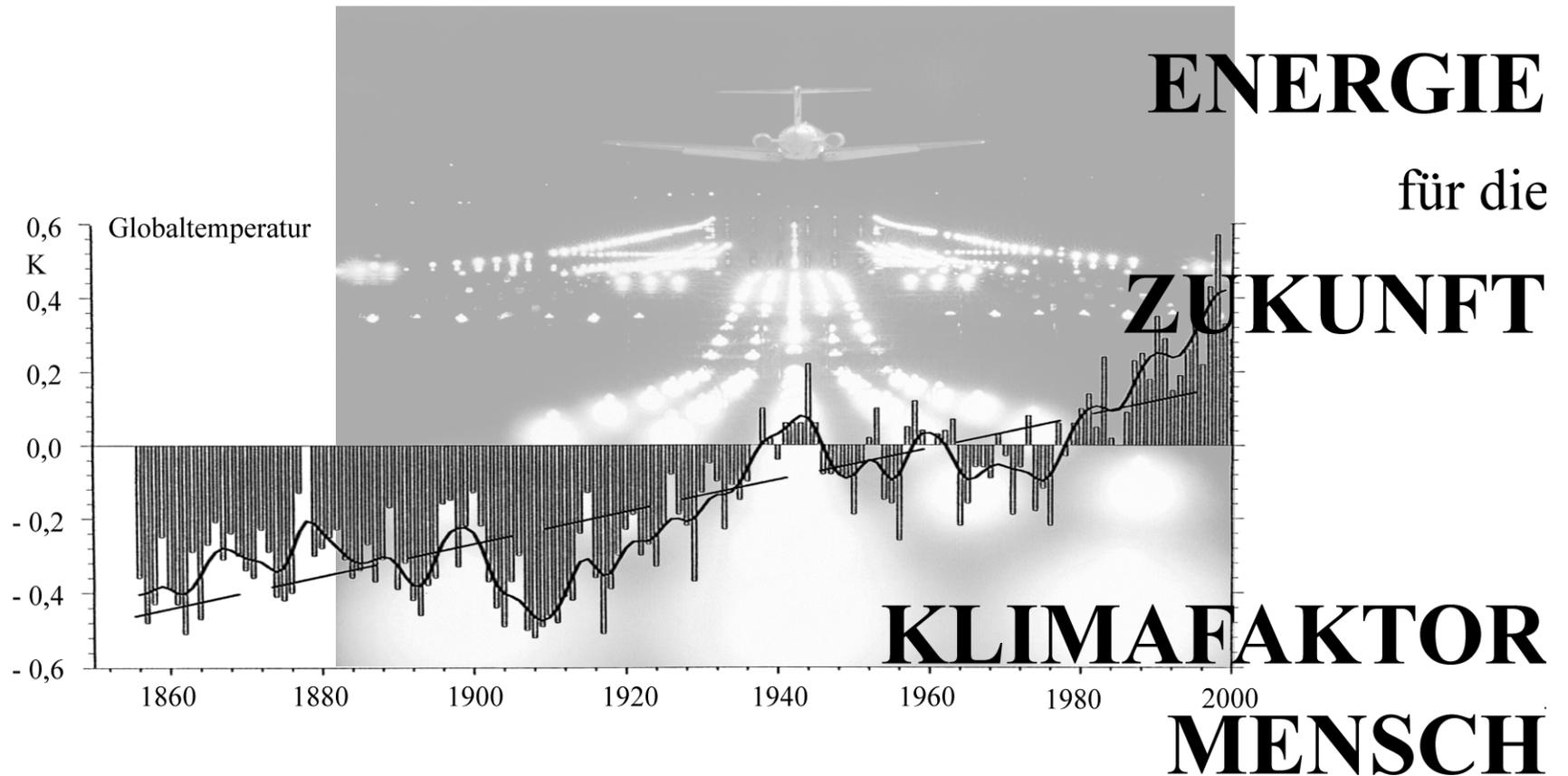


Deutsche Physikalische Gesellschaft – Arbeitskreis Energie



14 Vorträge der Hamburger Tagung (2001)

Herausgeber: W. Blum

Deutsche Physikalische Gesellschaft – Arbeitskreis Energie

ENERGIE
für die
ZUKUNFT

KLIMAFAKTOR
MENSCH

14 Vorträge der Hamburger Tagung (2001) Herausgeber: W. Blum

DPG Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Hauptstrasse 5, D-53604 Bad Honnef

Weitere Exemplare können bezogen werden von
<Walter.Blum@cern.ch>
oder über die Geschäftsstelle der DPG
<dpg@dpg-physik.de>

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	3	Thomas Hamacher	
Christian-D. Schönwiese Zum aktuellen Stand der Klimaproblematik: Nachweis des Klimafaktors Mensch in den Beobachtungsdaten und Modellabschätzungen	5	Was können wir aus der Entwicklung der Wassermühle im frühen Mittelalter über die Zukunft der Energieversorgung lernen?	175
Christoph Bals Die Klimaverhandlungen der Vereinten Nationen nach dem gescheiterten Klimagipfel von Den Haag	27	Karl Ehrlich Die Entwicklung von Strukturmaterialien für die Kernfusion	185
Harald Bradke Zukünftige Energiesysteme	41	Werner Späth Elektrisches Licht: Wegbereiter des Industrie- und Informationszeitalters	207
F.Barthel und P.Kehrer Welterdölvorräte und ihre Reichweite	53	Anschriften der Vortragenden und des Herausgebers	221
Jochen Fricke Energiebedarf und Energiebereitstellung: Forderungen und Beiträge aus der Wissenschaft, insbesondere zur Altbausanierung	69		
Rudolf Henne Brennstoffzellen: Funktion, Potenzial und Stand der Entwicklungen	79		
J. Ebner, G. Isenberg, R. Edinger Renewable Energies for Climate Benign Fuel Production: Powering Fuel Cell Vehicles	103		
Augustin J.McEvoy and Michael Grätzel Dye-sensitised Nanocrystalline Solar Cells	117		
Christoph Krupp Klimapolitik in Hamburg: Konzepte und Ergebnisse	137		
Eike Gelfort Statusbericht zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen	149		
Helmuth-Michael Groscurth Klimaschutz durch Emissionshandel	165		

VORWORT

Auf den Tagungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft tritt auch der Arbeitskreis Energie mit einer eigenen Vortragsreihe in Erscheinung. In dem vorliegenden Band sind 14 Hauptvorträge der Frühjahrstagung 2001 in Hamburg vereint.

Schon seit mehr als 15 Jahren, als die DPG zusammen mit der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zum ersten Mal öffentlich auf die Möglichkeit der Gefährdung des Klimas durch Kohlendioxid aufmerksam machte, hat sie die Fragen der Energie-Umwandlung und des Energieverbrauchs zum zentralen Thema gemacht und seither durch weitere Stellungnahmen der Öffentlichkeit zu Gehör gebracht. Hier ist insbesondere das Energiememorandum der DPG von 1995 zu nennen.

Die Vorträge des vorliegenden Bandes stehen in diesem Rahmen. Inzwischen ist die *Möglichkeit* der Gefährdung des Klimas zur wissenschaftlich erwiesenen *Gewissheit* geworden, wie in dem Artikel von Schönwiese nachzulesen ist. Die Industriegesellschaften stehen vor der unbezweifelbaren Aufgabe, das Verbrennen von Kohle, Öl und Erdgas drastisch einzuschränken. Neue Lösungen müssen gefunden werden.

Wir glauben, dass von den zahlreichen, physikalisch möglichen Lösungen keine von vornherein ausgeklammert werden darf. Alternative Energiegewinnung aus Sonne, Wind und anderen regenerierbaren Quellen ebenso wie Kernspaltungs-Energie und Kernfusion, aber auch die Verbesserung der industriellen Umwandlungsprozesse und der Isolationsverfahren – sie alle stehen auf der Agenda der DPG und besonders des Arbeitskreises Energie. Der Stand ihrer jeweiligen Entwicklung wird verfolgt und durch hervorragende Vertreter ihres Faches vorgestellt. – Einen Überblick über mögliche zukünftige Energiesysteme bietet der Artikel von Bradke.

Die grossen Automobilfirmen haben begonnen, mit Treibstoffen aus regenerierbaren Quellen zu experimentieren (Vortrag von Isenberg). Dies tun sie schon im Hinblick darauf, dass sich die Versorgungslage des Erdöls in wenigen Jahrzehnten verschlechtern wird, wie aus der genauen Analyse der Erdölvorräte der Welt von Barthel und Kehler hervorgeht. Besonders effektiv bei der Einsparung von CO₂ würden sich in Deutschland umfassende Modernisierungen im Althausbestand auswirken. Die Entwicklung von neuartigen, schaltbaren Elementen der Wärmedämmung ist hochinteressant (Artikel von Fricke).

Die zukünftigen Energietechniken werden nicht allein durch physikalische Umstände entschieden, sondern müssen auch politisch und am Markt durchgesetzt werden. In diesem Zusammenhang stehen diesmal die beiden Vorträge über Klimapolitik (zum einen ganz lokal und zum anderen ganz global) und der Vortrag über den sich bildenden Emissionshandel.

Die Hauptvorträge des Arbeitskreises erscheinen i.a. jährlich in der hier vorliegenden Form. Mit den Mitteln, die der AKE hat, können wir für diese Jahressbände nicht die Qualität des Buchdrucks erreichen. Manche Zeichnungen sind nicht so leicht zu lesen, wie es wünschenswert wäre – aber zu entziffern sind sie allemal, und es lohnt sich! Über die Jahre bilden diese Bände einen Überblick über die moderne Entwicklung verschiedenster Themen, die mit der Energie zusammenhängen.

Die eingeladenen Redner kommen meist von ausserhalb der DPG. Sie sind zum grössten Teil herausragende Fachleute ihres Gebietes. Für ihre Beiträge ist die DPG besonders dankbar.

Walter Blum (München und Genf)

**ZUM AKTUELLEN STAND DER KLIMAPROBLEMATIK:
NACHWEIS DES KLIMAFAKTORS MENSCH
IN DEN BEOBACHTUNGSDATEN UND MODELLABSCHÄTZUNGEN**

Christian-D. Schönwiese

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

1. Wissenschaftliche und öffentliche Relevanz der Klimaproblematik

Die Klimaproblematik lässt sich im wesentlichen durch zwei miteinander gekoppelte Problemkreise kennzeichnen:

a) Zum einen ist der Mensch (die Anthroposphäre) und mit ihm alles Leben auf unserem Planeten (die Biosphäre) offensichtlich von der Gunst des Klimas abhängig. Das betrifft nicht nur die Ökosysteme, sondern auch die wirtschaftlichen und sozialen Belange der Menschheit. b) Zum anderen nimmt der Mensch – in Konkurrenz zu den natürlichen Klimaänderungen – auch selbst mehr und mehr auf das Klima Einfluss, und dies keinesfalls immer zu seinem Vorteil.

Es kann uns daher nicht gleichgültig sein, was mit dem Klima der Erde geschehen ist und in Zukunft geschehen wird.

Angesichts dieser ebenso brisanten wie im einzelnen sehr komplizierten Problematik ist es nicht verwunderlich, dass neben der wissenschaftlichen Relevanz, die sich in intensiver weltweiter Klimaforschung und auch in den Statusberichten des IPCC (UN Intergovernmental Panel on Climate Change) niederschlägt, der Funke der Klimadebatte seit etwa zwei Jahrzehnten auch auf die Öffentlichkeit übersprungen ist. Leider gleitet dort die Diskussion aber nicht selten in die Extrempositionen „Klimakatastrophe“ auf der einen und „Klimairrtum“ oder gar „Klimaschwindel“ auf der anderen Seite ab. Mit solchen Extrempositionen werden wir jedoch weder den Erkenntnissen der klimatologischen Wissenschaft noch unserer Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen gerecht. Mancher mag die in Zukunft möglicherweise eintretenden, von uns verursachten Klimaänderungen durchaus als „Katastrophe“ empfinden; die aber ist eine subjektive Bewertung und kein exakter wissenschaftlicher Begriff, der zudem nicht den erheblichen Unsicherheiten solcher Vorhersagen Rechnung trägt. Andererseits gault uns der „Klima-Irrtum“ vor, wir hätten kein Problem, was zu fatalen Folgen für uns alle führen könnte („Schwindel“ ist sowieso eine böartige, völlig unangebrachte Unterstellung).

Vielmehr müssen wir uns ganz nüchtern und objektiv fragen: Welche Informationen haben wir über das Klima der Vergangenheit? Wie sieht das Bild der Klimaänderungen in Zeit und Raum aus, das sich daraus ergibt, und wie verlässlich ist es? Was sind die Ursachen der beobachteten Klimaänderungen; in welcher Relation stehen natürliche Ursachen und menschliche Beeinflussungen? Ist denn der Klimafaktor Mensch in den Klimabeobachtungsdaten schon

identifizierbar? Inwiefern kann die Klimamodellierung zur Klärung dieser Problematik beitragen und wie sehen die Zukunftsperspektiven aus? Schliesslich, welche Konsequenzen ziehen wir aus unseren Erkenntnissen?

Im folgenden wird nun versucht, aus aktueller Sicht (vgl. auch IPCC, Houghton et al., 2001; Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zu Klimaänderungen, DMG, 2001) auf diese Fragen in aller Kürze Antworten zu geben. Dabei liegt der Schwerpunkt der Betrachtung hier weniger auf der physikochemischen Klimamodellierung (vgl. dazu u.a. IPCC, 2001; Cubasch und Kasang, 2000), sondern auf den Beobachtungsindizes und ihrer Interpretation.

2. Klimaänderungen der Vergangenheit

Seit die Erde existiert, gibt es Klimaänderungen (Schwarzbach, 1974; Schönwiese, 1995; Lózan et al., 1998, 2001; u.v.a.), und das wird auch in Zukunft so bleiben. Allerdings ist nach dem Ende der letzten Kaltzeit („Eiszeit“), zwischen 11000 und 10000 Jahren vor heute, verbunden mit einem Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur um ungefähr 4 - 6 K, d.h. in der heutigen Warmzeit (Neo-Warmzeit = Holozän = Postglazial) ein bemerkenswert stabiler Klimazustand eingetreten, der langfristig und global gemittelt nur noch Fluktuationen um rund 1 K um den Mittelwert von 288 K (+ 15 °C) zugelassen hat, was die Entwicklung der Menschheit (neolithische Revolution, Entstehung der Hochkulturen) sicherlich sehr gefördert hat. Die überaus abrupten Klimaänderungen, zuletzt für die Zeit des genannten Kalt-/Warmzeitübergangs nachgewiesen (z.B. sog. Jüngere Dryaszeit mit einem Rückfall in Eiszeitbedingungen innerhalb weniger Jahrzehnte und ebenso rascher Beendigung dieser Episode) scheinen daher – vorerst - der weit zurückliegenden Vergangenheit anzugehören. Freilich dürfen auch die Auswirkungen zunächst relativ gering erscheinender Klimaänderungen nicht unterschätzt werden: Im Zuge der Erwärmung seit 1850 um „nur“ einige Zehntel Grad (genauer folgt) haben beispielsweise die Alpengletscher etwa die Hälfte ihres Volumens verloren (Häberli et al., 2001).

In der letzten Zeit sind schrittweise sehr genaue Rekonstruktionen der relativen Variationen der Jahresmittelwerte der nordhemisphärisch gemittelten Lufttemperatur zugänglich geworden, die auf einer Vielzahl indirekter Klimazeugen beruhen (u.a. Jahresringe der Bäume; Mann et al., 1999). Dabei zeigt die entsprechende 1000-jährige Zeitreihe, vgl. Abb. 1, dass sich die letzten ungefähr ca. 100 - 150 Jahre überaus markant von der vorangehenden Klimageschichte unterscheiden: Im Gegensatz zu den vorangehenden relativ geringen, überwiegend fluktuativen Variationen ist in zwei Schüben ein – klimatologisch gesehen – enormer Temperaturanstieg eingetreten, mit dem Jahr 1998 als dem bisher wärmsten des letzten Jahrtausends.

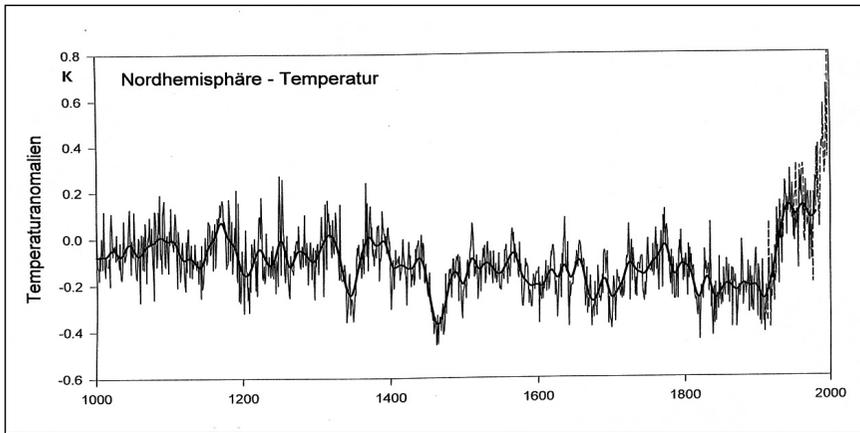


Abb. 1: Relative jährliche Variationen (Anomalien) der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den letzten rund 1000 Jahren (1000-1980; nach Mann et al., 1999), abgeschätzt aufgrund verschiedener indirekter Rekonstruktionstechniken, ausgezogen, zugehörige 30-jährige Glättung, dick ausgezogen, und Vergleich mit den entsprechenden, auf direkten Messungen beruhenden Daten 1856-1998 (IPCC, 2001; vgl. Abb. 2), gestrichelt.

Diese Erwärmung ist in Abb. 2, nunmehr in globaler Mittelung (einschliesslich Ozeanen; IPCC, Houghton et al., 2001, bzw. CRU, 2001) und beruhend auf der Analyse direkt gewonnener Messdaten, für die Zeit ab 1856 genauer zu sehen. Die Unschärfe der Abschätzung dieser Jahreswert-Anomalien, die für die Zeit vor 1000 Jahren bei etwa ± 0.4 K liegt, beträgt für diese jüngere Zeit nur noch ca. ± 0.05 K (IPCC, 2001). Man erkennt wiederum den bisherigen Rekordwert des Jahres 1998, zudem, dass sich für die Zeit 1856-2000 ein linearer Trend von 0.6 K errechnen lässt. Die zwei Schübe, in denen die hauptsächliche Erwärmung stattgefunden hat, lässt sich nun auf die Zeit ca. 1910 - 1945 und seit ca. 1975 festlegen (mit einem zeitlichen Gradienten von 0.3 K in den Jahren 1981 - 2000 bzw. 0.15 K pro Jahrzehnt, was eine ausserordentlich rasche Klimaänderung bedeutet).

Vergleicht man damit die mittlere Deutschland-Temperatur, die sich ebenfalls auf der Grundlage direkter Messdaten und bei ähnlicher Genauigkeit ab 1761 rekonstruieren lässt (Rapp, 2001), siehe Abb. 3, so ist bis etwa 1890 nur ein statistisch nicht signifikanter Abkühlungstrend erkennbar, aber danach eine noch stärkere Erwärmung als im globalen Mittel: +0.9 K in den Jahren 1890 - 1999. Das jüngste Jahr 2000 hat sozusagen noch einmal zugelegt und ist in diesem Fall das wärmste seit Messbeginn. Dies weist auf die räumlichen Unterschiede der Klimaänderungen hin: Der Korrelationskoeffizient der Jahresdaten 1891-1990 zwischen der global und für Deutschland gemittelten bodennahen Lufttemperatur beträgt lediglich 0.44. Auffällig ist auch die relativ grosse Variabilität der Deutschland-Daten, so dass sich der Trend seit 1890, obwohl er grösser als im globalen Mittel ist, weniger stark von dieser Variabilität (genauer: interannuären Varianz) abhebt; statistisch gesehen ist er somit auch weniger signifikant (nur > 85%) als im globalen Mittel (dort > 99%).

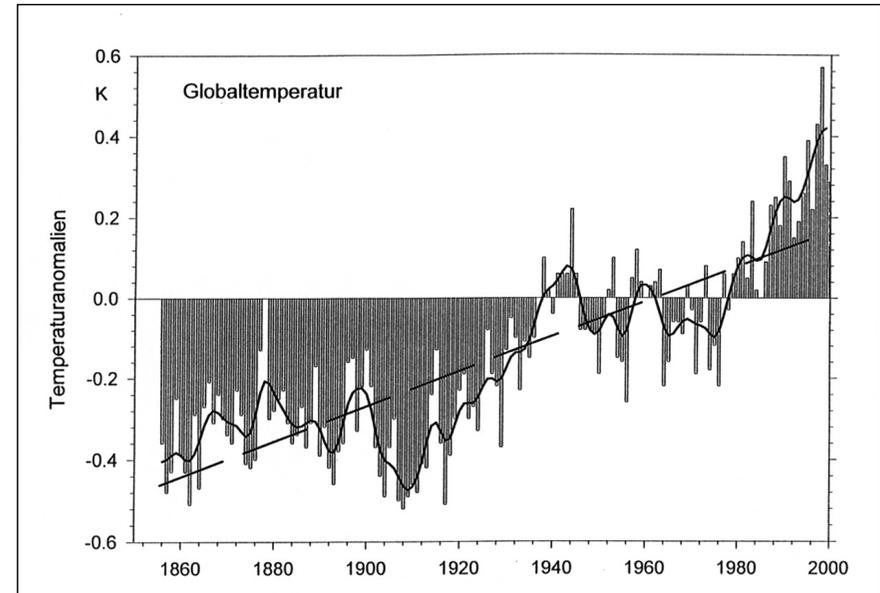


Abb. 2: Relative jährliche Variationen (Anomalien, Referenzintervall 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-2000 (Land- und Ozeangebiete; nach CRU bzw. IPCC, 2001), 10-jährige Glättung und linearer Trend. Insgesamt beträgt dieser Trend 0.6 K, für die Zeit 1901-2000 \rightarrow 0.7 K, für 1981-2000 \rightarrow 0.3 K (somit deutliche Trendverstärkung).

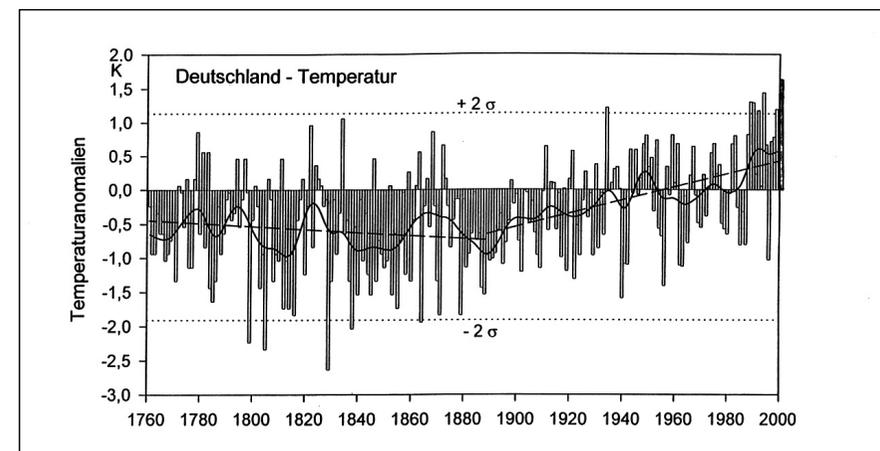


Abb. 3: Relative jährliche Variationen (Anomalien, Referenzintervall 1961-1990) der Deutschland-Mitteltemperatur 1761-2000 (nach Rapp, 2000, ergänzt), 20-jährige Glättung und lineare Trends 1761-1890 (- 0.2 K) bzw. 1891-2000 (+ 0.9 K; somit grösser als im globalen Mittel).

Konzentriert man sich auf die Analyse relativ langfristiger Trends, dies jedoch in regionaler und jahreszeitlicher Differenzierung, so ergeben sich je nach betrachteter Region sehr unterschiedliche Bilder. Global gesehen erscheinen 100-jährig (1891 - 1990) die Maxima der Erwärmung mit über 3 K im Winter der Regionen Grönland/Nordostkanada und Sibirien; im Sommer haben sich die Regionen Grönland, Sibirien und auch ein Teil des subtropischen Südpazifiks dagegen in der gleichen Zeitspanne leicht abgekühlt (Schönwiese et al., 1998). In Europa, wo die grosse Informationsdichte eine wesentliche genauere Analyse der Klimaänderungsstrukturen erlaubt, liegt das Maximum der Erwärmung mit ca. 2.5 K im Winter Osteuropas und der Abkühlung mit ca. 0.5 K im Südosten Europas (Schönwiese und Rapp, 1997; Schönwiese, 1999).

Die Klimaänderungen der Vergangenheit sind somit – selbst wenn man sich lediglich auf relativ langfristige Trends konzentriert – sehr kompliziert, und Abb. 4 vermittelt einen partiellen Eindruck davon. In diesem Beispiel sind für Europa die winterlichen Trends 1961-1990 für die bodennahe Lufttemperatur (T), den Niederschlag (N), den Luftdruck in Meeresspiegelhöhe (P) und den Luftdruck in ca. 5.5 km Höhe (500 hPa - Druckniveau; Φ) verglichen. Man erkennt, dass sich in dieser Zeit die Erwärmung mit Maximalwerten um 2 K auf die Breitenkreisezone ca. 45° - 60° Nord konzentriert hat, begleitet von Abkühlungen in einer Teilregion Nordskandinaviens (maximal ca. -0.5 K) und im äußersten Südosten (maximal ca. -1.5 K). In Nord-, West- und Mitteleuropa geht dies Hand in Hand mit einer winterlichen Niederschlagszunahme, die Werte bis zu 30 % (des Mittelwertes) erreicht (im einzelnen aber deutlich kompliziertere Struktur als bei den Temperaturtrends).

Noch auffälliger ist eine markante Niederschlagsabnahme, insbesondere im östlichen Mittelmeerraum sowie der Region Schwarzes Meer mit maximal über 50 %. Dieses Maximum ko- inzidiert - meteorologisch sinnvoll - mit dem Maximum der Zunahme des auf Meeresspiegelhöhe bezogenen Luftdrucks. Dieses Trendfeld (P) weist eine recht übersichtliche Struktur mit Abnahme im Norden und Zunahme im Süden auf. Im Vergleich mit den mittleren Gegebenheiten (Island-Tief im Norden, Azoren-Hoch im Süden; jeweils westlicher Grenzbereich) bedeutet dies eine Zunahme des meridionalen (Nord-Süd-) Luftdruckgradienten, was seinerseits zu einer Intensivierung der winterlichen Zonalzirkulation (westliche Strömungskomponente) führen muss. Dies ist, über die Advektion relativ milder und feuchter Luftmassen aus dem atlantischen Raum, mit der Wintermilderung und der Niederschlagszunahme in West- und Mitteleuropa konsistent. Die Höhenkarte (Φ), d.h. die Betrachtung der Luftdrucktrends in rund 5.5 km Höhe, was als Groborientierung der mittleren troposphärischen Zirkulation angesehen wird (die Troposphäre umfasst, grob gesehen, die unteren rund 10 km der Atmosphäre), zeigt, dass diese Zirkulationsumstellung nicht nur die bodennahe Atmosphäre erfasst hat. Daraus könnte u.a. auch auf eine Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit und eventuell auch der Sturmhäufigkeit geschlossen werden. Die Analyse der betreffenden Beobachtungsdaten unterstützt diese These jedoch nicht bzw. nicht eindeutig, da die Ergebnisse wenig signifikant, zum Teil sogar widersprüchlich sind.

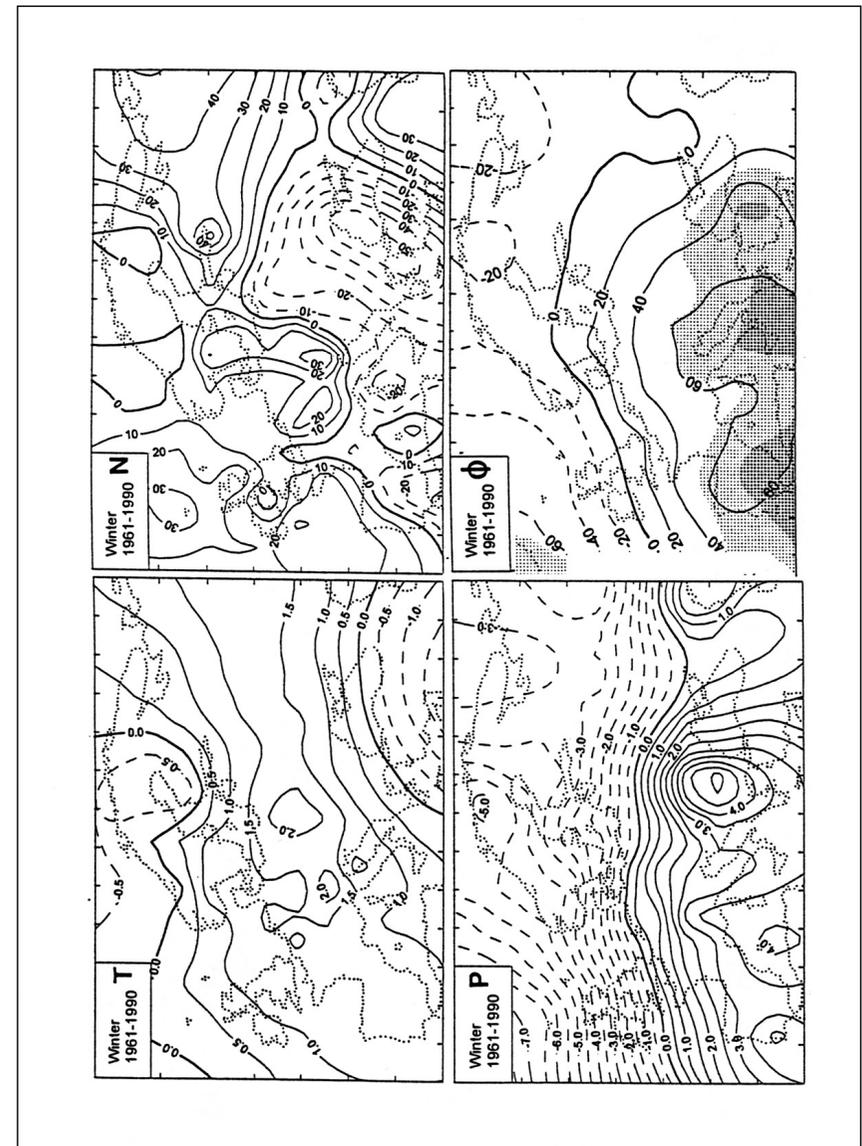


Abb. 4: Lineare Trends 1961-1990 der Winterdaten (Dezember bis einschliesslich Februar) der bodennahen Lufttemperatur (T) in K, des Niederschlages (N) in Prozent, des auf Meeresspiegelhöhe reduzierten Luftdrucks (P) in hPa und der geopotentiellen Höhe (Φ) des 500 hPa - Luftdruckniveaus (ca. 5.5 km) in gpm, Europa, Interpolation (Kriging) auf einem 3° mal 3° - Gitter geographischer Länge und Breite; gestrichelte Isolinien markieren negative Werte (nach Schönwiese und Rapp, 1997).

Information	A 1960-1969	B 1970-1979	C 1980-1989	D 1990-1999	Faktor D:A
Anzahl	27	47	63	87	3,2
Volkswirt. Schäden	71,1	127,8	198,6	608,5	8,6
Versicherte Schäden	6,8	11,7	24,7	109,3	16,1

Ergänzung: Ereignisklassen 1960-1997

Ereignisklasse	a	b
Erdbeben	9 %	2 %
Stürme	37 %	61 %
Überschwemmungen	46 %	36 %
Sonstiges	8 %	1 %

a = volkswirtschaftliche Schäden

b = versicherte Schäden

(Alle Schadensangaben inflationsbereinigt in Werten von 1999)

Tab. 1: Grosse Naturkatastrophen 1960 - 1999 und ihre Schäden in Mrd. US \$ (nach Münchener Rückversicherung, 2000).

Sogar bei weltweiter Betrachtung sind laut IPCC (Houghton et al., 2001) keine klaren Trends bei Wind bzw. Stürmen feststellbar. Andererseits ist die Versicherungswirtschaft mit einer enormen Steigerung des Schadensausmasses durch Stürme, Überschwemmungen und anderen „Naturkatastrophen“ konfrontiert, vgl. Tab. 1. Interessanterweise machen dabei Erdbeben nur einen relativ geringen Teil aus; die weitaus meisten dieser „Katastrophen“ sind also klimabedingt. Bei der Interpretation ist allerdings zu beachten, dass insbesondere bei der Zunahme der versicherten Schäden auch die zunehmende Bebauung gefährdeter Gebiete zur Schadenexplosion beigetragen hat. Doch schon die Zunahme der volkswirtschaftlichen Schäden bzw. – ohne Schadensbetrachtung – der Anzahl solcher Ereignisse allein – ist sehr bemerkenswert.

In bestimmten Teilregionen, die eine besonders grosse Informationsdichte (Anzahl der Messstationen) aufweisen, wie beispielsweise in Deutschland, lassen sich die Klimaänderungsstrukturen noch wesentlich genauer angeben. Als Beispiel zeigt Abb. 5 die Trends des Winterniederschlags 1961 - 1990 bzw. 1891 - 1990 in Deutschland (Rapp und Schönwiese, 1996). In den westlichen, insbesondere südwestlichen Landesteilen und im äußersten Osten sind dabei Trends von bis zu ca. 40 % Niederschlagszunahme feststellbar (mit etwas übersichtlicheren Ergebnissen bei der 100-jährigen Zeitspanne), die sicherlich mit den ebenfalls beobachteten Hochwasserhäufungen in Verbindung stehen. Weltweit (IPCC, Houghton et al., 2001) wie in Europa bzw. Deutschland (Grieser et al., 2000) besteht der dringende Verdacht, dass solche Niederschlagszunahmen mit einer Zunahme entsprechender Extremereignisse Hand in Hand geht. Jedoch bedarf gerade dieser Aspekt noch eingehenderer weiterer Forschung, wobei beim Niederschlag weitaus grössere Probleme der Messgenauigkeit und räumlichen Repräsentanz bestehen als bei der Temperatur oder beim Luftdruck.

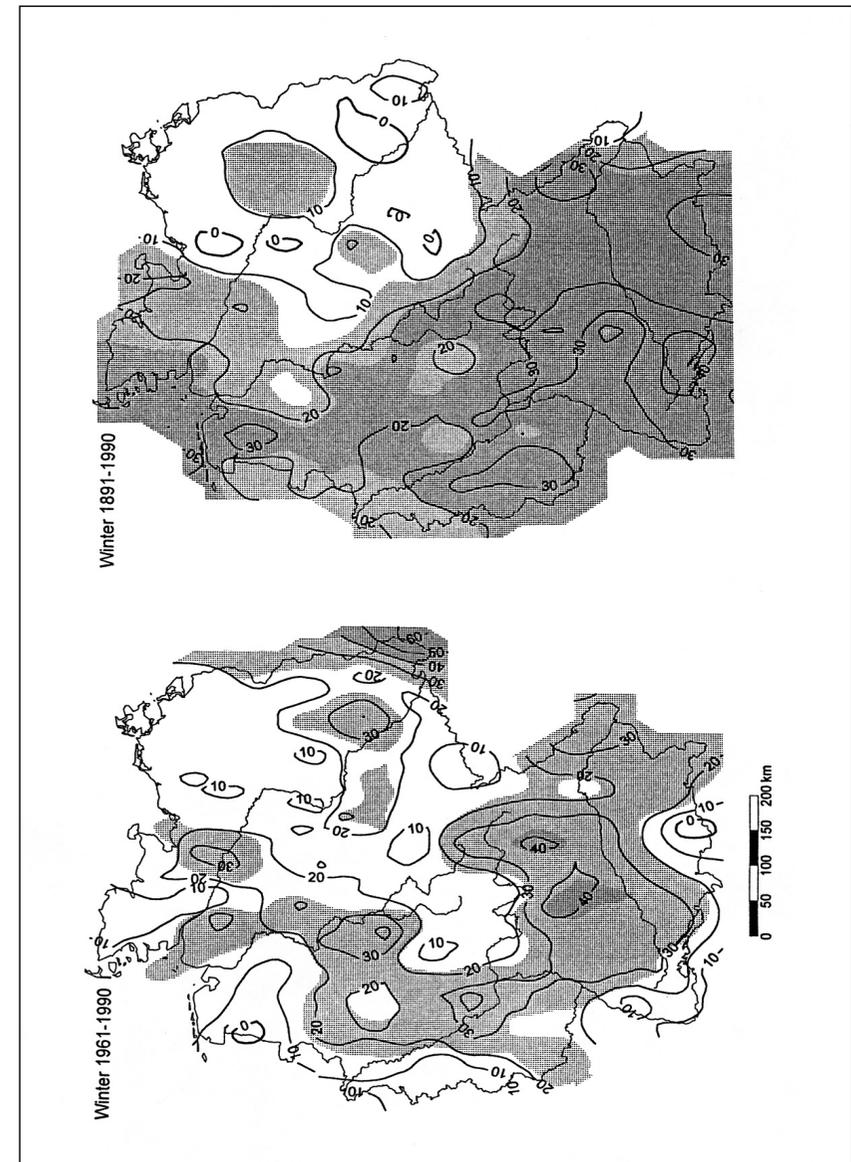


Abb. 5: Feinanalyse ($0,25^\circ$ mal $0,25^\circ$ - Gitter, Kriging) der winterlichen Niederschlagstrends in Prozent, links 1961-1990, rechts 1891-1990, Deutschland, wobei die Rasterung die Signifikanz angibt (hell > 70%, dunkel > 85%, gemäss Mann-Kendall-Trendtest) (nach Rapp und Schönwiese, 1996).

3. Ursachen der Klimaänderungen

Noch wesentlich komplizierter als das Erscheinungsbild der Klimaänderungen ist ihre Verursachung; denn es wirken stets verschiedene Faktoren zusammen, natürliche wie anthropogene, und die Reaktion des Klimasystems – nämlich Atmosphäre / Ozean / Kryosphäre (d.h. Eisgebiete) / Landoberfläche (Pedo-/Lithosphäre, d.h. Boden und Gesteine) / Biosphäre – beinhaltet teils verstandene, teils zumindest quantitativ unverstandene Rückkopplungen, die aus „kleinen“ Ursachen „grosse“ Wirkungen machen können. Als Zielgrößen werden dabei üblicherweise bestimmte atmosphärische Messgrößen, die sog. Klimatelemente, betrachtet, wie sie zum Teil in Abb. 4 in ihrem Trendverhalten diskutiert worden sind.

Dieses System kann im Prinzip aus zwei Gründen „gestört“ werden:

- Es treten im Subsystem Atmosphäre/Erdoberfläche Änderungen der Energetik auf, wobei vor allem die Sonneneinstrahlung und die in einem relativ dazu langwelligeren Bereich des elektromagnetischen Spektrums wirksame Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche bzw. Atmosphäre im Blickpunkt stehen. Es handelt sich dabei stets um Änderungen der Extinktion (Absorption bzw. Streuung bzw. beides) des solaren bzw. terrestrischen Strahlungsflusses durch die Atmosphäre (vgl. Lehrbücher der Klimatologie, z.B. Roedel, 1992; Schönwiese, 1994). In solchen Fällen werden die Störungen in Form von Strahlungsantrieben quantifiziert, die eine Erhöhung (positiver Antrieb) oder Erniedrigung (negativer) Antrieb) der troposphärischen Energiebilanz und somit von deren Temperatur zur Folge haben. Bei global integrierender Betrachtung besteht eine Relation zur Reaktion der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur, die sich demgemäss auch in Energiebilanzmodellen, der einfachsten Form von Klimamodellen (in diesem Fall offenbar nulldimensional), simulieren lässt.
- Es treten Veränderungen der atmosphärischen bzw. ozeanischen Zirkulation auf, die – falls sie nicht extern (z.B. durch die oben genannten Strahlungsantriebe) veranlaßt bzw. zusätzlich beeinflusst werden – häufig einen oszillatorischen Charakter haben und daher meist als eine Art Eigenschwingung des Klimasystems aufgefasst werden. Ob dies allerdings immer der Realität entspricht, ist eine offene Frage.

Bei Beschränkung auf Zeitskalen von einigen Jahren bis etwa 100 Jahre (interannuär, interdekadisch und säkular) und grossräumiger, mehr oder minder globalen Auswirkungen sind der explosive Vulkanismus und die Sonnenaktivität die wichtigsten Klimafaktoren der erstgenannten Art, die daher als extern bezeichnet werden. Der explosive Vulkanismus schleudert Gase und Partikel bis in die Stratosphäre (d.h. bis oberhalb, grob gesehen, ca. 10 km Höhe), in extremen Fällen sogar bis in die Mesosphäre (oberhalb ca. 50 km Höhe, z.B. Ausbruch des Tambora auf Indonesien, 1815). Wichtig sind dabei vor allem die Sulfat-Partikel (SO_4^-), die durch Gas-Partikelumwandlungen allmählich (d.h. im Laufe einiger Monate) aus den schwefelhaltigen Gasen der vulkanischen Exhalationen entstehen und einen Teil der Sonneneinstrahlung streuen sowie absorbieren. Die Absorption erwärmt die Stratosphäre (bzw. Meso-

sphäre), die durch die gesamte Extinktion verringerte Transmission in die untere Atmosphäre führt dort zu Abkühlungseffekten. Der troposphärische (direkte und global gemittelte) Strahlungsantrieb ist somit negativ.

Gemäss der typischen Verweilzeit dieses vulkanischen Schwefelaerosols (in der Stratosphäre ungefähr 1 - 3 Jahre) sind diese thermischen Effekte auf Episoden von wenigen Jahren beschränkt, mit der stärksten Wirkung i.a. ein Jahr nach dem betreffenden Vulkanausbruch. Bei Serien solcher explosiver Vulkanausbrüche bzw. deren längeren Ausbleiben sind aber auch längerfristige Wirkungen möglich. Jährliche Indexwerte, welche die Intensität des explosiven Vulkanismus quantifizieren, sind von verschiedenen Autoren vorgeschlagen worden (z.B. Lamb, 1970, Schönwiese, 1988; Cress und Schönwiese, 1992; Grieser und Schönwiese, 1999) bzw. aus Eisbohrdaten indirekt ersichtlich (siehe z.B. Hammer et al., 1980). Der effusive Vulkanismus, der hauptsächlich Lavaströme erzeugt, ist dagegen kaum klimarelevant.

Die Sonnenaktivität wird, seit der Erfindung des Fernrohrs, anhand der auf der sichtbaren Sonnenoberfläche (Photosphäre) auftretenden sog. Sonnenflecken quantifiziert, i.a. durch die Sonnenflecken-Relativzahlen (Keppler, 1990). Diese Flecken, die relativ dunkel und somit relativ kalt sind, werden durch bestimmte Begleiterscheinungen, insbesondere die Sonnenfackeln, überkompensiert, so dass die „aktive Sonne“, bei relativ hoher Sonnenfleckenzahl, etwas stärker ausstrahlt als die „ruhige Sonne“. Der Strahlungsantrieb ist somit positiv. Verschiedene Autoren haben versucht, dies anhand gemessener bzw. in die Vergangenheit zurück rekonstruierter Daten der „Solarkonstanten“ (Einstrahlung der Sonne an fiktiven äußeren Rand der Erdatmosphäre, somit eine „Inkonstante“) zu quantifizieren (z.B. Lean et al., 1995). Auf eher spekulative Hypothesen (z.B. Modifizierung der Bewölkung durch solare Aktivität; Sonnendurchmesseroszillationen) soll hier nicht eingegangen werden (vgl. jedoch z.B. Schönwiese et al., 1994).

Ein sehr prominentes Beispiel interner Zirkulationsveränderungen, denen somit kein Strahlungsantrieb zugeordnet werden kann, ist das El-Niño-Phänomen (EN). Es äußert sich in episodischen (Zykluslänge ca. 3 - 8 Jahre) Erwärmungen der tropischen Ozeane, besonders markant im Bereich des tropischen Pazifiks vor der Küste von Peru, kommt durch (dreidimensionale) Zirkulationsanomalien des tropischen Ozeans zustande und ist seitens der Atmosphäre mit der sog. Südlichen Oszillation (SO), einer Art Luftdruckschwingung der tropisch/subtropischen Südhemisphäre, eng korreliert (Details siehe z.B. Arntz und Fahrbach, 1991). Daher spricht man zusammenfassend vom ENSO-Mechanismus. Ein anderes, rein atmosphärisches Beispiel ist die Nordatlantik-Oszillation (NAO), die als die meridionale Luftdruckdifferenz zwischen dem Azoren-Hoch und Island-Tief definiert und – wie bereits angedeutet – für die Intensität der Zonalströmung in diesem Raum und in Europa von Bedeutung ist. Obwohl die NAO einen vorherrschenden Zyklus von ca. 7- 8 Jahren aufweist, ist ihr Variationsverhalten wesentlich komplizierter und vielfältiger als das des ENSO-Mechanismus (IPCC, Houghton et al., 2001).

Der Klimafaktor Mensch ist vor diesem Hintergrund als zusätzliche (anthropogene) Einflussgröße aufzufassen. Eigentlich hat er die Bühne des Geschehens schon vor Jahrtausenden betreten, als er im Rahmen der neolithischen Revolution allmählich Natur- in Kulturlandschaften umwandelte, insbesondere durch Waldrodungen und Anlage von landwirtschaftlichen Nutzflächen. Ein anderes, jüngerer aber ebenfalls regionales Beispiel ist das „Stadtklima“, das sich vor allem durch die sog. Wärmeinsel, aber auch durch andere Effekte vom Klima des Umlands unterscheidet und besonders gut untersucht ist (vgl. z.B. Fezer, 1995; Kuttler, 2000). Durch solche Eingriffe werden die Strahlungseigenschaften (insbesondere Albedo) der Erdoberfläche und die Stoff-Flüsse Erdoberfläche-Atmosphäre verändert, was beides klimarelevante Vorgänge sind.

Ein weiterer, in verschiedenen Regionen der Erde fast gleichzeitig und relativ rasch in Gang gekommener anthropogener Einfluss besteht in der Emission von Schwefeldioxid (SO₂) in die Troposphäre, das sich dort – ähnlich dem vulkanogenen stratosphärischen Sulfataerosol – in Sulfatpartikel umwandelt. Eine mögliche Klimarelevanz dieses und anderen troposphärischen Aerosols wird schon lange diskutiert; aber erst in den letzten Jahren ist eine gewisse Klarheit hinsichtlich des (direkten) Strahlungsantriebes gewonnen worden, so dass die entsprechenden Effekte mit Hilfe aufwendiger Klimamodelle recht plausibel simuliert werden können.

Der bekannteste und – unter globalen Aspekten – sicherlich bedeutsamste Eingriff des Menschen in den atmosphärischen Strahlungshaushalt und somit das Klima ist der anthropogene „Treibhauseffekt“, der zusätzlich zum natürlichen auftritt und diesen daher verstärkt (zum physikalischen Hintergrund siehe Lehrbücher der Klimatologie, zum Teil auch der Physik, z.B. Roedel, 1992; Hantel, 1997; Peixoto und Oort, 1992; Schönwiese, 1994). Er kommt dadurch zustande, dass durch diverse menschliche Aktivitäten unter anderem Kohlendioxid (CO₂) vermehrt in die Atmosphäre emittiert wird. Aus Tab. 2 ist zu entnehmen, dass dies in der letzten Dekade (genauer 1990-1997) rund 30 Gt CO₂ (entsprechend rund 8 Gt C) pro Jahr waren, wovon etwa 23 Gt CO₂ (6.3 Gt C), also rund 75 %, auf die Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Gas; einschliesslich der Umwandlungsprozesse z.B. im Verkehrsbereich) zurückgeht. Dieser Betrag ist im Laufe des Industriezeitalters ständig angestiegen. Im Jahr 1900, beispielsweise, waren es - bei um einen Faktor 12-14 geringerer globaler Primärenergieumsetzung – anstelle von heute 6.3 erst 0.5 Gt C pro Jahr.

Auf eine nähere Betrachtung des Kohlenstoff-Kreislaufs muss hier verzichtet werden (vgl. dazu z.B. Heimann, 2000; IPCC, 2001). Es sei aber erwähnt, dass die Hauptsenke, die aus der gesamten zusätzlichen anthropogenen CO₂-Emission von rund 8 Gt C pro Jahr resultiert, mit schätzungsweise 2,4 Gt C pro Jahr der Ozean ist. Knapp 0,5 Gt C pro Jahr werden durch Verwitterungsprozesse gebunden und rund 3 Gt C pro Jahr verbleiben in der Atmosphäre. Der Rest von etwas mehr als 2 Gt C pro Jahr wird biologischen Senken zugeschrieben (z.B. dem zunehmenden Holzzuwachs in den Wäldern mittlerer geographischer Breiten aufgrund höhe-

rer Temperatur, höherer atmosphärischer CO₂-Konzentration und Nitratreintrag in den Boden). Gerade die biologischen Quellen und Senken sind aber quantitativ sehr unsicher.

Klar durch Messungen bzw. Rekonstruktionen belegt ist jedoch der daraus resultierende und somit anthropogene Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration, ausgehend von rund 280 ppm (ppmv) noch um 1800, auf derzeit (Jahr 2000) rund 370 ppm. Es gilt mittlerweile als wahrscheinlich (IPCC, 2001), dass ein so hoher Wert für die vergangenen 20 Jahrtausenden einmalig ist. Im Holozän, also nach Ende der letzten „Eiszeit“ (wo die CO₂-Konzentration mit etwa 180-200 ppm wesentlich niedriger lag) sind wahrscheinlich nur Fluktuationen um höchstens +/- 10 ppm aufgetreten, wie das Abb. 6 für die Zeit seit ca. 1100 Jahren zeigt. Tab. 2 enthält auch eine Übersicht der wichtigsten weiteren klimawirksamen Spurengase hinsichtlich anthropogener Emission (mit Aufschlüsselung nach den verschiedenen menschlichen Aktivitäten), atmosphärischem Konzentrationsanstieg im Industriezeitalter sowie den die Beiträge dieser Gase zum natürlichen bzw. anthropogenen Treibhauseffekt.

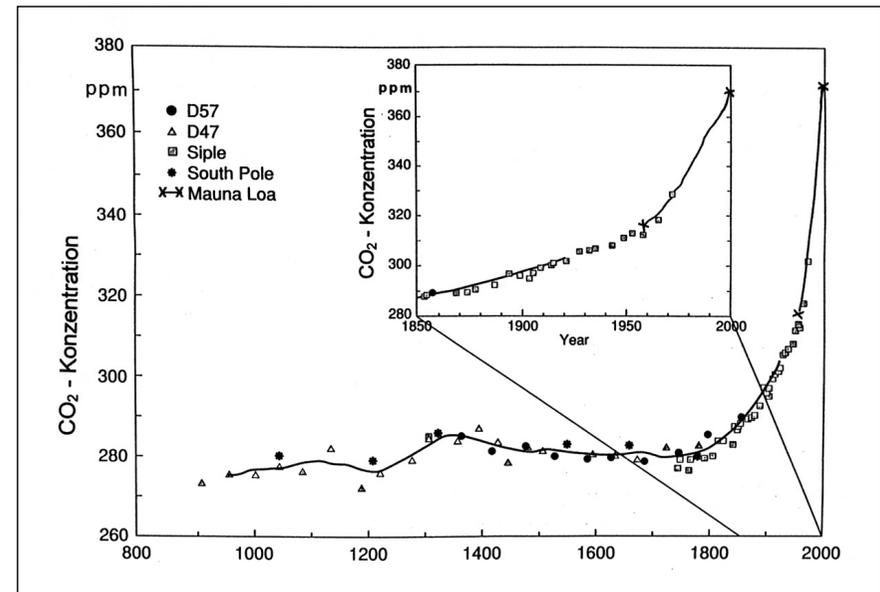


Abb. 6: Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxid (CO₂)-Konzentration für die letzten rund 1100 Jahre nach Eisbohrungen in der Antarktis (verschiedene Symbole, welche die Messstationen kennzeichnen), 100-jährige Glättung (ausgezogene Kurve) und direkte jährliche Messdaten vom Mauna Loa, Hawaii, 1958-2000 (mit x markierte ausgezogene Kurve; Zusammenstellung nach IPCC, 1996, 2001).

Spurengas, Symbol	Anthropogene Emissionen	Atmosphärische Konzentrationen	Treibh. natürlich	Treibh. anthrop.
Kohlendioxid, CO ₂	30 Gt a-1	370 (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 ₂ O	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 ₂ O**	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

Tab. 2: Anthropogene Emissionen (pro Jahr, Bezug 1999), atmosphärische Konzentrationen (Bezug 2000, vorindustrielle Werte, ca. 1800, in Klammern) und relative Beiträge zum natürlichen bzw. anthropogenen (Zeithorizont 100 Jahre) "Treibhauseffekt" der wichtigsten klimawirksamen Spurengase (FCKW = Fluorchlorkohlenwasserstoffe, F12 = CF₂Cl₂) (nach IPCC, Houghton et al., 1996, 2001, ergänzt).

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% Tierexkrememente
FCKW: Treibgase in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung
N ₂ O: 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)

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

Klimafaktor	Antrieb (Wm-2)	Signal (°C)	Signalstruktur
Treibhausgase *, TR	+ 2,1 - 2,8	0,7 - 1,3	progressiverTrend
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
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

Tab. 3: Strahlungsantriebe (+ Erwärmung, - Abkühlung), vorindustriell (ca. 1850) bis heute (nach IPCC, Houghton et al., 2001), und zugehörige mit Hilfe neuronaler Netze geschätzte Effekte ("Signale") der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur für die angegebenen anthropogenen und natürlichen Klimafaktoren (nach Walter et al., 1998; Schönwiese, 1999).

Den Schlüssel zur Klimawirksamkeit dieser – anthropogenen wie natürlichen – Vorgänge liefern, wie schon erwähnt, die Strahlungsantriebe. Sie sind nach den derzeitigen Erkenntnissen (IPCC, Houghton et al., 2001) in Tab. 3 zusammengestellt. Man erkennt, dass der höchste Wert in Zusammenhang mit dem Vulkanismus auftritt, wobei aber zu beachten ist, dass dieser Antrieb stets nur nach grösseren Vulkanausbrüchen und nur jeweils nur für wenige Jahre wirksam ist. Der fast gleich grosse Strahlungsantrieb durch den anthropogenen Treibhauseffekt wirkt dagegen rezent-langzeitlich (Industriezeitalter) in Form eines progressiven Trends, wie das auch Abb. 6 impliziert. Der drittgrösste Beitrag, in Form eines uneinheitlichen Trends (d.h. wirksam vor allem in der Zeit zwischen 1945, dem Ende des 2. Weltkriegs, bis ca. 1970/75, als in einigen Industrieländern wirksame Massnahmen zur Luftreinhaltung durchgeführt wurden), kommt vom anthropogenen troposphärischen Sulfataerosol. Alles andere, insbesondere auch die Sonnenaktivität, spielt dagegen lediglich eine sehr untergeordnete Rolle.

4. Modellabschätzungen und Detektion des Klimafaktors Mensch

Im weiteren ist jedoch zu beachten, dass diese Strahlungsantriebe jeweils nur deren direkten Anteil enthalten, also keine Rückkopplungen berücksichtigen, und ausserdem global gemittelt sind. Gerade beim Aerosol aber werden erhebliche indirekte Effekte, beispielsweise durch wolkenphysikalische Veränderungen (optische Eigenschaften usw.) vermutet, die sich aber noch nicht genau quantifizieren lassen. Neben den Wolken insgesamt bzw. dem gesamten hydrologischen Zyklus und dem Meereis gelten auch die Rückkopplungen mit der Vegetation und dem Boden als noch sehr unsicher. Dagegen werden die Wasserdampf-Rückkopplung (insbesondere durch erhöhte Verdunstung des Weltozeans bei Temperaturanstieg) und die Eis-Albedo-Rückkopplung (Veränderung der Landflächenbedeckung mit Schnee bzw. Eis und entsprechender Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Erdoberfläche) recht gut verstanden.

Es ist nun sehr naheliegend und auch oft versucht worden, mit möglichst aufwendigen physikalischen Modellen, bei möglichst guter räumlicher und zeitlicher Auflösung und unter Berücksichtigung möglichst aller Rückkopplungen, zu simulieren, wie das globale Klimasystem beispielsweise auf die zunehmende anthropogene Emission klimawirksamer Spurengase reagiert (IPCC, Houghton et al., 2001). Dabei treten eine Reihe von Problemen und Einschränkungen auf, die hier nicht näher diskutiert werden können.

Erwähnt sei aber, dass selbst bei Beschränkung auf gekoppelte atmosphärisch-ozeanische Zirkulationsmodelle (AO-GCM, general circulation models), das heute übliche Werkzeug solcher Betrachtungen, räumlicher Auflösung von ca. 200 - 500 km Gitterpunktweite und Gleichgewichtssimulation der Reaktion der bodennahen Lufttemperatur auf eine atmosphärische CO₂-Konzentrationsverdoppelung gegenüber dem vorindustriellen Niveau die Feldkorrelationen (d.h. Betrachtung der bodennahen Temperaturänderungsstrukturen) der verschiedenen Modellrechnungen trotz gleichem Simulationsziel ziemlich bescheiden sind; beispiels-

weise liegt die gemeinsame Varianz bei einem Vergleich des am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg betriebenen Modells (ECHAM-LSG) mit dem des Hadley Center (Bracknell, England) bei lediglich 32 % (Hegerl et al., 1996). Selbst bei globaler Mittelung der bodennahen Temperatur liegt laut IPCC (2001) die Unsicherheitsspanne bei 2.2 - 4.8 K. Geht man zu transienter, d.h. zeitabhängiger Modellierung über, so wird diese Spanne noch grösser: 1.4 - 5.8 K Temperaturerhöhung bis zum Jahr 2100 gegenüber 1990. Trotz dieser Unsicherheiten würde dies – das darf dabei nicht übersehen werden – im Vergleich mit den Temperaturänderungen der Vergangenheit (s. Abb. 1) – eine enorme Klimaänderung bedeuten.

Wegen dieser Unsicherheiten ist es wichtig, nach Alternativen zu suchen, insbesondere nach Strategien, die den anthropogenen Einfluss auf das Klima anhand der vorliegenden Beobachtungsdaten, die ja die Realität widerspiegeln, abschätzen (was sich natürlich zunächst nur auf die Vergangenheit und nicht die Zukunft beziehen kann). Zwei Versionen solcher empirisch-statistischer Analysen sollen nun betrachtet werden: Sukzessive multiple Regressionen und neuronale Netze. Der gravierende Nachteil solcher Methoden ist natürlich, dass sie die Physik umgehen und letztlich nur auf Ähnlichkeitsanalysen beruhen. Ihr Vorteil ist, ausser der strikten Orientierung an den beobachteten Fakten, dass die wesentlich kürzeren Rechenzeiten die simultane Berücksichtigung mehrerer, anthropogener wie natürlicher, Einflüsse auf das Klimasystem erlauben. Im folgenden sind das die klimawirksamen Spurengase (in Form von äquivalenten CO₂-Konzentrationen, die somit auch weitere Spurengase berücksichtigen), d.h. der zusätzliche anthropogene „Treibhauseffekt“, die ebenfalls anthropogene Wirkung des troposphärischen Sulfataerosols, sowie – als natürliche Einflussfaktoren – der explosive Vulkanismus (in der Parametrisierung nach Grieser und Schönwiese, 2000), die Sonnenaktivität (alternativ Sonnenflecken-Relativzahlen bzw. die Rekonstruktion der Variation der „Solar-konstanten“ nach Lean et al., 1995) und der ENSO-Mechanismus (vgl. Tab. 3; bei Betrachtung der Klimavariationen in Europa auch die NAO).

Zunächst zu den neuronalen Netzen (auch auf diese Technik kann hier nicht näher eingegangen werden, Details siehe z.B. Brause, 1995; Walter et al., 1998; Walter, 2001). Kurz zusammengefasst handelt es sich dabei um eine nicht-lineare multiple Anpassung von Einflussdaten-Zeitreihen (hier CO₂-Äquivalente usw.; neuronale Eingabeschicht) an Klimabeobachtungsdaten-Zeitreihen (hier bodennahe Lufttemperatur, global gemittelt, aber auch regional-jahreszeitlich differenziert; neuronale Ausgabeschicht), die zunächst in einer Art Training (überwachtes Lernen) mittels der sog. verdeckten Neuronenschicht, welche die Brücke zwischen Ein- und Ausgabeschicht bildet, durchgeführt und bei der Backpropagation-Architektur nach einer Kontrolle zuvor nicht verwendeter Daten mittels eines Fehlerkorrektur-Rückflusses in die verarbeitende Schicht optimiert wird. Dabei treten einige freie Parameter auf (Lernparameter sowie Anzahl der Neuronen in der verdeckten Schicht), deren Behandlung nicht ganz unproblematisch ist. Daher ist es sinnvoll, verschiedene Architekturen neuronaler Netze alternativ zu verwenden.

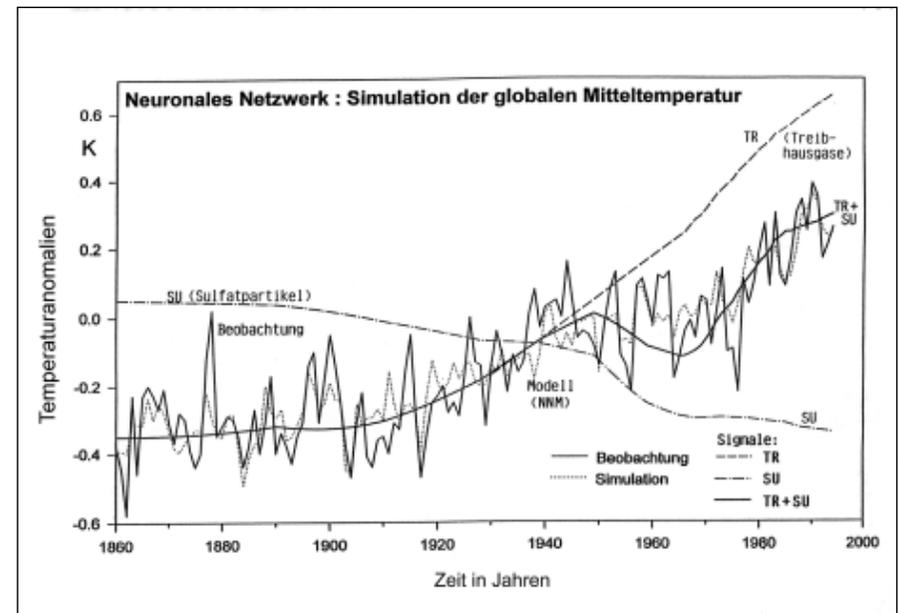


Abb. 7: (—) Jahresanomalien der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-1998 (vgl. Abb. 2), (·····) Reproduktion durch ein neuronales Netz (Backpropagation), das gemäss Tab. 3 den anthropogenen Treibhaus- (TR) sowie Sulfateffekt (SU) und weiterhin die natürlichen Faktoren Vulkanismus, Sonnenaktivität und El Niño enthält, (---) zugehörige TR-, SU- und (TR+SU) -Signalzeitreihen, welche die Entwicklung des anthropogenen Anteils dieser Klimaänderungen angeben (jeweils nach Walter, 2001; vgl. auch Walter et al., 1998).

Abb. 7 zeigt, nun, dass z.B. ein Backpropagation-Netzwerk in der Lage ist, unter Nutzung der oben genannten Einflussfaktoren 84 % der beobachteten global gemittelten bodennahen Temperaturvarianz 1856 - 1998 zu reproduzieren. Mit Hilfe der gleichen Technik lässt sich auch das anthropogene Treibhaus-signal, d.h. der Anteil der Temperaturänderungen, die aufgrund dieser Analyse-methode auf den Anstieg der atmosphärischen äquivalenten CO₂-Konzentration zurückgeführt werden kann, liegt bei 1.1 K, abzüglich des Sulfataerosoleffekts bei 0.8 K (Walter et al., 2001; vgl. auch Walter et al., 1998). Zum Vergleich: Ein simples fast-lineares Regressionsmodell (genauer: logarithmische CO₂-Temperaturbeziehung, ansonsten linear) bringt es bei Anwendung auf die gleichen Datensätze auf 75 % erklärte Varianz und ein anthropogenes Treibhaus-signal von 0.9 K, abzüglich des Sulfataerosoleffekts 0.6 K (Walter, 2001). Dies deckt sich, was die anthropogenen Signale betrifft, ausgesprochen gut mit entsprechenden AO-GCM-Simulationen (gekoppelte atmosphärisch-ozeanische Zirkulationsmodelle), die ab 1860 für das anthropogene Treibhaus-signal auf ebenfalls rund 1 K und für das kombinierte Treibhaus-Sulfataerosol-Signal auf etwa 0.6 K kommen (Mitchell et al., 1995; IPCC, Houghton et al., 1996, 2001).

Mit Hilfe von Tab. 3 lassen sich nun die (direkten) Strahlungsantriebe der verschiedenen hier betrachteten anthropogenen wie natürlichen Klimafaktoren mit den Ergebnissen solcher empirisch-statistischer Abschätzungen vergleichen, wobei neben der Signalstärke (d.h. Temperaturänderung bzw. -amplitude) auch die Signalstruktur bedeutsam ist. Das Ergebnis lautet: Der säkulare Trend der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur wird anthropogenen Ursachen, also dem Klimafaktor Mensch zugeschrieben, während die natürlichen Ursachen nur episodische Anomalien (d.h. relativ kurzfristige Abweichungen von diesem Trend) bzw. Fluktuationen (um diesen Trend herum) bewirkt haben; allenfalls dem solaren Einfluss lässt sich, bei einer der verwendeten alternativen Zeitreihen, ein Trendanteil zuordnen, der bei etwa 0.1 K Erwärmung liegt. Tab. 3 beinhaltet auch Unschärfeabschätzungen der verschiedenen Signalstärken, die durch Variation der Parametrisierung der Einflussdaten-Zeitreihen bzw. der freien Parameter der neuronalen Netze zustande kommen. Auf eine Diskussion der regional-jahreszeitlichen Strukturen der Signalabschätzungen, die ebenfalls vorliegen, kann hier nicht eingegangen werden (hinsichtlich neuronaler Netze vgl. dazu insbesondere Walter, 2001).

Zur Detektionsstrategie, die den Nachweis des Klimafaktors Mensch zum Ziel hat, gehört ausser der Abschätzung des Ausmasses der entsprechenden Klimaänderungen, also der Signalstärke, auch eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der sich das anthropogene Klimasignal von den natürlichen Klimaänderungen abhebt. Das übliche Vorgehen, die sog. Fingerprint-Strategie (IPCC, Houghton et al., 1996, 2001), besteht darin, die dreidimensionalen, mindestens aber bodennah-zweidimensionalen GCM-Simulationsergebnisse des anthropogenen Treibhaussignals mit den entsprechenden Strukturen der Beobachtungsdaten zu korrelieren (siehe z.B. Hegerl et al., 1996). Dabei tritt aber die Schwierigkeit auf, dass die Klimamodelle in ihrer regionalen Aussagekraft unsicher sind und dabei die in den Beobachtungsdaten sich widerspiegelnden natürlichen Klimavariationen, obwohl sie zumindest partiell auch ursächlich erklärbar sind, nicht berücksichtigt werden.

In einer vom Umweltbundesamt in Auftrag gegeben Studie (Grieser et al., 2000) ist daher versucht worden, den Nachweis allein auf der Grundlage von Beobachtungsdaten mit Hilfe sukzessiver multipler Regressionstechniken zu führen. Dabei wurden wieder die gleichen Klimafaktoren in die Analyse einbezogen wie bei den neuronalen Netz-Simulationen (vgl. erneut Tab. 3). Die Strategie besteht in diesem Fall darin, zunächst den Einflussfaktor zu suchen, der am höchsten mit den Klimabeobachtungsdaten korreliert ist, ihn von diesen Daten mittels Regression sozusagen abzuziehen, danach mit dem Einflussfaktor zweitgrösster Korrelation ebenso zu verfahren und so weiter. Bei Anwendung auf die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur 1900 - 1998 zeigt sich dann, dass rund 60 % Temperaturvarianz auf den anthropogenen Treibhauseffekt zurückgeführt werden können, rund 20 % auf weitere, natürliche wie anthropogene Klimafaktoren (dabei 4 % auf die Sonnenaktivität) und von den verbleibenden 20 %, dem unerklärten Residuum, 16 % Zufallseigenschaften aufweisen, somit prinzipiell deterministisch unerklärbar sind.

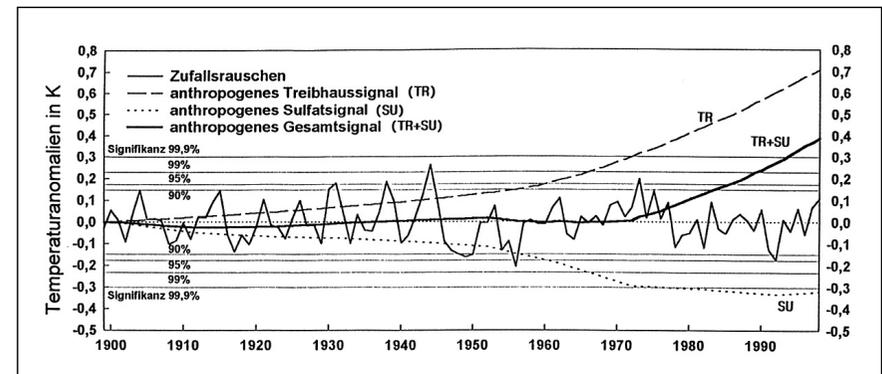


Abb. 8: „Zufallsrauschen“ der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1900-1998, nachdem alle erklärbaren Varianzanteile mittels sukzessiver Regression von den Originaldaten subtrahiert worden sind, zugehörige Signifikanzschwellen und (ähnlich Abb. 7) anthropogene TR-, SU- und (TR+SU) – Signalzeitreihen, wobei die TR-Zeitreihe ab dem Jahr 1973 die 99.9 % – Signifikanzgrenze des „Zufallsrauschens“ überschreitet (nach Grieser et al., 2000).

Vergleicht man nun das anthropogene Treibhausgassignal, das in diesem Fall (seit 1900) 0.7 K beträgt, mit diesem unerklärten Residuum, vgl. Abb. 8, so lässt sich daraus schliessen, dass es sich ab 1973 mit 99.9 % Wahrscheinlichkeit davon abhebt, also auf diesem Signifikanzniveau in den Beobachtungsdaten entdeckbar ist. Wird dieser Vergleich gegenüber der Summe aus unerklärter (wie oben) und durch natürliche Klimafaktoren erklärte Varianz durchgeführt, verschiebt sich das „Entdeckungsjahr“ des anthropogenen Treibhauseffektes auf 1989. Beim Übergang auf die Analyse der regional-jahreszeitlichen Strukturen der beobachteten Klimaänderungen bzw. andere Klimaelemente als die Temperatur nimmt diese Wahrscheinlichkeit allerdings rapide ab (Grieser et al., 2000).

5. Konsequenzen

Kurz gefasst, ergeben sich daraus die folgenden Konsequenzen:

- Durch weitere, intensive Forschung den Kenntnisstand zur Klimaproblematik signifikant verbessern; das betrifft die Analyse der Beobachtungsdaten der Vergangenheit (Trends, Extremereignisse, Fluktuationen und deren zeitlich-räumliche Strukturen; empirisch-statistische Modelle zur Entwicklung ursächlicher Hypothesen) genauso wie das Verständnis, die Modellierung und möglichst Vorhersage der klimawirksamen Prozesse (insbesondere hinsichtlich der Rolle der Wolken, des Niederschlages, des Meereises, der Vegetation und des Bodens im Klimasystem einschliesslich aller Rückkopplungen; sog. Regionalisierung (Downscaling) der

Modellergebnisse). Weiterhin sind alle ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der Klimaänderungen von besonderem Interesse, und zwar für Vergangenheit und Zukunft.

- Trotz noch offener Fragen und erheblicher Unsicherheiten aufgrund der andererseits zweifellos bestehenden Fakten (Vergangenheit, Prozesse) und angesichts des Risikoausmasses (Zukunft) Klimaschutzmassnahmen ergreifen; hier stehen insbesondere die Realisierung der UN-Klimarahmenkonvention (KRR) bzw. des Kyoto-Protokolls (d.h. der Beschlüsse der 3. Vertragsstaatenkonferenz zur KRR) im Vordergrund der Debatte, wie sie in den weiteren Beiträgen dieses Bandes behandelt wird (vgl. dazu auch Anhang).

Anhang:

Der Kerntext der **UN-Klimarahmenkonvention** (KRR, engl. Framework Convention on Climate Change, FCCC), beschlossen bei der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (UN Conference on Environment and Development, UNCED, Rio de Janeiro, 1992), völkerrechtlich verbindlich seit 1994, 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“.

Anmerkungen dazu: Die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“ (1995***) hat daraus allein beim CO₂ für die Industrieländer (IL) eine Emissionsreduktionsforderung gegenüber 1987 bis 2005 um mindestens 25% und bis 2050 um mindestens 80% abgeleitet. Aufgrund der 3. Vertragsstaatenkonferenz zur KRR (Conference of Parties, COP3, Kyoto, 1997) wird weltweit bezogen auf 1990 bis 2008-2012 dagegen lediglich eine Minderung um 5,2% angestrebt (CO₂ und weitere Treibhausgase*), in Deutschland gegenüber früher 25% bis 2005 (Enquête-Kommission, vgl. oben) nunmehr 21% (Konferenz der EU-Umweltminister, 1998**). Allerdings ist bis zur 6. Vertragsstaatenkonferenz (COP6, Den Haag, 2000), die im Juli 2001 in Bonn fortgesetzt wird, keine Einigung über die internationale Umsetzung der Kyoto-Beschlüsse zustande gekommen.

*) Das Kyoto-Protokoll berücksichtigt folgende Treibhausgase: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), verschiedene Fluorkohlenstoffe (Fluorkohlenwasserstoffe, HFCs, und Perfluorkohlenstoffe, PFCs) sowie Schwefelhexafluorid (SF₆). Das oben genannte weltweite Emissionsreduktionsziel setzt sich aus einem bestimmten Länderschlüssel zusammen, an dem u.a. die EU** und die Schweiz mit jeweils -8%, die USA mit -7%, Japan mit -6%, die GUS mit 0% und Australien mit +8% beteiligt sind. Die USA beabsichtigen derzeit allerdings, obwohl sie die Nation mit dem grössten CO₂-Ausstoss sind, ihre Kyoto-Zusagen zurückzunehmen.

**) Für die EU sind anvisiert: Luxemburg - 28%, Deutschland -21%, Österreich -13%, Grossbritannien -12,5%, Belgien -7,5%, Italien - 6,5%, Niederlande -6%, Dänemark -2,1%, Frankreich und Finnland 0%, Schweden +4%, Irland +13%, Spanien +15%, Griechenland +25%, Portugal +27%.

***) Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“ (Hrsg.), 1995: Mehr Zukunft für die Erde. Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz (Schlußbericht). Economica, Bonn.

Nach zwei derartigen Kommissionen hat der Deutsche Bundestag seit 1995 keine Klima-Enquete-Kommission mehr eingerichtet. Es existiert zur Zeit aber eine Enquete-Kommission, die sich mit nachhaltiger Energieversorgung beschäftigt („Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“).

