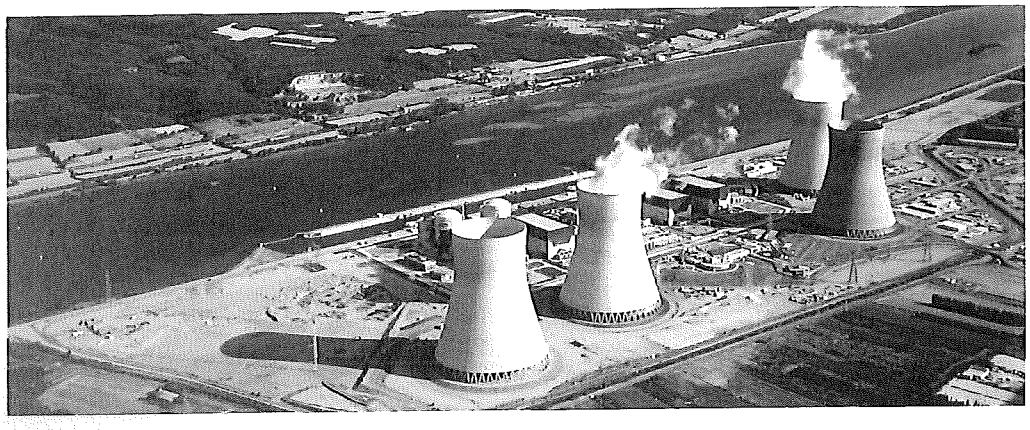
Forschungszentrum Jülich

J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, K. Kugeler,
W. Pfaffenberger, H.-J. Wagner (Hrsg.)

Energieforschung 1998



Vorlesungsmanuskripte

RWTH Aachen
Universität-GH Essen
Universität Oldenburg

Energietechnik
Energy Technology

Schriften des Forschungszentrum Jülich
Reihe Energietechnik / Energy Technology Band 3

Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung

Jürgen-Friedrich Hake, Wilhelm Kuckshinrichs, Kurt Kugeler,
Wolfgang Pfaffenberger, Hermann-Josef Wagner (Hrsg.)

Energieforschung 1998

Vorlesungsmanuskripte des 4. Ferienkurses „Energieforschung" vom 20. bis 26. September 1998 im Congrescentrum Rolduc und im Forschungszentrum Jülich.

Der Ferienkurs wurde in Zusammenarbeit mit der

- Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
  (Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik)
- Universität-Gesamthochschule Essen
  (Lehrstuhl für Ökologisch verträgliche Energiewirtschaft)
- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
  (Lehrstuhl für Volkswirtschaft / Allgemeine Wirtschaftspolitik)

veranstaltet.

Schriften des Forschungszentrum Jülich
Reihe Energietechnik / Energy Technology Band 3

ISSN 1433-5522 ISBN 3-89336-226-6

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Energieforschung 1998 : Vorlesungsmanuskripte des 4. Ferienkurses „Energieforschung" vom 20. bis 26. September 1998 im Congrescentrum Rolduc und im Forschungszentrum Jülich / der Ferienkurs wurde in Zusammenarbeit mit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik) ... veranst. Hrsg. von Hake, Jürgen-Friedrich ... - Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 1998
(Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Energietechnik / Energy Technology ; Vol. 3)
ISBN 3-89336-226-6

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

Umschlaggestaltung: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

© Forschungszentrum Jülich 1998

Gedruckt auf 100% chlorfrei gebleichtem Papier.

Schriften des Forschungszentrum Jülich
Reihe Energietechnik / Energy Technology, Band 3

ISSN 1433-5522
ISBN 3-89336-226-6

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

Inhalt

Vorwort 1

Energietechnik 3

Die weltweiten Reserven der Energierohstoffe: Mangel oder Überfluß ? 5
W. Stahl, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Genese und Exploration fossiler Energieträger 21
R. Littke, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Grundlagen der Energietechnik 33
W. Bitterlich, Universität GH Essen

GuD-Kraftwerke 67
B. Jäger, Technische Universität Berlin

Photovoltaik: steigender Umsatz und fallende Kosten 81
H. Wagner, Forschungszentrum Jülich

Fusionsforschung 93
J. Eidens, G. H. Wolf, Forschungszentrum Jülich

Antriebskonzepte nach 2005 115
K. E. Noreikat, Daimler-Benz AG, Stuttgart

Energiewirtschaft 133

Energie und Wirtschaft 135
J. Grawe, Universität Stuttgart

Konzentration in der Energiewirtschaft 149
T. Schuppe, Universität Köln

Einkauf von Strom und Erdgas: Chancen und Risiken des neuen Rechtsrahmens 165
P. Born, Akzo Nobel Faser AG, Wuppertal

Die Rolle der Braunkohle im Energiemix der Bundesrepublik Deutschland 171
H.-W. Schiffer, Rheinbraun AG, Köln

Energy and labour market 189
W. Pfaffenberger, Bremer Energie-Institut

Ökosteuern 207
W. Ströbele, Universität Münster

Contracting-Modelle als Instrument zur Umsetzung der rationellen Energieverwendung in Nordrhein-Westfalen 215
C. Tögel, Energieagentur NRW, Wuppertal

Kölner Rahmenkonzept einer energiesparenden und umweltschonenden Wärmeversorgung – auf dem Prüfstand im liberalisierten Energiemarkt 223
M. Keiner, GEW Köln AG

Energie und Umwelt 233

Energie und Umwelt 235
H.-J. Wagner, Universität GH Essen

Internationale Klimaschutzpolitik 259
W. Fischer, Forschungszentrum Jülich

Entsorgung 289
R. Odoj, Forschungszentrum Jülich

Umsetzung der EG-Umweltauditverordnung im Versorgungsunternehmen 297
W. Linden, GEW Köln AG

Systemanalyse 305

Politikszenarien für den Klimaschutz 307
P. Markewitz, Forschungszentrum Jülich

Potentiale und Strategien zur Energie- und CO_2-Einsparung im Gebäudebestand 317
M. Kleemann, A. Kraft, R. Heckler, Forschungszentrum Jülich

Emissionsminderung durch Verkehrsverlagerung oder Veränderung von Fahrzeugflotten 351
M. Walbeck, D. Sonnenschein, Forschungszentrum Jülich

Vergleichende Gesamtbetrachtung von PKW-Antrieben und Kraftstoffketten 367
B. Höhlein, Forschungszentrum Jülich

Energie und Gesellschaft 383

Die deutsche Energiewirtschaft im Spannungsfeld von Wettbewerb, Klimaschutz und Gesellschaft 385
J.-Fr. Hake, Forschungszentrum Jülich

Technik- und Umwelteinstellungen in Europa 403
M. Zwick, Akademie für Technikfolgenabschätzung, Stuttgart

Nutzung und Sicherheitsaspekte von Wasserstoff als zukünftigem Energieträger 429
K. Verfondern, Forschungszentrum Jülich

Wahrnehmungsmuster von Sicherheit und technischen Risiken in der Gesellschaft 455
P. Wiedemann, Forschungszentrum Jülich

Beschäftigungseffekte eines europäischen Programms zur Förderung des Exports kohlebasierter Verstromungstechnologien 469
W. Kuckshinrichs, H.-G. Schwarz, J. Müller-Kirchenbauer, Forschungszentrum Jülich

Aktionsprogramm zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen an der Stromversorgung 483
H.-M. Groscurth, W. Bräuer, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Mannheim

Referentinnen und Referenten 495

Vorwort

Energie versetzt Menschen und Maschinen in die Lage, Arbeit zu verrichten. So wird Energie zur Produktion von Gütern, für Transportvorgänge und für Dienstleistungen benötigt. Eine ausreichende, gesicherte, kostengünstige und nicht zuletzt eine umweltfreundliche Versorgung mit Energie ist daher eine wesentliche Grundlage für das Funktionieren eines Gemeinwesens und den erwirtschafteten Wohlstand.

Der 4. Ferienkurs Energieforschung beleuchtet diese Zusammenhänge aus Sicht von Wissenschaft und Forschung, d.h. neuere Entwicklungen stehen im Vordergrund. Die Spannweite der Themen deckt an Hand ausgewählter Beispiele den Fluß der Energie von den Primärenergieträgern bis zu Energiedienstleistungen ab. Auch zukünftige Optionen werden vorgestellt. Dabei werden im Sinne einer möglichst vollständigen Betrachtung technische, ökonomische und ökologische Aspekte angesprochen.

Es ist den Veranstaltern ein besonderes Anliegen, Systemzusammenhänge aufzuzeigen. Darüber hinaus gehen einige Referenten auf gesellschaftliche Prozesse ein, die im Zusammenhang mit der Energiefrage eine Rolle spielen. Innovationen gehören für die Unternehmen der Energiewirtschaft zum Alltag; deshalb freuen wir uns, daß einzelne Unternehmen unsere Einladung angenommen haben und neue Konzepte und ihre Umsetzung in die Praxis diskutieren.

Ein Blick auf die in der Energiewirtschaft gegenwärtig diskutierten Themen zeigt, daß sich nach wie vor beachtliche Veränderungen abzeichnen, die auch die zukünftigen Inhalte von Energieforschung prägen werden:

- Deregulierung und Liberalisierung stehen weiterhin ganz oben auf der Tagesordnung. Nach der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes werden nun Maßnahmen zur Umsetzung wie die Einrichtung einer Energiebörse diskutiert.
- Ressourcenschonung im allgemeinen und Klimaschutz im besonderen haben weiterhin einen hohen Stellenwert. Die Ergebnisse der Konferenz der Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention in Kyoto werden unterschiedlich bewertet. Bei Klimaforschern und Umweltschützern dominieren eher Skepsis und Sorge, während Politiker die erreichten Fortschritte positiv werten.

Der Ferienkurs *Energieforschung* greift diese Punkte auf und versucht, Hintergründe und Zusammenhänge über die Grenzen einzelner Fachgebiete hinweg zu analysieren. Das Programm besteht aus Vorträgen, Diskussionen und Exkursionen. Im Vergleich zu den vorangegangenen Ferienkursen wurde das Programm leicht modifiziert, indem Anregungen aus dem Kreis der Teilnehmer und Referenten aufgegriffen wurden.

Mit dem 4. Ferienkurs Energieforschung wenden sich die Veranstalter erneut an Studierende und jüngere WissenschaftlerInnen auf dem Gebiet *Energieforschung.* Es ist - wie in den vergangenen Jahren - wieder gelungen, namhafte Fachleute als Referenten zu gewinnen. Der Ferienkurs bietet den TeilnehmerInnen die Möglichkeit zu vertiefender Diskussion und zum Gedankenaustausch mit den Referenten. Persönliche Kontakte zu den unterschiedlichen Einrichtungen auf dem Gebiet der Energiewirtschaft und Energieforschung können geknüpft werden.

Der vorliegende Band bietet den TeilnehmerInnen Unterlagen zu den Themen des Ferienkurses. Den Autoren der schriftlichen Beiträge sei für Sorgfalt, Pünktlichkeit und ihr großes Engagement gedankt. Herr Dipl.-Ing. A. Kraft hat mit großer Sorgfalt die redaktionellen Arbeiten durchgeführt.

Der 4. Ferienkurs Energieforschung wurde von folgenden Firmen und Institutionen unbürokratisch und großzügig unterstützt:

- Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke Köln AG (GEW)
- Rheinbraun AG
- Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V. (VDEW)
- Gesellschaft für Energiewissenschaft und Energiepolitik e.V. (GEE)
- Gesellschaft der Freunde und Förderer von Systemforschung e.V. (gste).

Die Veranstalter bedanken sich beim Vorstand des Forschungszentrums Jülich. Er hat wie im Vorjahr die Durchführung des Ferienkurses großzügig unterstützt. Die freundliche Unterstützung des Projekts Kernfusion des Forschungszentrums Jülich ermöglicht einen Einblick in die energietechnische Forschungspraxis. Dank gilt auch dem Tagungsbüro des Forschungszentrums für die Unterstützung bei der organisatorischen Durchführung.

Jülich, September 1998

Jürgen-Friedrich Hake *Wilhelm Kuckshinrichs*

Kurt Kugeler *Wolfgang Pfaffenberger* *Hermann-Josef Wagner*

Energietechnik

Die weltweiten Reserven der Energierohstoffe: Mangel oder Überfluß?

Wolfgang Stahl

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Die Welt verbraucht immer mehr Energie

Die fossilen Energierohstoffe Erdöl, Kohle und Erdgas decken etwa 90% des kommerziellen Primärenergiebedarfs (PEV) der Welt, der 1997 auf 12,8 Mrd. t Steinkohleeinheiten (SKE) oder auf mehr als 8,5 Mrd. Tonnen Öläquivalent angestiegen ist.

1 t SKE = 0.67 t Öl = 850 Nm^3 Erdgas = 2 9.3 x $x10^9$ Joule

1 t Uran (nat.) = 14000 bis 23000 t SKE

Seit Anfang dieses Jahrhunderts ist der prozentuale Anteil der fossilen Energierohstoffe am Energieverbrauch zwar geringfügig, aber stetig zurückgegangen, zunächst bedingt durch Strom aus Wasserkraft, seit den 60er Jahren auch durch Strom aus der Nutzung der Kernkraft. Mengenmäßig hat der Bedarf an fossiler Energie bis 1970 pro Dekade um etwa 50% zugenommen. Danach verlangsamte sich der Anstieg auf 30% und in den 80er Jahren auf 20%. Während der Ölkrise gab es sogar zeitweise einen geringfügigen Rückgang. Anfang der 90er Jahre war infolge der Reformprozesse in den früheren Staatshandelsländern und dem dadurch bedingten drastischen Rückgang des dortigen Energieverbrauchs erneut eine Stagnation zu verzeichnen. Seit 1995 ist ein Anstieg des Primärenergieverbrauchs zu beobachten.

Im Vergleich zum Vorjahr ist 1997 der weltweite Bedarf an Primärenergie um 1% angestiegen.

In diesem Vergleichszeitraum hat der Erdgaskonsum, bedingt durch einen in den Hauptverbraucherländern milden Winter, in etwa stagniert. Der Anteil der Wasserkraft hat prozentual am stärksten zugenommen, der Beitrag der Kernkraft, bei jeweils geringen absoluten Beiträgen zum Gesamtenergiebedarf, am stärksten abgenommen (Abb.1).

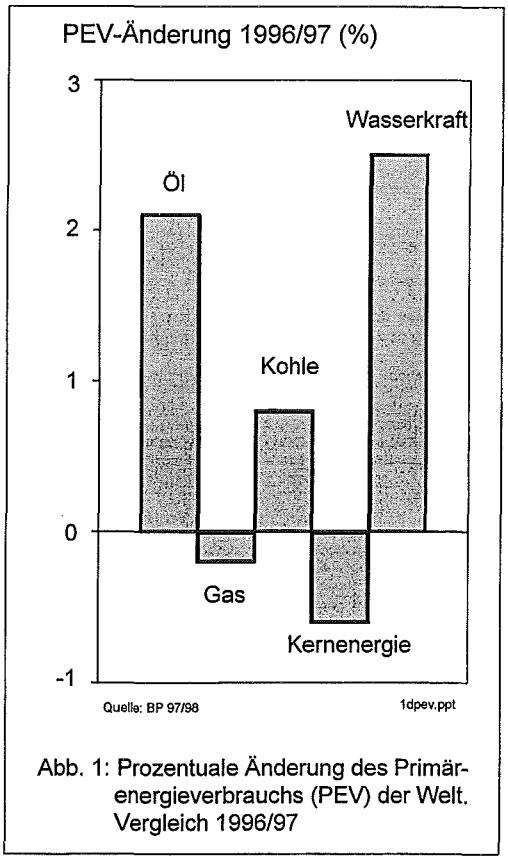


Abb. 1: Prozentuale Änderung des Primärenergieverbrauchs (PEV) der Welt. Vergleich 1996/97

Fossile Energie, unser wichtigster Energierohstoff

Der Anteil und die Zusammensetzung der Energieträger am Energieverbrauch (Energiemix) haben sich im Laufe der Zeit deutlich verändert. Kohle beherrschte bis Mitte dieses Jahrhunderts den Energiemarkt; sie wurde in den 60er Jahren durch das Erdöl abgelöst, dessen Anteil bis zur zweiten Ölpreiserhöhung im Jahre 1979 auf annähernd die Hälfte des Primärenergieverbrauchs der Welt gestiegen war. Erdöl deckte 1997 immer noch 40% des Primärenergieverbrauchs der Welt. Der Anteil der Kohle lag 1997 bei 27%. Der Anteil des Erdgases schwankte um 24%.

1997 betrug der Anteil der fossilen Energie am weltweiten Primärenergieverbrauch 91%

Strom aus Kern- und Wasserkraft hatten Anteile von etwa 9%, während der Anteil der erneuerbaren Energieträger (Biomasse, sowie Solar-, Wind- und geothermische Energie) weniger als 1% des kommerziellen Primärnergieerbrauchs der Welt ausmachte (Abb.2). Bezieht man die nichtkommerziellen Energieträger wie die Biomasse, die in vielen Entwicklungsländern eine große Bedeutung hat, in diese Überlegungen ein, so trugen diese etwa 15% zum gesamten Primärenergieverbauch der Welt bei.

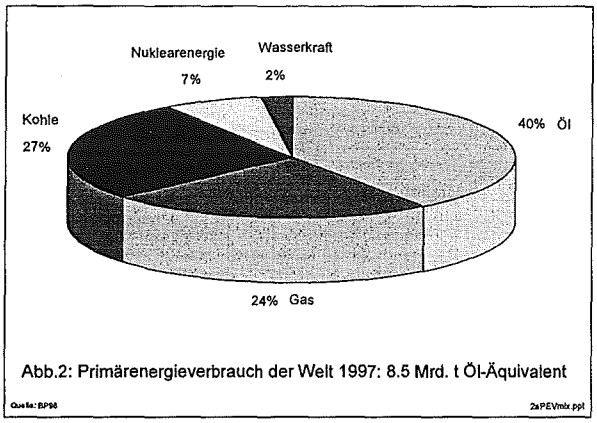


Abb.2: Primärenergieverbrauch der Welt 1997: 8.5 Mrd. t Öl-Äquivalent

Quelle: BP98 2aPEVmix.ppt

Die Hauptursache des wachsenden Energiebedarfs

Bestimmend für den zukünftigen Energiehunger der Welt wird das Bevölkerungswachstum sein. Alle Prognosen gehen von einem deutlichen Wachstum der Weltbevölkerung zumindest noch im nächsten Jahrhundert aus (Abb.3). Vorwiegend in den Schwellen- und Entwicklungsländern wird hierdurch und durch den Anstieg des Pro-Kopf-Verbrauchs infolge der industriellen Entwicklung und des steigenden Lebensstandards, der Energiebedarf überproportional zunehmen. Diese Aussagen werden sich kaum wesentlich ändern, selbst wenn die Empfehlungen der Cairo-Konferenz zur weltweiten Geburtenkontrolle künftig stärker beachtet werden würden.

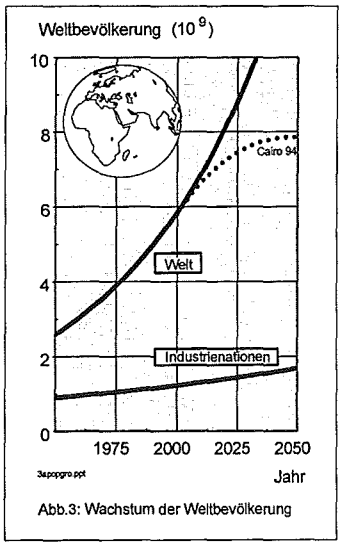


Abb.3: Wachstum der Weltbevölkerung

Wird der Energieverbrauch weiter steigen?

Zur Änderung der Anteile der einzelnen Energieträger bei der weltweiten Deckung des Primärenergiebedarfes sind große Zeitspannen für die Entwicklung konkurrenzfähiger Ersatzenergien notwendig. Darüber hinaus wird noch viel Zeit für die Umstellung der Versorgungssysteme und Verbraucherstrukturen benötigt. Deshalb besteht überwiegend Konsens in der Einschätzung, daß in den nächsten Jahrzehnten, trotz eines steigenden Beitrags der erneuerbaren Energieträger, eine weitere deutliche Erhöhung des Bedarfes an fossilen Energierohstoffen zu erwarten ist. Die

Internationale Energie-Agentur rechnet in ihren World Energy Outlook 1995 (Paris 1996) mit einer Zunahme des Verbrauchs an Erdöl, Kohle und Erdgas um zusammen mehr als ein Drittel auf über 15 Mrd. t Steinkohleeinheiten (SKE) bis zum Jahre 2010.

Der World Energy Council (WEC) hat Verbrauchs-Szenarien für die Jahre 2020 und 2050 entwickelt. Eines der Szenarien beruht auf vorsichtigen Annahmen über Wirtschaftswachstum, technologische Veränderungen und Energieverfügbarkeit. Es bezieht nichtkommerzielle Energieträger ein, also auch die in den Ländern der Dritten Welt verbrauchte Biomasse. Die Basis bildet der Gesamt-Primärenergieverbauch der Welt für das Jahr 1990 von ca. 13,5 Mrd. t SKE mit einem Anteil der fossilen Energierohstoffe von 77% (ca. 10,5 Mrd. t SKE). Schlußfolgerungen sind, daß der Anteil der fossilen Energie bis 2020 zwar um einen Prozentpunkt zurückgeht. die Menge der fossilen Energie wird bei einer relativen Zunahme von Erdgas zu Lasten des Erdöls aber um fast 50% auf über 15 Mrd. t SKE steigen. Für das Jahr 2050 wird mit einem inzwischen auf fast 30 Mrd. t SKE gestiegenen Gesamt-Primärenergieverbauch gerechnet, zu dessen Deckung die fossilen Energierohstoffe noch knapp zwei Drittel beitragen müssen. Falls die konservative Prognose des Welt-energierates richtig ist, muß die Förderung von Erdöl, Erdgas und Kohle mittelfristig nicht nur aufrecht erhalten, sondern sogar deutlich erhöht werden.

In den nächsten 50 Jahren muß die Förderung von Erdöl um fast ein Drittel, von Kohle auf etwa das Doppelte und von Erdgas auf rund das Dreifache gesteigert werden.

Wie werden sich die Erdölpreise entwickeln?

Die Reservensituation für die nicht erneuerbaren Energierohstoffe ist aus heutiger Sicht entspannt. Außerdem ist das gegenwärtige Preisniveau bei fallender Tendenz niedrig (Abb.4, Abb.10). Beide Faktoren wirken sich beschränkend auf die Explorationsbemühungen und damit auf Zunahme der Reserven durch Neufunde aus. In Anbetracht des sich abzeichnenden, künftig zunehmenden Bedarfs kann diese Entwicklung zu einer kritischen Versorgungssituation führen.

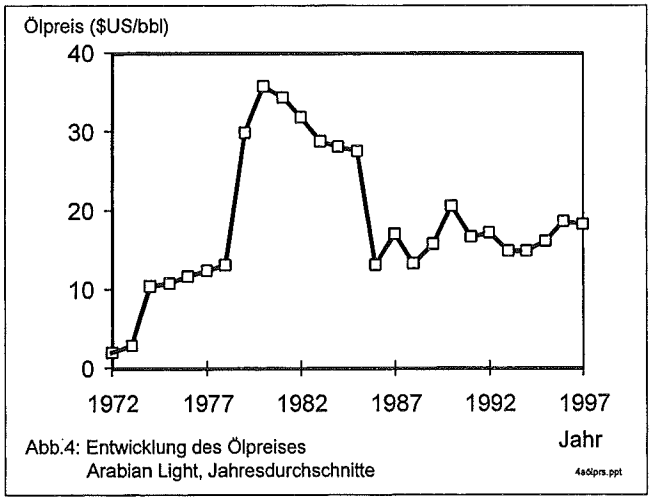


Abb.4: Entwicklung des Ölpreises
Arabian Light, Jahresdurchschnitte

Angesichts der großen Mengen mittelfristig benötigter Primärenergierohstoffe müssen Fragen zur künftigen Rohstoffsicherung gestellt werden, auch im Hinblick auf die lange, viele Jahre dauernde Zeit, die für die Suche und Entwicklung neuer Lagerstätten benötigt wird.

Wegen des derzeitigen hohen Angebots an Kohlenwasserstoffen ist in den nächsten Jahren eine dramatische Erhöhung der Öl- und Gaspreise unwahrscheinlich. Es ist jedoch anzunehmen, daß es wegen des steigenden Bedarfs mittel- bis langfristig zu erheblichen Preissteigerungen kommen wird.

Wie hoch ist unser Reservepolster?

Was versteht man eigentlich unter Reserven und Ressourcen?

Zur Zeit existieren, auch international, unterschiedliche Definitionen der Begriffe "Reserven" und "Ressourcen". Diese Begriffe weisen geringfügige Unterschiede für die verschiedenen Energieträger auf. Gemeinsames und wichtigstes Kriterium ist die Wirtschaftlichkeit (Abb.5, nachfolgende Definitionen).