Literatur

- Arntz, W.E., Fahrbach, E., 1991: El Niño. Klimaexperiment der Natur. Birkhäuser, Basel.
- Brause, R., 1995: Neuronale Netze. Teubner, Stuttgart.
- Cress, A., Schönwiese, C.-D., 1992: Statistical signal and signal-to-noise assessments of the seasonal and regional patterns of global volcanism-temperature relationships. *Atmosphäre* **5**, 31-46.
- CRU (Climatic Research Unit, Norwich University, UK, Jones, P.D., et al.), 2001: Klimadaten (insbesondere globale und hemisphärische Mitteltemperaturen); abrufbar über <http://www.cru.uea.ac.uk>.
- Cubasch, U., Kasang, ., 2000: Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes, Gotha u. Stuttgart.
- DMG (Deutsche Meteorologische Gesellschaft), 2001: Stellungnahme zu Klimaänderungen; abrufbar über dmg@met.fu-berlin.de
- Fezer, F., 1995: Das Klima der Städte. Perthes, Gotha.
- Grieser, J., Staeger, T., Schönwiese, C.-D., 2000: Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes. Bericht Nr. 103, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt (vollständige und Kurzfassung auch abrufbar über <http://www.rz.uni-frankfurt.de/IMGF/meteor/klima>).
- Häberli, W., Hölzle, M., Maisch, M., 2001: Glaciers as key indicator of global climate change. In Lózan, J.L., et al. (ed.), s. unten, pp. 212-220.
- Hammer, C.U., Clausen, H.B., Dansgaard, W., 1980: Greenland ice sheet evidence of post-glacial volcanism and its climatic impact. *Nature* **288**, 230-235.
- Hantel, M., 1997: Klimatologie. In Raith, W. (Hrsg.), Bergmann-Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7 (Erde und Planeten), De Gruyter, Berlin-New York, S. 311- 426.
- Hegerl, G., von Storch, H., Hasselmann, K., et al., 1996: Detecting greenhouse-gas-induced climate change with an optimal fingerprint method. *J. Clim.* **9**, 2281-2306.
- Heimann, M., 2000: Biogeochemische Spurenstoffkreisläufe. In Guderian, R. (Hrsg.), Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie, Band 1B (Atmosphäre), Springer, Berlin etc., S. 393-420.
- Höper, H., 1998: Klimaveränderungen durch Landnutzungsänderungen. In Lózan et al. (Hrsg.), s. oben, S. 144-149.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., et al. (eds.), 1996: Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Univ. Press, Cambridge; 2001: Third Assessment Report in print, Policymakers Summary (20 pp.) available from <http://www.ipcc.ch>.
- Kepler, E., 1990: Sonne, Monde und Planeten. Piper, 2. Aufl., München-Zürich.
- Kuttler, W., 2000: Stadtklima. In Guderian, R. (Hrsg.), vgl. Heimann, S. 420-470.
- Lamb, H.H., 1970: Volcanic dust in the atmosphere; with a chronology and assessment of its meteorological significance. *Phil. Transactions oy. Meteorol. Soc. A* **266**, 425-533.
- Lean, J., Beer, J., Bradley, R.S., 1995: Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change. *Geophys. Res. Letters* **22**, 3195-3198.
- Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P. (Hrsg.), 1998: Warnsignal Klima. Das Klima des 21. Jahrhunderts. Wissenschaftliche Fakten. Wiss. Auswertungen, in Kooperation mit GEO, Hamburg (Bestellung: Lozan@rz.uni-hamburg.de); 2001: Climate of the 21st century: Changes and risks (überarbeitete englischsprachige Ausgabe, gleicher Verlag).
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 1999: Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Letters* **26**, 759-762.
- Mitchell, J.F.B., Johns, T.C., Gergory, J.M., Tett, S.F.B., 1995: Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature* **376**, 501-504.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2000: Naturkatastrophen (Berz, G., et al., Bearbeiter). Topics, Selbstverlag, München.
- Peixoto, J.P., Oort, A.H., 1992: Physics of Climate. American Institute of Physics, New York.
- Rapp, J., 2000: Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, Deutscher Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.
- Rapp, J., und Schönwiese, C.-D., 1996: Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowiss. Arb., Serie B, Band 5, Univ. Frankfurt a.M., Selbstverlag, Frankfurt a.M.
- Roedel, W., 2000: Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre. Springer, 3. Aufl., Berlin-Heidelberg.
- Schönwiese, C.-D., 1988: Volcanic activity parameters and volcanism-climate relationships within the recent centuries. *Atmosphäre* **1**, 141-156.
- Schönwiese, C.-D., 1994: Klimatologie, Ulmer (URB), Stuttgart, 1994.
- Schönwiese, C.-D., 1995: Klimaänderungen. Daten, Analysen, Prognosen. Springer, Berlin-Heidelberg.
- Schönwiese, C.-D., 1999: Das Klima der jüngeren Vergangenheit. *Physik uns. Zeit* **30**, 94-101.
- Schönwiese, C.-D., Rapp, J., 1997: Climate Trend Atlas of Europe - Based on Observations 1891-1990. Kluwer, Dordrecht-Boston-London.
- Schönwiese, C.-D., Walter, A., Rapp, J., Meyhöfer, S., Denhard, M., 1998: Statistische Analyse der Klimavariabilität und anthropogenen Klimasignale in globaler und regionaler Betrachtung. Bericht Nr. 102, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt a.M.
- Schwarzbach, M., 1974: Das Klima der Vorzeit. Enke, Stuttgart.
- Walter, A., Denhard, M., Schönwiese, C.-D., 1998: Simulation of global and hemispheric temperature variations and signal detection studies using neural networks. *Meteorol. Z., N.F.*, **7**, 171-180.
- Walter, A., 2001: Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie. Dissertation, im Druck, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt a.M.

DIE KLIMAVERHANDLUNGEN DER VEREINTEN NATIONEN NACH DEM GESCHEITERTEN KLIMAGIPFEL VON DEN HAAG,

Christoph Bals,
GERMANWATCH e.V.

GERMANWATCH beobachtet u.a. seit sechs Jahren die UN-Klimaverhandlungen.

GERMANWATCH versucht dabei der Perspektive derer Gehör zu verschaffen, die besonders vom globalen Klimawandel betroffen wären, vor allem in den Ländern des Südens. Wir beraten Politik, informieren Medien und gehen, wo sinnvoll, strategische Allianzen mit der Wirtschaft ein.

Die folgende Analyse schildert das Scheitern des Klimagipfels von Den Haag und dessen Konsequenzen nicht in erster Linie aus der lebensweltlichen Perspektive einer Nichtregierungsorganisation, die den Fokus auf der existentiellen Bedrohung zahlreicher Menschen vor allem in den Ländern des Südens hat, sondern reichert die Beschreibung aus systemtheoretischer Perspektive an.

Zu diesem Zweck wird zunächst der menschengemachte globale Klimawandel als unbeabsichtigter Nebeneffekt der „Schumpeterdynamik“ (H. Krupp) der strukturell gekoppelten Gesellschaftssysteme Ökonomie, Technologie und Politik beschrieben. Dann wird der aufgrund wissenschaftlicher Aufarbeitung dieser Bedrohung (IPCC) initiierte Versuch einer Selbstkorrektur des politischen Systems durch den UN-Verhandlungsprozess beschrieben. Doch das Kyoto-Protokoll (1997) hat einen ehrgeizigeren Anspruch. Es will – v.a. mittels des internationalen Emissionshandels – eine Selbstkorrektur des ökonomischen und technologischen Systems initiieren. Dabei war es – obwohl es erst verabschiedet, aber noch nicht in Kraft gesetzt ist – erstaunlich erfolgreich. Erste ökonomisch/technologische Dynamisierungen werden (auch) als Reaktion auf das Kyoto-Protokoll beschrieben.

Vor diesem Hintergrund wird dann die Frage kommentiert: warum ist der Klimagipfel von Den Haag gescheitert? Daran schliesst sich die Frage an: Wie geht es weiter? Drei Szenarien werden kurz skizziert.

1. Verpasster Kairos in Den Haag?

Den Morgen des 25. November 2000, des letzten Tages des Klimagipfels von Den Haag, werde ich so schnell nicht vergessen. Kurz vor 12 Uhr: Ein wutschnaubender britischer Minister kommt aus der EU-Baracke, umschwärmt von Kamerateams, die wie eine Dampfwalze alles überrollen, was in der Richtung liegt, wohin der Minister geht. Kurz darauf kommt auch

Hendrik Vygen heraus, der seit vielen Jahren die deutsche Delegation leitet. „Es ist aus. Es ist vorbei“, murmelt er. Vorbei, vorbei war die Chance, ein substantielles Ergebnis in Den Haag zu erreichen. (Vgl. hierzu: www.germanwatch.org/rio/cop6.htm): Zwei Stunden später, um kurz nach zwei, verkündete der niederländische Umweltminister und Tagungspräsident Jan Pronk offiziell das Scheitern. Es wird beschlossen, den 6. Klimagipfel zu unterbrechen und später nach sorgfältiger Vorbereitung fortzuführen. Möglicherweise – seinerzeit war das Tauziehen um die Präsidentschaft in den USA noch nicht beendet – mit einem völlig neu politisch ausgerichteten US-Verhandlungsteam. Inzwischen wissen wir – es geht weiter in der zweiten Juli-Hälfte in Bonn, tatsächlich mit einem neu ausgerichteten Verhandlungsteam der USA.

Vielleicht kennen Sie die antike Darstellung des griechischen Zeitgottes „Kairos“, des Gottes der günstigen Gelegenheit. Er wird vorne mit Schopf und hinten mit Glatze dargestellt. Wenn die Gelegenheit nicht beim Schopfe gepackt wird, dann ist der Kairos vorbeigehuscht. Die Hand greift nur noch nach der Glatze, greift ins Leere.



Als eine schnellen Flugs auf einem Schermesser
Sich wiegende Gestalt, belockt die Stirn, sonst kahl –
Ergreifst du sie, so halt sie fest; einmal entschwunden,
Vermag selbst Jupiter sie nicht zurückzuholen

Phaedrus: Liber fabularum V 8

Ist in den Morgenstunden des 25. November in Den Haag der Kairos vorbeigehuscht? Versäumten die Minister den Griff nach seinem Schopfe? Bleibt bei der im Juli in Bonn geplanten Fortsetzung des Klimagipfels von Den Haag nur noch der Griff nach der Glatze des hässlich lachenden Kairos?

Ich möchte im folgenden nicht den Details des Scheiterns von Den Haag nachgehen. Etwa der Frage, warum die entscheidende Verhandlungsgrundlage des niederländischen Umweltministers und Präsidenten des Klimagipfels, Jan Pronk, zu spät vorgelegt wurde; warum sich der in den ersten zehn Tagen erreichte Verhandlungsfortschritt nur unzureichend in dem Papier widerspiegelte; oder warum die EU von der französischen EU-Präsidentschaft allzu schlecht koordiniert wurde und bisweilen bei den EU-Abstimmungen der Sprachenstreit – wird auf französisch oder englisch diskutiert – wichtiger als Inhalte schienen. Mich interessieren hier hingegen die grossen Linien dieses Scheiterns. Warum kommt es nach zehn Jahren internationaler Klimaverhandlungen zu dieser Krise? Welche Chancen und Risiken liegen in ihr? Wie kann es weitergehen?

2. Der Klimawandel als unbeabsichtigter Nebeneffekt der „Schumpeterdynamik“

Das Zusammenspiel von drei strukturell gekoppelten gesellschaftlichen Subsystemen – der Ökonomie, der Technologie und der Politik¹ – treibt weltweit die dynamischen Entwicklungen voran, die in den letzten 20 Jahren zu den Umgestaltungen und Zwängen geführt haben, die normalerweise mit dem Schlagwort „Globalisierung“ belegt werden. Der langjährige (Gründungs-)Leiter des ISI, des Fraunhofer-Instituts in Karlsruhe, Helmar Krupp, hat dieses dynamische Zusammenspiel der strukturell gekoppelten, jeweils ihrer eigenen Logik verpflichtenden ökonomischen, technologischen und politischen Systeme mit dem schönen Begriff „Schumpeter-Dynamik“ belegt². Eine Dynamik, deren Leitbild vor Augen, sich vor gut zehn Jahren Osteuropa politisch und ökonomisch umgestaltet hat; die so erfolgreich ist, dass sie sich letztendlich selbst bedroht. „Die langfristig weitaus grösste Selbstbedrohung der Schumpeter-Dynamik resultiert ... aus ihrer Tendenz, alle irdischen (...) Ressourcen für die Eigenentwicklung zu verwerten und die Umwelt mit wachsendem Abfall zu belasten, den diese immer weniger durch eigenen Kreisläufe unschädlich zu machen vermag.“ (Krupp, 1996, 98). Diese wachsenden globalen Gefahren haben die „Nationen der Welt längst hinter ihrem Rücken zu einer unfreiwilligen Risikogemeinschaft vereinigt“ (Habermas, 1999, 180).

¹ Krupp übernimmt von Niklas Luhmann die Konstruktion autopoietischer autonomer Systeme. Er geht dann aber stärker auf deren synergetisches Zusammenspiel und die daraus resultierende Gesamtleistung dieser Systeme ein.

² Ich benutze den Begriff „Schumpeterdynamik“ mit gewissen Abweichungen von Krupp. Erstens spreche ich vom gesellschaftlichen Subsystem „Technologie“ und nicht von „Technik“. Damit will ich einerseits zum Ausdruck bringen die Verschmelzung von zunehmenden Teilen der Wissenschaft mit der Technik zu einem Hybridsystem; andererseits heisst dies eben auch, dass dieses gesellschaftliche System nicht nur Technikentwicklung, sondern gerade auch die gesellschaftliche Kapazität mit ihr umzugehen, meint. Ausserdem interpretiere ich die Konsumwelt nicht als eigenes Subsystem der Gesellschaft. Ich verstehe sie vielmehr als Schnittstelle zwischen Lebenswelt und ökonomischem System, so wie die Wahlbürger(innen) die Schnittstelle zwischen Lebenswelt und politischem System darstellen.

Die UN-Klimaverhandlungen sind der grossangelegte Versuch, die Dynamik der drei Systeme Politik, Wirtschaft und Technologie so zu irritieren, dass diese Systeme sich selbst klimaverträglich umgestalten³. Nur so ist das Ziel der UN-Klimarahmenkonvention, wie es in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention festgehalten ist, zu erreichen: die Treibhausgas-Konzentrationen auf einem Niveau zu stabilisieren, das ausreicht, um existentielle Bedrohungen für Mensch und Natur abzuwenden und eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen (Vgl. United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, Art. 2).

In einem Aufruf der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, den diese am 26.3.2001 der Öffentlichkeit vorgestellt hat, wird dieses Ziel konkretisiert. „Zur Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre, das zentrale Ziel der UN-Klimarahmenkonvention, ist allein beim CO₂ mindestens eine Halbierung der anthropogenen Emissionen notwendig. Soll die Stabilisierung der Konzentration auf einem Niveau unterhalb der Verdoppelung des vorindustriellen CO₂-Gehalts erreicht werden, muss die genannte Reduktion der CO₂-Emission bis spätestens zur Mitte dieses Jahrhunderts erfolgt sein.“

Aufgrund der bereits beobachteten Klimaänderungen, ihrer ursächlichen Interpretation und der in Zukunft zu erwartenden Entwicklung unterstützt die Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG) diese Zielsetzung nachdrücklich“ (DMG, 26.3.2001).

Wieder einmal zeigt sich, wie auch beim gerade vorgelegten 3. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), dass die Wissenschaft ihrer Bringschuld nachkommt. Dennoch bleibt die Frage offen:

Kann es wirklich gelingen, gestützt auf den seltsam gewaltlosen Zwang wissenschaftlicher und moralischer Argumente und deren mehr oder weniger grosse Resonanz in der Öffentlichkeit, die Schumpeterdynamik, also das dynamische Zusammenspiel des politischen, ökonomischen und technologischen Systems zu einer entscheidenden Selbstkorrektur anzuregen?

2.1. Der Versuch, eine Selbstkorrektur des politischen Systems zu initiieren

Der Versuch der **Selbstkorrektur des globalen politischen Systems** wurde 1992 in Rio de Janeiro durch die Verabschiedung der UN-Klimarahmenkonvention eingeleitet. Diese soll über das Verhandlungssystem der UN erfolgen (UNFCCC). Im Gegensatz zu einigen anderen Themen, zu denen in Rio Verhandlungsprozesse in Gang gesetzt wurden (konkret etwa die Wüstenbildungskonvention), spricht einiges dafür, dass im Klimabereich tatsächlich auf dem

³ In dieser drücken sich Bedenken gegen einen naiven Steuerungsoptimismus aus. Die Irritation des jeweiligen Systems – in diesem Fall des politischen Systems – kann nur gelingen, wenn das jeweilige System in seiner Systemlogik angesprochen wird und die entsprechende Information als relevant erachtet. Das gutgemeinte Appellieren an die Verantwortung der Politik erscheint demgegenüber als „Verzweiflungsgeste“ (Niklas Luhmann). Auch diese kann sinnvoll sein, vor allem wenn sie öffentlichkeitswirksam inszeniert wird, und die Aufnahmebereitschaft der Politik, ein Thema selbst in ihre Systemlogik zu übersetzen, fördern. Dann wird reagiert – ob sachgemäss oder mit Symbolpolitik ist eine andere Frage.

multilateralen Verhandlungsweg nennenswerte Ergebnisse zu erreichen sind. Das sage ich, wohl wissend um das Scheitern des Klimagipfels von Den Haag und um den Klima-Salto-Mortale im Brief des US-Präsidenten Bush vom 13. März 2001⁴. Für diesen strukturellen Optimismus sprechen verschiedene Argumente:

Erstens: Alle Vertragsstaaten haben ein Interesse, mögliche katastrophale Folgen, resultierend aus diesem „Experiment des Menschen mit der Atmosphäre“ (DMG, 26.3.2001) und damit letztlich mit sich selber, zu vermeiden. Aber es hilft nicht sehr viel, wenn einer der Akteure dauerhaft allein aktiv wird, selbst wenn es der weltweit grösste Emittent ist. Gemeinhin ist eine solche Situation als Gefangenen-Dilemma bekannt. Umso besorgniserregender ist ja, dass die US-Regierung nicht nur das Kyoto-Abkommen zur Debatte stellt, sondern auch generell zur Diskussion stellt, ob ein multilateraler Verhandlungsprozess sinnvoll ist. Wie ohne multilaterale Ansätze ein Ausweg aus dem Gefangenen-Dilemma aussehen könnte, wird nicht deutlich. Ebenso wenig, welcher andere Prozess auch nur annähernd die Legitimation eines UN-Prozesses haben könnte.

Zweitens: Alle Seiten, auch die gewöhnlich im UN- und noch mehr im WTO-Kontext schwachen Verhandlungspartner, die Entwicklungsländer, haben eine relativ grosse Verhandlungsmacht – da vor allem die grossen Länder des Südens in Zukunft als Partner im Klimaschutz gebraucht werden.

Drittens: Es ist durch die bisherigen Klimaverhandlungen gelungen, einen sich selbst dynamisierenden Prozess zu etablieren. Ich möchte im folgenden aufzeigen, wie das zentrale – leider vom Verhandlungsführer Jan Pronk viel zu spät vorgelegte – grundlegende Kompromisspapier des Den Haager Klimagipfels, künftige Ereignisse so terminiert, dass dies mit einiger Wahrscheinlichkeit den Prozess weiter dynamisiert. Dieses Papier wird in überarbeiteter Form auch Grundlage der Ministerverhandlungen bei der Fortsetzung des 6. Klimagipfels von Den Haag im Juli in Bonn sein.

Das Verhandlungspapier von Jan Pronk schreibt den Jahren 2005 und 2008 eine zentrale Bedeutung zu. Dies ist kein Zufall. Im Jahr 2005 sollen die Verhandlungen für die zweite Verpflichtungsperiode (nach 2012) beginnen. Und im Jahr 2008 beginnt die erste fünfjährige Verpflichtungsperiode, in der die Industrieländer ihre Emissionen laut Kyoto-Protokoll im Durchschnitt um fünf Prozent gegenüber 1990 reduzieren sollen.

Das Pronkpapier versucht nun durch die Terminierung verschiedener Ereignisse, die Wahrscheinlichkeit einer positiven politischen Dynamik zu diesen Zeitpunkten zu steigern.

⁴ Der für den internationalen Klimaschutz zentrale Passus des Briefes lautet: „I oppose the Kyoto Protocol because it exempts 80 percent of the world, including major population centers such as China and India, from compliance, and would cause serious harm to the U.S. economy. The Senate’s vote, 95-0, shows that there is a clear consensus that the Kyoto Protocol is an unfair and ineffective means of addressing global climate change concerns“ (George Bush, 13.03.01).

Zum einen wird detaillierter als im Kyoto-Protokoll geregelt, dass und wie die Industrieländer bis 2005 sichtbare Fortschritte bei der Erreichung ihrer Klimaschutzziele demonstrieren. Denn nur, wenn die Industrieländer bis dann gezeigt haben: Klimaschutz ist machbar, zerstört nicht die Wirtschaft, setzt vielmehr Innovationen frei und schafft mindestens so viele Arbeitsplätze wie er zerstört, ist zu erwarten, dass führende Entwicklungsländer Emissionsbegrenzungsziele für die Zeit nach 2012 akzeptieren werden. Insoweit ist die derzeitige Krise des internationalen Klimaschutzprozesses nur der Beginn einer kritischen Phase. Wenn nach einem positiven Ausgang des Bonner Klimagipfels nicht eine zügige Ratifizierung und Umsetzung der Klimapolitik in zentralen Industrieländern erfolgt, wird es kaum einen erfolgreichen Abschluss der Verhandlungen für die zweite Verpflichtungsperiode geben.

Eine weitere Regelung soll den Entwicklungsländern zeigen, dass sie von einem Engagement im Rahmen des Kyoto-Protokolls profitieren. Nach dem Pronk-Papier müssen – spätestens ab 2005 – die Industrieländer jährlich eine Milliarde US-Dollar aufbringen, um den Prozess der Anpassung an Klimafolgen, Technologietransfer und den Aufbau entsprechender Kapazitäten in Entwicklungsländer über zwei Fonds finanzieren.

In der Zeit um 2005 steht noch mehr auf dem Spiel. Die Bereitschaft zentraler Entwicklungsländer, über Emissions-Begrenzungsziele zu verhandeln, wird aller Voraussicht nach – das wäre wohl auch unter einer Regierung Gore so gewesen – Voraussetzung für eine Ratifizierung des Kyoto-Protokolls durch die USA sein. Umgekehrt werden die Entwicklungsländer nur zu einer Verpflichtung bereit sein, wenn bis dahin eine Pro-Klimaschutzwende in den USA eingeleitet ist.

Spätestens bis zum Jahr 2008 aber sollen die Emissionsziele für die zweite Verpflichtungsperiode – vermutlich eine Verschärfung für Industrieländer und erste Treibhausgasbegrenzungsverpflichtungen für wichtige Entwicklungsländer - ausgehandelt werden. Und die USA müssen ratifizieren, sonst können ihre Unternehmen nicht am Multi-Milliarden-Markt des Emissionshandels partizipieren. (Der internationale Emissionshandel ist wohl derzeit der stärkste Anreiz für die USA, zu ratifizieren). Ich rechne damit, dass eine erfolgreiche Umsetzung des Kyoto-Protokolls durch einen Grossteil der Industrieländer bis 2008 genug Dynamik erzeugt, dass die USA zumindest für die zweite Verpflichtungsperiode (ab 2013) sich wieder am multilateralen Klimaprozess beteiligen.

Es ist damit abzusehen, dass sich bis 2008 die kritische Phase für den internationalen Klimaschutz hinziehen wird, die mit dem Scheitern von Den Haag begann und mit dem Klima Salto Mortale im Brief des US-Präsidenten einen zweiten Höhepunkt zeitigte. Aber dann könnte – im positiven Fall – der Durchbruch erreicht sein zum für die wirtschaftliche Entwicklung weltweit bedeutendsten Abkommen neben der WTO.

2.2. Der Versuch, eine Selbstkorrektur des ökonomischen und technologischen Systems zu initiieren

Das Kyoto-Protokoll (1997) ist nicht nur eine **politisch** vereinbarte völkerrechtlich verbindliche Treibhausgas-Reduktion für die Industrieländer. Nein, das Kyoto-Protokoll ist weit anspruchsvoller. Es will den Rahmen setzen für eine Richtungsänderung der Dynamik des **ökonomischen Systems**. Die ökonomische Dynamik soll nicht gebremst werden, aber sie soll – indem der politische Treibhausgas-Reduktions-Beschluss in eine ökonomische Logik übersetzt wird, zu einer Richtungsänderung angeregt werden.

Cap und Trade, Deckelung und Handel - durch den geplanten internationalen Emissionshandel soll die Übersetzung der politischen in die ökonomische Logik gelingen. Deckelung, das absolute Reduktionsziel, ist Ausdruck politischer Logik. Durch die Möglichkeit des Emissionshandels wird sie in die ökonomische Logik übersetzt. Der ökonomische Sektor erhalte somit einen systeminhärenten Anreiz, Emissionen kostengünstig zu reduzieren. Dies senkt nicht nur die Kosten des Klimaschutzes und ermöglicht somit eine baldige Verschärfung der Ziele, sondern der Emissionshandel erzeugt auch neue Märkte, neue Dynamik. Bei den Unternehmen wird kein Ausweichverhalten, sondern eher ein Suchverhalten induziert. Nur in den wenigsten Fällen wird die Finanzabteilung im Unternehmen einfach die Emissionszertifikate zahlen, sondern die zuständige Abteilung bekommt eine Suchauftrag: wo gibt es die kostengünstigsten Emissionsreduktionen, im eigenen Unternehmen oder anderswo. Das ökonomische Subsystem erhält Ziele und Fristen. Innerhalb dieser Leitplanken kann es sich selbst mit grosser Dynamik klimaverträglich umgestalten. Der Emissionshandel und dessen Derivat-Produkte erlaubt auch Unternehmen, die einen hohen Treibhausgasausstoss haben, eine zukunftsweisende Risikomanagementstrategie.

Zugleich sendet das ökonomische damit ein starkes Innovations-Signal an das **technologische** Subsystem der Gesellschaft, emissions-senkende Technologien zu entwickeln. Um nur ein Beispiel zu nennen: Bei einer europaweiten Etablierung eines Emissionshandelsregimes wäre mit einiger Wahrscheinlichkeit damit zu rechnen, dass endlich der Aufbau von solarthermischen Kraftwerken im Sonnengürtel Europas, durch den grosse Mengen solarer Energie ins europäische Netz eingespeist werden, verwirklicht würde.

3. Wird Europa die Chance nutzen?

Alleine der Abschluss des Kyoto-Protokolls 1997 – noch ohne Ratifizierung und Inkrafttreten – hat eine erstaunliche Dynamik in dieser Richtung ausgelöst bzw. deren Entwicklung unterstützt. Ironischerweise erinnert diese Dynamik an eine Aussage von Karl Marx : „Die uralten nationalen Industrien ... werden verdrängt durch neue Industrien, deren Einführung eine Lebensfrage für alle zivilisierten Staaten wird“. Für den Durchbruch der notwendigen Klimaschutz-Innovationen gilt das in besonderer Weise: eine Lebensfrage für alle zivilisierten

Staaten. So könnte man fast die Kapitulation der Bush-Regierung vor der Kohle-Lobby, die Ankündigung sein Wahlkampfversprechen zu brechen, ein CO₂-Emissionshandelssystem in den USA zu etablieren und sein „I oppose Kyoto“ als Ankündigung des Ausstiegs aus der Gruppe der zivilisierten Staaten interpretieren. Die USA scheint angesichts der zivilisatorischen Aufgabe abzudanken, kurzfristige Interessen zurückzustellen, um ein Grosseperiment mit der Atmosphäre und Menschheit in einigemmassen kalkulierbarem Rahmen zu halten. Der Soziologe und Zivilisationstheoretiker Norbert Elias hat die Zivilisierung als Reaktion auf „die Notwendigkeit einer Abstimmung des Verhaltens von Menschen über so weite Räume hin und eine Voraussicht über so weite Handlungsketten, wie noch nie zuvor“ bezeichnet. Genau vor einer solchen Herausforderung stehen wir angesichts des globalen Klimawandels. Wenn Zivilisation massgeblich darin besteht, kurzfristige Impulse – historisch etwa das Faustrecht – zugunsten langfristiger Existenzsicherung für sich und andere zurückzustellen – etwa durch das Staatsmonopol – , ist die Ankündigung von US-Präsident Bush schlichtweg eine Verweigerung eines Zivilisationsschrittes.

Doch wichtiger ist: Der US-Präsident gibt der US-Industrie ein klares Signal: Innovationssuche für Erneuerbare Energieträger und Energieeffizienz einstellen. Erstmals seit langem scheinen die von Lobbyinteressen und fossiler Abhängigkeit gebundenen USA und nicht die EU der Bedenkenträger angesichts einer beginnenden Innovationswelle. Diesmal scheinen die USA vor der „schöpferischen Zerstörung“ (Schumpeter) einer solchen Innovationswelle zurückzuschrecken und der EU den Vortritt zu lassen. Wird die EU die Chance nutzen? Wird sie etwa tatsächlich schon bald ein EU-weites Emissionshandelssystem einführen?

4. Erste ökonomisch-technologische Reaktionen auf das Kyoto-Protokoll

Es mehren sich die Anzeichen, dass die gewünschte Innovationsdynamik im ökonomisch-technologischen System – angetrieben u.a. durch Kyoto – bereits anfanghaft in Gang gekommen sein könnte. Noch ist allerdings nicht klar, ob es sich hier tatsächlich um die noch sachte ansteigende erste Phase einer exponentiellen Kurve handelt.

Die weit überdurchschnittliche Börsen-Kursentwicklung der entsprechenden Technologien – von der Brennstoffzelle bis zur Windkraft – in den letzten Jahren könnte so interpretiert werden.

Ein zweites Indiz ist die Diversifizierung der Industrielobby in der Klimafrage. Beim Klimagipfel 1995 in Berlin stand die Wirtschaft dieser Welt noch wie eine Front da. Es reichte ein Wort um die Position zu allem, was nach völkerrechtlich verbindlichen Klimaschutz roch, auszudrücken: „nein“. Aber diese Einheit sollte Schritt für Schritt verfallen. Ab 1996 waren bereits das (von Germanwatch initiierte) European und US-Business Council for a Sustainable Energy Future bei den UN-Klimaverhandlungen aktiv, die die Unternehmen organisieren, die die Innovationschancen des Klimaschutzes wahrnehmen wollen; auch die UNEP-Versicherer-Initiative meldete sich seit 1996 deutlich warnend zu Wort. Zwischen 1997 und

1999 traten fast alle grossen Unternehmen, zunächst BP, dann Shell, Dupont, Ford, Daimler-Chrysler und dann immer mehr aus der Bremser-Organisation „Global Climate Coalition“ aus. Im Pew Center in den USA sammelten sich Grossunternehmen, die eine konstruktive Rolle im Klimaschutz einnehmen. Und auch für den Bonner Klimagipfel bereitet eine transatlantische Unternehmerinitiative „e-mission 55“ ihre Positionierung vor: „Klimaschutz ist notwendig, Emissionshandel muss ein zentraler Bestandteil sein, wir brauchen internationale Regeln, und Bonn muss den Durchbruch für Kyoto bringen“.

Ein drittes Indiz, dass die gewünschte Dynamik an Fahrt gewinnt, ist Deutschland. Das politisch induzierte schnelle Wachstum der Erneuerbaren Energieträger wird auch die gesellschaftliche Dynamik ändern. Bereits im vergangenen Jahr gab es in Deutschland mehr Beschäftigte in der Produktion der Erneuerbaren Energieträger als in der Kernenergiebranche. Und in ein/zwei Jahren wird es mehr Arbeitsplätze für Erneuerbare Energieträger als für Steinkohle geben. Die Rückkopplungen dieser ökonomisch-technologischen Entwicklung ins politische System lassen sich leicht ausmalen. Es ist nicht mehr selbstverständlich, dass Kohleregionen für mehr Bergbau votieren. Die Zeiten, wo die Kohlebranche die Positionen der Gewerkschaften und indirekt der SPD massgeblich beeinflussen konnten, neigen sich allmählich dem Ende zu. In Kohleregionen gab es in den letzten Monaten erstmals grössere und schnell wachsende Bürgerinitiativen gegen die Kohle.

Sicherlich liegen in diesen drei beschriebenen Entwicklungen Phänomene vor, die man in den Naturwissenschaften Schwankungserscheinung oder Fluktuation nennt. „In den weitaus meisten Fällen verschwinden sie rasch wieder. Wenn aber eine Abweichung an ihre Umgebung >anzuschliessen< vermag, kann sie erhalten bleiben. Einzelabweichungen können zu einem neuen Systemzustand, einer *Innovation*, akkumulieren.“ (Krupp, 1996, 93).

5. War es wirklich der UN-Klimaverhandlungsprozess (UNFCCC), der diese Fluktuationen im Sinne des Klimaschutzes hervorgerufen hat?

Vieles spricht dafür, dass weltweit der UN-Klimaverhandlungsprozess der Motor auch für die nationalen Klimapolitiken war. Dies lässt sich schon bei oberflächlicher Betrachtung am Beispiel Deutschland nachvollziehen:

1992 Die deutsche Selbstverpflichtung, den CO₂-Ausstoss zwischen 1987 und 2005 um 25 Prozent zu verringern, erhält durch die Verkündung vor aller Weltöffentlichkeit in Rio durch Bundeskanzler Kohl einen deutlich herausragenderen Charakter als vorher.

1995 Kanzler Kohl verschärft auf dem Berliner Klimagipfel durch Verschiebung des Basisjahrs auf 1990 das Ziel indirekt um weitere 5 Prozent. Ausgelöst durch den Klimagipfel wird auf diesem die erste, noch völlig unzureichende Selbstverpflichtungserklärung der deutschen Wirtschaft abgegeben.

1997 In Kyoto wird die erheblich verschärfte Selbstverpflichtungserklärung der deutschen Wirtschaft vorgelegt.

1999 Auf dem Klimagipfel in Bonn kündigt Bundeskanzler Schröder das neue Klimaschutzprogramm an, um die deutschen Klimaschutzziele noch zu erreichen. Die erste Klima-Bundestagsdebatte der neuen Legislaturperiode findet anlässlich des Klimagipfels statt.

Diese unvollständige Aufzählung zeigt, welche wesentliche Impulse von der Internationalen Klimapolitik ausgingen. Andererseits gilt genauso: Eine entschiedene Klimaschutzpolitik im eigenen Land ist eine dynamische Triebfeder für den internationalen Klimaschutz. Wenn der internationale Klimaschutz jetzt in eine Krise gerät, dann vor allem auch deshalb, weil die meisten Industrieländer eben gerade keine entschiedene Klimaschutzpolitik im eigenen Lande durchgeführt haben und ihnen ihre Kyoto-Ziele davonliefen. Und es gilt auch: Nur weil in Deutschland relativ ehrgeiziger Klimaschutz umgesetzt wurde, unterstützte der BDI in Den Haag ohne Vorbehalte den Kurs der EU und engagierte sich stark für das Kyoto-Protokoll – weil sonst Wettbewerbsnachteile befürchtet werden. Falls der Kyoto-Prozess tatsächlich kollabieren sollte, wird es sehr spannend, ob dann der BDI nicht auch in Deutschland zum Rückzug bläst. Argument – die anderen machen ja auch nichts und haben dann Wettbewerbsvorteile.

6. Warum ist der Klimagipfel von Den Haag gescheitert?

Meine Damen und Herren. Wenn man auf der Grundlage wissenschaftlicher und moralischer Argumente auf die Notwendigkeit entschiedenen Handelns drängt, kann man angesichts des Zeitlupentempos des internationalen Verhandlungsprozesses fast verzweifeln. Gerade nach dem gescheiterten Klimagipfel in Den Haag ist auch damit zu rechnen, dass sich dieser Frust bei künftigen Klimaverhandlungen Luft macht. Wenn man aber die dem politischen, dem ökonomischen und dem technologischen System inhärenten Systemzeiten einkalkuliert, ist es sehr erstaunlich, wie rasant sich der internationale Klimazug von 1992 (Rio de Janeiro) bis heute bewegt hat und welche gesellschaftliche Dynamik er bereits in Gang gesetzt hat. Diese Systemzeiten sind auch ein wesentliches Argument, den Einstieg in den Klimaschutz nicht zu lange herauszuschieben. Klimaschutz ist dann am günstigsten, wenn er mit den Innovationszyklen zu verknüpfen ist. Dann wenn eine Investition ohnehin fällig ist, sollte sinnigerweise die Klimaschutzinvestition erfolgen. Ein Crash-Programm wäre wesentlich teurer.

Andererseits gilt es auch die inhärenten Systemzeiten des Klimasystems zu beachten. Wenn nicht rechtzeitig mit dem Klimaschutz begonnen wird, dann bleibt nur die Option eines Crash-Programmes, wenn die unerwünschten Folgen des Klimawandels im Rahmen gehalten werden sollen. Der „safe landing approach“, der sowohl die technisch-ökonomischen Systemzeiten als auch die Klima-Systemzeiten berücksichtigt, ist der rationale Ansatz für eine Klimapolitik.

Aus dieser Überblicksperspektive betrachtet, ist es keineswegs erstaunlich, dass es gerade jetzt, wo mit dem Kyoto-Protokoll erstmals völkerrechtlich **verbindliche** Mengenbegrenzun-

gen in Kraft treten sollen, zu einer ernsthaften Krise dieses Prozesses kommt. Widerstand von Staaten, denen es bislang nicht gelungen ist, ihre relative Abhängigkeit von fossilen Energieträgern deutlich zu mindern, kann nicht verwundern. Auch nicht, dass Regierungen, die ihren Wahlkampf wesentlich von diesen Interessengruppen bezahlt bekommen haben, auf diesen Druck reagieren. Ohne den Lobbydruck aus dem schmutzigen Dreieck von USA, Australien und Saudi-Arabien wäre das Kyoto-Abkommen schon längst über den Berg, wäre Den Haag nicht gescheitert.

6.1. Der Grundfehler von Kyoto: Ziele auf Kosten der Architektur

Allerdings hat dem Scheitern von Den Haag auch ein Webfehler des Kyoto-Protokolls Vorschub geleistet. Zu stark war in Kyoto die Versuchung, wählerwirksamen Zahlen den Vorrang vor der notwendigen Anreiz-Architektur für die Wirtschaft zu geben. Es wurden – um öffentlichkeitswirksam eine wirkliche Treibhausgas-Reduktion um 5 Prozent zusagen zu können – Schlupflöcher eingebaut oder offen gelassen. Wenn man aber schon die Ziele reduziert, dann wäre es wesentlich sinnvoller, direkt bei der Höhe der Ziele statt bei der Stringenz der Architektur Kompromisse zu machen. Denn die Ziele müssen für die nächste Verpflichtungsperiode ohnehin neu verhandelt werden. Die Diskussion um diese „Schlupflöcher“ des Kyoto-Protokolls bestimmte schwerfälligen Debatten in Den Haag.

6.2. Scheu vor dem völkerrechtlich verpflichtenden Charakter

Der Lösung zweier in Den Haag noch nicht gelöster Fragen kommt zentrale Bedeutung zu, um Versuche einzelner Länder zu verhindern, sich aus der politischen, ökonomischen und technologischen Dynamik herauszuwinden. Erstens: Welche Sanktionen und Hilfen gibt es bei Nichterfüllung der versprochenen Ziele? Zweitens: wer haftet, wenn im Rahmen des Emissionshandels unseriöse Ware verkauft wird? Hier steht zugleich die Integrität des Klimaschutzes und des Emissionshandelsregimes auf dem Spiel. Die Lösung dieser Fragen ist wesentlich dafür, ob das Abkommen hält, was es verspricht. Sie blieben bis zum Schluss offen.

6.3. Der Interessenskonflikt bezüglich der „Senken“

Der Kompromiss der letzten Nacht von Den Haag ist aber letztlich an einer anderen Frage gescheitert: welche Formen und in welchem Ausmass Senken – also die Anrechnung von Kohlenstoffbindung – im Kyoto-Protokoll zugelassen werden soll. Einerseits in den Industrieländern, und andererseits, wenn diese durch Projekte in Entwicklungsländern – im Rahmen des sogenannten Clean Development Mechanismus – ihre Emissionsverpflichtungen erfüllen wollen.

Hinter der kontroversen Debatte um Senken verbergen sich sehr unterschiedliche Interessen:

Aus der Sicht der EU ist der Einbezug von Senken zu betrachten:

- § als ein Versuch, den technischen Innovationsschub zu umgehen oder verlangsamen;
- § und als ein Versuch, die wissenschaftliche Seriösität des Kyoto-Abkommens zu unterminieren.

Aus Sicht der USA:

- § als ein Versuch, in den USA politische Dynamik für Kyoto zu erzeugen, indem man Land- und Forstwirte „einkauft“, da sich ihnen neue Geschäftsmöglichkeiten auftun;
- § und als ein Versuch, die ökonomischen Kosten zu minimieren

Aus der Sicht Japans:

- Als Versuch, das eigene Ziel ohne irgendwelche Aktivitäten zu reduzieren. Dies hatten die Japaner 1997 in Kyoto informell versprochen bekommen, damit sie in eine höhere Reduktionszahl einwilligen.

Aus Sicht der least developed countries – vor allem in Afrika und Lateinamerika – erscheinen sie als Möglichkeit,

- wenn schon wegen der ökonomischen Rahmenbedingungen über den Clean Development Mechanismus kaum Technikprojekte dort umgesetzt werden, wenigstens Forstprojekte gezahlt zu bekommen.

Den rapidly developing countries hingegen erscheint der Einbezug von Senken als Gefahr:

- dass sie wegen dieser kostengünstigen Konkurrenz durch den CDM zu wenig neue Technologien finanziert bekommen.

Die Ländergruppen, vor allem die EU und die USA, konnten sich in Den Haag nicht auf die Regeln für den Einbezug von Bäumen und Büschen einigen. Nach dem Scheitern von Den Haag entschied der US-Supreme Court, einen Bush zum Präsidenten zu machen. Und dieser hat am 13. März angekündigt, eine Senke für das Kyoto-Protokoll sein zu wollen. „I oppose Kyoto“. Sogar seine Initialien hat er demenstreichend ausgesucht: G.W. Bush – Global Warming Bush. Aber wir werden sehen. Aus der Diskussion über Senken haben wir gelernt, dass eine von deren wesentlichen Schwächen ist, dass sie keine Dauerhaftigkeit garantieren können. Es wird massgeblich darauf ankommen, wie sich der Grossteil der Wirtschaft, speziell der US-Wirtschaft, jetzt positionieren wird, die von Klimapolitik kaum betroffen sind oder darin Innovationschancen sehen. Es gibt Anzeichen dafür, dass grosse Teile der US-Wirtschaft inzwischen weit konstruktiver mit dem Thema umgehen als die neue US-Regierung. Wir werden sehen, ob sie den Mut haben, dies zum Ausdruck zu bringen. Wir werden sehen, ob am Ende der derzeitigen kritischen Phase das für die Weltwirtschaft neben der WTO bedeutsamste Regulierungsabkommen oder der Kollaps des Klimaschutzes steht.

7. Wie geht es weiter? Drei mögliche Szenariengruppen:

Erstens, es formt sich vor, in oder kurz nach dem Bonner Klimagipfel eine Gruppe von Staaten, die Kyoto bis 2002 – zehn Jahre nach Rio – ratifizieren und in Kraft setzen will. Der EU kommt dabei eine zentrale Rolle zu. Wenn sie nicht aktiv wird, wird das kaum geschehen. In Kraft treten kann das Abkommen nur, wenn neben anderen Japan und Russland eine solche Strategie mitmachen, da 55 Staaten, die zumindest 55 Prozent der Industrieländer-Emissionen des Jahres 1990 repräsentieren, mitmachen müssen. Dann könnte das Kyoto-Abkommen in Kraft treten, zunächst ohne USA, aber mit offener Tür für sie.

Die zweite Möglichkeit wäre, dass die USA sich auch im Klimaschutz in die Gruppe der zivilisierten Staaten zurückbewegt und konstruktiv an den Verhandlungen im Juli teilnimmt. Dann käme wahrscheinlich ein problematischer Kompromiss zustande, aber immerhin die Chance einer relativ frühen Ratifizierung durch die USA, den grössten Emittenten.

Die dritte Möglichkeit wäre, dass der Kyoto-Prozess auseinanderfällt. Dies würde den internationalen Klimaschutz wohl um etwa eine Dekade zurückwerfen. Es wäre zudem generell ein schwerer Vertrauensverlust in die Regelungskompetenz der UNO.

Dann wäre tatsächlich Kairos in Den Haag vorbeigehuscht und käme so bald nicht wieder.

Literatur

Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V. (DMG), 26.3.2001: Stellungnahme zu Klimaänderungen (C.-D. Schönwiese unter Mitwirkung von M. Claussen, U. Cubasch, H. Fischer, H. Graßl, S. Rahmstorf u.a. (DMG-Vorstand: W. Wehry, U. Gärtner, J. Sündermann)

Norbert Elias, 1969, (16, 1991) Über den Prozess der Zivilisation, Frankfurt a.M., Suhrkamp

Jürgen Habermas, 1999: Die Einbeziehung des Anderen, Frankfurt, Suhrkamp

Helmar Krupp, 1996: Zukunftsland Japan, Globale Evolution und Eigendynamik, Darmstadt, Wissenschaftl. Buchgesellschaft

Karl Marx, 1948, Manifest der kommunistischen Partei. In: Landshut, Siegfried, 1953, Karl Marx – die Frühschriften. Alfred Kröner Verlag Stuttgart, 525-560;

Phaedrus, Liber Fabularum, Reclam, Stuttgart 1987

UNFCCC-Convention on Climate Change, Bonn, 1992

www.germanwatch.org/rio

ZUKÜNFTIGE ENERGIESYSTEME

Harald Bradke

Fraunhofer Institut für Systemtechnik, Abteilung Energietechnik und Energiepolitik

1 Einleitung

Die Energieversorgung steht mittel- bis langfristig vor großen Herausforderungen: Der Energiebedarf der Menschheit könnte sich bei einer gerechten Entwicklung rund verzehnfachen, gleichzeitig müssen die Treibhausgas-Emissionen halbiert werden, außerdem ist die Verfügbarkeit vieler bisher verwendeter Energieträger begrenzt. Industrienationen sollen bis 2050 ihre CO₂-Emissionen um 80 % reduzieren, gleichzeitig wollen wir aus der Kernenergie aussteigen: Ist dies überhaupt zu schaffen? Wenn ja, mit welchen Technologien und wann müssten sie marktreif sein? Und wäre dies überhaupt bezahlbar?

Der Beitrag versucht, trotz aller Unsicherheiten, Antworten auf diese Fragen zu geben. Nach einem kurzen Überblick über die Herausforderungen an die Energiesysteme werden wichtige mögliche Technologien (regenerative Energiequellen, neue Kernenergiesysteme, effiziente konventionelle Stromerzeugung, CO₂-Abspaltung und -lagerung, rationelle Energienutzung) und ihre Lösungsbeiträge auf dem Weg in eine langfristig nachhaltige Energiewelt vorgestellt.

2 Die Herausforderungen

Energie ist aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken: Transport, angenehm temperierte Gebäude, Kommunikation, Ernährung, Handel, Produktion und vieles mehr wären ohne sichere und kostengünstige Energie nur sehr eingeschränkt möglich. Insbesondere die Menschen in den Entwicklungsländern hängen in ihrer wirtschaftlichen Entwicklung von einer bezahlbaren Energieversorgung ab, und gerade dort wird der Energiebedarf in den kommenden Jahrzehnten besonders steigen. Eine Verdrei- bis Verfünffachung des heutigen Weltenergiebedarfs in 100 Jahren erscheint durchaus plausibel. Auf der anderen Seite sind die zur Zeit hauptsächlich genutzten Energiequellen, allen voran Erdöl, aber auch Erdgas, nur begrenzt verfügbar. Auch wenn deren Reichweiten unter Experten kontrovers diskutiert werden: Der Höhepunkt der Erdölförderung dürfte in den nächsten 10 bis 20 Jahren überschritten werden, die maximal möglichen Fördermengen konventionellen Erdöls werden dann zurückgehen, während gleichzeitig die Nachfrage wächst. Die Konsequenzen für die Marktpreise sind leicht abzuschätzen, wenn man bedenkt, dass sich rund 80 % der noch verbleibenden Vorkommen im Nahen und Mittleren Osten konzentrieren. Zwar wird dann der Abbau von Teersanden und Ölschiefer wirtschaftlich, aber der Preis dafür wird hoch sein, auch der ökologische. Und so wie es zur Zeit aussieht, sind nicht die Reserven fossiler Energieträger das wirkliche Problem, sondern die Aufnahmefähigkeit unserer Atmosphäre für die Verbrennungsrückstände, allem voran für das Treibhausgas CO₂.

Die jüngsten Berichte des Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) lassen kaum noch Zweifel daran, dass der absehbare Klimawandel von den Menschen – derzeit zu 75 % aus Industrieländern - verursacht wird, und dass dessen Auswirkungen die zukünftigen Lebensbedingungen weltweit stark beeinträchtigen werden: Stürme, Überschwemmungen, Ausweitung der Wüsten, Krankheiten und als Folge Migrationen im weltweiten Maßstab. Schon seit vielen Jahren fordern Klimatologen eine dauerhafte Halbierung der Treibhausgasemissionen. Würden im Jahre 2100 alle dann möglicherweise 12 Milliarden Menschen auf dieser Erde soviel CO₂ pro Kopf emittieren wie wir Westeuropäer in den 90er Jahren, so würden wir dieses Ziel um den Faktor 10 verfehlen!

Ist das Ziel überhaupt erreichbar? Kann die technische Entwicklung soviel mehr an Energieeffizienz bringen, dass die erreichten Energieeinsparungen nicht wieder von der stetig steigenden Nachfrage nach Energie konterkariert wird? Dass eine Reihe von Industrieländern gleichzeitig aus der CO₂-freien Kernenergie aussteigen will, macht die Sache nicht einfacher. Und trotzdem erscheint es möglich, in Industrieländern die CO₂-Emissionen in den nächsten 50 Jahren um 80 % zu reduzieren. Und wenn wir es schaffen, werden auch weltweit genügend Techniken zur Verfügung stehen, um die Ziele in den sich entwickelnden Ländern zu erreichen.

Angesichts der Größe der Herausforderung wird schnell klar, dass mit einer einzelnen Technik- oder Energieart dieses Ziel nie erreichbar sein wird. Auf dem langen Weg in ein „post-fossiles“ Zeitalter gibt es eine Reihe von bekannten und wirtschaftlichen oder nahezu wirtschaftlichen Techniken, die Zeit geben, die Kosten der dafür erforderlichen Techniken soweit zu reduzieren, dass sie wirtschaftlich einsetzbar werden.

3 Konventionelle Kraftwerke

Gegenwärtig liegt der Wirkungsgrad der weltweit eingesetzten Kohlekraftwerke im Durchschnitt nur bei etwa 30 %, neue weisen einen Wirkungsgrad von 47 % auf. Gleichzeitig haben sich die Investitionskosten für Kohlekraftwerke in den letzten zehn Jahren fast halbiert. Noch beachtlicher sind die Wirkungsgrade bei mit Erdgas befeuerten GuD-Kraftwerken, eine Kombination aus Gasturbinen- und Dampfkraftwerk. Hier liegt der Wirkungsgrad gegenwärtig bei 58 %. In Verbindung mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen scheinen sogar Wirkungsgrade von fast 70 % erreichbar. Da Erdgas bei der Verbrennung nur etwa halb soviel CO₂ emittiert wie Kohle, wird mit diesen Kraftwerken pro erzeugter kWh nur noch etwa ein Viertel der CO₂-Menge eines bestehenden Kohlekraftwerks ausgestoßen. Noch interessanter – auch wirtschaftlich betrachtet – wird das Ganze, wenn die Abwärme für Prozesswärme in der Industrie oder als Fernwärme genutzt werden kann. Einziger Schönheitsfehler: Auch Erdgas ist eigentlich viel zu selten und zu wertvoll, um es in Kraftwerken zu verbrennen.

4 CO₂-Abscheidung und unterirdische Lagerung

Um mittelfristig die CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger zu begrenzen, steht prinzipiell auch die Möglichkeit zur Abscheidung und Lagerung von CO₂ zur Diskussion. Denn der Übergang zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen (derzeit 6 % Anteil in Westeuropa und nur 2 % in Deutschland) erfordert erhebliche Änderungen der Struktur der Energieversorgung und im Kapitalstock. Die Abscheidung und Einlagerung von CO₂ könnte sich dagegen unmittelbar in die bestehenden Strukturen von großen zentralen Stromerzeugungsanlagen oder Raffinerien an geeigneten Standorten einfügen. Die Realisierung entsprechender Investitionen würde nur den Einsatz einer kleinen Anzahl von Akteuren erfordern, die sowohl über das technische Wissen als auch über ausreichendes Kapital für die Erprobung und Umsetzung dieser Option verfügen, die allerdings immer eine beschränkte Option aus Kosten- und technischen Gründen sein würde.

Während die Technik der CO₂-Abscheidung aus den Rauchgasen oder über die Synthesegasherstellung erprobt und verfügbar ist, wenn auch mit nicht unerheblichen Kosten, so liegen derzeit noch keine Erfahrungen mit der Einlagerung von CO₂ in Aquiferen oder entleerten Öl und Gasvorkommen in Deutschland vor. Aufgrund der laufenden Projekte in anderen Ländern (z. B. in den USA und Norwegen) ist jedoch davon auszugehen, dass diese Option Ende des kommenden Jahrzehnts verfügbar sein wird. Erste Schätzungen gehen dabei von einem Speicherpotenzial von insgesamt 4,4 Mrd. t CO₂ in Deutschland aus. Im Vergleich zu den CO₂ Emissionen aus Kraftwerken von derzeit etwa 0,34 Mrd. t CO₂/a bedeutet dies, dass das Speichervolumen theoretisch für einen von CO₂-Emissionen freien Betrieb von einem Viertel aller Kraftwerke über einen Zeitraum von etwa 40 bis 50 Jahren ausreichend ist, d. h. für etwa zwei Investitionszyklen. Für andere Länder in der EU (insbesondere die Nordseeanrainerstaaten) ergeben sich wesentlich günstigere Verhältnisse.

Die CO₂-Abscheidung und Einlagerung verursacht dabei als „End-of Pipe“ Technologie zusätzliche Kosten, die nach ersten Abschätzungen etwa 50 bis 200 DM pro vermiedene Tonne CO₂ betragen werden. Damit liegen die CO₂-Vermeidungskosten durch CO₂-Abscheidung und Lagerung in vergleichbarer Höhe oder unter denen der Photovoltaik (50 bis 800 DM/t CO₂), der solaren Wärme (50 bis 320 DM/t CO₂) und der Geothermie (0 bis 300 DM/t CO₂). In Verbindung mit gewissen strukturellen Vorteilen der CO₂-Abscheidung in zentral organisierten Energieversorgungssystemen könnte dieser Technologie eine Interim-Brückenfunktion beim Übergang zu dezentralen Strukturen auf Basis des Einsatzes regenerativer Energiequellen zukommen.

Diese - nur während eines begrenzten Zeitraumes benötigte - Brückenfunktion könnte allerdings nur wahrgenommen werden, wenn schon in nächster Zeit zu klären wäre, ob neben den ausgebeuteten Erdgas- und Erdöllagerstätten Aquifere als Speicher in Frage kommen könnten. Denn es müsste gewährleistet sein, dass es durch die Einpressung des CO₂ in tiefe Wasserbestände nicht zur Verunreinigung jener Grundwasserressourcen kommt, die der Trink-

wasserversorgung vorbehalten bleiben müssen. Falls hierfür keine technologisch sicheren und kostengünstigen Lösungen gefunden werden, müsste man die Verpressung in tiefe Aquifere als Option ausschließen.

5 Kernenergie

Obwohl derzeit Gründe der mangelnden Akzeptanz und fehlender Wirtschaftlichkeit bei Neuinvestitionen die Kernenergienutzung in eine stagnierende bis rückläufige Marktposition in fast allen OECD-Ländern bringen (Ausnahme: Japan), muss angesichts der Größe der Herausforderung die langfristige Rolle der Kernenergie als prinzipiell weiter entwickelbare Technologie mit gewohnter wissenschaftlicher Distanz bedacht werden.

Die mangelnde Akzeptanz der Kernenergie beruht derzeit auf drei Fakten: das Ausmaß eines maximalen Reaktorunfalls, die enorme Langlebigkeit einiger Zerfallsprodukte in den radioaktiven Abfällen und die Gefahr der Proliferation. Implizit unterstellt die mangelnde Akzeptanz, dass sich diese Fakten in Zukunft nicht ändern könnten. Dem ist folgendes entgegenzuhalten:

- Grundsätzlich sind Reaktortypen entwickelbar, die inhärent sicher sind und die Unfallgefahren auf das Reaktorgebäude selbst beschränken (z. B. die Hochtemperaturtechnik mit Leistungen unter 100 MW, wie sie z. Z. in Südafrika entwickelt wird).
- Die Transmutationstechnik, d. h. die gezielte Umwandlung von langlebigen in kurzlebige Radionukleiden ist prinzipiell vorstellbar; inwieweit dies in absehbaren Zeiträumen wirklich zu realisieren ist, bleibt derzeit umstritten und ist nicht klärbar. Um diese Frage zu beantworten, bedürfte es intensiver FuE-Arbeiten, um zu prüfen, ob es technisch-wirtschaftliche Lösungen geben könnte.
- Die Proliferation ist ein Problem, das nur in sehr langfristigen, derzeit nicht abschätzbaren Zeithorizonten durch eine UNO-basierte Institution lösbar erscheint. Diese Institution müsste auch die Möglichkeit eingriffsintensiver Interventionen haben, um dem Ziel gerecht werden zu können, eine weitere Ausweitung der atomwaffenbesitzenden Staaten in Folge der Zugänglichkeit zur Kernergietechnik wirksam zu unterbinden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kernenergie unter gewissen Voraussetzungen technischer und politischer Art langfristig ein Teilstück einer Technologiebrücke sein könnte, auch wenn derzeit die Akzeptanz der Kernergietechnik in ihrer heutigen Form gering ist und ihre Wirtschaftlichkeit unter den gegenwärtigen energiewirtschaftlichen Bedingungen häufig nicht gegeben ist. Die Rolle der Kernenergie könnte in der Zeit nach 2020 aus den genannten Gründen zwar anders beurteilt werden; doch ist es in Folge der oben skizzierten, erst noch zu schaffenden Voraussetzungen sowie der relativ kostengünstigen konkurrierenden Optionen, insbesondere der rationellen Stromnutzung, aus heutiger Sicht sehr unwahrscheinlich, dass die Kernenergieoption eine größere Bedeutung als Teil einer Technologiebrücke hätte.

Die Kernfusion, die langfristig einen deutlichen Beitrag zur Deckung unseres Energiebedarfs beitragen könnte, ist vorerst nicht mehr als eine Hoffnung. Zwar sind in den vergangenen Jahren eine Reihe von Fortschritten erzielt worden, aber bis abschätzbar wird, ob oder wann Kernfusion einen nennenswerten Beitrag leisten kann, sind noch viele technische, ökonomische und ökologische Herausforderungen zu meistern.

6 Rationelle Energienutzung

Es gibt immer wieder die Stimmen, die fragen, ob nicht schon die meisten Energieeffizienzpotenziale ausgeschöpft seien. Dies trifft nur für wenige Bereiche einiger Energiewandler wie bei großen Elektromotoren oder modernen Kesselanlagen zu. Die entscheidenden Energieeffizienzpotenziale liegen aber nicht bei den konventionellen Energiewandlern, sondern in zwei strategischen Bereichen:

- der Verminderung der erforderlichen Nutzenergie, um eine bestimmte erwünschte Dienstleistung zu ermöglichen;
- der besseren Nutzung des Exergiegehalts einer hochwertigen Energie, z. B. der Brennstoffe und von Strom, was heute aus ökonomischen Gründen weitgehend vernachlässigt wird.

Diese beiden technologischen Bereiche eröffnen ein Energieeffizienzpotenzial, das innerhalb des nächsten Jahrhunderts den spezifischen Energiebedarf je Energiedienstleistung durchschnittlich um einen Faktor 7 bis 10 reduzieren könnte (Enquête, 1990, Jochem, 1991).

Zur Veranschaulichung derartiger Energieeinsparpotenziale seien einige Beispiele genannt, die zum Teil nahe der Wirtschaftlichkeit oder bei den heutigen Energiepreisen bereits rentabel, teilweise aber auch noch spekulativ sind, weil die konkrete Vorhersage von Techniken mit drei bis zehn Generationsfolgen in den kommenden 100 Jahren aus der Sache heraus nicht möglich ist, was rückblickend am Beispiel der Mikroelektronik und der Computertechnik sehr deutlich wird. Beispiele sind:

- Heutige Passivhäuser und -gebäude mit 20 bis 30 kWh/(m²·a) Energiebedarf benötigen etwa 12 bis 18 % des Energiebedarfs des heutigen Gebäudebestandes, der nach 100 Jahren weitgehend ausgewechselt sein dürfte.
- Nieder- und Mitteltemperaturproduktionsprozesse werden durch physikalisch-chemische oder biotechnologische Prozesse substituiert sein. Es gibt heute Beispiele, wo der Energiebedarf durch Einsatz der Membrantechnik oder von Enzymen um mehr als 80 bis 90 % gesenkt wurde.
- Energieintensive Produkte mit Hochtemperaturprozessen (z. B. Stahl, Zement, Glas) werden in den kommenden Dekaden in wesentlich höherem Ausmaß wiedergewonnen, in Folge geringeren spezifischen Gewichts für die Nutzung (z. B. durch Schäumen, bessere Konstruktion, Nanotechnik) oder durch Substitution weniger ressourcenintensiver Produkte oder Dienstleistungen weniger nachgefragt.
- Fahrzeuge werden leichter durch neue Werkstoffe, durch neue Antriebe und Konstruk-

tions- sowie Fahrzeugkonzepte; teilweise wird Mobilität durch Telekommunikation ersetzt, ohne die Dienstleistung zu reduzieren.

Die Beispiele der besseren Ausnutzung der Arbeitsfähigkeit der fossilen Energieträger und von Strom signalisieren zwar nicht so spektakuläre Energiegewinne wie die Vermeidung der spezifischen Nutzenergie, aber bei einem durchschnittlichen exergetischen Wirkungsgrad in Deutschland von etwa 15 % sind Effizienzgewinne um den Faktor 2 etwa durch Technologien wie Kraft-Wärme-Kopplung (in Zukunft auch auf der Basis von Brennstoffzellen), Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen mit der Absorptions- oder Adsorptionstechnik (Wärmetransformatoren) und „energy cascading“ in größeren Systemen als realisierbar anzusehen.

Bei allem Reiz technologischer Potenziale existiert dennoch ein weites Feld von Einsparpotenzialen, die mit den Fragen zusammenhängen „Warum werden viele rentable Energieeffizienztechniken nicht eingesetzt?“ und „Warum wird teilweise so verschwenderisch mit Energie umgegangen?“. So ist im Winter immer noch zu beobachten, dass bei laufender Heizung dauer gelüftet wird; Computermonitore trotz längerer Pausen, zum Teil auch über Nacht oder an Wochenenden nicht ausgeschaltet werden; diese Geräte auch im ausgeschalteten Zustand noch Strom verbrauchen, weil der Schalter hinter dem Transformator angeordnet wurde; noch viel zu häufig bei einer Fassadensanierung im Altbaubereich trotz hoher Kosteneffizienz und entsprechender Verordnungen keine Wärmedämmung angebracht wird.

7 Erneuerbare Energien

In der gesamten energiepolitischen Diskussion herrscht allgemein Konsens über die künftige Rolle erneuerbarer Energieträger. Ihr Anteil an der deutschen wie der globalen Energieversorgung wird demnach im langfristigen Rahmen deutlich zunehmen. Das Kernelement des sogenannten Solarzeitalters soll ein Mix verschiedener dezentraler Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie von kleinen KWK-Anlagen und großen Feuerungsanlagen einschließlich KWK bilden. Ein Dissens besteht bisher hauptsächlich im zeitlichen Ablauf der Einführung erneuerbarer Energieträger und daher auch über deren Anteile zu bestimmten Zeitpunkten.

Insbesondere beim Thema erneuerbare Energieträger ist immer von einem Mix einer Reihe von Technologien auszugehen. Systemanalytische Untersuchungen einzelner Technologien zeigen, dass deren Einsatzmöglichkeiten aufgrund ihrer weitgehenden Abhängigkeit von äußeren Faktoren (Einstrahlungs-, Windverhältnisse etc.) begrenzt werden. Diesem Aspekt kann nur durch eine geeignete Kopplung verschiedener Technologien Rechnung getragen werden, so dass die Nachteile der jeweiligen Technologien ausgeglichen werden.

Aus Untersuchungen der letzten Jahre sind belastbare Angaben zu den Potenzialen erneuerbarer Energieträger in Deutschland ableitbar. BMU/UBA weisen ein Primärenergie-Referenz-

potenzial von insgesamt 8 500 PJ/a aus, was fast 60 % des Primärenergieverbrauchs im Jahre 1997 entspricht. Dahinter steht ein potenzieller Beitrag zur Stromerzeugung in Höhe von 525 TWh/a (rund 95 % der Bruttostromerzeugung) und zur Wärmeerzeugung in Höhe von 3 600 PJ/a (etwa 70 % des Bedarfs).

Für diese beiden Nutzungen stellt die aus Solarstrahlung gewinnbare Energie mit 39 % den größten Anteil, gefolgt von Windenergie (34 %, einschließlich Offshore), Geothermie (16 %) und Biomasse (9 %). Die genannten Potenziale stellen aus heutiger Sicht einen ausreichend gesicherten Orientierungsrahmen für das auch technisch-umsetzbare Potenzial dar. Es ist in jedem Fall groß genug, um für regenerative Energien einen zentralen Beitrag zur Energieversorgung im Laufe des nächsten Jahrhunderts anzustreben. Gleichwohl existieren noch zahlreiche offene Fragen oder einige Beschränkungen, die Beachtung finden müssen.

Ohne im Detail auf die technologischen Langfristoptionen erneuerbarer Energieträger einzugehen, werden die Hauptstrategien im Folgenden kurz erläutert. Aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes und Praxiseinsatzes der verschiedenen Regenerativenergie-Technologien sind einheitliche Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und Praxisrelevanz aller Nutzungsoptionen noch nicht möglich. Die folgenden Zahlen zu den Anteilen einzelner Technologieoptionen beziehen sich auf das „Solare Langfristszenario“ von Nitsch und Luther (1997) sowie auf eigene Abschätzungen.

Neben der passiven Nutzung solarer Strahlung stellt die aktive Nutzung ein wichtiges Element für ein „Solarzeitalter“ dar. Die Technik solarthermischer Niedertemperatursysteme für Einzelgebäude ist weitgehend ausgereift, für Verbundsysteme besteht weiterhin Entwicklungsbedarf. Mittel- und Hochtemperatursysteme sind bisher kaum zum Einsatz gekommen. Im langfristigen Zeithorizont würde innerhalb eines Solarzeitalters der Großteil des Warmwassers mittels Niedertemperaturtechnologien bereit gestellt, aber auch im Raumheizungsbereich wären die Mitteltemperatursysteme umfassend vertreten. Hochtemperaturanlagen kämen auch dann in Deutschland nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Im Jahr 2050 ist für solarthermische Anlagen mit einem Anteil zwischen 10 und 20 % am Primärenergieverbrauch zu rechnen.

Die Erzeugung von Elektrizität mittels photovoltaischer Anlagen (PV-Anlagen) stellt einen weiteren wichtigen Bereich dar. Wie bei solarthermischen Anlagen handelt es sich um eine vornehmlich dezentral einzusetzende Technologie. Bis Mitte des nächsten Jahrhunderts könnte diese Technologie in Deutschland 5 bis 15 % des Primärenergieverbrauchs oder 15 bis 25 % des Stromverbrauchs decken.

Wasserkraft leistet bereits heute einen wichtigen Beitrag zur CO₂-freien Stromerzeugung. Bedeutsame Sprünge sind in Zukunft nicht mehr zu erwarten, jedoch stellt die Reaktivierung und Modernisierung von Laufwasserkraftanlagen ein leicht zu erschließendes Potenzial dar.

Im Jahr 2050 können damit 5 bis 10 % des Elektrizitätsbedarfs gedeckt werden.

Die Stromerzeugung mittels Wind hat aufgrund der entsprechenden politischen Weichenstellung in den letzten 10 Jahren einen fast beispiellosen Aufschwung erlebt. Aber auch in den folgenden Jahrzehnten stellt der Ausbau der Windenergienutzung eine der wichtigsten Strategien dar. Dabei werden das Binnenland und vor allem der Offshore-Bereich intensiv erschlossen sowie bestehende ältere Anlagen durch leistungsstärkere ersetzt werden. Mit Windenergieanlagen könnten damit 20 bis 30 % des Stromverbrauchs gedeckt werden.

Die Nutzung von Bio-Energien hat in den letzten Jahren in energiewirtschaftlichen Diskussionen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Auch hier bestehen erhebliche Potenziale, wobei es sich in diesem Fall um eine Reihe verschiedener Technologien und Ressourcen handelt. Der wesentliche Vorteil dieser Technologien besteht darin, dass ein chemischer Energiespeicher in fester oder flüssiger Form oder als Gas vorliegt und beliebig eingesetzt werden kann. Alle Optionen der Bio-Energie zusammen würden unter den Bedingungen eines Solarzeitalters mit rund 5 bis 15 % an der Stromerzeugung oder mit 10 bis 20 % am Primärenergieverbrauch beteiligt sein.

Eine weitere Hauptoption ist die Geothermie. Auch hier handelt es sich um verschiedene Nutzungsoptionen, beispielsweise um oberflächennahe Anlagen oder Sonden. Langfristig dürfte die Geothermie einen Anteil von 5 bis 15 % am Primärenergieverbrauch erreichen.

Nach dem Langfristszenario von Nitsch/Luther werden die fossilen Energieträger im Jahr 2050 noch mit 40 % zur Deckung des Primärenergiebedarfs beteiligt sein. Andere Szenarien weisen teils niedrigere, teils höhere Werte aus, insgesamt ist aber immer eine ähnliche Tendenz wie bei den oben genannten Strategien zu erkennen. Insofern ist in den folgenden Jahrzehnten mit einem weiterhin zunehmendem Einsatz erneuerbarer Energieträger zu rechnen, ohne dass die fossilen zunächst komplett ersetzt werden.

Völlig offen sind hingegen noch die möglichen Anteile weiterer Optionen erneuerbarer Energien, insbesondere von chemischen Energieträgern wie Methanol oder Wasserstoff oder des Imports von Strom, der auf Basis erneuerbarer Energieträger erzeugt wurde. Aufgrund der besseren Einstrahlungsverhältnisse im Sonnengürtel der Erde sind die Potenziale für REG-Strom oder -Wasserstoff grundsätzlich kaum begrenzt. Heute kann jedoch noch nicht beantwortet werden, ob überhaupt und wenn ja, welche der Technologien zum Einsatz kommen werden. Nitsch/Luther weisen in ihrem Szenario einen Anteil von rund einem Viertel an der gesamten Stromerzeugung aus, der durch REG-Stromimporte (aus PV- und solarthermischen Kraftwerken) bereitgestellt wird. Die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“ hat in ihren Szenarien zwar keinen Anteil von REG-Importstrom (Zeithorizont 2020) berücksichtigt, nennt aber die damit verbundenen Technologien als „notwendig“ für eine langfristige Strategie (Enquête 1995 S. 212ff).

Zudem könnten künftig Kurzzeitleistungs- und Langzeitarbeitsspeicher im Stromsektor wertvolle Aufgaben im Rahmen eines solar-gestützten Energiesystems übernehmen. Auch hier ist die mögliche Rolle noch nicht ausreichend geklärt.

Langfristig wird ein zukunftsfähiges Energiesystem weitaus dezentraler als heute aufgebaut sein und die Fähigkeit besitzen, deutlich flexibler auf äußere Änderungen zu reagieren als heute. Gerade aber die leitungsgebundene Energiewirtschaft wird in Zukunft ein noch stärkeres Gewicht erhalten. Daher ist bei heutigen Infrastrukturentscheidungen, die immer mindestens mittelfristiger, häufig aber auch langfristiger Natur sind, das Ziel in Betracht zu ziehen. Ansonsten können schnell Entscheidungen getroffen werden, die es entweder nicht erlauben das Ziel zu erreichen oder zu äußerst hohen Kosten führen (stranded investments etc.). Insbesondere Investition im Bereich der konventionellen und atomaren Kraftwerkstechnik sind unter dieser Prämisse zu beleuchten. Auch ist beim Einsatz neuer Technologien, also auch bei erneuerbaren Energien, darauf zu achten, dass andere ökosystemare Zusammenhänge nicht verletzt werden (beispielsweise Energiepflanzen in der konventionellen Landwirtschaft).

Im Vergleich zur fossilen Energietechnik stellt die betriebswirtschaftliche Kostensituation erneuerbarer Energieträger noch ein Haupthemmnis dar. Insbesondere bei PV-Anlagen ist eine Kostensenkung notwendig. Aufgrund der Eigenschaft von PV, im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken ein Massenprodukt zu sein, ist damit aber über Markteinführungsprogramme mittelfristig mit einer Kostensenkung zu rechnen. Insofern erfüllt das 100 000 Dächer-Programm des BMWi und das 200 Mio. DM-Programm zur Förderung erneuerbarer Energiequellen die Anforderung nach einer zukunftsorientierten Energiepolitik. Andererseits wird ohne Einbeziehung externer Kosten die Photovoltaik wohl nie die Stromerzeugungskosten konventioneller Kraftwerke erreichen. Eine an ökologischen Aspekten orientierte Erhöhung der Preise fossiler Energieträger ist damit ebenso notwendig für eine erfolgreiche Markteinführung von PV.

Für die anderen Hauptstrategien zur Einführung regenerativer Energien treffen diese Aussagen in ähnlicher Weise zu. Einerseits werden Kostensenkungen benötigt, die aufgrund des Massenproduktcharakters wahrscheinlich sind, und andererseits müssen die Preise fossiler Energieträger externe Kosten widerspiegeln.

8 Suffizienz

Und letztlich stellt sich die Frage „Wie viel ist genug?“. So wurde z. B. im Raumwärmebereich die mit technischen Mitteln erreichte Reduktion des spezifischen Wärmebedarfs durch die überproportionale Zunahme der Wohnfläche pro Kopf der Bevölkerung überkompensiert; die technischen Effizienzverbesserungen im PKW-Bereich durch Aerodynamik, motorische Maßnahmen, leichteren Werkstoffen etc. durch ständig größere Fahrzeuge konterkariert, von dem rapiden Wachstum der insgesamt zurückgelegten Fahrleistung ganz zu schweigen. Alle

diese Fragen hängen letztlich mit Fragen nach den Wertesystemen der Menschen zusammen. Wie weit diese Werte der Menschen in einer globalen, marktwirtschaftliche Demokratie in eine „positivere“ Richtung zu beeinflussen sind, bedarf noch vielfältiger psychologischer, soziologischer und politikwissenschaftlicher Forschung. Die dadurch erschließbaren Potenziale sind sicherlich in einer ähnlichen Größenordnung wie die technischen, und nur beide zusammen werden ein dauerhaftes Leben auf diesem Planeten ermöglichen.

9 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich über die vier Technologie-Optionen der Technologiebrücke sagen, dass die rationelle Energienutzung permanent und die erneuerbaren Energiequellen langfristig zunehmend die tragenden Stützen der Technologiebrücke des 21. Jahrhunderts sein werden. Sie verdienen – diese Dynamik beachtend – die höchste energiepolitische Aufmerksamkeit, die insbesondere der Energieeffizienz bisher nicht hinreichend geschenkt wurde. Ob und unter welchen Bedingungen die „neue“ Kernenergie und die CO₂-Abtrennung und -Speicherung eine längere oder nur eine Interims-Periode zu den Stützen der Technologiebrücke in Deutschland gehören werden, wird erst nach Jahren intensiver Forschung und Entwicklung beantwortbar sein.

Literatur:

BMU/UBA 1999: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des BMU und des UBA. J. Nitsch, M. Fischeck et al. Stuttgart, Berlin Veröffentlichung Dezember 1999. Zwischenbericht März 1999

DIW, EWI, FhG-ISI, Öko-Institut, Prognos, WI: Energiewirtschaftliche Voraussetzungen und energiepolitische Handlungsmöglichkeiten für eine zukunftsfähige Energieentwicklung in Deutschland. - Wissenschaftliche Begleitung des Energiedialogs –, 2000

Enquête-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages: Mehr Zukunft für die Erde. Ecnomica Verlag: Bonn 1995

Enquête-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Energie und Klima. Bd. 1-10. Bonn: Economica 1990

Jochem, E.: Long-term Potentials of Rational Energy Use- the Unknown Possibilities Reducing Greenhouse Gas Emissions, Energy & Environment (1991), Nr. 1, S. 31-44

Leitlinien zur Energiepolitik – Ergebnisse des Energiedialogs (www.bmwi.de), 2000

Nitsch, Luther et al.: Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung - Ein solares Langfristszenario für Deutschland. DLR/FHG-ISE. Stuttgart, Freiburg 1997

WELTERDÖLVORRÄTE UND IHRE REICHWEITE

F. Barthel und P. Kehrer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

1. Zusammenfassung

Die langfristige Verfügbarkeit von Erdöl steht im Mittelpunkt aktueller Diskussionen zur künftigen globalen Energieversorgung. Dieser fossile Energieträger, der eigentlich gespeicherte Sonnenenergie darstellt, trägt mit ca 40% nach wie vor die Hauptlast des Primärenergieverbrauchs der Welt und ist damit der wichtigste Energieträger der Weltwirtschaft.

Eine physische Verknappung von Erdöl hat es in der Vergangenheit nicht und wird es auch in unmittelbarer Zukunft nicht geben - sog. "Energiekrisen" waren politisch verursacht und kein Problem der globalen Verfügbarkeit, jüngste "künstliche Verknappungen" der OPEC zielten auf höhere Marktpreise. Im Gegenteil herrschte Jahrzehnte ein Überangebot mit der Folge entsprechend niedriger Preise. Die stets neu hinzugefundenen Reserven hielten mit der steigenden Förderung Schritt, glichen die durch Produktion entnommenen Mengen zumindest aus oder übertrafen diese, so dass die nachgewiesenen Erdölreserven über lange Zeit zunahmen und sich die "statische Reichweite" erhöhte.

Doch wie geht es weiter? Wird dieser Überfluss längerfristig in einen Mangel umschlagen, ist unsere Energieversorgung und unser Wohlstand gefährdet? Die Diskussion um die künftige Verfügbarkeit von Erdöl ist momentan kein sehr populäres Thema, wird auch von Politik und Wirtschaft nur ungerne geführt, weil es den politischen und wirtschaftlichen Frieden stört. Die gegenwärtige Debatte um künftige Energiestrategien, besonders auch in Deutschland, zielt schwerpunktmässig auf Umwelt- und Klimafragen sowie das Gefahrenpotential der Atomenergie und beinhaltet nicht eine mögliche Ressourcenproblematik fossiler Energie-Rohstoffe.

Die intensive aktuelle Diskussion in Politik, Medien und Fachkreisen zur Zukunft des Erdöls ist hinsichtlich ihrer Aussagen verwirrend, weil Fakten unzulässig vermischt, ungleiche Dinge verglichen werden, unterschiedliche Interessenlagen in Politik und Wirtschaft die Beurteilung tendenziös beeinflussen und verschiedenen Fachdisziplinen die Dinge naturgemäss aus ihrer Sicht unterschiedlich bewerten.

Dieser Vortrag versucht, dieses Thematik aus der Sicht einer neutralen Fachbehörde, basierend auf geowissenschaftlichen und lagerstättenkundlichen Kenntnissen und Erfahrungen, darzustellen. Die häufig zitierten "Reichweiten" und "Lebendauern" von Rohstoffen, bei denen Relationen zwischen Reserven und Produktion miteinander in Beziehung gesetzt werden,

sind eine statische Momentaufnahme in einem dynamischen System, in dem sich die Faktoren wie Reserven, Förderung, Verbrauch, Kosten, Preise und Technologien laufend verändern. Die Nichtbeachtung dieser Zusammenhänge führt zu falschen Schlussfolgerungen.

Erfahrungen und Kenntnisse aus Exploration und Produktion von Erdöl der Vergangenheit, die sich in sog. "Lernkurven" darstellen lassen, können Hinweise auf künftige Entwicklungen geben. Die daraus abgeleiteten Verfügbarkeitsprognosen haben als grobe Tendenz gemeinsam, dass in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts die maximale Produktion, möglicherweise im Zeitraum 2020-2030, an konventionellem Erdöl erreicht wird. Die Welt hat in den kommenden Jahrzehnten mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen Überfluss an Erdöl, das seinen Höhepunkt als Energieträger wohl in der ersten Hälfte de 21. Jahrhunderts überschreiten wird und seine Führungsposition im Energiemarkt an andere Energieträger abgeben wird. Ein die weitere Entwicklung der Weltwirtschaft hemmender Mangel ist gleichwohl nicht zu befürchten, da bedingt durch einen allmählichen längerfristigen Förderabfall sowie ausreichend vorhandener anderer fossiler Energieträger und regenerativer Energien ein gradueller Übergang zu einem anderen Energiemix möglich ist. Erdöl ist in allen seinen Anwendungen substituierbar.

Die Lichter werden, auch bei deutlichem Bevölkerungswachstum und steigendem Wohlstand in Entwicklungsländern, nicht ausgehen, sondern Intelligenz und Kreativität des Menschen, verbunden mit neuen Technologien, werden wie in der Vergangenheit auch in der Zukunft ein ausreichendes Angebot an Primärenergie bereitstellen. Allerdings wird die künftige Energieversorgung verstärkt von den Faktoren Akzeptanz, Umwelt, Klima, Kosten, Wirtschaftlichkeit, Substitution, Nachhaltigkeit und intelligenteren Lösungen durch neue Technologien bestimmt.

2. Einführung

Erdöl und Erdgas sind gegenwärtig die wichtigsten Energieträger. Zusammen decken sie über 60% des Welt-Primärenergiebedarfes (Abb. 1), in einzelnen Ländern und Regionen noch wesentlich mehr. Mit ca 40% ist das Erdöl der global führende Energie-Rohstoff, aber mit prozentual leicht abnehmender Tendenz, das Erdgas hat einen Anteil von ca 20% mit einer sehr dynamischen Entwicklung und zunehmendem Anteil am Verbrauch. Seit mehr als 100 Jahren wird Erdöl industriell gewonnen. Die Nutzung von Erdgas in grösserem Umfang setzte später ein, da die entsprechenden Märkte, bedingt durch eine aufwendige Infrastruktur mit hohen Vorlauf-Investitionen, sich erst allmählich entwickelten. Erdöl ist von grösster Bedeutung für Transportwesen, Wärmemarkt sowie als Rohstoff für die Chemie, Erdgas wird schwerpunktmässig für Wärme- und Stromerzeugung sowie ebenfalls als Grundstoff für die Chemie eingesetzt.

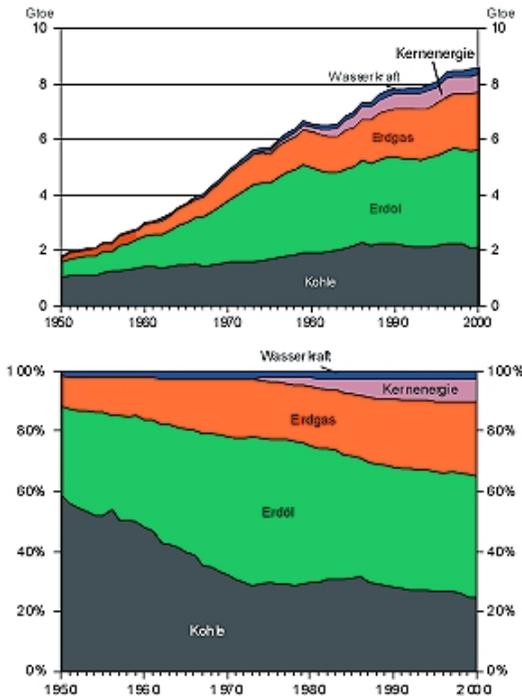


Abbildung 1: Entwicklung des Primärenergie-Verbrauchs weltweit absolut und anteilmässig nach Energieträgern (ohne Biomasse)

Erdöl und Erdgas sind endliche, nicht-erneuerbare Rohstoffe und gespeicherte Sonnenenergie, da ihre Entstehung organischen Ursprungs ist, das Leben aber auf Sonneneinstrahlung basiert. Der Verbrauch hat heute solche gewaltigen Dimensionen erreicht, dass die jährlich konsumierten Mengen an Erdöl und Erdgas einem Bildungszeitraum von einigen Millionen Jahren entsprechen.

Es werden konventionelle und nicht-konventionelle Erdöle und Erdgase unterschieden. Die heute geförderten Lagerstätten sind im wesentlichen konventionelle Kohlenwasserstoffe, an nicht-konventionelle Lagerstätten sind aber noch sehr grosse Vorräte gebunden. Deren künf-

tige Verfügbarkeit und Nutzung hängt wesentlich vom Energiepreinsniveau, Technologien, Akzeptanz und Klimadiskussionen ab. Konventionelles Erdöl und Erdgas sind vom Umfang der ursprünglichen Reserven und Ressourcen etwa gleich, die günstigere Situation bei Erdgas bei den heutigen Reserven und Ressourcen liegt in der schon wesentlich längeren Nutzung des Erdöls, während sich die Erdgasmärkte erst später entwickelten. In diesem Vortrag wird schwerpunktmässig das Erdöl behandelt.

Wie bereits vorher erwähnt wird zwischen konventionellem und nicht-konventionellem Erdöl unterschieden. Zum konventionellem Erdöl gehören Erdöl im klassischen Sinne (freifliessend, mit Abstand der grösste Anteil der heute geförderten Mengen) und Kondensat (NGL, Natural Gas Liquids; gasförmig in der Lagerstätte, flüssig an der Erdoberfläche). Zum nicht-konventionellem Erdöl werden Schweröl, Schwerstöl, Ölsande, Ölschiefer und Synthetisches Erdöl (aus Kohle oder Erdgas) gezählt.

3. Reserven und Ressourcen

Reserven sind zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Mengen an Erdöl einer Kohlenwasserstoff-Lagerstätte. Sie werden noch nach dem Grad der Nachweissicherheit in sichere, wahrscheinliche und mögliche Reserven unterteilt. Bei sich ändernden Rahmenbedingungen wie Erdölpreisen oder neuen Fördertechnologien ändert sich die Höhe der Reserven aus den schon bekannten Vorkommen. Gewinnbare Erdölreserven entsprechen etwa 30% bis 50% des gesamten Lagerstätteninhaltes an Erdöl (oil in place), je nach Fließfähigkeit und Lagerstättenparameter wie z.B. Porosität.

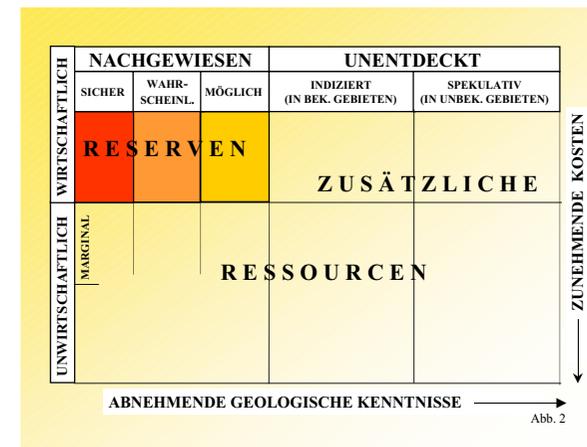


Abbildung 2: Reserven und Ressourcen

Ressourcen sind nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare, sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Mengen an Erdöl („yet to find“). Diese geologischen Möglichkeiten zur Entdeckung noch nicht nachgewiesener Mengen ergeben sich aus der Tatsache, dass die Erdölbildung an ein bestimmtes Temperaturfenster in der Erdkruste („oil window“) und an organische Ablagerungen in sog. Sedimentbecken gebunden ist. Damit kann das noch zu findende Potential „geologisch eingegrenzt“ werden. Von sehr gut erkundeten Sedimentbecken wird analog auf das Potential weniger explorierter Sedimentbecken geschlossen.

Das System Reserven und Ressourcen ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Durch mögliche steigende Gewinnungskosten bei höherem Energiepreinsniveau werden nachgewiesene Ressourcen und mit steigendem geologischem Kenntnisstand durch Exploration werden noch nicht nachgewiesene Ressourcen in Reserven überführt.

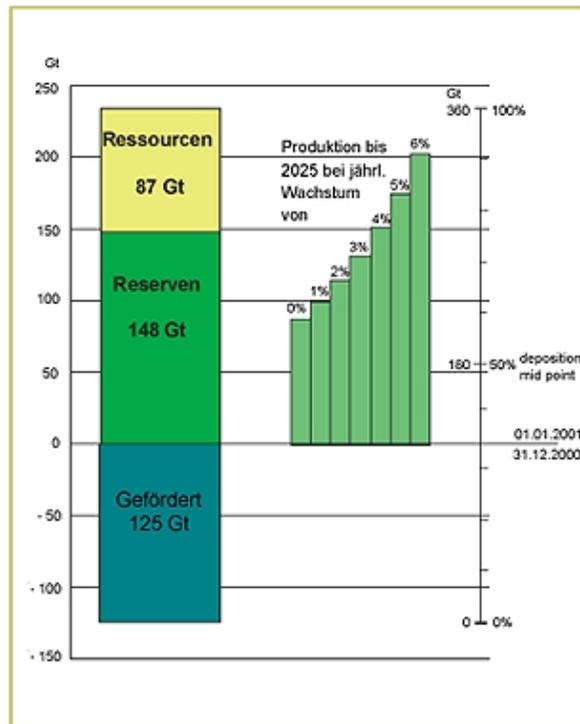


Abbildung 3: Gesamtpotential und Verfügbarkeit von konventionellem Erdöl weltweit

Nach Einschätzung der BGR lagen Ende 2000 das insgesamt zu fördernde Potential an konventionellem Erdöl bei ca 360 Gt (Millarden Tonnen), von denen 125 Gt bereits gefördert wurden, 148 Gt als Reserven vorliegen und ca 87 Gt Ressourcen, die noch in Reserven überführt werden können (Abb. 3).

Das insgesamt gewinnbare Potential, international auch unter dem Begriff EUR (Estimated Ultimate Recovery) bekannt, ist wie in Abbildung 4 dargestellt in den letzten beiden Jahrzehnten kaum noch gewachsen, obwohl die nachgewiesenen Reserven sich noch deutlich erhöht haben. Die einzelnen Punkte in dieser Abbildung beziehen sich auf Schätzungen unterschiedlicher Autoren, die von uns hindurchgelegte mittlere Kurve bewegt sich asymptotisch in die Horizontale. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist, dass mit steigendem Kenntnisstand und Erforschung der Erdkruste eine Begrenzung des Gesamtpotentials (EUR) deutlich wird und auch mit neuen Technologien und ggf. steigenden Energiepreisen dieses Niveau bei konventionellem Erdöl wegen der Endlichkeit der Ressourcen nicht mehr gesteigert werden kann.

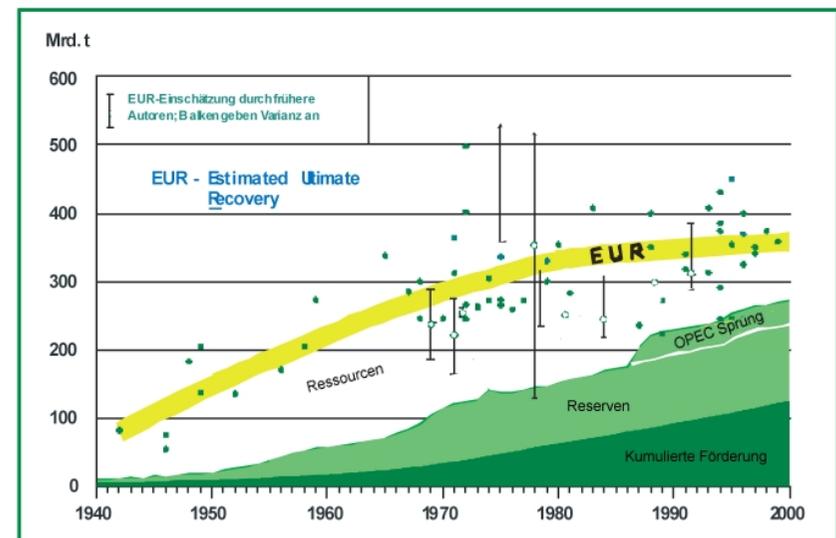


Abbildung 4: Konventionelles Erdöl 1940 – 2000
Entwicklung von EUR, Reserven und Förderung weltweit

Bezogen auf die Reserven von 148 Gt und die jährliche Förderung von ca 3,5 Gt ergibt sich eine „statische Reichweite“ von etwas über vierzig Jahren, unter Hinzurechnung der noch zu findenden Ressourcen von über sechzig Jahren. Der hierfür häufig gebrauchte Begriff „Lebensdauer“ ist insofern irreführend, weil es sich nur um eine statische Momentaufnahme in

einem dynamische Ssystem handelt, bei dem sich Faktoren wie Reserven, Förderung, Preise, Kosten und Technologien laufend ändern. Eine Lagerstätte bzw. eine Lagerstättenprovinz, ein Land oder die gesamte Welt kann aus lagerstättendynamischen Gründen auch nicht auf gleichem Förderniveau bis zur totalen Erschöpfung produzieren, sondern ist durch einen lang anhaltenden asymptotischen Abfall gekennzeichnet.

Aus Erfahrung einzelner Erdölfelder oder ganzer Erdölprovinzen ist bekannt, dass nach Förderung der Hälfte der gewinnbaren Menge, dem sog. „depletion mid point“, zwangsläufig ein Förderabfall einsetzt. In Abbildung 3 ist eine jährliche Fördersteigerung von 0% bis 6% über eine Dauer von 25 Jahren berechnet. Die höheren Produktionssteigerungen dürften dabei unrealistisch sein, da sie neben den Reserven schon einen wesentlichen Teil der Ressourcen in Anspruch nehmen würden. Auch bei gleichbleibendem Förderniveau wäre der bei 180 Gt liegende „depletion mid point“ schon in der Hälfte dieses 25-Jahreszeitraumes erreicht.

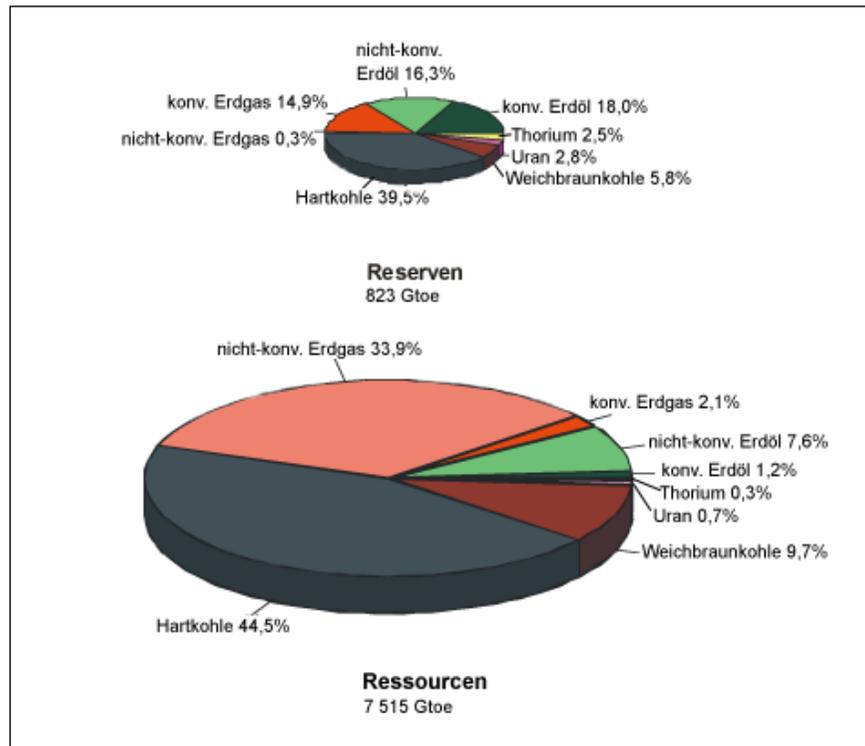


Abbildung 5: Reserven und Ressourcen von Energie-Rohstoffen

Sensationelle grosse neue Erdölfelder sind nicht mehr zu erwarten, da die Sedimentbecken und die Bildungsbedingungen weitgehend bekannt sind. Eine wesentliche Steigerung des Gesamtpotentials (EUR) wäre möglich, wenn der Entölungsgrad bekannter Lagerstätten über höhere Energiepreise, die höhere Produktionskosten erlauben, und die damit verbundenen verbesserten Fördertechnologien gesteigert werden könnte.

In Abbildung 5 ist der Anteil von Erdöl an den Reserven und Ressourcen nicht erneuerbarer Energie-Rohstoffe dargestellt. Während das konventionelle Erdöl bei den Reserven noch einen Anteil von 18,0% hat, sinkt dieser Wert bei den Ressourcen wegen der starken Stellung von Kohle und nicht-konventionellem Erdgas (überwiegend Gashydrate) auf nur noch 1,2%.

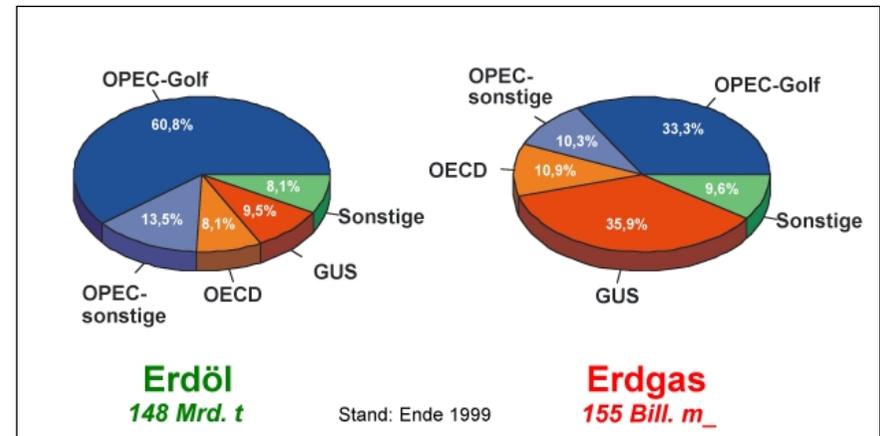


Abbildung 6: Verteilung der Erdöl- und Erdgasreserven nach wirtschaftspolitischen Gruppen

Die Verteilung der Erdölreserven nach wirtschaftspolitischen Gruppen ist in Abbildung 6 dargestellt, die starke Stellung der OPEC mit fast 65% kommt deutlich zum Ausdruck. Länder mit Erdölreserven von über 1 Gt zeigt Abbildung 7, ca. 70% der Welterdölreserven liegen innerhalb einer „strategischen Ellipse“.

In Abbildung 8 ist die weltweite Entdeckung von Erdöl im 5-Jahresmittel dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die grössten Felder in den 40-, 50- und 60-iger Jahren gefunden wurden. Der Zuwachs der Reserven der letzten beiden Jahrzehnte ist zu ca 75% auf Höherbewertung vorhandener Lagerstätten zurückzuführen.

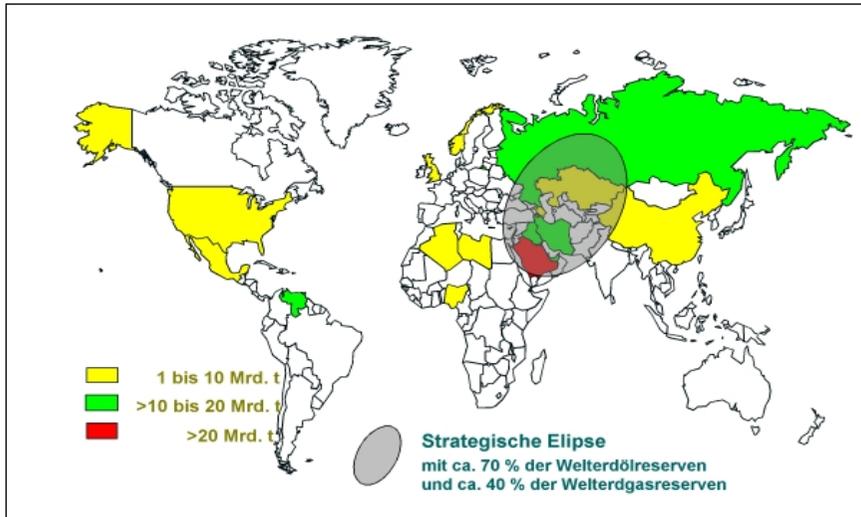


Abbildung 7: Länder mit Erdölreserven > 1 Mrd. t

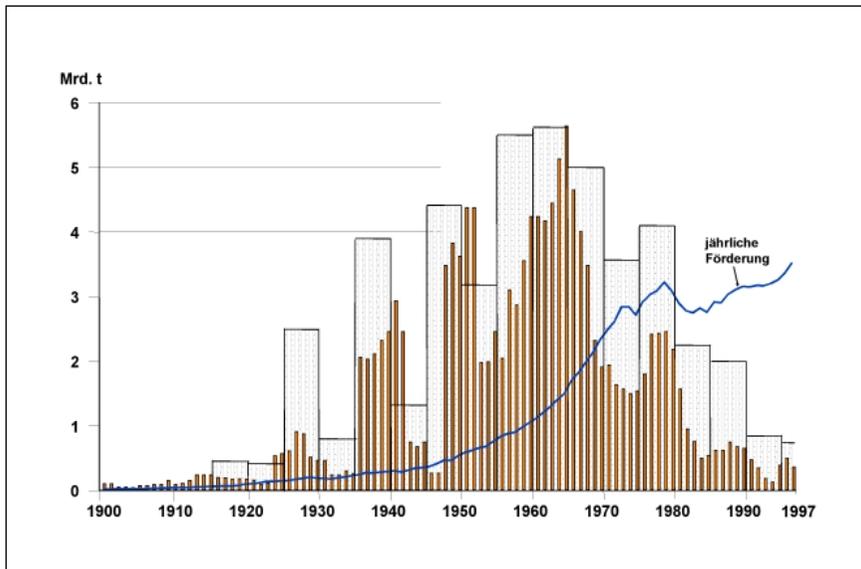


Abb. 8: Weltweite Entdeckung von Erdöl (im 5-Jahresmittel) und Erdölförderung seit 1900 die dünnen dunklen Säulen markieren den Anteil durch giant, super und mega giant Erdölfelder (aus HILLER 1999 nach MASTERS et al. 1994, MILLER 1997, CAMPBELL 1997 und BGR-Datenbank)

4. Lernkurven

Aufgrund der Erfahrung von Exploration (Aufsuchung, Erschließung) und Förderung (Gewinnung) von Erdöl ergeben sich charakteristische „Lernkurven“ oder „Erfahrungskurven“, die Hinweise auf das insgesamt zu findende bzw. zu fördernde Erdöl ergeben. Bei der Exploration werden Aufwand gegen Erfolg geplottet, wobei der Aufwand durch die Zahl der Explorationsbohrungen (bzw. Kosten) und der Erfolg durch die kumulierten gefundenen Reserven dargestellt wird. In Abbildung 9 sind drei Beispiele unterschiedlicher Größenordnungen dargestellt, und zwar bezogen auf ein Sedimentbecken, eine Lagerstättenprovinz und eine ganze Region. Die Kurven steigen zunächst steil an, da zuerst die grösseren Felder gefunden werden und flacht dann ab, weil die Grösse der zugefundenen Felder und damit der Reserven zuwachs abnimmt. Wenn alle wirtschaftliche Felder gefunden sind, nimmt die Kurve einen asymptotischen Verlauf und die Exploration endet wegen mangelnder weiterer Erfolge. Diese Kurve, international auch „creaming curve“ genannt, bildet das insgesamt gewinnbare Reservenpotential einer Lagerstätte, Lagerstättenprovinz, Sedimentbeckens, Regions oder der Welt ab.

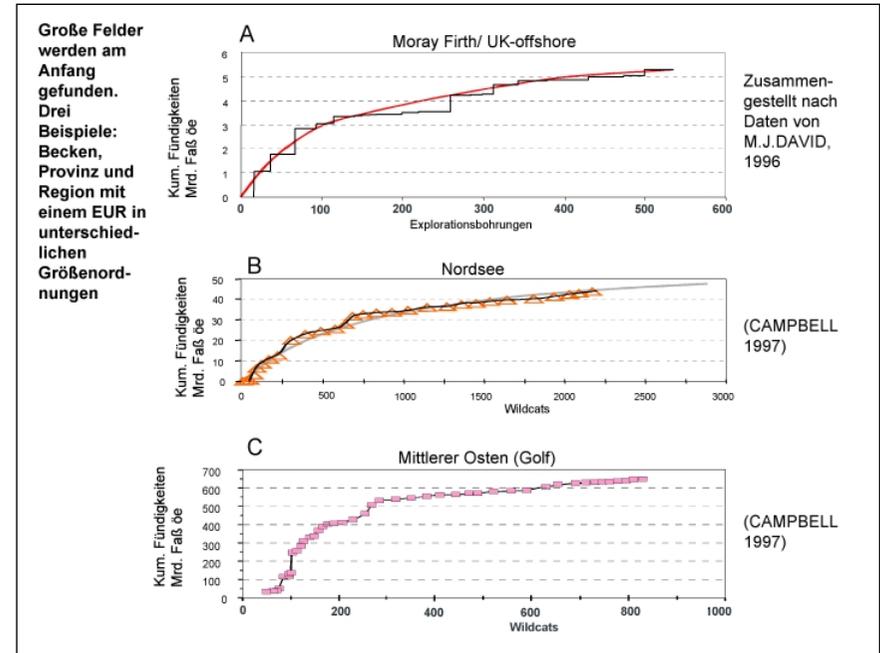


Abbildung 9: Drei Erfahrungskurven bei der Exploration grosser Felder

Die Jahresproduktion eines Feldes über der Zeit ergibt typischerweise eine Art Glockenkurve, normalerweise mit einem steileren Anstieg und einem längeren asymptotischen Abfall. In Abbildung 10 ist die Förderung der USA von 1900 bis heute und projiziert bis 2050 dargestellt. Der amerikanische Geologe Hubbert prognostizierte 1956, dass die USA ihren Förderhöhepunkt etwa 1965 bis 1970 erreichen würde und wurde damals dafür, auch in Fachkreisen, belächelt. Tatsächlich wurde das Fördermaximum 1970 erreicht, weil der „depletion mid point“ überschritten wurde und die Produktion zwangsläufig Lagerstätten bedingt zurückgehen musste. Auch die modernste den USA zur Verfügung stehende Fördertechnologie und mehrere Energiepreiserhöhungen konnten diesen Abfall nicht verhindern. Damit ist die These von Wirtschaftsforschern widerlegt, die künftige Verfügbarkeit von Erdöl hänge nur von Technologie und Kapital ab. Es gibt zahlreiche weitere Beispiele für einzelne Felder, Lagerstättenprovinzen oder Regionen in einem reiferen Förderstadium, die einen ähnlichen Förderverlauf zeigen.

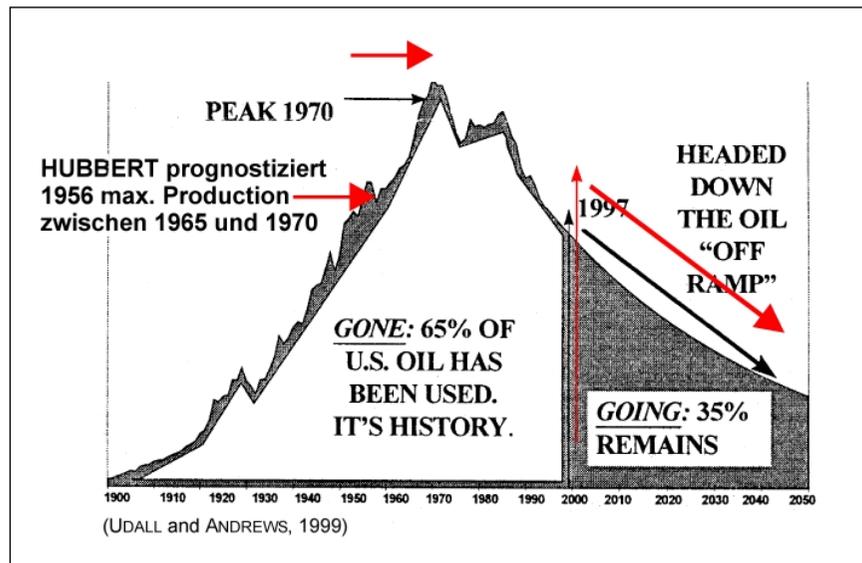


Abbildung 10: U.S. Erdölproduktion 1900 bis 2050

5. Ausblick

Aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen und den Vorstellungen über das gesamte Potential an förderbarem Erdöl ist in Abbildung 11 ein mögliches Förderszenario bis 2050 dargestellt. Die Welt-Produktion würde demnach ihren Höhepunkt im Zeitraum 2010 bis 2020 mit 4,5 bis

5,0 Gt erreichen. Eine Auswahl verschiedener Prognosen für die Erdölproduktion bis 2150, z.T. auch unter Einbeziehung nicht-konventioneller Erdöle, ist in Abbildung 12 dargestellt. In der Mehrzahl der Fälle wird ein Maximum der Produktion in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts erreicht. In der Abbildung 13 wird ein von der BGR entwickeltes Szenario, ebenfalls bis 2150, dargestellt. Auch die Einbeziehung eines bedeutenden Anteiles an Erdöl aus Schweröl, Schwerstöl und Ölsanden kann den längerfristigen Förderabfall nicht verhindern, sondern nur verlängern.

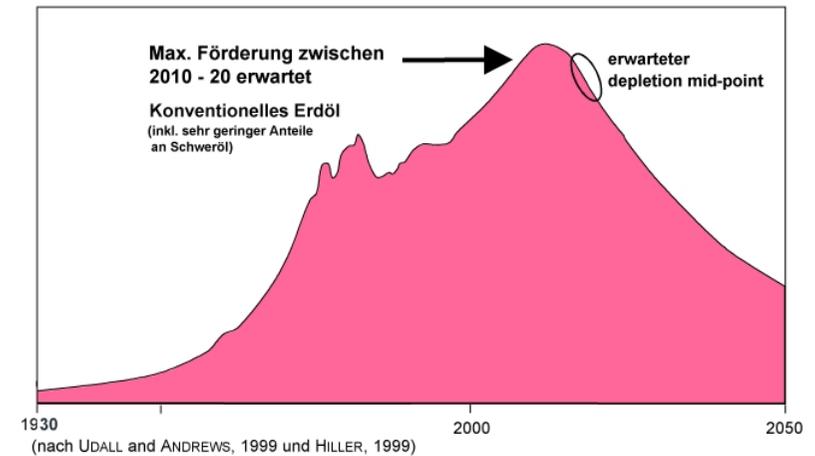


Abbildung 11: Weltweite Erdölproduktion 1930 - 2050

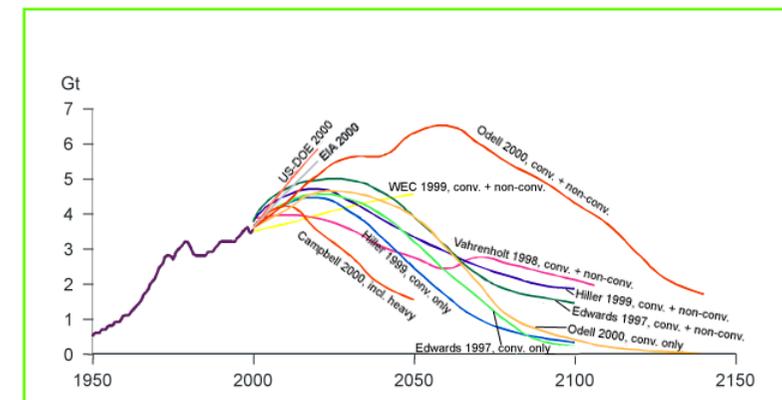


Abbildung 12: Auswahl verschiedener Prognosen für die Erdölproduktion

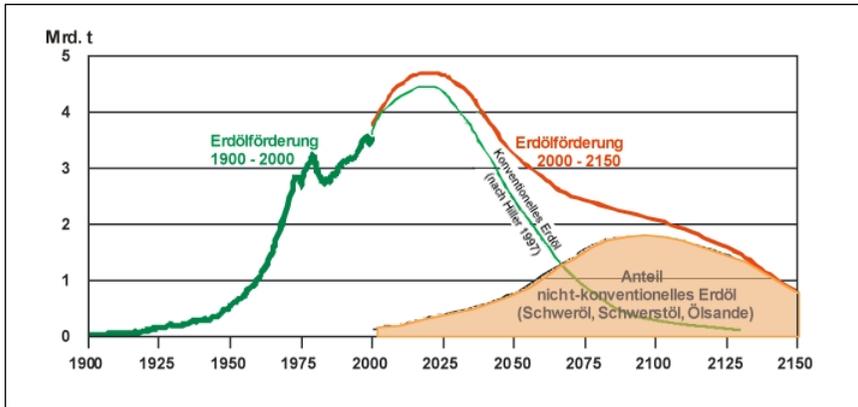


Abbildung 13: Weltweite Erdölförderung 1900 – 2150
Rückblende und Versuch eines Ausblicks

Ein von Shell vorgelegtes Szenario (Vahrenholt 1998) der Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs zeigt in 2060 einen Anteil von regenerativen Energien von über 50%. Erdöl ist in allen seinen Anwendungen wie Transport, Wärme oder Rohstoff für die Petrochemie ersetzbar.

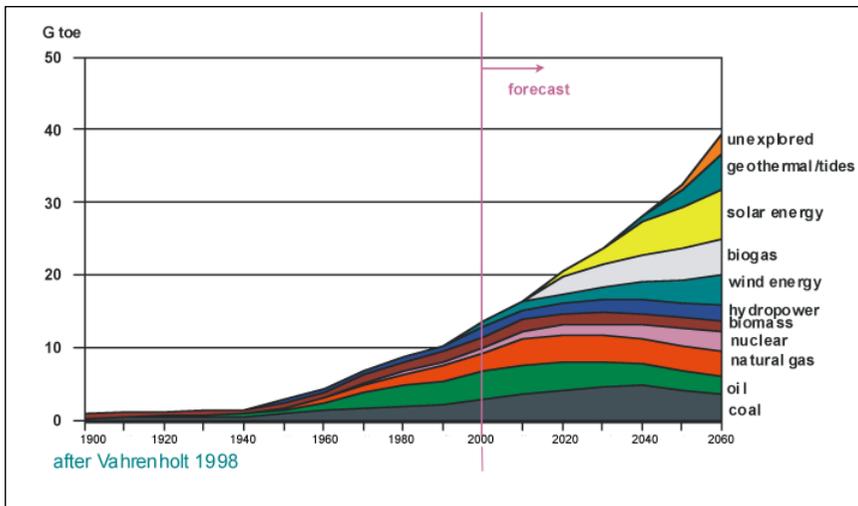


Abbildung 14: Entwicklung des Primärenergie-Verbrauchs weltweit

Ein möglicher Lastwechsel der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas in Beziehung zur Entwicklung der Weltbevölkerung ist in Abbildung 15 dargestellt. Erdgas wird zunächst einen Teil der von Erdöl gestellten Energie übernehmen, dann aber in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts auch das Fördermaximum überschreiten. Wegen der günstigen Situation der Kohle hinsichtlich Reserven und Ressourcen sind in dem dargestellten Zeitraum noch keinerlei Grenzen zu erkennen.

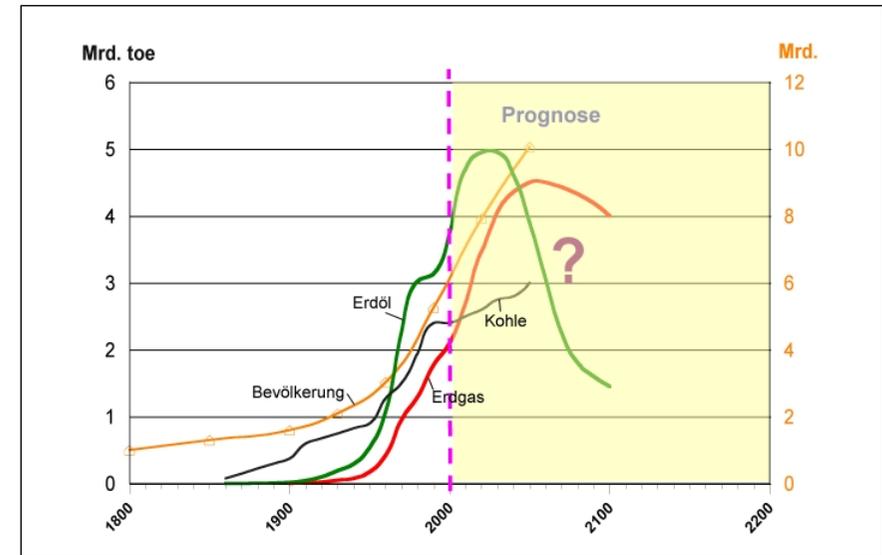


Abbildung 15: Entwicklung des Energieverbrauchs und der Weltbevölkerung

Das sog. Erdöl-Zeitalter wird keineswegs dadurch enden, dass alles im Untergrund förderbare Erdöl gewonnen wurde. Vielmehr werden Fragen wie Umwelt, Klima, Akzeptanz, Einsparungen und steigende Förderkosten, die intelligentere Lösungen mit anderen Energieträgern möglich machen, diese kurze Episode in der Geschichte der Menschheit beenden. Erdöl als Rohstoff in kleineren Mengen wird noch in Jahrhunderten gefördert werden. Kreativität des Menschen wird zu einem neuen Energiemix jenseits der Kohlenwasserstoffe Erdöl und Erdgas führen. Energie ist ausreichend vorhanden und der Welt werden nicht die Lichter ausgehen, auch angesichts steigender Weltbevölkerung und zunehmenden Wohlstands.

Ausgewählte Referenzen

BGR: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen,
in: Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, XXIV, 398 S., Schweizerbart, Stuttgart 1998

K. Hiller & P.Kehrer: Erfahrungskurven bei der Suche nach und Förderung von Erdöl,
in: Erdöl, Erdgas, Kohle, **116,9**, 427 – 430, Hamburg 2000

Danksagung

Herr Dipl.Geol. Hilmar Rempel von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
war freundlicherweise bei der Gestellung von Daten und Abbildungen behilflich.

**ENERGIEBEDARF UND ENERGIEBEREITSTELLUNG
FORDERUNGEN UND BEITRÄGE AUS DER WISSENSCHAFT,
INSBESONDERE ZUR ALTBAUSANIERUNG**

Jochen Fricke

Physikalisches Institut der Universität Würzburg und
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)

1. Einleitung

Im Zusammenhang mit der Rentendiskussion wird zurecht mit der Einhaltung des Generationenvertrages argumentiert. Dieser ungeschriebene Vertrag muss natürlich auch im Energiebereich Gültigkeit besitzen.

Der Wissenschaftsrat hat hierzu in seiner Stellungnahme von 1999 zur Energieforschung zehn Thesen verabschiedet, die ich hier in zwei Punkten in Erinnerung rufen möchte:

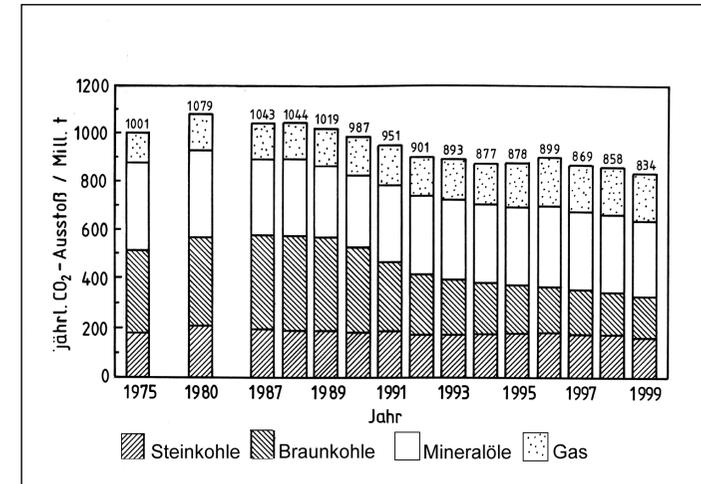
"Vorsorge im Bereich der Energieversorgung ist eine Aufgabe von herausragender Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit jeder Gesellschaft."

Für einen Wissenschaftler ist wohl einsichtig, dass die fossilen Ressourcen begrenzt sind, und dennoch glauben viele, einen Anspruch auf jedwede Menge billiger Energie zu haben. Und Kohle, Öl und Gas sind heute viel billiger als vor einigen Jahrzehnten, wenn man die Kaufkraft unserer Währung berücksichtigt. Die Vorsorge für unsere Kinder und Kindeskinde gebietet den sparsamen Umgang mit unseren fossilen Ressourcen, also auch den rationellen Energieeinsatz. Vorsorge bedeutet aber auch die Weiterentwicklung und Nutzung von neuen Energiequellen, wie Windenergie und Solarenergie.

"Die derzeitige Energieversorgung ist eine der wesentlichen Quellen von Umweltbelastungen und die Verbrennung fossiler Energieträger Hauptursache der anthropogenen Freisetzung von Treibhausgasen".

Auch die Begrenzung von Schadstoffströmen gebietet einen sparsamen Umgang mit Kohle, Öl und Gas. Die derzeitige CO₂-Konzentration in der Atmosphäre liegt bereits bei 370 ppm (gegenüber 280 ppm vor der Industrialisierung) und steigt absehbar schnell weiter. Im Kyoto-Protokoll 1997 haben 38 Industrienationen zugesagt, ihre CO₂-Emissionen zu reduzieren; Deutschland hatte sich bis 2012 eine Senkung der CO₂-Emissionen um 21% gegenüber 1990 vorgenommen. Bis 1999 sind die energiebedingten CO₂-Emissionen um ca. 15% zurückgegangen (s. Abb. 1), wobei allerdings auf den Zusammenbruch der Wirtschaft in den Neuen Bundesländern nach der Wiedervereinigung rund 10% entfallen (zu erkennen insbesondere

am Rückgang des Braunkohle-Einsatzes); wirklich eingespart wurden also nur rund 5%. Um das 21% - Ziel zu erreichen, müssen noch gut 50 Mio. Tonnen CO₂ an jährlichen energierelevanten Emissionen eingespart werden, was durchaus schwierig sein wird, zumal die deutsche Wirtschaft ja weiter wächst.



**Abbildung 1: Jährliche energiebedingte CO₂-Emissionen in Deutschland
(nach BWK 52, 34 (2000))**

Auch wenn der Weltklimagipfel in Den Haag kein Resultat gebracht hat, denke ich, es besteht weitgehender Konsens, an dem 1997 gemachten Commitment für Deutschland keine Abstriche zu machen. Dann aber bleibt die Frage, wie denn unsere CO₂-Emissionen weiter reduziert werden sollen.

2. CO₂-Einsparungen bei der Stromversorgung

Wenden wir uns zunächst dem Bereich Strom zu. In Tab. 1 ist die Stromerzeugung aus Kohle, Öl und Gas sowie Kernbrennstoff, Laufwasser, Wind, Müll und Photovoltaik im Jahr 1999 aufgelistet.

Rund zwei Drittel unserer Stromversorgung resultierten 1999 aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, 31% stammt aus Kernreaktoren und ca. 5% entfielen auf Laufwasser, Wind und Müll plus Biomasse. Für das Jahr 2012 wollen wir von einem ähnlichen Gesamtstromverbrauch ausgehen, was im Hinblick auf die wachsende Wirtschaft eine eher optimistische Annahme ist.

	elektrische Energieversorgung 1999	elektrische Energieversorgung 2012	
Kohle Öl Gas	64%	57%	Reduktion CO ₂ -Ausstoss: 40 Mio. t
Kernenergie	31%	31%	erzeugte Strommenge konstant entspricht 170 Mio. t CO ₂
Laufwasser	4%	4%	kaum Steigerung möglich
Wind	1%	5.1%	10.000 Offshore-Windanlagen à 1.5 MW
Müll Biomasse	0.5%	2.9%	gesamten Müll verbrennen; Biomasse von 4.000 km ²
Solar	0.007%	0.02%	Zuwachs install. Fläche + (15 – 18)% pro Jahr
Gesamt	100%	100%	Stromverbrauch konstant

Tabelle 1: Elektrische Energieerzeugung 1999 und Prognose für 2012 unter der Prämisse, dass die Gesamtzeugung und der absolute Kernenergiebeitrag konstant bleiben und Windenergienutzung und Müll/Biomasseinsatz deutlich erhöht werden.

Ebenso soll der absolute Beitrag der Kernenergie konstant gehalten werden (der im übrigen einer vermiedenen Menge von ca. 170 Mio. Tonnen CO₂ entspricht). Hier wird dafür plädiert, dass abgebrannte Kernbrennstäbe ohne Wiederaufarbeitung rückholbar untertag eingelagert werden, um zukünftigen Generationen eine Rückgriffsmöglichkeit auf die riesigen, in den Brennstäben enthaltenen Energiemengen zu geben, wenn die Energieversorgung anders nicht mehr gedeckt werden kann. Wir sollten uns dem Faktum nicht verschliessen, dass abgebrannte Kernbrennstäbe kein Müll, sondern Wertstoffe sind.

Der Beitrag von Laufwasserenergien wird sich nur unwesentlich steigern lassen.

Die Nutzung der Windenergie – in Deutschland durchaus eine Erfolgsstory – brachte Ende 2000 bereits 2% und könnte im Jahr 2012 einen Beitrag von 5% oder sogar mehr liefern, vorausgesetzt, die technisch nicht einfache Offshore-Technik entwickelt sich wie erwartet. Allerdings müssten zu den bereits installierten ca. 9000 Windenergieanlagen auf dem Festland noch rund 10000 am Meeresboden verankerte Windmühlen à 1,5 bis 2,5 MW hinzukommen. Die Attraktivität ist hier die hohe Windgeschwindigkeit, welche bekanntlich mit der dritten Potenz in die Leistung eingeht. Doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet demnach achtfache Leistung. Aus diesem Grund ist es auch volkswirtschaftlich nicht zielführend, Windmühlen in Würzburg oder München zu installieren, auch wenn sich dies betriebswirtschaftlich aufgrund der staatlichen Förderung rechnet. Wenn wir im Binnenland die Windenergie im grösseren Stil nutzen wollen und den Verlauf der Isoventen beachten, dann sollte dies in den Mittelgebirgen oder den Voralpen geschehen. Aus Gründen der Objektivität sei aber angemerkt, dass Windenergiestrom von Binnenland-Standorten weniger teuer als photovoltaisch erzeugte Elektrizität ist.

Müll und Biomasse könnten 2012 knapp 3% des Strombedarfs decken; allerdings muss der Müll dann auch verbrannt und nicht deponiert oder kompostiert werden. Ebenso ist die energetische Nutzung der Biomasse von 400.000 ha erforderlichlich.

Der Photovoltaikbeitrag wird zwar relativ gesehen drastisch weiter anwachsen, absolut gesehen spielt die Photovoltaik aber auch 2012 noch eine untergeordnete Rolle. Zum 100.000 Dächerprogramm in Deutschland ist u.a. zu bemerken, dass eine grenzüberschreitende, EU-weite Betrachtungsweise, d.h. zum Beispiel eine Installation in Italien oder Spanien anstatt in Deutschland ca. die eineinhalbfachen Stromerträge brächte. Auch wäre eine Aufteilung etwa in zehn 10.000 Dächerprogramme mit zeitlicher Staffelung im Hinblick auf die Innovation deutlich zu bevorzugen. Dennoch ist festzuhalten, dass die Photovoltaik eine Technik mit grossem Potential in der Zukunft ist, vorausgesetzt Forschung und Entwicklung insbesondere bezüglich Dünnschicht-Photovoltaik werden verstärkt staatlich weitergeführt. Dass die Photovoltaik sich im Inselbetrieb schon heute betriebswirtschaftlich rechnet, brauche ich hier nur anzumerken.

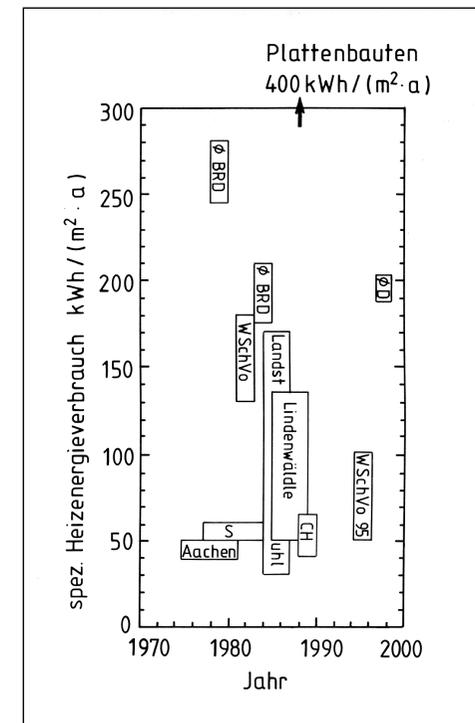


Abbildung 2: Entwicklung des Heizenergieverbrauchs in Deutschland

Die Quintessenz aus unserem Stromversorgungsszenario ist, dass der Einsatz der fossilen Energieträger zur Stromerzeugung deutlich verringert und damit der CO₂-Ausstoss um ca. 40 Mio. Tonnen reduziert werden könnte.

3. CO₂-Einsparungen bei der Wärmeversorgung in Gebäuden

Wenden wir uns nun dem Bereich Wärmeversorgung zu. Ca. ein Drittel unseres Endenergiebedarfs fällt für die Gebäudeheizung an. Entsprechend wurden hier 1998 laut Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) rund 270 Mio. Tonnen CO₂ freigesetzt. Hier existiert bei einem derzeitigen spezifischen Verbrauch von fast 200 kWh/Jahr und m² Wohnfläche in Deutschland ein besonders grosses Potential zur Einsparung (Abb. 2).

So sollte eine Verbesserung des derzeitigen Dämmstandards von 23 Mio. Altbauwohneinheiten auf die Vorgaben der Wärmeschutzverordnung von 1995 den Heizenergieverbrauch auf ein Drittel und die CO₂-Emissionen um 140 Mio. Tonnen reduzieren können. Allerdings ist diese energetische Renovierung des Gebäudebestands nicht in einem Sprung möglich. Die Kosten liegen immerhin bei etwa 30.000 DM/ Wohneinheit. Würden 500.000 WE pro Jahr saniert, fielen Kosten von 15 Mrd. DM/a an. Der CO₂-Ausstoss liesse sich dann bis 2012 um 40 Mio. t/a verringern. Ein weiteres Plus wäre die Schaffung von etwa 150.000 Dauerarbeitsplätzen.

Es gibt eine ganze Reihe von Möglichkeiten, eine solche Innovationswelle anzuschieben:

staatliche Förderung
steuerliche Anreize
Renovierungsleitfaden (Internet)
Energiepass
Energieverbrauchs-Monitoring mit Visualisierung
stringente Dämmvorschriften auch für Altbau
Erhöhung des Energiepreises
F&E neue Dämmsysteme (Beispiel ZAE Bayern)

Tabelle 2: Mögliche Massnahmen zur Reduktion des Heizenergieverbrauchs

Besonders effizient wäre ein direkter staatlicher Zuschuss – wie man von der äusserst erfolgreichen Förderung der solaren Warmwasserkollektoren mit 1500 DM pro Anlage (bei Kosten von ca. 10.000 DM) weiss. Hier werden mit 1 DM staatlichen Zuschusses von privater Seite Zukunftsinvestitionen von etwa 6 DM realisiert.

Die Techniken zur Altbausanierung reichen von der Verbesserung der Wärmedämmung bis hin zur Nutzung der Solarenergie. Das ZAE Bayern hat hierzu mehrere Verbundprojekte initiiert, in denen in enger Kooperation mit der Industrie diesbezügliche Entwicklungsarbeiten bis hin zum Demo-Objekt geführt werden.

3.1 Vakuumdämmungen

Eine attraktive Neuentwicklung ist die thermische Vakuumisolation für den Einsatz in Gebäuden. Derartige Vakuumisolationspaneele (VIP) mit langer Lebensdauer enthalten einen nanostrukturierten, hochporösen Stützkörper aus Kieselglaspulver und sind mit einer weitgehend diffusionsdichten Mehrschichtfolie umhüllt. Der Stützkörper nimmt den Atmosphärendruck von 10⁵ N/M² auf. Die Wärmeleitfähigkeit des auf technisches Vakuum evakuierten Pulverkörpers liegt bei ca. 4·10⁻³ W·m⁻¹·K⁻¹ und ist damit fast zehnmal geringer als in Styropor (Abb. 3). Sie wird von der Festkörperwärmeleitung dominiert (Beitrag ca. 3·10⁻³ W·m⁻¹·K⁻¹). Der Infrarot-Strahlungswärmetransport ist rein diffusiv und hat einen Anteil von nur etwa 1·10⁻³ W·m⁻¹·K⁻¹. Dies wird durch Zusatz von IR-Trübungsmitteln wie Eisenoxid, Siliziumcarbid oder Kohlenstoff ZUM SiO₂-Pulver erreicht, welche IR-Strahlung streuen und absorbieren.

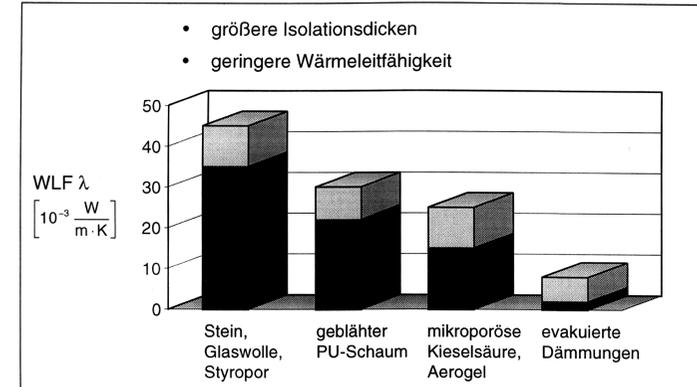


Abbildung 3: Evakuierte Dämmungen mit etwa zehnfach grösserer Dämmwirkung als Styropor bei vergleichbarer Dicke

Gaswärmeleitung in den Poren setzt erst ein, wenn der Druck 20 mbar wesentlich übersteigt (Abb. 4). Für Drücke unter diesem Wert ist die Knudsen-Zahl gross gegen 1, d.h. es erfolgen praktisch keine Teilchen-Teilchen-Stösse sondern fast nur Stösse der Restgasteilchen mit dem nanostrukturierten Pulverskelett. Bei Anstieg des Restgasdruckes auf 1 bar – etwa bei Perfo-

ration der Hülle – steigt die Wärmeleitfähigkeit auf ca. $20 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ an, ist somit also immer noch deutlich geringer als jene von konventionellen Dämmmaterialien.

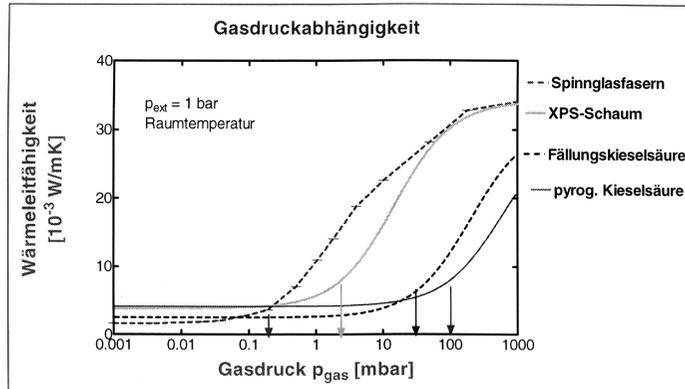


Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Füllmaterialien für VIPs als Funktion des Luftdrucks

Als Füllmaterialien kommen besonders feinteilige Pulver infrage mit völlig amorphen ungeordneten Strukturen und meist grossen massenspezifischen Oberflächen:

- pyrogene Kieselsäure wird in einem Flammprozess hergestellt und findet bislang Einsatz u.a. als Füllstoff in Autoreifen oder als Verdickungsmittel in Farben;
- SiO_2 -Aerogele werden in einem nass-chemischen Sol-Gel-Prozess mit anschliessender schonender Trocknung hergestellt.

Rund 50 m^2 Vakuumsulationspaneele sind bereits in die Fassade des neuen ZAE-Experimentiergebäudes installiert. Mit Dicken von etwa 2 cm lassen sich k-Werte von ca. $0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ realisieren, wie man sie für Niedrigenergiehäuser benötigt. Für Passivhäuser ergeben VIPs von 4 cm Dicke platzsparend die gewünschten k-Werte von etwa $0.1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}$, während mit konventionellen Dämmmaterialien Dicken von 40 cm erforderlich sind. In einem vom ZAE Bayern koordinierten Forschungsprogramm, welches im Rahmen der High-Tech-Initiative Bayern mit einer Reihe von Industriepartnern durchgeführt wird, werden einige 1000 m^2 VIPs beispielsweise als Aussenwanddämmung, Kerndämmung, Innendämmung, Fussbodendämmung, Tüрдämmung und in Glasfassaden zwischen Scheiben eingesetzt.

3.2 Schaltbare Wärmedämmung

Man bringt in ein Vakuumpaneel mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $3 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ eine geringe Menge Wasserstoffgas gezielt ein. Die Gaswärmeleitfähigkeit von H_2 beträgt in der verwendeten Glasfaserfüllung bei 50 mbar ca. $150 \cdot 10^{-3} \text{ W/(mK)}$. Damit liegt die Wärmeleitfähigkeit im gefluteten Zustand um den Faktor 50 höher als bei einem Gasdruck unter 0.01 mbar.

Die zum Schalten benötigte geringe Wasserstoffmenge wird durch elektrisches Heizen eines Metallhydrids freigesetzt. Dieses Material befindet sich in einem kleinen Behälter im Paneel. Die spezielle Wärmeisolation des Behälters ermöglicht es, die elektrische Heizleistung auf wenige Watt pro Quadratmeter Paneelfläche zu begrenzen. Kühlt sich das Hydrid ab, so wird das Wasserstoffgas reabsorbiert, und der dämmende Zustand des Paneels ist wiederhergestellt.

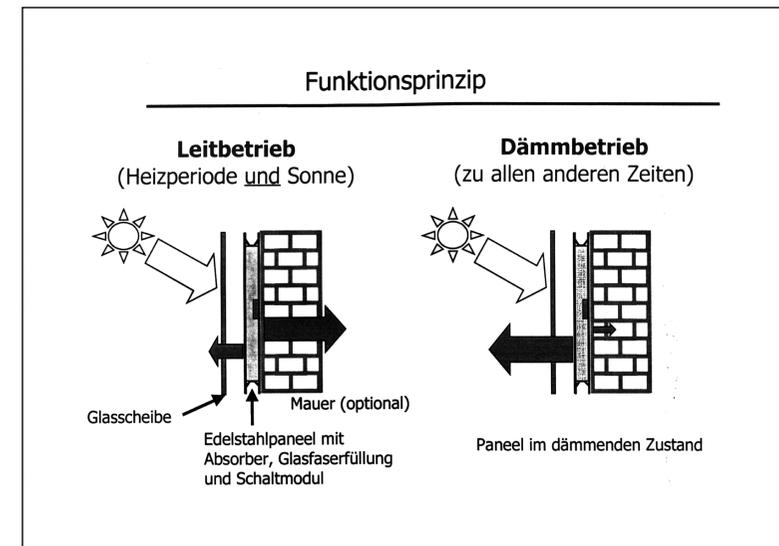
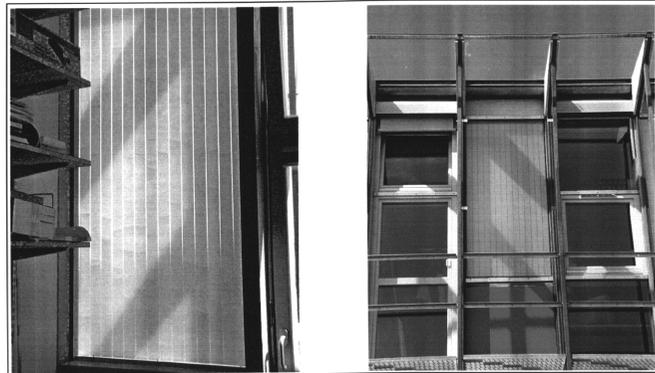
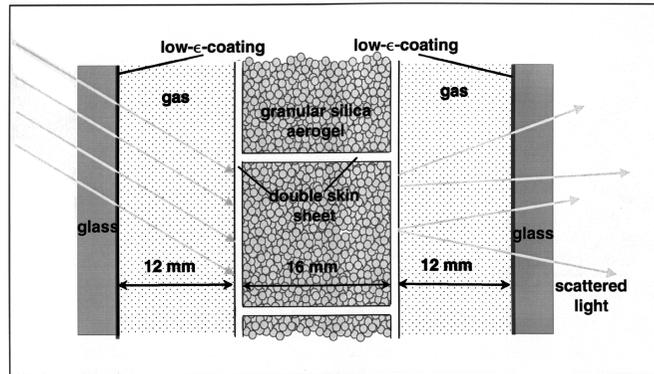


Abbildung 5: Funktionsweise der schaltbaren Wärmedämmung

Für die solarthermische Nutzung wird das schaltbare Wärmedämmpaneel (SWD) als Absorber mit Glasabdeckung in eine Südfassade integriert (Abb. 5). Bei ausreichender Einstrahlung während der Heizperiode ist der SWD auf Durchlass geschaltet. Nachts, bei fehlender Einstrahlung und im Sommer, wenn keine Wärme gebraucht wird, schaltet sich das Paneel selbsttätig zurück in den rein passiven, hoch dämmenden Zustand. Die Netto-Energieeinträge belaufen sich auf etwa 150 kWh pro Jahr und Quadratmeter Paneelfläche.

3.3 Streuung und Lenkung von Sonnenlicht

SiO₂-Aerogele besitzen nicht nur exzellente Dämmeigenschaften sondern sind auch lichtdurchlässig. Zusammen mit einem Industriepartner hat das ZAE Bayern ein transluzentes Fassadenelement (Abb. 6a und b) entwickelt, das einen k-Wert von ca. 0.5 W·m⁻²·K⁻¹ aufweist und die Raumausleuchtung über Lichtstreuung wesentlich verbessert (der Lichttransmissionsgrad liegt bei 54%).



Abbildungen 6a und b:
Hoch dämmendes Licht streuendes Fassadenelement mit SiO₂-Aerogelschicht

Lichtlenkung ist über Brechung und Totalreflexion in entsprechenden Fassadenkomponenten möglich. Gerade in Büro- und Verwaltungsgebäuden ist die blendfreie Nutzung von Tageslicht hoch erwünscht. Hier liegt ein erhebliches Einsparpotential bei Beleuchtungs- und Kli-

matierungsbedarf, welches bei Entwicklung vor allem von miniaturisierten Lichtlenkstrukturen ausgeschöpft werden kann.

Gehen wir ein paar Schritte weiter, so gelangen wir zu einer in thermischer Hinsicht aber auch bezüglich der Lichttransmission variablen Fassade, die dann über eine entsprechende Sensorik gesteuert wird.

4. Ausblick

Abschliessend sei bemerkt, dass es in Deutschland durchaus realistische Chancen gibt, die CO₂-Reduktionsziele nach dem Kyoto-Protokoll bis 2012 zu erreichen, ja sogar zu übertreffen. Eine zentrale Voraussetzung ist allerdings, dass die Kernenergienutzung (CO₂-Vermeidung 170 Mio. t/a) nicht zurückgefahren wird. Weiter müssen bis dahin ca. 6 Mio. Altbauwohneinheiten energetisch renoviert sein, die Windenergienutzung an Standorten mit hoher mittlerer Windgeschwindigkeit, d.h. vor allem im Offshore-Bereich ausgebaut sowie Müll und Biomasse verstärkt für die Stromerzeugung eingesetzt sein.

Im Übrigen sollten wir nicht vergessen, dass der vorjährige Preisanstieg für Rohöl sicher nicht der letzte gewesen sein dürfte, dass Öl noch immer 40% des Primärenergiekonsums in Deutschland deckt und rund 60% der Weltölreserven in den OPEC-Ländern liegen.

BRENNSTOFFZELLEN - FUNKTION, POTENZIAL UND STAND DER ENTWICKLUNGEN

Rudolf Henne

Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Vorwort

Die folgenden Ausführungen können angesichts der Vielfältigkeit der gegenwärtigen Brennstoffzellen-Entwicklungen und der damit zusammenhängenden Aspekte nicht flächendeckend sein. Sie können nur einige Schwerpunkte und Facetten hervorheben und näher beleuchten. Selbst bei täglicher Beschäftigung mit dem Brennstoffzellengeschehen ist es schwierig, die zahlreichen Veröffentlichungen und Verlautbarungen zu verfolgen und ihre Bedeutung einzuschätzen.

1. Einleitung

Brennstoffzellen und Brennstoffzellensysteme haben in jüngster Zeit ein rasch wachsendes Interesse in Forschung, Industrie und Öffentlichkeit erlangt. Erste, meist prototypische Systeme gelangten und gelangen in die Erprobung. Dies aus mehreren Gründen, von denen die wichtigsten wohl die im Folgenden aufgeführten sind:

- Sie sind Direktumwandler von in Brennstoffen gebundener chemischer Energie in elektrische Energie bei der Reaktion mit (Luft-) Sauerstoff; und im Gegensatz zu elektrochemischen Batterien kann eine Brennstoffzelle kontinuierlich elektrische Energie abgeben, solange sie mit Brennstoff und Luftsauerstoff versorgt wird, ohne dass sich das Wandlersystem aus Elektroden und Elektrolyt verändert.
- Da diese Reaktion nicht den Beschränkungen eines Carnot-Kreisprozesses unterliegt, können prinzipiell wesentlich höhere Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung erzielt werden, verbunden mit einer entsprechend niedrigeren spezifischen CO₂-Freisetzung beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen als Brennstoffe.
- Da verhältnismässig niedrige Reaktionstemperaturen vorliegen, ist die Schadstofffreisetzung beispielsweise von NO_x praktisch vernachlässigbar.
- Brennstoffzellen haben keine beweglichen Teile, sind daher in dieser Hinsicht wartungsarm und erzeugen keinen Lärm oder Schwingungen - die bei Brennstoffzellensystemen wahrnehmbaren Geräusche stammen vorwiegend von erforderlichen Gebläsen für die Luftversorgung.
- Brennstoffzellen sind modular, d. h. Brennstoffzellensysteme können durch eine entsprechende Zahl serien- und parallelverschalteter identischer Zellen in ihrer Leistungsgrösse dem Bedarf angepasst werden.

- Brennstoffzellen lassen sich daher prinzipiell in einem grossen Leistungsbereich einsetzen, angefangen von kleinen portablen Einheiten, beispielsweise im Computer- und Freizeitbereich, über Einheiten in kW-Grösse für stationäre oder mobile Wärme- und Strombereitstellung bis in den MW-Bereich mit Kraft-Wärme-Kopplung oder in Verschaltstufen z. B. von Kraftwerken zur Erzielung sehr hoher Wirkungs- und Brennstoffnutzungsgrade. Eine für die mobile Anwendung besonders attraktive Eigenschaft von Brennstoffzellen stellt die Zunahme ihres Wirkungsgrades bei Teillastbetrieb dar, was im Gegensatz zum Verhalten von Verbrennungskraftmaschinen steht.

Das nun verstärkt entstehende Bewusstsein über deutlich werdende Umweltprobleme, beispielsweise durch die CO₂-Freisetzung und die offensichtliche Begrenztheit wirtschaftlich und ökologisch günstig verfügbarer fossiler Energieträger wie Erdöl und Erdgas, haben nun weltweit eine immense Brennstoffzellennachfrage ausgelöst, und entsprechend entstand eine hohe Erwartungshaltung: Brennstoffzellen sollen ob ihrer spezifischen Eigenschaften einerseits die Verfügbarkeit fossiler Energieträger verlängern und andererseits die Einführung und Nutzung regenerativ erzeugter Energieträger wie Wasserstoff begünstigen, d. h. eine Brückenfunktion zwischen zwei „Energieversorgungswelten“ ausüben. Unterzieht man die gegenwärtige Situation einer kritischen Betrachtung hinsichtlich der Realisierung von Brennstoffzellensystemen, so kommt man verallgemeinernd zu folgenden Feststellungen, die auch das weitere Vorgehen beim Brennstoffzellen-F+E bestimmen:

- Die volumen- und gewichtsbezogenen Leistungsdichten der Brennstoffzellensysteme sind weitgehend noch zu gering und
- ihre Herstellung (noch) zu teuer im Vergleich zu eingeführten, konventionellen Energiewandlern. Ansätze zur Reduzierung der Kosten sind:
 - Verminderung des Einsatzes teurer Materialien (Katalysatoren) oder Erschliessung neuer, kostengünstigerer Materialien zu deren Ersatz
 - Verbilligung der derzeit üblichen Herstellungstechniken durch ihre Weiterentwicklung zu automatisierten, serientauglichen Verfahren oder durch Erarbeitung neuer Verfahren mit entsprechendem Potenzial
 - neue Designs, vorzugsweise dünn-schichtige, die weniger Material benötigen, die gleichzeitig auch günstiger fertigbar sein müssen.
- Die Lebensdauer der Zellen ist meist noch unzureichend. Um Wege zur Lösung dieses Problemkomplexes zu finden, müssen erst noch die Degradationsvorgänge und -ursachen weiter aufgeklärt werden.
- Die peripheren Komponenten, die aus einer Ansammlung von Zellen erst ein technisch einsetzbares System werden lassen und den Betrieb der Zellen ermöglichen, werden sicher auch in Zukunft zu mehr als 50 % die Kosten eines Systems ausmachen. Sie müssen zu serienfertigungsgerechten, kostengünstigen Produkten weiter entwickelt werden.

2. Brennstoffzellenhistorie

Trotz der attraktiven Eigenschaften von Brennstoffzellen hat es sehr lange nach der Entdeckung des Brennstoffzelleneffekts gedauert, bis dieser nun eine verbreitete technische Relevanz bekam. 1838 entdeckte Christian Friedrich Schoenbein den Effekt und unabhängig erfand und betrieb etwa zeitgleich William Robert Grove den ersten Brennstoffzellen-Generator mit Luft und einer kontinuierlichen H₂-Quelle (Zink in angesäuertem Wasser), wobei die Voraussetzungen hierfür in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts durch die Geburt der Physikalischen Chemie geschaffen wurden. In Bild 1 ist der historische Aufbau der Groveschen Erfindung wiedergegeben.

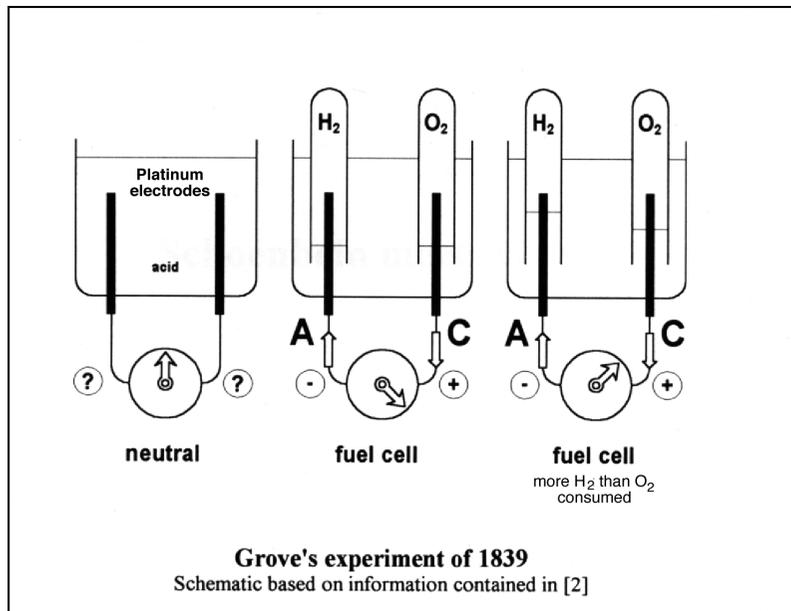


Bild 1: Schema des Grove'schen Experiments

Eine relevante Nutzung fand die Erfindung jedoch im 19. Jahrhundert nicht, da es die von James Watt technisch realisierte Dampfmaschine gab und 1866 Werner von Siemens, der Entdecker des dynamischen Prinzips, die erste Dynamomaschine konstruierte. Dabei äusserte der spätere Nobelpreisträger Wilhelm Ostwald bereits 1884 auf der 2. Jahrestagung des Verbands Deutscher Elektrotechniker: „Die Brennstoffzelle ist eine grössere zivilisatorische Leistung als die Dampfmaschine und wird schon bald den Siemensschen Generator in das Museum verbannt“. Der Begriff „bald“ ist wohl interpretierbar und das mit dem Museum, wenn überhaupt, wird wohl noch etliche Zeiten dauern!