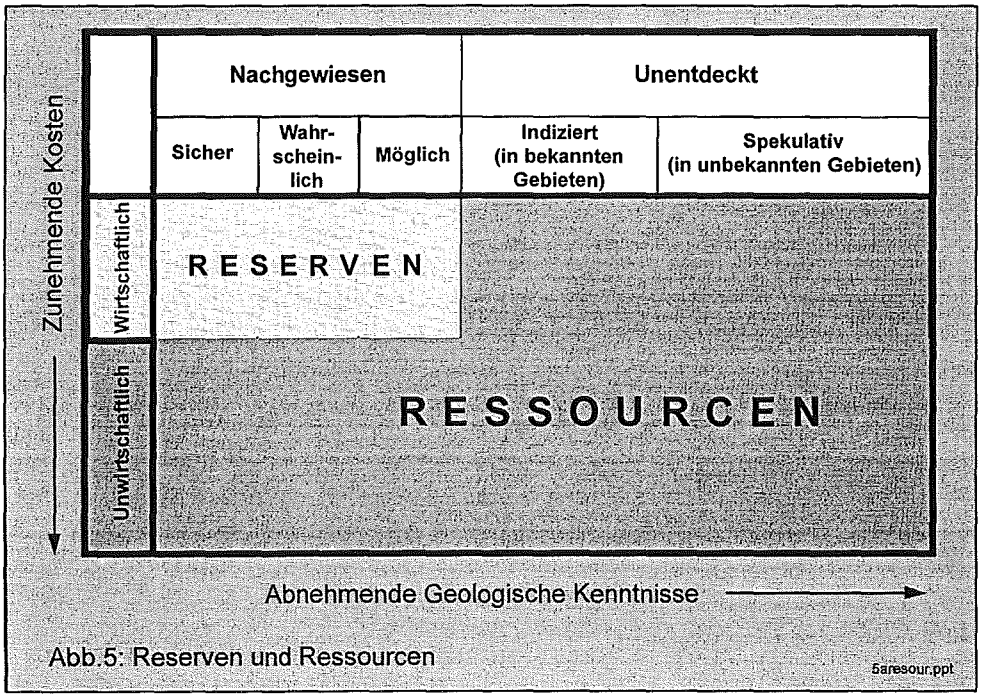


Abb.5: Reserven und Ressourcen

Kohlenwasserstoffe:

Reserven sind die Mengen des in einer Lagerstätte vorhandenen Erdöls oder Erdgases (Kohlenwasserstoffe = Erdöl und/oder Erdgas), die mit Bohrungen nachgewiesen sind bzw. als wahrscheinlich angesehen werden und die sich mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnen lassen.

Ressourcen sind nachgewiesene, aber technisch und/oder wirtschaftlich z.Z. nicht gewinnbare Kohlenwasserstoffe. Zu den Ressourcen gehören ferner Kohlenwasserstoffe aus noch nicht nachgewiesenen, geologisch aber möglichen Lagerstätten, also z.B. auch die zu erwartenden Neufunde. Die Abschätzung der Kohlenwasserstoff-Ressourcen ist mit großen geologischen Unsicherheiten behaftet und vom Ölpreis abhängig.

Kohle:

Die sicher gewinnbaren Reserven (Proved recoverable reserves) umfassen den wirtschaftlich förderbaren Teil der sicher nachgewiesenen Reserven.

Die sicher nachgewiesenen Reserven (Proved amount in place-reserves) sind der exakt vermessene, unter den gegenwärtigen und vorhersehbaren, lokal gültigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie mit verfügbarer Technologie abbaubare Teil der Gesamtressourcen.

Die Gesamtressourcen (Total resources) sind die Gesamtheit der nach geologischen Kriterien festgestellten bzw. vermuteten Kohlevorkommen, soweit sie bestimmte Parameter wie maximale Teufenlage und Mindestflözmächtigkeit erfüllen oder wahrscheinlich erfüllen.

Kernbrennstoffe:

Reserven sind diejenigen Mengen, die unter den derzeit technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewinnbar sind. Bei Uran ist eine Einteilung nach Gewinnungskosten üblich: Die Grenze für Reserven liegt bei 80$ US (günstigste Reserveklasse), das entspricht zur Zeit rund 2.34 Millionen Tonnen Uran.

Ressourcen sind Mengen an Uran, die wegen niedriger Nachweissicherheit oder aus technisch-wirtschaftlichen Gründen nicht gewonnen werden können. Dazu zählen auch Uranmengen, die als Nebenbestandteile in Lagerstätten anderer Rohstoffe (z.B. bei Phosphaten) auftreten, zusammen mehr als 18 Millionen Tonnen.

Es ist leicht nachvollziehbar, daß bisher nicht wirtschaftlich gewinnbaren Ressourcen bei einer Erhöhung der Verkaufspreise in die Kategorie der Reserven aufrücken. Andererseits sind die Reserveabschätzungen aber auch von politischen oder legislativen Randbedingungen abhängig: Sind beispielsweise Reserven als Betriebskapital zu versteuern, wird die Industrie bemüht sein, die Reserven niedrig zuhalten. Sind die maximalen Förderquoten an die Größe der Reserven gekoppelt, wird man anstreben, die Reserven möglichst hoch anzusetzen.

Werden unsere Kinder und Enkel noch ausreichend fossile Energie haben?

Die weltweit erfaßten gewinnbaren **Reserven** an nicht erneuerbaren Energierohstoffen betragen etwa 1200 Mrd. t SKE (Abb. 6). Der beherrschende Energieträger ist die Kohle. Sie ist mit 49,2% beteiligt, wovon 43,5% auf Hartkohle und 5,7% auf Braunkohle entfallen. Es folgen konventionelles Erdöl mit 18,2% und konventionelles Erdgas mit 14,5%. An vierter Stelle rangiert unkonventionelles Erdöl aus Ölschiefer, Ölsand und Schweröl mit ca. 10%. Uran stellt mit 3,7% den Rest der Reserven. Die zusätzlich vorhandenen **Ressourcen** betragen etwa 10200 Mrd. t SKE (Abb.6). Beherrschender Energieträger ist auch hier die Kohle mit fast 2/3 der Ressourcen. Ihr folgt das unkonventionelle Erdgas, voran die Gashydrate, mit ca. 21%. Die übrigen Energieträger sind mit jeweils weniger als 4% beteiligt. Auffällig ist der geringe Anteil des konventionellen Erdöls mit nur 1% an den Weltressourcen, was den fortgeschrittenen Explorationsstand dieses derzeit wichtigsten Primärenergieträgers anzeigt.

Gemessen an dem derzeitigen Energiebedarf reichen die Reserven an nicht erneuerbaren fossilen Brennstoffen für etwa ein Jahrhundert, die Ressourcen sogar erheblich länger.

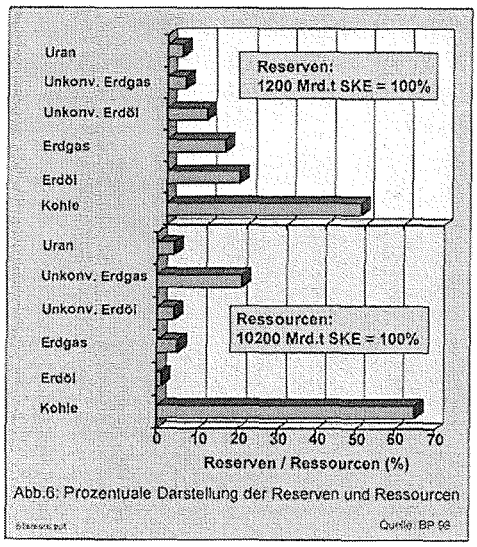


Abb.6: Prozentuale Darstellung der Reserven und Ressourcen

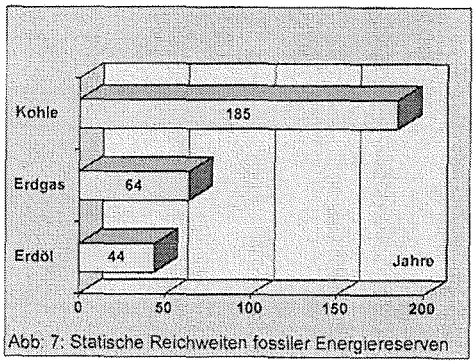


Abb. 7: Statische Reichweiten fossiler Energiereserven

Bei gleichbleibendem (statischem) weltweiten Primärenergieverbrauch haben die sicher gewinnbaren Reserven der nicht erneuerbaren Energierohstoffe Kohle, Erdgas und Erdöl Reichweiten zwischen 185 und 44 Jahren (Abb.7).

Die Primärenergie im kommerziellen Bereich wird weltweit allerdings ungleich verbraucht: Die Industrieländer mit 23% der Weltbevölkerung verbrauchen 71% der kommerziellen Primärenergie. Dagegen begnügt sich der größere, in Asien lebende Teil der Menschheit mit weniger als einem Viertel der kommerziellen Primärenergie. Westeuropa mit rund 6% der Weltbevölkerung und 17% des Primärenergieverbrauchs der Welt erbringt immerhin 30% der Weltwirtschaftsleistung.

Konventionelles Erdöl, der zur Zeit wichtigste Energierohstoff

1997 wurden 3,4 Mrd. t Erdöl aus etwa 900 000 Bohrungen gefördert. 32% des Öls wurden Offshore, davon rund 37% in der Nordsee, dem weltweit ergiebigsten Offshore-Gebiet, gefördert. Die gesamte Fördermenge entspricht einer Wertschöpfung von rund 500 Mrd. US $ Dollar. Im Zuge der weltweiten Überversorgung mit Erdöl, die 1997 rund 80 Mio. t betrug, budgetierten in den letzten Jahren die internationalen Ölgesellschaften nur wenig Mittel für die Aufsuchung neuer Vorkommen. Beispielsweise entfielen 1994 nur 10 Mrd. US $ Dollar auf die Exploration. Zur Zeit zeichnet sich international eine Belebung der Kohlenwasserstoffexploration ab.

Das Gesamtpotential des Erdöls wurde Anfang 1997 auf rund 332 Mrd. t geschätzt:

32,2% bereits gefördert

43,4% Reserven

24,4% Ressourcen

Die **Erdölreserven** sind regional und wirtschaftspolitisch ungleich verteilt. Ihr Auftreten deckt sich nicht mit der Lage der Verbraucherzentren: Während die Hauptmenge der Reserven (77%) in den Staaten der OPEC liegt, entfallen nur 9% auf die OECD-Mitgliedsstaaten (Abb.8). Die OECD verbrauchte jedoch 60% des geförderten Erdöls, die OPEC aber nur 8%. An der Förderung beteiligte sich 1997 die OPEC mit 1,44 Mrd. t, die OECD mit 1,02 Mrd. t. Diese Zahlen legen nahe, daß der Einfluß der OPEC auf den Weltmarkt in Zukunft steigen wird.

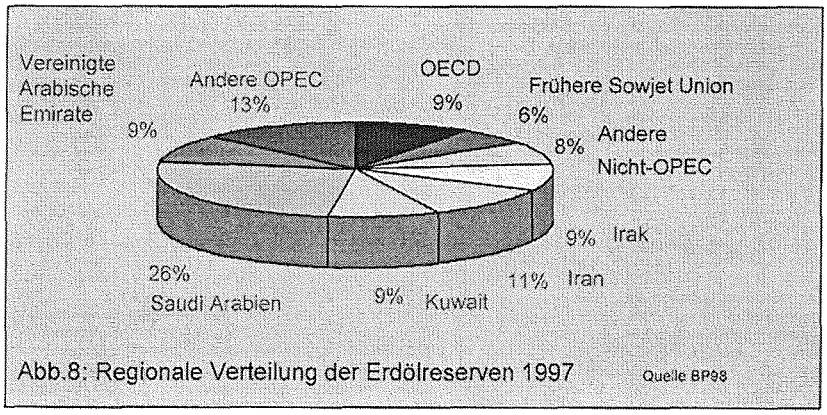


Abb.8: Regionale Verteilung der Erdölreserven 1997 Quelle BP98

1996 wurden weltweit etwa 2,3% der Reserven gefördert ("depletion rate"). Die Abnahmerate der Reserven betrug 8,2% für Westeuropa. Westeuropa verbrauchte 20% der weltweit geförderten Erdölmenge. Rund 60% dieses Erdöls stammte aus OPEC-Ländern.

1997 betrug die Welterdölförderung rund 3,4 Mrd. t mit einer seit Jahren leicht ansteigender Tendenz. Etwa 54 % dieser Menge ist in den internationalen Ölhandel einbezogen. Der Ölpreis bewegte sich seit 1989 zwischen 16 US$ (1994) und 24 US$ pro Faß (1990/91) im jeweiligen Jahresdurchschnitt. Der Anteil des Erdöls am kommerziellen Primärenergiebedarf hat sich weltweit auf etwa 40% eingepegelt. Erdöl bleibt somit weiterhin wichtigster kommerzieller Energieträger.

Nach gegenwärtiger geologischer Kenntnis geht die Epoche der Entdeckung von Riesenölfeldern mit Reserven über 67 Mio. t Erdöl zu Ende. Diese "Giants" beinhalten rund 3/4 der ursprünglichen

Erdölvorräte und decken z.Z. noch mehr als 80% der jährlichen Fördermenge. Sie wurden hauptsächlich zwischen 1950 - 1970 gefunden und entwickelt. Zu erwarten sind Neufunde kleiner Felder mit bis zu 3,5 Mio. t an Reserven: Ihre Aufsuchung und Erschließung wird häufig logistisch schwierig, aufwendig und damit teuer sein. Die zu erwartende Anzahl von neuen Feldern wird sehr unterschiedlich beziffert (20.000 bis 100.000). Der geschätzte Anteil der Neufunde an der Ressourcenmenge wird in der Literatur mit unbedeutend bis zu 50% angegeben. Enhanced Oil Recovery (EOR), d.h. die Ausbeutesteigerung bei Erdöllagerstätten durch Stimulation (z.B. Einpressen von Wasserdampf oder Kohlendioxid in die Bohrung, Zugabe von Chemikalien oder Mikroben zur Viskositätsminderung usw.) kann vor allem bei steigendem Ölpreis als wichtige Ressourcenquelle angesehen werden. Allein eine Steigerung von 1 % des Ausbeutefaktors durch EOR würde, statistisch und weltweit gesehen, eine zusätzliche Erdölmenge in der Größenordnung des derzeitigen jährlichen Welterdölbedarfs erbringen.

Erdgas, ein umweltfreundlicher Energieträger.

Erdgas besteht im wesentlichen aus Methan. Methan setzt während seiner Verbrennung bei gleichem freiwerdenden Energiebetrag von allen fossilen Energieträgern die geringste Menge an Kohlendioxid frei.

Methan ist der umweltfreundlichste fossile Energieträger. Es ist die fossile Energie der Zukunft

Die Weltreserven an konventionellem Erdgas haben in den letzten Jahren stetig zugenommen und betrugen Ende 1997 etwa 145 x 10^{12} m^3 (Abb. 9). Verglichen mit der Verteilungssituation beim Erdöl sind die Gasreserven weltweit gleichmäßiger verteilt. Erdgas ist mit ca. 24% am Primärenergieverbrauch beteiligt.

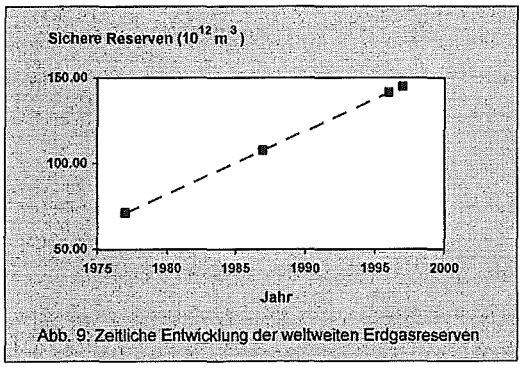


Abb. 9: Zeitliche Entwicklung der weltweiten Erdgasreserven

Die Welt-Erdgasförderung ist 1997 mit 2,223x10^{12} m^3 um 0,2% unter der Vorjahresförderung geblieben. Der Verbrauch belief sich auf 2,197x10^{12} m^3 und liegt ebenfalls um 0,2% unter dem Vorjahresverbrauch.

Die nachgewiesenen Erdgasvorräte Westeuropas reichen bei gleichbleibender Förderung etwa bis zum Jahre 2025; der Beitrag der Eigenförderung ist, abweichend von der Situation beim Erdöl, hoch: Derzeit müssen nur 27% des westeuropäischen Verbrauchs aus Drittländern importiert werden.

Dieses Defizit ist durch langfristige Lieferverträge mit Rußland, Algerien und Libyen abgesichert. Die Verteilung des Gases wird durch ein europäisches Erdgasverbundnetz erreicht.

Die zusätzlichen Erdgasressourcen der Welt werden auf das etwa Anderthalbfache der sicher nachgewiesenen Vorräte geschätzt. Für ihre Erkundung, wie auch für die Erschließung eines großen Teiles der nachgewiesenen Erdgasvorräte, besteht in vielen Gebieten der Welt in nächster Zeit kein wirtschaftlicher Anreiz, insbesondere außerhalb der großen Verbraucherzentren. Die z. Z. bereits entwickelten Felder können die Nachfrage noch über einen längeren Zeitraum decken.

Etwa 97% der Welt-Erdgasförderung erfolgt mit konventionellen Fördertechniken; ungefähr 22% stammt aus Offshore-Feldern, wozu die Lagerstätten der Nordsee und des Golfes von Mexiko jeweils etwa ein Drittel beitragen. Zwei Länder - Rußland und die USA - erbringen zusammen etwa die Hälfte der Welt-Erdgasförderung.

Einen weltweiten Markt wie bei Erdöl oder Kohle gibt es beim Erdgas ebenso wenig wie ein der OPEC entsprechendes Produzentenkartell. Es haben sich zur Zeit drei Großregionen zu getrennten Erdgasmärkten zusammengeschlossen: Der "Europäische Markt", der außer Rußland auch Nordafrika einschließt, der "Nordamerikanische Markt" aus den drei NAFTA-Staaten und der "Ostasiatische Erdgasmarkt", in dem die größten Entfernungen zwischen Liefer- und Empfängerländern bestehen. Auf die Länder dieser Märkte entfallen 96 % der Welt-Erdgasförderung und des Verbrauches.

Das Gesamtpotential des konventionellen Erdgases der Welt wurde Anfang 1997 auf etwa 440 $x10^{12}$ m^3 geschätzt:

$57 x10^{12} m^3$ bereits gefördert,

$145 x10^{12} m^3$ sichere Vorräte,

$234 x10^{12} m^3$ zusätzliche Ressourcen.

Global kann das konventionelle Erdgas unter Berücksichtigung der Ressourcen einen sogar wachsenden Bedarf für mehrere Generationen decken.

Für die Europäische Union ist die Versorgungssituation mit Erdgas insgesamt gut abgesichert und deutlich günstiger als beim Erdöl. Importe von mehr als 100 Mrd. m^3 standen einer Eigenförderung von über 200 Mrd. m^3 Gas gegenüber. Die Europäische Union ist Teil des europäischen Erdgasmarktes, der dank der Vorkommen in Rußland über sehr große Reserven verfügt. Dessen ungeachtet wird für einige OECD-Staaten die Exploration zusätzlicher Ressourcen, die Entwicklung von Technologien für die wirtschaftliche Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Vorkommen sowie ein ungestörter Erdgashandel künftig noch weiter zunehmende Bedeutung haben.

Unkonventionelles Erdöl: Eine wichtige Energiereserve für die Zukunft

Die Vorkommen von unkonventionellem Erdöl sind relativ gleichmäßig über die Welt verteilt mit Schwerpunkten in USA, Rußland, China und Australien (Ölschiefer), Kolumbien und Kanada (Ölsande) sowie USA und Venezuela (Schweröl). Gestehungs- und Verarbeitungskosten des unkonventionellen Erdöls sind i.a. hoch. Die Schwellenpreise, d.h. die Verkaufspreise, bei denen die wirtschaftliche Produktion einsetzt, nehmen vom Schweröl über Ölsand zu Ölschiefer zu. Aspekte der Umweltverträglichkeit bei Abbau und Verarbeitung haben aus heutiger Sicht die Chancen für eine weltweite Nutzung weiter verringert. Die Reserven werden auf $80x10^9$ t geschätzt, davon 54% aus Schweröl. Die zusätzlichen Ressourcen liegen bei $240x10^9$ t (angeführt von Ölschiefer mit einem Anteil von 67%).

Unkonventionelle Öle sind Öle, die aus unreifen Muttergesteinen (Ölschiefer) durch technische Prozesse wie Schwelung oder Pyrolyse generiert werden können oder die durch chemische und mikrobiologische Abbauprozesse (Schweröl, Öle aus Ölsanden) Qualitätsverluste erlitten haben. Diese haben zu einer Anreicherung von schweren, Schwefel und andere Elemente enthaltenden Molekülen und damit zu einer Erhöhung der Viskosität geführt.

Das Gesamtpotential, an unkonventionellem Erdöl d.h. Reserven und Ressourcen, wird auf 320×10^9 t beziffert und liegt damit im Bereich des Gesamtpotentials des konventionellen Erdöls von etwa 330×10^9 t.

Unkonventionelle Kohlenwasserstoffe aus Ölschiefer und Ölsanden stellen eine bedeutsame Ressource für die Zukunft dar.

Die Gewinnung von unkonventionellem Erdöl ist mit hohen Gestehungs- und Verarbeitungskosten verbunden. Sie setzt hohe Schwellenpreise voraus, die für den Abbau von Ölsanden bzw. von Schweröl zwischen 20 - 50 $ US pro Faß und für Ölschiefer mit mehr als 60 $ pro Faß beziffert worden sind. Hohe Ölpreise beim Auslaufen der konventionellen Erdölförderung sowie weitere technologische Entwicklungen, die Abbau und Nutzung von Ölschiefer und Ölsanden umweltverträglich gestalten, werden diese Energiereserve der Zukunft begünstigen. 1997/98 sind, wie Abb. 10 zeigt, die Ölpreise weit von den Schwellenpreisen entfernt. Eine Ausnahme bildet Kanada. Technischer Fortschritt sowie günstigere Steuer- und Abgabenbedingungen haben hier die Voraussetzungen geschaffen, daß Öl aus Ölsanden zu Kosten von rund 10 $ US je Faß produziert werden kann.

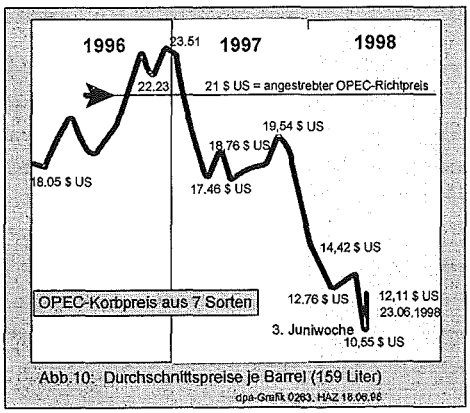


Abb.10: Durchschnittspreise je Barrel (159 Liter)
dpa-Grafik 0263: HAZ 18.06.98

Unkonventionelles Erdgas, eine Reserve für die Zukunft

Unkonventionelles Erdgas ist in Vorkommen enthalten, die nicht mit den klassischen Fördertechniken wirtschaftlich ausgebeutet werden können. Die Schätzungen über die Höhe möglicher zusätzlicher, Ressourcen gehen weit auseinander; sie dürften jedoch um eine Größenordnung über denen des konventionellen Erdgases liegen. Zum unkonventionellen Erdgas zählen Gase aus Kohleflözen, aus geringpermeablen (dichten) Speichergesteinen, aus Hydraten und Aquiferen.

Die Förderung von **Erdgas aus Kohleflözen** und dichten Gesteinen ist heute technisch möglich und wird in einzelnen Ländern praktiziert. Es bedarf jedoch eines relativ hohen Energiepreisniveaus bzw. wirtschaftspolitischer Anreize, um diesen Energieträger in Konkurrenz zum konventionellen Erdgas marktfähig zu machen. Flözgas wird nur in den USA kommerziell gefördert und trägt dort inzwischen mit etwa 5% zur inländischen Erdgasversorgung bei.

Erdgas aus Kohleflözen
Methan entsteht in großen Mengen bei der Bildung und Reifung von Kohlen. Ein Teil dieses Gases bildet große Erdgaslagerstätten, ein weiterer großer Teil bleibt in der Kohle fest sorbiert und wird partiell beim Abbau der Flöze frei bzw. durch gezielte (Horizontal-)Bohrungen aus

Gase in geringpermeablen, dichten Speichergesteinen sind in vielen Regionen der Erde verbreitet. Aber nur in wenigen Staaten sind die technischen Entwicklungen so weit fortgeschritten, daß Erdgas aus derartigen Lagerstätten kommerziell gefördert werden kann. Die Förderung (etwa 45 Mrd. m^3) konzentriert sich auf die USA, China und Europa. Die Weltreserven von Erdgas aus dichten Gesteinen lassen sich wegen ihrer derzeit überwiegend aufgrund von steuerlichen Anreizen gegebenen Marktfähigkeit nicht sicher angeben und werden zudem vielfach auch nicht getrennt ausgewiesen; die Mengen sind derzeit (noch) gering.

Erdgase in dichten Speichergesteinen sind wie die Flözgase aus organischen Ablagerungen entstanden. Sie werden aufgrund der geringen Durchlässigkeit ihrer Speichergesteine in ihnen festgehalten.Die technischen Voraussetzungen und auch das Potential für die Erschließung sind vorhanden. Der Methangewinnung aus Kohleflözen und dichten Speichergesteinen kommt vorerst jedoch nur eine regional begrenzte Bedeutung zu. Die Marktfähigkeit ist in Konkurrenz zum Erdgas aus konventionellen Lagerstätten in vielen Ländern noch nicht gegeben.

Gashydrate treten im Porenraum von Sedimenten auf; sie können Zemente, Knollen oder Lagen bilden. Sie kommen in Permafrost-Gebieten und am Kontinentalhang der Ozeane vor. Die Mengenabschätzungen sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Eine Förderung von Methan aus den Hydraten der Kontinentalhänge wird es wegen des größeren technischen Aufwandes bei schwierigeren geologischen Bedingungen und geringeren Hydrat-Mächtigkeiten erst in ferner Zukunft geben.