Um 1900 kam erstes technisches Interesse an der Direktverstromung fossiler Energieträger auf, jedoch bestand noch keine Möglichkeit einer technischen Realisierung. Mit der Erfindung von Gasdiffusionselektroden mit platinierterm Kohlenstoff für die Wasserstoffelektroden durch A. Schmid in den 20er Jahren kam man in dieser Hinsicht einen beträchtlichen Schritt weiter. Der 2. Weltkrieg stoppte jedoch zunächst Interesse und Weiterentwicklung, die dann mit der Realisierung von alkalischen Brennstoffzellen (AFC) mit porösen Metallelektroden durch F. T. Bacon eine Fortsetzung fand. Dabei handelte es sich um Prototypen der späteren NASA-Raumfahrt-Brennstoffzellen, welche 1969 den Flug zum Mond ermöglichten, wobei flüssiger Wasserstoff und Sauerstoff als Reaktanden mitgeführt und zum Einsatz kamen. 1970 baute dann K. Kordesch ein Hybrid-Fahrzeug für 4 Personen mit einem H₂-Brennstoffzellen/ Batterie-System, das 3 Jahre im Städteinsatz betrieben wurde.

Nach erfolgreichem Mondflug sank das Interesse an der Raumfahrt und damit auch die Aktivität bei alkalischen Brennstoffzellen zu Gunsten phosphorsaurer Zellen (PAFC), die eine bessere Eignung für stationäre Anwendungen versprochen. Reformer für Kohlenwasserstoffe wurden entwickelt; der Schwerpunkt der relevanten Aktivitäten verlagerte sich mehr und mehr von den USA nach Japan.

	Anode (Energieträger)	Elektrolyt	Kathode (Oxidant)
Oxidkeramische BZ (Solid Oxid Fuel Cell) SOFC	Kohlenwasserstoffe H ₂	1000 °C Keramik 800-1000 °C	Luft O ₂
Schmelzkarbonat BZ (Molten Carbonat Fuel Cell) MCFC	Kohlenwasserstoffe H ₂	Karbonat-schmelze 600-650 °C	Luft O ₂
Phosphorsäure BZ (Phosphoric Acid Fuel Cell) PAFC	H ₂	Temperatur Phosphorsäure 160-220 °C	Luft O ₂
Direktmethanol BZ (Direct Methanol Fuel Cell) DMFC	Methanol	Polymer 80-110 °C	Luft O ₂
Polymer Elektrolyt Membran BZ PEMFC	H ₂	60-80 °C	O ₂
Alkalische BZ (Alcaline Fuel Cell) AFC	H ₂	20 °C Kalilauge 60-90 °C	O ₂

Bild 2: Brennstoffzellentypen, geordnet nach Arbeitstemperaturen

Nach 1970 traten Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (MCFC) für eine effiziente Nutzung von Hochtemperaturwärme in den Vordergrund des Interesses. Ebenfalls auf die Hochtemperaturanwendung ausgerichtet wurden vor etwa 10 Jahren die Arbeiten an Festelektrolyt-Brennstoffzellen (SOFC) intensiviert, gleichzeitig wurden Entwicklungen an Membran-Brennstoffzellen (PEFC) wieder aufgenommen, da sie wegen eingetretener Verfügbarkeit von neuen Membranen (Polymeren) und Katalysatoren nun technisch realisierbar wurden. Wegen ihrer für den mobilen Einsatz prinzipiell vorteilhaften Eigenschaften finden sie gegenwärtig bei den Niedertemperaturbrennstoffzellen die höchste Aufmerksamkeit.

Wie die historische Aufzählung andeutet, gibt es eine Reihe unterschiedlicher Brennstoffzellentypen, die sich hauptsächlich in ihrer materialmässigen Zusammensetzung, im Ladungstrennenden Elektrolyten bzw. in der Ladungsträgerart, für die der Elektrolyt durchlässig ist, sowie hinsichtlich der verwendbaren Reaktanden und dem Einsatztemperaturbereich unterscheiden.

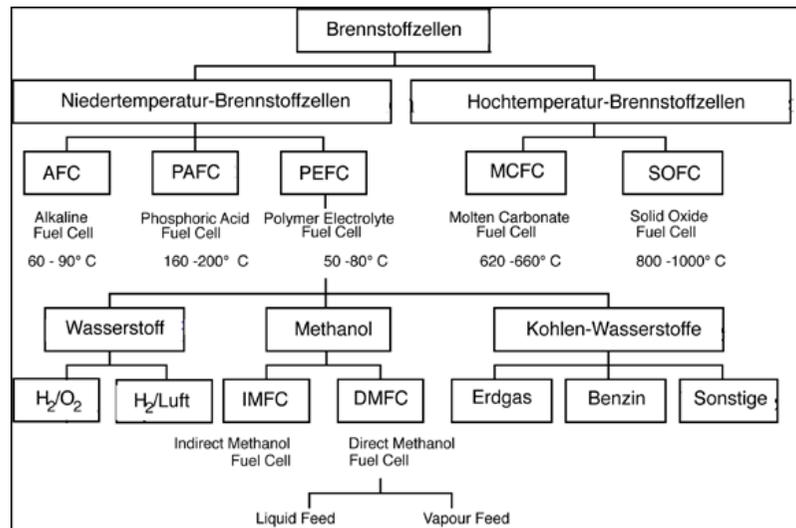


Bild 3: Brennstoffzellentypen und ihre Brennstoffe

Die Bilder 2 und 3 geben diese Vielfalt wieder, geordnet nach der Arbeitstemperatur. Wie weiter unten noch ausführlicher dargelegt werden wird, finden diese Brennstoffzellen bzw. Brennstoffzellensysteme in einem grossen Leistungsbereich und vielfältigen Einsatzarten Anwendung: portabel, mobil und stationär, wobei bei mobil mittlerweile auch an Einsätze nicht nur in Fahrzeugen sondern neuerdings auch in Schiffen und Flugzeugen gedacht wird. In Unterseebooten haben PEFC-Systeme bereits eine feste Position eingenommen; für Raumfahrtanwendungen sind nach wie vor AFCs interessant, beispielsweise in sog. regenerativen Systemen

zusammen mit Elektrolyseuren und Solarzellen – wie in Bild 4 dargestellt – für eine auch durch solare Schattenphasen nicht unterbrochene Stromversorgung.

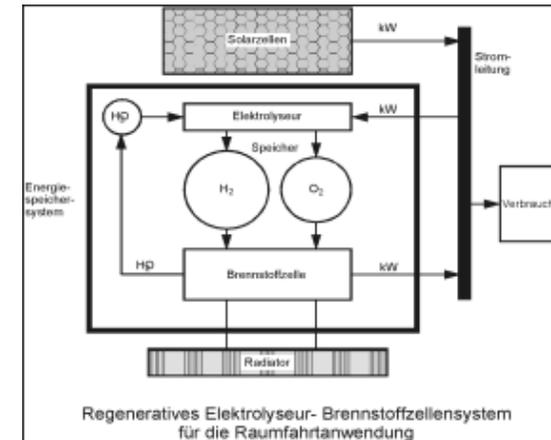


Bild 4: Regeneratives Elektrolyseur-Brennstoffzellensystem

3. Grundprinzipien von Brennstoffzellen

Im Folgenden sollen erläuternd als exemplarische Beispiele für Nieder- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen die Bau- und Funktionsprinzipien von Zellen des Polymer-Elektrolyt-(PEFC) und des Fest-Elektrolyt-(SOFC)-Typs dargestellt werden, wobei bei den ersteren die Elektrolyte protonenleitend, beim SOFC-Typ die Leitung durch die Elektrolyte durch doppelt negativ geladene Sauerstoffionen erfolgt. Beide Zellenarten finden derzeit das jeweils höchste Interesse, erstere bevorzugt hinsichtlich mobiler Anwendung, letztere mehr für die stationäre Strom- und Wärmebereitstellung unter Nutzung von Erdgas. Doch zunächst soll auf die elektrochemische Wirkungsweise von Brennstoffzellen eingegangen werden.

3.1 Elektrochemische Wirkungsweise von Brennstoffzellen

Durch die Trennung der Reaktionsbereiche mit Hilfe einer nur für eine Ladungsträgerart durchlässigen Membran ist eine Brennstoffzelle in der Lage, kontinuierlich – und ohne den den Wirkungsgrad mindern den Umweg über die thermische Energieform wie bei Carnot-Prozessen – elektrische Energie bereitzustellen, so lange die letztendlichen Reaktionspartner H₂ und O₂ zugeführt werden. Die dabei erfolgende Änderung der Bildungsenthalpie ΔH , gemäss der Reaktion $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(l) + \Delta H$, mit $\Delta H = -286 \text{ kJ/mol}$, kann allerdings nur teilweise in die elektrische Form umgesetzt werden; maximal umgesetzt werden kann der Energiewert, der bei der reversiblen Oxidation von H₂ verfügbar wird, nämlich die Änderung der Gibbsschen freien Bil-

dungsenergie ΔG . Diese Änderung beträgt bei Normalbedingungen (1 bar, 298,15 K) -237 kJ/mol. Der Gibbschen Funktion gemäss entspricht die Differenz zwischen ΔH und ΔG dem Produkt $T\Delta S$ der Brennstoffzellenarbeitstemperatur T und der Änderung der Entropie ΔS . Daher beträgt der maximale thermodynamische Wirkungsgrad

$$\eta_{thermo} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \cdot \frac{\Delta S}{\Delta H}$$

d. h. der Wirkungsgrad sinkt mit steigender Arbeitstemperatur. Mit ΔG , der Faraday-Konstante F und der Zahl n , der im Prozess spezifisch involvierten Elektronenzahl, bekommt man gemäss der Gleichung

$$E_0 = -\frac{\Delta G}{n_e F}$$

die von der Brennstoffzelle ohne Stromfluss (offener Stromkreis) bereitgestellte Spannung E_0 (Leerlaufspannung), welche bei Normalbedingungen $1,229$ V beträgt. Bei Stromfluss ergeben sich allerdings Verluste, beispielsweise durch Übergangspolarisationen, durch ohmschen Widerstand, durch Verarmungen an Reaktanden und durch das entstehende und behindernde Wasser.

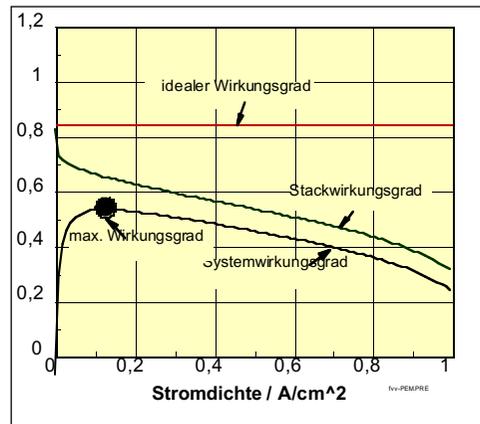


Bild 5:

Stack- und Systemwirkungsgrad von Brennstoffzellen abhängig von der Stromdichte

Bild 5 zeigt in Abhängigkeit von der Stromdichte beispielsweise den Verlauf der Zellspannung, des idealen und realen Wirkungsgrads von Zelle und Stack sowie den Systemwirkungsgrad. Deutlich wird, dass im Gegensatz zur Verbrennungskraftmaschine bei Brennstoffzellen bei Teillast ein Maximum vorliegt. Der Abfall zu niedrigen Stromdichten hin erklärt sich durch die dann spezifisch stärker ins Gewicht fallenden Verbräuche, verursacht für die Brennstoffaufbe-

reitung, für die Förderung von Brenngas und Luft und für die Leistungsaufbereitung und durch all die anderen Komponenten, die ein Brennstoffzellenstack zu einem einsetzbaren System werden lassen.

3.2 Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen

Bild 6 zeigt Querschnitt und Prinzip einer PEFC mit der protonendurchlässigen Membran und den beidseitigen Reaktions- und Gasdiffusionsschichten. Brenngas (H_2) – PEFCs sind CO empfindlich! – gelangt anodenseitig zur Reaktionsschicht, wo der molekulare Wasserstoff dissoziiert und die H-Atome durch Elektronenabgabe oxidiert werden. Die entstandenen Protonen wandern durch den Elektrolyten zur Kathodenseite, wo sie im Grenzbereich Elektrolyt/ kathodische Reaktionsschicht mit dissoziierten und durch Aufnahme von Elektronen reduzierten – also aus dem zugeführten Luftsauerstoff gebildeten Sauerstoffionen zu Wassermolekülen reagieren, die durch die Diffusionsschicht abzuführen sind. Die für die Reduktion des Sauerstoffs erforderlichen Elektronen können bei diesem Aufbau nur über eine äussere Last von der Anodenseite, wo sie bei der Oxidation des Brennstoffes freigesetzt werden, zur Kathodenseite gelangen.

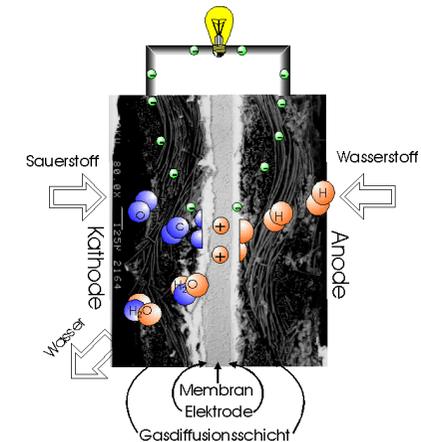


Bild 6: PEFC Querschnitt und Prinzip

Die pro Zelle bei technisch relevanten Stromdichten von einigen 100 mA/cm² verfügbare Spannung liegt dabei um ca. $0,5$ V, d. h. Brennstoffzellenstacks (-einheiten) bestehen meist aus einer grossen Anzahl serienverschalteter Zellen, um einen brauchbaren Ausgangsspannungswert bereitzustellen. Bipolarplatten zwischen den einzelnen Zellen dienen dabei der elektrischen Verschaltung, aber auch der Trennung der Gasräume und der mechanischen Stackstabilität. Ein solcher Stackverbund ist in Bild 7 dargestellt.

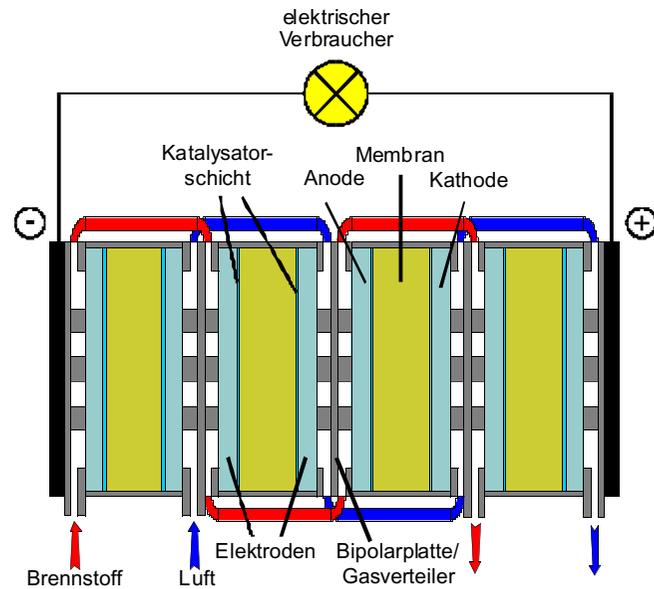


Bild 7: Prinzip der Zellenverschaltung zu einem Stackverbund

Wegen der (noch) nicht ausreichenden (und) verbreiteten Verfügbarkeit, aber auch wegen der aufwändigen Mitführbarkeit von Wasserstoff beschäftigt man sich in den letzten Jahren intensiv mit Methanol als Brennstoff für Niedertemperatur-Brennstoffzellen im Fahrzeugeinsatz. Methanol lässt sich wie Benzin in flüssiger Form und unter Normaldruck in Fahrzeugen mitführen, wobei allerdings seine Umweltverträglichkeit Fragen aufwirft. Ein bei Prototypenfahrzeugen bereits realisierter Weg, das Methanol für die PEFCs nutzbar zu machen, ist die Reformierung des Methanols on-board zu H_2 (und CO_2) (Bild 8). Dies erfolgt in einem mehrstufigen Prozess, beginnend mit einer Hochtemperaturstufe.

Da, wie bereits oben erwähnt, CO für PEFCs bzw. für das in den Reaktionsschichten als Katalysator enthaltene Platin vergiftend wirkt, indem Platinoberflächen durch relativ feste CO-Anlagerung passiviert werden, müssen die CO-Gehalte des Brenngases bis in den Bereich von etwa 50 ppm abgesenkt werden, was einen ziemlichen apparativen Aufwand mit entsprechender Minderung der Leistungsdichte und des Wirkungsgrades eines solchen Systems bedeutet. Aus diesem Grund sucht man nun verstärkt nach Möglichkeiten, PEFCs direkt für Methanol – in gasförmiger oder in in Wasser vermischter Form zugeführt – verträglich zu machen, d. h. Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFCs) zu realisieren. Obwohl bereits beträchtliche Fortschritte bei diesen Realisierungsbemühungen gemacht werden konnten, scheinen vor einer technischen Anwendung noch etliche Hürden zu überwinden zu sein.

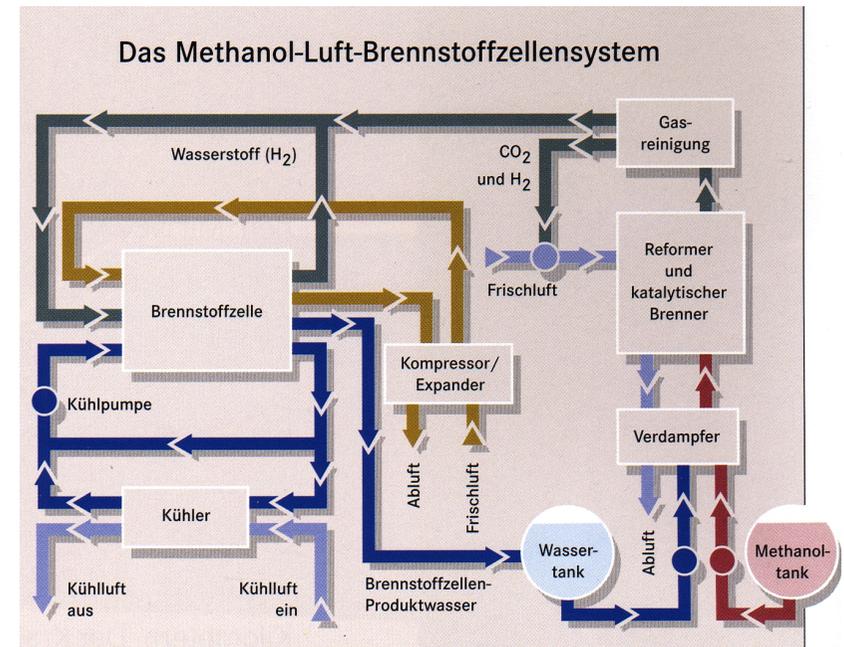


Bild 8: Brennstoffzellensystem mit der Methanol-Reformierung im Fahrzeug

Diese bestehen in folgenden (derzeitigen) wesentlichen Problemen:

- Das bei dem Umsetzungsprozess auf der Anodenseite involvierte CO führt zur partiellen Vergiftung des Pt-Katalysators, was einerseits durch ein erhöhtes Inventar an Platin und andererseits durch den Zusatz von Ruthenium in Grenzen und in dynamischem Gleichgewicht gehalten wird – Ruthenium fördert die Autoxidation des CO zu CO_2 und damit zur Befreiung der Platinoberflächen. Die derzeit erforderlichen Pt- und Ru-Gehalte sind noch viel zu hoch, um wettbewerbsfähige Kosten zu erreichen. Daher wird intensiv an Möglichkeiten zur Reduktion dieser Gehalte, aber auch zum Ersatz dieser Katalysatoren beispielsweise durch (noch nicht gefundene bzw. entwickelte) Mischoxide gearbeitet.
- Die z. Z. eingesetzten bzw. verfügbaren Membranpolymere funktionieren nur in wasserbefeuchtem Zustand. Mit dem Wasser erfolgt aber auch ein gewisser Durchtritt von Methanol von der Anoden- zur Kathodenseite mit entsprechenden Folgen hinsichtlich Vergiftung und Ökonomie. Neue Polymere mit vermindertem Methanoldurchtritt sind daher in Entwicklung.
- DMFCs sind derzeit in ihrer Umsetzungsdynamik, in ihrer Leistungsdichte und im Wirkungsgrad PEFCs mit Wasserstoffbetrieb noch ziemlich unterlegen. In diesen Hinsichten

will man mit höheren Betriebstemperaturen (um 150 °C) weiterkommen, aber auch hierzu fehlen noch die geeigneten und kostengünstigen Membranpolymere.

3.3 Festelektrolyt-Brennstoffzelle (SOFC)

Am oberen Ende der Temperaturskala sind die Hochtemperatur-Brennstoffzellen vom SOFC-Typ angesiedelt mit Arbeitstemperaturen bisher im Bereich zwischen etwa 800 und 1000 °C, wobei für gewisse Anwendungen intensive Entwicklungen im Gang sind, die Voraussetzungen für eine Absenkung unter 800 °C zu schaffen, um damit die technologischen und materialmäßigen Anforderung und damit die Kosten zu senken sowie die Degradationseffekte zu mindern.

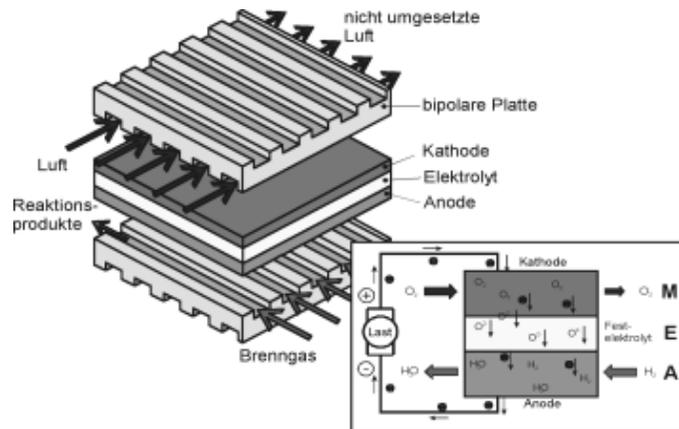


Bild 9: Prinzip einer planaren SOFC

Bild 9 zeigt Aufbauprinzip und Wirkungsweise einer SOFC. Kernbestandteil stellt der gasdichte, keramische Elektrolyt aus ZrO₂ dar, das mit Yttrium-, Cer- oder Scandiumoxid zur Phasenstabilisierung und zur Erhöhung der Sauerstoffionenleitfähigkeit dotiert ist. Auf beiden Seiten des Elektrolyten befinden sich die offenporigen Elektroden, auf der Anoden-, d. h. der Brenngasseite, aus einem Nickel-Zirkonoxidgemisch, auf der Luftseite aus einem Mischoxid mit Perowskitstruktur, beispielsweise aus Lanthan-Strontium-Manganit bestehend. Der Luftsauerstoff wird auf der Kathodenseite dissoziiert und durch Aufnahme von zwei Elektronen pro Atom zu O₂- reduziert. Für diese Ionen ist der Elektrolyt durchlässig. Auf der Anodenseite wird das Brenngas zugeführt. Im Falle des Wasserstoffs geschieht das gleiche wie bei der PEFC, nur dass in diesem Fall die Reaktion mit den Sauerstoffionen im Bereich des Elektrolyt-Anodenübergangs stattfindet und der entstehende Wasserdampf auf der Anodenseite abzuführen ist. Die auf dieser Seite frei werdenden Elektronen können auch hier nur über einen äusse-

ren Verbraucher zur Sauerstoffseite gelangen. Gleichfalls liegt bei Stromfluss die Arbeitsspannung pro Zelle zwischen etwa 0,5 und 0,7 V, so dass auch hier in technischen Ausführungen etliche Zellen elektrisch verschaltet werden. Hierzu dienen ebenfalls Bipolarplatten, die allerdings sowohl in oxidierender als auch reduzierender Umgebung stabil sein müssen, eine hohe Elektronenleitfähigkeit aufweisen und in ihrer Wärmedehnung der des Elektrolyten entsprechen sollen. Perowskitische Keramiken oder speziell entwickelte, pulvermetallurgisch und aufwändig zu verarbeitende Materialien auf Chrombasis kommen hierfür derzeit zur Anwendung. Für abgesenkte Arbeitstemperaturen von etwa 800 °C und darunter sind spezielle FeCr-Legierungen, die umformtechnisch und daher kostengünstiger behandelt werden können, in Entwicklung.

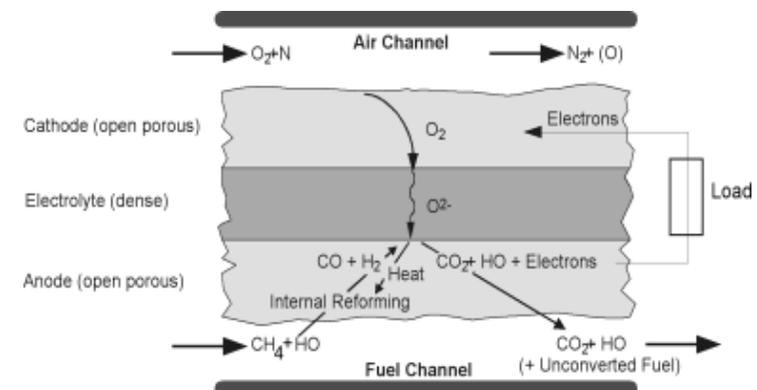


Bild 10: Prinzip der internen Reformierung bei SOFCs

Hochtemperatur-Brennstoffzellen vom SOFC-Typ weisen einige wesentliche Eigenschaften auf, die sie insbesondere für die kombinierte Bereitstellung von Strom und Wärme und für die Nutzung einer breiten Brennstoffpalette interessant machen. Zu diesen Eigenschaften gehören:

- die Unempfindlichkeit gegen CO, bzw. die direkte Nutzbarkeit dieses Gases für die Erzeugung elektrischer Energie,
- die hohen Betriebstemperaturen, die eine Nutzung der Abwärme in nachgeschalteten Wandlern erlauben und damit einen sehr hohen Gesamtwirkungsgrad ermöglichen,
- die hohen Arbeitstemperaturen und das Vorhandensein von Nickel in der Anode, so dass eine interne Reformierung von Kohlenwasserstoff in der Zelle möglich ist – siehe Prinzipbild 10 –, lediglich höhere Kohlenwasserstoffe erfordern ein Vorreformieren zum Cracken von Mehrfachbindungen und zur Vermeidung von Russbildung,
- wegen der relativen Unempfindlichkeit und der Möglichkeit der internen Reformierung treten neben Erdgas nun auch Biogase und andere aus Biomasse gewinnbare Kohlenwasserstoffe als Brenngase in den Blickpunkt, was insbesondere für dezentrale Versorgungseinrichtungen interessant ist und mithelfen kann, fossile Energieträger zu ersetzen,
- das Potenzial von SOFCs, bei teilweiser Vorreformierung und Reinigung auch Benzin als

Brennstoff verarbeiten zu können, veranlasste Automobilfirmen und Zulieferer, auch die Entwicklung von sog. APUs (Auxiliary Power Units) mit Benzin als Brennstoff und SOFCs als Wandler zu starten, um damit die Probleme der Wasserstoffversorgung und der Wasserstoffmitnahme oder einer aufwändigen Methanolaufbereitung in Fahrzeugen wie bei Niedertemperatur-Brennstoffzellen zu umgehen. APUs mit einem elektrischen Leistungsniveau von mehreren kW sollen alle Funktionen des Verbrennungsmotors außer dem Vortrieb übernehmen – und dies in viel effizienterer Weise – und auch den Wunsch nach mehr elektrischer Leistung im Fahrzeug beispielsweise für die Standklimatisierung zu erfüllen helfen. Insgesamt könnten solche APUs nicht nur den Komfort des Fahrzeuges, sondern auch seine Wirtschaftlichkeit beträchtlich erhöhen, allerdings sind bis dahin noch einige Entwicklungen erfolgreich zu bewältigen, beispielsweise hinsichtlich einer akzeptablen Startzeit, ausreichender Temperaturwechselbelastbarkeit sowie mechanischer Stabilität und Dichtheit.

Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) werden weltweit in verschiedenen geometrischen Ausführungen entwickelt, wobei für den niedrigeren Leistungsbereich planare Konzepte überwiegen, die für diesen Bereich eine höhere Leistungsdichte, Effizienz und Wirtschaftlichkeit erwarten lassen. In der ersten Generation planarer Zellen bildete der Elektrolyt die tragende Komponente der Zelle, bei der auf die dicht gesinterte Elektrolytfolie auf beide Seiten die Elektroden beispielsweise mit Siebdruck und anschliessendem Sinterprozess aufgebracht werden. Wegen dieser Tragfunktion können solche Folien in ihrer Stärke kaum unter 150 bis 250 μm abgesenkt werden. Da aber die Ionenleitung im Elektrolyten den grössten Beitrag zu den internen Verlusten darstellt, ist man bestrebt, einerseits die Leitfähigkeit des Elektrolyten, beispielsweise durch entsprechende Dotierung zu erhöhen, andererseits die Elektrolytdicke abzusenken, um damit nicht nur die Leistungsdichte und Effizienz zu erhöhen, sondern auch die Möglichkeit für eine Betriebstemperaturabsenkung zu eröffnen. Diese Dickenabsenkung in den Bereich unter 50 μm konnte nur durch Übergang zu einem anderen Zellenaufbau bewerkstelligt werden. In der sog. 2. Generation stellt nun eine Elektrode oder eine andere Tragestruktur die Basis dar, auf die die anderen Zellschichten in sehr dünner Ausführung aufgetragen werden können. In diesem Sinne arbeiten das Forschungszentrum Jülich (FZJ) und das DLR-Stuttgart in Wechselwirkung mit zwei unterschiedlichen technologischen Ansätzen an der Realisierung solcher Zellen und Stacks, das FZJ mit dem sog. Substratkonzept, bei dem auf einer relativ dicken, gesinterten Anode ein dünner Elektrolyt und die Kathode sintertechnisch aufgebracht werden, das DLR-Stuttgart verwendet in seinem Spritzkonzept poröse, metallische Substrate, auf die die Zellschichten mit speziell modifizierten Plasmaspritzverfahren in dünner Ausführung aufgetragen werden. Bei beiden Entwicklungen konnten bereits attraktive hohe Leistungsdichten um 1 W/cm^2 (bei etwa 900 °C) und ebenfalls noch brauchbare Werte von mehr als 0,5 W/cm^2 im Bereich von 800 °C und darunter erzielt werden.

Im Vergleich zu den planaren SOFC-Konzepten hat das tubulare Design der Firma Siemens-Westinghouse Power Corp. (SWPC) eine wesentlich höhere technologische Reife erlangt, was auch die Verfügbarkeit von prototypischen Systemen im Leistungsbereich 100 bis 200 kW und

den erfolgreichen Betrieb mit Erdgas über mehr als 1000 Stunden dokumentiert. Bei diesem Konzept bilden gesinterte, an ihrem Ende geschlossene 1,8 m lange poröse Keramikrohre aus Perowskitmaterial als Kathoden die Tragestruktur, auf die der dichte Elektrolyt, der für die elektrische Verschaltung erforderliche Kontaktstreifen sowie die Anode aufgebracht werden – siehe Bild 11 –. Die Aussenseiten der zu einem Bündel verschalteten Rohre befinden sich in der Brenngasatmosphäre, während die Rohrrinnenvolumina mit dem Luftsauerstoff versorgt werden. Ein solches Design, bei dem jedes Rohr eine Zelle darstellt, ist technisch simpel und robust, da die Abdichtungen zwischen den beiden Reaktandenbereichen keine besonderen Ansprüche stellen; die bei einer solchen Geometrie jedoch vorliegenden relativ grossen Stromwege erfordern jedoch zur Erreichung einer genügenden Leitfähigkeit relativ dicke Elektrodenschichten und hohe Betriebstemperaturen um 1000 °C und noch höhere kritische Temperaturen zur sintertechnischen Fertigung. Insbesondere die Herstellung des dichten Elektrolyten aus YSZ mit „Electrochemical Vapor Deposition“ (EVD) ist sehr zeit- und kostenaufwändig. Daher werden gegenwärtig alternative Verfahren untersucht bzw. adaptiert, um dieses Verfahren kostengünstiger zu ersetzen, ohne zu grosse Einbußen bei der derzeit sehr hohen Elektrolytqualität zu erleiden.

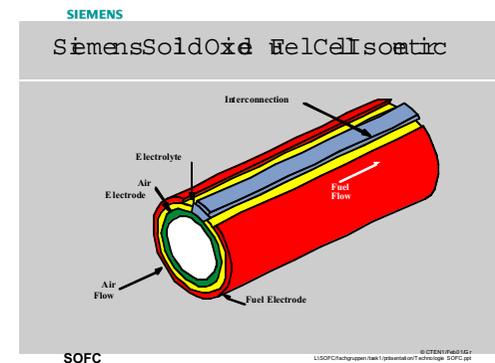


Bild 11: Tubulare SOFC von SWPC

4. Einsatzspektrum von Brennstoffzellensystemen, Realisierungen und Projekte

Das bereits realisierte bzw. potenziell realisierbare Leistungsspektrum von Brennstoffzellen und Brennstoffzellensystemen überdeckt einen weiten Bereich von wenigen Watt bis zu mehreren MWel und auch das Anwendungsspektrum zeigt eine entsprechende Breite:

- portable Einheiten mit vorwiegend kleiner Leistung
- mobile mit kleiner bis mittlerer Leistung und
- stationäre mit kleiner bis sehr hoher Leistung.

Wenn es gelingt, die Kosten weiter abzusenken, werden kleine Brennstoffzelleneinheiten besonders bei portablen Computern, Camcordern oder mobilen Telefonen einen grossen Markt finden, wobei wiederaufladbare Hydridspeicher, möglicherweise auch kleine Methanolkartuschen, für die Brennstoffversorgung sorgen.



Bild 12: Kleine portable Brennstoffzelleneinheit (FhG-ISE)

Einige hervorzuhebende Vorteile eines solchen Einsatzes sind die im Vergleich zu Batterien wesentlich längere Reichweite, das beträchtlich niedrigere Gewicht und Volumen und das Entfallen des mit Batterien üblicherweise existierenden Entsorgungsproblems. Bild 12 zeigt eine beim Freiburger Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE) erarbeitete Realisierung einer kleinen portablen Brennstoffzelleneinheit für Laptops.

Bei den mobilen Anwendungen von Brennstoffzellen denkt man in erster Linie an den Ersatz des Diesel- oder Ottomotors in Personenwagen oder Bussen. Aber auch die Verwendung in Schiffen und Zügen kann im Verlauf der Entwicklung attraktiv werden – für U-Boote haben sich Brennstoffzellensysteme ja bereits durchgesetzt. Über die potenzielle Rolle von „Auxiliary Power Units“ (APUs) in Fahrzeugen zur Bordstromversorgung und zur Entlastung des Motors von allen Aufgaben außer dem Fahrzeugvortrieb, wobei die Brennstoffzellen vorzugsweise mit dem gleichen Treibstoff wie der Motor versorgt werden, wurde bereits weiter oben im Zusammenhang mit SOFCs eingegangen. Auch an den Einsatz grösserer APUs in Flugzeugen wird gedacht. Sie können vor allem für die Versorgung der Klimatisierungseinrichtungen dienen, um die dafür bisher eingesetzten lauten und wenig effizienten Hilfsturbinen zu ersetzen.

Hinsichtlich des Pkw-Einsatzes von Brennstoffzellen haben mehrere Fahrzeughersteller inzwischen eine Reihe von Prototypen mit vorwiegend Polymerelektrolyt-Brennstoffzellenstacks (PEFC), aber unterschiedlichen Brennstoffversorgungskonzepten vorgestellt (Bild 13). Es wurden bereits Pkws realisiert, bei denen der Wasserstoff in Metallhydridspeichern, in verflüssigter Form oder gasförmig unter hohem Druck mitgeführt wird, letzteres auch für Busse.

Diese Vielfalt zeigt das Problem der H₂-Mitnahme in Fahrzeugen für eine akzeptable Reichweite, das bisher noch nicht zufriedenstellend – zumindest nicht voll wettbewerbsfähig zur Benzinbetankung – gelöst ist, denn Metallhydridspeicher haben eine geringe Speicherkapazität oder sind schwer, bei verflüssigtem Wasserstoff ist der energetische Aufwand für die Verflüssigung hoch und Druckwasserstofftanks haben ein beträchtliches Volumen, hier sind Arbeiten im Gange, Tanks für bis zu 700 bar anstelle der bisherigen 300 bar zu entwickeln. In dieser Situation wird, wie bereits oben erwähnt, sehr intensiv an Brennstoffzellen gearbeitet, die indirekt oder besser direkt (DMFC) Methanol als Brennstoff nutzen können. Methanol kann ähnlich wie Benzin behandelt und mitgeführt werden, allerdings spricht noch einiges dagegen, wie z. B. Umweltaspekte, der Aufwand für die Erzeugung von nahezu CO-freiem Wasserstoff aus Methanol im Fahrzeug bzw. die derzeit noch nicht gegebene Verfügbarkeit von leistungsfähigen und hinsichtlich der Kosten akzeptablen Brennstoffzellen, die direkt mit Methanol betrieben werden können.



Bild 13: Fahrzeugrealisierungen mit Brennstoffzellen

Beim stationären Einsatz von Brennstoffzellen ist man vor allem an der gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme (CHP: Combined Heat and Power) interessiert, um damit neben einem hohen elektrischen Wirkungsgrad auch insgesamt sehr hohe Brennstoffnutzungsgrade zu erzielen. Einheiten von einigen wenigen kW_e, beispielsweise für den Hausbedarf, bis zu etlichen 100 kW_e sind hierbei auf der Basis unterschiedlicher Brennstoffzellentypen in Entwicklung. Für den hohen Leistungsbereich ist die Auswahl allerdings auf die beiden Hochtemperaturtypen MCFC und SOFC beschränkt. Die bei diesen anfallende hochtemperaturige Abwärme begünstigt deren weitere Nutzung in nachgeschalteten Energiewandlern, wobei eine weitere Wirkungsgradsteigerung ermöglicht wird.

Bei den stationären Systemen mittlerer Leistung ist die Technologie von phosphorsauren Brennstoffzellen (PAFC) am weitesten fortgeschritten. Die PC25Cs der Firma ONSI mit ca. 200 kW_e sind bereits ein kommerziell erhältliches Produkt mit einem elektrischen Wirkungsgrad bis etwa 40 % und einem Gesamtnutzungsgrad von bis zu 80 %, wenn man die bei etwa

100 °C anfallende Abwärme einsetzt. Weltweit sollen bereits über 170 derartige Anlagen existieren, 8 davon allein in Deutschland, wobei neben Wasserstoff auch Klärgas zum Einsatz kommt. Für den stationären PEFC-Einsatz sind verschiedene Entwickler und potenzielle Hersteller aktiv. Plug Power, USA, steigt gerade in die Serienfertigung von Erdgas-betriebenen Stacks mit ca. 5 kW_e und einem elektrischen Wirkungsgrad von etwa 30 % ein, wobei eine Partnerschaft mit der deutschen Firma Vaillant besteht. Alstom Ballard – im mobilen Bereich Hauptpartner von DaimlerChrysler – hat bereits 4 Anlagen (Stand 2000) mit 250 kW_e erstellt, eine davon in Berlin, wobei ein η_e -Wert von 40 % und ein Gesamtnutzungsgrad von 70 bis 90 % angestrebt wird. In nächster Zeit soll in Dresden eine Fabrikationsanlage für die kommerzielle Fertigung solcher stationärer PEFC-Systeme entstehen.

Ebenfalls vorwiegend für den stationären Einsatz vorgesehen sind Systeme, die auf MCFCs (Molten Carbonate Fuel Cells) und SOFCs (Solid Oxide Fuel Cells) aufbauen. Unter der Bezeichnung „Hot Module“ hat die Firma **mtu** prototypische 300 kW_e-Systeme realisiert – eins davon ist in Bielefeld stationiert (Bild 14). Die Betriebstemperatur dieser Module liegt im Bereich 600 bis 650 °C, was sehr günstig ist hinsichtlich der Nutzung der Abwärme und der Verwendbarkeit „gängiger“ Werkstoffe. Die elektrischen Wirkungsgrade sollen über 50 % liegen. Eine Kommerzialisierung dieser Module ist ab etwa 2002 vorgesehen.

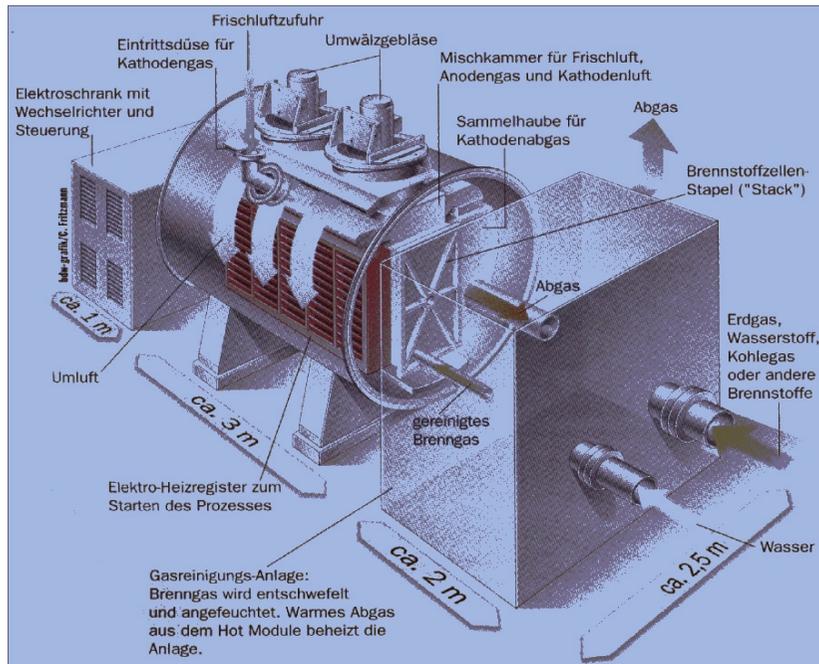


Bild 14: Schema eines 300 kW Hot Module (MCFC, mtu)

Bei den SOFCs, die im derzeitigen Entwicklungsstand im Temperaturbereich 800 bis 1000 °C arbeiten, sind die Entwicklungen sowohl für das niedrige wie auch das höhere Leistungsniveau bereits weit fortgeschritten. Unter der Produktbezeichnung Sulzer HEXIS sind für die Hausversorgung mit Wärme (~ 5 kW) und Strom (1-2 kW) etliche Erdgas-„befeuerte“ Einheiten mit einem elektrischen Wirkungsgrad von etwa 35 % bereits im Einsatz, so auch eine in Dortmund. Die verwendeten Zellen weisen eine ebene, runde Geometrie auf mit zentraler bzw. peripherer Zuführung von Brenngas bzw. Luft (Bild 15). Eine grössere Anzahl soll nun in den Feldtest gehen.

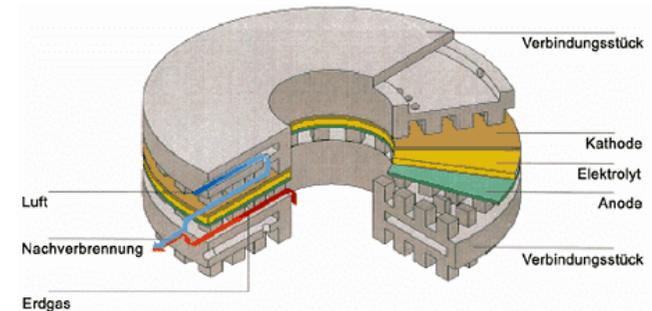


Bild 15: HEXIS

Für den höheren Leistungsbereich (≥ 100 kW_e) arbeitet Westinghouse (seit dem Kauf durch Siemens vor etwa 2 Jahren nun SiemensWestinghouse Power Corporation (SWPC)) in Pittsburgh und Erlangen an Brennstoffzellenstacks mit tubularen Zellen als Grundelement. Diese Zellen bestehen aus vorwiegend keramischen, einseitig verschlossenen Röhren von etwa 2 cm Durchmesser und einer aktiven Länge von 1,8 m (Querschnitt siehe Bild 11). Mehrere Rohre sind zu einem Bündel zusammengefasst. Erste prototypische Systeme mit einer elektrischen Leistung von ca. 100 kW und einem elektrischen Wirkungsgrad um 47 % waren bereits erfolgreich im Test. Gefördert durch die EU und in Zusammenarbeit von SWPC, EnBW, EdF, GdF und der TIWAG ist bei der EnBW in Marbach bei Stuttgart eine 1 MW-Anlage im Entstehen. Diese Anlage soll aus vier 200 kW-SOFC-Modulen und einer 200 kW-Mikrogasturbine bestehen und einen elektrischen Gesamtwirkungsgrad um 60 % aufweisen. Das Funktionsschema dieser Anlage ist in Bild 16 ersichtlich.

Für den Leistungsbereich zwischen wenigen kW_e und etwa 100 kW_e sind weltweit etliche Entwicklungen im Gange mit vorwiegend planarem Design, wobei die Zellen meistens von einer Elektrode oder einem Substrat getragen sind, um damit dünne Elektrolyte und dadurch hohe Leistungsdichten auch bei abgesenkten Temperaturen (<800 °C) zu ermöglichen. Beispielhaft ist hier das bereits erwähnte vom BMWi unterstützte deutsche ZEUS-Projekt zu nennen, bei dem das Forschungszentrum Jülich und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik in Stuttgart, im Wettbewerb unterschied-

licher Fertigungstechnologien und in Zusammenarbeit dabei sind, Stacks der 5 kW_e-Klasse aus ebenen Dünnschichtzellen, d. h. mit SOFCs der 2. Generation, zu realisieren.

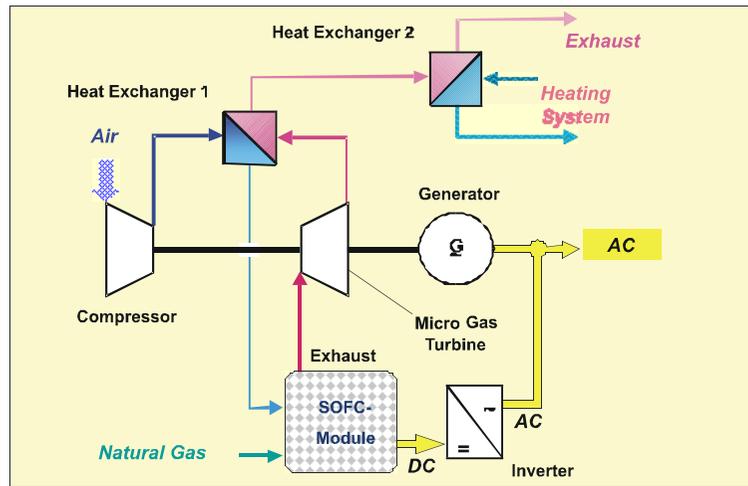


Bild 16: Schema einer SOFC/Mikrogasturbinen-Anlage

5. Ökonomische und ökologische Aspekte

Bei weiterhin rasch fortschreitender Entwicklung kann erwartet werden, dass sehr bald im Bereich der portablen elektronischen Geräte wie Laptops kleine Brennstoffzeleinheiten hinsichtlich der Kosten mit derzeitigen Hochleistungsbatterien konkurrenzfähig werden. Dabei haben sie die zusätzlichen Vorteile einer potenziell höheren Leistungsdichte und Reichweite, wobei der Brennstoff als Wasserstoff in Metallhydrid gespeichert oder in Form von flüssigem Methanol mitgeführt wird. In beiden Fällen ist ein leichter Austausch der Kartuschen oder ein Nachladen bzw. Nachfüllen möglich. Die mit Batterien verbundenen Probleme des Rezyklirens bzw. Entsorgens entfallen.

Bei der Anwendung von Membranbrennstoffzellen in Fahrzeugen sind – wie aus Bild 17 ersichtlich – der gegenüber Verbrennungskraftmaschinen deutlich höhere Wirkungsgrad, der insbesondere bei Teillastbetrieb noch zunimmt, sowie die lokal stark verminderte Umweltbelastung deutliche Vorteile, allerdings stellen neben den derzeitigen Kosten das noch nicht zufriedenstellend gelöste Problem der Brennstoffmitführung erhebliche Hindernisse dar. Auch müssen, wie weiter unten kurz gestreift, die Aspekte der Brennstoffbereitstellung, der Zellenherstellung und des Rezyklirens bei einer ganzheitlichen Betrachtung und Beurteilung berücksichtigt werden.

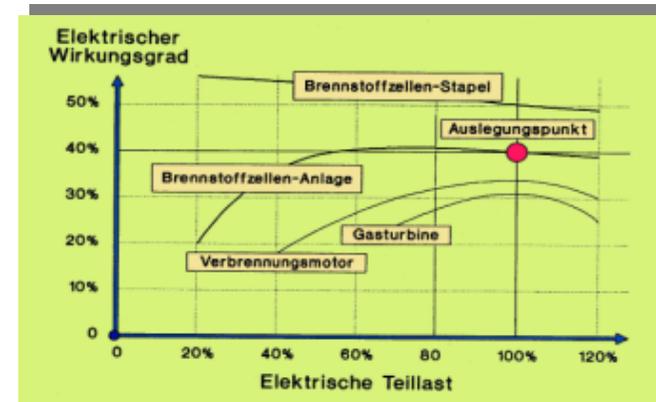


Bild 17: Wirkungsgrad und Teillastverhalten von Brennstoffzellen im Vergleich zu „konventionellen“ Wandlern

Für den stationären Einsatz von Brennstoffzellen ist vor allem die gekoppelte Bereitstellung von Strom und Wärme mit dem resultierenden sehr hohen Gesamtnutzungsgrad der eingesetzten chemischen Energie ein überzeugendes Argument. In Zusammenhang mit der Stromerzeugung im höheren Leistungsbereich sind insbesondere Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Systeme besonders attraktiv, da das hohe Temperaturniveau der Abwärme ihre weitere Nutzung in nachgeschalteten Wandlerstufen begünstigt, was, wie Bild 18 demonstriert, sehr hohe elektrische Wirkungsgrade erwarten lässt.

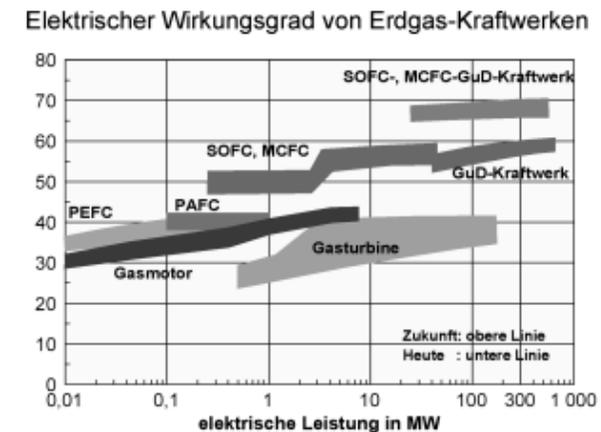


Bild 18: Elektrische Gesamtwirkungsgrade (in Prozent) diverser Brennstoffzellen allein und im Verbund mit weiteren nachgeschalteten Wandlern

Auch hinsichtlich niedriger Emissionen von CO, NO_x und NMHC zeigt sich die Brennstoffzelle in der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber Systemen mit Verbrennungsmotor oder Gasturbine deutlich überlegen, wie aus der prognostizierenden Graphik in Bild 19 deutlich wird.

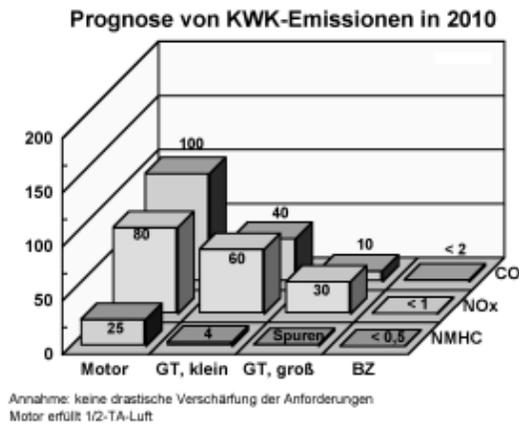


Bild 19: Prognose von KWK-Emissionen in 2010

Eine eingehende Betrachtung lässt rasch offensichtlich werden, dass bei der Beurteilung der Umweltwirksamkeit von Brennstoffzellen die Basis der Brenngaserzeugung nicht unberücksichtigt bleiben darf, wie die Tabelle in Bild 20 zeigt.

Einsatzfeld	mobil		dezentrale KWK		industrielle KWK		zentrale Stromerzeugung	
	PEFC (H ₂)	PEFC (MeOH)	PEFC	PEFC	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT
BZ-Technologie	PEFC (H ₂)	PEFC (MeOH)	PEFC	PEFC	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT
Vergleichstechnologie	Otto-Motor*	Otto-Motor*	Motor-BHKW	ungekoppelt**	Gasturbine	ungekoppelt**	Erdgas-GuD	ungekoppelt**
erschöpf. Energie	-14%	11%	26%	-39%	-12%	-47%	-9%	-36%
Treibhauseffekt	-28%	-13%	3%	-37%	-12%	-47%	-10%	-34%
Versauerung	-66%	-52%	-57%	-81%	-68%	-80%	-31%	-71%
Eutrophierung	-69%	-63%	-84%	-75%	-87%	-69%	-57%	-44%
Kanzerogenität	-98%	-95%	-77%	-89%	-77%	-97%	-54%	-92%

PEFC (H₂/MeOH): Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle mit Brennstoff Wasserstoff/Methanol SOFC/GT: Solid Oxide Fuel Cell
mit Gasturbine. * 5 l Benzin/100 km, Euro 4-Grenzwert ** mit Strommix und Erdgas-Brenner

Bild 20: Emissionen im Vergleich bei Verwendung fossiler Energieträger als Ausgangsbasis

Für den Einsatz in Fahrzeugen und in dezentralen bzw. industriellen BHKWs ist dort u. a. der Primärenergieverbrauch von BZ-Systemen im Vergleich zu konventionellen Systemen aufgelistet, wobei fossile Energieträger die Ausgangsbasis bilden. Dabei fällt auf, dass im Falle von Methanol-betriebenen Brennstoffzellen im mobilen Einsatz sogar ein höherer Verbrauch erschöpflicher Energie vorliegt. Hinsichtlich der anderen Auswirkungen (Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Kanzerogenität) bringt die Brennstoffzelle allerdings fast durchweg deutliche Verbesserungen.

Noch deutlicher zeigt Bild 21 die Bedeutung der Brennstoffbasis im mobilen Bereich, wobei nicht allein die Auswirkungen des Fahrens, sondern auch die der Kraftstoff- und Fahrzeugherstellung sowie der Entsorgung und des Rezyklierens von Materialien auf die CO₂-Freisetzung dargestellt ist. So lange fossile Energieträger die Basis bilden, können – global, ganzheitlich gesehen – nur höchstens geringe Reduktionen der negativen Umweltauswirkungen erzielt werden. Erst wenn die Brennstoffe Methanol und Wasserstoff regenerativ erzeugt werden, ergeben sich neben den starken lokalen Verbesserungen auch entsprechend grosse im Globalen. Auch für Brennstoffzellen ist der Übergang von der fossilen zur regenerativ geprägten Energiewelt eine Verpflichtung.

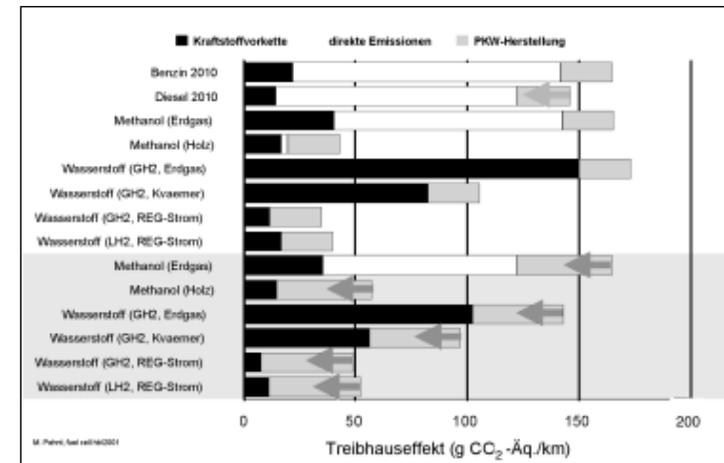


Bild 21: Treibhauseffekt

Man kann davon ausgehen, dass selbst bei Realisierung der unbestritten hohen ökologischen Potenziale die Brennstoffzellensysteme erst dann eine grössere technische Bedeutung insbesondere im mobilen Bereich erlangen werden, wenn auch die Kosten und die Lebensdauer mit den derzeit eingesetzten Energiewandlern mithalten können. Für verschiedene Einsatzbereiche sind in der folgenden Tabelle die vermutlichen kritischen Kostenlimits und nachzuweisende Lebensdauer dargestellt:

Einsatzgebiet	kritische Kosten [DM/kW _e]	Lebensdauer [h]
Pkw	≤ 100	> 4 000
Lkw/Bus	~ 300	~ 10 000
APU	~ 400	~ 5 000
Stationär (BHKW)		
- Haushalt	2 000	40 000
- Kraftwerk	2 000	> 60 000

Im Vergleich zum derzeitigen Entwicklungsstand müssen die Lebensdauer je nach Anwendung verdoppelt bis verfünffacht und die Kosten auf etwa 10 % abgesenkt werden, beides bei entsprechender Weiterentwicklung durchaus realisierbar.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Brennstoffzellen diverser Art haben bereits ihre prinzipielle Eignung nachgewiesen, fossile Brennstoffe mit höherem Wirkungsgrad im Vergleich zu derzeitigen Wandlern für die Strom- und Wärmeerzeugung zu nutzen und auch die Einführung regenerativ erzeugter Brennstoffe zu begünstigen. Sie können damit einen wichtigen Beitrag für die Schonung fossiler Energiequellen und deren Reichweiteverlängerung sowie für die Reduzierung der Umweltbelastung bei der Energiebereitstellung leisten. Brennstoffzellen haben daher das Potenzial, eine wichtige Komponente für eine zukünftige, nachhaltige Energieversorgung zu werden, insofern sind Brennstoffzellenaktivitäten eine unabdingbare Notwendigkeit. Trotz der noch hohen Kosten sind prototypische Anlagen zu bauen, um Erfahrungen zu sammeln und um Hinweise für Kostensenkungen zu erhalten. Wichtige Ansätze und Ziele bei der Kostensenkung, bei Erhöhung von Leistungsdichte und Lebensdauer sind vor allem:

- die Verminderung des Bedarfs teurer Werkstoffe und Suche nach kostengünstigen als Ersatz,
- die Entwicklung materialschonender Designs und serienfertigungsgeeigneter Herstellungsverfahren,
- die Erarbeitung von Rezyklierungsverfahren,
- die Entwicklung billiger serienfertigungsgeeigneter peripherer Komponenten,
- die Ermöglichung günstigerer Betriebsbedingungen (DMFCs mit höheren (> 100 °C) und SOFCs mit niedrigeren (≤ 800 °C) Betriebstemperaturen,
- Aufklärung und Abmilderung der Degradationsvorgänge und
- Fortschritte bei Brennstoffherzeugung und -bereitstellung

Es gibt noch viel zu tun. Geduld und Kontinuität sind gefordert.

Literatur

Für eine vertiefte Beschäftigung mit Historie, aktuellen Entwicklungen und mit der Bedeutung der Brennstoffzellen werden u.a. folgende Schriften empfohlen:

U. Bossel: The Birth of the Fuel Cell 1835-1845. European Fuel Cell Forum 2000, Dr. Ulf Bossel, Oberrohrdorf, Schweiz.

N.Q. Minh, T. Takahashi: Science and Technology of Ceramic Fuel Cells. Elsevier Verlag, Amsterdam 1995.

Brennstoffzellen ... effiziente Energietechnik der Zukunft (Tagungsband). Tagung des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, 20.-21.07.2000, Friedrichshafen.

Zukunftstechnologie Brennstoffzelle. Jahrestagung 1999 des Forschungsverbunds Sonnenenergie (FVS), FVS c/o Hahn-Meitner Institut GmbH, Kekuléstr. 5, D-12489 Berlin.

World Energy Outlook. Internationale Energieagentur, Paris (1998).

C. Carpetis: Globale Umweltvorteile bei der Nutzung von Elektroantrieben und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotoren. DLR-IB-200044417400 (2000).

Dienhardt, Pehnt, M. und Nitsch, J.: Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen verschiedener Brennstoffzellensysteme in Industrie und zentraler öffentlicher Stromversorgung. Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung (1999)

M. Pehnt: Ökologische Nachhaltigkeitspotentiale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen. DLR-STB-Bericht Nr. 24 (2001).

R. Henne und H. Müller-Steinhagen: Brennstoffzellentechnologie – ein allgemeiner Überblick. Tagungsband f-cell-Symposium „Die Brennstoffzelle“, Stuttgart, 15.-16.10.2001, Wirtschaftsförderung Region Stuttgart (Hrsg.).

RENEWABLE ENERGIES FOR CLIMATE BENIGN FUEL PRODUCTION – POWERING FUEL CELL VEHICLES

J. Ebner, Fuel Cell Project EP-BZ, Nabern
G. Isenberg, Research and Technology FT1/E, Ulm
R. Edinger, Research and Technology, FT4, Stuttgart-Möhringen
 DaimlerChrysler AG, Germany

Transportation contributes to energy consumption and greenhouse gas emissions, sustainable mobility requires reductions in both areas. Alternative fuels from natural gas and from renewable resources can contribute in the mid and long term to the fuel market for mobile as well as stationary applications. The lack of reliable data on emissions, energy chain efficiencies and costs demonstrates the need for field tests and demonstration projects. Fuel cells offer the technology to use “new fuels” in a highly efficient way.

Why Renewable Fuels for the Transportation Sector?

1. Situation of Energy Supply and Environmental Issues

In the future, the global energy demand is expected to rise considerably, resulting in increasing CO₂-emissions. A significant share of energy consumption is due to rising transportation activities. Today, the mobility sector is almost completely dependent on crude oil derivatives. Figure 1 shows the global energy and CO₂-emission situation and an outlook through 2020.

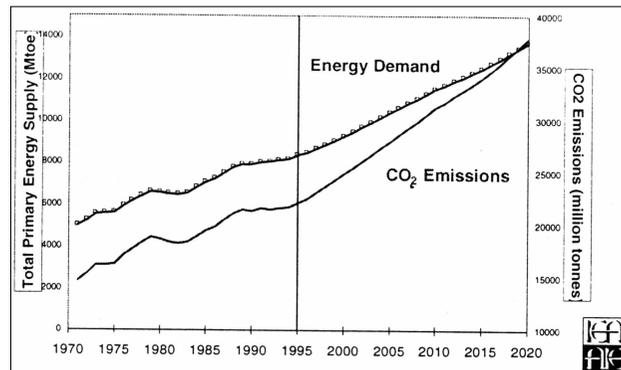


Fig. 1: Global Energy- and CO₂-Emission Situation

Source: Robert Priddle, International Energy Agency, Challenges of World Energy Supply, p. 11. Conference Proceedings „Energy Supply and Climate Protection“, Munich, November 11, 1999.

70% of proved crude oil reserves are located in the OPEC area (mainly in the Middle East region). Global production of low-cost conventional crude oil is expected to peak within the coming decade. The gap between increasing demand and economically available crude oil will be covered by using deep sea oil as well as oil sands and tars. Natural gas liquids are an additional option for closing the supply-demand gap, as illustrated in figure 2.

The production of non-conventional oil causes considerably higher CO₂-emissions and higher cost. Canada estimates greenhouse gas emission increases of a factor of 3.5 for heavy oil and a factor of 3.65 for oil sand resources.

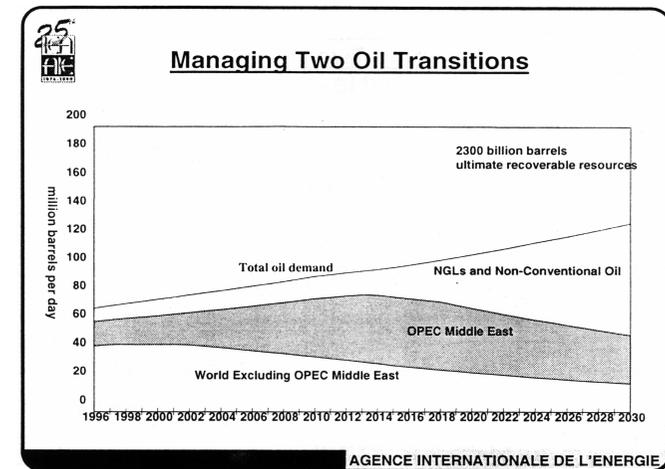


Fig. 2: Global Crude Oil Supply and Demand – Outlook

Source: Robert Priddle, International Energy Agency, Challenges of World Energy Supply, p. 11. Conference Proceedings „Energy Supply and Climate Protection“, Munich, November 11, 1999.

Due to strong increases in energy demand, the future fuel supply will face instabilities in ecological, economic, and political respect (price increases, volatile prices, distribution conflicts, augmenting greenhouse gas emissions etc.).

In the past years, the major energy consuming sectors have succeeded in stabilizing or reducing energy consumption and emissions, except for the mobility sector. Transportation faces high growth rates and expects a doubling of fuel consumption through 2020, connected with growing greenhouse gas emissions. Therefore, the climate discussion will more directly address the mobility sector as a major potential contributor to climate issues.

Sustainable mobility requires emission and consumption reduction and therefore a re-orientation of today’s fuel production and supply system:

- A secure, economic and environmentally sound fuel supply is a key factor for maintaining mobility and economic development.
- The geostrategic imbalance of crude oil consumption (approx. 80% in industrialized countries) and crude oil reserves (approx. 75% located in the OPEC area, esp. in the Middle East region) reveals the proneness of industrialized economies and mobility to political or logistic disturbances of fuel supply. Distribution conflicts are likely; currently 60% of Middle East crude oil is exported East, i.e. to the Asian nations. The global production share of OPEC oil will augment to more than 50%.
- Peak crude oil production of Western Non-OPEC countries, especially North Sea, will probably be reached within this decade; the USA have surpassed peak production in the 1990s. Increasing fuel demand in Western industrialized countries has to be met by augmenting imports from OPEC-countries (delivering mainly to Asia even today), by enhancing the use of Unconventional Oil, or by introducing alternative fuels such as hydrogen, ethanol and methanol. These fuels can be principally derived from natural gas, in the future from renewable energies.
- Transportation plays a key role in the discussion of the anthropogenic greenhouse gas effect. The self-commitment of the European automotive industry association (ACEA) on CO₂-reduction as well as the approaches of the German Federal Government target a mid-term stabilization and long-term reduction of CO₂-emissions caused by the transportation sector.

Conclusion

Increasing fuel prices due to either political reasons or as a consequence of decreasing low-cost crude oil resources as well as emission and consumption reduction legislation will amplify the pressure on the mobility sector (e.g. Climate Protection Program of the German Federal Government; EU Green Paper). This is mainly due to the following reasons:

- Improving air quality (local situation: reduction of air pollution, e.g. Clean Air Initiative of the World Bank)
- Mitigating global warming (global situation: CO₂-reduction, e.g. ACEA Self Commitment)
- Relaxation of dependence on crude oil (diversification of fuel supply through enlarging our supply basis by alternative fuels, in the long term from renewable resources).

The automotive industry focuses on a variety of solution approaches:

1. Enhancing efficiency of drive train systems:
 - Improving conventional engines, e.g. direct injection systems, light weight design, hybrid propulsion systems (improvement >20% within the next 10 years feasible)
 - Development of new propulsion systems, e.g. fuel cell electric drive systems (see fig. 10: DaimlerChrysler Fuel Cell Vehicle R&D Program with hydrogen and methanol powered vehicles)

2. Market introduction of CO₂-free fuels (e.g. hydrogen from renewable electricity) or CO₂-neutral fuels (e.g. methanol and ethanol from biomass), i.e. introduction of renewable fuels to the transport and mobility sector. Examples: Ethanol program in Brazil and USA; Bio-diesel program in Germany.

Renewable Energies already contribute a considerable share to the current energy consumption:

- World: 6%
(including non-commercial biomass: up to 14%; e.g. Sub-Sahara: 47% biomass)
- EU: 6% (Biofuels in EU: 0.15%)
(Sweden: 28,5%; Austria: 23,3%; Finland; 21,8%)
- Germany: 2%
- USA: 8% (thereof 44% biomass)

2. Renewable Energies for Transportation: Potentials and Approaches

In the mid- and long-term perspective, alternative fuels from natural gas and from renewable resources have to be introduced to the fuel market in order to

- enlarge our energy basis and increasing security for political and economic crises (loosen the dependence on crude oil, especially by using renewable and hence partly regional energy carriers)
- reduce transportation emissions by CO₂-free, CO₂-neutral and CO₂-reduced fuels.

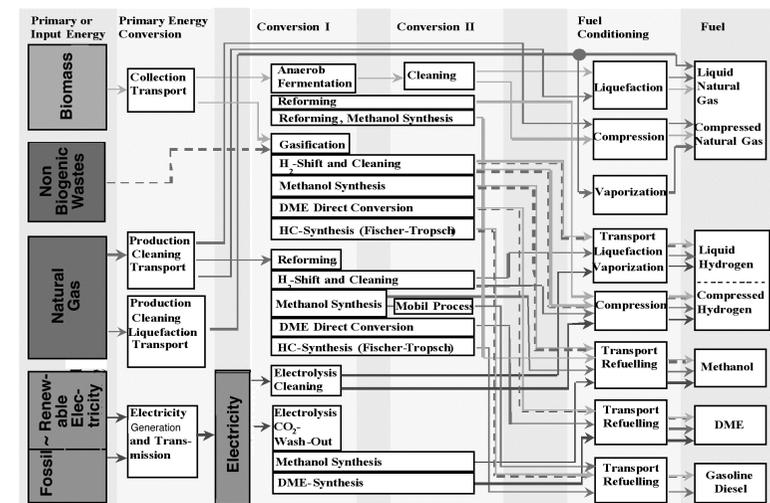


Fig. 3. TES Fuel Production Paths

For this approach, feasible energy sources are wind/hydro/solar power (electrolysis and hydrogen generation) as well as biomass (gasification and fermentation of biomass and wastes for producing methanol, ethanol, synthetic fuels; production of natural oils by pressing biomass with high oil content; biodiesel etc.). Figure 3 shows an overview of fuel production paths.

A variety of technological options exist for producing fuels from renewable energies that have to be adapted according to local and regional conditions (availability of different natural resources and renewable energies).

In Germany, the industry initiative Transport Energy Strategy (TES) was created to assess the potentials of alternative fuels on the basis of renewable resources and select one or two alternative fuels for mass market introduction.

In total, more than 70 fuel production paths were assessed on technology issues, energy efficiency, cost, CO₂-emissions and resource availability. The TES analysis is mainly based on available scientific examinations and publications as well as industry information.

Figure 4 presents TES results “Potentials of Alternative Fuels in the EU”. In the case of biomass, only residual and waste biomass was considered. Comparable analyses are available for Germany.

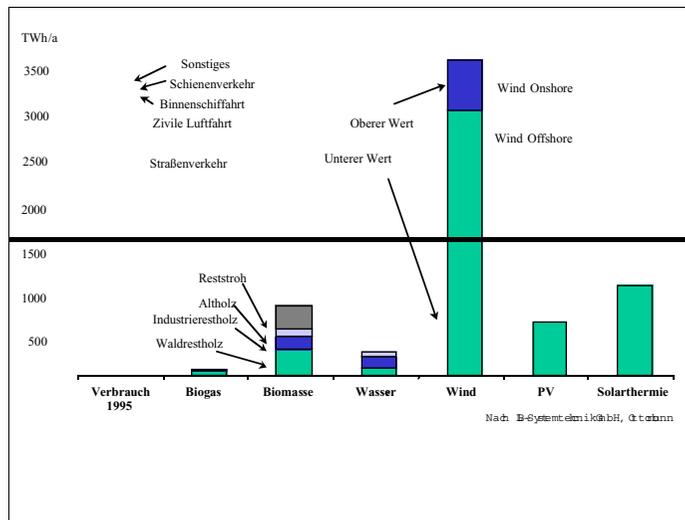


Fig. 4. Availability of Renewable Resources in Europe
Source: TES

Figure 5 shows the resource availability of renewable methanol in Germany (assumption: 50% of renewable resources are used for stationary application, 50% for the mobility sector); the corresponding values for hydrogen from renewable resources were evaluated as well.

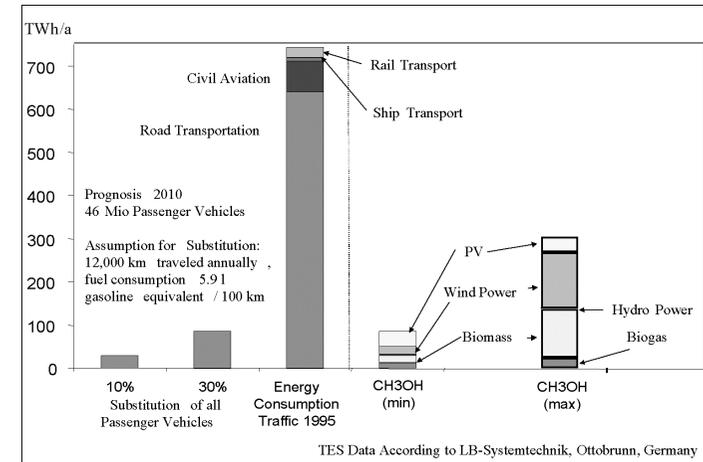


Fig. 5. Availability of Methanol from Renewable Resources to German Road Transport
Source: TES

The analyses indicated that approximately 6-8% of German fuel demand can be provided by using biogenic wastes and residues, and an additional 5-7% can be contributed by reactivating non-used agricultural areas partly for non-food production. Totally, some 15% of fuel demand can be provided from today’s view. Corresponding values for Europe are higher than 30% (see figure 6).

Referring to EU Green Paper biofuels are very attractive emitting between 40 and 80% less greenhouse gases than other fuels.

Selected examples:

1. Available biomass resources
 - Sweden: residual wood, approx. 125 TWh/a
 - Finland: residual wood, approx. 100 TWh/a
 - Germany: residual biomass, approx. 128 TWh/a
2. Offshore wind power resources
 - UK: 307% of national electricity consumption
 - DK: 1.708%
 - FRG: 55%
 - NL: 180%

Considerable additional resources can be made available in the context of the Kyoto Clean Development Mechanism (CDM) by recultivating eroded soils, but also by using agricultural surplus areas in Eastern Europe in the case of extending the EU East to the future joining candidates.

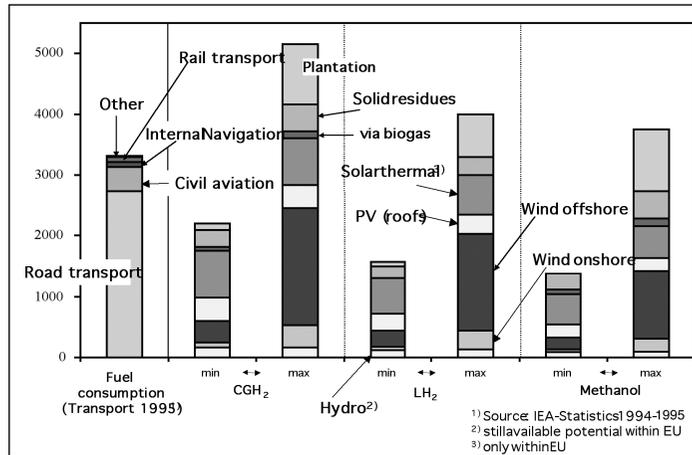


Fig. 6. Availability of Renewably Generated Hydrogen and Methanol in EU
Source: Ludwig Bölkow Foundation, Ottobrunn, Germany

Important to note is that the production of biofuels must not be in conflict with food production.

The technical feasibility of mass producing fuels from renewable resources has to be assessed in demonstration plants and field tests in order to gain reliable data on emissions and total cycle energy chains (input/output analyses) as well as cost data.

Selected efficiency values for the production of renewably produced fuels (source: TU Munich, IfE):

1. Compressed hydrogen from
 - gasification of biomass eta ~ 56%
 - electrolysis (PV and solarthermal electricity) 47-54%
2. Methanol from
 - Gasification of biomass 40-55%
 - Fermentation of biomass ~ 46%

Examples for specific fuel yield from renewable sources

- RME 1-1.4 t/ha/a
- Ethanol 4-5.000 l/ha/a (equals up to 2.6 t OE/ha)

- Fast growing wood 10-15 t/ha/a (equals 3-5 t OE/ha)
- Annual crops 12-18 t/ha/a (equals 4-6 t OE/ha)

Current political approaches for intensifying the use of renewable resources for transportation:

- EU Green Paper (11/2000)
“Required Commitment for 7% biofuels in 2010”
- EU Council (Transportation, 03/2001) on transport policy: “Accelerated introduction of alternative fuels from renewable resources”
- National Climate Protection Program of the German Federal Government (10/2000):
“Use of alternative fuels such as natural gas, hydrogen, and methanol”

Figure 7 shows the global potentials for producing biofuels. Noteworthy is the large share of secondary biomass resources.

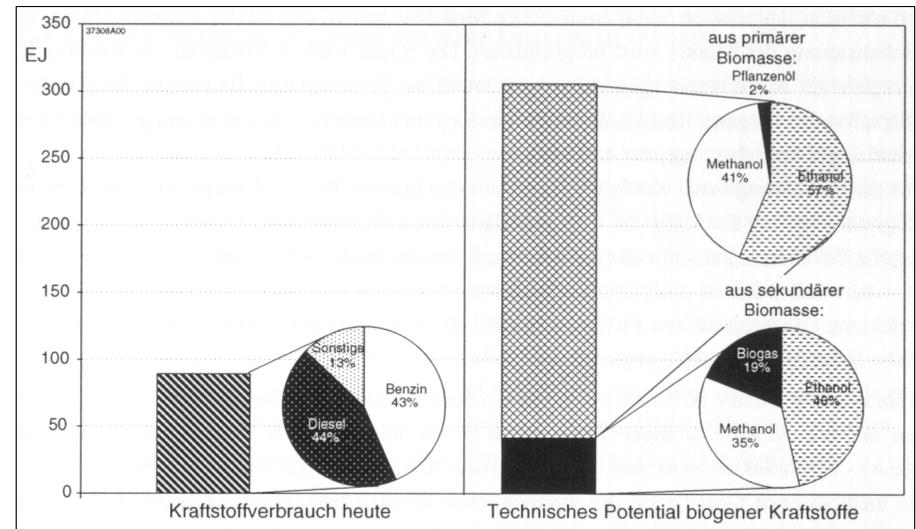


Fig. 7. Global Resources for Renewable Fuels
Source: Dreier, Thomas, “Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe. TU Munich, 2000, p. 115.

Figure 8 illustrates climate relevant CO₂-emissions for fuel cell vehicles and internal combustion vehicles (total cycle: fuel production and vehicle operation). Alternative fuels such as methanol and hydrogen can be derived from both fossil and renewable resources. Bio-metha-

anol and renewably generated hydrogen feature lowest CO₂-values when used in fuel cell vehicles.

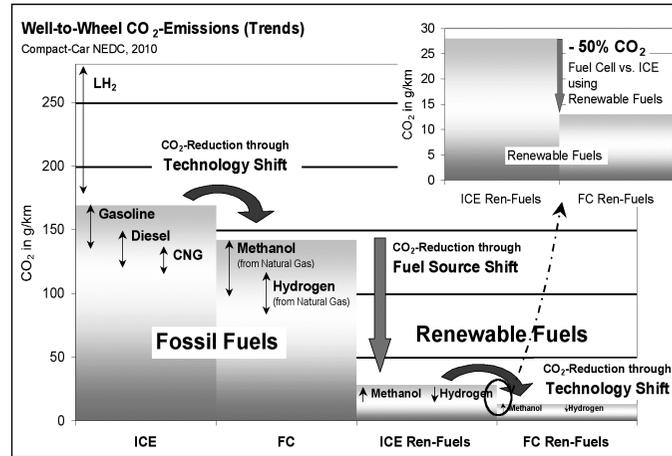


Fig. 8. Total Cycle Emissions for Internal Combustion Engines and Fuel Cell Electric Vehicles
Source: DaimlerChrysler and TES.

Remark: Range of expected vehicle efficiencies for market penetration (after 2010).

For the transition to unconventional oil, gasoline and diesel, production will feature lower efficiencies and higher CO₂-emissions.

Significant CO₂-reductions will be achieved with the market penetration of renewably produced fuels in combination with fuel cell vehicles: the fuel cell benefits from its efficiency advantage of 30-50% since both propulsion technologies then utilize the same fuel sources with identical fuel production efficiencies. This leads to well-to-wheel efficiency improvements of up to 50% for fuel cell vehicles powered by renewable fuels compared to internal combustion engines run with renewables.

Conclusion

Renewable resources for fuel production in combination with fuel cell drive systems can contribute:

- to reduce Europe's dependence on crude oil imports (today 75%, expected increase up to approx. 90% through 2020) and enhance supply security

- to reduce emissions from the mobility sector and thus approach a sustainable transportation system

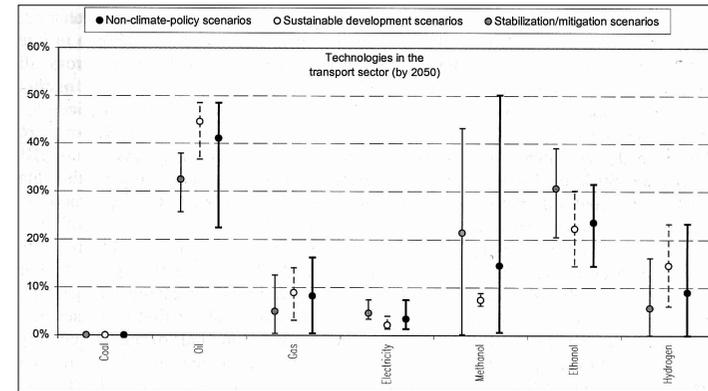


Fig. 9. Outlook of Market Share for Global Transportation Sector (Ranges for 2050)

Source: Keywan Riahi and R. Alexander Roehrl, „Energy Technology Strategies for Carbon Dioxide Mitigation and Sustainable Development“. Environmental Economics and Policy Studies (6/7, 2000)

Figure 9 presents a feasible fuel scenery characterized by a diversification of fuels (Source: IIASA).

However, there is no unique and ideal solution to the challenges mentioned above. Renewable resources such as photovoltaics, wind and hydropower, biomass etc. have to be regarded in their variety and regional availability, contributing together a significant share to energy consumption.

3. NECAR Fuel Cell Cars

DaimlerChrysler's commitment to FC technology is evident considering the different demonstration vehicles that were developed and introduced in recent years. As early as in 1994, Daimler-Benz demonstrated the feasibility of using fuel cells for vehicle propulsion with the introduction of the New Electric Car (NECAR) I. Just two years later, in 1996, Daimler-Benz presented NECAR II, a six-seat minivan, also fueled with compressed hydrogen, and demonstrated that FCVs have the potential to reach production maturity in the mid term.

NECAR 3 (1997), a compact car based on the A-Class of Mercedes-Benz, was the first FC car worldwide that runs on a liquid fuel: methanol. Hydrogen is generated on board by methanol reforming.

NECAR 4, presented in 1999 in Washington, uses liquid hydrogen as a fuel, reaches a top speed of 145 km/h and can travel more than 400 km before refueling. The fuel cell systems fits in the vehicle floor for the first time, allowing room for up to five passengers and cargo space

NECAR 5 (2000) finally demonstrated on board reforming of Methanol in a compact car with nearly no restrictions for passenger, again integrating the complete fuel processor and fuel cell system in the vehicle floor.

4. Fuel Cell Bus Solutions

Commercial vehicles operated in densely populated areas, like buses, delivery vans etc. are the largest group for an early market introduction of FC vehicles, using their environmental advantages. The first DaimlerChrysler commercial vehicle was presented in 1997. The NeBus (New Electric Bus) was built as a prototype of a hydrogen powered fuel cell bus and was designed for city and regional transportation of up to 58 passengers.

The amount of compressed hydrogen stored allows an operating range of approximately 250 km which is sufficient for a standard city bus tour. In comparison with conventional diesel and natural gas buses, the NeBus shows a good acceleration characteristics with low noise behavior and low energy consumption.

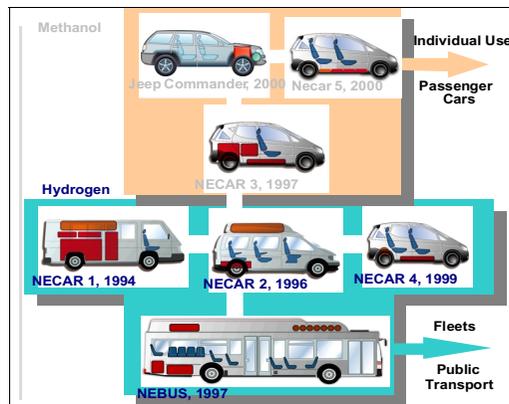


Fig. 10. Development Lines: Fuels for fc-vehicles: hydrogen, methanol and gasoline

DaimlerChrysler is in a fuel neutral way working on fuel cell concepts with three different fuels – hydrogen, methanol and gasoline. Each fuel has its specific liabilities and assets, unique strengths and weaknesses.

Fuel cell electric power generated from hydrogen is the easiest to produce, eliminates all carbon dioxide emissions during vehicle operation, and produces greater efficiencies than using gasoline or methanol. A hydrogen powered fuel cell is a way to achieve a true zero emission vehicle without the range limitations of a battery.

The key challenges for hydrogen-powered fuel cells are the storage system on board of the vehicle and the lack of fuel infrastructure. Consequently, we see chances for hydrogen as fuel for mass transit, company fleets, and car pools that operate within a limited region and can return to centrally located hydrogen filling stations.

Methanol is pointing the way toward a fuel cell technology for mass production and general use in private passenger vehicles. DaimlerChrysler engineers have developed a process that obtains hydrogen from methanol, using an on-board reformer. Fuel cell vehicles powered by methanol from fossil resources are locally virtually pollution-free and have the potential to reduce carbon dioxide emission by 30 percent compared to today's conventional vehicles. Furthermore, methanol has long-term environmental benefits because like hydrogen, it could be produced from renewable resources (e.g. from biomass).

Additionally, DaimlerChrysler pursues direct methanol fuel cell technologies as a much simpler successor technology with advanced research and development.

Gasoline fuel cell vehicles would not be dependent upon significant fuel infrastructure changes. However, gasoline is much more difficult to convert to hydrogen. For gasoline-based fuel cell systems, a more complicated reforming technology using much higher operating temperatures needs to be developed in order to change the liquid gasoline into a gas with a large proportion of hydrogen. In addition, a much cleaner gasoline is needed for operating the reformer properly. Naphtha, for example, with no sulfur, a higher hydrogen content and fewer aromatics could be the fuel for such a system.

Nevertheless, on-board gasoline-to-hydrogen reforming for fuel cell drive systems is yet a technological challenge.

5. DaimlerChrysler European Bus Fleet Program

To significantly enhance the development of clean urban transport, transit authorities of ten European metropolitan areas will participate in a joint fleet test with DaimlerChrysler and its bus subsidiary Evobus.

In each of these cities three buses shall be operated and a hydrogen refueling station will be erected. During the project the buses will be operated in public transport under normal traffic

conditions for a period of two years. While these first real scale field tests of fuel cell buses will deliver significant amounts of data to support the development process towards commercially viable fuel cell buses it is at the same time the transport companies participating in these tests of emission-free vehicles that will become global pioneers and gain considerable experience in this technology of the future.

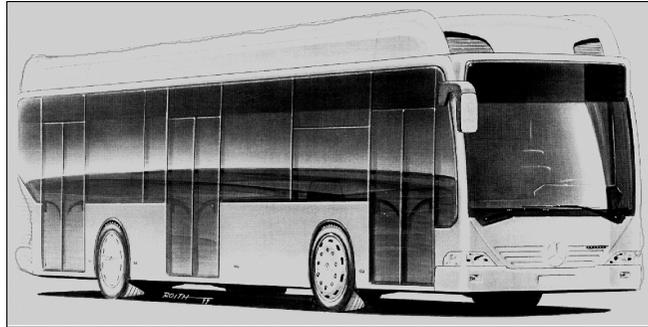


Fig. 11. European Bus Project NEFLEET

The Fuel cell buses will be based on the Mercedes-Benz Citaro low-floor buses and will be specifically modified to accommodate the fuel cell drivetrain. While the hydrogen supply infrastructure is being set up, the transport operators will receive guidance, knowledge and expertise for the operational phase of the buses.

Apart from technical aspects influencing the future fuel cell bus design the issues of hydrogen production and distribution will be a central point in this project. Different production paths for hydrogen will be demonstrated, including fossil and renewable options.

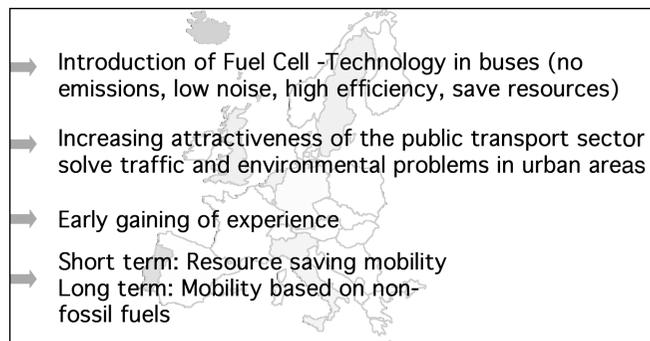


Fig. 12. Goals of NEFLEET

6. Conclusion

Fuel Cell systems seem to be the world's most promising alternative drive concept for the future. They are highly efficient, have extremely low emissions and good driving performance. Additionally, fuel cells could run on a variety of alternative fuels, including fuels from renewables.

The market ultimately has to decide what the best technology is. While fuel cells are progressing at fast pace, the traditional gasoline-powered combustion engine continues to improve as well.

DYE-SENSITISED NANOCRYSTALLINE SOLAR CELLS

Augustin J. McEvoy and Michael Grätzel

Laboratory for Photonics and Interfaces,
Department of Chemistry,
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

The dominant photovoltaic device at the present time is the solid state junction, in which the materials and concepts of semiconductor technology are applied to the challenge of cost-effective solar energy conversion into electricity. An alternative approach is electrochemical, with semiconductor contacts to electrolytes sensitised to visible light by charge transfer dyes. The principle of operation of the sensitised photoelectrochemical device has close affinity to photography, and depends for its future development on materials science on the nanometric scale, and on molecular engineering to provide dyes with the energetics, chemical kinetics and absorption match to the solar spectrum, if it is to successfully enter the market in competition with the established products.

1. Sunshine, Photovoltaics and Photosynthesis

Any discussion of photovoltaic technology and its future utility as part of the overall energy market must begin with an objective assessment of the solar energy conversion problem and the adequacy of the solution proposed. Solar irradiation provides an annual energy input to our planet of 1.56×10^{18} kWh, in comparison with which our annual primary energy consumption is smaller by a factor of 10^4 . However, this energy is distributed, non-uniformly, over the total surface of the earth, so obviously in practice it is not constantly available on a given area, and has a maximum power, at midday under a clear tropical sky, of only 1 kW/m^2 . A commercial photovoltaic system has a typical conversion efficiency of the order of 10 - 15%, so a panel giving 1 kW output under peak insolation (1 kW_p) has an area of at least 7 m^2 . Taking account of higher latitude, seasonal and weather considerations at a central European site, the typical annual electrical output of a photovoltaic system is about 800 kWh per installed kW_p of PV modules. There remains also the problem of load matching, given that power supplied by a PV system under our conditions is not coincident with maximum demand, and therefore conventional systems must remain available to maintain supply continuity, since an adequate technology for large-scale storage of electrical energy is not yet available. It follows that if PV is in the future to become a significant component of a European energy system, the solar energy panels must have a very large area, associated with low cost and extremely high reliability, as the economics of competition with other technologies demands a minimum lifetime of several decades under outdoor conditions - extremes of temperature, wind, snow and hailstorms, as well as corrosion and even vandalism!

With typical commercial module conversion efficiency to electricity of 10%, 1 kW_p of installed photovoltaic generation capacity represents a surface area of approx. 10 m^2 . Practical achievement in German conditions is an annual electrical output under 1000 kWh/kW_p .

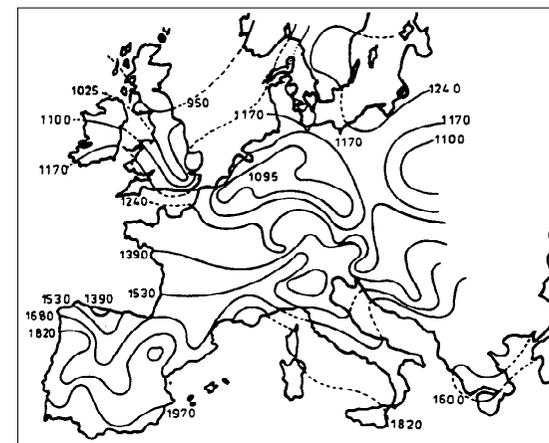


Fig. 1: Mean annual incident radiative solar energy in Europe, in kWh/m^2 .

Photovoltaic technology is presently dominated by silicon solid state junction devices, where the materials and processing follow the practice of the semiconductor industry. They therefore involve costly and energy-intensive high temperature and high vacuum processing steps, with correspondingly long economic and energetic payback times. Even with government support and a highly motivated clientele, competitiveness with conventional systems is far from being achieved. Alternative routes for conversion of sunlight to electricity are clearly required, both in their own right and as a stimulus to further progress in solid state PV. The original observation of a photoelectric effect, by Becquerel in 1839 was in fact with an electrochemical device (1). In this context, chemical systems, including the dye-sensitised photoelectrochemical cell, are emerging to challenge semiconductor physics for light-to-electricity energy conversion. At the same time, it is to be noted that our biosphere is effectively a solar energy conversion system of proven reliability over hundreds of millions of years. The natural organometallic dye in green plants, chlorophyll (Fig.2), absorbs sunlight and in the process of photosynthesis exploits it for the energy and materials needs of the biosphere; all animal existence in turn can be regarded as parasitical on plants. Even with a low energy conversion efficiency of about 1%, this process - and this molecule - have sustained biological life over geological time, due to the large surface area exposed by grasses and leaves. The dye-sensitised PV cell has emerged as a result of a biomimetic development strategy, inspired by this reality of nature. However in nature, once the functionality of the chlorophyll system was

established as adequate to provide the energy to maintain a self-replicating organism, that molecule was retained despite the ongoing variation in plant structure, environment and genetics. There is a similar history over geological time for the haemoglobin molecule in animals, also a nitrogen-cage structure or porphyrin surrounding a metal, in this case iron. To emulate photosynthesis on the other hand there is no restriction of the metal or the surrounding organic complex, giving endless possibilities for molecular engineering of dyes.

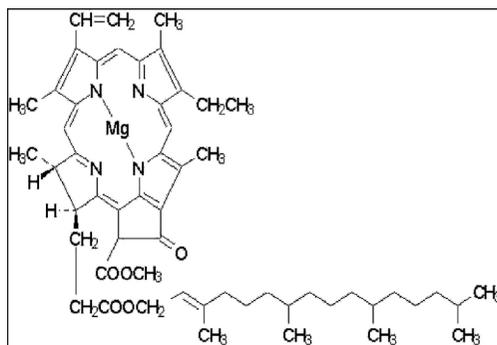


Fig. 2: Molecular structure of chlorophyll, the key to natural photosynthesis.

2. Sensitisation of Semiconductors

It could be asked why the use of a dye is necessary in chemical or electrochemical photoconversion devices. In the solid state cell, the semiconductor is at the same time the optical absorber of photons whose energy exceeds the band gap, and the site of charge separation to provide a photovoltage across a junction, p-n within the material or Schottky at a metal-semiconductor interface. On energy considerations, a semiconductor-electrolyte contact in a photochemical system is identical to the Schottky case, the redox potential of the electrolyte being the equivalent of the metal Fermi level. However, semiconductors with band gaps appropriate for the absorption and conversion of sunlight are liable to photocorrosion in contact with electrolytes; since positively charged holes arrive at the interface the species with which they are most likely to react oxidatively may be the semiconductor itself, unless the kinetics of the redox reaction are sufficiently fast to provide some degree of protection. Semiconductors with wide band gaps, and therefore stable under illumination in contact with electrolytes, are poorly matched to the solar spectrum; titanium dioxide, one of the better candidates, has a band gap of 3.1 eV., and therefore an optical absorption edge already in the ultraviolet. Association of the semiconductor with a separate optical absorber such as a suitable dye could then provide a photoeffect with visible light.

This particular problem was already well known in the physics of photography, contemporary in its origins, in the work of Daguerre (1837) and Fox-Talbot (1831) with the photoelectric observations of Becquerel. Silver halides were established as the standard photosensitive materials, but the formulation of photographic emulsions remained an art rather than a science for a further century, until the theory of the process was presented by Gurney and Mott in 1938 (2). However the limitations of early emulsions were gradually overcome, notable the inability to present realistically on a grey scale scenes observed in colour, given their insensitivity to mid-spectral and red light. It is now known that this is due to the wide bandgaps of the silver halide semiconductor grains, over 2.7 eV. Extension of the spectral response proceeded empirically, with the observation that the origin of the gelatin in the emulsion had a distinct effect. Only in this century was it recognised that organosulfur compounds in calf-skin gelatin were responsible, by producing a sulfide layer of wider sensitivity on each halide grain (3). A more systematic approach was followed by Vogel, as professor of photochemistry, spectroscopy and photography at the Königliche Technische Hochschule in Berlin towards the end of the 19th. Century. From 1873 onwards he researched the association of dyes with the silver halide grains, finding a photoresponse controllably extended into the red and even the infrared, making possible the panchromatic black-and-white (or more accurately, grey-scale) film and ultimately, with spectrally selective dyes, the modern colour film (4).

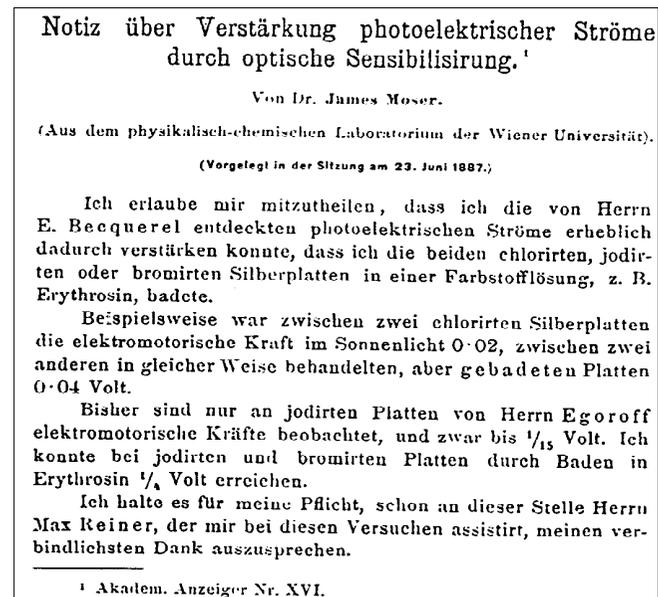


Fig. 3: The first report in the scientific literature of the optical sensitisation of a semiconductor, silver chloride, the obvious choice because of its use in photography (Moser, Vienna, 1887).

Possibly influenced by these developments, and using the same silver halide semiconductors, the first sensitisation of a photoelectric effect was also reported over a century ago, in the text reproduced above (5). For the physics community it is instructive to note that Moser, writing 20 years before the Einstein theory of the photoelectric effect, correctly referred to sensitisation of the electrical current, which we now know to be proportional to the radiative intensity or flux of photons, but he reported his result in volts, although the photopotential is primarily a function of the semiconductor band-gap and is linked only indirectly with the intensity through carrier loss processes.

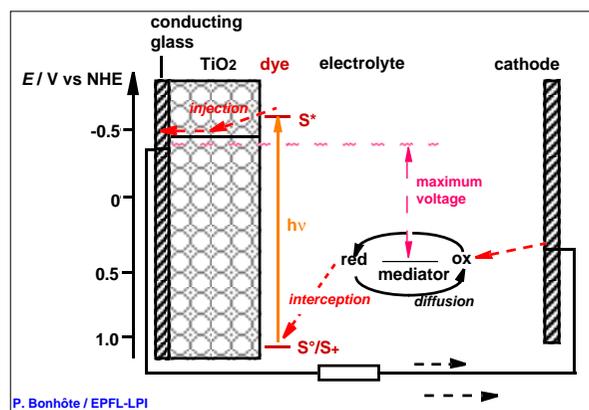


Fig. 5: Schematic of operation of the dye-sensitized electrochemical photovoltaic cell. The nanoporous sensitised semiconductor photoanode receives electrons from the photoexcited dye which is thereby oxidised. The charge-neutral state is restored by reaction with the redox electrolyte which in turn is regenerated by reduction at the metallic cathode by the electrons circulated through the external circuit.

This historic parallel maintained between sensitisation in photography and in photoelectrochemistry still seems to come as a surprise (6). That the same dyes were particularly effective for both processes was recognised amongst others by Namba and Hishiki (7) at the 1964 International Conference on Photosensitisation in Solids in Chicago, which was a seminal event in the history of dyes in photochemistry. It was also important for the presentation of a theoretical understanding of sensitisation, since it was still disputed whether the mechanism was an electron transfer or an energy-coupling process. The presently accepted model was determined shortly after in the work of Gerischer and Tributsch (8,9) on ZnO, which left little further doubt about the mechanism, and the significance for photoelectrochemistry of the dye-sensitisation phenomenon. It is now evident that the process involved the excitation of the dye from its charge-neutral ground state to an excited state by the absorption of the energy of a photon. One of the permitted relaxation processes is the injection of an electron into the valence band of the semiconductor, leaving the dye molecule positively charged. In the photographic process the injected electron reduces a silver ion, and thereby established the latent

image. In a photoelectrochemical cell, the injected electrons form a current in an external circuit, reaching a cathode in contact with the redox electrolyte. The uncharged ground state of the dye is in turn restored by electron transfer from the redox system, completing the circuit and providing a regenerative cycle functionally comparable with other photovoltaic devices, as presented in fig. 5.

The dye has clearly a charge transfer function, but it is not itself an electrical conductor. Therefore only molecules in intimate contact with the substrate can engage in the electron injection process. However, a monomolecular layer is not sufficient effectively to absorb the incident light for photovoltaic conversion of energy. This requirement of sufficient optical density of the absorbing structure leads to the use of nanocrystalline materials for the titanium dioxide semiconductor; by provision of an extended surface area, sufficient dye, chemisorbed as a monomolecular layer, can be retained on a given area of electrode to provide absorption to opacity of the incident light. The semiconductor structure, typically 10 μm thick and with a porosity of 50%, therefore has a surface available for dye chemisorption enhanced by a factor of several hundred in comparison with the projected electrode surface area, due to that nano-scale crystallinity. From the micrograph, fig. 6, the grain size in a photoelectrode is under 10 nanometers; smaller grain size is evidently associated with enhanced surface area.

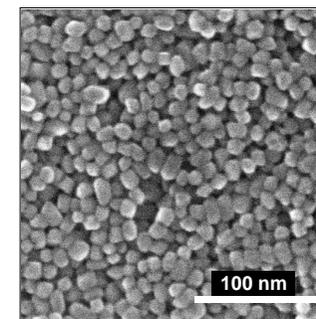


Fig. 6: SEM image of the surface of a mesoporous film prepared from a hydrothermally processed TiO₂ colloid.

It followed then to recognise that the major loss mechanism associated with polycrystalline or rough semiconductors in photovoltaics, the recombination of the photoexcited electrons with the mobile positive holes in the crystalline lattice or at surface or grain boundaries, is not applicable to the dye-sensitized electrochemical device (10). In amorphous silicon solar cells the suppression of recombination is carried out by reacting unsaturated bonds with hydrogen or fluorine. In the dye-sensitisation case, in contrast, no specific action is necessary, as the electron injected from the photoexcited dye finds itself in the semiconductor lattice, separated

spatially and by a potential barrier from the oxidised dye species (Fig. 5) within picoseconds of the optical excitation event. The carrier loss mechanisms are comparatively slow (11), and although conventionally referred to as recombination, by analogy with the solid-state process, the loss of a photoexcited electron from the semiconductor should be regarded as a recapture by an oxidised dye species, or a redox capture when the electron reacts directly with an ion in the electrolyte. Either occurs on a millisecond timescale. This extreme ratio of the kinetics of the photovoltaic process to those of loss mechanisms is essential if the required cell lifetime is to be maintained. In the case of the photovoltaic device, at least 10^8 cycles through the regenerative process of photoexcitation of the sensitising dye, electron injection and neutralisation of the charged state by the redox electrolyte are required in a typical 20 years of outdoor operation, in contrast with the single cycle of the photographic process. This vividly illustrates the constraints for development of practical photovoltaic dyes.

3. Semiconductor Film Processing

As already mentioned, titanium dioxide is one of the better candidates for use as a sensitisable semiconductor. Work in Lausanne began with an investigation of TiO_2 as substrate for a chemisorbed sensitizing dye, first on particles (12) in the 1980's, then on photoelectrodes (13). The material has many advantages for sensitized photochemistry and photoelectrochemistry: it is a low cost, widely available, non-toxic material, and as such is even used in health care products. The original semiconductor film used for our early photosensitization experiments (14), a fractal derived by hydrolysis of an organo-titanium compound, has since been replaced with a nanostructure deposited from colloidal suspension. This evidently provides a much more reproducible and controlled porous high surface area nanotexture. Further, since it is compatible with screen printing technology for deposition on a conducting transparent substrate, it anticipates future production requirements. Hydrothermal techniques are employed for the synthesis of the nanoparticulate anatase TiO_2 powder used in colloidal form as the screen printing ink for dye solar cell fabrication, a technology which is continuously evolving to yield film microstructures which increase the photovoltaic performance of such devices through better optical management. Other oxide semiconductors which have been studied in the context of dye sensitized photovoltaics include ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5 , and SrTiO_3 (15-19).

The microstructure of the semiconductor is of course a compromise, to achieve an optimal optical absorption and photovoltaic performance. Nanosize grains give the greatest surface area, but pores must be sufficiently large that the mobility of the charge carriers in the electrolyte, the redox ions, is not unduly inhibited. Also some degree of optical scattering by larger particles in the semiconductor film is also desirable, particularly for devices which function under indirect illumination such as vertical building facades. Processing parameters

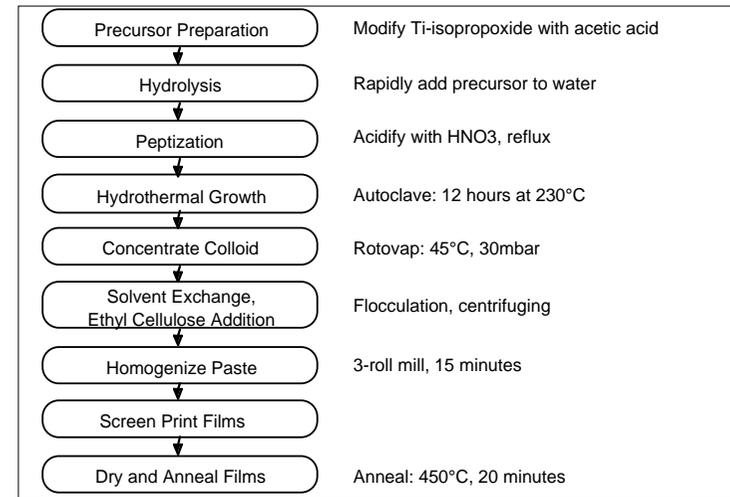


Table 1: Flow diagram for the preparation of TiO_2 colloids and mesoporous films.

such as precursor chemistry, hydrothermal growth temperature for the titania powder, and sintering conditions are varied in the optimisation procedure. A flowsheet for hydrothermal processing is presented in Table 1 as an example of the required development work, and in fig.7 the control of grain size which results from it, as determined by a nitrogen adsorption method.

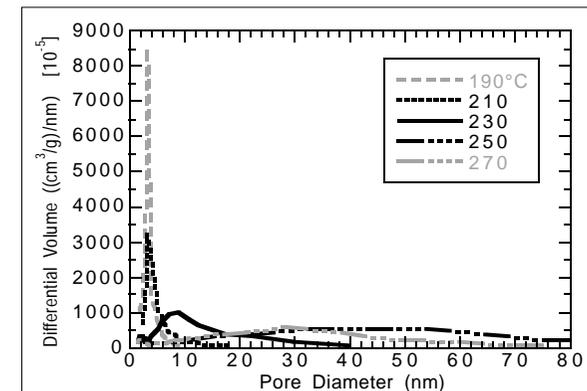


Fig. 7: Influence of hydrothermal growth temperature of TiO_2 colloids on the pore size distribution. Curves obtained from N_2 desorption data using the BJH model.

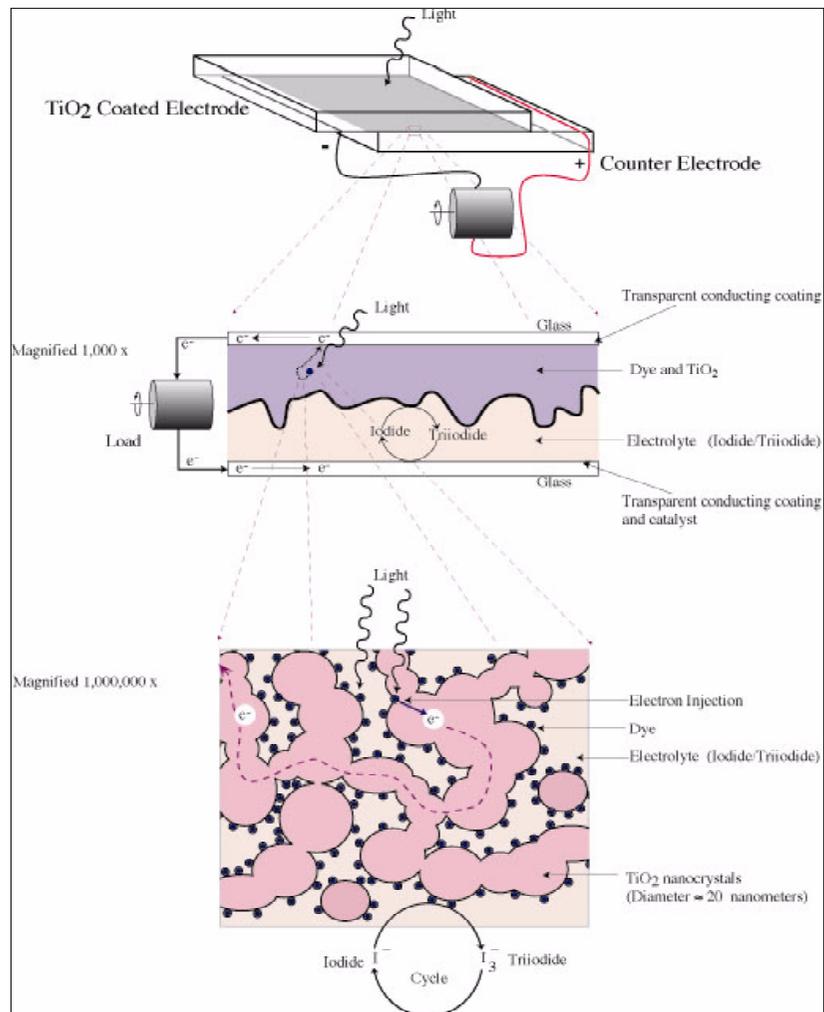


Fig.8: Structure of dye-sensitized photoelectrochemical cell on different scales. (Top): a complete cell (centimetric scale). (Centre): electrodes and electrolyte, micron scale. (Bottom): nanocrystalline semiconductor interconnected porous layer, with adsorbed monolayer of dye and entrained electrolyte (nano scale).

For the photoanode, the screen printed pattern using the hydrothermally grown powder in an ink is sintered to the conducting glass substrate, and the dye monomolecular layer applied. The cathode or counter-electrode is usually a similar glass, treated to electrocatalyse the redox reaction, for example with highly dispersed platinum. The cell is completed with an edge seal

to contain the electrolyte, usually a liquid although gel or solid variants are also possible. Cell structure on successively smaller scales is shown in fig. 8, ultimately reaching the molecular dimensions of the dye itself.

4. Dye Development

The constraints determining the dye selection have already been indicated, and the production of a suitable formulation is a demanding exercise in synthetic chemistry. Firstly and evidently there is the matter of an optical absorption spectrum closely matched to the application of the photovoltaic device, whether it be to the solar spectrum for energy conversion or to artificial light sources for indoor use. With a high optical absorption coefficient across the visible spectrum, the excitation process should be rapid but subsequent relaxation slow, as already explained. For attachment to the semiconductor surface the molecule should adsorb strongly, by preference through a specific chemical bond, to the substrate, but avoid aggregation so that a monolayer coverage forms spontaneously on contact between the semiconductor and the dye in solution. To facilitate this chemisorption, carboxylate or phosphonate groups, which bind strongly to titanium sites in the oxide, are integrated into the dye molecule. The dye structures selected for intensive development arose originally from biomimetic considerations, given the role of photosynthesis in the natural world. However, whereas plant photosynthetic processes rely on chlorophyll, a magnesium organometallic molecule, the synthetic chemist can select from the whole range of complex-forming metals to design an appropriate metal-ligand charge transfer structure. When development of the photovoltaic device started, ruthenium pyridyl complexes were already attracting considerable interest as photochemical reagents (20), so they have since been the principal focus of dye sensitizer development.

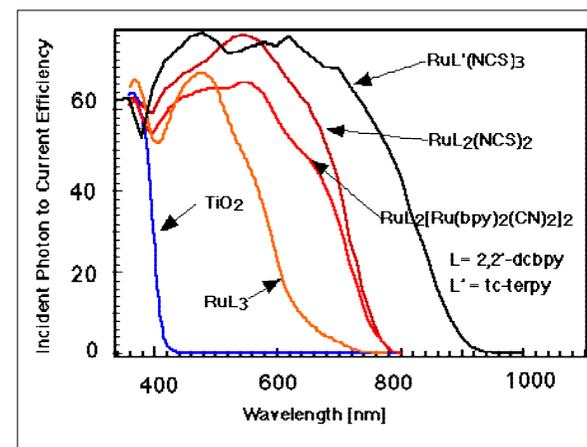


Fig.9: The photocurrent action spectrum of a cell containing various sensitizers, where the incident photon to current conversion efficiency is plotted as a function of wavelength.

The first priority for any PV cell is of course efficient conversion of incident radiation, requiring the spectral match of the optically absorbant component to the incident light, and in this regard the early dyes were inadequate. Development of dye molecules for extension of sensitivity, ultimately into the infra-red, is dramatically illustrated in fig. 9. The progress in extension of the absorption spectrum of ruthenium complexes from the early tris-bipyridyl ("RuL₃") molecule, absorbent only in the blue region and therefore appearing red, to the present-day wide-spectrum material ("RuL' (NCS)₃"), panchromatic, absorbing right across the visible range and therefore presenting itself as a "black" dye, has been a key step in cell development. The strategy has been to retain ruthenium as the metallic component, with structural modification of the ligands to tune the energetics of the molecule. The LUMO level (lowest unoccupied molecular orbital) to which the photoexcited electron is promoted must remain above the conduction band edge of the semiconductor substrate if electron injection is to occur. Extension of the spectral sensitivity is then accomplished by raising the HOMO (highest occupied molecular orbital) of the molecule, as in fig. 10. This molecular engineering process is of particular interest to physicists, as there is a close analogy to band gap modification in compound semiconductors.

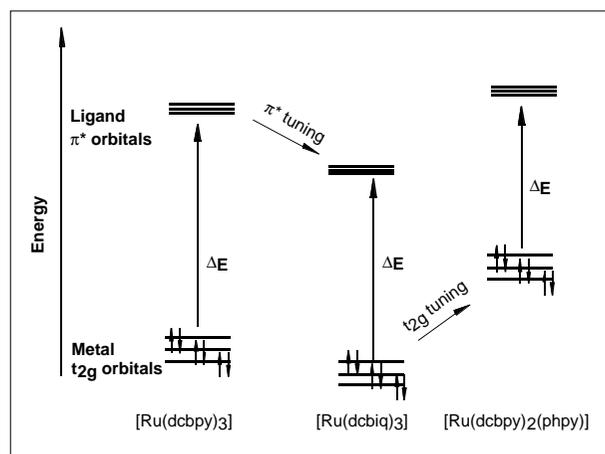


Fig.10: Tuning of HOMO (t_{2g}) and LUMO (π^*) orbital energy in various ruthenium polypyridyl complexes.

A trimer structure, consisting of three ruthenium bis-bipyridyl entities, cyanide bridged, and chemisorbed through carboxylate groups to the titania surface, gave the first significant extension of absorption spectrum, on the principle that an antenna structure with consequent charge transfer could be appropriate. However monomer structures are inherently simpler, and modification of pyridyl complexes by nucleophilic groups provided a more promising route. By

thiocyanate substitution, this gave rise to the dye RuL₂(NCS)₂, (L=bipyridyl), for several years our standard chromophore and the basis for most of the system development work. Under the product name N3 it is now probably the best-understood photosensitisation molecule, particularly for its charge exchange kinetics (11). In the ground state the metal ion is in oxidation state (II), but on excitation it loses a further electron to the organic ligand structure, a metal-to-ligand charge transfer. Loss of the electron through the bridging carboxylate to the semiconductor substrate occurs within picoseconds, faster than other relaxation processes and explaining the high quantum efficiency of the sensitised system.

Isomerism of the dye molecule can permit the identification of structures with variant optical properties. For example the standard N3 is a *cis*-isomer (both NCS thiocyanate groups on the same side of the molecule); the corresponding *trans*-isomer has an extended sensitivity into the infra-red, but over time it tends to revert to the *cis*-structure. A *trans*-type configuration can be stabilised by replacing the L₂, bis-bi-pyridyl ligand system by a single tetrapyridyl coordination (21).

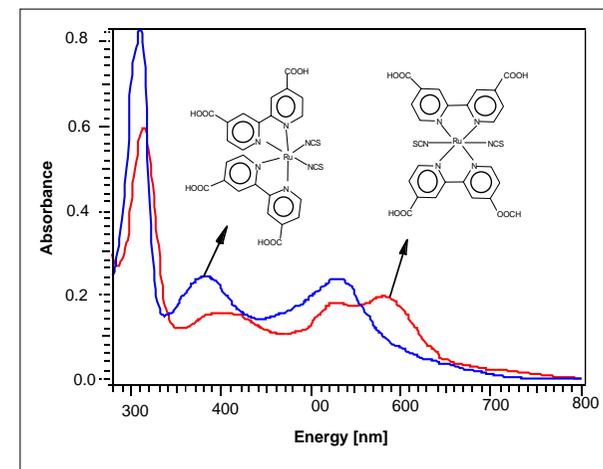


Fig.11: UV-visible absorption spectra of *cis*- and *trans*-bis(2,2'-bipyridine-4,4'-dicarboxylic acid) ruthenium (II) (NCS)₂, or N3-type, complexes.

Addition of a third thiocyanate group, with the necessary reduction of pyridyl complexation from bis-bi- to ter-pyridyl, gives the structure of the state-of-the-art black dye, "RuL' (NCS)₃", whose spectral sensitivity extends throughout the visible and into the infra-red, approaching the ideal absorption edge position (1.4 eV) for optimal solar energy conversion. It can be expected that this type of molecular engineering will make available suitable dye formulations for a variety of applications, such as infra-red sensitive dyes with lower visible absorptivity,

useful for "transparent" cells, or dyes with selective absorption, the resulting color presentation being determined for example by architectural preference for building-integrated PV.

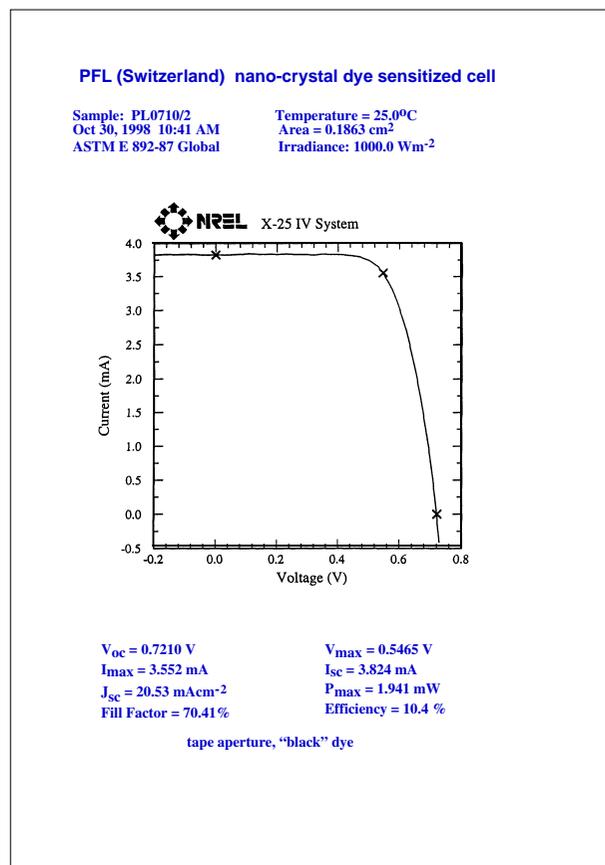


Fig. 12: Certified performance characteristics of a "black dye" [RuL'(NCS)₃] cell.

The interaction between the dye molecule and the adsorbant surface also influences the energetics of the dye and the kinetics of its chemical reactions. For example it is known that on adsorption of a carboxylated dye, a titania surface becomes positively charged, due to the deprotonation of the acid dye. The consequent interface potential gradient obviously enhances electron injection efficiency, leading to a higher photocurrent. However efficiency does not proportionately rise, since the positive shift of band edge is associated with a lower open-circuit voltage. Optimisation of the cell efficiency also requires a control of protonation of the

dye. With this in mind several salts of N3 with organic cations such as tetrabutylammonium and imidazolium have been investigated (21). These salts are also more soluble, facilitating purification by recrystallisation and thereafter adsorption to the semiconductor from the more concentrated solution. The thermal dehydration behaviour shows the association of only 1.5 molecules of water per Ru ion, for the optimum di-tetrabutylammonium salt, with a thermal stability thereafter to 190°C; at that point the organic cation tends to dissociate. When adsorbed on the semiconductor the dye stability is further enhanced, decarboxylation requiring over 300°C. This remarkable rise is attributed to the strength of the Ti ion to carboxylate bond between the semiconductor surface and the chemisorber molecule. This confirmation of the thermal stability of the surface-bonded dye therefore opens the prospect of a very wide temperature window for processing the sensitised semiconductor during any manufacturing routine, simplifying bonding and sealing processes by permitting thermal treatment and curing of sealants even after the dye has been admitted to the cell.

Modification of the surface of the semiconductor to optimise adsorption and charge transfer behaviour is a further option. Several years ago, deposition of an outer intrinsic titania (22) or a solid solution layer (23) on the semiconductor was investigated in order to control the interface properties after dye adsorption. Evidently a nanostructure emulating the oxide or insulator layer in MOS or MIS solid state Schottky devices has a similar effect in defining the bandedge characteristics in the photoelectrochemical case.

5. Solid State Heterojunctions

Given that a dye at the interface in a photoelectrochemical cell can sensitise the system to photons of lower energy that would not otherwise be absorbed by the semiconductor, the possibility presents itself that the same effect could be verifiable at a semiconductor interface to a different conducting phase. Here we are not considering the special cases of gel or polymer electrolytes (24), because in these charge transport is by the same mechanism as in a conventional liquid electrolyte. The sensitised solid state cell, while functionally similar, requires a contact between the n-type titania semiconductor substrate and a metal or p-type semiconductor. Since the sensitising dye provides charge separation but not charge transport, and is distributed at an interface in the form of an immobilised molecular species, it is evident that for charge transfer each molecule must be in intimate contact with both conducting phases. This applies in the first instance to the wide bandgap porous semiconductor substrate into which the photoexcited chemisorbed molecules inject electrons. It is also evident that in the photoelectrochemical format of the sensitised cell the liquid electrolyte penetrates into the porosity, thereby permitting the required intimate contact with the charged dye molecule necessary for charge neutralisation after the electron loss by exchange with the redox system in solution. It is not immediately evident that an interpenetrating network of two conducting solids can be established so easily that an immobilised molecule at their interface can exchange charge carriers with both. This is a

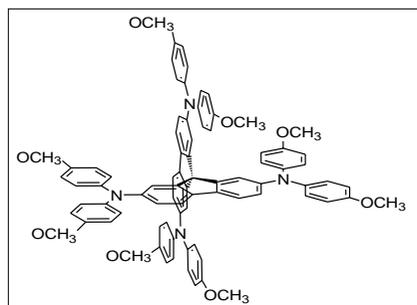


Fig. 13: structure of spirobifluorene hole-conducting p-type organic semiconductor. The fluorene structures are perpendicular, conjoined through a carbon site common to both.

particular obstacle to the realisation of a sensitised nanostructured Schottky junction. However use of transparent organic semiconductors is a possibility, and initial results in our laboratory (25) and elsewhere (26) are promising. In both cases the hole conducting p-type materials are deposited by spin coating from the liquid phase in order to achieve the necessary intimate contact. In the latter case a mixture of polymers was used, which phase-separate spontaneously on removal of a solvent, whereas the Lausanne laboratory introduces a solution of the conducting compound into a previously-sensitised nanostructure. The charge transfer material currently used is a spirobifluorene, proprietary to Hoechst (27) as shown in Fig. 13. As a matter of technical precision, if this materials functions in the cell as a hole conductor, the device constitutes a sensitised nanostructured heterojunction.

6. Applications for Sensitised Photovoltaic Devices

Commercial success is not an immediate and necessary consequence of the development of a technically elegant system. Therefore the efficiency and stability of the dye solar cell must be associated with practical and economic advantages. On the technical side, the efficiency of conventional solid state junction cells falls off rapidly with increasing temperature and decreasing light intensity, whereas the sensitised system remains more constant under both operating parameter variables. The cell fabrication processes are intrinsically less demanding - no high vacuum or high temperature treatment steps, with therefore a low "grey" energy demand, whereas silicon devices require up to 5 gigaJoules per square meter of cell surface. The energy recovery time for the sensitised system should therefore be distinctly shorter. For architectural applications the possibility to select for cell color, even transparency, and texture gives additional freedom of action in building design, and with the incorporation of a light

diffusive function, by admixture of large grains in the semiconductor layer for example, the effect of variation of light incidence angle can be less marked. The cells may be bifacially sensitive, thereby capable of increased output when mounted over high albedo surfaces. Finally even on the parameter of energy conversion efficiency amorphous silicon is already successfully challenged, even though crystalline silicon cells may still retain a margin of advantage. To illustrate this competitiveness, in fig. 14 the incident photon conversion efficiency spectrum of a state of the art dye photoelectrochemical cell is compared with those of new and of aged a-Si solid state devices under daylight conditions.

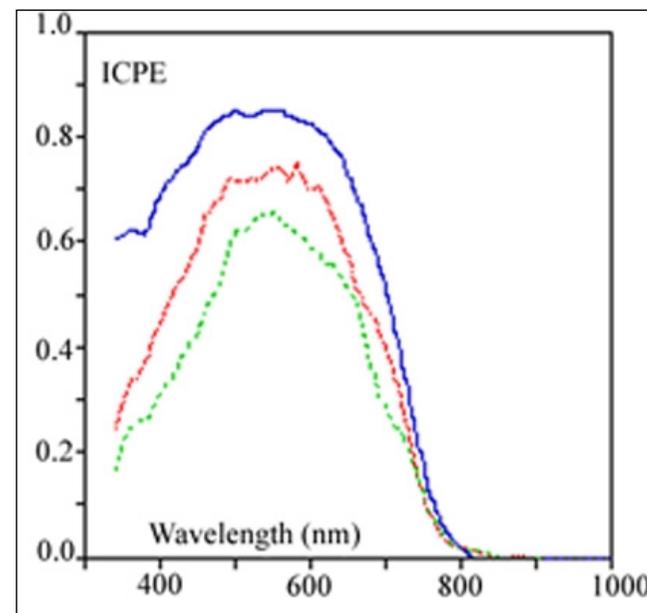


Fig. 14: Spectral response, given as incident photon conversion efficiency against wavelength, of a dye-sensitised cell (—) in comparison with a new (-----) or used (....., 800 W/m²) amorphous silicon cell.

A second area of competitiveness is for indoor devices, under artificial light. In the dye-sensitised cell one of the parameters most difficult to optimise is the fill factor, related as it is to ion diffusivity in the electrolyte and therefore to its viscosity. The lower intensity under artificial light indoors is advantageous for the sensitised device, as its conversion efficiency is maintained or even raised, whereas that of conventional junctions falls off as the open-circuit voltage decreased in those circumstances. Behavior under indoor conditions, including under a variety of artificial light sources, is compared with that of a-Si cells in fig.15.

7. Conclusion

Whereas the total solar energy input to earth is extremely high, at a given site the energy density is low and intermittent, a fact which constrains its integration into the energy economy, particularly in the absence of a high-volume energy storage technology. To compensate for these difficulties and to compete technically and economically with more conventional processes, solar photovoltaic systems must be of large area, low cost, and very high long-term reliability. It is not therefore a simple technology to implement. Stimulation of imaginative energy conversion procedures for electricity production from sunlight is therefore highly desirable, and the emergence of the dye-sensitised photoelectrochemical solar cell is therefore not only of interest in its own right, but is also just that type of stimulus required, both to motivate advances in solid state devices, and also as a verification that alternative procedures are possible.

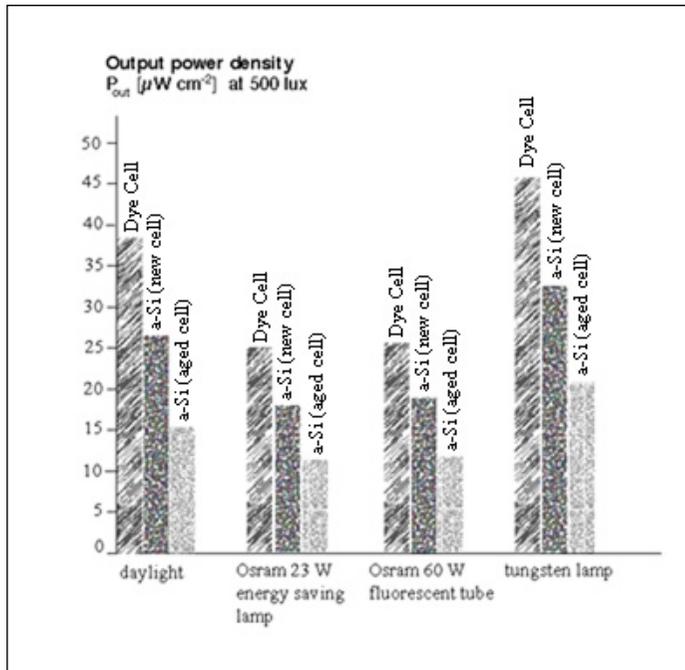


Fig. 15: Comparison of power outputs of a dye-sensitised nanocrystalline photoelectrochemical cell and of a-Si devices, new and aged, under typical indoor illumination from natural or artificial sources.

The use of dye-sensitised semiconductors has a long development history, in parallel for image and information storage through photography and now as an energy conversion technology through applied photochemistry to rival the established solid state devices. The photoelectrochemical system, and the related dye-sensitised heterojunction. In some aspects the various solar energy conversion devices may be regarded as having complementary advantages, so that market possibilities specific to the sensitised systems can be expected to emerge. After a decade of gestation, therefore, the sensitised cell is now approaching technical maturity, so commitment to production is now more a question of commercial judgement, not technical limitation.

8. Acknowledgements

It is evident that the development of a new technical concept is a team effort, here involving specialisations from ceramic thin film processing to organometallic synthesis. Many of the collaborators in this effort are cited in the references below. Their efforts are appreciated. Research and development are impossible without resources and institutional support. The Swiss Federal Office of Energy funded the initial work on this concept; thereafter several industries have shown their confidence in its potential by licensing the relevant patents. International interest is reflected by the engagement of the European Office of Aerospace Research and Development, Air Force Office of Scientific Research, and Materials and Manufacturing Directorate, United States Air Force Research Laboratory, and of the European Union within Framework Programme 5 in association with other research institutes and industry.

REFERENCES

1. E.Becquerel, C.R.Acad.Sci. Paris 9 (1839) 561.
2. R.W.Gurney and N.E.Mott, Proc.Roy.Soc., A164 (1938) 151.
3. T.H.James, Theory of the Photographic Process, 4th. Ed., MacMillan, New York, 1977.
4. W.West, Proc. Vogel Cent. Symp., Photog. Sci. Eng., 18 (1974) 35.
5. J.Moser, Monatsh. Chem., 8 (1887) 373.
6. M.T.Spitler, J.Chem.Ed., 60 (1983) 330.
7. S. Namba and Y. Hishiki, J.Phys.Chem., 69 (1965) 774.
8. H. Tributsch, Ph.D. thesis, Techn.Hochschule München (1968).
9. H. Gerischer and H. Tributsch, Ber. Bunsenges, Phys.Chem., 72 (1968) 437.
10. A.J. McEvoy, in "Advances in Solar Energy", W.H. Bloss and F. Pfisterer (Eds); Proc. Intern. Solar Energy Soc., Hamburg (1987), Pergamon, Oxford (1988), p. 2921.
11. S.A.Haque, Y.Tachibana, R.L.Willis, J.E.Moser, M.Grätzel, D.R.Klug and J.A.Durrant, J.Phys.Chem.B, 104 (2000) 538.
12. D. Duonghong, N. Serpone and M. Grätzel, Helv.Chim.Acta, 67 1012 (1984).
13. H. DeSilvestro, M. Grätzel, L. Kavan, J. Moser and J. Augustynski, J.Am.Chem.Soc., 107 (1985) 2988.
14. N. Vlachopoulos, P. Liska, A.J. McEvoy and M. Grätzel, Surface Sci, 189/90 (1987) 823-831.
15. I. Bedja, S. Hotchandani, P.V. Kamat, J. Phys. Chem., 98 (1994) 4133.
16. K. Sayama, H. Sugihara and H. Arakawa, Chem. Mater. 10 (1998) 3825.
17. B. O'Regan and D. T. Schwartz, J. Appl. Phys., 80 (1996) 4749.
18. H. Rensmo, K. Keis, H. Lindstrom, S. Sodergren, A. Solbrand, A. Hagfeldt, S.-E. Lindquist, L.N. Wang and M. Muhammed J. Phys. Chem.B, 101 (1997) 2598.
19. R.Dabestani, A.J.Bard, A.Campion, M.A.Fox, T.E.Mallouk, S.E.Webber and J.M.White, J. Phys. Chem., 92 (1998) 1872.
20. M. P. Dare-Edwards, J.B.Goodenough, A.Hamnett, K.R.Seddon and R.D.Wright, Faraday Disc. Chem. Soc., 70 (1980) 285.
21. M.K.Nazeeruddin, S.M.Zakeeruddin, R.Humphrey-Baker, M.Jirouzek, P.Liska, N. Vlachopoulos, V.Shklover, C.-H.Fischer and M. Grätzel, Inorg. Chem., 38 (1999) 6298.

22. US patent 5525440 (1996).
23. US patent 5350644 (1994).
24. S.Mikoshiha, H.Sumino, M.Yonetsu and S.Hayase, Proc.16th. Europ. PV Solar Energy Conf., Glasgow, Scotland, May 2000, page. 47.
25. U.Bach, D.Lupo, P.Comte, J.E.Moser, F.Weissörtel, J.Salbeck, H.Spreitzer and M.Grätzel, Nature 395 (1998) 544.
26. J.J.M.Halls, C.A.Walsh, N.C.Greenham, E.A.Marseglia, R.H.Friend, S.C.Moratti and A.B.Holmes, Nature 376 (1995) 498.
27. European patent PCT/ EP96/03944

KLIMAPOLITIK IN HAMBURG: KONZEPTE UND ERGEBNISSE

Christoph Krupp

Umweltbehörde Hamburg, Fachamt für Energie und Immissionsschutz

1. Die Mühen der Ebene

Mit dem letzten Vortrag des heutigen Tages kommen wir nach den grossen internationalen und nationalen Verhandlungen und Programmen zu den Mühen der Ebene. Unser alltägliches Leben ist mit dem Verbrauch von Energie verbunden. Und die theoretisch richtige Erkenntnis, dass Energie eigentlich zu billig ist, weil der Preis die externen Kosten der Energieversorgung nicht widerspiegelt, trifft auf eine soziale Wirklichkeit, in der viele Menschen meinen, es gäbe in unserer Verfassung ein Grundrecht auf billiges Benzin.

Als Gemeinde, als Bundesland sind wir sehr viel näher an dieser sozialen Wirklichkeit und damit gezwungen, Konzepte zu entwickeln, die passen.

Und wir haben eine zweite Wirklichkeit ins Auge zu fassen: Hamburg ist eine Metropole mit einer dynamisch wachsenden Wirtschaft. Seit Beginn der 90er Jahre hat die Einwohnerzahl um 50.000 – gegenüber 1988 sogar um 100.000 – zugenommen, wir haben 50.000 Wohnungen gebaut, die beheizt und beleuchtet werden müssen. Die Geräteausstattung von Haushalten und Büros hat zugenommen. Die Raffinerien, die in der Hamburger Energiebilanz eine wesentliche Rolle spielen, haben ihren Absatz seit der Maueröffnung um rd. 40 % gesteigert.

Wir machen Klimapolitik gegen diese Trends

Im Vergleich zu anderen Kommunen und Bundesländern kann sich der Hamburger Beitrag durchaus sehen lassen. Nicht umsonst hat Hamburg beim Kommunalwettbewerb „Bundessieger Klimaschutz“ der Deutschen Umwelthilfe im Jahr 1997 unter 142 teilnehmenden Städten und Gemeinden den 4. Platz belegt. Damit sind wir der bestplatzierte Stadtstaat. Im Jahr 2000 wurde unsere Politik mit dem Internationalen „Energiespar-Oskar“, dem Global Energy Award, ausgezeichnet.

Der Hamburger Beitrag zum Klimaschutz zeigt, was möglich ist. Er besteht aus vielen Lichtblicken und hebt umso deutlicher hervor, wo es noch Defizite gibt. Um es klar auf den Punkt zu bringen: Wir können nicht behaupten, dass wir das Problem im Griff haben. Von dem neuen Klimaschutzprogramm der Bundesregierung erwarten wir uns Rückenwind, der auch uns Arbeit leichter macht.

2. Hamburg hat sich auf den Weg gemacht

Hamburg hat sich 1990 auf den Weg gemacht und schon einiges erreicht. Hamburg hat vergleichsweise früh reagiert. Drei Gründe dafür will ich anführen:

1. Mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie und dem Deutschen Klimarechenzentrum ist Hamburg eines der Zentren der weltweiten Klimaforschung. Schon 1988 hat unser damaliger Erster Bürgermeister Dr. Henning Voscherau an einer internationalen Klimakonferenz in Hamburg teilgenommen.

2. Hamburg ist Hafenstadt und trotz seiner 70 km Entfernung zur offenen See dazu gezwungen, sich gegen Sturmfluten zu schützen, die in der Elbe auflaufen. Mehr als 100 km Hochwasserschutzlinien müssen unterhalten werden. In den letzten Jahren mussten die Deichhöhen mehrfach angepasst werden – wir sind jetzt bei 8,50 m. Die katastrophale Flut von 1962 mit mehr als 300 Todesopfern hatte eine Höhe von 5,70 m. Der Leiter unseres Amtes für Wasserwirtschaft weist immer wieder darauf hin: Ein halber Meter Deicherhöhung kann leicht 1 Mrd DM kosten.

3. Hamburg ist als Hafenstadt mit allen Teilen der Welt verbunden. Deshalb wissen wir: Hamburg und die Bundesrepublik Deutschland könnten das Geld für weitere Deicherhöhungen vielleicht aufbringen, auch wenn uns dies nicht leicht fallen würde. In vielen Teilen der Welt sieht dies aber ganz anders aus und dort wird sehr viel weniger CO₂ emittiert als in Hamburg. In Hamburg werden rund 14 Mio. t CO₂ emittiert, davon 30 Prozent von Haushalten und Kleinverbrauchern, hier handelt es sich überwiegend um Raumheizung. 7 Prozent sind durch Industrie und Gewerbe verursacht, 9 Prozent durch die Raffinerien, 32 Prozent durch den Verkehr inklusive der hier betankten Schiffe und Flugzeuge. Die Kraft- und Fernheizwerke sind für 22 Prozent der Hamburger CO₂-Emissionen verantwortlich.

8,6 t CO₂ sind es pro Einwohner. Damit liegen wir deutlich unter dem Bundesdurchschnitt von 11,3 t, aber: zukunftsfähig sind weltweit pro Kopf maximal 2,3 t beim heutigen (!) Stand der Weltbevölkerung.

2.1. Erste Erfolge

Der Senat der Freien und Hansestadt Hamburg hat im Oktober 1990 - also 2 Jahre vor der Rio-Konferenz - ein 24-Punkte-Programm zum Klimaschutz beschlossen. Es steht unter dem Titel „Hamburgs Beitrag zur Verminderung der Klimagefahren“ und enthält 24 Massnahmen vom Ausbau der Fernwärme über die Energieeinsparung im öffentlichen Bereich, den Ausbau der regenerativen Energien, die Linearisierung der Tarife bis zur Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Personennahverkehrs.

Viel davon ist erfolgreich umgesetzt worden:

- wer in Hamburg öffentliche Zuschüsse für den Neubau oder die Modernisierung von Wohngebäuden erhalten will, der muss höhere Energiestandards einhalten, als die Wärmeschutzverordnung des Bundes verlangt – noch lieber wäre uns natürlich, dass die Energieeinsparverordnung des Bundes bald kommt,
- mehr als 411.000 Wohneinheiten sind an die Fernwärme angeschlossen, die in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird; mit 650 km Netzlänge ist das Hamburger Fernwärmenetz eines der grössten Netze Europas; 20 Prozent der Wärme werden aus Müll gewonnen, und insgesamt hat die Fernwärme einen Anteil von 18 Prozent an der Wohnungsbeheizung. Damit nimmt sie Platz 2 hinter dem Erdgas, aber vor dem Heizöl ein,
- in Hamburg sind 1.250 solarthermische Anlagen mit zusammen 22.000 qm Kollektorfläche in Betrieb, die meisten Kollektoren dienen der Warmwasserbereitung,
- in der Solarsiedlung Bramfeld werden 148 Reihenhäuser mit Solarenergie beheizt: 3000 qm Kollektorfläche fangen im Sommer die Wärme ein, die in einem grossen Erdwassertank gespeichert und im Winter in den Häusern zum Heizen benutzt wird,
- 600 Photovoltaikanlagen mit einer Nennleistung von 2,0 MW sind am Netz und
- 46 Windkraftanlagen verfügen über eine Leistung 25,8 MW.

2.2. Finanzierung von Klimaschutz-Massnahmen

„Hamburgs Beitrag zur Verminderung der Klimagefahren“ ist ein alljährliches 20-Millionen-Mark-Programm. Davon wird etwa die Hälfte für energiesparende Massnahmen in den öffentlichen Gebäuden der Stadt und die andere Hälfte in Form von Zuschüssen an private Investoren eingesetzt.

Die energiesparenden Massnahmen in den öffentlichen Gebäuden der Stadt unterliegen dabei dem Grundsatz der Zwei-Drittel-Wirtschaftlichkeit. Die Massnahmen müssen sich also zu Zwei-Dritteln aus den eingesparten Energiekosten refinanzieren. Dies entspricht unserem Verständnis von betriebswirtschaftlicher Vernunft, denn langfristig werden die Energiepreise steigen. In die Wirtschaftlichkeitsberechnung die heutigen Energiepreise einzusetzen führt nicht immer zur ökonomisch besten Lösungen.

Die weitere Finanzierungsquelle sind Kaufratenkredite, die die Freie und Hansestadt Hamburg zunächst mit den Hamburgischen Electricitätswerken und jetzt mit der Hamburgischen Wohnungsbaukreditanstalt vertraglich vereinbart haben. Auf diesem Wege finanzieren wir strom- und wassersparende Massnahmen, die nicht nur zu Zwei-Dritteln, sondern zu mehr als 100%

wirtschaftlich sind. Der entscheidende Schritt war, die Finanzbehörde davon zu überzeugen, dass aus dem Haushaltstitel für Strom- bzw. Wasserkosten auch die Ratenzahlungen für Energiesparmassnahmen bezahlt werden können.

Mit diesem Instrument finanzieren wir phantastische Energiesparmassnahmen:

- In unserem Leuchtentausch-Projekt „2:1 fürs Klima“ tauschen wir flächendeckend in den öffentlichen Gebäuden der Freien und Hansestadt Hamburg Leuchten mit 2 Leuchtstoffröhren gegen neue Leuchten mit nur noch einer Leuchtstoffröhre aus. Die neuen Leuchten sind verspiegelt und genauso hell, wie die alten Leuchten. Wenn wir 400.000 Leuchten austauschen, dann bauen wir ein 26 MW-Einsparkraftwerk.
- In einer ähnlichen Aktion haben wir in allen Schulen die Keramikbrennöfen mit einer neuer Schaltung versehen. Diese Schaltung erlaubt den Betrieb der Brennöfen nur noch in der Nacht. Nach Ende der Schulstunde drückt der Lehrer auf einen Knopf und in der kommenden Nacht werden die Arbeiten gebrannt. Wir sparen durch diesen Umbau mehr als 2 MW Leistung. Der Umbau hat sich in weniger als einem Jahr durch die eingesparten Stromkosten refinanziert.
- Genauso haben wir 100 grosse und 300 kleine Schulturnhallen mit außenlichtabhängigen Lichtsteueranlagen versehen. Die typische Situation ist doch folgende: Morgens beginnt der Unterricht. Es ist noch dunkel und die Turnhallenbeleuchtung wird eingeschaltet. Dann geht die Sonne auf. Es wird hell und keiner schaltet die Beleuchtung wieder aus. Durch die neu eingebaute Automatik wird die Turnhallenbeleuchtung ausgeschaltet, wenn sie nicht mehr benötigt wird.

Diese Massnahmen sind voll wirtschaftlich. Sie refinanzieren sich in wenigen Jahren – auf jeden Fall innerhalb der Lebensdauer der entsprechende Geräte.

Sie erkennen an diesen Beispielen aber auch unsere Methode. Indem wir uns jeweils eine Stromspartechnik vornehmen und diese flächendeckend einführen, erreichen wir Abnahmemengen, die wiederum die Wirtschaftlichkeit erhöhen und die Umsetzung wesentlich erleichtern.

Genauso kümmern wir uns um die Heizungsmodernisierung und führen in den gasversorgten Liegenschaften flächendeckend die Brennwerttechnik ein.

2.3. fifty-fifty - Energiesparen in Schulen

Aber wir wissen auch, dass Technik nicht alles ist. Das Verhalten der Nutzer ist genauso wichtig: Was hilft das beste Thermostatventil, wenn es keiner bedient. Im Jahr 1994 wurde in Hamburg das Projekt „fifty/fifty - Energiesparen an Schulen“ erfunden, das inzwischen bundesweit Nachahmer gefunden hat. In diesem Projekt werden die Schulen mit 50 Prozent an den eingesparten Energiekosten beteiligt.

Die Schüler und Lehrer laufen zusammen mit ihrem Hausmeister als Energiedetektive durch die Schule und entwickeln dabei eine Phantasie, die beeindruckt. Das eigene Gebäude und das eigene Verhalten werden zum Gegenstand des Unterrichts. Energiesparen lässt sich nicht nur im Physik- und Mathematik-, sondern auch im Kunst- und Gemeinschaftskundeunterricht lernen.

Im Physik-Unterricht gehen die Schüler durch die Klassenräume und messen Temperaturen, Beleuchtungsstärken und den Stromverbrauch von Geräten. Sie überlegen, wie man Energie sparen kann. Im Mathematikunterricht werden die Zahlen statistisch ausgewertet, dargestellt und interpretiert.

Im Gemeinschaftskundeunterricht wird überlegt, wie man die Mitschüler zum Energiesparen anregen könnte und im Kunstunterricht werden Plakate dazu entworfen.

Die Schülerinnen und Schüler finden den Warmwasserboiler im Nebenraum, der 24-Stunden am Tage beheizt wird, damit die Putzfrau zweimal in der Woche warmes Wasser zapfen kann. Und sie fragen auch, warum im Lehrerzimmer drei alte Kühlschränke stehen, die zu Hause ausrangiert wurden.

Die Schulen kommen auf Ideen, auf die wir in der Behörde nie kommen würden. Und durch den Anreiz „fifty-fifty“ lohnt es sich für beide. Im ersten Jahr haben sich 24 Schulen beteiligt und im zweiten Jahr 40. Inzwischen sind alle Schulen dabei. Im letzten Abrechnungszeitraum (1998/99) waren es 415 Schulen, die zusammen

- den Stromverbrauch um 5,4 Mio. kWh bzw. 10,6 Prozent,
- der Heizenergieverbrauch um 40 Mio. kWh bzw. 8,3 Prozent und
- die CO₂-Emissionen um Prozent 11.500 Tonnen bzw. 9,3 % reduziert haben.

Insgesamt wurden Energie- und Wasserkosten in Höhe von 3,5 Mio. DM eingespart und die Hälfte davon haben die Schulen als Prämie erhalten.

2.4. Klimaschutzgesetz

Die Freie und Hansestadt Hamburg beschränkt sich aber nicht auf die Energieeinsparung in den eigenen Gebäuden, sondern gestaltet auch die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Klimaschutz. Dabei gibt es natürlich eine Abgrenzung der Kompetenzen zwischen Bund und Ländern. Der Spielraum für landesrechtliche Regelungen ist eng. Es gibt ihn nur im Bereich der Energieeinsparung, aber nicht im Bereich der Energieerzeugung.

Die Bürgerschaft hat im Jahr 1997 das Hamburgische Klimaschutzgesetz beschlossen und damit als erstes Bundesland den Klimaschutz auf eine gesetzliche Grundlage gestellt.

Das Ziel des Gesetzes ist der „Schutz des Klimas durch eine möglichst sparsame, rationelle und ressourcenschonende sowie eine umwelt- und gesundheitsverträgliche und risikoarme Er-

zeugung, Verteilung und Verwendung von Energie im Rahmen des wirtschaftlich Vertretbaren“.

Das Klimaschutzgesetz schreibt also nur vor, was auch die wirtschaftliche Vernunft gebietet und es wird oft die Frage gestellt, ob man dazu dann noch ein Gesetz braucht. Die Erfahrung zeigt aber, dass diese wirtschaftlichen Potentiale eben häufig nicht erschlossen werden. Die Gründe dafür sind vielfältig. Einerseits werden unterschiedliche Abschreibungszeiträume zugrunde gelegt, andererseits besteht das bekannte Investor/Nutzer-Dilemma. Höhere Baukosten beim Investor kommen diesem nicht zugute, sondern führen zu geringeren Betriebskosten beim Nutzer. Häufig fehlt es auch schlicht an Information und Erfahrung.