Gashydrate sind eisähnliche, kristalline Käfigstrukturen, die sich aus einer Mischung von Gas (meist Methan) und Wasser bei hohen Drucken und/oder niedrigen Temperaturen ausbilden. Die Käfige bestehen aus Wassermolekülen. Der Käfigdurchmesser der einfachsten Strukturen beträgt etwa 8 Angström. Methan kann sich im Inneren der Käfige ansammeln.

Eine Produktion von Methan aus Hydraten rechnet sich unter heutigen Marktbedingungen nicht. Falls sich die Marktbedingungen ändern, werden zunächst die Permafrost-Gebiete wegen guter Erreichbarkeit des Hydrats von der Oberfläche und größerer Hydrat-Mächtigkeiten interessant werden. Die Menge des in Gashydraten gebundenen Kohlenstoffs entspricht in der Größenordnung etwa der Kohlenstoffmenge, die in den übrigen fossilen Energierohstoffen zusammen enthalten ist.

Methan als **Aquifergas** tritt überall dort in größeren Konzentrationen auf, wo Porenwässer mit Erdgas- oder Erdöl-/Erdgaslagerstätten in Verbindung stehen. Es wird deshalb weltweit in fast allen

Sedimentbecken erwartet. Eine Reihe von Aquifergasvorkommen ist bekannt und bereits untersucht worden. Die Gewinnung von Methan aus oberflächennahen Aquiferen hat heute lokale Bedeutung; Sie wird künftig zunehmen, aber einen regional eingeschränkten Rahmen zunächst nicht übersteigen. Die kommerzielle Methangewinnung aus tiefer liegenden Aquiferen erfolgt bislang nur in einem Ausnahmefall (Japan), wobei die Wirtschaftlichkeit durch eine parallel verlaufende Gewinnung von Jod erzielt wurde.

Aquifergase sind Erdgase. Sie stammen aus konventionellen Kohlenwasserstoff-Muttergesteinen, die über Wegsamkeiten mit Grundwasserleitern in Verbindung stehen.

Eine komplexe Nutzung der Aquifere, die außer Gasen auch die Extraktion von Spurenelementen und die Gewinnung thermischer Energie einschließt, erscheint zukunftsträchtig. Gasgesättigte Aquifere sind heute eine technisch, wirtschaftlich und damit auch mengenmäßig noch nicht einschätzbare Energie- (und Rohstoff-) Ressource, die jedoch wegen ihres großen Potentials langfristig wichtig wird.

Abiogenes Tiefengas oder **Mantelmethan,** d.h. anorganisch gebildetes Methan aus dem Erdmantel, spielt nach allgemeiner Einschätzung keine wirtschaftliche Rolle und wird deshalb hier nicht weiter behandelt.

Kohle, unsere große Reserve

Mit der Kohle verfügen wir über die mit Abstand größten, sicher gewinnbaren Reserven der nicht erneuerbaren Energieträger. Sie betragen weltweit 595×10^{12} t SKE. Die Reserven haben eine statische Reichweite von 185 Jahren und können damit den derzeitigen Anteil der Kohle am weltweiten Primärenergieverbrauch von 26% bis weit in das 22. Jahrhundert sicherstellen. Die sicher gewinnbaren Vorräte sind weltweit auf 79 Länder verteilt, von denen 65 Länder 1997 insgesamt rund $3{,}2 \times 10^{12}$ t SKE Kohle förderten. Der Verbrauch stieg dabei um 0,8% im Vergleich zum Vorjahr an. Die sicher gewinnbaren Reserven machen nur 7% der Gesamtressourcen der Kohle aus, die rund 7513×10^{12} t SKE betragen. Dieses immense Potential verdeutlicht die überragende energiewirtschaftliche Bedeutung der Kohle. Aufgrund der Nachteile der Kohle beim Transport wird der überwiegende Teil in den Ursprungsländern verbraucht und lediglich 10% der Förderung weltweit gehandelt. Die Elektrizitätswirtschaft nimmt die Hauptmenge der Kohle ab: Weltweit werden 45% des Stroms mit Kohle erzeugt. Der übrige Teil der Förderung wird in der Eisen- und Stahlindustrie eingesetzt und zu Heizzwecken genutzt.

Die Kohle stellt eine, auch für die fernere Zukunft, sichere Energiereserve dar. Ihr zukünftiger Beitrag zum Primärenergieverbrauch und ihre zukünftige Akzeptanz werden wesentlich davon abhängen, ob es gelingt, ihren Energieinhalt wirtschaftlich und umweltverträglich nutzbar zu machen.

Nach dem Energieinhalt werden die geringkalorigen, nicht mit Transportkosten belastbare Braunkohlen von den höherkalorigen, auf dem Weltmarkt gehandelten Hartkohlen unterschieden. Die sicher gewinnbaren Vorräte der Braunkohle machen vom Energieinhalt immerhin 13% der weltweiten Kohlevorräte aus.

Nach wirtschaftspolitischen Ländergruppierungen verfügen die ehemaligen Staatshandelsländer über 25,2%, und die OECD über 54,0% der sicher gewinnbaren Reserven.

Größte Förderländer waren die VR China mit 30% und die USA mit 25% der weltweiten Gesamtförderung. Mit weitaus geringerem Förderanteil, der zwischen 4 und 6% der Weltförderung lag, folgten die Länder Rußland, Australien, Indien, Südafrika, Polen und Deutschland.

Uran, der Energieträger ohne Akzeptanz

Die **Kernenergie** erreichte 1996 einen Anteil von ca. 7 % am Primärenergieverbrauch der Welt und trug mit ca. 18% zur Stromerzeugung bei. Rund 83 % der Kernenergieerzeugung sind in der OECD und 35% in der EU konzentriert.

Weltweit waren 1997 Reserven von 2,34 Mio. Tonnen Uran (gewinnbar bis 80 $US/kgU) nachgewiesen. Diese sind geographisch ungleichmäßig verteilt. Die OECD als Hauptverbraucher verfügt über ca. 52% der Reserven bis 80 $US/kgU, die EU nur über etwa 2%. Die nordamerikanischen Verbraucher können auf etwa 19% der Reserven zurückgreifen. Der Ferne Osten (Japan, Korea, Taiwan) besitzt praktisch keine Reserven. Australien und Afrika, ohne nennenswerten Eigenbedarf, verfügen über 30% bzw. 20% der Reserven. Ein wesentlicher Anteil der Reserven ist mit etwa 39% in den Entwicklungsländern konzentriert.

Bei gleichbleibendem Verbrauch (1996 ca. 62.000 t U) würden die Reserven an Uran für ca. 37 Jahre reichen. Setzt man den geschätzten Verbrauchsanstieg auf 75.000 t U im Jahr 2010 an, werden die kostengünstigen Vorräte 2020 und die der höheren Kostenklasse 2030 erschöpft sein.

Wegen der in vielen Staaten fehlenden Akzeptanz in der Zivilbevölkerung wird der mittelfristige Bedarf stagnieren. Außerdem ist es unwahrscheinlich, daß keine neuen Reserven gefunden werden. Lagerbestände und Uran aus der Kernwaffenabrüstung sowie bekannte Reserven und sonstige Ressourcen stehen darüber hinaus zur Verfügung. Derzeit basiert die Versorgung zu einem erheblichen Teil auf Lagerbeständen, da die Produktion seit mehreren Jahren unter den Verbrauch gesunken ist.

Wann gehen die Lichter aus?

Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, daß die Welt auch in den nächsten Generationen noch über ausreichende Mengen an Primärenergie verfügen wird. Es wird mittelfristig keine Energiekatastrophe geben. Allerdings zeigen aber auch die Analysen, daß wir zumindest für die nächsten hundert Jahre auf fossile Energie nicht verzichten können.

Fossile Energie wird noch lange überwiegend unseren Energiebedarf decken. Sie ist nicht erneuerbar und ein kostbares Gut, mit dem sparsam und nachhaltig umgegangen werden muß

Die fossilen Energieträger sind mittelfristig nicht nur wegen ihres Energieinhalts wertvoll und unverzichtbar, sondern werden auch als Chemierohstoff wachsende Bedeutung haben. Sie geben bei ihrer Nutzung Kohlendioxid an die Atmosphäre ab und können auch andere Schadstoffe freisetzen. Obwohl inzwischen die Klimarelevanz des anthropogen erzeugten Kohlendioxids etwas entspannter diskutiert wird, ist die Freisetzung großer Mengen von Kohlendioxid und anderer bei der Verbrennung auftretender Schadstoffe umweltbelastend. Es gibt also gute Gründe, mit fossiler Energie sparsam und nachhaltig umzugehen. Verhalten wir uns in dieser Weise, werden die Lichter so schnell noch nicht ausgehen.

Literatur

BP 1997 - BP Statistical Review of World Energy 1998, The British Petroleum Company (1998)

Masters, C.D. et al:World Petroleum Assessment and Analysis. - Topic 15, p. 1-13, Proc. WPC, Stavanger. (1994).

Perspektiven für Erdöl und Erdgas im 21. Jahrhundert. Steigender Welt-Energieverbrauch stellt Energieversorgung vor neue Herausforderungen. Deutsche Shell AG, Hamburg (1996).

Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit von Energierohstoffen. BGR Hannover. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller) Johannesstraße 3 A, D 70176 Stuttgart, ISBN. 3-510-95805-5 (1995).

Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. IIASA/WEC, London, 1995. WEC (1995): World Energy Outlook 1995. IEA-OECD, Paris, WEC (1995).

Anhang

Abkürzungen

EOR	Enhanced Oil Recovery
EU	Europäische Union (vormals EG): Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Irland, Italien, Luxemburg, Niederlande, Portugal und Spanien (Stand: Dez. 1993)
J	Joule (0,239 cal)
LNG	Liquified Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
Mrd.	Milliarde, (10^9) entspricht 1 Billiarde im englichen Sprachraum
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development (Australien, Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Irland, Island, Italien, Japan, Kanada, Luxemburg, Neuseeland, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Türkei, USA)
OPEC	Organization of Petroleum Exporting Countries (Algerien, Ecuador (bis 1992), Gabun, Indonesien, Irak, Iran, Katar, Kuwait, Libyen, Nigeria, Saudi Arabien, Venezuela, Vereinigte Arabische Emirate)
SKE	Steinkohleneinheit
t	metrische Tonne

Umrechnungsfaktoren

1 t Erdöl	=	1 toe = 7,35 bbl = 1,50 t SKE = 1270 Nm^3Erdgas = 44,0 x $x10^9$ J
1 t LNG	=	1400 Nm^3 Erdgas = 1,10 toe = 1,65 t SKE = 48,3 x $x10^9$ J
1000 Nm^3 Erdgas	=	35,31 cuft = 0,79 toe = 1,18 t SKE = 0,71 t LNG = 34,6 x $x10^9$ J
1 t SKE	=	0,67 toe = 850 Nm^3 Erdgas = 29,3 x $x10^9$ J
1 t Uran (nat.)	=	14.000 - 23.000 t SKE ohne bzw. mit Recycling von wieder aufgearbeitetem Uran und Plutonium = 0,4 - 0,7 x 10^{12} J

Genese und Exploration fossiler Energieträger

Ralf Littke

Lehrstuhl für Erdöl und Kohle

RWTH Aachen

Fossile Energieträger sind aus Pflanzen, untergeordnet auch aus Bakterien und Tieren, hervorgegangene organische Substanzen, die in Sedimente eingebettet und mit diesen in große Erdtiefen versenkt wurden. Die wichtigsten dieser fossilen Energieträger sind Erdgas, das überwiegend aus Methan (CH4) besteht, Erdöl und Kohle. Daneben gehören jedoch auch Schweröle, Teersande und vor allem Ölschiefer zu den fossilen Energieträgern. Die Bedeutung der fossilen Energieträger für die Welt-Energieversorgung dokumentiert Abbildung 1: Etwa 90% des gesamten Welt-Energieverbrauchs wird über fossile Energieträger abgedeckt, wobei der Anteil des Erdöls der größte ist. Lediglich 7% des Energieverbrauches werden durch Kernenergie und 3% durch Wasserkraft zur Verfügung gestellt; andere Energieträger spielen praktisch keine Rolle.

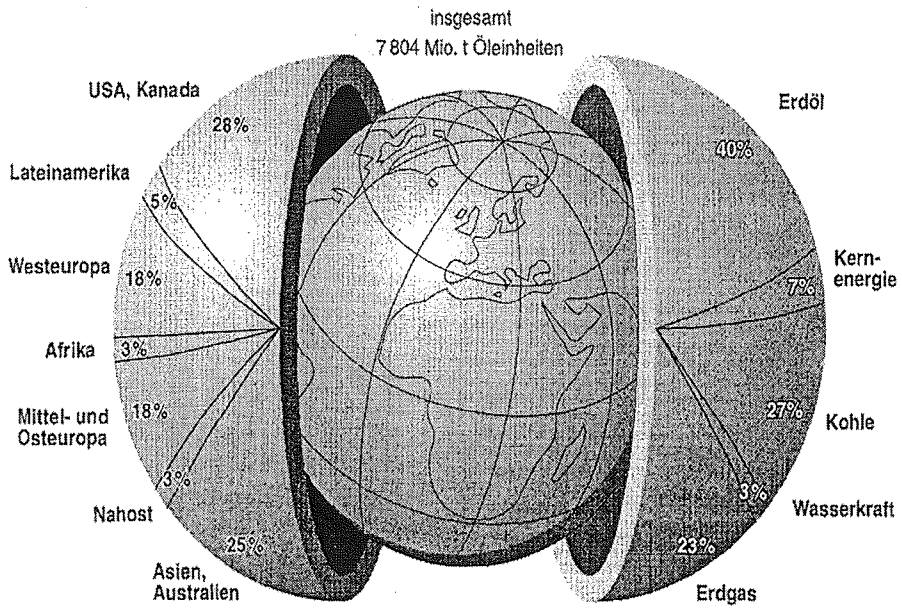


Abb. 1: Welt-Energieverbrauch im Jahre 1993, aufgeteilt nach Kontinenten und Energieträgern

Praktisch alle fossilen Energieträger kommen in Sedimentbecken vor. Dieses sind Strukturen im Oberteil der Erdkruste, in denen über Millionen von Jahren mehrere Kilometer an Sediment zusammengetragen wurden. Sedimentbecken sind im Vergleich zur Erdkruste klein (Abb. 2), beherbergen jedoch den bei weitem größten Teil der Energie- und Mineralressourcen der Erde. Sedimentbecken entstehen dort, wo tektonische Kräfte eine lang anhaltende Subsidenz zulassen; ein klassisches Beispiel sind

Rift-Strukturen wie das Rote Meer oder der Oberrheingraben, wo die Erdkruste durch Dehnungskräfte auseinandergezogen und verdünnt wird. Halten diese Kräfte über mehrere 10 oder 100 Millionen Jahre an, so können Kontinente vollends auseinanderbrechen und neue Ozeane entstehen. Die Sedimentationsraten in diesen Gebieten liegen in der Regel zwischen wenigen Millimetern und Bruchteilen von Millimetern pro Jahr; über die langen (geologischen) Zeiträume der Beckenentwicklung erreichen einmal abgelagerte Sedimente in diesen Großstrukturen dennoch Tiefen (geologisch: Teufen) von mehreren Kilometern.

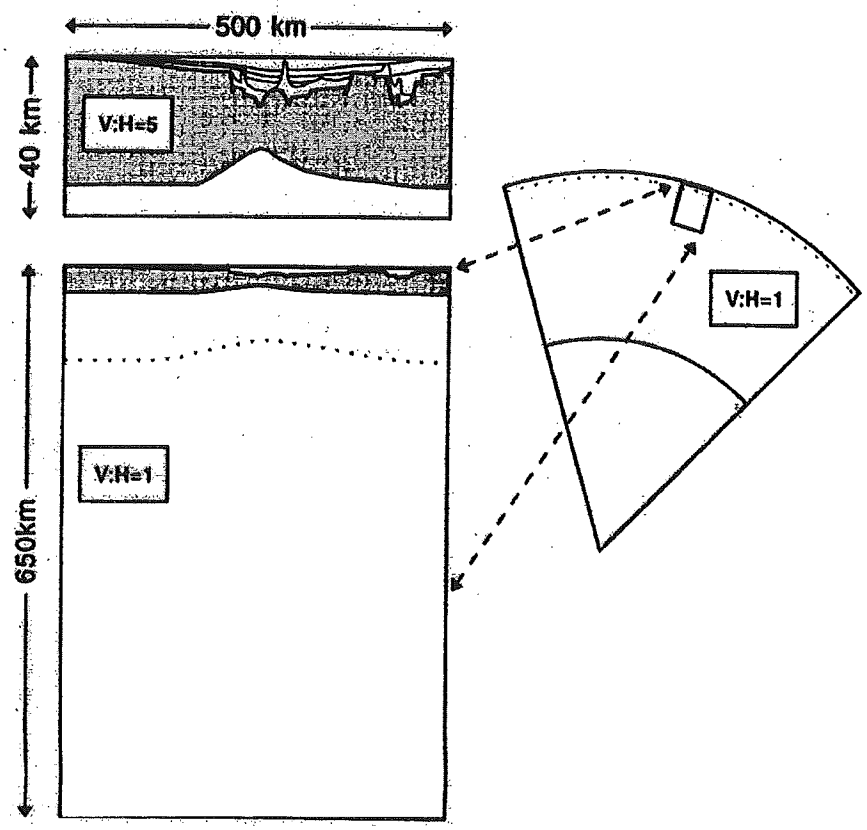


Abb. 2: Lage und Struktur von Sedimentbecken in der Oberkruste

Bei dieser Versenkung in größere Teufen werden Sedimente (z.B. Tone, Sande, Kalke) mechanisch verfestigt und durch chemische Reaktionen verändert: Es entstehen Sedimentgesteine (z.B. Tonsteine, Sandsteine, Kalksteine). Zudem ändert sich die Temperatur erheblich und nimmt wesentlichen Einfluß auf die Entwicklung der fossilen Energieträger: So sind Erdöl und Erdgas überwiegend ein Produkt der durch erhöhte Temperaturen bedingten Abspaltung von Kohlenwasserstoffen aus pflanzlicher organischer Substanz. Die Temperaturänderungen mit der Tiefe hängen wesentlich von den Wärmeflüssen aus dem Erdinneren ab, wo radiogene Wärme produziert wird. Sie können sehr unterschiedlich sein, wie aus Tabelle 1 hervorgeht, wobei (in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine) durchschnittliche Temperaturzunahmen von 20 bis 40 K pro Kilometer kontinentale Erdkruste charakterisieren.

Tabelle 1: Typische Wärmeflüsse in Sedimentbecken (in mW m-2)

Extensions-Becken	
Aktive Ozeanrücken und Vulkane	120->200
Aktive Back-Arc-Becken	67-120
Aktive Riftbecken	65-110
Becken in Postriftstadien (thermische Subsidenz)	..40-6
Komressionsbecken	
Kollisions-Faltengürtel	40-97
Ozean-Kontinent-Übergänge an Subduktionszonen	20-80
Grundgebirge (Basement)	
Präkambrische Schilde	..30-55
Alte Ozeankruste (>200 Millionen Jahre)	30-40
Durchschnittlicher weltweiter Wärmefluß	60-70

Im folgenden werden die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas nacheinander vorgestellt, wobei das Hauptaugenmerk auf die Bildung und die Explorationstechniken gelegt wird. Weiterführende Literatur wird am Ende dieses Artikels genannt.

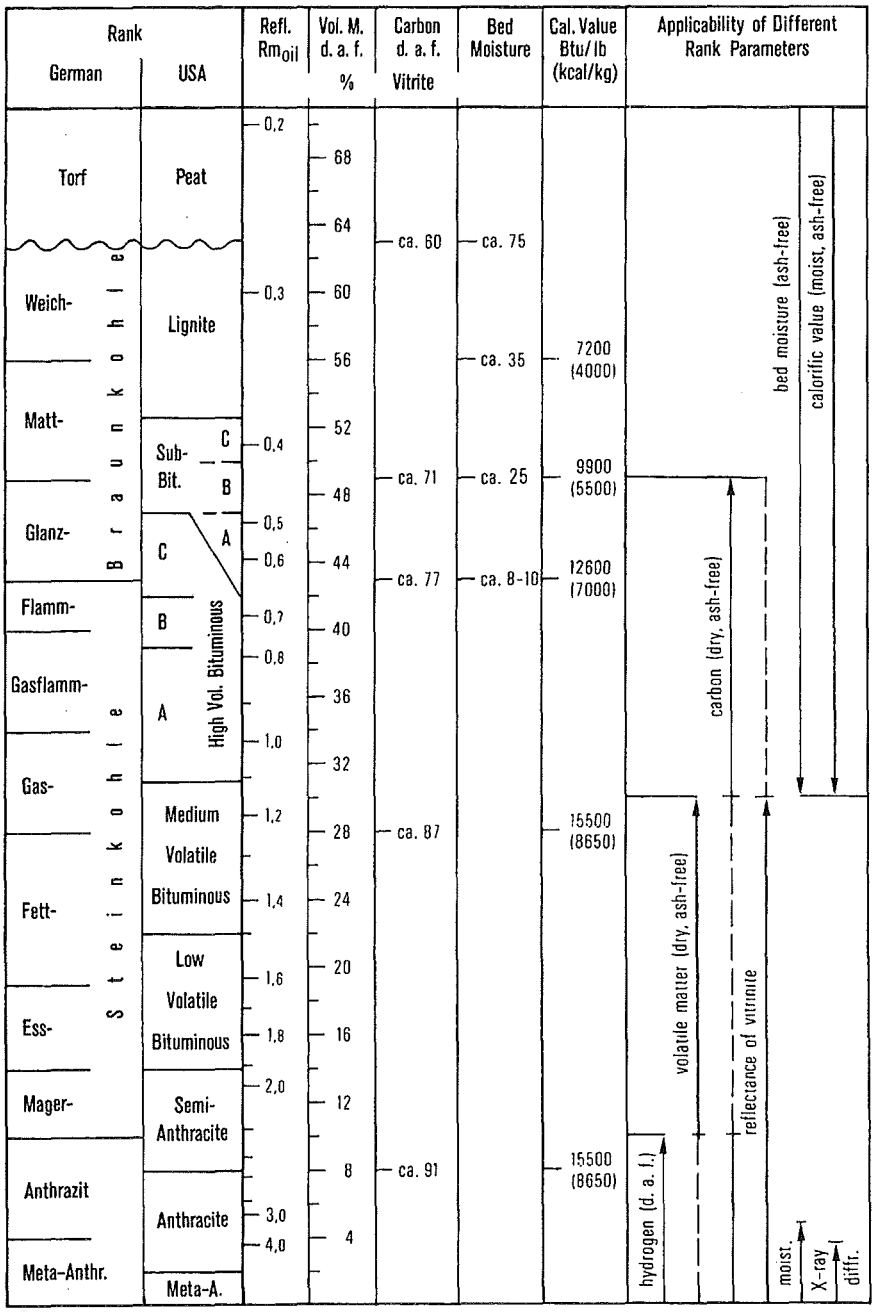
Kohle

Kohlen sind Gesteine, die zu über 50 Gew.% aus organischer Substanz bestehen. Sie gehen auf Torfmoore zurück, die sich nach der Entwicklung von Landpflanzen im Devon (vor ca. 400 Millionen Jahren) auf der Erdoberfläche bildeten. Solche Torfmoore sind in der Regel an humide Klimazonen gebunden. Sie werden von Schilfpflanzen, Moosen (Sphagnum) aber auch Bäumen bewachsen. Nach dem Absterben der Pflanzen werden die einzelnen Pflanzenteile, mehr oder weniger stark, abgebaut; widerstandsfähige Teile werden jedoch teilweise konserviert und bleiben dementsprechend in dem sich bildenden Torf erhalten. Torfmoore können eine Mächtigkeit von mehreren Metern erreichen; in der Regel findet das Wachstum des Torfes jedoch ein natürliches Ende, weil durch die Aufdomung der immer dicker werdenden Moore der Wasserabfluß so stark wird, dass die Zersetzung der pflanzlichen Bestandteile schneller fortschreitet als deren Bioproduktion. In den Tropen gibt es jedoch Hochmoore von bis zu 20 m Mächtigkeit. Torfe sind sehr heterogen zusammengesetzte Mischungen verschiedener Pflanzen und Pflanzenteile sowie mineralischer Bestandteile. Dementsprechend sind auch ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften sehr variabel. So können die nicht-organischen Anteile zwischen 0 und 50 Gew.-% betragen, die für die umwelt-gerechte Verarbeitung wichtigen Schwefelgehalte zwischen 0 und über 5 Gew.-%.

Aus Torfen werden bei zunehmender Versenkung und Temperaturerhöhung zunächst Braunkohlen, dann Steinkohlen und schließlich Anthrazite und Graphit. Das Schema dieser Entwicklung zeigt Tabelle 2. Zur quantitativen Beschreibung dieser Entwicklung werden verschiedene Parameter eingesetzt, so z.B. die Reflexion des Vitrinits (ehemalige Holzteilchen) bei bestimmten Standard-Bedingungen, die Menge an flüchtigen Bestandteilen, die bei der Verbrennung entstehen, der Kohlenstoffgehalt der organischen Substanz der Kohle, der Wassergehalt und der Heizwert (Tabelle 2). Diese Parameter sind jedoch nicht universell anwendbar, sondern jeweils für verschiedene Rang-Bereiche besonders geeignet. Bei der Entwicklung vom Torf bis zur Steinkohle geht ein erheblicher Anteil an Volumen durch mechanische Kompaktion, aber auch durch Abspaltung und Verlust von Gasen verloren, so dass ein 20 m mächtiger Torf nur etwa ein drei Meter mächtiges Steinkohle-Flöz ergibt. Die technische Verwendbarkeit der Kohlen hängt stark von der ursprünglichen pflanzlichen

Zusammensetzung, dem Mineralgehalt und vor allem dem Rang ab. So sind im allgemeinen Fettkohlen ideal für die Verkokung geeignet.