Durch die im Gesetz vorgesehene Anhebung der Standards sollen derartige Potentiale jetzt erschlossen werden.

Im Einzelnen enthält das Gesetz folgende Regelungen:

1. Stromheizungen: Das Klimaschutzgesetz lässt in Zukunft die Neuinstallation von Stromheizungen nur noch zu, wenn andere Arten der Raumheizung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unvertretbar sind.

2. Klimaanlage: Beim Hamburger Klima reicht bei einer geeigneten Bauweise eine freie Lüftung, erforderlichenfalls mit einem wirksamen Sonnenschutz, grundsätzlich aus, um die hygienischen und thermischen Behaglichkeitsanforderungen zu erfüllen. Höhere Raumlufttemperaturen treten nur an wenigen Tagen im Jahr auf. Für Bürogebäude gibt es interessante und innovative Konzepte, um Raumkonditionen zu schaffen, die von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern als wesentlich angenehmer empfunden werden. Klimaanlage werden häufig erst aufgrund einer bautechnisch und bauphysikalisch unzweckmäßigen Bauweise erforderlich. Daher lässt das Klimaschutzgesetz die Neuinstallation Klimaanlage nur noch zu, „wenn die bestimmungsgemäße Nutzung nicht durch bautechnische oder andere geeignete Massnahmen auf wirtschaftlich vertretbare Weise erreicht werden kann.“

3. Anschluss- und Benutzungsgebote für Fernwärme, Blockheizkraftwerke und erneuerbare Energien: Diese ökologisch sinnvollen Wärmeversorgungen sind jeweils auf eine hohe Abnahmedichte angewiesen, um die Investitionskosten pro versorgter Einheit zu minimieren. Daher erlaubt das Klimaschutzgesetz für bestimmte Gebiete, ein Anschluss- und Benutzungsgebot zu erlassen.

4. Das Klimaschutzgesetz gibt dem Senat auch die Möglichkeit eigene – höhere – Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz und die Haustechnik zu stellen. Schon vor der Wärmeschutzverordnung von 1995 gab es eine eigene Hamburger Wärmeschutzverordnung mit höheren Anforderungen. Im Moment hat der Senat den Erlass einer Hamburger Energieeinsparverordnung zurückgestellt, weil wir hoffen, dass die neue bundesweite Energieeinsparverordnung bald kommt.

2. Neue Ansätze

Im zweiten Teil meiner Ausführungen will ich Ihnen zwei neue, kooperative Ansätze der Hamburger Klimaschutzpolitik vorstellen – die Initiative „Arbeit und Klimaschutz“ und die Solarinitiative Nord. Die Umweltbehörde kooperiert in diesen Initiativen mit anderen Akteuren, die neben dem Klimaschutz auch andere Interessen im Blick haben. Diese anderen, z.T. wirtschaftliche Interessen, sind nicht unmoralisch oder zweitrangig, sondern sie erlauben es eine „Win-win-Situation“ zu schaffen, in der beide Partner gewinnen. Durch diese Ansätze können neue Bündnispartner für den Klimaschutz gewonnen werden.

2.1. Initiative „Arbeit und Klimaschutz“

Von den rund 14 Mio. t CO₂, die in Hamburg emittiert werden, entfallen rund 5 Mio. t auf den Bereich Raumwärme. Dies ist einer der grössten Bereiche. In den privaten Haushalten sind es sogar 75 Prozent der verbrauchten Endenergie, die für Raumwärme eingesetzt werden.

In diesem Bereich liegt ein außerordentlich grosses Potential zur CO₂-Minderung. Ein Gebäude, das zu Anfang der siebziger Jahre gebaut wurde und an dem noch keinerlei ModernisierungsMassnahmen durchgeführt wurden, hat einen typischen Verbrauch von etwa 400 Kilowattstunden pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr (kWh/(m² a)). Ein Gebäude vom Anfang der Achtziger Jahre kommt auf etwa 250 kWh/(m² a). Dagegen kann der Energieverbrauch im Neubau bei etwa 50 kWh/(m² a) und im modernisierten Altbau bei 80 bis 100 kWh/(m² a) liegen. Das Institut für Wohnen und Umwelt in Darmstadt schätzt das technische Einsparpotential im bundesdeutschen Gebäudebestand auf 71 Prozent.

Über 80% der Hamburger Wohngebäude sind vor 1978, d.h. vor dem Erlass der ersten Wärmeschutzverordnung gebaut worden. Der überwiegende Teil dieser Gebäude hat auch heute noch keinen ausreichenden Wärmeschutz. Im Durchschnitt verbrauchen die Hamburger Wohngebäude etwa 220 kWh/(m² a). Wie gesagt verbraucht ein modernisierter Altbau rund 100 kWh/(qm a). Darüber hinaus gibt es einen Bestand von etwa 10% der Hamburger Wohngebäude, die sich als Hochverbraucher bezeichnen lassen. Dort werden 300 kWh/(qm a) und mehr verbraucht.

Deshalb müssen heute die Weichen für die langfristig angelegte Sanierung und Modernisierung des Hamburger Gebäudebestandes gestellt werden.

Diese grosse und wichtige Aufgabe der energetischen Modernisierung des Gebäudebestandes kann die Stadt aber nicht allein und aus eigener Kraft umsetzen. Sie ist auf die Kooperation mit allen am Bau Beteiligten angewiesen. Dazu wurde die Initiative „Arbeit und Klimaschutz“ gegründet. Schon im Titel wird deutlich, dass nicht allein ökologische Gründe für die Sanierung des Gebäudebestandes sprechen, sondern jeder Beteiligte seine eigenen Interessen einbringen kann.

Aus **Sicht von Handwerk und Baugewerbe** spricht z.B. die Baukonjunktur dafür, in der energetischen Gebäudesanierung einen neuen Schwerpunkt zu setzen. Bei zurückgehender Neubautätigkeit gilt es einen Einbruch zu vermeiden und Arbeitsplätze zu sichern. Die Sanierung und Modernisierung im Bestand verspricht neue Chancen, da diese Massnahmen erfahrungsgemäß besonders beschäftigungsintensiv sind und viel handwerkliche Arbeit erfordern. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung schätzt die Beschäftigungseffekte von EnergiesparMassnahmen zur Wärmedämmung in Wohngebäuden auf bundesweit etwa 77.000 Arbeitsplätze.

Die **Mieter** haben ein Interesse an modernisierten Wohnungen und sinkenden Heizkosten. Der schlechte wärmetechnische Zustand der Gebäude belastet nicht nur das Klima, sondern auch den Geldbeutel der Bewohner. Die Hamburger heizen den Himmel über der Hansestadt und zahlen dafür viel Geld. Ein durchschnittlicher Mieterhaushalt zahlt etwa 1.100 DM Heizkosten im Jahr, im modernisierten Altbau sind dies nur noch 500 bis 700 DM pro Jahr. In einem Gebäude mit sehr hohem Energieverbrauch werden leicht 1500 DM Heizkosten und mehr bezahlt.

Aus der Sicht der Eigentümer dienen die Sanierungs- und ModernisierungsMassnahmen dem Werterhalt ihrer Gebäuden und sichern die langfristige Vermietbarkeit.

Aus diesem Grund arbeiten in der Initiative „Arbeit und Klimaschutz“ unterschiedlichste Vertreter aus Wohnungswirtschaft, Mietervereinen, Handwerk, Baugewerbe, Architekten, Ingenieure und Hochschulen mit.

Die **Kernidee der Initiative** ist die Finanzierung zusätzlicher Investitionen in den Wärmeschutz aus der Einsparung von Heizkosten. Das ist nichts anderes als der Ersatz von Ressourcenverbrauch durch Arbeit und Ingenieursverstand und dient der Schaffung von Arbeitsplätzen.

Der **Schlüssel für die Finanzierung** eines solchen Schwerpunktprogramms „Arbeit und Klimaschutz“ ist das Kopplungsprinzip. Die Massnahmen zur Energieeinsparung im Gebäudebestand werden wirtschaftlich, wenn Massnahmen der Instandhaltung, der Modernisierung und der Energieeinsparung zusammengefasst werden. Das bedeutet zugleich, dass dieser Schwerpunkt der Hamburger Klimaschutzpolitik langfristig angelegt sein muss, da der Zeitpunkt der Energiespar-Massnahmen von der Fälligkeit der ohnehin erforderlichen Massnahmen abhängt.

Im konkreten Einzelfall bedeutet dies, dass sich die Kosten für eine Sanierungs-Massnahmen folgendermaßen aufteilen:

- Instandhaltungsanteil: Dieser Anteil ist vom Eigentümer zu tragen und liegt im Interesse der langfristigen Werterhaltung der Immobilie,

- Modernisierungsanteil: neue Fenster oder eine wärmegeämmte Fassade führen zu einer Erhöhung des Wohnwertes und dienen damit auch der langfristigen Sicherung der Vermietbarkeit des Objektes. Damit liegt die Modernisierung im Interesse von Mieter und Vermieter.
- Anteil der Energieeinsparung: Energiesparmassnahmen führen zu einer Heizkostensparnis. Da der Mieter von dieser Einsparung profitiert, kann die Kaltmiete im Umfang der eingesparten Heizkosten erhöht werden.

Die Initiative „Arbeit und Klimaschutz“ zielt auf eine Verbesserung der Rahmenbedingungen, auf Information und Motivation. Etwa einmal im Jahr kommt der **Initiativkreis** zusammen. Er wird vom Umweltsenator geleitet und umfasst etwa 60 Personen: die Spitzenvertreter der Wohnungs- und Immobilienwirtschaft, der Mieterorganisationen, der Handwerksinnungen und Fachverbände, der Architekten- und Ingenieurkammern und –verbände, der Architektur- und Baufachbereiche der Hamburger Hochschulen, Gewerkschaften und entsprechenden Fachleute aus den Behörden. Dort wird über die grundlegenden Ziele und die Richtung gesprochen. Es wird eine Aktionsprogramm beschlossen, dass Grundlage für die praktische Arbeit ist.

Die praktische Arbeit findet dann in projektbezogenen Arbeitsgruppen – den sog. Projektteams – statt. Da sitzen die Leute, die man braucht, um etwas zu bewegen und sie tagen auch nur dann, wenn es nötig ist. Meist tagen die Projektteams zu Anfang monatlich, um ein Projekt auf den Weg zu bringen und dann nur noch bei Bedarf.

Im **Projektteam „Information und Beratung“** arbeiten alle Institutionen zusammen, die in Hamburg Energie-, Verbraucher- oder Mieterberatung anbieten bzw. Gebäudeeigentümer beraten. Das Ziel ist ein vernetztes und optimiertes Angebot aus allgemeiner Information, Initialberatung und Fachberatung. Dies umfasst sowohl eine Optimierung und Vernetzung des vorhandenen Angebotes als auch neue Angebote. So wurden die Schornsteinfeger geschult und bieten den Ein- und Zweifamilienhausbesitzern den WärmeCheck – eine EDV-gestützte Grobdiagnose von Gebäude – an.

Ein wichtiges, detaillierteres Beratungsinstrument ist der **Hamburger Wärmepass**. Hausbesitzer können sich von einem der über 30 zugelassenen Büros einen Wärmepass erstellen lassen. Der Wärmepass ist eine ausführliche Bestandsaufnahme des energietechnischen Zustandes der Gebäudehülle und enthält ebenso ausführliche Vorschläge zur Sanierung von Dach, Außenwand, Fenstern und Kellerdecke. Die voraussichtlichen Kosten und die dadurch eingesparten Heizkosten werden berechnet. Der Eigentümer erhält damit ein Zertifikat über den energietechnische Zustand des Gebäudes, der bei Verkauf und Vermietung zu einem guten Argument werden kann.

Im **Projektteam „Impulsprogramm“** sind die Weiterbildungseinrichtungen des Handwerks und der Architekten, die Hochschulen und die beruflichen Schulen vertreten. Dort haben wir ein Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebot für Handwerker, Architekten und Ingenieure

erarbeitet. Es werden spezielle Kurse zum Thema energetische Sanierung und Modernisierung des Gebäudebestandes durchgeführt. In den letzten beiden Jahren haben über 2.000 Architekten, Ingenieure, Handwerker und Investoren an den bisher 50 Veranstaltungen teilgenommen.

Im **Projektteam „Mietrechtliche Fragen“** sind die Vertreter der Wohnungswirtschaft und der Mieterverbände versammelt. Dort haben sich Mieter- und Vermieterorganisationen über die optimierte Durchführung der Massnahmen, die rechtzeitige Information, die Einbeziehung der Mieter und Aufteilung der Kosten (warmmietenneutrale Mieterhöhung) verständigt. Wenn ein Vermieter zum Grundeigentümergeverband geht und sein Mieter zum Mieterverein, dann erhalten Sie beide die gleiche Broschüre der Initiative Arbeit und Klimaschutz, mit den gleichen Ratschlägen und Empfehlungen. Dies erleichtert die Durchführung von Wärmeschutzmassnahmen im Mietwohnungsbau ganz erheblich.

In Zusammenarbeit mit dem Bauhandwerk haben wir **Beschäftigungsprojekt mit arbeitslosen Jugendlichen** auf den Weg gebracht. Es geht dort um Handwerker, die nach der abgeschlossenen Ausbildung keine Arbeit finden. Sie erhalten in diesem Projekt eine einjährige Zusatzqualifikation mit dem Schwerpunkt auf Wärmeschutztechniken. Mehr als zwei Drittel der Jugendlichen konnten im Verlauf oder im Anschluss an das Projekt in den ersten Arbeitsmarkt vermittelt werden.

Wenn wir die Wärmeschutzmassnahmen in grossem Stil durchführen oder anregen, dann hat dies Auswirkungen auf das Bild unserer Stadt – auf das wir Hamburger doch so stolz sind. Wir haben deshalb einen **Architekturpreis „Die zweite Chance für Architektur und Stadtbild“** ausgelobt, mit dem Objekte ausgezeichnet werden, die die technische Aufgabe der Energieeinsparung mit einer Verbesserung der architektonischen Qualität verbinden. Im Auslobungstext heisst es:

„Auch im Falle schützenswerter vorhandener Architektursprache sollten sich energetische Optimierung und Gestaltanspruch zu einem "besten Ganzen" ergänzen. Hierin liegen Chance und Herausforderung zugleich – sowohl für das Gebäude als auch für das Erscheinungsbild des Quartiers.“

Mit dem Architektur Preis der Initiative Arbeit und Klimaschutz sollen hervorragende Lösungen dieser Aufgabe ausgezeichnet werden. Idee der Preisauslobung ist, die energetische Modernisierung gerade im Bereich der „alltäglichen“ Architektur auf die architektonische Qualität zu orientieren und die Chance der Verbesserung von Architektur und Stadtbild hervorzuheben.“

Die Preisverleihung findet am 6. Juni statt. Wir haben dabei aber schon die interessante Erfahrung gemacht, dass so manchem Planer oder Bauherren gar nicht bewusst war, dass es einen Zusammenhang zwischen Wärmedämmung, Architektur und Stadtbildqualität gibt. Da liegt noch eine grosse Aufgabe vor uns.

Aus der Initiative Arbeit und Klimaschutz heraus wurde unter Beteiligung von Hochschulen, Behörden und HEW das **Zentrum für Energien, Bauen, Architektur und Umwelt ZEBAU** gegründet, das sich zu einem Kompetenzzentrum rund um das energetische Bauen entwickeln soll.

Schliesslich flankiert die Umweltbehörde diese Massnahmen mit Investitionszuschüssen. Dazu haben wir zwei Förderprogramme:

- Im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser arbeiten wir mit Festbeträgen.
- Im Mehrfamilienhausbereich fördern wir in Abhängigkeit von der rechnerischen Energieeinsparung: Für die Reduzierung des Jahreswärmebedarfs um eine kWh zahlen wir zwischen 0,30 und 0,70 DM als Zuschuss. Dabei gilt die Regel: Wer mehr Energie einspart, erhält auch einen höheren Zuschuss.

Insgesamt haben wir in den letzten zwei Jahren folgendes erreicht:

- Durch Fördermittel der Umweltbehörde haben 1.130 Gebäude mit zusammen 5.270 Wohnungen einen modernen Wärmeschutz erhalten
- Das Investitionsvolumen dieser Massnahmen beträgt 67 Mio. DM – hiervon übernimmt die Umweltbehörde 11,4 Mio. DM im Rahmen ihrer Förderprogramme.
- Dadurch werden jährlich 27,5 Mio. kWh Energie und 6.800 Tonnen CO₂ eingespart
- Für 1.600 Hamburger Wohngebäude wurden Wärmepässe erstellt.
- Für 1.000 Ein- und Zweifamilienhäuser haben die Bezirksschornsteinfeger Grobenergie-diagnosen in Form des WärmeChecks durchgeführt.

In der Summe sollen diese Aktivitäten private und öffentliche Eigentümer zur Investitionen anregen und damit dem Klimaschutz dienen und zugleich zusätzliche Beschäftigung schaffen. Wenn die Weichen richtig gestellt werden, dann können die CO₂-Emissionen aus dem Bereich Raumheizung in den nächsten 20 Jahren um 50 Prozent gesenkt werden.

2.2. Solarinitiative Nord

Der gleichen Methode folgt auch die Solarinitiative Nord, die ich Ihnen noch kurz vorstellen möchte. Der Ausbau der Solarenergienutzung wird sowohl von politischen Gremien als auch Umweltverbänden mit Nachdruck gefordert und hat bei der Bevölkerung eine sehr hohe Akzeptanz.

Um der Solarenergie zum Marktdurchbruch zu verhelfen, bedarf es aber noch einige Jahre besondere Anstrengungen, um die Bereitschaft zur Investition zu fördern. Dieses Ziel hat sich die Solarinitiative Nord als eine Interessengemeinschaft aus derzeit 10 Organisationen, Verbänden und Unternehmen gesetzt. Dies sind neben der Umweltbehörde die Innung Sanitär Heizung Klempner, das Zentrum für Energie- Wasser- und Umwelttechnik der Handwerkskammer Hamburg (ZEWU), der Verband norddeutscher Wohnungsunternehmen VNW und andere.

Die Solarinitiative bietet umfangreiche **Schulungsveranstaltungen** und **Seminare** für Handwerksbetriebe und Planer an. Durch das Zentrum für Wasser-, Energie- und Umwelttechnik sowie die Innung Sanitär Heizung Klempner wurde ein Lehrgang „Thermische Solaranlagen – Theorie und Praxis für Warmwasser und Heizung“ entwickelt.

Darüber hinaus engagiert sich die Solarinitiative Nord durch **gezielte Öffentlichkeitsarbeit**, Kooperation mit weiteren Verbänden und Gremien für die Marktausweitung der Solarthermie. Weiterentwicklungen in den Bereichen Technik und Marketing werden gefördert.

Die Solarinitiative vergibt jedes Jahr den **Hamburger Solarpreis** an Personen oder Institutionen, die sich in besonderer Weise um die Solarenergie in Hamburg verdient gemacht haben.

Da bei den derzeitigen Energiepreisen durch Solarkollektoranlagen die niedrigen Wärmegestehungskosten von Öl/Gas-Heizsystemen nicht zu erreichen sind, begleitet die Umweltbehörde die Solarinitiative Nord mit einer **finanziellen Förderung** der Investition. Die Abwicklung der Förderung wurde der Innung Heizung Sanitär Klempner übertragen. Heizungs- und Sanitärinstallateure werden motiviert, sich im Solarbereich zu engagieren. Dabei ist es selbstverständlich, dass sich die Betriebe davon neue Aufträge versprechen. Das sollte die Klimaschützer nicht erschrecken. Im Gegenteil: Die enge Kooperation mit dem installierenden Fachhandwerk ist der Schlüssel zur Marktausweitung der Solarthermie und bietet damit neue Chancen für den Klimaschutz.

Das neueste Projekt ist die Einrichtung eines SolarZentrums, dass bei der Handwerkskammer angesiedelt ist. Bauherren können sich an das SolarZentrum wenden und erhalten mehr als eine normale Beratung. Auf Wunsch begleiten die Mitarbeiter den Bauherren von der ersten Idee, über die Planung, die Ausschreibung und die Installation bis zur Inbetriebnahme. Auch Handwerker können sich hier Rat und Unterstützung holen.

Meine Damen und Herren, ich hoffe ich habe Ihnen mit meinem Vortrag einen kleinen Einblick in die Mühen der Ebene geben können. Wenn sie das, was auf grossen internationalen Tagungen beschlossen wird, dort umsetzen wollen, wo die Emissionen tatsächlich stattfinden, dann müssen sie sich nicht nur mit Wirtschaftlichkeitsberechnungen herumschlagen, sondern Sie haben es mit den Kühlschränken im Lehrerzimmer, dem Mietrecht, arbeitslosen Jugendlichen, der Stadtbildpflege und vielen anderen Dingen zu tun, die eigentlich nicht zu den typischen Aufgaben des Physikers gehören.

STATUSBERICHT ZUR STILLLEGUNG KERntechnischer ANLAGEN

Eike Gelfort

VDI-Gesellschaft für Energietechnik, Fachausschuss Kerntechnik

1. Bestand

Von den ca. 110 kerntechnischen Anlagen in Deutschland wurden, bzw. werden derzeit (Stand: IV, 2000) ca. 70 Anlagen stillgelegt. Davon befinden sich ca. 60 Anlagen in der Verantwortung des Bundes und der Länder. Die Tabellen 1 bis 4 nennen den Bestand an Stilllegungsprojekten einschliesslich deren Status (in Stilllegung, Rückbau beendet, sicherer Einschluss):

Betriebszeiten (Betriebsdauer)	Anlage, Leistung, Typ	Charakteristika der Stilllegung
1966 - 1977 (11)	KRB-A Gundremmingen 250 MW _e , SWR	ab 1983 Durchführung d. Beseitigung bis ca 2001
1968 - 1977 (9)	KWL Lingen 240 MW _e , SWR	ab 1988, sicherer Einschluss, ab 2023 geplanter Abriss
1975 - 1995 (20)	KWW Würiggassen 670 MW _e , SWR	ab 1997 Durchführung d. Beseitigung bis ca 2008
1974 - 1990 (17)	KGR I Greifswald 440 MW _e , WWER	geplante Beseitigung bis ca 2010
1975 - 1990 (15)	KGR II Greifswald 440 MW _e , WWER	geplante Beseitigung bis ca 2010
1978 - 1990 (12)	KGR III Greifswald 440 MW _e , WWER	geplante Beseitigung bis ca 2010
1979 - 1990 (11)	KGR IV Greifswald 440 MW _e , WWER	geplante Beseitigung bis ca 2010
1983 - 1989 (6)	THTR Hamm-Uentrop 300 MW _e , HTR	1993 - 1997 sicherer Einschluss (ca 30 Jahre)
1989 - 1989 (0,5)	KGR V Greifswald 440 MW _e , WWER	geplante Beseitigung bis ca 2010
1986 - 1988 (2)	KMK Mülheim Kärlich 1300 MW _e , DWR	geplante Beseitigung ab 2001

Tab. 1: Leistungs-Reaktoren: DWR: Druckwasser-Reaktor, HTR: Hochtemperatur-Reaktor, SWR: Siedewasser-Reaktor, WWER: Druckwasser-Reaktor sowjetischer Bauart

- Leistungsreaktoren in Kernkraftwerken (KRB-A Gundremmingen; KWL Lingen – sicherer Einschluss; KWW Würiggassen; KGR Greifswald Block 1 bis 5; THTR Hamm-Uentrop),
- Prototyp-Reaktoren (VAK Kahl; MZFR Karlsruhe; AVR Jülich; KKR Rheinsberg; NS Geesthach; KNK II Karlsruhe; HDR Grosswelzheim und KKN Niederaichbach vollständiger Abriss),
- Forschungs-Reaktoren (Siemens-Unterrichtsreaktoren, Nullleistungs-Reaktoren, Materialtest-Reaktoren, TRIGA),
- Teststände (kerntechnische Einrichtungen in Karlsruhe, Jülich, Rossendorf, Geesthacht, TU-München; Heisse Zellen Erlangen und Karstein),
- Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs (Uranerz-Aufbereitungs-Anlagen, Brennelement-Fabriken, Wiederaufbereitungs-Anlagen, Versuchsendlager).

Betriebszeiten (Betriebsdauer)	Anlage, Leistung, Typ	Charakteristika der Stilllegung
1960 - 1985 (25)	VAK Kahl 16 MW _e , SWR	ab 1988 Vorbereitung, Beseitigung bis ca 2005
1965 - 1984 (19)	MZFR FZ Karlsruhe 58 MW _e , DWR (D20)	stillgelegt 1987; geplante Beseitigung bis ca 2004
1964 - 1988 (25)	AVR Jülich, 15 MW _e , HTR	Beseitigung bis ca 2008
1966 - 1990 (24)	KKR Rheinsberg, 70 MW _e , WWER	Beseitigung bis ca 2004
1968 - 1979 (10,5)	NS-Otto Hahn GKSS 38 MW _{th} , DWR (I)	Demontage der Nuklearanlagen 1980 - 1982 abgebaut
1970 - 1971 (1)	HDR Grosswelzheim 25 MW _e , SWR	1975 Beginn d. Stilllegung, vollständiger Abbau erreicht 1992 - 1998
1972 - 1974 (2)	KKN Niederaichbach 100 MW _e , HWCR	1976 stillgelegt, vollständiger Abbau erreicht von 1981 - 1995
1977 - 1991 (14)	KNK I/II FZ Karlsruhe 20 MW _e , SBR	ab 1992 Durchführung d. Beseitigung bis ca 2004

Tab. 2: Prototyp-Reaktoren

HWCR: D₂O-CO₂-Druckröhren-Reaktor, **SBR:** Schneller Brutreaktor, **HDR:** Heissdampf-Reaktor Grosswelzheim (nukleare Überhitzer), **NS:** Nuklearschiff – Kernenergie-betriebenes Handelsschiff, **VAK:** Versuchs-Atomkraftwerk Kahl, **AVR:** Helium-Grafit-Atom Versuchs-Reaktor, **KNK:** Kompakte Natrium-gekühlte Kernreaktor-Anlage (KNK Nr. 1 von 1971 bis 1974), **MZFR:** Mehrzweck-Forschungs-Reaktor, **GKSS:** Gesellschaft für Kernenergie-Verwertung in Schiffsbau und Schifffahrt mbH, Geesthach

Betriebszeiten	Anlage, Leistung, Typ	Charakteristika der Stilllegung
1957 - 2000	FRM-1 München, 4 MW _{th}	Start: 31.10.1957, Stilllegung: 31. 06. 2000
1957 - 1991	RFR Rossendorf, VKTA 2 MW _{th} / 10 MW _{th}	ab 1998 in Stilllegung
1958 - 1974	BER-1 HMI-Berlin	1974 - 1978 abgebaut
1958 - 1968	FRF-1 U Frankfurt	1970 - 1977 abgebaut
1959 - 1992	SAR TU-München ARGONAUT	1992 - 1998 abgebaut
1961 - 1981	FR-2 FZ-Karlsruhe	Stilllegungsmassnahmen von 1986 - 1996; sicherer Einschluss
1961 - 1976	PR-10 AEG Karlstein ARGONAUT	1976 - 1978 abgebaut
1970 - 1981	SUR-M TU-München, 100 MW _{th}	1981 - 1998 abgebaut
1962 - 1985	FRJ-1 MERLIN, 10 MW _{th} , FZ Jülich	ab 1995 in Stilllegung, bis 2002 abgebaut
1963 - 1995	FGR-2 Geesthach, 15 MW _{th} , GKSS	ab 1995 in Stilllegung
1963 - 1995	FGR-2 Geesthach, 15 MW _{th} , GKSS	ab 1995 in Stilllegung
1963 - 1989	SUR-DA TH-Darmstadt, 800 MW _{th}	1989 - 1996 abgebaut
1966 - 1996	SUR-KA FZ Karlsruhe, 100 MW _{th}	1996 - 1998 abgebaut
1966 - 1977	HD-1 DKFZ Heidelberg 0,25 MW _{th} TRIGA I	Stilllegungsmassnahme 1980, sicherer Einschluss
1967 - 1995	FMRB PTB 1 MW _{th} Braunschweig	ab 1999 in Stilllegung: Genehmigung erwartet ab 2000
1967 - 1973	Nullenergie-Reaktor, AEG Karlstein	1981 abgebaut
1967 - 1993	SUR-HB TH-Bremen, 100 MW _{th}	ab 1997 Stilllegungsmassnahmen
	FRN Neuberberg GSF1 MW _{th} , TRIGA III	Stilllegungsmassnahmen 1983 - 1984; sicherer Einschluss

1973 - 1997	FRH MHH Hannover 0,25 MW _{th} , TRIGA I	Stilllegungsmassnahmen ab 2001, 1999 Rückführung der BE
1977 - 1983	FRF-2 U Frankfurt, 100 MW _{th}	ab 1982 Stilllegung
1978 - 2001	HD 2 DKFZ Heidelberg 0,25 MW _{th} , TRIGA I	BE-Abtransport nach USA
1963 -	SUR-B TU-Berlin, 100 MW _{th}	Stilllegung in Vorbereitung
1971 - 2000	SUR-H TU-Hannover, 100 MW _{th}	Stilllegung in Vorbereitung
1970 -	SUR-HH FH-Hamburg, 100 MW _{th}	abgebaut 1999
1961 - 1976	PR-10 Karlstein AEG-Prüfreaktor/TRIGA	abgebaut 1978
1966 -	SUR-KI U-Kiel, 100 MW _{th}	Stilllegung in Vorbereitung
1966 -	SUR-AC RWTH Aachen, 100 MW _{th}	Stilllegung in Vorbereitung
1969 - 1991	RAKE Rossendorf, 10 MW _{th} VKTA	1997 - 1998 abgebaut

Tab. 3: Forschungs-Reaktoren

SUR: Siemens Unterrichts Reaktor; **Argonaut:** Argonne Assembly for Universal Training, 20% U308, Al-Be-Platten; **VKTA:** Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V., Dresden; **RFR:** Rossendorfer Forschungs-Reaktor; **RRR:** Rossendorfer Ringzonen-Reaktor; **Merlin:** Medium Energy Research Light Water Moderation Industrial Reactor; **TRIGA:** Training Research Isotopes General Atomic – Schulreaktor der General Atomic, Mark 1: unterirdischer Einbau, Mark 2: Einbau über Bodenhöhe, Mark 3: 20% U308, Zirkonhydridplatten, H20 Moderator mit Grafitreflektor; **FMBR:** Forschungsreaktor der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig; **DKFZ:** Deutsches Krebs-Forschungs-Zentrum Heidelberg; **MHH:** Medizinische Hochschule Hannover; **HMI:** Hahn-Meitner-Institut Berlin; **GSF:** Gesellschaft für Strahlenforschung / Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit Mü.-Neuherberg; **RAKE:** Rossendorfer Anordnung für kritische Experimente

Betriebszeiten	Anlage, Leistung, Typ	Charakteristika der Stilllegung
1972 - 1974	SNEAK FZ Karlsruhe	1985 - 1988 abgebaut
1963 - 1976	STARK FZ Karlsruhe, Argonaut-Typ	1976 - 1977 abgebaut
1964 - 1979	SUAK FZ Karlsruhe	abgebaut
1967 -	SUA TU-München	1968 - 1988 abgebaut
1967 - 1972	ADIBKA FZ Jülich	1977 abgebaut
1973 - 1985	KATHER FZ Jülich	1987 - 1988 abgebaut
1971 - 1982	KEITER FZ Jülich	1982 - 1988 abgebaut
1964 - 1978	ANEX Geesthach	1979 - 1980 abgebaut
1965 - 1978	ASSE Wolfenbüttel Forschungs-Salzbergwerk	Verfüllung ab 1995
1978 - 1998	ERAM, Endlager für radioaktive Abfälle – Morsleben	25.09.1998 Einlagerungsstop
1953 - 1990	Uran-Erz-Aufbereitungsanlage Seelingstädt	ab 1990 in Stilllegung
1956 - 1990	Uran-Erz-Aufbereitungsanlage Crossen	ab 1990 in Stilllegung
1958 - 1989	Uran-Anlage Ellweiler Versuchsanlage zur Erzaufbereitung	1997 - 1999 abgebaut
1962 - 1988	NUKEM 1 Hanau, Brennelement-Fabrik	1993 stillgelegt, ab 1999 Abbau
1962 - 1992	HOBEG Hanau, Brennelement-Fabrik	Stilllegung abgeschlossen
1982 - 1996	AEG Brennelement-Werk Karlstein	1995 - 1999 abgebaut
1968 - 1991	ALKEM Hanau Brennelement-Fabrik	ab 1995 Stilllegungsmassnahmen bis 2003
1969 - 1995	RBU 1 Hanau, Brennelement-Fabrik	ab 1995 Stilllegungsmassnahmen bis 2002
1980 - 1990	AMOR I Rossendorf VKTA	ab 1996 Stilllegungsmassnahmen

1985 - 1991	AMOR II Rossendorf VKTA	ab 1996 Stilllegungsmassnahmen
1986 - 1991	AMOR III Rossendorf VKTA	ab 1998 Stilllegungsmassnahmen
1971 - 1991	WAK Karlsruhe, Aufarbeitungsanlage	1996 - 2009 Rückbau, 1996 - 2005 Verglasungseinrichtung
1970 - 1989	MILLI FZ-Karlsruhe, Aufbereitungsanlage	1991-1998 abgebaut
1967 - 1989	Heisse Zellen Erlangen, Siemens	ab 1994 Stilllegungsmassnahmen
1967 - 1989	Heisse Zellen Karlstein, AEG-Siemens	ab 1989 Stilllegungsmassnahmen bis 2001

**Tab. 4: Sonstige stillzulegende kerntechnische Anlagen
(Kernbrennstoffkreislauf, Isotopentechnik, Teststände, Heisse Zellen)**

ANEX: Anlage für Nullleistungsexperimente; **ADIBKA:** Abbrandmessung differentieller Brennelemente mit kritischer Anordnung; **KAITER:** Kritische Anordnung Incore Thermionik Reaktor; **KATHER:** Kritische Anordnung Hochtemperaturreaktor; **SNEAK:** Schnelle Null Energie Anordnung Karlsruhe; **SUAK:** Schnelle Unterkritische Anordnung Karlsruhe; **SUA:** Siemens Thermisch-Kritische Anordnung; **STARK:** Schneller Thermischer Argonaut Reaktor; **AMOR:** Anlage zur Spalt-Molybdän-Gewinnung Rossendorf-Dresden, 1. Molybdän-Extraktion, 2. Uranerzeugung, 3. Targetherstellung; **NUKEM:** Nuklear-Chemie-Metallurgie GmbH, BE für Uran u. Thorium; **ALKEM:** Alpha-Chemie-Metallurgie GmbH, BE für Mischoxid Uran und Plutonium; **RBU:** Reaktor-Brennelement-Union GmbH; **HOBEG:** Hochtemperatur-Reaktor-Brennelement GmbH; **MILLI:** Aufarbeitungs-Versuchsanlage, Kapazität: 1 kg pro Tag (1 MILLI Tonne); **WAK:** Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe BGmbH, Kapazität: 40 t pro Jahr.

Die frühzeitig eingeleiteten FuE-Arbeiten und die erworbenen Erfahrungen aus einer grossen Reihe von Stilllegungsbeispielen haben zu einem gesicherten technischen Kenntnisstand für das Vorgehen bei der Ausserbetriebnahme, bei dem Rückbau und beim vollständigen Abriss verschiedenster kerntechnischer Anlagen geführt, so dass nach kosteneinsparenden Synergien gefragt wird.

Bezeichnung		Typ	Thermische Leistung Watt	Betrieb 1. Kritikalität	Standort
FRM II	Forschungsreaktor München II	Tank	20 000 000	Bau seit 1993	Reaktorstation TU München
FRG I	Forschungsreaktor Geesthacht I	Schwimmbad	5 000 000	1958	GKSS Geesthach
FRJ II	Forschungsreaktor DIDO Jülich II	D20 moderiert & gekühlt, Tank	23 000 000	1962	Forschungszentrum Jülich (2006)
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz	TRIGA II	100 000 bis 23 000 000	1965	Institut f. Kernchemie U Mainz
BER II	Berliner Experimentier- reaktor II	Schwimmbad	10 000 000	1973	Hahn-Meitner Institut Berlin
AKR	Ausbildungs- kernreaktor Dresden	homogen	2	1978	Institut f. Kernenergetik TU Dresden
ZLFR	Zittauer Lehr- und Forschungsreaktor	Tank	10	1979	FH Zittau-Görlitz
SUR-UL	Siemens Unterrichts- reaktor Ulm	homogen	1	1965	FH Ulm
SUR-S	Siemens Unterrichts- reaktor Stuttgart	homogen	0,1	1964	TU Stuttgart
SUR-VS	Siemens Unterrichts- reaktor Furtwangen	homogen	0,1	1973	FH Furtwangen
SUR-AC	Siemens Unterrichts- reaktor Aachen	homogen	0,1	1966	RWTH Aachen Institut für elektr. Anlagen & Energien

**Tab. 5 : Bestand an Kernreaktoren für Forschung und Ausbildung , die sich in Betrieb befinden
(Stand IV.2000)**

Der Auflistung in Tab. 5 ist zu entnehmen, dass sich die Zahl der Forschungsreaktoren (F) und der Ausbildungsreaktoren (A) im erheblichen Masse verkleinert hat /Spo/. Aus ihr und aus Abb. 1 ergibt sich derzeit (IV, 2000) ein Bestand von 10 F+A-Reaktoren. Sie sind alle bereits über 20 Jahre alt; ein einziger, bestrittener Neubau wird durchgeführt (FRM II); von den 10 Objekten werden in den nächsten Jahren zweidrittel der F+A-Reaktoren den Betrieb einstellen; um den Kompetenzerhalt ist deshalb energisch zu kämpfen.

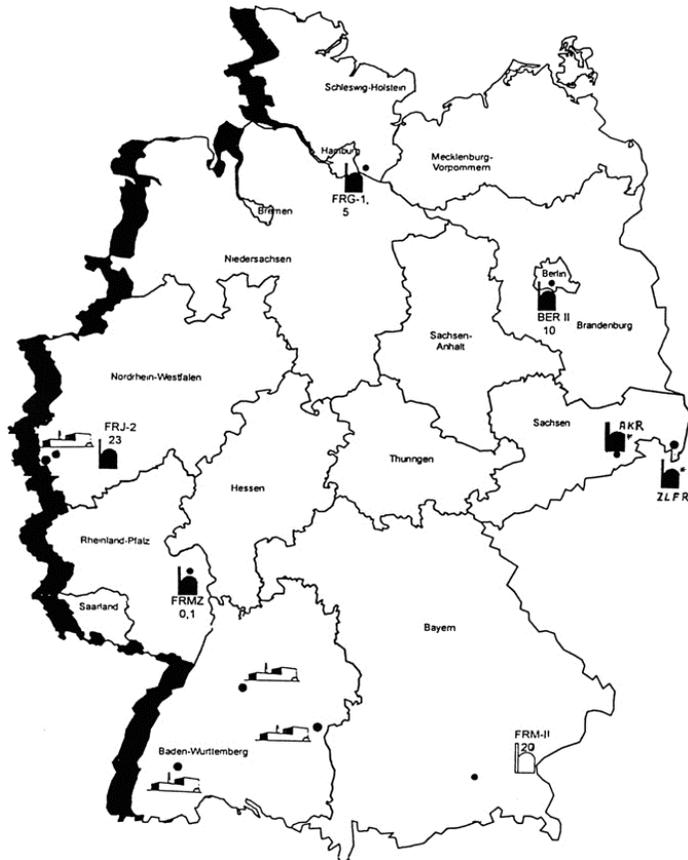


Abb. 1: in Betrieb befindliche Kernreaktoren für die Forschung und Ausbildung in Deutschland mit der Angabe der thermischen Leistung in Mega-Watt (MWth); AKR: 2 Wth ; ZLFR: 10 Wth; Siemens Unterrichtsreaktor (SUR) 0,1 Wth , (Stand IV. 2000)

Land	Anzahl der Kernkraftwerke in Betrieb	Status der stillgelegten Kernreaktoren			
		gesicherter Einschluss	Abbau	Teilabbau	Abbau beendet
Deutschland	19	3	14		2
Frankreich	57			9	2
England	35			11	
Schweiz	5	1			
Belgien	7			1	
Niederlande	1	1			
Schweden, Finnland	15				
Italien			4		
Spanien	9	1			
Rumänien, Bulgarien, Ungarn	11				
Tschechien, Slowakien, Slowenien	10		1		
ehemalige Sowjetunion	44	13		3	
USA	109			17	
Kanada	24			3	
Japan	54				1
China, Indien, Südostasien	14				
Korea	17				

Tab. 6: Weltweiter Bestand an Kernkraftwerken, die sich in Betrieb, in Stilllegung oder im Rückbau befinden /Bac-1/

Ein weltweiter Vergleich hinsichtlich der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen (ohne militärische Aspekte) gemäss Tab.6 nach /Bac/ zeigt, dass sich Deutschland in der Gruppe befindet, die hinsichtlich Erfahrungen und Durchführungen den Spitzenplatz einnimmt. International gesehen, muss aber auch klar herausgestellt werden, dass sich die Mehrheit der KKW betreibenden Staaten Zeit lässt, um den Rückbau und die Entsorgung zu veranlassen.

2. Zielsetzung

Als kerntechnische Anlage wird grundsätzlich jede Anordnung oder Anlage angesehen, die bei ihrem Abriss in irgendeiner Form zu radioaktiven Abfällen führt, die geordnet zu beseitigen sind. Angefallene radioaktive Hinterlassenschaften werden in Zwischenläger für radioaktive Abfälle entsorgt. Endgültige Lösungen im Sinne einer generellen Entsorgung gibt es nicht. Zeitweilig wurden Abfälle in die Versuchsanlage ASSE und in das Salzbergwerk ERAM (geschlossen durch Gerichtsbeschluss vom September 1998) endgelagert. Dadurch steht die Stilllegung kerntechnischer Anlagen vor einer Stagnation, zu der nachfolgend Konsequenzen beschrieben werden.

Der Begriff "Stilllegung" nach § 7 (3) des Atomgesetzes (AtG) betrifft alle kerntechnischen Anlagen, d.h. Kernkraftwerke, Forschungsreaktoren und Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs. Die Stilllegung einer kerntechnischen Anlage umfasst jene Massnahme nach der endgültigen Betriebseinstellung, die den sicheren Einschluss oder den Abbau der Anlage als

Ziel hat. Stilllegung beinhaltet gleichfalls den Abbau von Anlagenteilen und bleibt verbunden mit der "Innehabung" der sicher eingeschlossenen, bzw. teilweise abgebauten Anlage für den Betreiber. Das AtG und relevante Rechtsnormen enthalten hinsichtlich der Stilllegung einer kerntechnischen Anlage keine spezifischen Vorschriften. Im Gesetz wird auf eine sinngemäße Anwendung der Vorschriften für Errichtung und Betrieb verwiesen. Eine sinngemäße Anwendung findet aufgrund fehlender spezifischer Vorschriften statt, bzw. wurde entwickelt /Sch/.

Auf dieser Basis sind bisher Stilllegungen, auch Teilschritte genehmigt und ausgeführt worden, allerdings folgt aus der sinngemässen Anwendung bestimmter Rechtsvorschriften ein Ermessungsspielraum für die Behörden, die über die beantragte Genehmigung entscheiden. Hierdurch erklären sich auch weitgehend die Unterschiede bei den Verfahrensabwicklungen in den einzelnen Bundesländern. In diesem Zusammenhang sind die Bestrebungen des BMU zur länderübergreifenden Vereinheitlichung der Vorgehensweise durch die Erarbeitung des sogenannten "Stilllegungsleitfadens" zu nennen /Sti/.

Es zeichnet sich ab, dass die Umweltverträglichkeitsprüfung für Bau und Betrieb der Kernkraftwerke in der EU, die in der Atomrechtlichen Verfahrensordnung, Stand 12.2.1990, umgesetzt wurde, zu Änderungen führt. Denn die EU hat am 3.3.1997 in einer Änderungsrichtlinie (Anhang 1 Nr.2, Nr.3; UVP Richtlinie der EU vom 27.6.1985) festgelegt, dass auch die Stilllegung und der Rückbau der Kernkraftwerke UVP-pflichtig ist. Es sollte deshalb bei der Umsetzung darauf ankommen, dass die Darstellung der insgesamt geplanten Massnahmen für die Stilllegungstätigkeiten nur zur ersten, einmaligen Stilllegungsgenehmigung und nicht zu mehr zu späteren Änderungsgenehmigungen, bzw. einzelnen Abbaugenehmigungen führt. Sollte allerdings für jede einzelne Stilllegungsmassnahme jedes Mal eine Darstellung der insgesamt geplanten Massnahmen notwendig werden, wäre der bürokratische Aufwand für den Anlageninhaber, für die atomrechtliche Behörde und für den Gutachter immens.

Einerseits durch die rechtlichen und andererseits durch die technischen Aspekte stellt die kerntechnische Stilllegung einen sehr komplexen Sachverhalt mit einer Reihe von Aufgaben und Auswirkungen dar, die allesamt im Kontext behandelt werden müssen. Ausserdem sind zwei Wege möglich: der Abriss oder der Einschluss.

- Direkter Rückbau (dR): Hierzu gehört sowohl der Gesamtabriss bis zur "grünen Wiese", als auch der Teilabbau, bei dem alle nuklearen Komponenten der Anlage abgebaut und beseitigt, aber andere Anlagenteile (Gebäude) erhalten und einer neuen Nutzung zugeführt werden.
- Sicherer Einschluss (sE): Beim sicheren Einschluss bleibt die Anlage in wesentlichen Teilen erhalten und im Geltungsbereich des AtG. Der Kernbrennstoff ist entfernt. Inaktive Komponenten sind teilweise ausgebaut. Das verbleibende radioaktive Material ist für einen befristeten Zeitraum sicher eingeschlossen.

Bisher erschien der unmittelbare Rückbau einer kerntechnischen Anlage bis zur Entlassung aus dem AtG kostengünstiger als die Herstellung des sicheren Einschlusses, weil eine Endlagerung folgen sollte. Es tritt derzeit ein Paradigmenwechsel ein; der sichere Einschluss wird zur gängigen Vorgehensweise, weil kein Endlager zur Verfügung steht und deshalb kostengünstiger wird. Zwischenlager an verschiedenen Stellen in Deutschland mit Standzeiten von 40 Jahren stellen sich sozusagen als Anlagen mit behandelten Abfällen in sicherem Einschluss dar.

Betriebseinstellung, Nachbetriebsphase, Rückbau mit Abriss oder sicheren Einschluss sowie Abfallbehandlung oder Schrottfreigabe und Endlagerung haben als gemeinsamen Nenner die Stilllegung der verschiedensten kerntechnischen Anlagen den Strahlenschutz. Er ist Pflicht und Aufgabe.

Diesbezüglich erklärt das AtG (§ 1, 2) vor den Gefahren der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen und durch ionisierende Strahlen verursachte Schäden auszugleichen, sowie, auf der Grundlage der Ermächtigung nach § 12 AtG, eine Strahlenschutzverordnung zu erlassen, um über diese in § 28 der StrSchV die Strahlenschutzgrundsätze zu präzisieren. Es ist:

- jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Personen, Sachgütern oder der Umwelt zu vermeiden und
- jede Strahlenexposition oder Kontamination von Personen, Sachgütern oder der Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalles auch unterhalb der in dieser Verordnung festgesetzten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.

Demzufolge gilt ein Optimierungsgebot. Es ist zu vergleichen die direkte Aktion längs der heutigen Handhabungskette: sofortiger Rückbau, Abfallbehandlung, Zwischenlagerung und späteres Endlager, sowie der Handhabungskette: sicherer Einschluss, Überwachung, Vorteilsnahme von radioaktivem Zerfall, Abriss, Abfallbehandlung und Endlager.

Der sE kann den dE zwecks Strahlenschutz nicht ersetzen, sondern verschiebt ihn lediglich auf einen späteren Zeitpunkt. In der deutschen Genehmigungspraxis wird im allgemeinen mit einer Zeitspanne von etwa 30 Jahren gerechnet. Die Rückbaukosten nach dieser Zeit werden bei den Leistungsreaktoren wegen der abgeklungenen Aktivität der Anlage und der dann einmaligen Abfallbehandlung mit sofortiger Endlagerung niedriger sein.

Bei Forschungsreaktoren und Aufarbeitungsanlagen spielt dieser Effekt wegen ihres geringen Aktivitätsinventars und der unterschiedlichen Zerfallsnuklide eine untergeordnete Rolle. Hier dominieren die Zusatzkosten für die notwendigen Massnahmen zur Herstellung des sicheren Einschlusses und zu seiner Gewährleistung, zu denen sowohl technische Massnahmen wie auch die Bereithaltung der Organisation, Anlagensicherung u.a. gehören. Kosten und Pro-

bleme können ferner entstehen, weil in der Regel nach 30 Jahren das anlagenkundige Personal nicht mehr zur Verfügung steht. Insgesamt erscheint der unmittelbare Rückbau einer kerntechnischen Anlage bis zur Entlassung aus dem AtG kostengünstiger als die Herstellung des sicheren Einschlusses mit dem anschließenden Rückbau, immer vorausgesetzt, es steht unmittelbar ein Endlager zur Verfügung, um das Ziel: Entsorgung zu erreichen.

Mit den Vorgaben durch den Strahlenschutz, im Rahmen der Endlagermöglichkeiten und mit den Gesichtspunkten schnelle Nutzung des Standortes sowie Pflicht zur Kosteneinsparung ist jeweils ein spezifisches Vorgehen bei einer Stilllegung – Abriss oder Einschluss – als eine fallweise optimierte Zielsetzung durchzuführen.

3. Vorgehensweise

Der Entschluss und der Zeitpunkt der Stilllegung werden durch die Ergebnisse aus einer Nutzen-Kosten-Analyse bestimmt. Massgebend für solch eine Entscheidung ist der jeweilige Umfang einer sicherheitstechnischen Nachrüstung, um den Stand von Wissenschaft und Technik zu berücksichtigen, zu den Vorteilen einer weiteren Nutzung. In jedem Fall wird die Vorgehensweise für eine Stilllegung unter den Aspekten von Sicherheit und Kosten zu diskutieren sein, inwieweit ein sofortiger Abriss oder ein vorläufiger Einschluss erfolgen sollte. Den Rahmen gibt ein angemessener Strahlenschutz ganzheitlich betrachtet von der fernhantierten Demontage, über die Abfallbehandlung bis zur Endlagerung vor. Mit der Festlegung der Stilllegungsstrategie, den Beginn einer rechtzeitigen Planung und der Stilllegungsabwicklung sind die Kenntnisse Dritter zu nutzen, um Doppelarbeiten auszuschließen /Ein/. Nach dem Stand der Praxis und den bisherigen Erfahrungen müssen Vorbereitungen zu Stilllegung und Rückbau einer kerntechnischen Anlage möglichst früh im Rahmen der Betriebsgenehmigung beginnen. Sie betreffen:

- Festlegung der Stilllegungsstrategie und vorbereitende Information der Behörden
- Entfernung des Kernbrennstoffs aus der Anlage
- Entfernen der Betriebsabfälle aus der Anlage
- Erstellung des Aktivitätskatasters
- Durchführung von Materialanalysen und von Dekontaminationsmassnahmen
- Erarbeitung der Unterlagen mit Stilllegungsantrag, Sicherheitsbericht für die Stilllegung, Demontagehandbuch.

Zur Sicherstellung eines planmässigen und kostenoptimierten Rückbaus sind folgende Randbedingungen zu gewährleisten bzw. folgende Massnahmen durchzuführen:

- Rechtliche Planungssicherheit (AtG, StrlSchV, Endlagerbedingungen)
- Finanzielle Planungssicherheit (verbindliches Budget über die gesamte Projektlaufzeit)
- Einrichtung eines effektiven Projektmanagement und Controllingsystems.

Derzeit führt jede kerntechnische Anlage diese Massnahmen mehr oder minder allein für sich selbst durch. Es besteht im Prinzip kein Kontakt zu Anlagen an anderen Standorten und keine Nutzung von deren Erfahrungen und Unterlagen. Bei ähnlichen Anlagen kommt es so zur unnötigen Doppelarbeit (zB. bei TRIGA besteht ein Einsparpotential in Höhe von 20% bis 50% bei der Erstellung der Antragsunterlagen des 2. Reaktors, das sind geschätzt mindestens 1 Mio DM). Ganz allgemein ist es eine Erfahrung, dass Informationsgespräche zwischen Behörden, Gutachtern und Antragstellern von der Vorbereitung der Stilllegung bis zur Durchführung von grossem Nutzen sind.

4. Stilllegungsrelevanter Strahlenschutz

Die Zielvorgaben der nuklearen Entsorgung werden grundsätzlich durch den Strahlenschutz bestimmt. Für die Stilllegung ist er genau zu hinterfragen. Um die Strahlenbelastung so gering wie möglich zu halten, sind sinnvolle d.h. angepasste Massnahmen durchzuführen und bei einem nicht verfügbaren Endlager ist dem sicheren Einschluss unter Berücksichtigung des ALARA-Prinzips (as low as reasonable achievable) der Vorzug zu geben.

Nach über 40 Jahren des Sammelns von Erfahrungen und der wissenschaftlichen Abklärung sowie erheblicher Untersuchungen und Auswertungen der Vielzahl von Fällen für den Strahlenschutz sind dessen Positionen, Vorgehen, Begründungen sowie Erklärungen im Sinne des ALARA neu zu gestalten.

Es ist Paradigmenwechsel angesagt. Der Ausgangspunkt seinerzeit war die Vorsicht wegen Unkenntnis der Zusammenhänge mit den Sicherheitsaufschlägen und mit einer konservativen Vorgehensweise Gefahren auszugrenzen. Dieses Unsicherheitspotential hat sich bis heute mechanisch fortgeschrieben, ist jedoch zu überwinden. Die Dinge haben mittlerweile eine Eigendynamik entwickelt, um eine Strahlenphobie zu erhalten bzw. fortzuschreiben /Kra/. Einerseits ist abzuklären, wieviel gesundheitliches Risiko ergibt sich pro Sievert an Strahlenexposition. Dabei sind die Modell-Annahmen Schritt für Schritt für jedermann einsehbar zu erörtern, beziehungsweise zu begründen, sodass eine ergebnisoffene Diskussion abläuft. Andererseits hat diese öffentliche Abklärung der konservativen Annahmen zur Folge, dass sich F+E-Arbeiten generieren und der Schritt von Sicherheitszuschlägen zu Messdaten erfolgt.

P. Pellerin, langjähriger Chef des Französischen Strahlenschutzamtes (SCRIP-Paris), spricht hier von einer klassischen Lobbyhaltung der echten und sogenannten Strahlenschutzexperten und bedauert die gigantischen Kosten zur Vermeidung höchst unwahrscheinlicher Wirkungen sehr kleiner Strahlendosen /Bec/. Das Mann-Sievert-Konzept ist zu restrukturieren und neuen Strahlenschutz-Konzepten anzupassen, sodass seine Revision ein Baustein unter vielen anderen zum Paradigmenwechsel ergibt.

Im Ergebnis lassen sich die Strahlenschutz-Grenzwerte erheblich senken und Strahlenschutz-Massnahmen deutlich erleichtern. Das erfordert, dass transparent und detailliert begründete Fälle (mit klar genannten Randbedingungen) als durchgerechnete Beispiele für die radiologischen Auswirkungen von der Stilllegung über den Abbau, über die Abfallkonditionierung, über die Zwischenlagerung und den Transport, bis zur Endlager-Abgabe betrachtet werden.

Anzumerken ist, dass eine einheitliche Anwendung in der Europäischen Gemeinschaft für den stilllegungsrelevanten Strahlenschutz gefordert werden muss /Hel/. Der Grundsatz der einheitlichen Anwendung auf der Basis der neuen Grundnormen für den Strahlenschutz von 1996 für die vielen Aktivitäten bei der Stilllegung Kerntechnischer Anlagen in Europa stellt gleichfalls einen Baustein zum Paradigmenwechsel dar und ist eine Grundlage des freien Zugangs zu Dienstleistungen in allen EU-Ländern gleichermaßen.

5. Technik

Seit den 60er Jahren wurden Verfahren entwickelt und Erfahrungen gesammelt sowie ausgewertet, wobei das BMFT/BMBF erhebliche finanzielle Mittel bereitstellen konnte, mit den Zielen:

- Reduzierung der radiologischen Belastung des Personals
- Eingrenzung des Anfalls von radioaktiven Abfällen (Volumenreduzierung)
- Einsparung beim finanziellen Aufwand durch Optimierung der Technik und des Zeitaufwandes.

Die generelle Erfahrung lehrt, dass es kein Universalverfahren für alle Demontageaufgaben gibt. Es ist jeweils die ausgewählte Methode einzusetzen, die die gestellte Aufgabe mit geringster radiologischer Belastung von Personal und Umwelt und geringstem Aufwand bei den Abfallmengen zu lösen gestattet /Bac-1/ .

5.1 Zerlegetechniken

Mechanische Zerlegetechniken und thermische Schneidverfahren sind etabliert. Die Entwicklungen der letzten Jahre wurden mit dem Ziel der Reduzierung des technischen Aufwandes, der Zeitdauer und damit der radiologischen Belastung des Betriebspersonals und der Kosten mit Erfolg durchgeführt (Wasserabrasivstrahlschneiden, Laserschneiden, Plasmafeinstrahlschneiden, Handhabungssysteme). Die generelle Erfahrung ist, dass es kein Universalverfahren gibt, sondern spezielle Verfahren für die verschiedenen Aufgaben erforderlich sind. Jeweils das ist einzusetzen, was die Aufgabe mit geringstem Aufwand und damit geringster radiologischer Belastung von Personal und Umwelt zu lösen gestattet.

5.2 Dekontaminationstechniken:

Neben den etablierten Techniken, die für den zu bearbeitenden Werkstoff das entsprechende Dekontaminationsverfahren berücksichtigen, ist eine Sondertechnik für Forschungsreaktoren zur Anwendung gekommen (Trockeneis-Laserstrahl-Thermoschock-Verfahren) /Bac-2/.

5.3 Freimesstechniken:

Neben den etablierten Freimesstechniken wurde in jüngerer Zeit das in-situ Gamma-scanning anwendungsorientiert entwickelt, das beträchtliche Kosteneinsparungen erwarten lässt.

Die derzeit verfügbaren bzw. in Entwicklung befindlichen Techniken erscheinen ausreichend. Ein Identifizieren zusätzlicher Probleme mit der Forderung nach neuen Verfahren kann aber nicht ausgeschlossen werden. Neue Verfahren sollten aber in jedem Fall unter der Mitwirkung von Betreibern entwickelt werden und immer ein Einsparpotential eröffnen. Ein Charakteristikum nach dem heutigen Stand ist es, dass sich jede F+E-Entwicklung weitgehend auf eine Anlage beschränkte, mit deren Betreiber sie durchgeführt wurde. Eine Einbindung verschiedener Anlagenbetreiber in Entwicklungsarbeiten findet bisher nur vereinzelt statt.

6. Einsparpotentiale

So wie der Stilllegungsprozess wegen seiner Komplexität differenziert zu handhaben ist, so sind differenziert Einsparpotentiale zu betrachten:

- Strahlenschutz-spezifische Einsparpotentiale werden bestimmt durch das ALARA - Prinzip
- Technische Einsparpotentiale durch den Einsatz einer hochqualifizierten Technik, wobei die Geräte und Verfahren weitgehend ausgeschöpft wurden; fallweise bringen sehr spezielle Anpassungen noch kleinere Vorteile
- Management-bezogene Einsparpotentiale lassen sich erreichen durch die Organisation des know-how-transfer verbunden mit der Ausschaltung von Doppelarbeit
- Entsorgungsbedingte Einsparpotentiale betreffen die Vorkehrungen bei der Abfallbehandlung und die Verfügbarkeit von Zwischen- und Endlager. Letzteres wird nachfolgend angesprochen:

Einsparmöglichkeiten bei der Lagerung :

Die Ziele und deren Erreichbarkeit für eine zügige Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland in Vergangenheit und Zukunft werden hier nicht reflektiert. Eine tabellarische Aufstellung (Tab. 7) gibt eine Übersicht über die untersuchten kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland, deren Rückbau und Entsorgung von der öffentlichen Hand zu finanzieren sind.

Anlagen: Kernreaktoren, Kerntechnische Anlage Anzahl, Typ	Status: in Betrieb, in Stilllegung, im Rückbau, im Einschluss	Abfall: Volumen des radioaktiven Rohabfalls*, pro Anlage/Reaktor in m ³ Summe	Kosten: Geschätzte Stilllegungskosten pro Anlage/Reaktor (ohne Entsorgung) in Mio DM Summe:	Zuständigkeit: Finanziert aus dem Haushalt des/der
13 Nullleistungs- reaktoren	in Stilllegung in Betrieb	0,5 - 10	1 - 1,5	BMBF, Länder
12 Siemens- Unterrichts- reaktoren	5 abgebaut 4 in Betrieb 3 in Stilllegung	0,5 - 10	1 - 1,5	Länder
6 TRIGA (DKFZ I, II; MH- H Neuherberg, Mainz, FRF 2)	2 in Betrieb 2 im Rückbau 2 im Einschluss	30 - 60	20	BMBF, Länder
10 MTR (FRG I, II; BER I, II; FRJ I, II; FMRB; FRM; FR 2; RFR)	5 in Betrieb 1 im rückbau 2 in Stilllegung 2 im Einschluss	60 - 260	30 - 150	BMBF, Länder
6 Leistungsreaktoren	6 im Rückbau	4000	433	BMF/BMWi
MZFR	im Rückbau	300	320	BMBF, Baden Württemberg
KNK II	im Rückbau	350	330	BMBF, Land BW
MILLI	abgebaut	600	20	BMBF, Land BW
AMOR 1, 2, 3	im Rückbau	167	80	Freistaat Sachsen
Heisse Zellen im FZJ u. FZK	in Betrieb	400	200	BMBF, Länder
Kumulative Summen:		27.000 bis 30.000 m³	4,4 bis 5,6 Mrd. DM	

Tab. 7: Zusammenstellung der Kosten für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen /Ein/, die sich in der Verantwortung des Bundes und der Länder befinden (Stand IV.2000), (kumulative Zahlenwerte folgen aus Anzahl der Anlagen multipliziert mit dem Mindest- oder Maximalwert)

Alle derzeit stillgelegten Anlagen sollen bis zum Jahr 2012 abgebaut sein. Zudem ist in den nächsten 10 Jahren mit der Stilllegung bzw. dem Rückbau von weiteren 10 Anlagen zu rechnen. Die geschätzten Stilllegungskosten (Basis 1999) gelten bis zur Entlassung aus dem AtG. Somit sind 27.000 bis 30.000 M3 radioaktiver Rohabfälle zu betrachten. Bei einem durchschnittlichen Füllfaktor von 0.2 ergeben sich 135.000 bis 150.000 M3 in Gebinden konditionierter Abfall. Für die Entsorgung dieser radioaktiven konditionierten Abfälle werden drei Entsorgungsvarianten einander gegenübergestellt /Ein/:

- Variante 1: umgehende Endlagerung (Kosten nach KONRAD-Endlager-Bedingungen 25.000 DM/M3);
- Variante 2: Zentrale Zwischenlagerung über 30 Jahre (am Beispiel des Zwischenlagers Rubenow/Greifswald; Kosten bei Einlagerung unter Berücksichtigung der Errichtungs- und Betriebskosten: 250 bis 500 DM/M3 *a), dann Endlagerung; die Zusatzkosten für den einmaligen Transport zum Zwischenlager wurden nicht berücksichtigt;
- Variante 3: Dezentrale Zwischenlagerungen über 30 Jahre am jeweiligen Standort (Kosten bei Einlagerung in einem erst neu zu errichtendem Langzeit-Zwischenlager am Standort, d.h. unter Einrechnung von Errichtungs- und Betriebskosten, an den Beispielen: des Zwischenlagers VKTA Rossendorf: 730 DM/m3 *a und des Zwischenlagers bei GKSS: 1550 DM/M3 *a), dann Endlagerung.

Zu Grunde gelegt werden in allen Fällen zusätzliche einmalige Nebenkosten in Höhe von 3500 DM/m (Informationen aus den Erfahrungen von VKTA, FZK und FZJ) für Transporte, Konditionierung und Produktkontrolle. Für die angegebenen Varianten mit ca. 30 000 m3 radioaktivem Primärabfall ergeben sich damit Kosten von :

- Variante 1: 3,9 bis 4,3 Mrd. DM
- Variante 2: 4,9 bis 6,1 Mrd. DM
- Variante 3: 6,8 bis 11, 1 Mrd. DM

Die möglichen Einsparpotentiale sind aus dieser Gegenüberstellung ablesbar. Sie beziehen sich allein auf die angegebenen kerntechnischen Anlagen nach der obigen tabellarischen Zusammenstellung und deren Abfallaufkommen. Es muss festgestellt werden, dass bei dezentralem Zwischenlager (3.Variante) wesentlich höhere Kosten entstehen als bei den anderen Varianten. Dagegen fallen die übrigen Einsparpotentiale (Technik, Management, u.a.) im Vergleich zu den anderen Aspekten bescheiden aus.

7. Ausblick

Für die hier angesprochenen kerntechnischen Anlagen in öffentlicher Hand beträgt der Finanzbedarf aller Stilllegungsprojekte mehr als 18 Mrd DM /Ein/. Er wird steigen, zumal die Endlagerkosten nicht berücksichtigt worden sind. Diese Situation erzwingt es, nach möglichen Einsparpotentialen zu suchen auch dann, wenn diese nur wenige Prozent des Gesamtaufkommens betragen sollten, da jedoch wenige Prozente Einsparungen in zweistelliger Millionenhöhe pro Jahr bedeuten werden. Das BMBF ist in diesem Zusammenhang nachdrücklich darum bemüht, den finanziellen Aufwand für die Stilllegung und die Entsorgung zu minimieren. Das BFS koordinierte ein vom BMBF gefördertes Forschungsvorhaben FM 8084, um Abschätzungen für mögliche Einsparpotentiale zu bekommen /Ein/.

Ein Fazit lautet: unabhängig von der Genehmigungs- und Aufsichtspraxis, unabhängig von der Endlagersituation, allein bereits durch Know-how-transfer und generalisiertes Management (soweit sinnvoll) lassen sich erhebliche Geldbeträge einsparen. Es wird zur Diskussion gestellt, einen Informations- und Arbeitskreis Stilllegung Kerntechnischer Einrichtungen zu etablieren. Eine Mitarbeit könnte jede Behörde durch Auflagen zur Pflicht machen, weil unter dem Gesichtspunkt Strahlenschutz-Optimierung das Know-how Dritter zu berücksichtigen ist. Diesem Ausschuss stehen eine Datenbank, aufbereitete Statusberichte und alle Beispiele von Stilllegungsmaßnahmen mit ihren Unterlagen zur Verfügung, um Doppelarbeit auszuschließen.

Ein zweites Fazit bezieht sich auf den Paradigmenwechsel beim Strahlenschutz, in dem das ALARA-Prinzip eindeutig zur Anwendung kommt und die derzeitigen Modell-Annahmen hinterfragt werden. Dabei können die Grenzwerte kraft jahrzehntelanger Erfahrungen sich senken lassen.

Ein drittes Fazit ergibt sich aus dem Faktum, dass kein Endlager zur Verfügung steht, Zwischenlager verwendet werden und der sichere Einschluss als die eine vorteilhafter gegebene Vorgehensweise gleichfalls den Paradigmenwechsels hervorruft.

Literatur:

- /Bac-1 / Bach, Fr.-W.; u.a.; Stilllegung im internationalen Vergleich; atw 46.Jg. H.2; S. 100 (2001)
- /Bac-2/ Bach, Fr.-W.; u.a.; Abtrags- und Zerlegetechnik für den Rückbau kerntechnischer Anlagen; atw 46. Jg. H.2, S.1 12, (2001)
- /Bec/ Becker, K.; Schwelle oder nicht Schwelle - ist das hier die Frage; Strahlenschutz-Praxis, 3.Jg. H.2, S.2 1; (1997)
- /Ein/ BMBF-Vorhaben "Ermittlung von Einsparpotentialen bei Stilllegung und Rückbau deutscher kerntechnischer Anlagen" (FKZ: 02-S-7778) (1999)
- /Spo/ Spoden, E.; Übersicht über Stilllegungsprojekte in Deutschland, Teil II; Forschungsreaktoren, BFS, KT-IB 81, Salzgitter (April 1999)
- /Hel/ Heller, W.; Strahlenschutz in Europa harmonisieren; atw 45. Jg., Heft 6; S. 412 (2000)
- /Kra/ Kraus, W.D.; Strahlenschutz so vernünftig wie möglich, oder: Wie leben wir mit dem Dilemma unserer Unsicherheit?; Strahlenschutz-Praxis; 3. Jg; Heft 2, S. 24 (1997)
- /Sch/ Schatke, H.: Rechtliche Vorgaben für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen; atw 46. Jg., H:2, S. 108, (2001)
- /Sti/ BMU-Leitfaden zur Stilllegung von Anlagen nach § 7 Atomgesetz; (Juni 1996)

KLIMASCHUTZ DURCH EMISSIONSHANDEL

Helmuth-Michael Groscurth

Hamburgische Electricitäts-Werke AG (HEW)

1. Umweltziele in liberalisierten Energiemärkten

Die Liberalisierung der Energiemärkte erfordert auch eine Neuorientierung der Umweltpolitik hin zu marktwirtschaftlichen Instrumenten. Bereits in der Vergangenheit war es nicht immer einfach, Kompromisse zwischen den konkurrierenden Zielen *Versorgungssicherheit*, *Umweltschutz* und *niedrigen Preisen* zu finden. Dieser Zielkonflikt wird durch den einsetzenden Wettbewerb auf den Energiemärkten verschärft, wenn es nicht gelingt, die Rahmenbedingungen so zu setzen, dass die Marktkräfte auch Umweltbelangen Rechnung tragen.

Die Liberalisierung wird im wesentlichen mit dem Argument vorangetrieben, dass dadurch Effizienzgewinne in den Energieunternehmen zu erzielen seien, die letztlich zu Preissenkungen für die Energienutzer führen. Gleichzeitig wächst die Gefahr vom Menschen verursachter Klimaveränderungen, die hier als Beispiel für ein besonders drängendes Umweltproblem dienen soll. Die Vielfalt der Indizien für und die möglichen Folgen von Klimaveränderungen sind erst kürzlich wieder vom *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* in seinem dritten Bericht unterstrichen worden. Die Politik hat auf dieses Problem reagiert und im Kyoto-Protokoll zur Klimarahmenkonvention (UNFCCC) international verbindliche Ziele zum Klimaschutz vereinbart (vgl. www.unfccc.org).

Bei der Umsetzung der Liberalisierung sind jedoch weder in der einschlägigen EU-Richtlinie noch in der Novelle des deutschen Energiewirtschaftsgesetzes adäquate Regelungen für die Umsetzung derartiger Umweltziele getroffen worden. Unternehmen, die in der Vergangenheit mehr für den Umweltschutz getan haben als ihre Konkurrenten und dies auch weiter tun wollen, geraten in Zugzwang, weil die zusätzlichen Kosten für Umweltprojekte heute einen Wettbewerbsnachteil darstellen.

Die deutsche Politik versucht, ihre Umweltziele mit konventionellen Mitteln des Ordnungs- und Steuerrechts umzusetzen, die im wesentlichen aus der Zeit der Energiemonopole stammen und die vielfach mit den Erfordernissen liberalisierter Märkte kollidieren. Es soll daher in diesem Artikel gezeigt werden, wie umweltpolitische Ziele in liberalisierten Märkten so verfolgt werden können, dass die berechtigten Ansprüche der Unternehmen auf Planungssicherheit, Wettbewerbsneutralität und möglichst geringe zusätzliche Belastung berücksichtigt werden.

2. Annahmen und Anforderungen aus Sicht der Unternehmen

Ausgangspunkt der Überlegungen sind folgende *Annahmen*:

Die Gefahren, die von möglichen Klimaveränderungen ausgehen, sind so gravierend, dass die Politik früher oder später gezwungen sein wird, drastische Massnahmen einzuleiten, um die Emissionen von Treibhausgasen zu limitieren. Vor dem Hintergrund einer Investitionsentscheidung, die ein Unternehmen über zwanzig oder dreissig Jahre bindet, ist es dabei unerheblich, ob das Kyoto-Protokoll ein paar Jahre früher oder später ratifiziert wird. Es besteht aus heutiger Sicht ein erhebliches *regulatorisches Risiko*, dass die Emissionen von Treibhausgasen während der wirtschaftlichen Lebensdauer einer grösseren Investition beschränkt werden. Dieses Risiko muss bewertet werden und sollte, wenn möglich, technisch und *finanziell* abgesichert werden. Die Möglichkeit, auch für Umweltprobleme ein *finanzielles Risikomanagement* zu betreiben, wird erst seit der Liberalisierung der Energiemärkte und der damit verbundenen Schaffung von Strom- und Gasbörsen, an denen auch Derivate auf physische Stromlieferungen gehandelt werden, diskutiert. Solche Derivate (Forwards, Futures, Optionen etc.) dienen heute in erster Linie der Absicherung künftiger Strom- und Gaspreise, lassen sich aber auch zur Begrenzung von Kosten, die künftig durch Emissionen verursacht werden, einsetzen. Ein solches Vorgehen wird auch als „Hedging“ bezeichnet.

Es ist für die betroffenen Unternehmen vorteilhaft, die Emissionsminderung in kleinen Schritten, über einen längeren Zeitraum und unter klaren, fairen Rahmenbedingungen, die den Wettbewerb nicht behindern, vorzunehmen. Die notwendigen Massnahmen können dann an die Investitionszyklen der Unternehmen angepasst werden. Der ungünstigste und vermutlich auch teuerste Fall wäre es, das Problem auf die lange Bank zu schieben, um sich dann – nach einem einzelnen, grösseren Schadensereignis – hektischen und kostenträchtigen Sofortmassnahmen der Politik gegenüber zu sehen, wie dies kürzlich im Rahmen der BSE-Problematik zu beobachten war.

Deutschland muss zudem darauf achten, dass es nicht von der internationalen Entwicklung abgekoppelt wird. Marktwirtschaftliche Instrumente wie der Emissionshandel sind neben den USA, Australien und Neuseeland auch in etlichen EU-Ländern wie Dänemark, Grossbritannien, Schweden und den Niederlanden bereits eingeführt oder in Vorbereitung. Es besteht die Gefahr, dass Deutschland gezwungen sein könnte, im Rahmen der EU derartige Instrumente einzuführen, ohne hinreichend Einfluss auf die Gestaltung gehabt zu haben und ohne dass deutsche Unternehmen ausreichend vorbereitet sind.

Folgende *Anforderungen* sollten an neue umweltpolitische Instrumente gestellt werden: Vor der Auswahl der Instrumente sollten klare Umweltziele definiert werden. Industrie-, struktur- und sozialpolitische Überlegungen sollten explizit benannt und nicht mit den Umweltzielen vermischt werden, weil sie sonst die Akzeptanz letzterer bei Unternehmen und Bürgern unterhöheln.

Die (finanziellen) Lasten, die sich aus der Umsetzung des Umweltzieles ergeben, sollten so verteilt werden, dass sich daraus keine Wettbewerbsnachteile für einzelne Marktteilnehmer ergeben. Eine Ausnahme bilden natürlich diejenigen Fälle, in denen die Verschiebung relativer Preise durch die Internalisierung von Umweltkosten in die Produktpreise zum unverzichtbaren Kern des Instruments gehört. So wird beispielsweise jede ernstzunehmende Klimapolitik die Nutzung von Kohle gegenüber Gas und Erdöl verteuern. Wenn aus sozial- und strukturpolitischen Erwägungen oder um die Abhängigkeit von Importen zu begrenzen, ein bestimmtes Niveau der Kohlenutzung von der Politik gewünscht ist, so muss dies bei der Ausgestaltung der Instrumente berücksichtigt werden.

Die zusätzlichen Kosten, die sich aus umweltpolitischen Massnahmen ergeben, sollten so gering wie irgend möglich gehalten werden, indem die Marktteilnehmer bei der Umsetzung des einmal definierten Umweltziels so viel Freiheit wie möglich erhalten und nicht einzelne Techniken oder Entwicklungspfade vorgegeben bekommen. Der Wettbewerb um die beste Lösung führt dann zu einer Senkung der Gesamtkosten für alle Marktteilnehmer.

Die Instrumente sollten so angelegt sein, dass sie den Betroffenen Planungssicherheit für Investitionen gewähren und gleichzeitig die Möglichkeit für ein (finanzielles) Risikomanagement eröffnen.

Die hier beschriebenen Anforderungen werden in hohem Masse erfüllt, wenn Umweltziele über *handelbare Umweltzertifikate* verfolgt werden. Derzeit werden drei Ausgestaltungen von Umweltzertifikaten diskutiert: der Handel mit *Emissionsrechten*, mit *Emissionsminderungen* und mit *grünen Zertifikaten*. Die beiden ersten Varianten werden im folgenden näher beschrieben.¹

3. Emissionshandel

3.1 Handel mit Emissionslizenzen

Umwelt-Ökonomen favorisieren schon seit langem den Emissionshandel als Instrument, um Umweltziele in liberalisierten Märkten umzusetzen. Der Emissionshandel selbst reduziert allerdings keine Emissionen. Er führt aber dazu, dass ökonomische Anreize geschaffen werden, in die Minderung von Emissionen zu investieren, und zwar genau dort, wo die grössten Minderungen pro eingesetztem Euro zu erzielen sind.

Ausgangspunkt jedes Emissionshandelsmodells ist der zeitliche Pfad für die Rückführung der absoluten Emissionen des betroffenen Schadstoffes. Das heißt, es muss festgelegt werden,

¹ Zum Handel mit grünen Zertifikaten vgl. H.-M. Groscurth, H. Beeck, S. Zisler: Erneuerbare Energien im liberalisierten Markt. Elektrizitätswirtschaft 24/2000, S. 26-32.

welche absolute Menge eines Schadstoffes in jedem Jahr emittiert werden darf. In der Regel werden dabei Minderungsraten bezogen auf ein Basisjahr angegeben. Im Rahmen des Kyoto-Protokolls wurde beispielsweise festgelegt, dass die Emissionen von Treibhausgasen² weltweit um 5%, EU-weit um 8% und in Deutschland um 21% reduziert werden müssen. Für die zulässigen Emissionen werden dann handelbare *Emissionslizenzen* ausgegeben.

Wenn an dieser Stelle eingewandt wird, dass absolute Emissionsobergrenzen die Entwicklungsmöglichkeiten einzelner Unternehmen in nicht akzeptabler Weise begrenzen, dann sei auf zwei Dinge hingewiesen. Erstens werden höhere Emissionen einzelner Unternehmen nicht grundsätzlich untersagt, sondern lediglich mit einem Preis versehen. Jede Klimaschutzgesetzgebung wird letztlich den Emittenten oder den Käufern ihrer Produkte einen Preis abverlangen. Emissionshandel dient dazu, diesen Preis möglichst gering zu halten. Zweitens hat Deutschland als prominenter Befürworter des Kyoto-Protokolls bereits eine Obergrenze seiner Treibhausgasemissionen akzeptiert. Es ist unwahrscheinlich, dass es einzelnen Akteuren in der Gesellschaft auf Dauer gestattet werden wird, ihre absoluten Emissionen beliebig zu erhöhen und damit andere Sektoren zu verstärkten Anstrengungen zu nötigen.

Es ist nicht zwingend, dass die international vereinbarten Minderungen direkt auf die an einem Handel Beteiligten herunter gebrochen werden. Die unterschiedlichen Ziele für die Unterzeichnerstaaten des Kyoto-Protokolls und das sogenannte „Burden-sharing“ in der EU zeigen dies bereits. Hier wurden ganz unterschiedliche Minderungsziele (z.T. sogar Steigerungsraten) für die einzelnen Ländern vereinbart. Wenn die unterschiedlichen Ziele der Mitgliedsländer ungefiltert an deren Unternehmen weitergegeben würden, dann könnte dies zu erheblichen Wettbewerbsverzerrungen führen. Dieses Problem muss bei der konkreten Ausgestaltung eines Handelsmodells berücksichtigt werden. Es würde aber an dieser Stelle zu weit führen, hierauf näher einzugehen.

Eine *Emissionslizenz* steht für das Recht, eine bestimmte Menge eines Schadstoffes in einem bestimmten Zeitraum (z.B. 1 t CO₂/a) in die Atmosphäre entlassen zu dürfen. Akteure beim Handel mit Emissionslizenzen sind in der Regel die Emittenten, also diejenigen Personen und Unternehmen, die Prozesse betreiben, bei denen Emissionen freigesetzt werden. Jeder, der einen emittierenden Prozeß betreibt, muss die seinen Emissionen entsprechende Anzahl von Emissionslizenzen besitzen und entwerfen.

Das Kyoto-Protokoll ist eine internationale Vereinbarung zwischen Staaten und befasst sich daher zunächst auch nur mit dem Emissionshandel zwischen Staaten. Emissionshandel macht jedoch erst dann richtig Sinn, wenn diejenigen beteiligt werden, die unmittelbar für die Emissionen verantwortlich sind und diese auch direkt beeinflussen können. Dies trifft vor allem auf Unternehmen, aber auch auf private Haushalte und Verkehrsteilnehmer zu.

² Gemessen in *Kohlendioxid-Äquivalenten*, worunter man das nach Klimawirksamkeit gewichtete Mittel der Emissionen von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), N₂O, HFCs, PFC und SF₆ versteht.

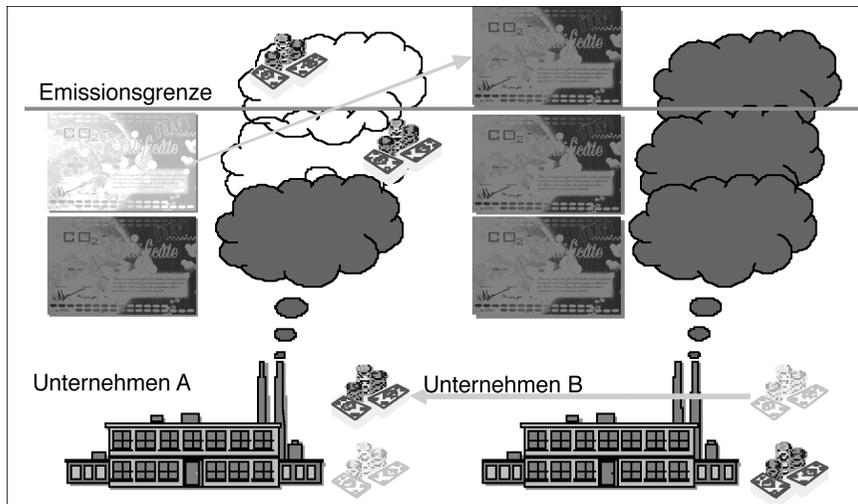


Abb. 1: Emissionshandel am Beispiel zweier Unternehmen

Die Wirkungsweise des Emissionshandels sei an einem Beispiel erläutert (vgl. Abb. 1). Betrachtet werden der Einfachheit halber nur zwei Unternehmen. Beide sollen drei Einheiten eines globalen Schadstoffes emittieren. Das Reduzierungsziel im Beispiel betrage 33%. Ohne Emissionshandel müssten beide Unternehmen ihre Emissionen um diesen Prozentsatz reduzieren. Wir nehmen an, dass Unternehmen A einen älteren Anlagenpark habe, bei dem die geforderte Emissionsminderung mit moderaten Investitionen erzielt werden kann, so dass die Kosten 10 €/t betragen. Unternehmen B habe erst kürzlich neue, emissionsarme Anlagen installiert, so dass weitere Reduzierungen technisch aufwendig seien und somit 20 €/t kosten würden. In dieser Situation würde Unternehmen B zu recht beklagen, im Wettbewerb mit dem Konkurrenten A benachteiligt zu sein.

Um einen Emissionshandel zwischen den Unternehmen zu ermöglichen, muss der Gesetzgeber zunächst für die weiterhin zulässigen Emissionen sogenannte *Emissionslizenzen* ausgeben. Dazu werden derzeit zwei grundsätzliche Varianten diskutiert. Eine Möglichkeit besteht darin, die Lizenzen zu versteigern. Dies würde dazu führen, dass alle Beteiligten die gleichen Kosten für ihre Emissionen tragen müssten und dass auch Neueinsteiger sich am Markt eindecken könnten. Andererseits würde dies für Altemittenten möglicherweise innerhalb von kurzer Zeit zu erheblichen zusätzlichen Kostenbelastungen führen, die bei der Planungen und Erstellung der Anlagen nicht absehbar waren und daher auch unzumutbar sein könnten. Deshalb wurde in der Praxis bisher meist auf das sogenannte „Grandfathering“ zurückgegriffen, bei dem Emissionslizenzen auf der Basis eines Stichtages kostenlos an Alt-Emittenten ausgegeben werden. Für neue Marktteilnehmer müssen dann Ausnahmeregelungen getroffen werden. Die EU-Kommission hat bereits darauf hingewiesen, dass ein solches Vorgehen den

Tatbestand der (unzulässigen) Staatsbeihilfe erfüllen könnte. Es ist daher denkbar, dass man in der Praxis zu einer Mischform beider Konzepte oder dem schrittweisen Übergang von „Grandfathering“ zur Versteigerung kommen wird. Im Falle einer Versteigerung muss auch überlegt werden, ob die Einnahmen bei Staat verbleiben oder in geeigneter Weise an die am Handel Beteiligten zurückerstattet werden sollen.

Im Beispiel sollen beide Unternehmen jeweils zwei Emissionslizenzen kostenlos erhalten haben. Wenn Unternehmen A nunmehr seine Emissionen um zwei Einheiten vermindert – was weiter für 10 €/t möglich sein soll –, dann verfügt es über eine überzählige Emissionslizenz. Diese kann A an Unternehmen B verkaufen, das dann über die drei Lizenzen verfügt, die es für seine Emissionen benötigt. Als Ergebnis dieser Transaktion lassen sich drei Dinge festhalten:

- Erstens: das Umweltziel ist erreicht worden. Die Emissionen der beiden Unternehmen zusammen sind um ein Drittel vermindert worden. Es ist wichtig festzuhalten, dass ein funktionierendes Emissionshandelssystem – im Gegensatz zu einer Umweltsteuer – die Einhaltung des Umweltzieles garantiert. Es unterscheidet sich darin auch vom viel zitierten Ablasshandel, bei dem die Menge der insgesamt zulässigen Sünden eben nicht begrenzt war.
- Zweitens: Die Gesamtkosten sind mit zweimal 10 €/t deutlich geringer als im Referenzfall, in dem einmal 10 und einmal 20 €/t bezahlt werden mussten.
- Drittens: Beide Unternehmen haben die gleichen Kosten von 10 €/t für eine Emissionseinheit zu tragen und werden somit in ihrem Wettbewerb nicht behindert.

Um einen Handel mit Emissionslizenzen zu starten, muss von Anfang an ein staatliches System installiert sein und es muss eine ausreichende Zahl von Teilnehmern geben. Weil dies derzeit noch nicht der Fall ist, versuchen immer mehr Unternehmen, über den Handel mit *zertifizierten Emissionsminderungen* Erfahrungen mit dem neuen Instrument „Emissionshandel“ zu gewinnen.

3.2 Handel mit Emissionsminderungen

Eine *zertifizierte Emissionsminderung* ist die von unabhängiger Seite verifizierte Reduzierung von Schadstoffemissionen gegenüber einem Referenzfall (engl. baseline). Diese Emissionsminderung wird auf einem Zertifikat bestätigt, das dann gehandelt werden kann.

In unserem Beispiel würde Unternehmen A an B nicht das Recht zur Emission einer weiteren Einheit des Schadstoffes verkaufen, sondern ein Minderungszertifikate, das B dann ebenfalls nutzen kann, um seine überzählige Emissionen zu kompensieren (vgl. Abb. 2). Die Einhaltung des Umweltzieles ist in gleicher Weise wie im ersten Beispiel gewährleistet, lediglich der Gegenstand des Handels ändert sich.

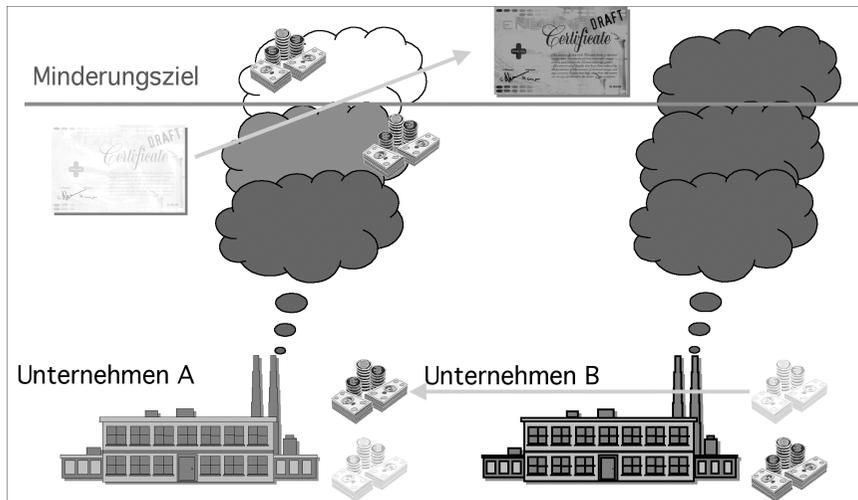


Abb. 2: Emissionsminderungshandel zwischen zwei Unternehmen

Damit ein Anreiz zur Produktion solcher Minderungszertifikate besteht, muss es Käufer dafür geben. Derzeit gibt es bereits eine begrenzte Zahl von Akteuren, die aus unterschiedlichen Gründen bereit sind, solche Zertifikate zu kaufen. Entweder wollen sie auf diese Weise ihr Umweltengagement unterstreichen oder sie wollen Erfahrungen mit dem Emissionshandel sammeln. Damit die zur Einhaltung des Minderungsziels erforderliche Zahl von Zertifikaten produziert wird, muss jedoch eine Abnahmepflicht geschaffen werden.

Die im Kyoto-Protokoll vorgesehenen flexiblen Mechanismen *Joint Implementation (JI)*³ und *Clean Development Mechanism (CDM)*⁴ beruhen auf dem Prinzip des Emissionsminderungshandels, während das dritte Instrument, *Emissions Trading*⁵, einen Handel mit Emissionslizenzen auf Staatenebene vorsieht.

3.3 Erste Erfahrungen in der Praxis

Der CO₂-Pilothandel zwischen HEW und dem kanadischen Energieunternehmen TransAlta ist ein Beispiel für einen Handel mit Emissionsminderungen auf freiwilliger Basis (vgl. Abb. 3).

³ Handel mit Emissionsminderungen („Emission reduction units - ERU“) zwischen Staaten mit Minderungsverpflichtungen (Annex B-Staaten).

⁴ Handel mit Emissionsminderungen („Certified emission reductions - CER“) zwischen Staaten mit und ohne Minderungsverpflichtung (Annex B- bzw. Nicht-Annex B-Staaten).

⁵ Emissionshandel auf der Basis von „Assigned amount units - AAU“) zwischen Annex B-Staaten.

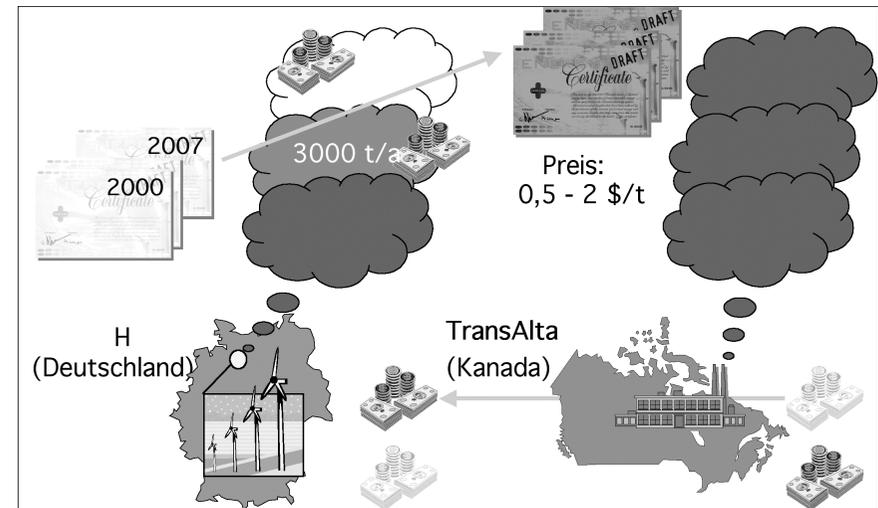


Abb. 3: Der Pilothandel zwischen HEW und TransAlta.

HEW hat Emissionsminderungen in Höhe von 3000 t/a, die durch den Einsatz von Windkraftanlagen in Hamburg erzielt werden, für den Zeitraum von 2000 bis 2007 an TransAlta verkauft. Die Emissionsminderung ergibt sich durch die Verdrängung von Strom aus Kohlekraftwerken der HEW. Über den Preis dieser Transaktion wurde Stillschweigen vereinbart. Auf Nachfrage würde ein Broker jedoch derzeit eine Preisspanne von 0,5 bis 2 \$/t CO₂ nennen. Die Emissionsminderungen werden jährlich von unabhängigen Gutachtern verifiziert.

Um die CO₂-Minderungen zu errechnen, muss die tatsächlich eingetretene Situation mit Windkraftanlagen mit einem Referenzfall ohne Windkraftanlagen verglichen werden. Es ist nicht selbstverständlich, dass die Stromerzeugung in Kohlekraftwerken der HEW diesen Vergleichsfall für die Berechnung der Emissionsminderung bildet. Es wäre möglich, dass eine Stromproduktion aus erneuerbaren Energien nicht dazu führt, dass andere Kraftwerke zurückgefahren werden, sondern dass der zusätzliche Strom am Markt verkauft wird und damit anderswo im europäischen Verbund Kraftwerksleistung verdrängt. Die derzeitige Datenlage erlaubt es jedoch nicht, dies nachzuvollziehen. Zudem war es der Wunsch von TransAlta, den HEW-Kraftwerkspark als Referenzfall heranzuziehen.

Unter dieser Voraussetzung ist es plausibel, dass Kohlekraftwerke eher zurückgefahren werden als Kernkraftwerke, weil letztere die niedrigeren Betriebskosten haben und aufwendiger zu regeln sind. Jedoch ist auch zu beachten, dass es sich bei den Kohlekraftwerken um Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen handelt, die zeitweise wärmegeführt gefahren werden. Weiterhin sind der Einsatz von Spitzenlastkraftwerken, die vertragliche Situation beim Bezug von

Brennstoffen und ggf. gesonderte Stromabnahmeverträge einzelner Kraftwerke zu berücksichtigen. Die Berechnung der CO₂-Minderung für diesen Einzelfall hat gezeigt, wie hoch der Aufwand und die verbleibenden Unsicherheiten sind. Beides wäre zu vermeiden, wenn in einem künftig Handelssystem Emissionslizenzen anstelle von –minderungen gehandelt würden.

Häufig wird auch die Frage gestellt, ob HEW hier nicht einen Umweltnutzen verkauft hat, der aufgrund gesetzlicher Bestimmungen erzielt wird und daher den Kunden der HEW zuzurechnen ist. Die fraglichen Windkraftanlagen werden in der Tat über das „Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG)“ mit 17,8 Pf/kWh gefördert. Darüber hinaus zahlt HEW jedoch eine zusätzliche, freiwillige Einspeisevergütung von 10 Pf/kWh. In Absprache mit den unabhängigen Gutachtern werden die Emissionsminderungen deshalb im Verhältnis der Einspeisevergütungen aufgeteilt. Somit entfallen $[10 / (10+17,8)] = 36\%$ der erzielten CO₂-Minderungen der betreffenden Windkraftanlagen auf HEW.

Der Handelspartner, TransAlta, ist ein umweltbewusstes Unternehmen, das es sich zum Ziel gesetzt hat, seine Treibhausgasemissionen bis 2024 auf Null zu reduzieren (vgl. www.transalta.com). Dies soll allerdings nicht allein durch Effizienzsteigerungen und Brennstoffwechsel, sondern auch durch Emissionshandel erreicht werden. Für TransAlta war der Pilothehandel mit HEW einer der ersten Schritte in diese Richtung. TransAlta wird vermutlich keine Gegenleistungen von der kanadischen Regierung für die von HEW gekauften Emissionsminderungen erhalten. Die Motivation für den Abschluss dieses Geschäfts lag daher bei beiden Unternehmen zum einen in dem Interesse, Erfahrungen mit dem neuen Instrument des Emissionshandels zu gewinnen, zum anderen darin, die Diskussion über dieses Instrument in den jeweiligen Ländern voran zu bringen.

Der Preis für die Emissionsminderungen in diesem Pilothehandel spiegelt nicht die Vermeidungskosten wieder. Die Marktpreise beinhalten einen erheblichen Abschlag, da der Rechtsrahmen für derartige Geschäfte noch unsicher ist. Dennoch werden schon heute Transaktionen für die Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2008-2012) abgeschlossen. HEW und TransAlta sind allerdings mit ihrem Handel ausserhalb dieser Periode geblieben, da die Ausgestaltung der Kyoto-Mechanismen und die Haltung der in einem solchen Fall zu beteiligten Regierungen als derzeit noch zu unsicher eingestuft wurden.

Auf der Basis der hier gemachten Erfahrungen beteiligt sich HEW aktiv an der nationalen und internationalen Diskussion zum Emissionshandel.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass der Emissionshandel eine faszinierende Möglichkeit bietet, Umweltziele und die Liberalisierung der Energiemärkte in Einklang zu bringen.

WAS KÖNNEN WIR AUS DER ENTWICKLUNG DER WASSERMÜHLE IM FRÜHEN MITTELALTER ÜBER DIE ZUKUNFT DER ENERGIEVERSORGUNG LERNEN?

Thomas Hamacher

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching

1. Einleitung: Technologischer Wandel

Die nachfolgende Darstellung beruht zum Teil auf Vorträgen, die im Sommer 2000 in einer kleinen Konferenz über die Geschichte der Energie mit dem Titel "Das Feuer des Prometheus" im Teilinstitut des Max-Planck-Institutes für Plasmaphysik in Greifswald abgehalten wurde [prometheus].

Das Wechselspiel zwischen Mensch, Umwelt und Technologie prägt nicht erst seit der Industrialisierung das Bild des Planeten Erde nachhaltig. Der Mensch besass schon vor 40000 Jahren die Technologie, seine Umwelt zu verändern. Die Besiedlung Australiens durch den Menschen hat zum Beispiel die Flora des Kontinents nachweislich drastisch durch die Technik der Brandrodung verändert [pyne].

Im Zentrum dieser Betrachtungen soll aber vornehmlich die Entwicklung der Technik und die Frage, wie Mensch und Umwelt darauf Einfluss genommen haben, stehen. Vorab möchte ich eine Definition des Wortes Technik geben, da ,wie wir später sehen werden, Technik weit mehr umfasst als Bauteile aus Stahl und Glas:

"... Technik bezeichnet also nicht nur die vom Menschen gefertigten Gegenstände, sondern auch deren Entstehungs- und Verwendungszusammenhänge und die dafür erforderlichen besonderen Fertigkeiten. Technik ist in diesem Sinne kein isolierter, selbstständiger Bereich, sondern eng mit Wirtschaft, Gesellschaft, Politik und Kultur verflochten." [Brockhaus]

Worin liegt nun die besondere Bedeutung einer solchen Rückschau. Es soll der Versuch unternommen werden, Strukturen zu identifizieren, die es möglich machen, die Bedingungen zukünftiger Technologiewechsel besser zu verstehen und gegebenenfalls zu modellieren. Die Ökonomie tut sich bekanntlich von wenigen Ausnahmen abgesehen sehr schwer damit, Technik in ihre Modell aufzunehmen und neben Produktionsfaktoren wie Kapital und Arbeit zu stellen [Kümmel].

Ein Blick auf die Agenda dieser Tagung zeigt, dass hier um den Technologiewechsel gestritten wird. Die Begründung für den notwendigen Wechsel stellt die Problematik des Klimawandels dar; mögliche Techniken sind Brennstoffzelle, Spiegelsystem zur Warmwassererzeugung oder Kernfusion. Eine andere Verfahrensweise, die ich hier gleich auch als Technik bezeichnen möchte, ist die Einführung von Emissions-Handelsrechten. Sie ist natürlich ein

wirtschaftliches Lenkungsinstrument und überlässt die Wahl der Primärenergie und Wandlungstechniken dem Markt.

Nach einer kurzen Einführung, in der mit wenigen Worten noch einmal die gesamte Menschheitsgeschichte im Schnelldurchlauf vorbeiziehen wird, werden zwei bedeutende Energietechnologien in ihrer Entstehung und Ausbreitung beleuchtet: zuerst die Wasserkraft, die bis heute eine Stütze der Energieversorgung, aber insbesondere der Stromversorgung ist, und die Elektrifizierung, die heute mit ihren langen Armen auch ins letzte Kinderzimmer – in der industrialisierten Welt – reicht.

2. Blick in die Vergangenheit: ein erster Überblick über die Geschichte der Energie

Als erste Energiequelle außerhalb seiner eigenen Arbeitskraft hat der Mensch das Feuer genutzt. Wie der Mensch zum Feuer gekommen ist, können wir leider nur sehr unvollkommen rekonstruieren [Kaiser]. Es gibt nur wenige archäologischen Funde, die nur begrenzte Schlüsse zulassen. Die Wiege der Menschheit liegt in Afrika und hier finden sich auch die ersten Beweise für die Nutzung des Feuers durch den Menschen. Vor etwa 1.8 Mio. Jahren haben Hominiden – genauer Homo ergaster – in den Höhlen von Swartkrans im südlichen Afrika Feuer genutzt. An Knochenüberresten konnten Feuerspuren nachgewiesen werden, die kaum von einem Steppen- oder Waldbrand herrühren konnten. Wahrscheinlich hatten die Hominiden zu diesem Zeitpunkt noch keine Technik, um Feuer zu machen, sie waren auf Brände angewiesen, die aber in den afrikanischen Savannen- und Steppenlandschaften keine Seltenheit sind. Regelmässig kommt es nach Gewittern zu Bränden. Sicherlich war eine erste Aufgabe des Feuers die Verteidigung gegen wilde Tiere – vor allem Hyänen – die insbesondere in der Mittagszeit wie die Hominiden Höhlen aufsuchten, um Schutz vor der Hitze und der Fliegenplage zu erlangen. Die Nutzung des Feuers zur Nahrungsmittelbereitung ist erst vor 500 000 Jahren belegt. Quasi zeitgleich mit der ersten nachgewiesenen Nutzung des Feuers durch Hominiden kommt es zu Auswanderungswellen der Hominiden aus Afrika. Die Vermutung liegt nahe, dass der Mensch durch die Nutzung des Feuers eine ganz neue Unabhängigkeit von seinen natürlichen Feinden und vom Klima gewonnen hat. Zudem konnte er seine Ernährung auf eine breitere Grundlage stellen, da er jetzt rohes Fleisch braten konnte und es dadurch auch für den Mensch mit dem "schwachen" Essapparat geniessbar wurde. Trotzdem konnte diese Spekulation bis heute nicht eindeutig belegt werden.

In der Antike kennt der Mensch schon eine Reihe von Energiequellen: Biomasse, Tiere, Wind für Segelboote, Geothermie in Form von warmen Quellen, Wasserkraft (siehe weiter unten) und Öl. Trotzdem war die zentrale Energiequelle nach wie vor die menschliche Arbeitskraft.

Die Antike brachte dem Menschen auch die Fortschrittsdebatte – auch wenn dies natürlich eine nachträgliche Deutung ist. Aufgehängt hat sich diese Debatte nicht zuletzt an der Figur

des Titanen Prometheus. Dieser zeichnete letztlich dafür verantwortlich, dass der Mensch Feuer machen konnte. Schon die Antike kannte Verächter und Freunde des Feuers.

Freunde des Prometheus waren Aischylos und Platon. In den Texten dieser Autoren wird der Mensch ohne Technik als nackt (ohne Fell) und hilflos (ohne Klauen) dargestellt. Erst durch Technik (Nahrungsbereitung, Kleidung, Feuernutzung) schafft der Mensch sich eine angenehme Lebensgrundlage. (Hier sei angemerkt, dass die Entwicklungsgeschichte des Menschen diese These unterstützt; der Mensch, von den Bäumen auf den Boden gekommen, sah sich vielen übermächtigen Feinden ausgesetzt: die Beherrschung des Feuers bot hier einen einmaligen Schutz und hat wahrscheinlich erst das langfristige Überleben der Gattung Mensch ermöglicht).

Einer der prominentesten Verächter war der antike Kyniker Diogenes¹. Er hielt den Befürwortern entgegen, dass die ersten Menschen auch ohne Technik ausgekommen wären und nur die Verweichlichung den Einsatz der Technik heute herausfordere, bzw. fördere. Die Nachfolger des Diogenes tragen heute zum Teil massgeschneiderte Anzüge und ziehen Stuttgarter Automobile der Tonne vor.

Das Mittelalter führt dann zur massiven Verbreitung der Wasserkraft. Erst als Getreidemühle, dann, nach Entdeckung der Nockenwelle, in Schmieden usw. Auch im Mittelalter verbreitete sich die Windmühle, aber in keiner Weise so diversifiziert wie die Wassermühle. Zentrale Aufgaben waren das Mahlen des Getreides und das Schöpfen von Wasser. Letzteres war eine der Schlüsseltechnologien bei der Besiedlung Hollands [Kaijser]. Beide Technologien sind dabei stark an geographische Gegebenheiten gebunden. Die Windmühle entwickelte sich insbesondere mit der Blüte der Flämischen und Holländischen Hafenstädte, die keinen Zugang zur Wasserkraft hatten.

Die Grundlagen für die Dampfmaschine wurden im achtzehnten und die der Elektrifizierung im neunzehnten Jahrhundert gelegt. Verständnis von Mechanik, Thermodynamik und Elektrodynamik entwickelt sich zwar im gleichen Zeitraum, stand den Erfindern aber nicht immer zur Verfügung. Im zwanzigsten Jahrhundert traten dann Kernkraft und Photovoltaik als neue Techniken hinzu.

Zwei technische Veränderungen sollen im Detail besprochen werden, die Verbreitung der Wassermühle und die Elektrifizierung.

¹ Diogenes von Sinope, genannt der Kyniker, geboren um 400, gestorben zwischen 328 und 323 v.u.Z. Der Diogenes in der Tonne, der Alexander den Großen aufforderte, ihm aus der Sonne zu gehen, als dieser ihm anbot, ihm einen Wunsch zu erfüllen. Er kritisierte in seinem provokatorisch einfachen und asketischen Leben unreflektierte Bedürfnisbefriedigung und, unvernünftige Konventionen und gesellschaftliche Zwänge.

3. Die Wassermühle

Die Anfänge der Wassermühle liegen wahrscheinlich in Kleinasien. Die erste heute bekannte Beschreibung findet sich bei Vitruv (10,5,2) [Hägermann, 1997]:

Nach demselben Prinzip werden auch Wassermühlen getrieben, bei denen sonst alles ebenso ist, nur ist an dem einen Ende der Achse ein Zahnrad angebracht. Dies ist senkrecht auf die hohe Kante gestellt und dreht sich gleichmässig mit dem Rad in derselben Richtung. Anschliessend an dieses ist ein grösseres horizontal angebracht, das in jenes eingreift. So erzwingen die Zähne jenes Zahnrades, das an der Achse angebracht ist, dadurch, dass sie die Zähne des horizontalen Zahnrades in Bewegung setzen, eine Umdrehung der Mühlsteine. Bei dieser Machina führt ein Trichter, der darüber hängt, das Getreide zu, und durch dieselbe Umdrehung wird das Mehl erzeugt.

Wenn auch die in der älteren Literatur vertretene Annahme, dass die Wassermühle in der Antike gar keine Verbreitung gefunden, heute als nicht mehr haltbar gilt, zahlreiche Quellen und auch archäologische Funde beweisen das Gegenteil (wie die Mühlen in Barbegal in Südfrankreich), so bleibt doch festzuhalten, dass ihre Verbreitung im Vergleich zum Frühmittelalter klein war [Hägermann, 1997; Hägermann, 2001]. Seit Mitte des 7. Jahrhunderts lässt sich eine deutlich Zunahme der Mühlen nachweisen. Dieser Umstand hat schon früh zu Spekulationen geführt. Laut Karl Marx hat das Übermass an billigen Arbeitskräften in der römischen Sklavengesellschaft die frühe Verbreitung der Technik verhindert.

Wie kam es nun zur Verbreitung der Wassermühle im Frühmittelalter und wie konnte diese "elegante" Technik so an den Bedürfnissen der Antike vorbeigehen. Die Antwort lässt sich mit einem Bild aus der Biologie umschreiben. Bestimmte Tiere und Pflanzen können nur in einem bestimmten "Öko-System" bestehen. Genauso ist es mit verschiedenen Technologien. Der Übergang von der antiken, mediterranen Welt in die mittelalterliche, fränkische Welt stellt einen solchen Wechsel des "Öko-Systems" dar.

Die beiden Welten unterschieden sich in vieler Hinsicht. Zunächst einmal siedelten die Franken als ehemalige Viehzüchter in der Nähe von Flüssen, während die römische Villa vornehmlich auf Hügeln ohne direkten Zugang zu fliessenden Gewässern errichtet wurde. Hinzu kam eine deutliche Ausweitung des Getreideanbaus als Antwort auf die zunehmende demographische Kurve, sowie ein Wandel in der Technik der Landwirtschaft hin zu Pflügen, die von Ochsen gezogenen wurden. Als Folge nahm die Bedeutung des Getreides zu und damit wurden mehr Mühlen gebraucht. Eine weitere wichtige Veränderung war die Ausweitung des Lehnswesens mit ausgedehnten Herrengütern, umgeben von kleinen Höfen der Hörigen. Die Grundherrschaft verfügte über die Wasserrechte. Die Grundherrschaft verfügte über das nötige Kapital zum Bau von Wassermühlen und über die notwendigen "Genehmigungsrechte". Im Zentrum vieler Grundherrschaften lag oft ein Kloster. Die Verbindungen zwischen den Klöstern der einzelnen Orden führte zu einer raschen Verbreitung der Technik.

Es sind also eine Vielzahl von Veränderungen, die der Wassermühle die Möglichkeit zur Verbreitung bot. Wirtschaftsform, Siedlungsform, Ernährungsgewohnheiten usw.

Die Bedeutung der Wassermühle wuchs schnell über das reine Getreidemahlen hinaus. Durch die Verbindung des Wasserrades mit einer Nockenwelle bot sich die Möglichkeit auch auf und ab Bewegungen, wie z.B. beim Schmieden notwendig, durch ein Wasserrad anzutreiben. Die Wassermühle wurde zum nicht weg zu denkenden Kern der späteren industriellen Entwicklung. Manche Dampfmaschine pumpte anfangs nur Wasser für ein Wasserrad hoch, das dann die eigentlichen Maschinen antrieb.

Die Dampfmaschine ist das unbestrittene Symbol der industriellen Revolution. Sie war aber nicht der Auslöser dieser Revolution, sondern eine erste Folge. Eine sich drehende Dampfmaschine führt zu keiner Revolution.

5. Die Elektrifizierung

Die Bedeutung der Elektrifizierung für die modernen Volkswirtschaften lässt sich wahrscheinlich kaum unterschätzen. Als einfache Illustration soll ein Vergleich zwischen Wirtschaftswachstum und Wachstum der Stromnachfrage gezogen werden. Abbildung 1 zeigt diese Entwicklungen für Westeuropa und Indien. In Westeuropa geht Wirtschaftswachstum und Wachstum der Stromnachfrage Hand in Hand. In Indien wächst die Stromnachfrage sogar noch stärker als die Wirtschaft.

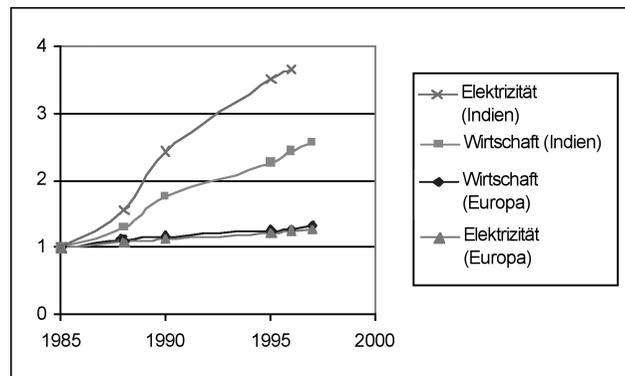


Abbildung 1: Die Entwicklung der Stromnachfrage und des Wirtschaftswachstums für Europa und Indien [EU].

Das Wort Elektrizität ist von dem griechischen Wort für Bernstein "Elektron" abgeleitet. Schon sechshundert Jahre vor Christus kannten die Griechen das Phänomen der Aufladung eines Nichtleiters durch Reibung. Die physikalischen Grundlagen der Elektrizitätsversorgung

wurden dann im achtzehnten und neunzehnten Jahrhundert gelegt. Meilensteine dürften die Entdeckung von Gray, dass Metalle Strom leiten, von Oersted, dass von Strom durchflossene Leiter ein Magnetfeld um sich aufbauen und insbesondere die Arbeiten von Faraday zur Induktion gewesen sein.

Damit waren die Grundlagen zum Bau von Stromgeneratoren gelegt. Generatoren waren zuerst noch kompliziert und fanden nur in Nischen eine Anwendung: Strom für Leuchtturmlampen, Strom in galvanischen Prozessen, Strom für therapeutische Zwecke. Generatoren waren teuer, weil sie entweder einen teuren Permanentmagneten oder einen zweiten Stromanschluss zum Betrieb eines Elektromagneten brauchten [König].

Der Durchbruch zu einer wirtschaftlichen Stromerzeugung gelang 1866 Werner von Siemens. Mit der Entdeckung des "Dynamoelektrischen Prinzips" machte er es möglich, dass in Generatoren auf die teuren Permanentmagnete oder auf eine zusätzliche Stromversorgung für Elektromagnete verzichtet werden konnte.

Es war aber nicht Siemens, der den Anstoß zur grossflächigen Stromversorgung gab, sondern der Amerikaner Thomas Alva Edison [Hughes]. Ihn verbinden wir natürlich insbesondere mit der Entdeckung der Glühbirne, bei denen die Form der Gewinde bis heute auf Edison zurückgeht. Aber Edison war nicht so sehr nur eine Erfinder von einer Komponente, sondern hat ganze Systeme erfunden. Er hat also nicht nur die Glühbirne, sondern auch die Halterung, die Schalter und das gesamte System der Stromversorgung, bis hin zu Stromzählern durchdacht. Mit der Glühbirne war also das Gegenstück zum Generator erfunden. Und beide zusammen ergaben ein neues System der Beleuchtung. Aber selbst die Erfindung der Glühbirne setzte neue Massstäbe. Die Idee der Glühbirne stammte dabei gar nicht von Edison, nur war es vor Edison niemanden gelungen, ein geeignetes Material für die Glühwendel mit hinreichender Lebensdauer und ausreichender Leuchtkraft – sprich Temperatur – zu entwickeln. Edison liess sechstausend verschiedene Materialien untersuchen, bis er in verkohlten Bambusfäden das geeignete Material gefunden hatte. Mit Recht darf man in dieser Untersuchung die Anfänge der systematischen, grossflächigen, industriellen Produktforschung sehen.

Nun kommen wir aber wieder zu unserem eigentlichen Thema, nämlich dem Wandel von Technologie. Im beginnenden neunzehnten Jahrhundert hatte sich – zumindest in großen Städten – die Versorgung der Gebäude mit Stadtgas durchgesetzt. Es gab also schon eine ausgereifte Beleuchtungstechnik. Stadtgas wurde durch trockene Destillation aus Kohle gewonnen. Während diese Technik erst nur in einzelnen Fabriken, insbesondere in der Textilindustrie, mit gesonderten Anlagen Einsatz fand, setzte sie sich in den zwanziger Jahren des neunzehnten Jahrhunderts in vielen Großstädten als flächendeckende Versorgung mit zentralen Produktionsstätten und weitmaschigem Leitungsnetz durch. Diese Entwicklung wurde auch zu dieser Zeit schon von Sicherheits- und Umweltdiskussionen begleitet. Schließlich kam es zu Explosionen und Bränden in den Anlagen und die Rückstände der Stadtgasproduktion un-

ter anderem Teer wurden einfach in die Gewässer geschüttet. Letzteres Problem löste sich als weitere Verwendungen des Teers in der Industrie gefunden wurden.

Warum und wie sollte sich die neue, aus Strom und Glühbirne bestehende, Beleuchtungstechnik durchsetzen. Sicherlich bot das elektrische Licht Vorteile: es entstanden keine Verbrennungsprodukte in den Räumen, die Wärmeentwicklung war moderater, man konnte das Licht mit einem Schalter an oder ausschalten. Aber – und dies schien einer raschen Ausbreitung entgegen zu stehen – die Kosten waren deutlich höher. Insgesamt hat die Entwicklung, wie am Beispiel Berlin (Abbildung 2) weiter unten gezeigt wird, eben deshalb mehr als fünfzig Jahre gedauert. Erst dann waren fast alle Haushalte an die Stromversorgung angeschlossen. Global ist die Elektrifizierung auch heute noch lange nicht abgeschlossen. Ein Blick auf die Kundenstruktur im Jahre 1886 zeigt, wer zuerst Strom nachfragte: je ein Viertel nahmen Theater, Banken, Geschäfte und die Gruppe der Gaststätten, Hotels usw. ab. Neben den sachlichen Vorteilen des elektrischen Lichtes spielt also insbesondere das Prestige eine Rolle. Lern- und Skaleneffekte führten letztlich zu Kostenreduktionen und damit zu einer Verstärkung des Wachstums. Auch die Entwicklung des Stadtgases wurde zuerst in den reichen Vierteln der Städte vorangetrieben, auch hier war die Verbindung mit Luxus und Prestige nicht unbedeutend.

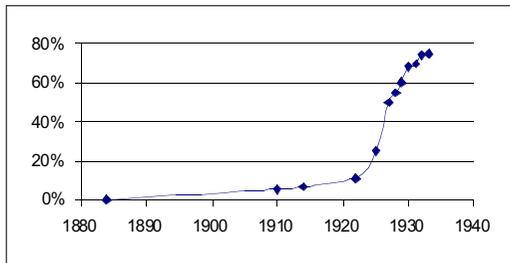


Abbildung 2: Anteil der Berliner Haushalte mit Stromanschluß [König]

Das erste Elektrizitätswerk wurde von Edison 1882 in New York gebaut und betrieben. Von dort verbreitete sich die Technik im Lande und auch in die Welt. Berlin und Chicago waren bei der weiteren Entwicklung Vorreiter. Die ungünstige Laststruktur der Elektrizitätswerke in den Anfangsjahren – Spitzenlast in den Abendstunden – führte zu einer forcierten Diversifikation der Kunden. Neben die Beleuchtung traten bald auch stationärer Elektromotoren und Straßenbahnen. Bereiche, die bald mehr Bedeutung als die Beleuchtung hatten. Hinzu kam die Ausweitung der Hausgeräte mit elektrischem Antrieb.

Bevor sich die Elektrizitätsgesellschaften in der Form konsolidierten, wie wir sie auch heute zum Teil noch vorfinden, gab es am Ende des neunzehnten Jahrhunderts eine sogenannte "Schlacht der Systeme". Hierbei handelte es sich die um Frage, ob Gleich- oder Wechselstrom Anwendung finden sollte. Gleichstrom mit Spannungen um hundert Volt konnte nicht über

weite Strecken transportiert werden. Hochgespannter Wechselstrom bot sich als Alternative an. Die etablierten Kräfte – auch Edison – setzten auf den Gleichstrom, unterlagen aber letztlich den Systemvorteilen des Wechselstroms.

6. Ausblick: Technik in einer bestimmten Umwelt

Wichtig für den Wechsel der Technologie ist die Veränderung der Rahmenbedingungen und das Entstehen einer "Nachfrage" nach dem neuen Produkt oder der neuen Technologie. Bei der Wassermühle wurde die Verbreitung durch einen Wechsel des Systems ermöglicht, die Elektrifizierung wurde von der "Nachfrage" nach sauberem und "luxuriösen" Licht vorangetrieben.

Die hier gemachten Ausführungen können natürlich nicht mehr als ein erstes Schlaglicht auf die spannende Geschichte der Energie werfen und dabei die Muster des technologischen Wandels diskutieren. Die Ausführung soll aber insbesondere dafür werben, die Geschichte nicht achtlos zu ignorieren, sondern sie zu nutzen, um unsere Konzepte der Modellierung und Beschreibung des technischen Wandels zu hinterfragen.

Technik und Technikentwicklung lässt sich nur durch eine Analyse der gesamten Umwelt, einschließlich Ordnungsrahmens usw. bestimmen. Wir müssen sozusagen das Öko-System einer jeden Technik analysieren, wenn wir Aussagen über die weitere Verbreitung machen wollen. Bei der Bewertung und Entwicklung neuer Energiemodelle sollte vermehrt die Frage gestellt werden, ob die Modelle vergangene Entwicklungen beschreiben können. Streng wissenschaftstheoretisch ist damit noch kein hinreichender Beweis ihrer Gültigkeit erbracht, aber ein erster wichtiger Schritt dahin.

Literatur:

[prometheus] www.ipp.mpg.de/prometheus (ab Dezember 2001)

[Brockhaus] Der Brockhaus in fünfzehn Bänden, F.A. Brockhaus Gm.bH, Leipzig-Mannheim 1997

[pyne] Pyne, S. J., World Fire, The Culture of Fire on Earth, 1997 by the University of Washington Press

[Kümmel] Kümmel, R., Energie und Kreativität, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig, 1998

[Kaiser] Kaiser, T., Das Feuer und die Evolution des Menschen, in [prometheus]

[Kaijser] Kaijser, A., Technological Systems in the Natural World: Water and Windmills in the Netherlands, in Technological and Systemic Changes and Economic Theories, 1998, ISSN 0348-3991

[Hägermann,1997] Hägermann, in Propyläen Technik Geschichte, Propyläen Verlag, Berlin 1997

[Hägermann,2001] Hägermann, Einfluß der gesellschaftsform auf technologische Entwicklungen am Beispiel des Einsatzes der Wasserkraft im Frühmittelalter: Getreidemühle und Grundherrschaft, to be published in autumn 2001 in [prometheus]

[EU] Energy in Europe, 1999 - Annual Energy Review, European Communities, 2000

[Hughes] Hughes, T., Networks of Power, The John Hopkins University Press, Baltimore, 1983

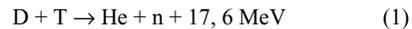
[König] König, in Propyläen Technik Geschichte, Propyläen Verlag, Berlin 1997

DIE ENTWICKLUNG VON STRUKTURMATERIALIEN FÜR DIE KERNFUSION

Karl Ehrlich

1. Einleitung

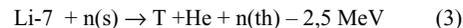
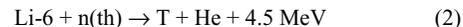
Die reale Möglichkeit der Energiegewinnung in einem Fusionsreaktor beruht auf der Verschmelzung der beiden Wasserstoffatome Deuterium und Tritium zu einem Heliumkern und einem Neutron, wobei nach der folgenden Reaktionsgleichung eine Energie von 17,6 MeV freigesetzt wird.



Die Reaktionsenergie verteilt sich entsprechend dem Impulserhalt im umgekehrten Verhältnis der Massen auf die Reaktionspartner He (3.5 MeV) und Neutron (14.1 MeV).

Während die kinetische Energie der Alphateilchen zur Deckung der Plasmaverluste genutzt wird, steht die Energie der hoch energetischen Neutronen (rund 80% der Reaktionsenergie) durch Thermalisierung und nachfolgende Energieumwandlung zur Gewinnung elektrischer Energie zur Verfügung.

Da das schwere Wasserstoffisotop Tritium nicht in der Natur vorkommt, muss es aus Lithium oder dessen geeigneten Verbindungen in einem das Plasma umgebenden Brutmantel oder Brutblanket „erbrütet“ werden. Dies ist mit Hilfe der Neutronen aus Gleichung (1) über die beiden folgenden Reaktionen möglich:



Sowohl für die Einfassung des Plasmas durch die sog. „Erste Wand“ als auch den Aufbau des anschliessenden Brutmantels sind Konstruktionswerkstoffe notwendig, die in besonderem Maße durch die Plasmateilchen, die hochenergetischen Neutronen und elektromagnetische Strahlung belastet werden. Diese fusionspezifische Materialbelastung wird zunächst näher erörtert und die Möglichkeiten zur quantitativen Beschreibung angegeben. Daran schliesst sich die Diskussion über geeignete Auswahlkriterien und eine Darstellung des gegenwärtigen Wissensstandes über potentielle Werkstoffgruppen an. Schliesslich werden die Anforderungen, wie sie an einen Demonstrationsreaktor oder eine kommerzielle Anlagen zur Energieerzeugung zu stellen sind, näher präzisiert und abschliessend über die zur Zeit verfolgte Entwicklungsstrategie diskutiert.

2. Fusionspezifische Werkstoffbelastung in der ersten materiellen Wand

In Abb. 1 ist schematisch die Belastung der ersten materiellen Umfassung des Plasmas durch niederenergetische ($\leq 400 \text{ eV}$) neutrale und geladene Teilchen des Plasmas (D,T, He, e) und durch die Reaktionsprodukte von Gleichung (1), also hochenergetische Alphateilchen (3.5 MeV) und 14 MeV Neutronen dargestellt.

Niederenergetische Plasmateilchen haben eine geringe Eindringtiefe und belasten die Erste Wand thermisch sowie durch physikalische und chemische Sputterprozesse, die zu einer nennenswerten Erosion der Ersten Wand führen können. Durch Einführung sog. Divertoren werden diese Teilchenströme zum grössten Teil von der Ersten Wand abgelenkt und in entsprechenden Divertorkammern aus dem Plasma entfernt, so dass diese Prozesse unter stationären Betriebsbedingungen für diese Komponente relativ gut kontrolliert werden können. Anders sieht die Situation für die Divertoren sowie Limiter aus, die für hohe thermische Belastungen und Plasma-Wandwechselwirkungen auszulegen sind. Die dort auftretenden Implikationen und daraus abzuleitenden Auswahlkriterien für geeignete Werkstoffauswahl sind jedoch nicht Gegenstand dieses Artikels.

Alphateilchen aus Reaktion (1) werden in die oberflächennahen Grenzschichten der Ersten Wand implantiert und können neben geringfügiger Erosion durch die Bildung von heliumgefüllten Blasen die Ablösung dieser Grenzschichten durch sogenannte Blisterbildung bewirken. Bedeutsamer ist die thermische Belastung der ersten Wand durch die Alphateilchen. Sie beträgt abgeschätzt etwa 20% der Reaktionsenergie verteilt auf die Gesamtoberfläche und kann in der Grössenordnung von MW/m² liegen. Sie verursacht entsprechend hohe sekundäre Spannungen, deren vertretbare Höhe durch die thermisch-mechanischen Eigenschaften des ausgewählten Strukturmaterials begrenzt diskutiert.

Hochenergetische 14 MeV Neutronen aus der Reaktionsgleichung (1) haben eine grosse mittlere freie Weglänge in Konstruktionsmaterialien und dringen deshalb tief in die nachfolgenden Komponenten ein. Ihre Wechselwirkung mit Struktur- und Funktionsmaterialien erfolgt über elastische, beziehungsweise inelastische Prozesse mit den Gitteratomen unter Abgabe ihrer kinetischen Energie. Beide Prozesse führen zur Bildung von Einzeldefekten wie Leerstellen und Zwischengitteratomen, spontan gebildeten Defekt-clustern sowie durch Nachfolgereaktionen zu einer Reihe von Phänomenen, welche wichtige Eigenschaften von Werkstoffen wie Festigkeit, Duktilität, Dichte etc. nachhaltig verändern können und zu einer entsprechenden Begrenzung der Lebensdauer von Komponenten führen können. In Abb. 2 ist hierzu beispielhaft die mikrostrukturelle Veränderung eines Stahls durch Neutronenbestrahlung in einem Spaltungsreaktor mit einem „schnellen“, d. h. energiereichen Neutronenspektrum in Abhängigkeit von Bestrahlungstemperatur und Neutronendosis gezeigt. Typischerweise werden bei tiefen Temperaturen sog. Black-dot-Defekte, meist planare Defektcluster beobachtet. Im Bereich mittlerer Einsatztemperaturen treten gut beobachtbare dreidimensio-

nale Leerstellencluster – also Poren – und planare Cluster von Zwischengitteratomen auf. Bei höheren Temperaturen werden schliesslich Heliumblasen an Korngrenzen, an kohärenten Ausscheidungen aber auch in der Matrix gefunden. Die Bildung von solchen Heliumagglomeraten ist ein Beispiel für die besondere Bedeutung von inelastischen Reaktionen von Neutronen mit Gitteratomen, bei denen gasförmige Transmutationsprodukte wie Wasserstoff und Helium entstehen. Sie tragen erheblich zur Materialschädigung bei.

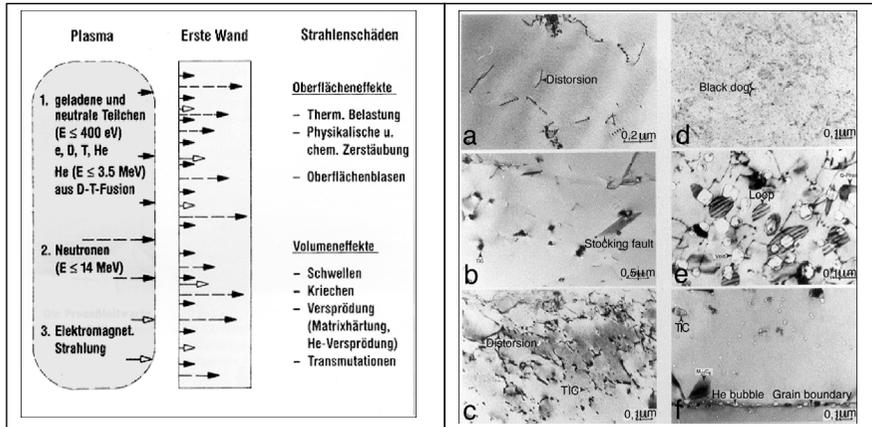


Abb. 1: Schematische Darstellung der Wechselwirkung von Plasmateilchen, elektromagnetischer Strahlung und Neutronen mit der "Ersten-Wand" und daraus resultierende Belastungen.

Abb. 2: Mikrostrukturelle Änderungen im austenitischen Stahl X10 CrNiMo 15 15 (W.-Nr. 1.4970) durch thermisch-mechanische Vorbehandlung und nach Bestrahlung mit Neutronen

- a) Lösungsgeglüht
 b) Lg + ausgelagert (1150°C/30'+800°C/23h)
 c) Lg + kaltverformt + a (1150°C/30'+15%kv +800°C/23h)
 d) 5 dpa bei 50°C
 e) 30 dpa bei 465°C
 f) 5 dpa bei 650°C

Der Entstehung von solchen für die Bestrahlung spezifischen Mikrostrukturen liegen sehr komplizierte physikalische Vorgänge zugrunde, die hier nicht erörtert werden können und ausserdem sehr spezifisch von dem verwendeten Material abhängen. Weiter unten werden jedoch deren Auswirkungen auf die makroskopischen Eigenschaften anhand einiger Beispiele erläutert werden.

Die unmittelbare Einwirkung bei Bestrahlung kann zunächst durch sogenannte **primäre Schädigungsparameter** wie die Zahl der Atomverlagerungen pro Gitteratom und Sekunde in dpa s⁻¹ (displacements per atom per second) sowie durch die Erzeugungsraten von wichtigen

Transmutationsprodukten wie Helium und Wasserstoff in Relation zu den entsprechenden Verlagerungsraten, also zum Beispiel durch die Relation He/dpa quantifiziert werden. Die Anzahl von Verlagerungen von Gitteratomen pro Atom ist für einen vorgegebenen Neutronenfluss und Bestrahlungszeit mittels des heute standardisierten Norgett-Robinson-Torrens (NRT)-Modells [1] möglich und hat die üblichen Angaben wie Neutronenfluss und Dosis ersetzt, weil es viel spezifischer den Einfluss des Neutronenspektrums auf die Stoßvorgänge im Festkörper beschreibt. Die Anwendung des NRT-Modells auf metallische Werkstoffe beruht auf einer physikalisch relativ gesicherten Basis, während für nicht metallische Werkstoffe z.T. noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der prinzipiellen Stoßvorgänge besteht. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

In Tab. 1 sind vergleichende Rechnungen zu den Defekterzeugungsraten für ausgewählte Werkstoffgruppen bei einer Wandbelastung von 2.5 MW/m² angegeben. Sie bestimmt den Neutronenfluss, die Oberflächen- und Volumenbelastung und die primären Schädigungsparameter. Eine Korrespondenz zwischen der Wandbelastung und dem daraus resultierenden Neutronenfluss und Neutronenspektrum hängt allerdings auch von dem Design und der materiellen Zusammensetzung der anschliessenden Anordnung von Brut- und Abschirmblanket ab. Für die weitere Diskussion ist in Tab. 1 die folgende Relation zwischen Wandbelastung, dem Neutronenfluss und der daraus resultierenden Verlagerungsschädigung angegeben: 1MW/m² \cong 4*10¹³n/cm²s (E_n = 14 MeV) \cong 3*10¹⁴n/cm²s \cong 3*10⁻⁷dpa s⁻¹; Für Eisen und die meisten anderen Strukturmaterialien wird ausserdem überschlagsmässig die Relation 1MWa/m² \cong 10dpa benutzt.

Tab. 1: Einige Strahlenschädigungsparameter in einem FR-DEMO (1. Wand, Belastung: 2,5 MW/m²)

Material	dpa/s·10 ⁻⁷	appm He/dpa	appm H/dpa
SiCf/SiC	7,1	108	42,5
V-4Cr-4Ti	7,06	4,6	19,5
Fe-9Cr	6,6	9,8	37,8
W-5Re	1,8	2,1	< 10

Tab.1 zeigt, dass die effektiven Verlagerungsraten für drei von vier ausgewählten Werkstoffen, nämlich ferritisch-martensitischen Stählen, dem keramischen Kompositwerkstoff SiCf/SiC und einer Vanadiumlegierung in einem sehr engen Bereich von 7-9 × 10⁻⁷ dpa/s liegen und auf etwa ein Drittel dieses Wertes für Wolfram abfällt. Inwieweit der niedrigere Wert für schwere Elemente wie Wolfram tatsächlich auch einer höheren Strahlungsresistenz entspricht, kann derzeit nicht beantwortet werden. Solche Defektraten können auch bei Bestrahlung in Kernspaltungsreaktoren mit hohen Neutronenflüssen erreicht werden.

Bei der Berechnung von Elementumwandlungen unter Neutronenbestrahlung ist zu berücksichtigen, dass beim Übergang von thermischen oder auch „schnellen“ Spaltungsreaktoren zu einem Fusionsreaktor die Möglichkeiten für inelastische Umwandlungsreaktionen mit der Neutronenenergie stark zunehmen. In Abb 3 sind die typischerweise mit 14 MeV Neutronen zu erwartenden Prozesse dargestellt. Sie umfassen nicht nur primäre, durch Neutronen verursachte Reaktionen, sondern auch sogenannte sequentielle, durch geladene Teilchen wie z. B. Protonen, Deuteronen und Tritonen aus den Primärreaktionen hervorgerufene Umwandlungen [2]. Aber nicht nur die Zahl der möglichen Reaktionen steigt mit der Neutronenenergie an, sondern auch die Wirkungsquerschnitte. Dies hat generell zur Folge, dass Strahlenschädigung, verursacht durch Elementumwandlungen, wie die Bildung von Wasserstoff oder Helium, intensiver auftreten wird als in konventionellen Kernkraftwerken und mit der Anregung für mehr Reaktionskanäle auch eine höhere Aktivierung von Materialien zu erwarten ist. So sind die in Tab. 1 aufgeführten relativen Transmutationsraten für Helium und Wasserstoff, bezogen auf eine integrale Atomverlagerung im Durchschnitt mehr als eine Größenordnung höher als in bisherigen Kernkraftwerken. Die Elemente Helium und Wasserstoff sind deshalb von Bedeutung, weil sie für die bestrahlungsinduzierte Versprödung und gegebenenfalls für das spannungsgetriebene Schwellen von Werkstoffen verantwortlich sind. Tab. 1 zeigt, dass unter diesem Gesichtspunkt insbesondere SiCf/SiC aber auch andere Werkstoffe aus leichten Elementen wie z. B. Aluminiumlegierungen ein sehr ungünstiges Verhalten erwarten lassen.

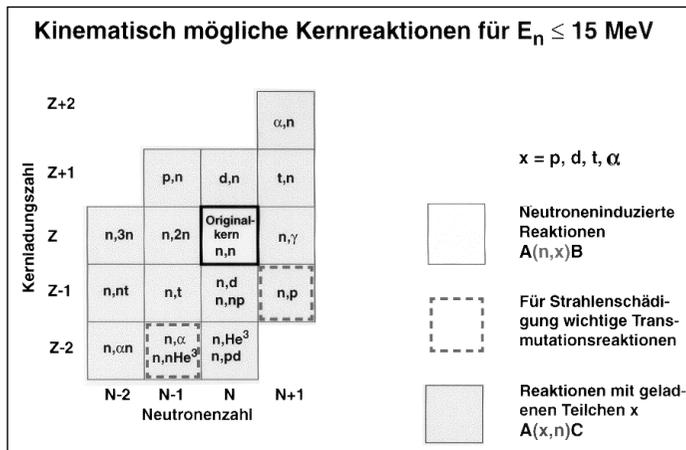


Abb. 3:
Kinematisch mögliche Nuklearreaktionen von hochenergetischen Neutronen ($E \leq 15$ MeV) mit Materie

Die unmittelbare Auswirkung vermehrter Reaktionskanäle bei der Wechselwirkung von Neutronen mit der Ersten Wand ist eine erhöhte Radioaktivität. Da im Gegensatz zu den konven-

tionellen Kernreaktoren das Strukturmaterial überwiegend zum radioaktiven Inventar eines Fusionsreaktors beitragen wird, ist die Entwicklung von sog. „niedrig aktivierbaren“ Werkstoffen (low activation materials) ein sehr wichtiges Anliegen bei der Auswahl von geeigneten Konstruktionswerkstoffen [3]. Auf diesen Aspekt wird weiter unten eingegangen.

3. Strukturmaterialien für Brutblankets und deren Belastungen.

Wie einleitend erwähnt, muss zur Aufrechterhaltung von Reaktion (1) das Element Tritium im Brutmantel eines Fusionsreaktors erbrütet, extrahiert und dem Kreislauf zugeführt werden. Lithium, aus dem das Tritium über die beiden Reaktionsgleichungen (2) und (3) erbrütet wird, steht in Form von festen keramischen Verbindungen wie LiO_2 , Li_4SiO_4 , Li_2ZrO_3 und Li_2TiO_3 oder als flüssiges Lithium beziehungsweise als eine flüssige Blei-Lithium Verbindung zur Verfügung. Eine weitere wichtige Funktion eines solchen Brutmantels ist die Abführung der durch die Neutronenabbremsung (Umwandlung der kinetischen Energie in thermische Energie) entstehenden Wärme. Als Kühlmittel werden derzeit Helium, Wasser und flüssiges Lithium beziehungsweise Blei-Lithium in Betracht gezogen. Als Strukturmaterialien werden die bereits genannten ferritisch-martensitischen (f/m) Stähle, SiCf/SiC-Verbundwerkstoffe (Composites) und Vanadiumlegierungen favorisiert. In Tab. 2 sind die derzeit wichtigsten Anordnungen von Brutblankets zusammengefasst, andere Optionen oder Kombinationen sind Derivate.

Tab. 2: Haupt-Brutblanket-Konzepte

	Kühlmittel	Brutmaterial	Strukturmaterial	Neutronen-Vervielfacher	Einsatzbedingungen	
					Temperatur	Druck
He/LiCe/FS/Be*	He	LiCe	F/M-Stähle	Be	250-550°C	5-20 MPa (8 MPa)
He/LiCe/SiC/SiC/Be	He	LiCe	Keramik-Verbundwerkstoffe SiC/SiC	Be	450-950°C	5-20 MPa
Li/V	Li	Li	Vanadium-Legierungen	Li	350-750°C	~1 MPa
H ₂ O/Pb-Li/FS**	H ₂ O	Pb-Li	F/M-Stähle	Pb-Li	250-550°C	12-15 MPa (15.5 MPa)

* HCPB - Helium-Cooled Pebble-Bed Blanket / EU; Druckdaten in Klammern
 ** WCLL - Water-Cooled Lithium-Lead Blanket / EU; Druckdaten in Klammern
 LiCe=Lithium Ceramic Breeder Materials: Li_2O , Li_4SiO_4 , Li_2ZrO_3 or Li_2TiO_3

In Abb. 4 ist der Aufbau eines austauschbaren, mit Helium gekühlten Außensegmentes eines sogenannten Pebble Bed Blankets gezeigt, bei dem eine Lithium-Orthosilikat Kugelschüttung als Brutmaterial, Beryllium Kugeln als Neutronenmultiplikator und die Erste Wand, die tragenden Platten und die Versorgungsleitungen für das Spülgas und Kühlmittel Helium aus dem f/m Stahl EUROFER bestehen werden. Die Erste Wand ist als Einschluß dieses Seg-

menten zur Plasmaseite hin in die Komponente mit einbezogen. Dieses Brutblanket als Helium-cooled Pebble-bed Blanket (HCPB) bekannt, ist eines der beiden derzeit im Europäischen Fusionstechnologieprogramm entwickelten Test Blanket Module, die in der nächsten Fusionsanlage ITER (International Thermal Experimental Reactor) für den Einsatz in einem danach folgenden Demonstrationsreaktor getestet werden sollen [4]. Wichtige Auslegungsdaten sind eine maximale Erste Wandbelastung von 3.5 MW/m² und eine Standzeit von 20 000 h, was einer maximalen Akkumulation von 8MWa/m² oder 80 dpa entspricht. Der Verlauf der wichtigen Strahlenschädigungsparameter im radialen Abstand von der Ersten Wand wie der integrale Neutronenfluss, die Anzahl der jährlichen Verlagerungen pro Gitteratom im Strukturmaterial und die durch Transmutationsreaktionen erzeugten Helium und Wasserstoffkonzentrationen sind in Abb. 5 für dieses Aussenblanket aufgetragen. Man kann dieser Abbildung entnehmen, dass im ersten Viertel diese Schädigungsparameter bereits auf ein Drittel des maximalen Wertes abgefallen sind, so dass hier sehr starke Schädigungsgradienten auftreten. Gleichzeitig lässt sich aus dem unterschiedlichen Abfall der dpa- und Neutronenflusskurven schliessen, dass der Anteil der hochenergetischen Neutronen überproportional abfällt, das Neutronenspektrum also stark moderiert wird.

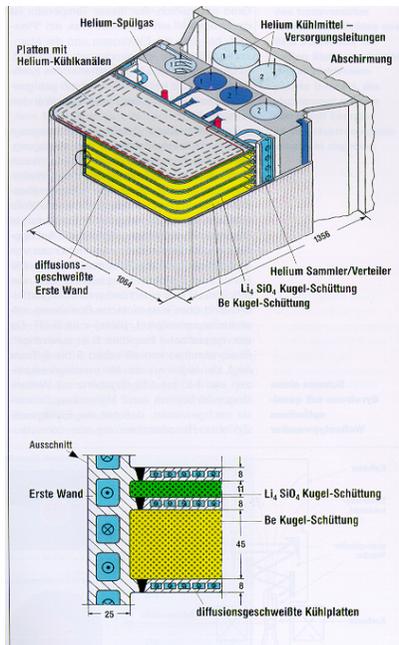
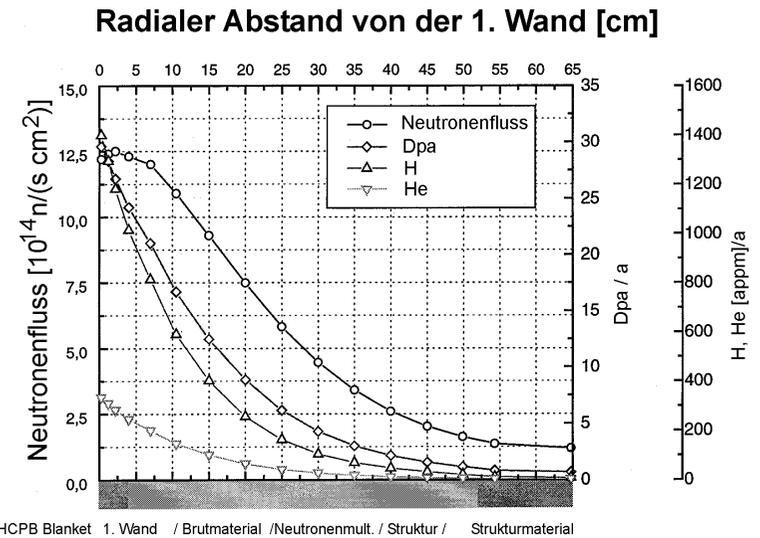


Abb. 4

Aufbau des "heliumgekühlten Pebble Bed Brutblankets, HCPB" mit Lithiumorthosilikat Kugelschüttung als Brutmaterial und Berylliumkugeln als Neutronenmultiplikator

In Tab. 2 ist der abgeschätzte Temperaturbereich für das Strukturmaterial, in dem dieses Brutblanket betrieben werden soll, angegeben. Dieses Temperaturfenster zwischen etwa 250 und 550°C ist, wie später noch erläutert wird, von einer Reihe von Materialparametern abhängig und beeinflusst ebenso wie die maximal mögliche Wandbelastung den thermischen Wirkungsgrad des Reaktors.



HCPB Blanket 1. Wand / Brutmaterial / Neutronenmult. / Struktur / Strukturmaterial

Abb. 5: Verlauf der primären Strahlenschädigungsparameter im Strukturmaterial des HCPB Blankets als Funktion des Abstands vom Plasma

4. Materialanforderungen und Auswahlkriterien

Es gibt eine Reihe von Anforderungen die von dem Konstruktionswerkstoff für die Erste Wand und das Brutblanket zu erfüllen sind. Zu ihnen gehören **konventionelle Eigenschaften** wie zum Beispiel die Zug- und Zeitstandfestigkeit sowie die Bruchzähigkeit. Sie bestimmen zunächst für ein vorgegebenes Design das sog. Temperaturfenster in dem ein Werkstoff eingesetzt werden kann. Beispielhaft ist dies angewendet auf das vorab beschriebene heliumgekühlte Brutblanket mit den Festigkeitsdaten eines f/m Stahls (F82H) und ist in Abb. 6 dargestellt. Bei einer Einlasstemperatur des Helium von etwa 230°C kann für ein Spannungsniveau von 100 MPa für eine Standzeit $R_m/100\ 000h$ von 105 Stunden ein oberes Temperaturlimit von mehr als 550°C erreicht werden. Des weiteren sind, von dem jeweiligen Design abhängig,

die Kompatibilität mit dem verwendeten Kühlmittel sowie dem Brutmaterial zu berücksichtigen. So ist in dem hier angeführten Beispiel wegen starker Korrosion des Strukturmaterials F82H mit flüssigem Blei-Lithium, welches in dem wassergekühlten Europäischen Brutblanket (Water-cooled Lithium-lead Blanket WCLL) als Neutronenmultiplikator eingesetzt wird, die Temperatur auf bis zu 500°C herunterzusetzen, falls es nicht gelingt, die Korrosionsbeständigkeit des Strukturmaterials durch entsprechende Oberflächenschichten (Coatings) zu verbessern. Im unteren Temperaturbereich gibt es zunächst keine Begrenzung durch den Werkstoff, da die Bruchzähigkeit K einen geforderten Wert von 100 MPa√m im unbestrahlten Zustand bis zu einer Temperatur von -50°C erreicht. Bestrahlungsexperimente mit diesem und anderen ferritisch-martensitischen Werkstoffen haben jedoch ergeben, dass durch eine bestrahlungsinduzierte Verfestigung dieses Materials eine erhebliche Verschiebung der für diese Werkstoffe typischen Sprödbrechübergangstemperatur (Ductile-to brittle transition temperature, DBTT) erfolgt, die selbst bei niedrigen Bestrahlungsdosen zu einer starken Temperaturverschiebung der Bruchzähigkeitskurve und damit auch zu einer unteren Begrenzung des Temperaturfensters führen kann. Ursachen hierfür sind Defektcluster etwa der Art wie sie in Abb. 2 durch Elektronenmikroskopie zu beobachten sind oder bestrahlungsinduzierte feinstverteilte Ausscheidungen – also sekundäre Phasen- die ebenfalls eine starke Materialhärtung hervorrufen können.

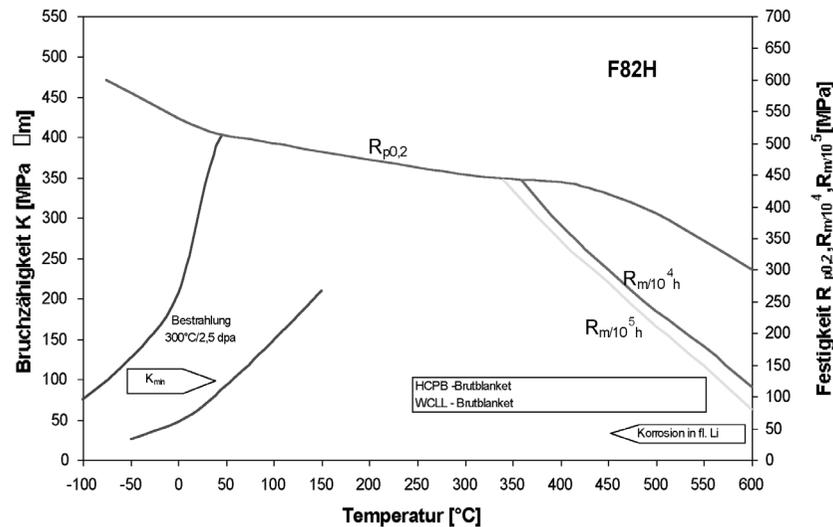


Abb. 6:
Das Anwendungsfenster für den f/m Stahl F82H in den Europäischen Test Blanket Modulen HCPP und WCLL. Bruchzähigkeitsdaten von E.V. van Osch, ECN-Petten, 1999

Verfestigung bei gleichzeitiger Versprödung eines Werkstoffs ist einer von mehreren Bestrahlungseffekten, die abhängig von der Bestrahlungstemperatur und der Neutronendosis in praktisch allen Werkstoffen, allerdings in unterschiedlicher Intensität auftreten. Andere Phänomene, aufgeführt in Abb. 7, wie die Porenbildung und das durch Bestrahlung induzierte Kriechen können durch Volumenzunahme und Verformung und dadurch hervorgerufene Formveränderungen und Verbiegungen von Komponenten zu einer Limitierung der erreichbaren Neutronendosis führen. Schliesslich ist die bereits angedeutete Bildung von Wasserstoff und Helium in Festkörpern eine Ursache von Versprödung ohne gleichzeitige Verfestigung, die tiefen (Wasserstoffversprödung) oder bei hohen Temperaturen (Heliumversprödung) auftreten kann und ebenfalls zur Einschränkung des Temperaturfensters führt. Man kann also feststellen, dass neben den **konventionellen Eigenschaften** das **Bestrahlungsverhalten** und die dadurch geänderten Eigenschaften ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium darstellen.