Tabelle 2: Entwicklungsstufen der Kohlen: Vitrinitreflexion, Flüchtige Bestandteile, Kohlenstoffgehalt (jeweils bezogen auf trockene und aschefreie Kohlen), Feuchtigkeit und Heizwert. Rechts ist die Anwendbarkeit verschiedener Parameter zur Rang-Beurteilung der Kohlen dargestellt.



Kohlen werden entweder im Tagebau oder Untertage abgebaut. Beispiele für beide Verfahren liegen in Jülich vor der Haustür: Die miozänen, etwa 20 Millionen Jahre alten Weich-Braunkohlen der Niederrheinischen Bucht werden in einigen hundert Meter Teufe angetroffen. Die darüberliegenden Schichten werden zur Gewinnung abgetragen und (zwischen-) gelagert; ein Beispiel dafür ist die Sophienhöhe bei Jülich. Die darunter folgende Kohle wird durch große Bagger im Tagebaubetrieb gefördert. Dieses Verfahren, das auch zur Ölschiefer-Förderung geeignet ist, greift zwar in die natürliche Landschaft erheblich ein, ist aber kostengünstig.

Im Ruhrgebiet, im Saargebiet und im Aachen-Erkelenzer Revier werden karbonische, etwa 300 Millionen Jahre alte Steinkohlen und Anthrazite dagegen im Untertage-Verfahren gewonnen. Diese Kohlen liegen in der Regel relativ tief, oft 700 bis 1500 Meter unter der Erdoberfläche. Daher, und auch aus verschiedenen anderen, geologischen Gründen, ist ein Tagebau dort nicht möglich. Aufgrund der Zunahme der Temperatur mit der Teufe liegen die Temperaturen im Abbaubereich oft bei über 30 bis 40°; ein aufwendiges Belüftungssystem (Bewetterung) verbessert die Arbeitsbedingungen und senkt gleichzeitig die Konzentration des bei der Gewinnung freigesetzten, hoch-explosiven Grubengases. Der Untertage-Bergbau ist insgesamt sehr viel kostenintensiver als der Übertage-Bergbau und wird daher immer weniger betrieben. Für Deutschland gilt jedoch nach wie vor, dass die Steinkohle die bei weitem größte nationale Energiereserve darstellt.

Die Exploration auf Kohle erfolgt zu einem erheblichen Teil über Bohrungen. Dabei werden die Mächtigkeit und die Qualität sowie die Lagerung der Kohle ermittelt. Eine horizontale Lagerung und eine Schichtmächtigkeit von mindestens 60 cm sind im allgemeinen Voraussetzung für einen maschinellen Abbau. Zunehmend müssen im Zuge der Exploration auch Umweltverträglichkeits-Untersuchungen durchgeführt werden; so spielt bei der Genehmigung des geplanten Tagebaus Garzweiler II die Frage der Absenkung des Grundwasserspiegels in benachbarten Gebieten und allgemein der Grundwasserbeeinflussung eine große Rolle.

Eine neuartige Nutzung von der Steinkohlenlagerstätten hat sich in den vergangenen 10 bis 15 Jahren aus dem Bemühen des Bergbaus entwickelt, die Konzentration des explosiven Grubengases zu senken und damit die Sicherheit der Bergleute zu erhöhen:

Grubengases besteht zu über 90 % aus Methan und wird z.B. in den USA und in Australien kommerziell durch Bohrungen, die von der Erdoberfläche in die etwa 500 bis 1500 m tief liegenden Kohlenflöze niedergebracht werden, gefördert. Es wird als Flözgas oder auch als coalbed methane bezeichnet. Typische Gasgehalte liegen im Ruhrbecken bei 10 bis 20 m^3 Gas pro m^3 Reinkohle, so dass alleine in diesem Becken von geologischen Reserven von über 30 Mrd. m^3 auszugehen ist. Das Flözgas ist in den Kohlenflözen nur zu einem geringen Teil als gasförmige Phase vorhanden; der weitaus größte Teil des Flözgases ist unter hohem hydrostatischen Lagerstättendruck adsorptiv auf der Kohlenoberfläche gebunden. Die technische Gewinnung des Flözgases wird durch die Entwässerung der Lagerstätte und die damit einhergehende Absenkung des hydrostatischen Druckes eingeleitet. Durch den Druckabfall wird zuvor adsorptiv gebundenes Gas desorbiert und migriert über natürliche Wegsamkeiten (Schlechten) innerhalb der Kohlenflöze zum Bohrloch. Zur Verbesserung der Permeabilität der Flöze werden diese häufig nach dem sogenannten Frac-Verfahren behandelt. Dabei werden die natürlichen Wegsamkeiten durch einen im Gestein künstlich erzeugten Riß mit dem Bohrloch zu verbunden. Bei der Erstellung eines solchen Fracs (Riß) wird eine Suspension aus Wasser, Sand und Stärke unter hohem Druck in das Gestein eingepresst. Der Gesteinsverband reisst auf, die eindringende Suspension weitet den Spalt und füllt ihn mit dem mitgeführten Sand auf. Auf diese Weise wird ein späteres Kollabieren des künstlichen Hohlraumes verhindert. Typischerweise werden bei einem Frac etwa 50 t Sand mit einer Pumpleistung von über 5000 KW (7000 PS) in einen bis zu 200 m langen Spalt eingepresst. Aufgrund genauer petrophysikalischer und tektonischer

Kenntnisse kann die Orientierung und Ausdehnung solcher Fracs gut vorausberechnet und beeinflusst werden.

Während weltweit die Zahl der erfolgreichen Flözgas-Projekte wächst, haben die im Ruhrbecken durchgeführten Explorationsarbeiten - trotz der Frac-Technik - bisher jedoch nicht zur einer ökonomischen Flözgas-Produktion geführt. Als Ursache dafür sind einerseits hohe Kosten für Produktions- und Transportinstallationen sowie Aspekte des Umweltschutzes zu nennen. Andererseits scheinen die natürlichen Wegsamkeiten der Kohlen in Tiefen von über 1000 m durch den hohen Überlagerungsdruck weitgehend verschlossen.

Andere, technisch sehr viel aufwendigere Verfahren zur Nutzung der Steinkohle, so z.B. die Untertage-Vergasung bzw. die Verflüssigung von Kohle scheitern derzeit aus technischen bzw. ökonomischen Gründen.

Erdöl

Erdöl entsteht aus pflanzlichem (untergeordnet auch aus tierischem und bakteriellem) organischem Material in Sedimenten und Sedimentgesteinen durch Crack-Prozesse. Dieses sedimentäre organische Material tritt einerseits in konzentrierter Form in Torfen und Kohlen auf, andererseits aber auch fein-dispers in fast allen Sedimentgesteinen. Die Gesamtmenge an fein-dispersem organischem Material (Kerogen) ist bei weitem größer als die in Kohlen gebundene bzw. als die Masse der lebenden Biomasse (Abb. 3). Unter besonders günstigen Bedingungen kommt es in Seen oder Meeren jedoch zur Ablagerung von Sedimenten mit relativ hohen Gehalten an organischem Material (oft 5 bis 20%). Diese Bedingungen treten ein, wenn 1) eine hohe Bioproduktivität vorliegt, die wiederum von Nährstoffangebot und Sonneneinstrahlung abhängt, und 2) geringe Wasserbewegung zur Sauerstoff-zehrung im Bodenwasser und damit zu einer Limitierung aerober und auch anaerober Abbauprozesse im Bodenwasser und im frisch abgelagerten Sediment führen. Die entsprechenden Sedimente werden oft als Sapropelschlamm oder Gyttja bezeichnet und enthalten hohe Anteile an Algen und anderem Phytoplankton. Bei der folgenden Überlagerung durch jüngere Sedimente werden sie in größere Erdtiefen versenkt und dann als Ölschiefer, Schwarzschiefer oder Erdölmuttergesteine bezeichnet.

Bedingungen, die für die Bildung solcher Sedimente günstig sind, werden rezent auch durch menschliche Einflüsse geschaffen. Die Eutrophisierung von Seen und Nebenmeeren führt an vielen Stellen zu stark erhöhter Bioproduktivität im Oberflächenwasser. Nach dem Absterben kann das entsprechende organische Material nicht mehr vollständig abgebaut werden bzw. der Sauerstoff im Bodenwasser wird durch den großen Anfall an organischer Substanz komplett verbraucht. Damit sterben die Bodenlebewesen (Benthos), die ansonsten durch die Durchwühlung der oberen Zentimeter der Sedimente zum weiteren Abbau des organischen Materials beitragen. In den letzten Jahren sind unter anderem Teile der Ostsee anoxisch geworden. Komplett anoxisch ist das Tiefenwasser unter anderem im Schwarzen Meer und im Tanganjika-See; besonders hohe Bioproduktivität herrscht im marinen Bereich vor den Küsten von Peru, Nordwest- und Südwest-Afrika, und Arabien.

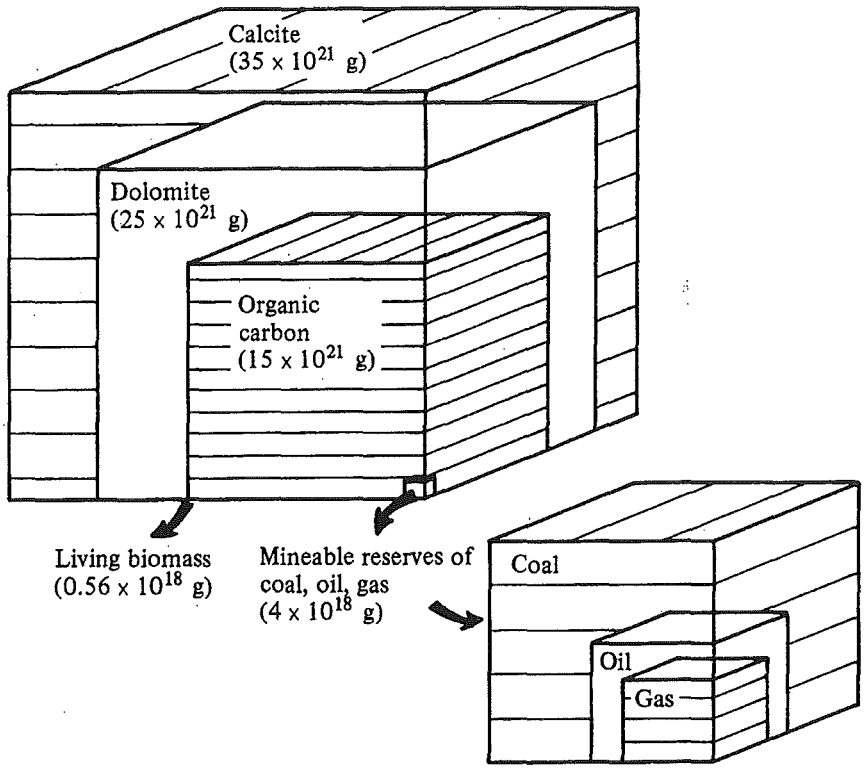


Abb. 3: Kohlenstoff in Karbonaten (Kalzit und Dolomit) und organischem Material in der Erdkruste.

Bei der Versenkung erleben die in den Sedimenten eingebetteten organischen Substanzen zunächst eine Phase biochemischer Umwandlung, deren Intensität sehr unterschiedlich ist. Quantitativ bedeutend sind vor allem der aerobe Abbau und der Abbau über sulphatreduzierende Bakterien. Zusammenfassend läßt sich festhalten, dass seit der Erfindung der Photosynthese vor mehr als 2000 Millionen Jahren die biologische Massenproduktion organischen Materials auf der Erde stattfand. Jedoch wird der bei weitem größte Teil des reduzierten (organischen) Kohlenstoffs bei Oxidationsprozessen zerstört und schließlich in Kohlendioxid zurückgewandelt. Nur ein kleiner Teil entgeht diesem atmosphärisch-hydrosphärischen Zyklus und wird, in Sedimente eingebettet, in größere Erdtiefen verfrachtet.

Dabei kommt es zu zunehmend intensiven, thermisch gesteuerten Abbauprozessen. Allerdings ist nicht allein die Temperatur, sondern auch die Zeit, die eine bestimmte Temperatur einwirken kann, für die Vorgänge, die zur Erdölbildung führen, entscheidend. Die Erdölbildung ist quantitativ und hinsichtlich der gebildeten Produkte also von der Art des organischen Materials und der Temperaturgeschichte der Sedimente, in denen das organische Material vorkommt, abhängig. Chemisch lassen sich die Änderungen des dispersen organischen Materials während der Erdölbildung mit dem sogenannten van Krevelen-Diagramm (H/C-O/C) veranschaulichen (Abb. 4). Mit zunehmender Temperaturbeanspruchung verlieren sowohl primär wasserstoffreiche Kerogene (z.B. Alginit), als auch intermediäre Kerogene (Exinit: Sporen- und Harzreste, etc.) vor allem Wasserstoff, so dass das H/C- Verhältnis stark abnimmt (siehe auch Tab. 2). Gleiches gilt für wasserstoffärmeres Kerogen, wie es aus höheren

Landpflanzen hervorgeht (Vitrinit; vitrinitreich sind diemeisten Kohlen), jedoch nimmt hier zunächst der Sauerstoffgehalt und damit das O/C-Verhältnis stark ab.

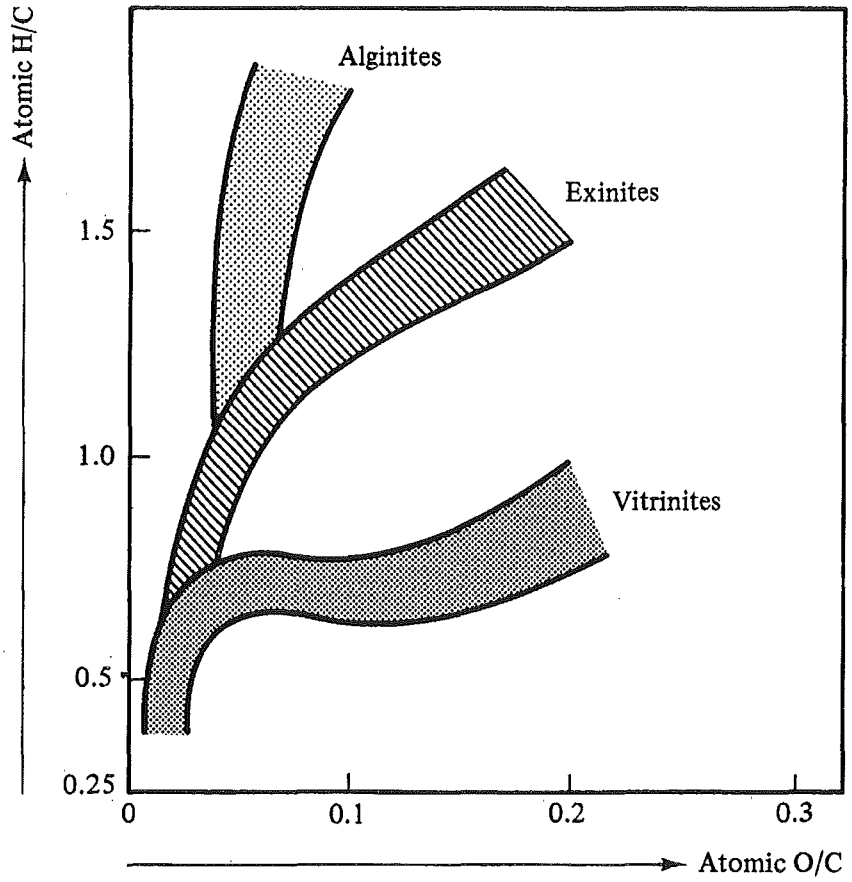


Abb. 4: Atomare Verhältnisse von Wasserstoff zu Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlenstoff für verschiedene Typen von sedimentärem organischem Material (van Krevelen-Diagramm).

Die Veränderungen des dispersen organischen Materials und der Kohlen gehen auf die Abspaltung von kleinerer Moleküle, vor allem von Kohlenwasserstoffen und anderen organischen Verbindungen, zurück. Diese organischen Verbindungen besitzen in der Regel zwischen 1 (Methan) und 40 Kohlenstoff-Atome. Öle sind auserordentlich komplexe Gemische solcher Verbindungen wobei aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe mit 10 bis 30 Kohlenstoff-Atomen meist dominieren. Schweröle und Teersande sind durch größere Moleküle und oft durch einen hohen Anteil von Schwefelverbindungen gekennzeichnet. Sie entstehen zum Beispiel dort, wo sich Erdöl nahe der Erdoberfläche sammelt und durch Bakterien abgebaut wird.

Die Bildung von Erdöl vollzieht sich in der Regel in Teufen von 2 bis 5 Kilometern und bei Temperaturen von 80 bis 160°C (Abb. 5). Es gibt jedoch Ausnahmen, die durch besondere Zusammensetzungen des sedimentären organischen Materials (z.B. schwefelreiches Kerogen) oder durch besonders hohe Aufheizraten (an Vulkanen) bedingt sein können. Generell wird in einer frühen ersten Phase der Erdölbildung vor allem die Genese großer Heterokomponenten-Moleküle (also

Verbindungen, die auch organischen Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel etc.) enthalten) und langkettiger Kohlenwasserstoffe beobachtet. Bei höheren Temperaturen (in größeren Teufen) entstehen dann zunehmend kleinere Moleküle, so dass sich der Charakter des Öls, zum Beispiel in Bezug auf seine chemische Zusammensetzung, seine Fließfähigkeit und seine Dichte, verändert.

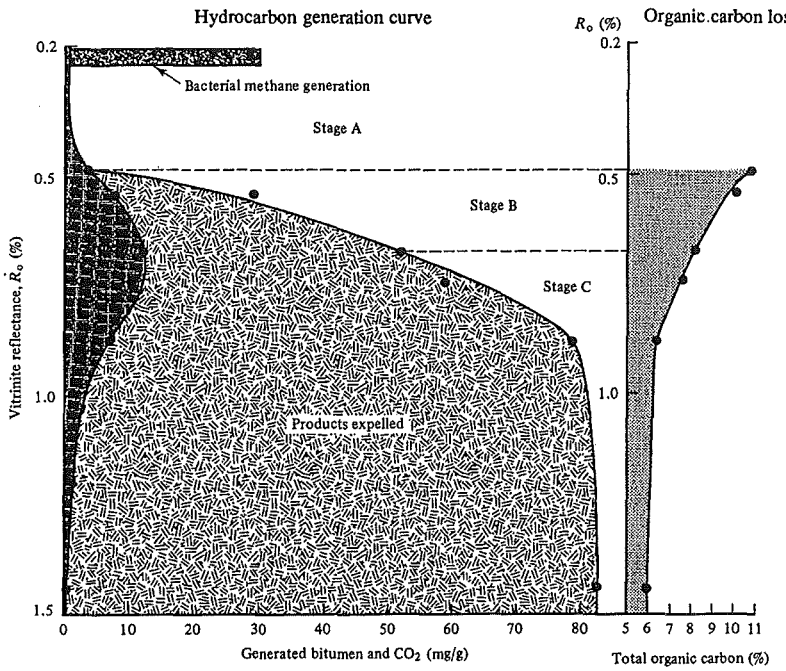


Abb. 5: Schema der Erdöl- und Erdgasbildung in Erdölmuttergesteinen

Erdöl wird in verschiedensten Sedimentgesteinen gebildet, in großer Menge jedoch nur in den oben beschriebenen Ölschiefern und Erdölmuttergesteinen, sofern sie das richtige Temperaturfenster erreichen. Diese Gesteine sind jedoch meist sehr feinkörnig und damit wenig permeabel (Abb. 6); eine Förderung von Öl aus diesen Gesteinen würde daher kaum wirtschaftlich sein. Glücklicherweise ist Erdöl jedoch mobil und bewegt sich (migriert) daher teilweise aus den Erdölmuttergesteinen heraus in gröbere Speicher- und Reservoirgesteine. In Abbildung 5 ist dementsprechend - exemplarisch für den Posidonienschiefer als wichtigstes zentraleuropäisches Erdölmuttergestein - dargestellt, welche Gesamt-Massen an Erdöl und Erdgas entstehen und welche Anteile in den Muttergesteinen verbleiben. Die Migration von Erdöl folgt im allgemeinen Druckgradienten; da Öl leichter als das Porenwasser ist, das ansonsten den Porenraum der Sedimente ausfüllt, bewegt es sich relativ zu diesem nach oben, bis es an undurchlässige (besser: wenig durchlässige) Schichten stößt und an der weiteren Wanderung gehindert wird. Treten solche undurchlässigen Schichten (siehe Abb. 6: z.B. Tonsteine, Salze) nicht auf, so wird das Öl bis an die Erdoberfläche gelangen und dort durch Bakterien allmählich zu Schweröl degradiert. Eine optimale Zone für die Förderung von Erdöl liegt daher bei mindestens 1-2 Kilometern und meist weniger als 4 Kilometern Teufe. In diesen Bereichen ist auch die Porosität (Abb. 7) und Permeabilität typischer Speichergesteine (z.B. Sandsteine) noch akzeptabel; mit zunehmender Teufe nimmt diese durch den zunehmenden Überlagerungsdruck stark ab.

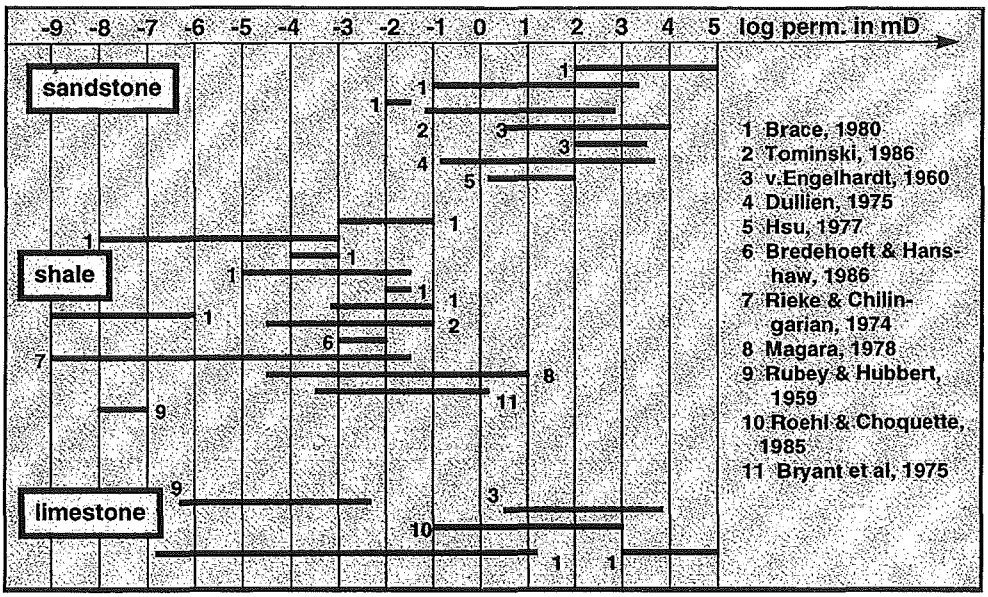


Abb. 6: Permeabilitäten verschiedener Gesteinstypen

Die Exploration auf Erdöl bedient sich sehr verschiedener geowissenschaftzlicher Verfahren. In den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts, als das Erdölzeitalter mit Förderung in Pennsylvania, im Kaukasus und auch im Gifhorner Trog in Nordeutschland begann, waren es Ölaustritte an der Erdoberfläche die den Ausschlag für Bohraktivitäten gaben. Heute nimmt die seismische Erkundung des Untergrundes eine besonders bedeutende Stellung unter den Explorationsmethoden ein. Dabei werden Erschütterungen und Explosionen an der Erdoberfläche genutzt, um die oberen Kilometer zu durchschallen. Die an die Oberfläche zurückreflektierten Wellen dienen dazu, ein (dreidimensionales) Bild der im Untergrund liegenden Gesteine zu entwerfen. Dabei sind Schichtgrenzen, an denen starke Sichtekontraste bzw. Kontraste der Schall-Laufzeiten auftreten besonders geeignet um scharfe Reflektoren zu bilden. Die Verfahren der Seismik haben sich in den letzten Jahren außerordentlich weiterentwickelt (Stichwort: 3D-Seismik); dennoch sind die Methoden bezüglich der Auflösung bei weitem noch nicht so genau, als daß sich bereits einzelne Gesteinstypen oder gar Gesteinseigenschaften aus der Seismik ableiten ließen. Strukturen im Untergrund wie z.B. Antiklinalen (Sättel, Aufwölbungen), die für die Akkumulation von Erdöl und Erdgas besonders günstig sind, lassen sich jedoch oft sehr gut ermitteln.

Zur Aufsuchung von Lagerstätten in verschiedenen Sedimentbecken ist auch die Aufklärung des komplexen Zusammenhanges zwischen Erdölbildung in Muttergesteinen, Erdölmigration in Speichergesteinen und Erdölakkumulation unter undurchlässigen Abdeckschichten von großer Bedeutung. Solche kompletten „Petroleum Plays" lassen sich besonders gut durch die Anwendung organisch-geochemischer Methoden betrachten, die eine Charakterisierung der komplex zusammengesetzten Öle bis in den molekularen Bereich erlauben. Da die entsprechenden Prozesse jedoch im Maßstab von Sedimentbecken (also mehrere 1000 km3) und über Zeiträume von mehreren Millionen Jahren ablaufen, haben sich in den letzten Jahren numerische Computer-Simulationstechniken (Beckensimulation) als Hilfsmittel der Exploration zunehmend durchgesetzt.

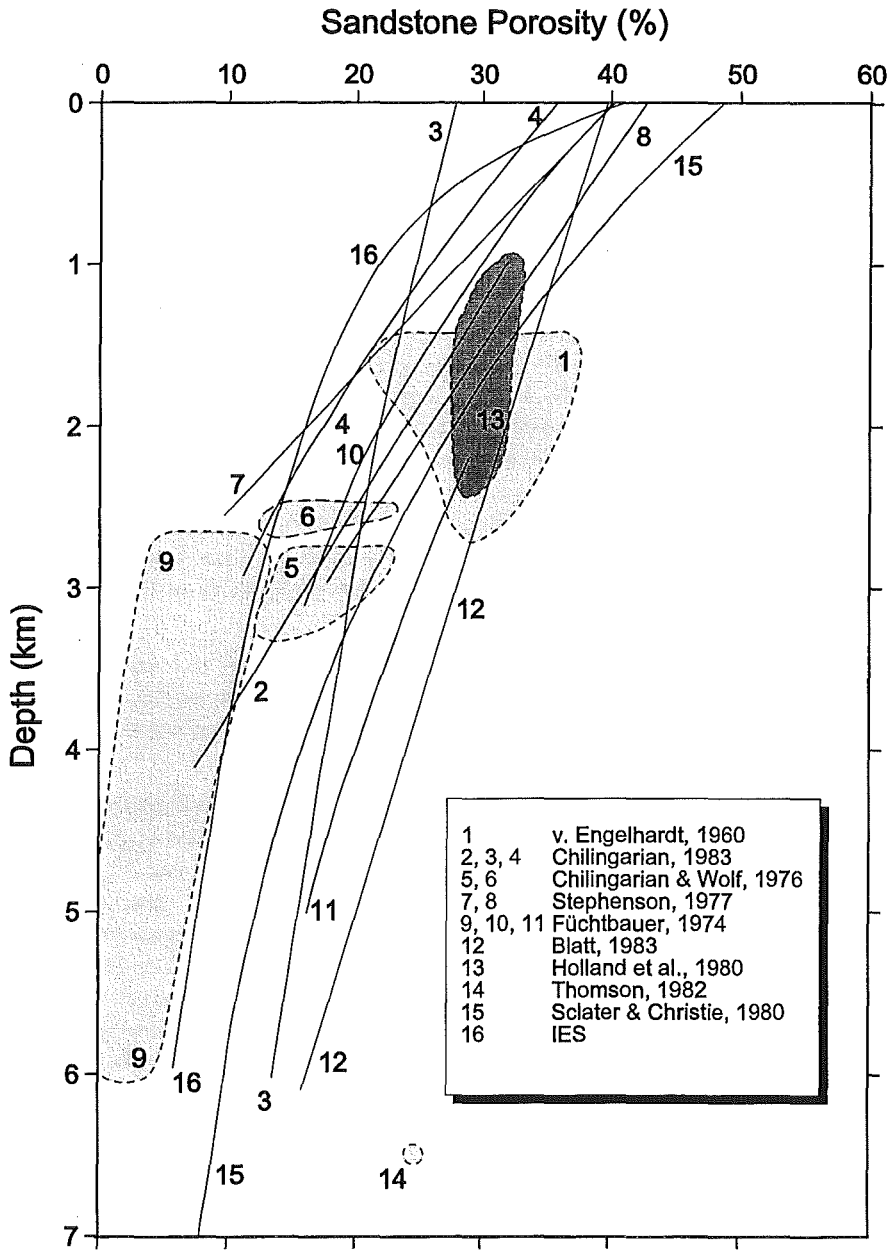


Abb. 7: Porositäten verschiedener Sandsteine in Abhängigkeit von der Teufe

Weiterhin spielt für die heutige Exploration und Produktion die Technik der Horizontalbohrungen eine besondere Rolle. Dabei werden in der Vertikale angesetzte Bohrungen in einer bestimmten Teufe so abgelenkt, dass die Bohrung schließlich in der Horizontalen weiterverläuft, vorzugsweise in einem Reservoir-Gestein. Damit lassen sich nicht nur höhere Förderraten erzielen, sondern es ist auch möglich, in bisher nicht zugänglichen Gebieten (z.B. unter Naturschutzarealen, Städten) zu fördern.

Erdgas

Erdgas gilt als wichtigster fossiler Energieträger des nächsten Jahrhunderts, da bei der Verbrennung kaum Schadstoffe freigesetzt werden und da die CO2 Emission (bezogen auf den Heizwert) geringer ist als bei Erdöl und Kohle. Als Erdgas wird gemeinhin Methan (CH4) bezeichnet, der einfachste und thermisch stabilste Kohlenwasserstoff. Allerdings gibt es im Porenraum von Sedimentgesteinen eine Vielzahl von Gasen und auch die geförderten Lagerstättengase sind sehr heterogen zusammengesetzt. So gibt es fast immer Beimengungen höherer Kohlenwasserstoffe, vor allem von Ethan und Propan, aber auch anorganischer Gase. Bedeutend sind vor allem molekularer Stickstoff (N2), der gerade in Nord- und Ostdeutschland in hohen Konzentrationen auftritt, Kohlendioxid (CO2) und Schwefelwasserstoff (H2S). Alle genannten anorganischen Gase können, ebenso wie Methan, bis zu über 99% eines Lagerstättengases stellen.

Die Bildung des kommerziell wichtigen Methan-Gases geschieht auf verschiedenen Wegen. Der wichtigste ist die Bildung von Methan in Erdtiefen von einigen Kilometern und bei Temperaturen von ca. 80 bis 300°C. Insbesondere bei Temperaturen oberhalb von 160°C, bei denen die Erdölbildung weitgehend abgeschlossen ist, werden Methylgruppen aus dem sedimentären organischen Material abgespalten und tragen zur Methangenese bei. Ein zweiter wichtiger Weg der Methanbildung vollzieht sich über mikrobielle Prozesse nahe der Erdoberfläche. Nur unter günstigen Verhältnissen kann so gebildetes Gas in Sedimenten konserviert bleiben; ansonsten entweicht es in Richtung der Erdoberfläche.

Die Herkunft von Methan kann aus der Assoziation mit anderen Gasen, aber auch aus der Isotopie des beteiligten Kohlenstoffes geschlossen werden. So sind bakteriell gebildete gegenüber thermogenen Methan-Gasen immer verarmt an dem schweren Kohlenstoff-Isotop (^{13}C) und enthalten auch fast keine Beimengungen von Ethan, Propan und anderen Kohlenwasserstoffen.

Die Exploration auf Erdgas vollzieht sich zum Teil in weit größeren Teufen als diejenige auf Erdöl, da Methan bei höheren Temperaturen als Erdöl gebildet wird und damit auch meist in größeren Teufen von bis zu 10 Kilometern. Allerdings spielt auch die abnehmende Porosität und Permeabilität der Gesteine mit zunehmender Teufe eine wichtige Rolle. Diese bewirkt, dass hervorragende Speichergesteine in großen Teufen nur unter besonders günstigen Umständen zu erwarten sind (Abb. 7). Während Sandsteine und Kalksteine die klassischen Speichergesteine für Erdöl und Erdgas darstellen, werden zunehmend auch dichtere Gesteine zur Erdgasförderung verwendet. Dazu gehören insbesonders Kohlen aus denen Methan als sogenanntes Flözgas (coalbed methane) gefördert wird (siehe oben). Daneben stellen Gashydrate eine außerordentlich große, potentielle Methanreserve dar, die allerdings bisher kaum wirtschaftlich nutzbar ist. Solche Gashydrate bilden sich bei hohen Drucken und niedrigen Temperaturen, wie sie beispielsweise in Sedimente einige hundert Meter unter der Tiefsee auftreten. Unter solche Bedingungen bilden bei Anwesenheit von Methan Wassermoleküle feste, eisartige Käfige, in denen Methan „gefangen" wird. Die Menge von derart gebundenem Methan soll die Menge konventionellen Erdgases bei weitem übersteigen.

Literatur

Füchtbauer, H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine, Schweizerbarth, Stuttgart, 1141S.

Howell, D.G. (1993): The future of energy gases. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1570, 890S.

Tissot, B.P. & Welte, D.H. (1984): Petroleum formation and occurrence. Springer, Berlin, 699S.

Welte, D.H. et al. (1997): Petroleum and basin evolution, Springer, Berlin, 535S.

Grundlagen der Energietechnik

Walter Bitterlich

Lehrstuhl Energie- und Kraftwerkstechnik

Universität GH Essen

Grundkenntnisse in der Energietechnik wurden schon im Grundstudium erworben bzw. in einigen Gebieten, z. B. der Thermodynamik oder der Strömungsmechanik, angewandt. Man könnte daher meinen, daß die physikalisch-technischen Grundlagen der Energietechnik schon bekannt sein müßten. Dennoch erscheint es wichtig und richtig, die Grundlagen noch einmal herauszuarbeiten und schon Bekanntes neu zu ordnen bzw. erst einmal in eine grundsätzliche Ordnung zu bringen.

Der Energiebegriff wird in den verschiedenen Bereichen der Naturwissenschaft und Technik zur Beschreibung des Zustandes materieller Systeme und der von diesen ausgehenden Wirkungen verwendet. Auch in der Energiewirtschaft werden sehr viele Begriffe benutzt, die sich auf Energie beziehen.

In den verschiedenen Disziplinen, in denen Energiebegriffe auftreten, haben sich im Laufe der Entwicklung und entsprechend dem speziellen Verwendungsbedarf verschiedene Definitionen, Begriffe und Energieformen als besonders wichtig erwiesen. Dementsprechend wurden sie geprägt und definiert, ohne immer den Zusammenhang mit weniger oft oder gar nicht benutzten Begriffen anderer Disziplinen zu berücksichtigen. Es entwickelten sich sogar Spezialbereiche, wie z. B. die Thermodynamik, mit einer für die jeweilige Praxis sehr nützlichen Auswahl aus den Gesetzmäßigkeiten der Energielehre.

Auf diese Weise treten Unschärfen beim Gebrauch von Energiebegriffen auf bzw. entwickelte sich ein sehr differenziertes Verständnis für den gleichen Begriff. Dies kann sich in der modernen Energietechnik, in der heute alle Bereiche der Energielehre wichtig sind, schädlich auswirken.

Vor diesem Hintergrund wird ein Abriß der allgemeinen Energielehre erläutert, wie er für den in der Energietechnik und Energiewirtschaft Tätigen von Bedeutung ist. Es werden die wichtigsten Bereiche verbal und mathematisch definiert. Soweit dies sinnvoll ist, verwenden wir die schon in Regeln und Normen festgelegten Definitionen und Formelzeichen.

Die Einengung innerhalb der Physik erfolgt einerseits im Hinblick auf die Relativitätstheorie, d. h. es werden hier nur Systeme betrachtet, deren relative Geschwindigkeit viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist, obwohl ein Ergebnis der Relativitätstheorie, nämlich die Äquivalenz von Energie und Masse, selbstverständlich verwendet wird. Die Thermodynamik und die dort formulierten Gesetzmäßigkeiten sind ein wesentlicher Bestandteil dieses Beitrages.

1 Einführung in die Energielehre

1.1 Energiebegriff

Unser Wort Energie kommt über das Französische im 18. Jahrhundert aus dem Lateinischen und ursprünglich aus dem Griechischen und bedeutet etwa „wirkende Kraft“ oder „innewohnende Wirkungskraft“.

Die allgemeine Definition ist - wie viele exakte Definitionen - relativ „hölzern" und nichtssagend.

Energie eines materiellen Systems ist eine physikalische Größe, die durch den Ort und die Geschwindigkeit des Systems und dessen Systemelemente bestimmt ist. Sie ist in den einfachsten Fällen eine Funktion der Orts- und Geschwindigkeitsvektoren ($\vec{r}$,$\vec{w}$) oder anderer Zustandsgrößen, wie z. B. Temperatur, Druck, elektrische Stromstärke usw.

Eine mehr populäre Definition ist die folgende:

Die Energie eines materiellen Systems ist ein Maß für die Fähigkeit, eine Wirkung zu erzielen. Die energetische Wirkung ist entweder Arbeit, Wärme oder (elektromagnetische) Strahlung.

Die Einheit der Energie ist das Joule.

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{Nm} = 1\ \mathrm{kg}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} = 1\ \mathrm{Ws}.$$

Weitere Energieeinheiten, die z. T. veraltet oder sogar ungesetzlich oder in Deutschland ungebräuchlich sind:

1 kWh = 3,6 MJ
1 kcal = 4,1868 kJ
1 PSh = 0,73549875 kWh = 2,647796 MJ
1 Btu = 1,055056 kJ
1 tSKE = 29,3 GJ
1 MeV = 1,6021892 $\cdot 10^{-13}$ J
1 kpm = 9,80665 J.

1.2 Formen der gespeicherten Energie

Offenbar ist die Energie in einem System gespeichert. Wir nennen diese Energie daher gespeicherte Energie E_S im Gegensatz zu den Prozeßenergien Ep Arbeit, Wärme und Strahlung, die weiter oben schon erwähnt wurden.

$E_S = E_S (\vec{r}, \vec{w})$.

In jedem materiellen System ist Energie gespeichert. Die *gespeicherte Energie* (E_S) eines Systems ist proportional dem materiellen Inhalt des Systems, d.h. proportional der Masse (m) und der elektrischen Ladung (e). Gespeicherte Energie ist also eine *extensive Größe*, die unterscheidbar ist in *massengebundene Energie* (E_S^m) und *ladungsgebundene Energie* (E_S^e).

$E_S = E_S^m + E_S^e$.

Wie oben gesagt, ist die gespeicherte Energie entweder von dem Ort (Ortsvektor $\vec{r}$) E_{Sr} oder von der Geschwindigkeit ($\vec{w}$) E_{Sw} abhängig.

1.2.1 Massenabhängige Energie

Für die massenabhängige Energie kann man schreiben:

$$E_S^m = E_{Sr}^m + E_{Sw}^m + E_{Sm\,0}^m .$$

Ein Beispiel für die ortsabhängige Energie E_{Sr}^m ist die Gravitationsenergie.

Die Anziehungskraft zwischen den Massen M und m ist umgekehrt proportional dem Quadrat ihres

Abstandes $\vec{r}$ und proportional dem Produkt beider Massen.

$$\vec{F}(\vec{r}) = f \cdot \frac{m \cdot M}{\vec{r}^2}$$

$f = 6{,}6732 \cdot 10^{-11}\ Nm^2/kg^2$ ist die Gravitationskonstante.

$$E_{Sr}^m = \int_{r_B}^{\vec{r}} \vec{F} \cdot (\vec{r}) \cdot d\vec{r} = f \cdot m \cdot M \cdot \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r} \right).$$

Die Gravitationsenergie ist offensichtlich von Bezugspunkt r_B abhängig und kann auch negative Werte annehmen.

Für $M_E = 5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg (Erdmasse) und $r_B = R_E = 6{,}37 \cdot 10^6$ m (mittlerer Erdradius) bekommt man mit $h = r - R_E << R_E$ die Gravitationsenergie

$$E_{Sr}^m \approx m \cdot g \cdot h \qquad \text{mit} \quad g = f \cdot \frac{M}{R_E^{\,2}} = 9{,}80664 \frac{m}{s^2} \quad \text{Erdbeschleunigung.}$$

Nach Newton wirkt auf die träge Masse bei einer Geschwindigkeitsänderung die Kraft

$$\vec{F}_w^m = m \cdot \frac{d\vec{w}}{dt}.$$

Damit erhält man für die geschwindigkeitsabhängige Energie E_{Sw}^m

$$E_{Sw}^m = \int \vec{F}_w^m \cdot d\vec{r} = \int_0^w m \cdot w \cdot dw \approx m \cdot \frac{w^2}{2}$$

Dies gilt allerdings nur für Geschwindigkeiten, die sehr viel kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit ($c = 2{,}99{,}7925 \cdot 10^6$ m/s).

Gemäß der Relativitätstheorie gilt für die geschwindigkeitsabhängige Energie

$$E_{Sw}^m = m \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{w^2}{c^2}}} = m_0 \cdot c^2 + m_0 \cdot \frac{w^2}{2} + \left(\frac{3}{8} m_0 \cdot \frac{w^4}{c^2} + \ldots \right).$$

Bei relativ kleinen Geschwindigkeiten können die weiteren Glieder der Summe vernachlässigt werden, so daß als weiterer massenabhängiger Term die Energie der Ruhemasse m_0

$$E_{Sm0}^m = m_0 \cdot c^2$$

hinzutritt.

1.2.2 Ladungsabhängige Energie

In Analogie zu den massengebundenen fundamentalen Energieformen kann man zwei ladungsgebundene Energieformen ableiten, die vom Ort ($\vec{r}$), vom Strom (I) (d.h., der Geschwindigkeit der Ladung) bzw. seinem Magnetfeld und von der Ladung (e) abhängen.

$$dE_S^e = dE_{Sr}^e + dE_{SI}^e$$

Die potentielle elektrische Energie ist

$$E^e_{Sr} = \int_0^{\vec{r}} \vec{F}^e(\vec{r}) \cdot d\vec{r}\,.$$

Die Kraft zwischen zwei Ladungsträgern e_1 und e_2 ist formal ähnlich wie diejenige zwischen Massenpunkten.

$$F^e(r) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} \qquad \varepsilon_0 = 8{,}8541843 \cdot 10^{-12}\ \text{As/Vm}\ \text{(Dielektrizitätskonstante)}$$

Entsprechend ergibt sich für die potentielle elektrische Energie durch Integration nach r mit

$r_B = \infty$:

$$E^e_S(r) = E^e_{pot} = -\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r}\,.$$

Nach dem Induktionsgesetz ist die induzierte Spannung U proportional zur zeitlichen Änderung des Stromflusses $\frac{dI}{dt}$:

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Die Selbstinduktion L ist in einer Spule ein konstanter Wert. Die elektrische Energie E^e_{SI} erhält man durch Integration des Produktes aus der induzierten Spannung U und dem Stromfluß I über die Zeit t.

$$E^e_{SI} = \int_0^t U \cdot I \cdot dt = \int_{I(0)=0}^{I} L \cdot I \cdot \frac{dI}{dt} \cdot dt = L \cdot \frac{I^2}{2}\,.$$

Die Bedeutung der potentiellen elektrischen Energie liegt auch im atomaren Bereich. Sie ist ein wesentlicher Anteil der in Materie speicherbaren Energie . Die andere speicherbare ladungsgebundene Energieform (Energie eines Stromkreises) ist energietechnisch ohne große Bedeutung.

1.2.3 Innere und äußere Energie

Man kann gespeicherte Energie in äußere Energie E_{Sa} und innere Energie E_{Si} unterteilen.

$$E_{Sa} = E_{Sa} + E_{Si}\,.$$

Dabei hängt die äußere Energie E_{Sa} nur von den Schwerpunktgrößen $\vec{r}_S$ und $\vec{w}_S$ des Massen- und/oder Ladungsschwerpunktes ab (**Bild 1**).

$$E_{Sa} = E_{Sa}(\vec{r}_S, \vec{w}_S)\,.$$

Die innere Energie ist dagegen von den relativen Orten $\vec{r}_j - \vec{r}_S$ und Geschwindigkeiten $\vec{w}_j - \vec{w}_S$ der Komponenten j eines Gesamtsystems in Bezug zu den Schwerpunktgrößen abhängig.

$$E_{Si} = \sum_j E_{Sj}(\vec{r}_j - \vec{r}_S, \vec{w}_j - \vec{w}_S)\,.$$

Die Hauptklassen der bisher behandelten Energieformen zeigt **Bild 2**.

1.2.4 Thermische Energie

Ein Beispiel für die innere gespeicherte Energie ist die thermische Energie.

Die thermische Energie eines Systems ist die gespeicherte Energie der ungeordneten Bewegung aller Teilchen dieses Systems. Dabei muß die Teilchenzahl sehr groß sein, so daß man zur Beschreibung statistische Methoden anwenden kann. Letzteres ist bei allen technischen relevanten Systemen erfüllt, deren Teilchenzahl (Atome bzw. Moleküle) immer größer als 10^{20} ist.

Die ungeordnete Bewegung kann translatorisch, rotatorisch und oszillatorisch sein. Je nach Aggregatzustand und Temperatur sind diese drei Bewegungsformen mehr oder weniger stark vertreten.

Ein weiteres Charakteristikum der thermischen Energie ist, daß man die Energie formal nicht als Funktion der Orts- und Geschwindigkeitsvektoren beschreibt, sondern als Funktion von thermischen oder kalorischen Zustandsgrößen.

Jedem Freiheitsgrad der ungeordneten Bewegung ist nach dem *Gleichverteilungssatz* die gleiche Energie ε pro Teilchen zuzuordnen, die proportional der absoluten Temperatur ist.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot k \cdot T \qquad k = 1{,}38054 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K (Boltzmann-Konstante)}$$

Ein einatomiges Gas hat drei translatorische Freiheitsgrade ($n_{tr} = 3$). Seine gesamte gespeicherte kinetische Energie pro Atom ist:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{tr} = \frac{m \cdot w^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T\,.$$

Für jeden weiteren Freiheitsgrad der Rotation und der Oszillation kommt zu ε_{tr} noch $\frac{1}{2}k{\cdot}T$ Energie dazu.

$$_n = \frac{n_{rot} + n_{osz} + n_{tr}}{2} \cdot k \cdot T = \frac{n}{2} \cdot k \cdot T\,.$$

Bei Flüssigkeiten und festen Körpern ist $n_{rot} = 0$ und $n_{tr} = 0$. Dabei kann aber n_{osz} sehr groß sein.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, daß jeder möglichen Oszillation zwei Freiheitsgrade zuzuordnen sind: Ein Freiheitsgrad für die kinetische Energie und ein Freiheitsgrad für die potentielle elektrische Energie.

Die folgende Tabelle 1 gibt die Freiheitsgrade für verschiedene Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen an.

Stoff	n_{tr}	n_{rot}	n_{OSZ}	n
einatomiges Gas	3	0	0	3
zweiatomiges Gas	3	2	2	7
Flüssigkeit	0	0	meist über 6	> 6
idealer fester Stoff	0	0	≤ 6	≤ 6

Tabelle 1: Freiheitsgrade der Moleküle verschiedener Stoffe

Die gesamte thermische Energie aller z Teilchen eines Systems ist

$$E^m_{STemp} = \frac{n}{2}\cdot k\cdot T\cdot z = \frac{n}{2}\cdot k\cdot N_A\cdot\frac{m}{M}\cdot T = \frac{n}{2}\cdot R_m\cdot\frac{m}{M}\cdot T$$

mit $z = N_A\cdot\frac{m}{M}$ Avogadro Zahl $N_A = 6{,}02252\cdot 10^{26}\,\mathrm{kmol^{-1}}$

und $R_m = k\cdot N_A$ allgemeine molare Gaskonstante $R_m = 8314{,}3\,\frac{J}{kmolK}$

und $R = R_m/M$ M = molare Masse
R = spezifische Gaskonstante

$$E^m_{STemp} = m\cdot\frac{n}{2}\cdot R\cdot T\,.$$

Die spezifische Wärmekapazität c_V (bei konstantem Volumen) ist nach Definition

$$c_v = \frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{E^m_{STemp}}{m}\right) = \frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{n}{2}\cdot R\cdot T\right).$$

Nur für n = konst. (z. B. einatomige Gase) ist $c_v = \frac{n}{2}\cdot R$, ansonsten ist n im allgemeinen eine Funktion der Temperatur n = n (T).

1.2.5 Chemische Energie

Entsteht aus mehreren Atomen ein Molekül, dann ist die Energie dieses Moleküls ungleich der Summe der Energie der Atome, wenn die thermischen Zustandsgrößen gleich bleiben.

$$E\ (\text{Molekül}) \neq \sum_i E_i\ (\text{Atome}) \qquad (i : \text{Atome})$$

Die Differenz nennt man chemische Bildungsenergie E^B_{ch}, die bei der Bildung eines Moleküls aus Atomen auftritt.

$$E^B_{ch} = E\ (\text{Molekül}) - \sum_i E_i\ (\text{Atome})$$

Häufig ist $\sum_i E_i$ (Atome) größer als E (Molekül), dann ist E^B_{ch} negativ. Oft wird in der Literatur statt E^B_{ch} die entsprechende chemische Bildungsenthalpie H^B_{ch} angegeben.

$$H^B_{ch} = E^B_{ch} + p\cdot\left(V - \sum_i V_i\right)$$

Bei Bezug der Bildungsenergien auf den absoluten Nullpunkt spricht man von chemischen Nullpunktenergien E^B_{0ch} bzw. chemischen Nullpunktenthalpien H^B_{0ch}, die wegen $p_0 = 0$ identisch sind.

Bei einer chemischen Reaktion, bei der mehrere Moleküle als Reaktanden (Index *j*) wiederum mehrere Moleküle als Reaktionsprodukte (Index *k*) bilden, tritt die chemische Reaktionsenergie ΔE^R_{ch} bzw. die chemische Reaktionsenthalpie ΔH^R_{ch} auf.

$$\Delta H^R_{ch} = \sum_k H^B_{ch_k} - \sum_j H^B_{ch_j} \qquad (R \text{ steht für Reaktion})$$

Diese Gleichung gilt allerdings nur für den Zustand, auf den auch die Bildungsenthalpien bezogen sind.

Anstelle der Reaktionsenthalpie wird bei exothermen Verbrennungsreaktionen der Heizwert E_H angegeben. Er entspricht der negativen Reaktionsenthalpie beim thermochemischen Standardzustand $t_S = 25\ °C = 298{,}15\ K$ und $p_S = 0{,}1\ MPa$.

$$E_H = -\Delta H^R_{ch}(T_S, p_S)$$

E_H wird auf die Menge des Brennstoffs bezogen.

1.2.6 Nukleare Energie, Kernenergie

In den Kernen der Atome ist der Großteil der Masse der Atome konzentriert. Die Kerne bestehen aus Nukleonen, das sind Neutronen und Protonen. Die in der Atomhülle befindlichen Elektronen haben rund 1835 mal weniger Masse.

Die atomare Masseneinheit (u) ist definiert als der zwölfte Teil der Masse des Kohlenstoff-isotops C-12 (12 Nukleonen), das eine Masse von $1{,}99264 \cdot 10^{-26}$ kg hat, also ist

$u = 1{,}99264 \cdot 10^{-26}\ kg/12 = 1{,}660531 \cdot 10^{-27}\ kg.$

Neben Neutron, Proton und Elektron gibt es noch andere Elementarteilchen, die in diesem Rahmen keine Bedeutung haben. Die Masse des Protons (m_P) beträgt 1,007269 · u, die des Neutrons (m_N) 1,008654 · u und die des Elektrons (m_e) 0,000549 · u.

Der Massendefekt und die Bindungsenergie

Mittels der Massenspektroskopie können die Atommassen sehr genau bestimmt werden. Man sollte nun annehmen, daß die Summe der Massen aller Bausteine der gemessenen Atommasse entspricht. Tatsächlich ist aber die Masse der Kerne kleiner als die Summe der Masse der Nukleonen. Man nennt dies den *Massendefekt* Δm.

Für die Masse m eines Atoms ergibt sich somit:

$$m = Z \cdot m_P + N \cdot m_N + Z \cdot m_e - \Delta m$$

Z: Anzahl der Protonen bzw. Elektronen,
N: Anzahl der Neutronen.

Nach der Einsteinschen Äquivalenz von Energie und Masse $E = m \cdot c^2$ muß bei der Bildung eines Atomkerns aus seinen elementaren Bestandteilen eine dem Massendefekt entsprechende Energiemenge freigesetzt worden sein. Man nennt sie Bindungsenergie E_B.

$$E_B = -\Delta m \cdot c^2$$

Diese Berechnung der Bindungsenergie von Atomkernen kann man systematisch für alle bekannten Kerne durchführen und daraus für jeden Kern die Bindungsenergie $B(A)$ ermitteln, die auf ein einzelnes Nukleon entfällt.

$$B(A) = \frac{E_B}{A}$$

$A = N + Z$ = Massenzahl

Vergleicht man die Bindungsenergien $B(A)$ für die verschiedenen Kerne, so erhält man die in **Bild 3** dargestellte Charakteristik in Abhängigkeit von der Massenzahl A.

Zu beachten ist, daß die Bindungsenergie E_B eines Kerns gegenüber den noch nicht vereinigten einzelnen Teilchen ein negatives Vorzeichen hat, denn es handelt sich um eine Energie, die bei der Bildung des Kerns nach außen abgegeben wurde und damit um ein *Energiedefizit.*

Demnach ergibt sich für Atome mit einer Massenzahl A von mehr als 25 eine mittlere Bindungsenergie $B(A)$ je Nukleon von etwa -8MeV $\left(1\text{MeV} = 1{,}6021917 \cdot 10^{-13}\text{J}\right)$. Zu leichteren Kernen hin nimmt der Betrag der Bindungsenergie $B(A)$ stark ab. Ebenso ist zu schweren Kernen hin, allerdings in weitaus geringerem Maße, eine Abnahme des Betrages der Bindungsenergie $B(A)$ festzustellen.

Kern-Reaktionsenergie

Die verschiedenen relativen Bindungsenergien von Atomen unterschiedlicher Massenzahlen können über Kernreaktionen zur Energiefreisetzung genutzt werden. Die *Kern-Reaktions-energie* kann dabei durch Spaltung schwerer in leichtere Kerne (*Kernspaltungsenergie*) oder durch Verschmelzung sehr leichter Kerne zu einem schwereren Kern (*Kernfusionsenergie*) frei-gesetzt werden.

Kernspaltungsenergie

Ein sehr schwerer Kern hat eine geringere relative negative Bindungsenergie $B(A)$ als ein leichterer Kern. Beim Spalten eines Kernes oder mehrerer Kerne durch Elektronen- oder Neutronenbeschuß oder durch radioaktiven Zerfall entstehen mehrere Kerne, eventuell zusätzlich Neutronen und Elektronen in Form von β-Strahlung.

Die Kernspaltungsenergie E_{Sp} läßt sich allgemein mit der Formel berechnen:

$$E_{Sp} = \left(\sum_i m_i - \sum_j m_j \right) \cdot c^2$$

m_i : Masse des i-ten Teilchens auf der Eduktseite, welches ein Atom, ein Elektron in Form eines β-Strahls oder ein zur Spaltung eingesetztes Neutron sein kann.

m_j : Masse des j-ten Teilchens auf der Produktseite.

Unter Vernachlässigung der Elektronenmasse $(m_e = 0)$ vereinfacht sich die Formel unter der zusätzlichen Vereinfachung $m_p = m_n$ wie folgt:

$$E_{Sp} \approx \sum_i \left(A_i \cdot B(A_i)\right) - \sum_j \left(A_j \cdot B(A_j)\right).$$

Kernfusionsenergie

Die Verschmelzung leichter Kerne zu einem schwereren Endkern, d.h. die Kernfusion, ist aufgrund des Verlaufs der Bindungsenergie $B(A)$ (**Bild 5**) neben der Kernspaltung ein weiterer exoenergetischer Prozeß, der energietechnisch genutzt werden könnte.

Zur Berechnung der Kernfusionsenergie E_{Fus} kann man dieselben Formeln wie zur Berechnung der Kernspaltungsenergie E_{Sp} heranziehen. Somit ergibt sich für die Kernfusionsenergie E_{Fus} bei Vernachlässigung der Elektronenmasse und des Massenunterschiedes zwischen einem Proton und einem Neutron bei der Umwandlung von Neutronen zu Protonen und Elektronen:

$$E_{Fus} \approx \sum_i \left(A_i \cdot B(A_i)\right) - \sum_j \left(A_j \cdot B(A_j)\right).$$

1.3 Energieerhaltungssatz

Energie ist eine Erhaltungsgröße (wie Impuls und Drehimpuls). Energie kann weder vermehrt noch vermindert werden. (Demnach ist das Wort Energieverbrauch unsinnig!)

Die Energie eines Systems läßt sich als Erhaltungsgröße bilanzieren. Zwecks Bilanzierung der Energie haben sich drei Arten von Systemen mit unterschiedlichen Begrenzungen bezüglich der Masse und der Energie als nützlich erwiesen:

- abgeschlossenes System
- geschlossenes System
- offenes System.

1.4 Abgeschlossenes System

Hat ein System mit seiner Umgebung keinerlei Wechselwirkung, nennt man es abgeschlossenes System. Hier bleibt die Summe der gespeicherten Energie konstant, selbst dann, wenn sich eine Energieform in eine andere umwandelt (**Bild 6**).

$$\sum_k E_{Sk} = \text{konst.}$$

k: Index für die k-te Energieform

1.5 Geschlossenes System

Wenn bei einem System Prozeßenergie die Systemgrenze überschreitet, aber keine Materie, dann spricht man von einem geschlossenen System.

Nach dem Energieerhaltungssatz ist die zeitliche Änderung der gespeicherten Energie gleich dem die Systemgrenze überschreitenden Prozeßenergiestrom $\dot{E}_{Pl}$ bzw. die Änderung ΔE_{Sl} der gespeicherten Energie gleich der Prozeßenergie E_{Pl} nach der Zeit t_1.

$$E_{Pl} = \int_0^{t_1} \dot{E}_{Pl} \cdot dt = \Delta E_{Sl}$$

Prozeßenergie kann einem System zugeführt, sie kann aber auch vom System abgegeben werden (**Bild 8**). Im letzteren Fall wird entweder dem positiven Formelzeichnen ein negativer Zahlenwert zugeordnet (z. B. $E_{P2} = -10\text{kJ}$) oder die abgeführte Prozeßenergie wird schon im Formelzeichen als solche durch ein negatives Vorzeichen (und einen entsprechenden Index) gekennzeichnet (z. B. $E_{PA} = 10\text{kJ} = -E_{P2}$), wobei der Zahlenwert dann positiv ist.

$E_{Pl} + E_{P2} = \Delta E_S$ z. B. $30\text{kJ} + (-10\text{kJ}) = 20\text{kJ}$

$E_{PE} - E_{PA} = \Delta E_S$ $30\text{kJ} - (+10\text{kJ}) = 20\text{kJ}$

1.6 Formen der Prozeßenergie

Prozeßenergieformen sind die Energieformen, die nicht an Materie gebunden sind und die während eines Prozesses die Systemgrenze überschreiten. Bei ihnen gibt es die schon genannten drei Hauptformen Arbeit, Wärme und Strahlung, die sich wesentlich voneinander unterscheiden. Prozeßenergieformen sind *nicht speicherbar*.(Es ist z. B. falsch, von Wärmespeichern zu sprechen!)

1.6.1 Arbeit

Arbeit ist das innere Vektorprodukt einer Kraft mit der Verschiebung des Kraftangriffspunktes.

$$dW = \vec{F} \cdot \vec{ds} = |F| \cdot |ds| \cdot \cos\alpha$$

Ist die Kraft elektrischen Ursprungs, handelt es sich um elektrische Arbeit, andernfalls um mechanische Arbeit.

Von den vielen Unterformen der Arbeit sollen hier nur die bei Energiebilanzen an technischen Systemen wichtigen Formen genannt werden:

- Die *Volumenänderungsarbeit* $(-p \cdot A \cdot ds = -p \cdot dV)$ tritt auf, wenn einem geschlossenen System durch Volumenänderung dV gegen den Druck p Arbeit zugeführt wird (siehe **Bild 9**).
- Die *Verdrängungsarbeit* $p \cdot dV = p \cdot v \cdot \dot{m} \cdot d\tau$ (v = spezifisches Volumen = V/m) muß bei offenen Systemen berücksichtigt werden als Einschiebearbeit $p_E \cdot v_E \cdot \dot{m}_E \cdot d\tau$ zum Einführen der Masse $\dot{m}_E \cdot d\tau$ mit dem Volumen dV_E gegen den Druck p_E in das System bzw. als Ausschiebearbeit $p_A \cdot v_A \cdot \dot{m}_A \cdot d\tau$ der Masse $\dot{m}_A \cdot d\tau$ mit dem Volumen dV_A beim Druck p_A (**Bild 10**). Die Differenz dieser beiden Verdrängungsarbeiten nennt man Verschiebearbeit dW_{Vers}: $dW_{Vers} = p_E \cdot v_E \cdot \dot{m}_E \cdot d\tau - p_A \cdot v_A \cdot \dot{m}_A \cdot d\tau$.
- Die *Dissipationsarbeit* dW_{diss} (dissipierte Arbeit [Reibungsarbeit]) wird bei irreversiblen Prozessen einem System zugeführt und ist stets positiv.
- Die *technische Arbeit* dW_t ist die Differenz der gesamten Arbeit dW, die einem offenen System zu- oder abgeführt wird, vermindert um die Verschiebearbeit dW_{Vers}.
  $dW_t = dW - (p_E \cdot v_E \cdot \dot{m}_E \cdot d\tau - p_A \cdot v_A \cdot \dot{m}_A \cdot d\tau)$
  Für den stationären Fall $(\dot{m}_E = \dot{m}_A = \dot{m})$ gilt: $dW_t = dW - (p_E \cdot v_E - p_A \cdot v_A) \cdot \dot{m} \cdot d\tau$.

1.6.2 Wärme

Wärme ist die Energie, die allein aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen Systemen übertragen wird, die in direktem materiellen Kontakt stehen. Das Vorzeichen der Prozeßenergie Wärme richtet sich nach dem Temperaturgradienten: Wärme strömt stets von der höheren zu der niederen Temperatur.

Für das Beispiel zweier Systeme (**Bild 11**) gilt mit der konstanten Wärmeleitfähigkeit λ für den Wärmestrom:

$$\dot{Q}(t) = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}(t) \cdot A$$

1.6.3 Strahlung

Die Prozeßenergieform Strahlung ist die Energie, die zwischen Systemen elektromagnetisch übertragen wird. Materieller Kontakt ist dabei im Gegensatz zur Wärme nicht erforderlich.

Es gibt verschiedene Arten von Strahlung. Eine große Bedeutung in der Energiestechnik hat die *Temperaturstrahlung* (**Bild 12**).

Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ist die Strahlungsleistung proportional der vierten Potenz der Temperatur.

$$\frac{d\dot{X}}{dA} = \sigma \cdot T^4$$

Dabei ist σ die Stefan-Boltzmann-Konstante.

1.6.4 Energiebilanz für das geschlossene System

Für das geschlossene System gilt die schon in Abschnitt 1.5 angegebene Bilanzgleichung in differentieller Form.

$$dE_P = dE_S$$

Während die gespeicherte Energie im System durch Änderung der inneren und äußeren Energie geändert werden kann, tritt die zugeführte Prozeßenergie in Form von Arbeit, Wärme und Strahlung auf.

$$dE_S = dE_{Si} + dE_{Sa}$$
$$dE_P = dW + dQ + dX$$

Die zugeführte Arbeit kann aufgespalten werden in einen Anteil dW_i, der die innere Energie des Systems erhöht, und in einen Anteil dW_a, der die äußere Energie vergrößert.

$$dW = dW_i + dW_a$$

Gleiches gilt für die Strahlung und die Wärme, wobei allerdings der durch den Strahlungsdruck bewirkte äußere Anteil dX_a und der Anteil dQ_a in den meisten Fällen vernachlässigbar klein sind.

$$dX = dX_i + dX_a$$
$$dQ = dQ_i + dQ_a$$

Für die äußere Energie des Systems gilt:

$$dE_{Sa} = dW_a + dQ_a + dX_a.$$

Die auf die innere Energie des Systems wirkende Arbeit dW_i setzt sich zusammen aus der reversiblen Arbeit dW_{rev} (z. B. Volumenänderungsarbeit $-p \cdot dV$) und der Dissipationsarbeit dW_{diss}, d. h. Arbeit, die durch einen irreversiblen Prozeß in innere Energie überführt wird (**Bild 13**).

$$dW_i = dW_{rev} + dW_{diss}$$

Werden alle Energieanteile in die Bilanzgleichung eingesetzt, so erhält man

$$dW_{rev} + dW_{diss} + dW_a + dQ_i + dQ_a + dX_i + dX_a = dE_{Si} +. dE_{Sa}$$

und nach einer Umformung:

$$dQ_i + dX_i + dW_{diss} = dE_{Si} - dW_{rev}.$$

Dies ist der erste Hauptsatz der Thermodynamik in der allgemeinen üblichen Form, angewandt auf ein geschlossenes System.

1.7 Offenes System

Für das offene System (**Bild 14**) mit einem eintretenden Massenstrom $\dot{m}_E$, der einen Strom $\dot{E}_{SE}$ gespeicherter Energie mit sich führt, und einem austretenden Massenstrom $\dot{m}_A$ mit $\dot{E}_{SA}$ lautet die Energiebilanzgleichung in differentieller Form:

$$dE_p + dE_{SE} - dE_{SA} = dE_S.$$

Von den drei Prozeßenergieformen Arbeit, Wärme und Strahlung ist beim offenen System vor allem die Arbeit zu untersuchen. Es muß Einschiebearbeit $(p \cdot V)_E$ aufgebracht werden, um die Masse m_E mit dem Volumen V_E gegen den Druck pE in das System einzubringen, ebenso wird die Ausschiebearbeit $(p \cdot V)_A$ beim Verlassen der Masse m_A mit dem Volumen V_A beim Druck p_A abgegeben.

Die Arbeit W_t als Differenz der gesamten Arbeit W und der Verschiebearbeit bei offenen Systemen wird als technische Arbeit bezeichnet.

$$dW_t = dW - d[(p \cdot V)_E - (p \cdot V)_A]$$

Spaltet man die mit den Massenströmen mitgeführten gespeicherten Energien in innere und äußere Energien auf,

$$dE_{SE} = dE_{SiE} + dE_{SaE}$$
$$dE_{SA} = dE_{SiA} + dE_{SaA}$$

so bekommt man nach Einsetzen und Umformen:

$$dW_t + dQ + dX + [dE_{Si} + d(p \cdot V) + dE_{Sa}]_E - [dE_{Si} + d(p \cdot V) + dE_{Sa}]_A = dE_S.$$

Da bei offenen Systemen die mit der Masse mitgeführte innere gespeicherte Energie und die Ein- bzw. Ausschiebearbeit stets gemeinsam auftreten, werden sie unter dem neuen Energiebegriff Enthalpie zusammengefaßt.

$$H =_{def} E_{Si} + p \cdot V$$

Die Enthalpie ist in der praktischen Behandlung offener Systeme eine sehr bequeme und hilfreiche Größe.

Die Energiebilanz lautet nach Einsetzen der Enthalpie und nach Umgruppieren:

$$dW_t + dQ + dX = d(H + E_{Sa})_A - d(H + E_{Sa})_E + dE_S .)$$

Die Enthalpie wird mit der äußeren gespeicherten Energie der ein- und austretenden Masse zur Totalenthalpie H_t zusammengefaßt.

$$H_t =_{def} H + E_{Sa}$$

Damit kann die Bilanzgleichung für ein offenes System in sehr einfacher Form aufgestellt werden. Sie wird hier in differentieller Form, als zeitliche Ableitung und in Integralform angegeben:

$$dW_t + dQ + dX = dH_{tA} - dH_{tE} + dE_S$$
$$\dot{W}_t + \dot{Q} + \dot{X} = \dot{H}_{tA} - \dot{H}_{tE} + \frac{d\dot{E}_S}{dt}$$
$$W_t + Q + X = H_{tA} - H_{tE} + \Delta E_S .$$

1.8 Exergie

Eine für Energieumwandlungen wichtige Größe ist die Exergie. Sie gibt die Arbeitsfähigkeit eines Systems an.

- Die Exergie eines Systems ist die maximal nutzbare Arbeit, die durch Ausgleich mit der Umgebung bezüglich Druck, Temperatur und chemischer Zusammensetzung (durch weitere Reaktionen und Konzentrationsausgleich) abgegeben werden kann. Dabei hat die Umgebung grundsätzlich den niedrigst möglichen Exergiezustand ($e_{xUmgebung} = 0$), da ihre Entropie immer den maximal möglichen Wert annimmt.
- Unterscheidet sich die Temperatur eines Systems von der der Umgebung, so ist die temperaturbedingte Exergie des Systems positiv.

Als Beispiel wird der Wärmeübergang zwischen einem System und der Umgebung betrachtet. Die Exergie der bei der Temperatur T übertragenen Wärme Q ist:

$$E_x = Q \cdot \left(1 - \frac{T_U}{T}\right) = \eta_C \cdot Q .$$

Die Temperatur T ist die über die Zeit gemittelte Temperatur des Systems beim Wärmeaustausch der Wärme Q mit der Umgebung zwischen den Temperaturen des Systems am Anfang (T_1) und am Ende (T_2) des Wärmeaustausches; eine häufig verwendete Näherung ist: $T = (T_1 - T_2)/\ln(T_1/T_2)$. Ist nun die Temperatur T größer als die Umgebungstemperatur T_U, dann kann die Arbeit mit Hilfe einer Wärme-Antriebsmaschine gewonnen werden, der die Wärme Q bei der Temperatur T zugeführt wird ($Q > 0$) und die Wärme Q_U bei der Temperatur T_U an die Umgebung abgibt (**Bild 16**).

Ist die Temperatur T kleiner als T_U, so kann ebenfalls Arbeit mit Hilfe einer Wärme-Antriebsmaschine gewonnen werden, die allerdings die Wärme Q_U von der Umgebung zugeführt beikommt und die Wärme Q bei der Temperatur T abgibt ($Q < 0$) (**Bild 17**).

Die resultierende Exergie ist in beiden Fällen positiv.

Bei der Überführung eines geschlossenen Systems auf Umgebungszustand ist die maximal mögliche freiwerdende Arbeit (Exergie e_{x_g}) die Addition der freiwerdenen negativen Nutzarbeit durch isentrope Zustandsänderung mit der nachfolgenden freiwerdenen negativen Nutzarbeit durch isotherme Zustandsänderung (siehe Carnotprozeß und **Bild 18**):

$$e_{x_g} = e_{th1} - e_{thU} - T_U \cdot (s_1 - s_U) + p_U \cdot (v_1 - v_U).$$

Bei einem offenen System erhält man die Exergie $e_{x_{of}}$ eines Enthalpiestromes (**Bild 20**) auf ähnliche Weise wie beim geschlossenen System. Man bekommt die maximal mögliche gewinnbare technische Arbeit (Exergie) eines Systems durch Addition der freiwerdenen technischen Arbeit durch isentrope ($ds = 0, dq = 0$) Zustandsänderung mit einer nachfolgenden freiwerdenen technischen Arbeit durch isotherme Zustandsänderung.

$$e_{x_h} = -w_{tisotherm} - w_{tisentrop} = h_1 - h_U - T_U \cdot (s_1 - s_U).$$

In einem offenen System mit einem niedrigeren Druck als dem der Umgebung wäre der Druckanteil der Exergie negativ und mit einem höheren Druck als dem der Umgebung positiv.

- Konzentrationsunterschiede müssen auch exergetisch bewertet werden.

Liegt ein bestimmtes Gas eines Systems in einer höheren Konzentration als in der Umgebung vor, so kann es sich noch bis auf Umgebungskonzentration entspannen. Die konzentrationsbedingte Exergie dieses Gases ist somit positiv.

Für ideale Gase gilt:

$$e_{xmix} = \frac{E_{xmix}}{m} = T_U \cdot R \cdot \sum_i \psi_i \cdot \ln\left(\frac{\psi_i}{\psi_{iU}}\right).$$

Ist die Konzentration eines Gasanteils im System niedriger als in der Umgebung (Stoffmengenanteil ψ_i des Gases i im System kleiner als Stoffmengenanteil ψ_{iU} des Gases i in der Umgebung, so wird auch die konzentrationsabhängige Exergie dieses Gases negativ bewertet, wie man aus der Beziehung für die Mischungsexergie idealer Gase ersehen kann.

Unbestimmt bleibt die exergetische Bewertung, wenn ein bestimmtes Gas eines Systems in der Umgebung nicht oder in vernachlässigbar geringen Mengen vorkommt und auch nicht durch Folgereaktion in Gase der Umgebung überführt werden kann (z. B. FCKW). Dieses Gas kann sich beliebig entspannen, ohne Umgebungskonzentration zu erreichen. Die konzentrationsbedingte Exergie dieses Gases ist theoretisch unendlich, wie auch aus der obigen Gleichung ersichtlich wird:

hier gilt: $\lim_{\psi_{iU} \to 0} e_{x:mix} = \infty$.

Die chemisch Exergie von Stoffen ist dann positiv, wenn Energie bei der Reaktion zu Umgebungsstoffen frei wird. Muß Energie zugeführt werden, so ist die chemische Exergie dieser Stoffe negativ.

Während man die natürlichen gasförmigen und flüssigen Umgebungsstoffe näherungsweise auf wenige beschränken kann, ist die Anzahl von festen Umgebungsstoffen groß. Außerdem ist die Zusammensetzung von festen Umgebungsstoffen sehr unterschiedlich und somit die exergetische Bewertung schwierig und vom Ort abhängig.

Die Exergie von Systemen, die gleiche Zustandsgrößen wie die Umgebung haben, ist gleich Null.

Allgemein zeigt sich, daß für die Exergie eines Systems eigentlich nicht die Energie des Systems die entscheidende Größe ist, sondern allein die Differenz zwischen System und Umgebung . Die Exergie als maximal mögliche Arbeit erhält man durch vollkommenen Ausgleich des Systems mit der Umgebung, der nicht nur die thermodynamischen Zustandsgrößen betrifft, sondern auch alle weiteren Zustandsgrößen (z. B. **chemische** Zusammensetzung), in denen sich das System von der Umgebung unterscheidet.

Eine weitere sehr einfache und scheinbar laxe Definition der Exergie ist die folgende: Die Exergie eines Systems ist die theoretisch minimale Energie, die zur Herstellung des Systems **aus** der Umgebung **in** der Umgebung erforderlich ist.

2 Energiewandlung

In der Energietechnik gibt es vier verschiedene Gruppen von Anlagen und Komponenten:

- Energiewandler,
- Energieübertrager,
- Energiespeicher und
- Energie-Transportvorrichtungen.

Sie lassen sich alle mit Hilfe eines offenen Systems darstellen und klassifizieren. Das geschlossene System kann als Sonderfall des offenen Systems gelten. Ein solches System zeigt **Bild 21**, dem Einsatzenergie in Form i zugeführt wird (E_{Ei}) und Zielenergie (E_{Zj}) der Form j entnommen wird. Dabei wird Fortenergie (E_{Fk}) der Form k an die Umwelt abgeführt.

Energiewandler verändern gezielt die Energieform ($j \neq i$), während dies bei Energieübertragern nicht der Fall ist ($j = i$). Während die Gesamt-Energie bei diesen Prozessen erhalten bleibt, wird die Exergie stets kleiner.

$$\sum_{i=1}^{l} E_{Ei} = \sum_{j=1}^{m} E_{Zj} + \sum_{k=1}^{n} E_{Fk}$$

$$\sum_{i=1}^{l} E_{xEi} > \left(\sum_{j=1}^{m} E_{xZj} + \sum_{k=1}^{n} E_{xFk} \right)$$

Das Ziel der Energietechnik ist einerseits, die Fortenergie möglichst klein zu halten und andererseits darauf zu achten, daß die Exergie der Zielenergie nicht viel kleiner ist als die eingesetzte Exergie. Der energetische und exergetische Nutzen soll groß sein. Dies wird mit Nutzungs- und Wirkungsgraden bewertet.

Der energetische Nutzungsgrad ist durch das Verhältnis Zielenergie zu eingesetzter Energie definiert.

$$\eta_N =_{def} \frac{E_Z}{E_E} \quad \text{energetischer Nutzungsgrad}$$

Analog dazu ist der exergetische Nutzungsgrad das Verhältnis der Zielexergie zur eingesetzten Exergie.

$$\eta_{xN} =_{def} \frac{E_{xZ}}{E_{xE}} \quad \text{exergetischer Nutzungsgrad}$$

Bei den meisten Systemen treten die zu- oder abgeführten Energien E nicht als einmalige Energiemengen auf, sondern als Integralwerte von Energieströmen $\dot{E}$ über einen bestimmten Zeitraum $\Delta\tau$. Die Energieströme sind i. a. zeitlich veränderlich $\left[\dot{E} = \dot{E}(\tau)\right]$.

$$E = \int_0^{\Delta\tau} \dot{E}(\tau) \cdot d\tau$$

Bei stationären Systemen mit konstanten Energieströmen ist die Angabe des Wirkungsgrades angebracht.

$\eta =_{def} \frac{\dot{E}_Z}{\dot{E}_E}$ energetischer Wirkungsgrad

$\eta_x =_{def} \frac{\dot{E}_{xZ}}{\dot{E}_{xE}}$ exergetischer Wirkungsgrad.

Bei instationärem Betrieb, wie z. B. Anfahren und Abfahren einer Anlage, oder beim Be- und Entladen eines Speichers kann sich die im System gespeicherte Energie verändern. Ein Motor wird z. B. aufgewärmt und seine gespeicherte Energie E_S erhöht sich, bis die Verhältnisse stationär sind. Nach dem Abfahren gibt der Motor diese gespeicherte Energie an die Umgebung ab. Für den nichtstationären Betrieb muß daher die Energiestrombilanz vollständig angesetzt werden.

$$\dot{E}_E = \frac{dE_S}{d\tau} + \dot{E}_Z + \dot{E}_F$$

$$E_E = \int_0^{\tau} \frac{dE_S}{d\tau} \cdot d\tau + E_Z + E_F = \Delta E_S + E_Z + E_F$$

Die energetische Funktionsmatrix vieler energetisch wichtiger Anlagen und Komponenten zeigt **Bild 22.**

Bei den Energiewandlungsmaschinen tritt in irgendeiner Form mechanische Arbeit auf. Wird Energie ohne mechanische Arbeit direkt in elektrische Arbeit umgewandelt, dann spricht man von Direktenergiewandlern.

Energieübertrager und Rohrleitungen stehen gemäß i = j in den Diagonalelementen der Matrix. Die hier angegebenen Speicher für chemisch gebundene Energie sind Brennstofflager.

In Tabelle 3 sind für ausgewählte Energiewandler und Energieübertrager die Formen der Einsatz-, Ziel- und Fortenergie angegeben.

Energietechnische Komponenten bzw. Anlagen	E_E	E_F	E_Z
Otto-Motor	E_{ch}	Q, ΔH	W_{mech}
Kondensations-Dampfturbine	ΔH_{Dampf}	ΔH	W_{mech}
Dampf-Rohrleitungen	$H_{E,Dampf}$	Q	H_{Dampf}
Wärmeaustauscher	ΔH_E	Q	ΔH_Z
Elektrospeicher	$W_{E,elektr.}$	Q	Q
Elektrogenerator	W_{mech}	Q	$W_{elektr.}$
Getriebe	W_{mech}	Q	$W_{mech.}$
Transformator	$W_{elektr.}$	Q	$W_{elektr.}$

Tabelle 3: Einsatz-, Ziel- und Fortenergien bei einigen Energiewandlern und Energieübertragern

2.1 Zustandsänderungen von Fluiden in Energiewandlungsmaschinen

Bei einfachen Energiewandlungsmaschinen mit fluidem Arbeitsmedium wird ohne Zwischenenergieform die den Arbeitsmaschinen zugeführte technische Arbeit in mechanische und thermische Energie eines Arbeitsmediums umgewandelt, bzw. bei den Antriebsmaschinen einem Arbeitsmedium mechanische oder thermische Energie entzogen und als mechanische Arbeit abgegeben.

Bei den Strömungsmaschinen lassen sich die Zustandsänderungen des Arbeitsmediums zwischen dem Eintritt und dem Austritt der Maschine sehr gut im Enthalpie-Entropie-Diagramm darstellen. Wird weiterhin mit der spezifischen Totalenthalpie

$$h_t =_{def} h + c^2/2 + g \cdot z$$

die kinetische und potentielle Energie des Arbeitsmediums erfaßt, so gibt die Differenz der Totalenthalpie am Austritt (Index A) und am Eintritt (Index E) nach dem Energieerhaltungsgesetz für offene Systeme die Summe der in der Maschine zu- oder abgeführten technischen Arbeit und der Wärme an:

$$w_t + q = h_{tA} - h_{tE}.$$

(q steht hier als gemeinsames Zeichen für die auf die Masse bezogene Wärme und Strahlung)

Bei vielen Energiewandlungsmaschinen ist die auftretende Wärme entweder bekannt oder vernachlässigbar klein. **Bild 23** zeigt qualitativ die Zustände am Ein- und Austritt für eine adiabate Arbeitsmaschine, dargestellt im h,s-Diagramm. Bei einer Arbeitsmaschine mit Kühlung ergibt sich eine Zustandsänderung gemäß **Bild 24**. Entsprechende Zustandsänderungen zeigen die **Bilder 25** bzw. **26** für eine adiabate bzw. diabate Antriebsmaschine.

In **Bild 26** ist die Zustandsänderung im h,s-Diagramm für zwei Entspannungen in Turbinen und einer dazwischen gelegenen Zustandsänderung durch Wärmezufuhr dargestellt.

Bemerkenswert ist, daß die Änderung der Enthalpie bei Gasen fast ausschließlich von der Temperaturänderung abhängt, während bei Flüssigkeiten in den einfachen Maschinen die Enthalpieänderung hauptsächlich auf der Druckänderung beruht.

$$h_A - h_E = \Delta h(\Delta T) \qquad \text{(Gase)}$$
$$h_A - h_E = \Delta h(\Delta p) \qquad \text{(Flüssigkeiten)}$$

Während die systemüberschreitenden Energieströme eindeutig aus den Zuständen des Arbeitsmediums am Ein- und Austritt der Energiewandlungsmaschine bestimmt werden können, ist die Zustandsänderung des Arbeitsmediums innerhalb der Maschine noch ungeklärt. Liegt eine kontinuierliche Änderung der Zustandsgrößen vom Eintritt zum Austritt der Maschine vor (**Bild 23** und **25**) so wird vereinfacht eine polytrope Zustandsänderung zwischen dem Ein- und Austritt angenommen. Die Polytrope ist definiert durch ein konstantes Polytropenverhältnis ν während der Zustandsänderung, so daß mit der Definitionsgleichung für ν die Zustandsänderung ein-deutig festgelegt ist.

$$\nu =_{def} \frac{dh}{v \cdot dp} = \text{konst.}$$

$$\nu = \frac{h_A - h_E}{\int_E^A v \cdot dp}$$

Diese Definition bietet den Vorteil, daß sie nicht nur für jede beliebige Zustandsänderung an-wendbar ist (z. B. Isentrope $\nu_S = 1$, Isenthalpe $\nu_h = 0$, Isobare $\nu_p = \infty$), sondern auch unabhängig ist von der Art und dem Aggregatzustand des Arbeitsmediums.

Zustandsänderungen nach den **Bildern 24** und **26** lassen sich natürlich nicht durch einen einzigen Wert für das Polytropenverhältnis beschreiben. In diesen Fällen muß die gesamte Zustandsänderung in Teilbereiche mit verschiedenen Polytropenverhältnissen aufgeteilt werden.

Mit den allgemeinen thermischen und kalorischen Zustandsbeziehungen für fluide Arbeitsmedien erhält man nach einigen Umformungen den Zusammenhang zwischen einer differentiellen Druck-änderung und der zugehörigen Temperaturänderung.

$$v = v(T,p)$$
$$h = h(T,p)$$
$$dT = \frac{\nu \cdot v(T,p) - \left(\frac{\delta h}{\delta p}\right)(T,p)}{\left(\frac{\delta h}{\delta T}\right)_p (T,p)} \cdot dp$$

Bei bekanntem Polytropenverhältnis ν ist damit die Berechnung aller Zwischenzustände bei der polytropen Zustandsänderung möglich. Liegen bei einem Gas die besonders einfachen Abhängig-keiten des idealen Gases mit konstanten Wärmekapazitäten vor, so geht die allgemeine Polytropen-beziehung über in die bekannte Polytropenbeziehung über in die bekannte Polytropengleichung mit dem Polytropenexponenten n.

$$\frac{T}{T_E} = \left(\frac{p}{p_E}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$
$$\frac{n}{n-1} = \frac{c_p}{R} \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{1}{\nu}$$

Für eine ideale Flüssigkeit mit konstantem spezifischen Volumen erhält man die einfache Rechnung:

$$v = \text{konst.}$$
$$h = u + p \cdot v \quad dT = \frac{(\nu - 1) \cdot v}{c_v} \cdot dp$$
$$c_v = \left(\frac{\delta u}{\delta T}\right)_v .$$

Für polytrope Zustandsänderungen im Naßdampfgebiet eines Arbeitsmediums gelten andere Zusammenhänge. Temperatur und Druck sind in diesem Fall über die Dampfdruckkurve korreliert, so daß eine weitere Zustandsgröße zur Festlegung eines Zustandspunktes erforderlich ist. Dies ist z. B. der Dampfgehalt x, so daß sich die folgenden Gleichungen und ergeben.

$$T_s = T_s(p_s)$$
$$v = v(x,p) = (1-x) \cdot v'(p) + x \cdot v''(p)$$
$$h = h(x,p) = h'(p) + x \cdot r(p)$$
$$dx = \frac{1}{r(p)} \cdot \left\{ \nu \cdot [(1-x) \cdot v'(p) + x \cdot v''(p)] - \frac{dh'}{dp}(p) - x \cdot \frac{dr}{dp}(p) \right\} \cdot dp$$

Bei den Wirkungsgraden von einfach wandelnden Energiewandlungsmaschinen zeigt sich, daß die zuvor definierten energetischen Wirkungsgrade wenig geeignet sind, weil bei den meisten Maschinen nur sehr kleine Fortenergien in Form von Wärmeverlusten an die Umgebung oder Energieverlust durch Leckströme auftreten. **Bild 27** zeigt als Beispiel die Energiebilanz einer Flüssigkeitspumpe.

Während in diesem Fall der Verlustwärmestrom praktisch vernachlässigbar ist, tritt zwar besonders bei Wasserpumpen ein oftmals beabsichtigter Leckagestrom von einigen Prozent des Gesamtmassenstromes auf, doch kann und muß dieser Verlustmassenstrom bei giftigen und aggressiven Flüssigkeiten verhindert werden, so daß der energetische Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\dot{H}_{tA} - \dot{H}_{tE}}{P_P} = 1 - \frac{\dot{Q}_U + \dot{H}_{tL}}{P_P}$$

in vielen Fällen den Wert 1 annimmt und daher keine Aussage über die Güte der Maschine macht.

Auch bei gekühlten Maschinen, z. B. einem Verdichter mit Zwischenkühlung (**Bild 28**), ist die Aussage dieses nun kleineren Zahlenwertes für den energetischen Wirkungsgrad irreführend, weil durch die Kühlung die Wirkungsweise des Verdichters nicht verschlechtert sondern verbessert wird.

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_K}{P_V}$$

Für die exergetischen Wirkungsgrade gelten diese Ungereimtheiten nicht. Daß sie nicht öfter angewandt werden, liegt daran, daß sie in Berechnung und Handhabung etwas umständlich sind, daß sie vom jeweiligen Umgebungszustand abhängen und daher doch nicht ganz allgemeingültig sind, und daß sie keine direkten Rückschlüsse auf die Art der Zustandsänderung in der Maschine zulassen.

2.2 Strömungswirkungsgrade

Ausgangspunkt für die Definition der Strömungswirkungsgrade sind die in der Maschine auftretenden Irreversibilitäten, erfaßt durch die spezifische Dissipationsarbeit w_{diss}.

Da nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik die Dissipationsarbeit stets positiv ist, gelten für die Arbeitsmaschinen mit $w_t > 0$ und die Antriebsmaschinen mit $w_t < 0$ die jeweils umgekehrten Wirkungsgraddefinitionen.

Arbeitsmaschine:

$$\eta_{tArb.masch.} =_{def} \frac{w_t - w_{diss}}{w_t} = 1 - \frac{w_{diss}}{w_t}$$

Antriebsmaschine:

$$\eta_{tAntr.masch.} =_{def} \frac{w_t}{w_t - w_{diss}} = \frac{1}{1 - \frac{w_{diss}}{w_t}}$$

Wie aus den Definitionsgleichungen deutlich zu ersehen ist, wird die bei der Energieumwandlung in der Maschine auftretende verlustbewirkende Dissipationsarbeit ins Verhältnis gesetzt zur technischen Arbeit.

Mit dem Energieerhaltungssatz für stationäre offene Systeme

$$w_t + q = h_A - h_E + {w_A^2}/{2} - {w_E^2}/{2} + g \cdot (z_A - z_E) = \Delta h + \Delta\left({w^2}/{2}\right) + g \cdot \Delta z$$

und dem Energieerhaltungssatz für ein durchströmendes Massenelement als geschlossenes System bei polytroper Zustandsänderung (ν = konst.)

$$q + w_{diss} = \Delta e_{Si} + \int_E^A p \cdot dv = \Delta h - \int_E^A v \cdot dp = \Delta h \cdot \left(1 - \frac{1}{\nu}\right)$$

erhält man nach einigen Umformungen:

$$1 - \frac{w_{diss}}{w_t} = \frac{1}{\nu} \cdot \left[1 + \frac{q}{w_t} - \frac{\Delta\left(w^2/2\right) + g \cdot \Delta z}{w_t}\right] + \frac{\Delta\left(w^2/2\right) + g \cdot \Delta z}{w_t}.$$

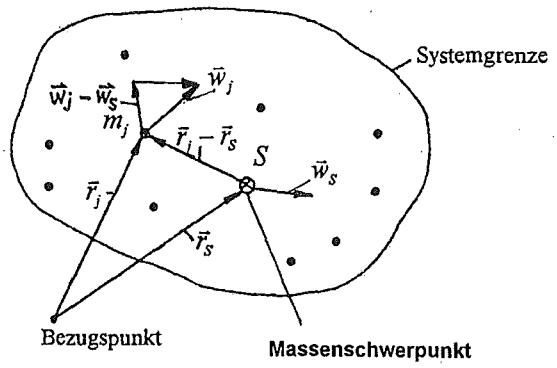
Für Maschinen ohne merkbare Änderung der kinetischen und potentiellen Energie kann daher eine einfache Verknüpfung zwischen dem Polytropenverhältnis und dem Wirkungsgrad hergestellt werden.

$$\left.\begin{aligned} \eta_{tArb.masch.} &= \frac{1}{\nu} \cdot \left(1 + \frac{q}{w_t}\right) \\ \eta_{tAntr.masch.} &= \frac{\nu}{1 + \frac{q}{w_t}} \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &\nu = \text{konst.} \\ &\Delta\left(w^2/2\right) = 0 \\ &\Delta z = 0 \end{aligned}$$

Bei adiabaten Maschinen gelten sogar die folgenden einfachen Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned} \eta_{tArb.masch.} &= \frac{1}{\nu} \\ \eta_{tAntr.masch.} &= \nu \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &\nu = \text{konst.} \\ &\Delta\left(w^2/2\right) = 0 \\ &\Delta z = 0 \\ &q = 0. \end{aligned}$$

Technisch erreichbare Wirkungsgrade einfachwandelnder Energiewandlungsmaschinen mit fluiden Arbeitsmedien hängen ab von der Art der Maschine, so daß keine allgemeingültigen Zahlenwerte angegeben werden können. Ebenso hängen die Wirkungsgrade von der Maschinengröße ab, wobei kleine Maschinen die schlechteren Wirkungsgrade haben, weil bei ihnen z. B. die Reibungsverluste erzeugenden Oberflächen relativ zum Volumen groß sind. Vom Arbeitsmedium sind die Wirkungsgrade dagegen weniger abhängig.



$$E_{Sa} = E_{Sa}\left(\vec{r}_S, \vec{w}_S\right).$$

$$E_{Si} = \sum_j E_{Sj}\left(\vec{r}_j - \vec{r}_S, \vec{w}_j - \vec{w}_S\right).$$

Bild 1 Zur Erläuterung der äußeren und inneren massengebundenen gespeicherten Energie

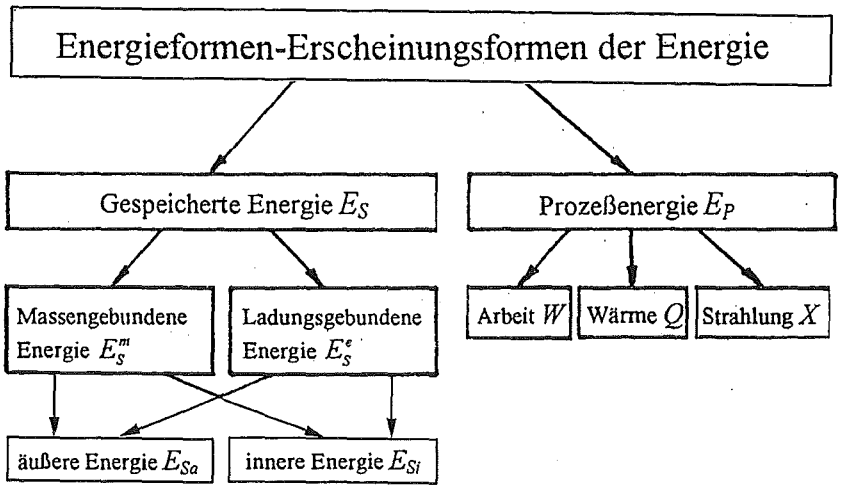


Bild 2 Hauptklassen der Energieformen

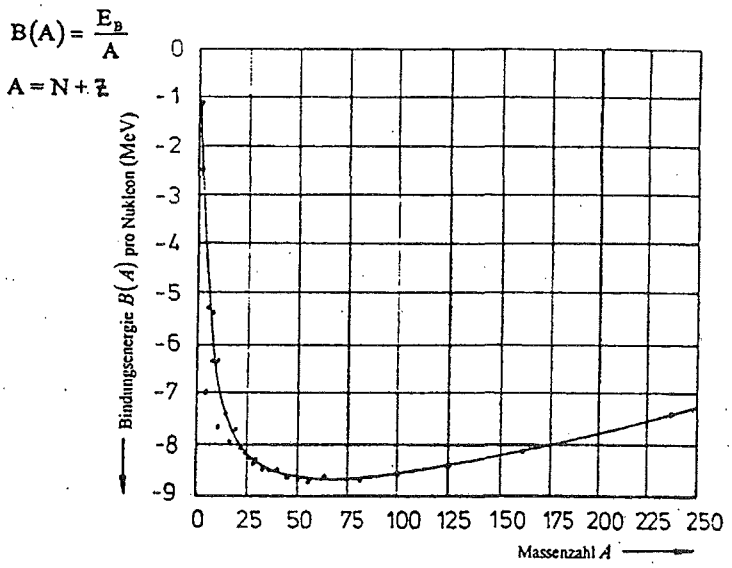


Bild 3 Bindungsenergie B (A) pro Nukleon bei stabilen Kernen

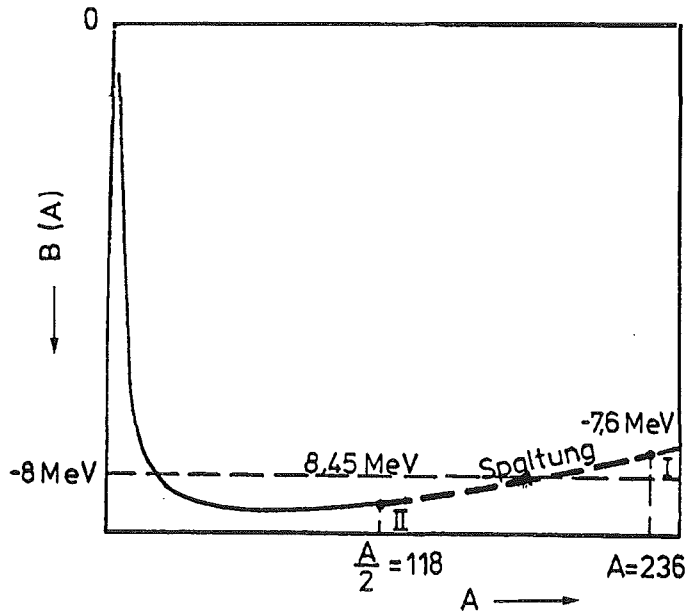


Bild 4 Änderung der Bindungsenergie bei Kernspaltung (unmaßstäblich)

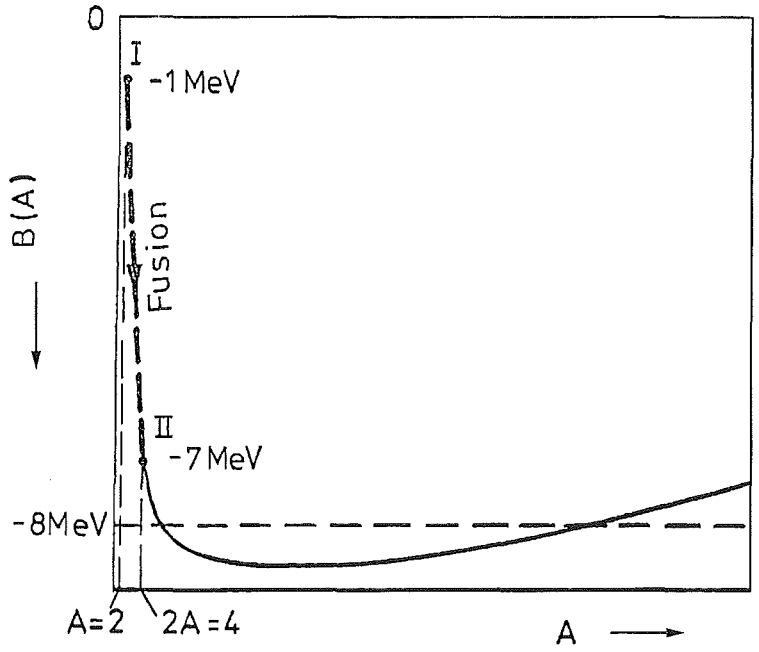
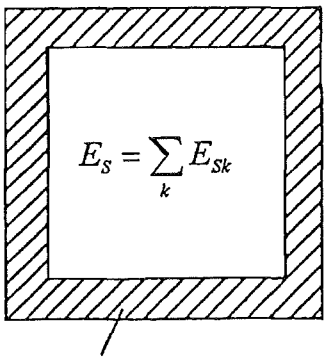


Bild 5 Änderung der Bindungsenergie bei der Kernfusion (unmaßstäblich)



Für Masse und Prozeßenergie
undurchdringliche Systembegrenzung

Bild 6 Schema eines abgeschlossenen Systems

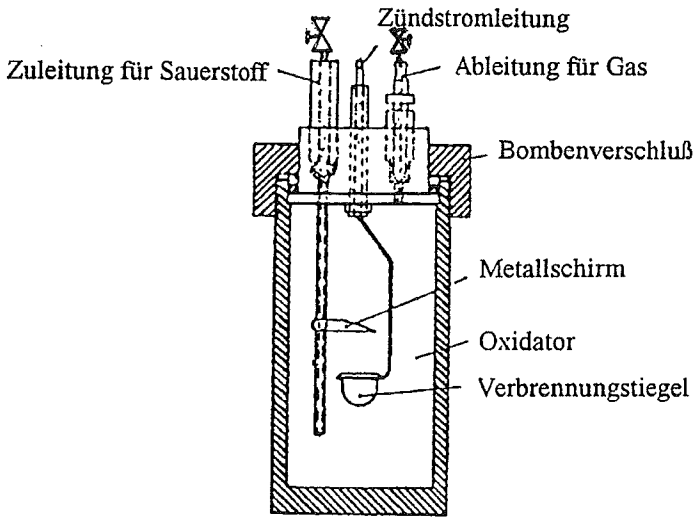


Bild 7 Schematische Darstellung einer Kalorimeterbombe

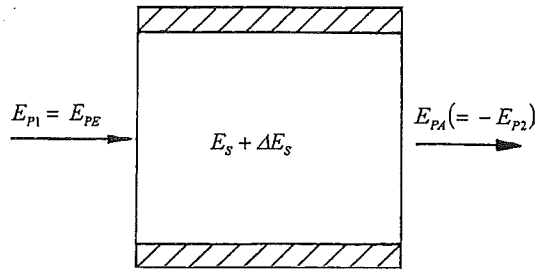


Bild 8 Geschlossenes System mit Zufuhr und Abgabe von Prozeßenergie

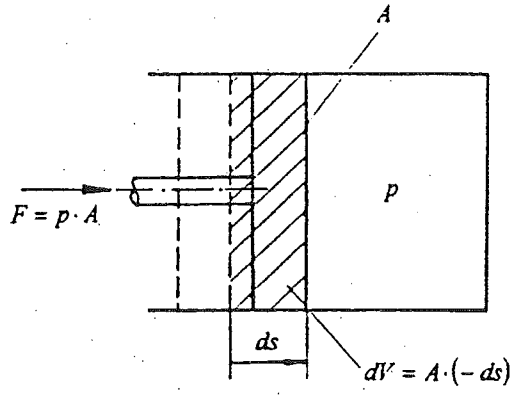


Bild 9 Volumenänderungsarbeit p · dV bei einem geschlossenen System

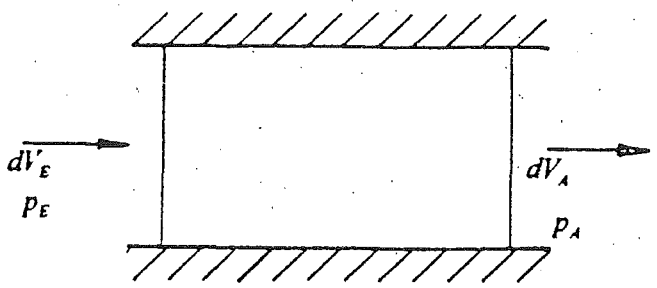
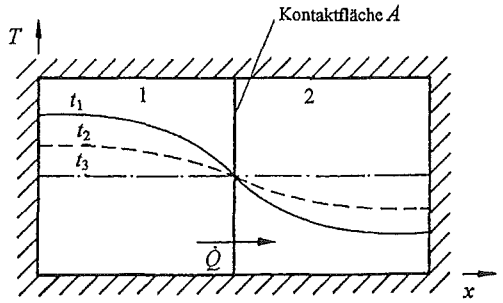


Bild 10 Ein- und Ausschiebearbeit $p_E \cdot dV_E$ und $p_A \cdot dV_A$ bei einem offenen System



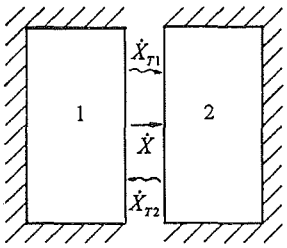
t_1, t_2, t_3 drei verschiedene Zeiten
$t_1 < t_2 < t_3 (\approx \infty)$

$$\dot{Q}(t) = - \lambda \cdot \frac{dT}{dx}(t) \cdot A$$

Bild 11 Wärme zwischen zwei Systemen unterschiedlicher Temperaturen

$$\dot{X}_{T1} = \sigma \cdot T_1^4 \cdot A$$

$$\dot{X}_{T2} = \sigma \cdot T_2^4 \cdot A$$



$T_1 > T_2$
$\dot{X} = \dot{X}_{T1} - \dot{X}_{T2}$

Bild 12 Strahlung zwischen zwei Systemen unterschiedlicher Temperaturen

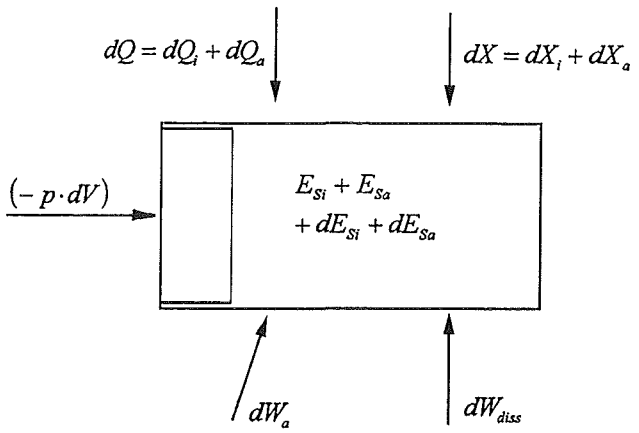


Bild 13 Energiebilanz bei einem einfachen geschlosenen System

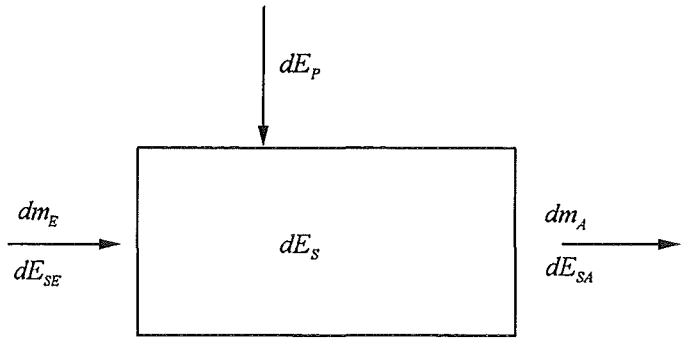


Bild 14 Zur Bilanzierung eines offenen Systems

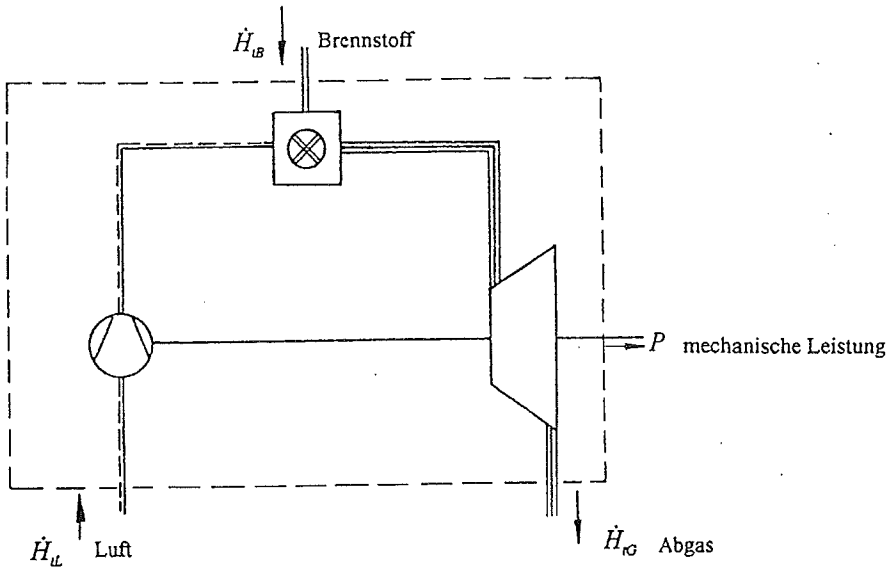


Bild 15 Energiebilanz bei einer Gasturbinenanlage

Beispiel 6: offene Gasturbinenanlage (Bild 15)

$$P =_{def} \dot{W}_t .$$

$$P = \dot{H}_{tA} - \dot{H}_{tE}$$

$$P = \dot{H}_{tG} - \left(\dot{H}_{tL} + \dot{H}_{tB}\right)$$

Indices: G = Gas
L = Luft
B = Brennstoff

$$\dot{H}_t = \dot{H}_{th} + \dot{H}_{ch} + \dot{E}_{Sa}$$

$$\dot{H}_{th} = \dot{E}_{th} + p \cdot \dot{V}$$

$$\Delta\dot{H}^R_{ch} = \dot{H}_{chG} - \dot{H}_{chB} - \dot{H}_{chL}$$

$$P = \Delta\dot{H}^R_{ch} + \left(\dot{H}_{th} + \dot{E}_{Sa}\right)_G - \left(\dot{H}_{th} + \dot{E}_{Sa}\right)_L - \left(\dot{H}_{th} + \dot{E}_{Sa}\right)_B .$$

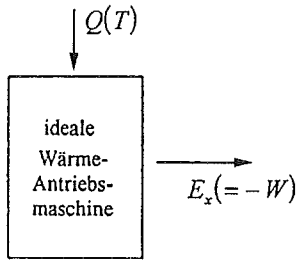


Bild 16 Exergie einer Wärme $Q(T)$ bei $T > T_U$

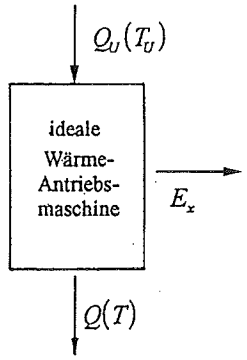


Bild17 Exergie einer Wärme $Q(T)$ bei $T < T_U$

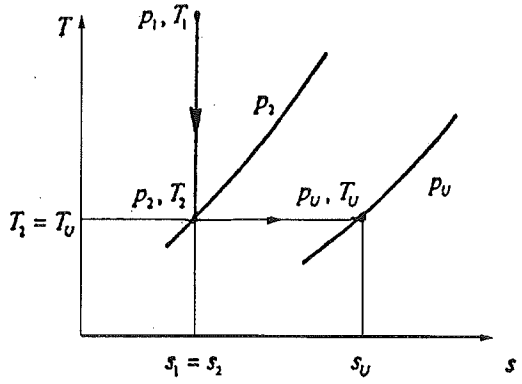
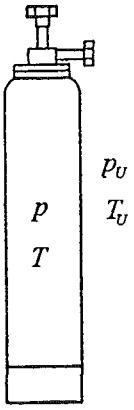


Bild 18 Ermittlung der Exergie von geschlossenen Systemen mit Hilfe des T-s-Diagramms



$$\frac{E_x}{m} = e_{x_s} = e_{th1} - e_{thU} - T_U \cdot (s_1 - s_U) + p_U \cdot (v_1 - v_U)$$

Bild19 Zur Exergie einer Druckluftflasche

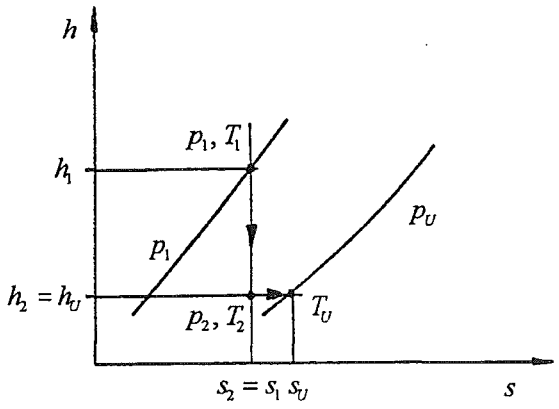


Bild 20 *h-s*-Diagramm zur Ermittlung der Exergie eines offenen Systems für Gase

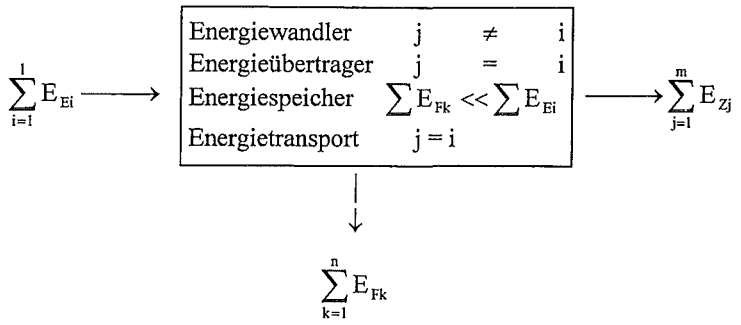


Bild 21 System zur Darstellung von energietechnischen Anlagen und Komponenten

Zielenergie E_{Zj} j=1...6 / E_{Ei} i=1...6 Einsatzenergie		Prozeßenergie				Gespeicherte Energie			
		1 Wärme	2 Strahlung	3 Mech. Arbeit	4 Elektr. Arbeit	5 kin. u. pot. Energie	6 Therm. Energie	7 Chem. geb. Energie	8 Kern-energie
Prozeß-energie	1 Wärme				Thermo-elektr. Generator		Dampf-erzeuger	Endotherm. chem. Reaktion	
	2 Srahlung		Lichtleiter		Solarzellen		Solar-kollektor	Photo-synthese	
	3 Mech. Arbeit			Getriebe	Elektrischer Generator	Wasser-pumpen	Verdichter		
	4 Elektr. Arbeit	Elektro-Heizung	Elektro-magnetischer Sender	Elektro-Motor	Transfor-mator	Elektro-magn. Kranheber	Elektro-speicher-Heizung	Batterie (laden)	
Gesp. Energie	5 kin. u. pot. Energie			Wasserturb. Wind-konverter	Piezo-Generator	Speicher			
	6 Therm. Energie		Wärme-strahler	Gas- und Dampfturb.	MHD Generator	Düse	Wärmeaus-tauscher u. Speicher		
	7 Chemisch gebundene Energie				Batterie (Entladen) Brenn-stoffzelle		Exotherm. chem. Reaktion (Verbrennen)	Speicher (Lager)	
	8 Kern-energie				Nuklid-Batterie		Kernspaltung Kernfusion		

Energieumwandlungsmaschinen

Direktenergiewandler

Energieübertrager u.U. auch Speicher u. Rohrltg.

Bild 22 Funktionsmatrix technisch relevanter Komponenten und Anlagen

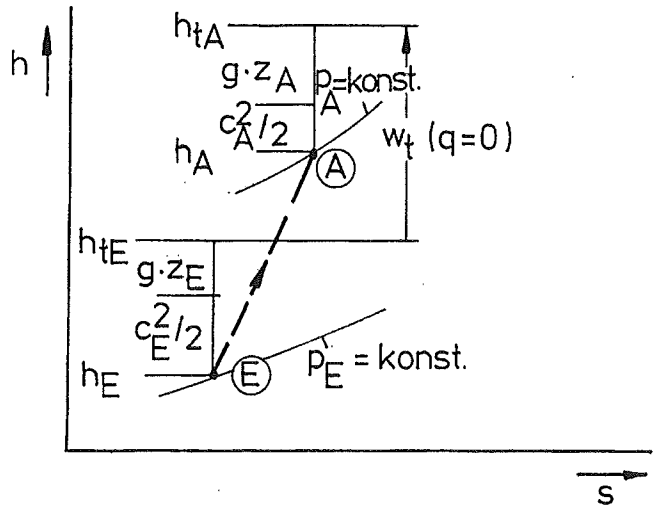


Bild 23 Zustandsänderung in einer adiabaten Arbeitsmaschine

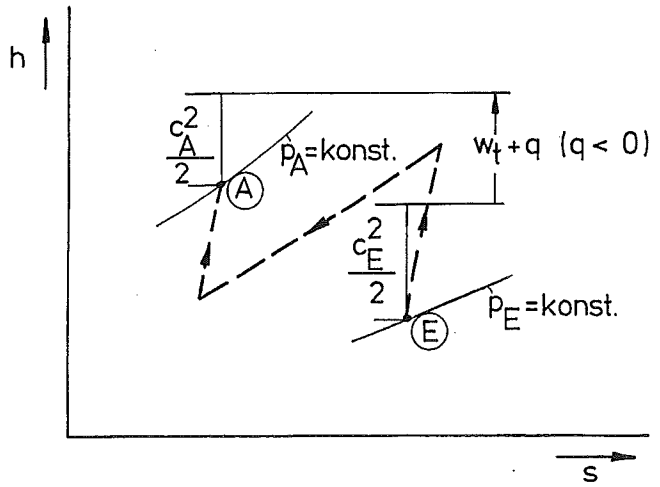


Bild 24 Zustandsänderung in einer Arbeitsmaschine mit Kühlung

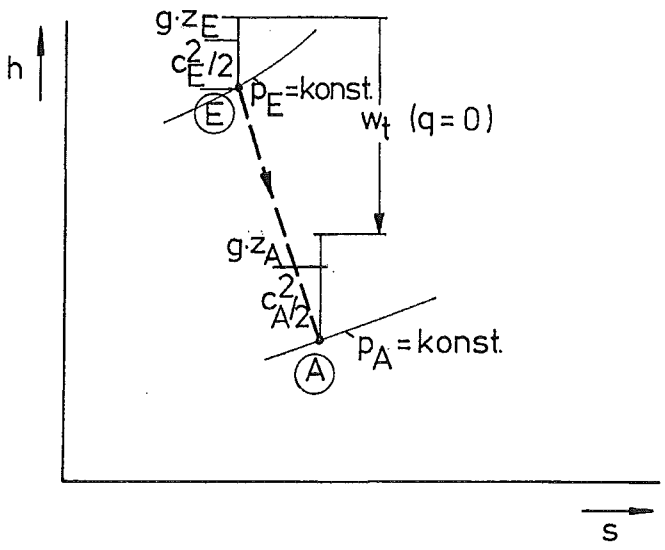


Bild 25 Zustandsänderung in einer adiabaten Antriebsmaschine

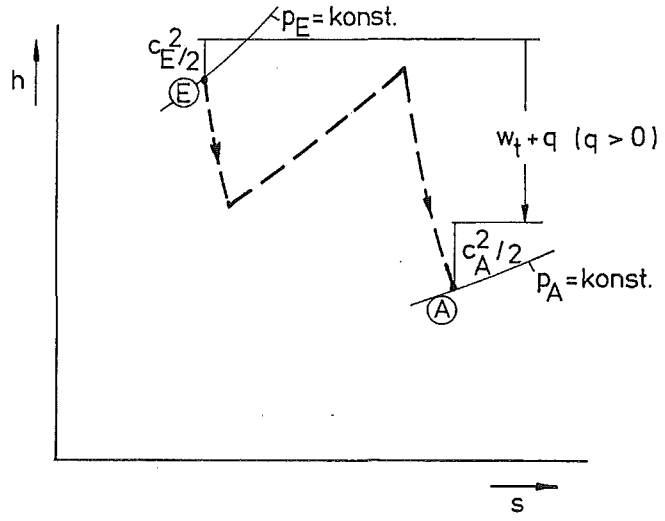


Bild 26 Zustandsänderung in einer Antriebsmaschine mit Wärmezufuhr

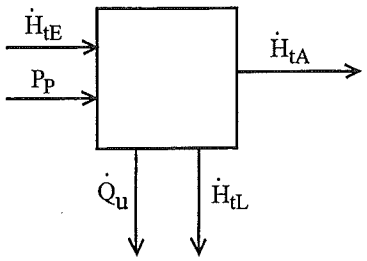


Bild 27: Energiebilanz an einer Flüssigkeitspumpe

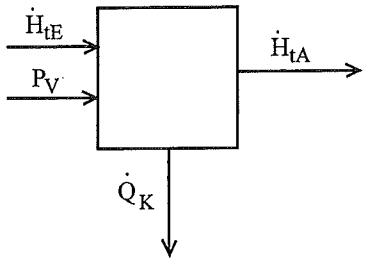


Bild 28: Energiebilanz an einem gekühlten Verdichter

GuD-Kraftwerke

Benvenuto Jäger

Technische Universität Berlin

1. Einleitung

Das Bemühen um bessere Ressourcennutzung bei der Umwandlung fossiler in elektrische Energie ist in diesem Jahrzehnt wesentlich durch den weltweit zunehmenden kombinierten Einsatz von Gasturbosätzen und Dampfkraftprozessen in den unten näher erläuterten, sehr effizienten GuD-Kraftwerken gekennzeichnet [1]. Unabdingbare Voraussetzung waren dazu die Weiterentwicklungen der stationären Gasturbinen in Richtung höherer Wirkungsgrade und verbesserter Verfügbarkeit, die diesem Maschinentyp zum Durchbruch bei der breiten Anwendung in der Elektrizitätserzeugung und besonders in der Kombination mit nachgeschalteten Dampfkraftprozessen - den GuD-Kraftwerken - verholfen haben [2]. Demgegenüber sind die zugehörigen Dampfturbinen konventionell aufgebaut und weisen keine außergewöhnlichen Dampfdaten auf. Als Brennstoffe für Gasturbinen und damit GuD-Kraftwerke eignen sich allerdings wegen der direkten Kontakte des Heißgases mit den Schaufeln nur sehr saubere, aschefreie Brennstoffe, also vorzugsweise Erdgas und leichtes Heizöl.

Die wesentlichen Entwicklungsschritte bei den stationären Gasturbinen basierten in der Vergangenheit auf den Verbesserungen der Strahltriebwerke als Flugzeugantriebe, insbesondere im zunächst militärischen Sektor. Die betrieblichen Anforderungen in Elektrizitätswerken unterscheiden sich allerdings erheblich von denen als Flugtriebwerke. Während bei Flugtriebwerken Leichtbau und kleine Stirnflächen gefordert, aber auch recht geringe Inspektionsintervalle zugelassen werden, gilt für die stationäre Gasturbine - das 'Heavy Duty Design' - zum Antrieb von Generatoren beinahe das Gegenteil: Geringe Gewichte und Abmessungen sind - bis auf Kostengesichtspunkte - von untergeordneter Bedeutung, jedoch sollten die Intervalle zwischen 2 größeren Inspektionen zur gründlichen Durchsicht besonders der heißgasführenden Teile und gegebenenfalls Austausch von Verschleißteilen bei etwa 25000 äquivalenten Vollast-Betriebsstunden liegen. Im Grund- und Mittellastbetrieb bedeutet dies etwa 3 Jahre Laufzeit zwischen den größeren Inspektionen [3; 10].

2. Gasturbinen

Gasturbinen zeichnen sich durch einen außerordentlich einfachen und platzsparenden Prinzipaufbau aus - allerdings sind die heißgasführenden Teile technisch besonders anspruchsvoll [4; 5; 6]. Der einfache und platzsparende Aufbau führt naturgemäß auch zu sehr geringen spezifischen Investitionskosten für reine Gasturbinenkraftwerke, die jedoch gegenüber Dampfkraftanlagen höhere spezifische Brennstoffkosten aufweisen. Außerdem lassen sich Gasturbinen im Gegensatz zu Dampfkraftwerken sehr schnell - innerhalb von 5 bis 10 Minuten - starten und anschließend belasten, da das Anheizen von Kesseln mit den großen Wasservolumina usw. entfällt.

Ein Gasturbosatz, Bild 1, besteht aus den Hauptkomponenten 1 - 4 und den ergänzenden Hilfseinrichtungen (Ölversorgung, Regelungs- und Schutzeinrichtungen usw.).

Der Verdichter saugt atmosphärische Luft aus der Umgebung an und verdichtet sie - je nach Ausführung der Maschine - auf Drücke von etwa 17 bar bis 23 bar, in Einzelausführungen bis etwa 30 bar. Die verdichtete Luft wird heute zumeist in einer am Umfang vor dem Turbinenteil angeordneten

Ringbrennkammer mit Einzelbrennern auf Temperaturen um 1350°C bis zu 1450°C erhitzt, anschließend expandiert die erhitzte Druckluft - das Heißgas - in der Turbine. Diese treibt zugleich den Verdichter an, der etwa 55% bis 60% der gesamten Turbinenleistung erfordert (P_V). Nur die restliche Leistung steht nach außen zum Antrieb des Generators zur Verfügung und bezeichnet die eigentliche Nennleistung (P_N) des Turbosatzes. Die Abgase am Turbinenaustritt weisen noch beträchtliche Temperaturen von - je nach Turbinendesign - 560 bis zu 640°C und damit Energieinhalte auf, die sich in nachgeschalteten Dampfkraftanlagen - den GuD-Kraftwerken - oder auch anderen Prozessen nutzen lassen (z.B. Prozeßwärme, Fernheizung, Meerwasserentsalzung).

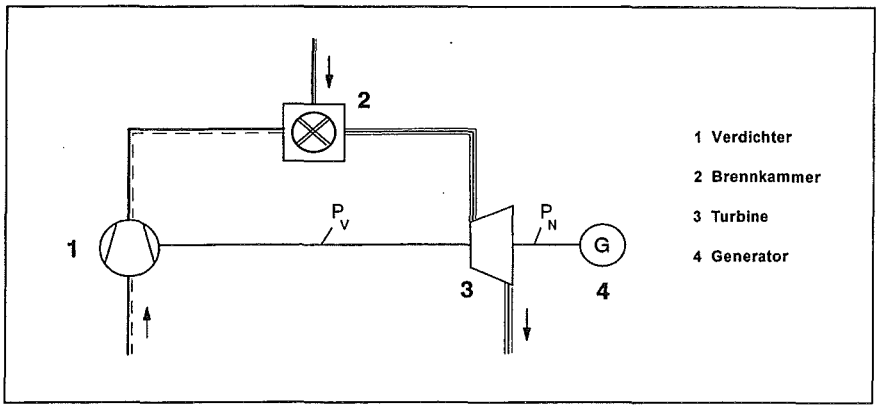


Bild 1: Prinzipaufbau eines Gasturbosatzes

Die Weiterentwicklungen der stationären Gasturbinen, besonders seit den 80er Jahren, konzentrieren sich - zusammengefaßt - auf vier wesentliche Gesichtspunkte:

1. Verbesserte Auslegung der Verdichter (erhöhte Wirkungsgrade, vergrößerte Luftmassenströme ohne Erreichen der Schallgeschwindigkeit im Verdichter),
2. Erhöhung der Wirkungsgrade durch steigende ISO-Eintrittstemperaturen,
3. Erhöhung der Verfügbarkeit, d.h. der