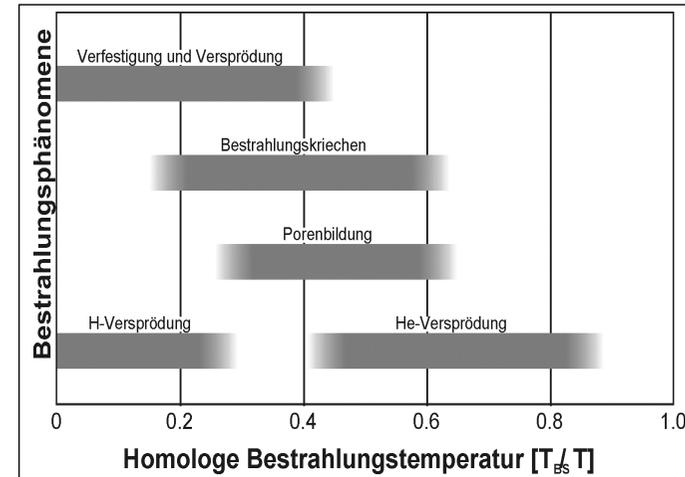


Abb. 7:
Schematische Darstellung von relevanten Bestrahlungseffekten in metallischen Werkstoffen als Funktion der relativen Bestrahlungstemperatur T_B/T_M

Von grosser Bedeutung ist schliesslich die Aktivierung von Werkstoffen unter Neutronenbestrahlung, da sie im Gegensatz zu konventionellen Kernkraftwerken in einem zukünftigen Fusionsreaktor die Hauptquelle für verbleibende Radioaktivität darstellt und durch die oben dargestellte Vermehrung von Reaktionskanälen mit energiereichen 14 MeV Neutronen besonders sorgfältig bei der Materialauswahl zu beachten ist. Dabei gibt es zwei Argumente unter denen eine Entwicklung **niedrig aktivierbarer Werkstoffe** zu betrachten ist [5]: Der

eine Aspekt ist mit der Sicherheit, dem Betrieb und der Wartung einer solchen Anlage verknüpft und betrifft die Aktivität, die γ -Kontaktdosis und die Nachzerfallswärme kurz nach dem Abschalten einer Anlage. Hier kann die letztere unter extremen Bedingungen zum Schmelzen und zur Verflüchtigen von radioaktivem Material führen. Werkstoffe mit einer niedrigen Aktivierung und Nachzerfallswärme unmittelbar oder in Tagen und Wochen nach dem Abschalten sind deshalb unter diesem Gesichtspunkt besonders vorteilhaft. Bei Fragen der Endlagerung und der Rezyklierung von Werkstoffen sind hingegen niedrige Werte nach langer Abklingzeit wichtig. In Tab. 3 sind entsprechende Kriterien und Grenzwerte für sog. niedrigaktivierbare Werkstoffe für kurze (< 0.1 Jahr) und lange Abklingzeiten (>100 Jahre) zusammengefasst.

Für die Entwicklung von niedrig aktivierbaren Werkstoffen ist die Kenntnis der Beiträge einzelner chemischer Elemente und Isotope zur Aktivierung über diverse Reaktionskanäle und deren weiterer Zerfall von grosser Bedeutung. Sie bildet die Grundlage für die Möglichkeit durch geeignete Veränderung der chemischen Zusammensetzung einzelner Werkstoffgruppen deren radioaktives Potential soweit wie möglich zu minimieren. Gegenwärtig werden zu dieser im internationalen Rahmen vorangetriebenen Legierungsoptimierung in den Europäischen Labors im wesentlichen die Datensätze des European Activation File Systems (EASY) [6] mit Wirkungsquerschnitten, Aktivierungs- und Zerfallsdaten und zur Berechnung der Aktivierbarkeit und anderer radiologischer Parameter wie der Nachzerfallswärme, der Radiotoxizität etc. der sog. FISPACT Code [7] verwendet.

Tab. 3: Kriterien für niedrigaktivierbare Werkstoffe

	Parameter	Grenzwerte
Betrieb, Wartung	γ -Kontaktdosisrate γ -Gesamtdosis	< 104 Gy/h nach 24 h oder < 107 Gy total
Unfallszenario*	Aktivität γ -Dosisrate Nachzerfallswärme/Radiotoxizität	< 1014 Bq (Off site) < 100 mSv (Off site)
Rezyklierbarkeit**	γ -Kontaktdosisrate (Hands-on-Level)	< 25 μ Sv/h nach 100 Jahren (Recycling)
	Nachzerfallswärme	< 10 mSv/h (Remote recycling) < 1 W/m ³
Abfallbehandlung**	γ -Kontaktdosis/Nachzerfallswärme	
	Low Level Waste LLW	< 2 mSv/h / < 1 W/m ³
	Medium Level Waste MLW	< 20 mSv/h / < 10 W/m ³
	High Level Waste HLW	>20 mSv/h / > 10 W/m ³
* Für Abklingzeiten < 0,1 a		
** Für Abklingzeiten von \geq 100 Jahren		

Abb 8 zeigt Rechnungen zur γ -Dosisrate potentieller Werkstoffe nach einer integralen Wandbelastung von 12.5 MW/m² (entsprechend 125 dpa-Fe) für die Erste Wand Position in Ab-

hängigkeit von der Abklingzeit nach Abschalten der Anlage. Die Rechnungen ausgeführt mit dem oben genannten FISPACT Code-Version 4.1 berücksichtigen nicht nur die Legierungselemente, sondern auch legierungsspezifische natürliche Verunreinigungen die bereits in 10⁻⁶ Gewichtsanteilen (Gew.-ppm) die Aktivierung beeinflussen oder sogar dominieren können. Zu solchen Elementen gehören z.B. seltene Erden, Silber, Niob und andere.

Unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit und Wartung unmittelbar nach dem Abschalten der Anlage bietet das mit Si-Fasern verstärkte Silizium die günstigsten Eigenschaften. Allerdings wird von diesem Material zu keiner Zeit der sog. Hands-on Level erreicht und eine Rezyklierung des radioaktiven Materials dürfte kaum zur Diskussion stehen. Bei Betrachtung der Langzeitaktivierung besteht für hochreine f/m Stähle (Eurofer-Referenz) sowie besonders für die Vanadiumlegierungen am ehesten die Möglichkeit den sog. Hands-on-Level nach etwa 100 Jahren Abklingzeit zu erreichen. In jedem Falle kann aber eine Rezyklierung dieser Materialien technisch ins Auge gefasst werden.

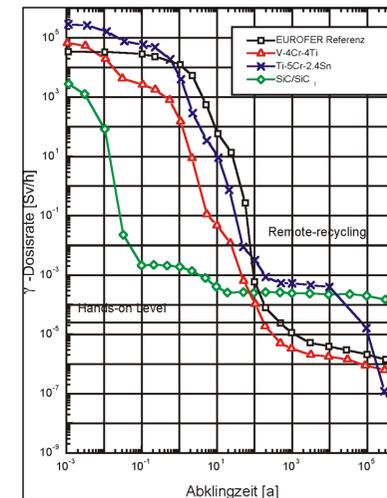


Abb. 8: Kontakt γ -Dosis als Funktion der Abklingzeit für mehrere Werkstoffe nach einer integralen Wandbelastung von 12.5 MWa/m² \approx 125 dpa (Fe)

5. Status der Materialentwicklung und Schlüsselprobleme

Die seit Mitte der 80iger Jahre begonnene Suche nach geeigneten Strukturmaterialien für die Kernfusion hat unter der Prämisse der oben näher erläuterten Auswahlkriterien zu den drei bereits genannten Werkstoffgruppen geführt. Es sind dies die f/m 7-11% CrWVTa-Stähle auf

Eisenbasis, mit Si-Fasern verstärktes Silizium (SiCf/SiC) als Beispiel eines Verbundwerkstoffes und Vanadiumbasislegierungen mit Chrom und Titanzusätzen. Ihre Auswahl beruht im wesentlichen auf günstigen konventionellen Eigenschaften wie Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, auf der Möglichkeit niedrige strahlungsinduzierte Aktivitätslevels zu erreichen und teilweise auf der guten Erfahrung mit diesen Werkstoffen in konventionellen Kraftwerken und Kernspaltungsreaktoren. In der geeigneten Kombination mit Brutmaterialien und Kühlmitteln erlauben sie die in Tab. 2 aufgeführten Temperaturfenster bei gegebenen mechanischen Belastungen in Brutblankets abzudecken, wobei aus thermodynamischen Gründen ein hohes Temperaturniveau grundsätzlich von Vorteil ist. Allerdings sind die f/m Stähle und SiCf/SiC aufgrund ihrer moderaten thermophysikalischen Eigenschaften nicht für Wandbelastungen von $\geq 3 \text{ MW/m}^2$ geeignet. Eine Möglichkeit diese Begrenzung zu umgehen wäre der Einsatz von Legierungen auf der Basis hoch schmelzender Elemente wie Wolfram oder Molybdän, bei denen man Werte von 10 MW/m^2 und mehr erreichen könnte. Dem stünde eine deutlich höhere Radioaktivität und eine Vielzahl noch offener Fragen entgegen. Im folgenden wird anhand der Tab. 4 der Entwicklungsstatus für diese Materialien sehr komprimiert dargestellt und die notwendigen weiteren Arbeiten kurz umrissen. Eingehendere Berichte können den Proceedings der einschlägigen Konferenzen entnommen werden.

Tab. 4: Schlüsselprobleme und notwendige Entwicklungsarbeiten für Strukturmaterialien

Werkstoffgruppe	Probleme	Entwicklungsarbeiten
F/M-Stähle	<ul style="list-style-type: none"> Sprödbbruchverhalten und Verfestigung unter Bestrahlung Ferromagnetisches Verhalten 	<ul style="list-style-type: none"> Generelles Verhalten unter hoher Bestrahlungsbelastung Verbesserung der Zeitstandfestigkeit (ODS-Legierungen)
Vanadiumlegierungen	<ul style="list-style-type: none"> Sprödbbruchverhalten und Verfestigung unter Bestrahlung Aufnahme von verspröhdenden Elementen (O,C,N) aus Kühlmedien 	<ul style="list-style-type: none"> Generelles Verhalten unter hoher Bestrahlung Entwicklung von Coatings zur Verbesserung der Kompatibilität und elektr. Isolation (MHD-Effekt)
SiCf/SiC-Komposits	<ul style="list-style-type: none"> Nicht ausreichend entwickelte Herstellungs- und Verbindungstechnologien Unterschiedliches Bestrahlungsverhalten von Fasern und Matrix 	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklung von strahlungsbeständigen Komposits Verbesserung der Herstellungstechnologien Entwicklung einer Datenbasis
Wolframlegierungen	<ul style="list-style-type: none"> Bestrahlungsversprödung Hohe Radioaktivität Schwierige Verarbeitbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Generelles Verhalten unter Bestrahlung Verbesserung der Verarbeitungs- und Verbindungstechnologien

5.1 Ferritisch-martensitische Stähle

Die Gruppe der ferritisch-martensitischen 9-12% CrMoV(Nb) Stähle hat sich in weiten Berei-

chen konventioneller und kerntechnischer Kraftwerke und Anlagen hervorragend bewährt und besitzt den höchsten technischen Entwicklungsstand aller Kandidaten. Diese Stähle sind von ihrer Festigkeit her bis etwa 600°C einsetzbar und haben in Schnellen Brutreaktoren bis zu einer Neutronenexposition von 150dpa nur eine sehr geringe Neigung zur bestrahlungsinduzierten Hochtemperaturversprödung und zur Porenbildung gezeigt. Ausserdem sind sie hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens gegenüber den meisten Kühlmitteln und Brutmaterialien kompatibel. Ein kritischer, bereits unter Abschnitt 4 angesprochener Punkt dieser Materialgruppe ist die mögliche Verschiebung der Sprödbbruchübergangstemperatur (DBTT) bei Bestrahlungstemperaturen unterhalb etwa 350°C . In den letzten 10 –15 Jahren sind international erhebliche Anstrengungen unternommen worden, durch geeignete Modifikation der chemischen Zusammensetzung und entsprechende Reduzierung von schädlichen Verunreinigungen neue Legierungen zu entwickeln, die eine erheblich reduzierte Aktivierbarkeit nach Neutronenbestrahlung aufweisen [8,9]. In zahlreichen Laborschmelzen dieser neuen 7-11% CrWVTA Legierungen konnte zum einen die Übergangstemperatur der Versprödung (DBTT) im unbestrahlten Zustand temperaturmässig weiter abgesenkt und eine geringere Verschiebung der DBTT nach Bestrahlung beobachtet werden. In der Zwischenzeit wurden auch zwei Grosschargen im industriellen Maßstab in Japan (F82H-mod.) und in Europa (EUROFER 97) hergestellt und getestet. Sie zeigen gute mechanische Eigenschaften und konnten problemlos zu verschiedenen Halbzeugen verarbeitet werden. Die wichtigsten für die Aktivierung schädlichen Verunreinigungen wie z.B. Niob konnten auf ein Niveau im Bereich von Gewichts -ppm gesenkt werden.

Schwerpunkt der weiteren Arbeiten muss die Klärung der genauen Ursachen für die beobachtete Verfestigung/Versprödung und der Mechanismen beschleunigter Rissausbreitung unter dem Einfluss erhöhter Heliumgeneration und dpa –Schädigung bei niedriger Einsatztemperatur sein.

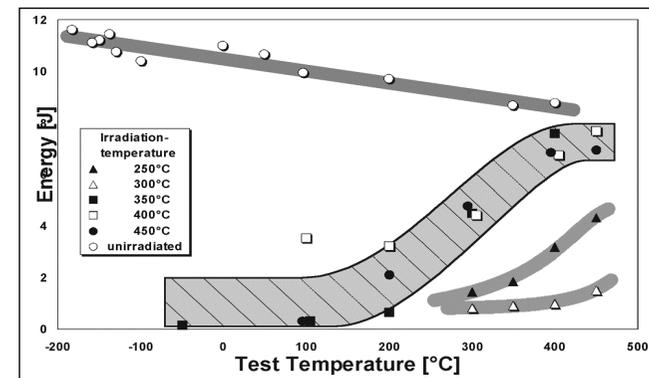


Abb. 9: Larson-Miller Darstellung des Zeitstandfestigkeitsverhaltens verschiedener f/m Stähle mit

reduzierter Aktivierbarkeit im Vergleich zu der dispersionsgehärteten Variante ODS-Eurofer

Um die Attraktivität dieser Werkstoffgruppe weiter zu erhöhen ist die Entwicklung von dispersionsgehärteten f/m Stählen in Angriff genommen worden mit dem Ziel die Zeitstandfestigkeit soweit zu erhöhen, dass die obere Temperaturgrenze für den Einsatz um 100 °C oder mehr auf 650 oder sogar 750°C erhöht werden kann. Erste Ergebnisse an einer Basislegierung EUROFER mit Zusätzen sehr feinverteilten Yttriumoxid-Dispersionen haben bereits ermutigende Resultate gezeigt (Abb.9).

5.2 Vanadiumlegierungen

Vanadium mit Chrom und Titan als zulegierten Elementen (z. B. die Legierung V-4Cr-4Ti), besitzt sehr gute mechanische Eigenschaften, die hohe Betriebstemperaturen (bis zu etwa 750°C) erlauben. Diese Legierung hat wegen der günstigen thermophysikalischen Eigenschaften das Potential für hohe thermische Wandbelastung und kann in Kombination mit flüsigem Lithium als Brut- und Kühlmedium gegenüber Stählen und SiCf/SiC für hohe Energiedichten in Fusionsblankets eingesetzt werden [10]. In dieser Zusammensetzung erreicht die Legierung entsprechend Abb.8 über die gesamte Abklingzeit sehr günstige Aktivitäts-, γ -Dosis- und Nachzerfallswärme, vorausgesetzt die Konzentration von hoch-aktivierbaren Verunreinigungen kann niedrig gehalten werden. Die bisherigen Ergebnisse aus Bestrahlungsexperimenten in Spaltungsreaktoren sind ebenfalls positiv mit Ausnahme einer beobachteten Tieftemperaturversprödung, die in gleicher Weise zu einer Begrenzung der unteren Einsatztemperatur führt wie bei den f/m Stählen (Abb10).

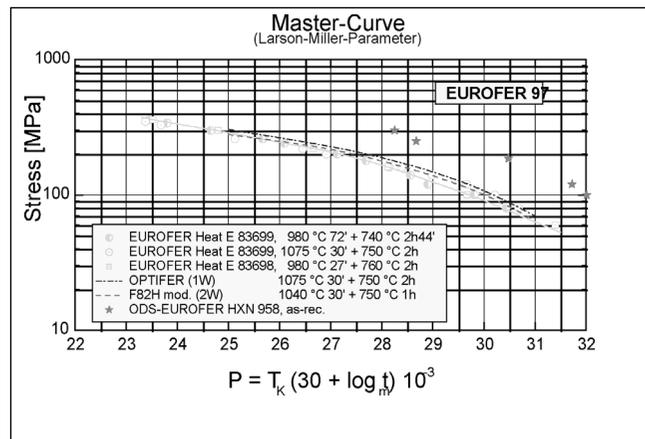


Abb. 10:

Der Einfluss von Bestrahlung auf die Kerbschlagzähigkeit einer V-4Cr-4Ti

Legierung. (Daten von H.D.Röhrig et al. 1999)

Das grösste Hindernis für die Anwendung dieser attraktiven Legierungsgruppe könnte die hohe Affinität zu Elementen wie Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff sein, die in das Zwischengitter aufgenommen, ohne Bestrahlungseinwirkung zu einer erheblichen Versprödung führen können. Deshalb ist auch eine Kombination mit dem Flüssigmetall Lithium als Kühl- und Brutmedium entsprechend Tab 2 am geeignetsten. Aber auch in diesem Falle ist die Entwicklung von selbstheilenden Schutzschichten notwendig, welche die Aufnahme dieser Elemente auch bei hoher Temperatur verhindern und gleichzeitig eine elektrisch isolierende Wirkung besitzen, um magnetohydrodynamische (MHD) Effekte im Flüssigmetall Li.zu verhindern. Schutzschichten aus CaO sind nach neueren Untersuchungen hierfür am ehesten geeignet.

5.3 SiCf/SiC Verbundwerkstoff

Die Entwicklung dieser Werkstoffgruppe stellt die grössten Anforderungen. Ihr Einsatz in Brutblankets verspricht sehr hohe Betriebstemperaturen und damit sehr günstige Wirkungsgrade [11]. Gleichzeitig sind für niedrige und mittlere Abklingzeiten die Aktivitätslevels sehr günstig wie in Abb. 8 gezeigt. Im Vergleich zu den f/m Stählen sind die Herstellungsmethoden von Komponenten und die Verbindungstechniken wenig entwickelt und teuer. Besonders schwierig ist der Aufbau dieses Materials aus kohlenstoffumhüllten SiC-Fasern, die in einer keramischen SiC-Matrix eingebettet sind und die unter dem Einfluss von Bestrahlung wegen unterschiedlichen Schwellens zur Delamination der Fasern von der SiC-Matrix führen können. Abhilfe kann nach neuesten Untersuchungen eine Optimierung der Faserzusammensetzung schaffen, Ausserdem zeigen die bislang wenigen Bestrahlungsexperimente eine starke Verschlechterung der thermischen Leitfähigkeit. Weitere Untersuchungen sind jedoch auch notwendig um das Oxidationsverhalten bei den angestrebten hohen Einsatztemperaturen abzusichern und die Verträglichkeit mit den vorgesehenen Kühl- und Brutmaterialien zu überprüfen. Schliesslich sind für diese Werkstoffgruppe adäquate Auslegungsregeln zu formulieren um ihren Einsatz als Konstruktionsmaterialien zu gewährleisten.

5.4 Wolframlegierungen

Die Attraktivität dieser Materialgruppe beruht auf der exzellenten Hochtemperatur festigkeit in Kombination mit der sehr guten thermischen Leitfähigkeit, die eine Anwendung in Brutblankets mit hoher Leistungsdichte ermöglicht. Allerdings sind eine starke Aktivierbarkeit verbunden mit einer hohen Nachzerfallswärme und die Anfälligkeit für Bestrahlungsverprödung eher ungünstig. Die zukünftigen Arbeiten zur Ertüchtigung dieser Werkstoffgruppe sollten sich deshalb zunächst auf das Studium des generellen Verhaltens unter Bestrahlung und eine Verbesserung der Verarbeitungstechnologien konzentrieren.

5.5 Verhalten unter Bestrahlung

Aus dem hier sehr kurz gefassten Status der Entwicklung der einzelnen Werkstoffgruppen (ausführliche Darstellung in [12]) geht hervor, dass für alle Varianten das Verhalten unter fusions-spezifischen Bestrahlungsbedingungen fehlt. Unsere Kenntnis über das Bestrahlungsverhalten generell ist sehr unterschiedlich mit den weitaus meisten Erfahrungen für f/m Stähle. Sie beruht jedoch generell auf Experimenten, die in vorhandenen Spaltungsreaktoren mit einer viel niedrigeren Neutronenenergie und in anderen Bestrahlungseinrichtungen wie Beschleunigern durchgeführt werden. In ihnen können Teilaspekte der fusions-spezifischen Bedingungen wie z. B. hohe Verlagerungsschädigung (in dpa) oder durch gezielte Implantation von Helium oder chemische Modifikationen eine hohe Heliumerzeugung erzeugt werden, um die Heliumversprödung zu simulieren. Mit solchen Experimenten können sehr wertvolle Teilergebnisse erzielt und eine Art Vorselektion von Materialien vorgenommen werden. Allerdings ist ein direkter Transfer dieser Ergebnisse auf die fusions-spezifischen Belastungen nur sehr begrenzt möglich, da, wie bereits mehrfach angedeutet, die Abweichung in wichtigen Bestrahlungsparametern sehr gross sind. So sind zum Beispiel bei gleicher dpa-Schädigung wegen der erhöhten Neutronenenergien die Wirkungsquerschnitte für inelastische (n,p)- und (n, α)-Prozesse im Fusionsreaktor typischerweise um ein bis zwei Grössenordnungen höher als bei Bestrahlung in einem Schnellen Brutreaktor. Deren quantitative Auswirkung auf die dadurch hervorgerufenen Versprödungs- und Verfestigungseffekte sind auch unter zu Hilfe-nahme von Modellrechnungen derzeit nicht möglich. Die Wechselwirkung mit 14 MeV Neutronen führt auch zu erhöhten mittleren übertragenen Energien auf die primär angestoßenen Gitteratome, die direkten Einfluss auf die relative Bildung von Einzeldefekten und Defektclustern haben. Auch deren Auswirkungen auf Effekte wie das Porenschwellen, diffusionsgesteuerte Prozesse, Entmischungsvorgänge etc. ist im einzelnen ebenfalls nicht bekannt [2].

All diese Gründe haben deshalb dazu geführt, dass von der Materials Community der Bau einer intensiven 14 MeV Neutronenquelle als unabdingbar für die gesamte Werkstoffentwicklung angesehen wird.

6. Langfristige Ziele der Materialentwicklung

Strukturwerkstoffe für die Erste Wand und Brutblankets müssen hohe Anforderungen erfüllen, um wettbewerbsfähige Fusionsreaktoren bauen zu können. So sollten sie idealerweise einen sicheren Betrieb über lange Zeiträume garantieren und dazu beitragen, einen hohen Wirkungsgrad der Anlagen in der Grössenordnung von 35-45% zu erreichen. Ein solches Ziel kann sicher erst am Ende einer längeren, sich über mehrere Jahrzehnte erstreckende Entwicklungsperiode über mehrere Zwischenschritte erreicht werden [13].

Dabei ist die Materialforschung naturgemäss eng mit der Entwicklung der geplanten Plasmasmaschinen und Demonstrationsreaktoren verbunden [14]. In der Europäischen Entwicklungsstrategie ist als nächster Schritt ITER geplant. Diese Maschine ist, was die Materialprobleme angeht, charakterisiert durch einen stark gepulsten Betrieb und eine relativ niedrige Neutronenbelastung (3-10dpa) bei niedriger Betriebstemperatur Tab. 5. Hierfür ist ein austenitischer 18Cr-10Ni-Stahl mit der Sonderspezifikation 316LN-IG vorgesehen, ein Werkstoff, der erfolgreich in der Reaktortechnologie eingesetzt wurde.

Der im nächsten Schritt zu erwartende Demonstrationsreaktor, DEMO bedarf Materialien, die bei hohen Betriebstemperaturen moderat hohen Neutronendosen widerstehen können und gleichzeitig das Potential für niedrige Aktivierbarkeit besitzen. Zu ihnen gehören die in den letzten beiden Jahrzehnten entwickelten und in diesem Bericht näher beschriebenen f/m Stähle, die SiCf/SiC Verbundwerkstoffe und die Vanadiumlegierungen. Als Ziel ist hier die Ertüchtigung der Werkstoffe auf ein Niveau von etwa 80 dpa angepeilt. Abhängig von den Ergebnissen und Erfahrungen mit diesen Werkstoffen kann dann in einem nächsten Schritt eine weitere Auswahl getroffen und eine sukzessive Erhöhung der Neutronenbelastung auf etwa 150 dpa angestrebt werden. Eine darüber hinausgehende Erhöhung der Standzeit von Erste Wand/ Brutblankets auf Laufzeiten wie sie der Gesamtanlage von 30 und mehr Jahren entsprechen würden, ist jedoch ziemlich illusorisch, da sich dann für diese Komponenten in unmittelbarer Nähe des Plasmas bei einer gegebenen Wandbelastung von 2-3 MW/m² nicht weniger als 75 MWa/m² oder 750 dpa ergeben würden. Auch aus anderen Gründen ist deshalb ein modularer Aufbau mit der Möglichkeit für mehrmaligen Austausch realistisch.

Tabelle 5: Entwicklungsziele für Fusionsanlagen

	ITER	DEMO	REAKTOR
Anlagenleistung	0,5 - 1 GW	2 - 4 GW	3 - 4 GW
Neutronenwandbelastung (Erste Wand)	0,5 - 1 MW/m ²	2 - 3 MW/m ²	2 - 3 MW/m ²
Integrale Wandbelastung (Erste Wand) in MWy/m ² in Displacements per atom*	0,3 - 1 MWy/m ² 3 - 10 dpa	3 - 8 MWy/m ² 30 - 80 dpa	10-15 MWy/m ² 100-150 dpa
Betriebsart (Pulslänge) Zyklenzahl	Gepulst (1000s) < 5·10 ⁴ cycles	Quasikontinuierlich	
Anlagenlebensdauer			~ 30 FPY
Wirkungsgrad der Anlage			~ 35 %

* Die folgenden Reaktionen zwischen Wandbelastung, Neutronenfluss und Verlagerungsschädigung sind angenommen :

$$1 \text{ MW/m}^2 \hat{=} 3 \cdot 10^{14} \text{ ntot/cm}^2 \cdot \text{s} \hat{=} 3 \cdot 10^{-7} \text{ dpa/s (Fe)}$$

$$1 \text{ MWy/m}^2 \hat{=} 10 \text{ dpa (Fe)}$$

Die dpa-Berechnung erfolgt mittels des Norgett-Robinson Torrens Modells

Aber selbst die oben skizzierte Entwicklung für eine maximale Strahlungsbelastung von 150 dpa erstreckt sich über mehrere Jahrzehnte, dargestellt in Abb. 11. Sie erfordert insbesondere die weitere Nutzung von Kernspaltungsreaktoren, insbesondere von Schnellen Brutreaktoren mit hohen Neutronenflüssen und Forschungsreaktoren mit besonders geeigneten Einrichtungen für vollinstrumentierte in-situ Experimente während der nächsten Dekade und den zügigen Aufbau einer intensiven Neutronenquelle.

In dem letzten Jahrzehnt sind im Rahmen einer von der Internationalen Energieagentur IEA Paris veranlassten Studie verschiedene Konzepte von hochenergetischen Neutronenquellen auf ihre Nutzbarkeit für die Materialforschung in der Fusion untersucht worden. Als Ergebnis wurde eine auf der D-Li Neutronen-Strippingreaktion beruhende beschleunigergetriebene Anlage als am weitesten fortgeschritten und am geeignetsten für die Materialforschung angesehen [15]. Diese als „International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF“ bezeichnete Anlage kann alle wesentlichen fusionspezifischen primären Schädigungsparameter einstellen, hat ein ausreichend grosses Bestrahlungsvolumen für vollinstrumentierte in-situ Experimente in Hochfluss- und Mittelflussbereich und kann in einem beschränkten Experimentierolumen Neutronenwandbelastungen von bis zu 5MW/m^2 erreichen [16]. Sie basiert im Vergleich zu anderen Alternativen auf bereits erprobter Beschleunigertechnologie und kann innerhalb der nächsten 10 Jahre gebaut werden.

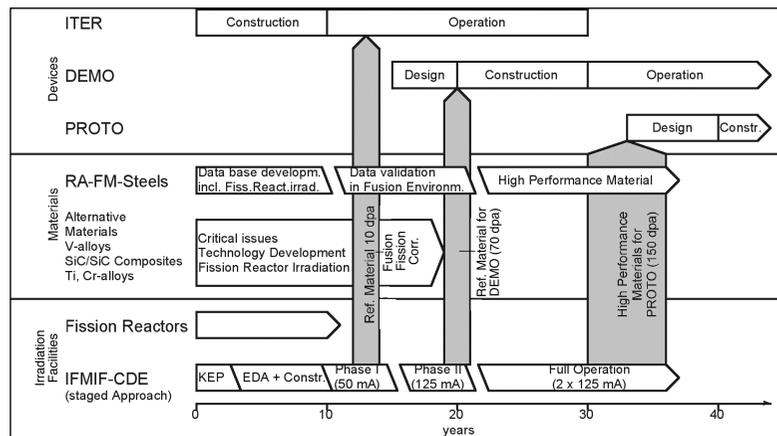


Abb. 11:

Der Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Fusionsanlagen, notwendigen Bestrahlungseinrichtungen und der Materialentwicklung

Aus Abb. 11 ist die Dringlichkeit für die Entwicklung und den Bau eines solchen Testbetts für die Materialforschung klar ersichtlich. Nur im Fall seiner Verwirklichung können die wichtigen Meilensteine der Materialentwicklung, nämlich i) die Verifikation für das Materialkonzept der Europäischen Test Blanket Module für ITER, ii) die Demonstration der Verfügbar-

keit des Referenzmaterials für DEMO und iii) die Qualifikation von Werkstoffen für sehr hohe Bestrahlungsbelastung in einem prototypischen Reaktor gewährleistet werden.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Werkstoffe der Ersten Wand und Plasma naher Komponenten sind niederenergetischen Plasmateilchen und besonders den energiereichen 14 MeV Neutronen ausgesetzt. Sie rufen Veränderungen der inneren Mikrostruktur und anderer Eigenschaften wie der Festigkeit hervor.
- Fusionspezifische Auswahlkriterien für die Werkstoffwahl sind primäre Schädigungsparameter wie die Wirkungsquerschnitte für Atomverlagerungen und die Aktivierung über inelastische Prozesse. Beide Grössen sollen möglichst klein sein wobei insbesondere die Forderung nach niedrig aktivierbaren Materialien (Low activation materials) besteht.
- In gleicher Weise sind konventionelle Daten wie thermo-physikalische Eigenschaften, Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und wie im Falle von Brutblankets die Kompatibilität mit Brutstoffen und Kühlmitteln für deren Auslegung wichtig.
- Aus der Vielzahl von Werkstoffgruppen haben sich aufgrund der genannten Kriterien und der bisher vorliegenden Erfahrungen mit diesen Materialien in konventionellen Kraftwerken und nuklearen Anlagen wie Spaltungsreaktoren die ferritisch-martensitischen 7-12% Chromstähle, der SiC-Faser verstärkte Verbundwerkstoff SiCf/SiC und Vanadiumlegierungen mit Chrom und Titan als Zulegierungselementen herauskristallisiert.
- Diese Werkstoffgruppen besitzen einen sehr unterschiedlichen technischen Reifegrad und Erprobung auch in der nuklearen Anwendung. Am weitesten entwickelt gelten die f/m Stähle, die anderen Alternativen könnten bei Anwendung in Brutblankets gegebenenfalls zu höheren Wirkungsgraden führen.
- Das derzeitige Hauptproblem bei der Abschätzung des Potentials der Werkstoffe ist ihre Qualifikation unter fusionspezifischen Bestrahlungsbedingungen. Die aus Simulationsbestrahlungen in Spaltungsreaktoren und an Beschleunigern gewonnenen Ergebnisse lassen sich wegen der sehr unterschiedlichen Bestrahlungsparametern zur Fusion nur sehr bedingt hierauf übertragen. Zuverlässige Korrelationen für eine solche Datenübertragung konnten bisher auch durch theoretische Modellierung nicht erreicht werden.
- Mittel- und langfristig ist für die Entwicklung von Fusionsreaktoren die Ertüchtigung von Werkstoffen für eine integrale Belastung von etwa 15MWa/m^2 oder 150 dpa angestrebt. Zur Erfüllung dieser Forderung ist die weitere Nutzung von bestehenden Bestrahlungseinrichtungen besonders aber der rasche und rechtzeitige Bau einer 14 MeV- Neutronenquelle (sog. International Fusion Materials Irradiation Facility) absolut notwendig.

Literatur

- [1] M.J. Norgett, M.T. Robinson and M. I. Torrens , A proposed method of calculating displacement dose rates, *Nuclear Engineering and Design* 33 (1975) 50-54
- [2] S. Cierjacks, K. Ehrlich, E.T. Cheng, H. Conrads and H. Ullmaier, *Nucl. Sci. Engineering*, 106 (1990) 99
- [3] Proceedings of an IEA- Workshop on Low Activation Materials, Culham, UK, 8 -12 April 1991, Volumes I and II
- [4] E. Proust et al., Breeding Blankets for DEMO, *Fusion Engineering and Design* 22 (1993) 19-33
- [5] J. Raeder, I. Cook, F.H. Morgenstern, E. Salpietro, R. Bünde and E. Ebert, Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP)-Report EURFUBRU XII-217 (1995)
- [6] R.A. Forrest and J. Kopecky, The European Activation System, IAEA - Advisory Group Meeting on Fendl 2 (Nov. 1991)
- [7] R.A. Forrest and J.-Ch. Sublet, 1997 - Fispact User Manual, UKAEA FUS 358 Report, May 1997
- [8] K. Ehrlich, D.R. Harries and A. Möslang, Characterisation and Assessment of F/M-Steels, FZKA-Report 5626 (1997)
- [9] B. v. d. Schaaf et al., Progress and Critical Issues of Reduced Activation Ferritic-Martensitic Steel Development, Proc. Ninth Internat. Conference on Fusion Reactor Materials, Colorado Springs, Oct. 1999, USA, *J. Nucl. Mat.* 283-287 (2000) 52-59
- [10] R.J. Kurtz et al., Critical Issues and Current Status of Vanadium Alloys for Fusion Energy Application, Proc. 9th ICFRM, *J. Nucl. Mat.* 283-287 (2000) 70-78
- [11] A Hasegawa et al., Critical Issues and Current Status of SiC/SiC Composites for Fusion, Proc. 9th ICFRM, *J. Nucl. Mat.* 283-287 (2000) 128-137
- [12] Proceedings of the Tenth Internat. Conference on Fusion Reactor Materials, Baden-Baden, 14-19 October 2001, Germany
- [13] K. Ehrlich, E.E. Bloom and T. Kondo, International Strategy for Fusion Materials Development, Proc. 9th ICFRM, *J. Nucl. Mat.* 283-287 (2000) 79-88
- [14] K. Lackner, Longterm Fusion Strategy in Europe, Proceedings of the Tenth Internat. Conference on Fusion Reactor Materials, Baden-Baden, 14-19 October 2001, Germany, to be published
- [15] M. Martone (Editor), IFMIF - International Fusion Materials Irradiation Facility - Conceptual Design Activity, Final Report ENEA-RT/ERG/FUS/9611, Dec. 1996
- [16] K. Ehrlich and A. Möslang, IFMIF - An International Fusion Materials Irradiation Facility, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 139 (1998) 72-81

ELEKTRISCHES LICHT WEGBEREITER DES INDUSTRIE- UND INFORMATIONSZEITALTERS

Werner Späth

OSRAM Opto-Semiconductors, Abteilung Innovations Management

Elektrisches Licht ist in unserem modernen Zeitalter so etwas Selbstverständliches, dass man sich wenig Gedanken darüber macht, welch grosse wirtschaftliche Bedeutung im allgemeinen und welch grossen Einfluss auf das Leben und die Lebensqualität des Einzelnen dieses künstliche Licht hat. Künstliche elektrische Lichtquellen haben beginnend mit den thermischen Strahlern (Plancksche Strahler) im 19. Jahrhundert über die Gasentladung bis zu den heutigen Festkörperlichtquellen entscheidend zum technischen Fortschritt im vorigen Jahrhundert beigetragen und werden in diesem eine noch weitaus wichtigere Rolle spielen. Heute werden in Deutschland etwa 8% der elektrischen Energie, das entspricht etwa 40 Mrd kWh pro Jahr, für die Erzeugung von elektrischem Licht verwendet.

1. Licht

Wenn man von Licht spricht, dann meint man den Teil des elektromagnetischen Spektrums, den das menschliche Auge wahrnehmen kann. Vom anderen, dem weitaus grösseren, spricht man von Strahlung. Häufig hält man sich nicht so genau an diese Definition, so dass man z.B. auch Röntgen-, UV- oder IR- Strahlung Licht nennt. Der Strahlungsfluss wird in Watt gemessen und der Lichtstrom in Lumen. Der spektrale Empfindlichkeitsverlauf des menschlichen Auges reicht von etwa 400 nm bis 700 nm und hat bei 555 nm seinen Maximalwert. Dieser ist auf 1 normiert und hat den Absolutwert 683 Lumen/Watt (lm/W). Für weisses Tageslicht, das aus spektralem Mischlicht besteht, liegt die physikalische Grenze für die Lichtausbeute bei 199 lm/W.

Die Beleuchtungsstärke wird in Lux (lx) angegeben ($1\text{lx} = 1\text{ lm/m}^2$). Die natürliche Beleuchtungsstärke reicht von 100 000 Lux bei Sonnenschein im Sommer bis zu einigen Millilux bei Sternenlicht.

2. Glühlampe

1879 hat Edison die Kohlefadenlampe erfunden und damit eine neue Ära der Lichterzeugung eingeläutet. Obwohl sie nur geringfügig heller als die damals üblichen Gaslampen war – diese hatten durch die Erfindung des Glühstrumpfes durch Auer von Welsbach eben einen grossen Sprung nach vorne getan –, war der Siegeszug des elektrischen Lichtes nicht mehr aufzuhalten. Dies lag zum einen daran, dass elektrischer Strom im Vergleich zu Gas leicht zu vertei-

len und zu handhaben war, wegen der Abwesenheit von brennbaren Gasen niedriges Feuer- und Unfallrisiko in sich barg und während der Lichterzeugung kein Sauerstoff verbraucht und keine Abgase generiert wurden, was speziell in geschlossenen Räumen das Wohlbefinden des Menschen beeinträchtigt, und zum anderen daran, dass die Lichtausbeute von anfänglichen 1,5 lm/W durch die Verwendung von Wolframglühfäden anstelle von Kohlefäden relativ schnell über 10 lm/W bis auf maximal 15 lm/W gesteigert und die Herstellkosten der Glühbirne in kurzer Zeit deutlich abgesenkt werden konnten. **Mit der Erfindung der Glühlampe wurde gleichsam das Feuer für die Lichterzeugung domestiziert.**

Die Steigerung der Lichtausbeute stagnierte über viele Jahre, da der Wolframdraht, die thermische Lichtquelle, nicht über 3000°C erhitzt werden konnte und Materialien, die bei höheren Temperaturen betrieben werden konnten, nicht gefunden wurden. Dies bedeutete, dass der Wirkungsgrad bei vernünftigen Lebensdauern der Lampen (ca. 1000 h) nicht wesentlich über 6%-8% hinaus gesteigert werden konnte. Erst in den fünfziger Jahren gelang es durch Zusatz von Halogenen in das Schutzgas die Lichtausbeute um mehr als 50% zu steigern und die Lebensdauer der Lampen zu verdoppeln. Die Halogene binden das abdampfende Wolfram und führen es über eine Transportreaktion der Wendel wieder zu und erhöhen dadurch deren Lebensdauer. Sie verhindern gleichzeitig den Niederschlag von Wolfram auf den „kalten“ Glaswänden und die daraus resultierende Absorption des Lichtes. Halogenlampen brauchen daher nur einen wesentlich kleineren Glaskörper. Das geringere Lampenvolumen macht die Füllung mit teuren Edelgasen wirtschaftlich möglich, welche wiederum eine deutliche Verbesserung der Lampenparameter mit sich bringt.

Mit einem dielektrischen Bandfilter auf der Innenseite des Glaskörpers, das den sichtbaren Anteil an der erzeugten Strahlung durchlässt und den hohen IR-Anteil zur Wendel zurückreflektiert, also recycelt, konnte eine weitere Effizienzsteigerung um 30% erreicht werden. Die grosstechnische Umsetzung dieser Technologie war eine enorme Herausforderung für Ingenieure und Techniker.

Die Halogenlampe hat sich wegen ihrer hohen Effizienz, ihrer guten Farbwiedergabe und Kompaktheit eine breite Anwendung in der Allgemeinbeleuchtung erobert.

3. Gasentladung

Feuer und Blitz haftete in der Mythologie immer etwas Göttliches an. In der griechischen Mythologie hat Prometheus den Menschen das Feuer gebracht und ist dafür schwer bestraft worden. Für den Blitz war der Göttervater Zeus, der Blitzeschleuderer mit Beinamen, selbst zuständig. Der leuchtende Blitz faszinierte und machte Angst zugleich.

Letztere war aber mit Sicherheit nicht der Grund, warum es relativ lange gedauert hat, bis man die Gasentladung, **den domestizierten Blitz also**, im grossen Stil für die Lichterzeugung

nutzten konnte. Denn bereits um 1750 – also mehr als 100 Jahre vor der Erfindung der Glühlampe – konnte man in wissenschaftlichen Zirkeln Gasentladungslampen bestaunen (1). Es fehlten jedoch zu jener Zeit einfach die geeigneten Strom- bzw. Spannungsquellen zum Betrieb der Lampen, die eine Weiterentwicklung begünstigt und sinnvoll gemacht hätten.

Der an Luft frei brennende Kohlelichtbogen wurde schon relativ früh neben der Glühlampe zur Lichterzeugung eingesetzt. Die Wartung und Sicherheitsvorkehrungen für diese Lichtquelle waren jedoch sehr aufwendig, so dass sie keine breite Anwendung und Weiterentwicklung fand.

Erst ab Anfang der dreissiger Jahre wurde intensiv an der **Niederdruckgasentladung in Verbindung mit Leuchtstoffen** (Phosphore) zur Lichterzeugung gearbeitet. Wirtschaftliche Bedeutung erlangte sie in Europa aber erst nach dem 2. Weltkrieg. In einer Quecksilbergasentladung wird etwa 70% der elektrischen Energie in optische Energie umgewandelt und zwar in Strahlung von 254 nm und 185 nm Wellenlänge. Die Photonen dieser Wellenlänge werden mittels Leuchtstoffe auf dem Glaskörper in Photonen des sichtbaren Spektrums umgewandelt. Die Energiedifferenz, d.h. mehr als die Hälfte der Energie, wird in Wärme umgewandelt und ist für die Lichterzeugung verloren. Den Wirkungsgrad einer Lampe bestimmen in hohem Mass die verwendeten Leuchtstoffe. Mit Silikatleuchtstoffen wurden bereits 1940 40 lm/W erreicht. Heute werden dank der Leuchtstoffe aus Seltenen Erden und elektronischen Vorschaltgeräten Lichtausbeuten bei Leuchtstofflampen von 75-90 lm/W erreicht. Gelänge es, Leuchtstoffe zu entwickeln, die statt ein Photon zwei Photonen im sichtbaren Spektralbereich aus einem kurzwelligeren Photon machten – energetisch ist dies möglich – so führte das zu einem Wirkungsgrad an die 60%.

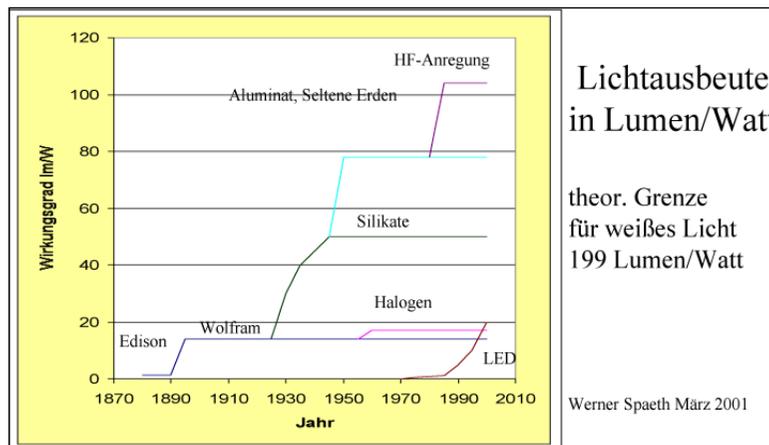


Abbildung 1: Entwicklung der Lichtsteigerung

Neben der Niederdruckgasentladung wird in grossem Umfang die **Hochdruckgasentladung** zur Erzeugung von Licht eingesetzt. Als Füllgas werden z.B. Metallhalide wie Scandiumiodid, Natriumiodid und Iodide der Seltenen Erden verwendet. Diese Lampen sind sehr kompakt, erreichen knapp 60 lm/W, also etwa den Faktor 5 im Vergleich zu einer Standardglühlampe, emittieren im Wesentlichen im sichtbaren Spektralbereich und erreichen Lebensdauern von über 6000 h. Diese Lampen haben einen sehr kleinen Leuchtfleck und können daher mittels reflektiven oder/und transmissiven Optiken gut kollimiert oder fokussiert werden. Sie werden heute in der Allgemeinbeleuchtung, mit grossem Vorteil im Autoscheinwerfer – bessere Strahlqualität bei geringerem Energieverbrauch –, in Projektoren und in vielen anderen technischen Geräten eingesetzt (2).

4. Halbleiterlichtquellen

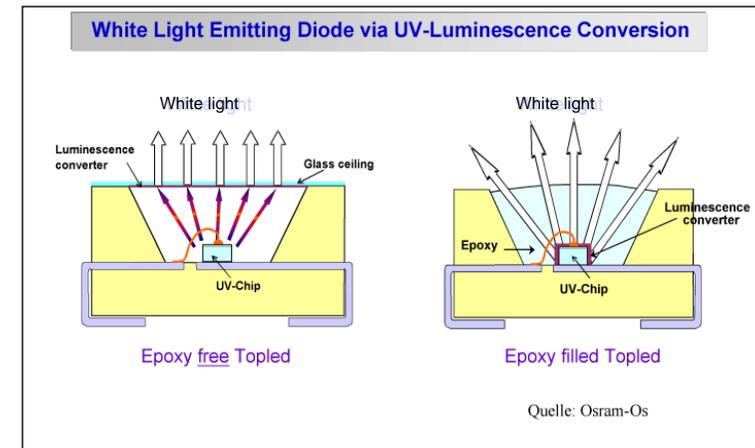


Abbildung 2: Lichtsteigerung bei Halbleiterlichtquellen

Luminiszenzdioden (LED) sind Halbleiterdioden aus sog. III-V-Halbleitern, wie den binären Halbleitern GaAs, GaP, den ternären und quaternären Halbleitern GaAsP, GaAlAs, InGaAlP usw.. Diese wurden bereits 1952 von Welker in den Forschungslaboratorien von Siemens in Erlangen erfunden. Es dauerte allerdings bis Anfang der 70-iger Jahre des vorigen Jahrhunderts, bis nennenswerte Lichtausbeuten mit solchen Halbleiterdioden erzielt wurden. Der ternäre Halbleiter GaAsP und der binäre Halbleiter GaP:N waren die ersten Halbleitersysteme, mit denen rot und gelbgrün leuchtende LED hergestellt werden konnten. Die im Infraroten strahlenden GaAs-Dioden gab es bereits Ende der 60-iger Jahre mit Wirkungsgraden deutlich über 10%. Sie fanden Anwendung in Lichtschranken, Optokopplern und ab Mitte der 70-iger Jahre in der Infrarotfernsteuerung (TV Remote), die ihren Ursprung in Deutschland hatte und sich weltweit durchsetzte.

Die LED haben in den letzten Jahren in der Lichtausbeute dank moderner Epitaxieverfahren und Chiptechnologie einen enormen Sprung nach vorne gemacht. Technologischer Treiber war der Halbleiterlaser, eine Schlüsselkomponente der optischen Datenspeicherung und Datenübertragung. Mit dem GaN ist ein neues Halbleitermaterial hinzugekommen, mit dem man effizient blau- und grünleuchtende LED herstellen kann. In Europa wurden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an diesem Material Ende der 70-iger Jahre aufgegeben, weil man keine Möglichkeit sah, GaN p-leitend zu dotieren und somit eine pn-Diode mit diesem Material zu machen. In Japan wurden die Arbeiten jedoch weitergeführt und Amano und Asaki (3) gelang es dann 1989 einen p/n-Übergang in GaN herzustellen. Die ersten effizienten InGaN-blauleuchtenden LED wurden 1994 und 1995 von Nakamura (4) bei Nichia Chemical demonstriert.

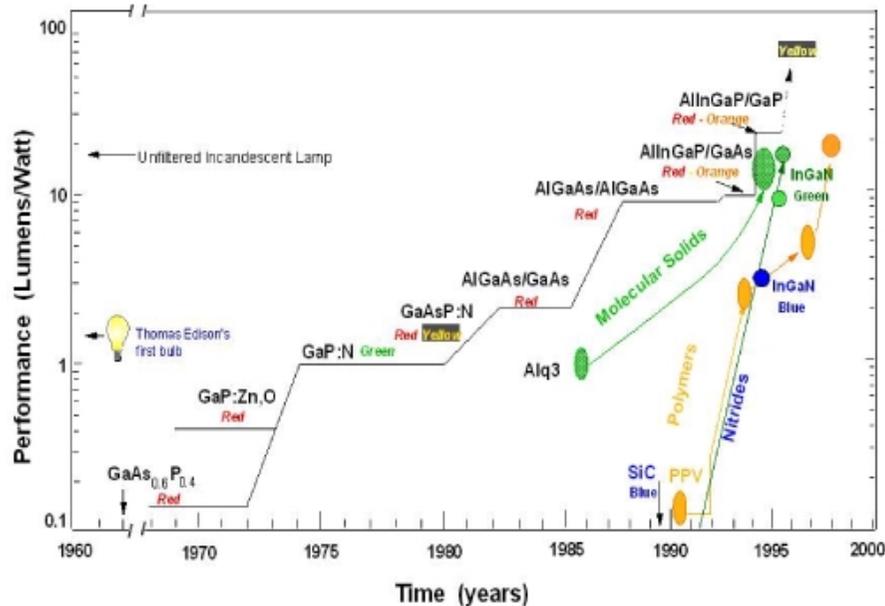


Abbildung 3: Rapid Advancement in Cutting Edge Technology

Mit den Materialsystemen InGaAlP auf GaAs- und InGaN auf SiC- oder Saphirsubstrat ist man in der Lage hocheffiziente LED herzustellen, die das gesamte sichtbare Spektrum vom Violett-blau bis hin zu Rot abdecken.

LED haben mittlerweile eine breite Anwendung gefunden. Bis zu 300 LED sind heute z.B. in einem Auto. Sie werden dort als Signallämpchen, als Hinterleuchtung für LCD oder als drittes Bremslicht verwendet. Die LED hilft Platz, Energie und Kosten sparen. Auch das Handy kommt nicht mehr ohne LED-Hinterleuchtung aus. Vollfarbige Grossdisplays und Verkehrsinformationssysteme nutzen die LED als Lichtquelle.

Für eine Reihe von Anwendungen ist eine weisse LED von grossem Interesse. Dies sind Anwendungen, bei denen alle Vorteile der LED, wie hohe Lebensdauer, mechanische Stabilität, geringe Grösse und Gewicht, Dimm- und Modulierbarkeit, einfache Montage auf Leiterplatte ähnlich einem Si-Standardhalbleiterbauteil und damit einfache Verteilung der verschieden farbigen Lichtquellen über eine Fläche. Um Weisslicht zu erzeugen, regt man in einer LED mit einer blau leuchtenden Diode einen Leuchtstoff zur Gelbemission an. Durch geeignete Mischung des blauen Primärlichtes der Diode und der Gelbemission des Farbstoffes, die im Wesentlichen durch die Konzentration des Leuchtstoffes im Gießharz bestimmt wird, kann man Weisslicht allerdings wegen des Fehlens des Rotanteils mit einer sehr hohen Farbtemperatur von 6000 K erzeugen. Man erreicht heute Lichtausbeuten bei 20 mA Betriebsstrom von etwa 20 lm/W. Werte in der Grössenordnung von 50 lm/W scheinen in absehbarer Zeit möglich.

5. Organische LED

Leuchtdioden aus organischen Materialien werden künftig sehr flache Lichtquellen ermöglichen. Die Entwicklung befindet sich derzeit noch am Beginn der industriellen Lernkurve. Die Lichtausbeute für farbige Ausführungen erreicht heute etwa 25-30 lm/W (weiss <10 lm/W). Sie wird derzeit durch Displayanwendungen getrieben. Für die Zukunft sehr interessant ist der Einsatz grossflächiger lichtemittierender Folien als Raumlichtquellen, die auch in gekrümmten Flächen verlegt werden können. Zur Erreichung dieses Zieles sind allerdings noch erhebliche Entwicklungsarbeiten bei den funktionalen Schichten und beim Packaging notwendig und Fragen zur Langzeitstabilität zu klären.

6. Licht in der Informations- und Kommunikationstechnik

Dass Licht mehr kann als die Dunkelheit vertreiben, erleben wir heute in der Informations- und Kommunikationstechnik

Mit Licht kommunizieren ist keine Erfindung unserer Zeit. Schon seit alters her nutzt der Mensch Licht als Kommunikationsmittel. Mit Rauch-, Feuer- und Flaggenzeichen konnten grosse Entfernungen schnell überwunden werden. Der Fall Trojas z.B. wurde mit Feuerzeichen nach Griechenland übermittelt (5). Die Griechen konnten später mit einem ausgetüftelten Code das ganze Alphabet optisch übertragen (6). Diese Technik wurde von den Römern

nicht genutzt und geriet in Vergessenheit. Erst der französische Abbé Claude Chappe hat in der Neuzeit (1791-1792) (7) wieder ein optisches Übertragungsverfahren vorgeschlagen, nämlich den Balkentelegraphen, dessen strategische Bedeutung Napoleon schnell erkannte und daher dessen Ausbau forcierte.

Aber all diesen Verfahren haftete der grosse Nachteil an, dass der relativ "langsame" Mensch direkt als Sender und Empfänger wirkte und die Atmosphäre als Übertragungsmedium diente, dessen Transparenz vom Wetter abhängt. Dies war auch der Grund, warum sich elektrische Übertragungsverfahren früher durchgesetzt haben als optische, obwohl der Mensch naturgemäß mit dem Licht mehr vertraut war als mit Elektrizität und Radiowellen. Erst durch Erfindung bzw. Entwicklung von **Optoelektronischen Sende- und Empfängerbauelementen**, insbesondere die des **Halbleiterlasers** und von **Glasfasern mit geringer Dämpfung und Dispersion** als Übertragungsmedium wurde das Tor für die **Kommunikation mit Licht** aufgestossen. Damit verfügt man über die drei Grundkomponenten für eine optische Datenübertragung. Eine zentrale Bedeutung für die Kommunikation mit Licht kommt dem Laser zu; denn er ist nicht nur Schlüsselkomponente für die optische Datenübertragung und die optische Datenspeicherung (CD = Compact Disk und DVD = Digital Versatile Disk), sondern wird künftig auch in der Visualisierung von Daten, also in der Displaytechnik, eine wichtige Rolle als Lichtquelle hoher Strahlqualität spielen.

6.1 Optische Datenübertragung

Die Datenübertragung ist heute schon in grossem Umfang eine Domäne des Lichtes, also der Lichtquanten bzw. Photonen sein. Photonen lassen sich praktisch nicht wie die Elektronen von Störfeldern beeinflussen und treten praktisch nicht in Wechselwirkung. Diese Eigenschaften machen sie zu idealen Datentransporteurern.

Photonen transportieren schon heute mehr als 90% der Datenmengen über das Glasfaserfernetz in Deutschland. Ähnlich hoch ist dieser Anteil auch in den anderen Industrieländern. Diese Datenmengen werden in den nächsten Jahren allein durch den Internetverkehr exponentiell ansteigen. Der Telefonverkehr wird dann in etwa 10 Jahren nur noch 5% des gesamten Datenverkehrs ausmachen. Heute liegen beide bei etwa bei 40 Tausend Terabyte pro Monat. Der Transport dieser Datenmengen ist praktisch nur noch mit optischen Übertragungstechniken zu bewältigen. Die Standardglasfaser ist mit 30 Mio km der meistverlegte Lichtwellenleiter weltweit. Es handelt sich hier um eine singlemodige Stufenindexfaser mit einem äusseren Durchmesser von 125 μm und einem Kern von 9 μm und einer numerischen Apertur von 0,1, das etwa einem Akzeptanzwinkel der Faserr von 6° entspricht. Strahlen mit einem grösseren Divergenzwinkel werden in der Faser nicht mehr geführt und leisten damit keinen Beitrag zum Übertragungssignal. Es war viel Entwicklungsarbeit notwendig, um eine effiziente und vor allen Dingen stabile Kopplung zwischen Laser und Faser im Temperaturbereich von -40° und $+85^\circ$ C zu erreichen. Lateralverschiebungen zwischen Laser und Faser von we-

niger als einem Mikrometer führen in der Regel schon zu deutlichen Koppelverlusten. Daher gibt es noch eine Reihe anderer Fasertypen, wie die multimodige Gradienten- und Stufenindexfaser, die wesentlich toleranter bezüglich der optischen Kopplung sind, weil deren numerische Apertur und deren Kern um ein Vielfaches grösser sind als bei der Standardfaser (bei Plastikfasern z.B. bis zu einem Faktor 100 grösserer Kerndurchmesser). Diesen Vorteil bezahlt man allerdings mit deutlich schlechteren Übertragungseigenschaften, was aber bei kurzen Übertragungsstrecken und niedrigeren Bitraten in der Regel keine Rolle spielt.

In einem guten Übertragungssystem reichen in der Regel 1000 Photonen (Energieinhalt weniger als 1000 eV) pro Bit am Empfänger aus, um Daten mit einer Fehlerrate (Biterrorrate = BER) von 1 Fehler pro 1 Milliarde Bits übertragen zu können. Bei einem idealen Empfänger würden bereits 10 Photonen für diese Übertragungsqualität, die Standardqualität in unseren Festnetzen, ausreichen. Wie viel Photonen pro Bit am Anfang einer Übertragungstrecke nun wirklich auf die Reise geschickt werden müssen, hängt von den Verlusten auf der Strecke ab. Diese werden mit dem Dämpfungskoeffizienten angegeben. Er beträgt für Licht von einer Wellenlänge von 1300 nm etwa 0,3 dB/km und für Licht von einer Wellenlänge von 1550 nm etwa 0,16 dB/km. Das bedeutet, dass bei 1550 nm das in die Faser eingekoppelte Licht nach 100 km noch 2,5% der Anfangsintensität hat. Für ein Bit sind also 40 Tausend Photonen am Fasereingang einzukoppeln, damit die 1000 erforderlichen Photonen am Empfänger ankommen. Das Verhältnis der Intensität am Eingang zur Intensität am Ausgang der Faser ist vergleichbar dem Verhältnis Beleuchtung durch die Mittagssonne im Sommer zu einer elektrischen Raumbeleuchtung. Bei normalem Fensterglas wird diese Intensitätsabnahme bereits bei einigen Metern Glasdicke erreicht. Daraus kann man ermesen, welche Reinheit und Perfektion die Glasfaser haben muss, um diese niedrigen Dämpfungswerte zu erreichen. Die Glasfaser, die im wesentlichen aus Quarz, also Silizium und Sauerstoff besteht, den in der Erdkruste am häufigsten vorkommenden Elementen, hat sehr stark von der Herstellung des Siliziums, dem Substratmaterial für die Mikroelektronikbauelemente (den "Chips") profitiert. Diese Technik hat übrigens ihren Ursprung in Deutschland.

Die einzelnen Bits werden in Form von Lichtimpulsen einer definierten Höhe und zeitlichen Halbwertsbreite in die Faser eingespeist. Deren Höhe und damit deren Energieinhalt nimmt aufgrund der Dämpfung über die Streckenlänge ab, wie oben dargelegt wurde. Deren Breite dagegen nimmt je nach Schwerpunktswellenlänge und spektraler Breite des Lichtimpulses aufgrund der Dispersion zu, so dass nach einer bestimmten Strecke die einzelnen Pulse ineinander laufen und vom Empfänger nicht mehr als Einzelimpulse erkannt werden. Man spricht dann von Dispersionsbegrenzung. Für die Standardfaser beträgt die Dispersion bei 1300 nm etwa 1 ps/km-nm und bei 1550 nm 17 ps/km-nm. Um die geringere Dämpfung bei 1550 nm auch bei sehr hohen Bitraten nutzen zu können, verwendet man daher als Lichtquelle Halbleiterlaser mit sehr schmalen Spektrum ($< 1\text{nm}$). Mit Solitonen- das sind Photonenpakete, die über nichtlineare Wechselwirkung mit dem Übertragungsmedium, der Faser also, als Paket zusammengehalten werden, hat man rein optische Übertragungsstrecken von mehr als 10000 km realisiert. Die Dämpfungsverluste hat man über Faserverstärker wieder ausgeglichen. Das

Soliton kann man sich als eine Art Reigentanzgruppe von Photonen vorstellen, die mit Lichtgeschwindigkeit durch die Faser tanzt, und deren Mitglieder durch interne und externe Wechselwirkungen zusammengehalten werden.

Die nutzbare Bandbreite der Glasfaser beträgt im Wellenlängenbereich von 1250 nm bis 1600 nm 50 THz. Heute werden die meisten Weitverkehrssysteme noch bei einer Bitrate von 2,4 Gbit/sec betrieben, was der Übertragungskapazität von 30 Tausend Telefonkanälen entspricht. Es stecken also im bereits verlegten Fasernetz noch ungeheure Reserven.

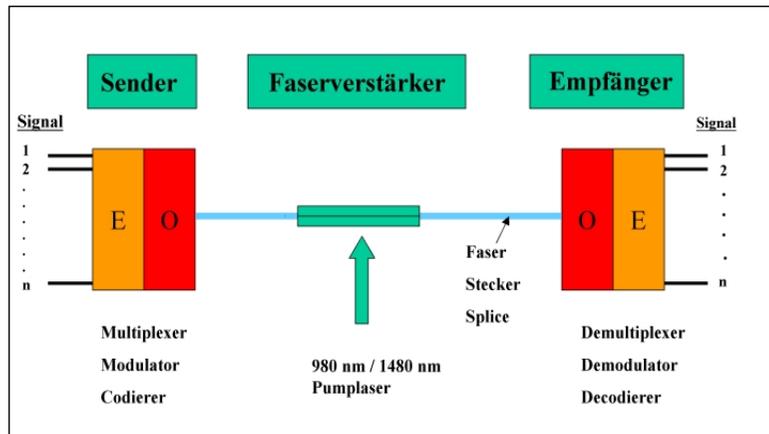


Abbildung 4: Optische Übertragungsstrecke – Weitverkehr

Abb.4 zeigt eine optische Übertragungsstrecke. Die aus den parallelen elektrischen Leitungen ankommenden Bitströme werden in so genannten **ATM- Multiplexern** (= Asynchronous Transfer Mode) in gleich grosse Bitpakete von 53 Bytes "zerlegt". 48 Bytes enthalten die Nutzinformation und 5 Bytes die Adresse für den Empfänger, ähnlich wie bei einem Brief. Diese Bitpakete werden elektronisch zeitlich so ineinander verschachtelt, dass sie als serielle Bitströme von dem optischen Wandler auf die Faser geschickt werden. Man nennt dieses Verfahren **Time- Division- Multiplexing**. Am Ausgang der Faser werden sie elektronisch wieder in die einzelnen Bitpakete zerlegt und weitergeleitet.

Die Glasfaserstrecke selbst enthält einen optischen Verstärker, der mit Halbleiterlasern der Wellenlänge 1460 nm oder 980 nm gepumpt wird. Auf diese Weise kann die optische Übertragungsstrecke je nach Verstärkung bis zu einem Faktor zwei und mehr vergrößert werden. Diese Verstärker gibt es heute nur für 1500 nm. Es wird jedoch intensiv an Verstärkern für einen grösseren Wellenlängenbereich geforscht.

Um die Übertragungskapazität der Faser besser zu nutzen, wird die Bitrate Zug um Zug erhöht. Das nächste kommerzielle System wird eine Bitrate von 10 GBit/s haben. Im Labor experimentiert man bereits mit 40 Gbit/s und mehr. Der andere Weg ist, Lichtimpulse verschiedener Wellenlänge für die Übertragung zu verwenden. Wie man das weisse Sonnenlicht z.B. mit einem Prisma in einzelne Spektralfarben aufspalten kann – ist am Regenbogen in der Natur zu beobachten – und diese Spektralfarben mit ebenso einem Prisma wieder zu weissem Licht zusammenfügen kann, so kann man das auch mit infrarotem Licht. Wählt man Sender mit schmaler spektraler Breite aus, so dass die Wellenlängenbereiche des emittierten Lichtes der einzelnen Sender nicht überlappen, so kann man das Licht dieser Wellenlängenbereiche z.B. mit einem Prisma – es gibt aber auch eine Reihe anderer Methoden – zusammenführen und in die Faser einkoppeln. Am Ausgang der Faser wird dieses "Mischlicht" wieder in die einzelnen Wellenlängenbereiche oder anschaulicher in die einzelnen Farben zerlegt und den zugehörigen Empfängern zugeführt. Die Faser ist gleichsam ein Tunnel mit separaten Gleisen für die einzelnen "Farbenzüge", die sich gegenseitig nicht beeinflussen und nicht stören und von denen jeder mit einer anderen Bitrate beladen sein kann. Man nennt diese Methode Wellenlängenmultiplexen oder englisch **Wavelength Division Multiplexing (WDM)**. Liegen die Wellenlängenbereiche sehr dicht beieinander und sind schmal, so spricht man von **Densed Wavelength Division Multiplexing (DWDM)**. Der Vorteil ist sofort sichtbar. Die Übertragungskapazität erhöht sich proportional der Anzahl der verwendeten Wellenlängenbereiche. Man braucht im Prinzip nur Sender entsprechender Wellenlänge und WDM-Bausteine am Ein- und Ausgang der Faser. Die Elektronik ist bei allen die gleiche. Es wurden mit Hilfe dieser Technik Übertragungsstrecken von 240 km Länge mit einer Übertragungskapazität von 3,2 Tbit/s realisiert worden (8). Das entspricht einer Übertragungskapazität von 40 Mio Telefonkanälen. Mittlerweile liegt der Rekord über 7 Tbit/s und einer Streckenlänge von 80 km. Kommerziell wird es demnächst Systeme mit einer Übertragungskapazität von 160 x 10 Gbit/s, also 1,6 Tbit/s, und einer Streckenlänge von 80 km geben (9).

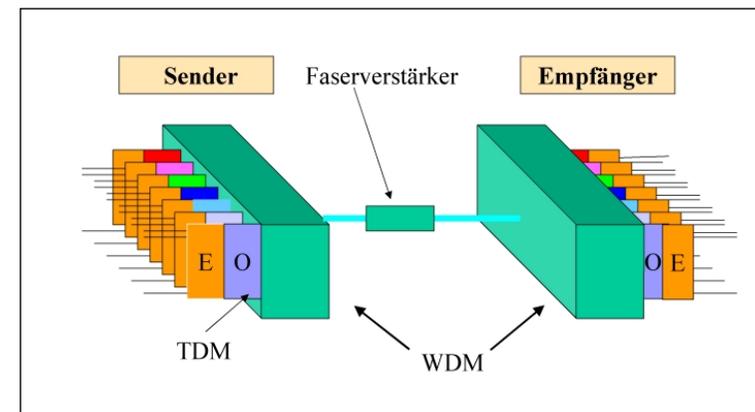


Abbildung 5: WDM-Übertragungssystem

Aber auch über kurze Strecken werden Zug um Zug optische Netze den Datentransport übernehmen. Bei Grossrechnern ist die optische Datenübertragung schon seit mehr als zehn Jahren Stand der Technik. Selbst im Auto wird künftig der Datentransport über Fasern erfolgen, da die Bandbreite der Kupfernetze für die moderne Autoelektronik nicht mehr ausreichend und störsicher genug ist. Neben der höheren Zuverlässigkeit erreicht man damit auch eine Gewichtreduzierung des Autos.

6.2 Optische Datenspeicherung

Die Datenspeicherung hat im Hinblick auf Qualität, Menge und Kosten durch die Nutzung der Photonen einen gewaltigen Sprung nach vorne gemacht. Kostengünstige Halbleiterlaser waren die Voraussetzung für den Siegeszug der CD und werden es auch für DVD sein, die seit kurzem auf dem Markt ist und die dank des rot statt infrarot strahlenden Lasers wegen des kleineren Leuchtfleckes eine Speicherkapazität von knapp fünf Gigabyte hat, also fast das Zehnfache der CD. Mit dem blauemittierenden Halbleiterlaser, dessen Entwicklung weltweit vorangetrieben wird, lässt sich diese Kapazität nochmals vervierfachen. Selbst die magnetische Datenaufzeichnung steht längerfristig vor einem Wandel; denn die magnetischen Domänen sind nur bis zu einer bestimmten Grösse stabil (supermagnetischer Effekt). Für die Überwindung dieser physikalischen Grenze bzw. Steigerung der Flächenspeicherdichte gilt die magneto-optische Nahfeldspeicherung als aussichtsreiches Konzept. Sie lässt eine Speicherkapazität von 100 Gigabyte pro Disk erwarten.

6.3 Visualisierung

Der Mensch kann mit seinen Augen etwa 200 Mbit/s an Information aufnehmen, Grössenordnungen mehr als mit den Ohren. Daher kommt der Visualisierung von Information in der modernen Gesellschaft eine eminent wichtige Grundaufgabe zu. Neben der klassischen Kathodenstrahlröhre und dem Flüssigkristall-Bildschirm werden künftig Projektionsgeräte, wie Beamer mit LCD- oder Digitalspiegel- Bildgeber (DMD = Digital- Mirror- Device) und Raster-Systeme (Flying- Spot) für die optische Darbietung von Information enorm an Bedeutung gewinnen. Kompakte, hocheffiziente Lichtquellen sind die Basis für diese Geräte. Bei letzteren erfolgt die Bilderzeugung durch Ablenkung eines modulierten Rot-Grün-Blau(RGB)- Laserstrahles mittels eines bewegten Spiegels. Selbst in Autos werden künftig ähnlich wie in Flugzeugen Bildinformationen in die Windschutzscheibe projiziert, so dass der Fahrer beim Lesen der Information den Kopf nicht mehr bewegen und die Augen nicht mehr adaptieren braucht. Hier werden ebenfalls kompakte, hocheffiziente Lichtquellen, nämlich Halbleiterlichtquellen verwendet.

7. Schlussbemerkung

Das elektrische Licht hat wesentlich zu unserem technischen Fortschritt beigetragen und war ein Wegbereiter für das Industrie- und Informationszeitalter. Ausreichend Licht zu jeder Tageszeit machte es möglich, unabhängig vom Sonnenlicht zu arbeiten, Industrieanlagen länger und damit das investierte Kapital besser zu nutzen. Elektrisches Licht machte es möglich, Informationen in grossen Mengen kostengünstig zu übertragen, zu visualisieren und zu speichern. Elektrisches Licht wird in vielen modernen industriellen Prozessen, wie der Photolithographie, einer Schlüsseltechnologie in der Halbleiterfertigung, in der Analytik und in vielem mehr genutzt. Elektrisches Licht war und ist eine Voraussetzung für die Produktivitätssteigerung in unserem Wirtschaftsleben und eine Stütze unseres Wohlstandes.

Literatur

- (1) Physik – Themen, Bedeutung und Perspektiven physikalischer Forschung: Denkschrift zum Jahr der Physik; ein Bericht an Gesellschaft, Politik und Industrie, Hrsg. DPG. Markus Schwoerer, Bad Honnef, Dt. Physikalische Ges., 2000
- (2) Dieter Hofmann, Reinhard Weitzel, Siemens Review – R&D Special – Fall 1995 „More Light from Less Power“
- (3) H. Amano, M. Kitho, K. Hiratsuka, I. Akasaki: Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) 2112
- (4) S. Nakamura, T. Mukai, M. Seoh, Phys. Lett. 64 (1994) 1687
- (5) Aischylos: Tragödien und Fragmente, Ernst Heimeran Verlag, München 1959
- (6) Vegetius: Epitoma rei militari; B. G. Teubner Verlag Stuttgart 1967
- (7) F. Klemm: Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte 45 (1977) 1
- (8) A. Färbert, A. Schöpflin, A. Richter, C.-J. Weiske, K. Kotten, P. M. Krummrich, A. Schex, C. Glingener and D. Chen, S. Wheeler, D. Nguyen OFC 2001, Proceedings PD - 36 Anaheim (2001)
- (9) A. Färbert, G. Mohs, S. Spälter, J.-P. Elbers, C. Fürst, A. Schöpflin, E. Gottwald, C. S. Scheerer, C. Glingener Ecoc 200, Proceedings PD - 1.3, Munich (2000)
- (10) Siemens, ICN

ANSCHRIFTEN DER VORTRAGENDEN UND DES HERAUSGEBERS

Christoph Bals,
GERMANWATCH e.V.
Kaiserstrasse 201
D-53113 Bonn
e-mail: Bals@germanwatch.de

Prof. Dr. Walter Blum
Max-Planck-Institut für Physik
(Werner Heisenberg Institut)
Föhringer Ring 6
D-80805 München
und:
EP Division, CERN
CH-1211 Genf 23
e-mail: Walter.Blum@cern.ch

Dr. Ing. Harald Bradke
Fraunhofer Institut für Systemtechnik
Breslauer Strasse 48
D-76139 Karlsruhe
e-mail: Harald.Bradke@isi.fhg.de

Prof. Karl Ehrlich
(vormals Leiter der Abteilung Metallische Werkstoffe)
Forschungszentrum Karlsruhe
Postfach 3640
D-76021 Karlsruhe

Augustin J. McEvoy
Laboratory for Photonics and Interfaces,
Department of Chemistry,
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,
CH-1015 Lausanne, Switzerland.
e-mail: augustin.mcevoy@epfl.ch

Prof. Dr. Jochen Fricke
Physikalisches Institut der Universität Würzburg und ZAE
Am Hubland
D-97074 Würzburg
e-mail: Fricke.Jochen@zae.uni-wuerzburg.de

Eike Gelfort
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Heinemannstrasse 2
D-53175 Bonn
e-mail: e.gelfort@gmx.de

Dr. Helmuth-Michael Groscurth
Hamburgische Elektrizitäts-Werke AG (HEW)
Überseering 12
D-22297 Hamburg
e-mail: groscurth.ekz@hew.de

Dr. Thomas Hamacher
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Boltzmannstr. 2
D-85748 Garching
e-mail: Thomas.Hamacher@ipp.mpg.de

Dr. Rudolf Henne
Institut für Technische Thermodynamik (DLR)
Pfaffenwaldring 38-40
D-70569 Stuttgart
e-mail: rudolf.henne@dlr.de

Dr. Gerhard Isenberg
DaimlerChrysler AG
Forschung und Technologie
Wilhelm Runge Strasse 11
D-89081 Ulm
e-mail: gerhard.isenberg@DaimlerChrysler.com

Prof. Peter Kehrler
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
D-30655 Hannover
e-mail: Peter.Kehrler@bgr.de

Dr. Christoph Krupp
Umweltbehörde
D-20539 Hamburg
e-mail: Christoph.Krupp@ub.hamburg.de

Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese
Institut für Meteorologie und Geophysik
Postfach 11 19 32
D-60054 Frankfurt a. M.
e-mail: schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de

Dr. Werner Späth
OSRAM Opto-Semiconductors
Wernerwerkstrasse 2
D-93049 Regensburg
e-mail: w.f.spaeth@t-online.de

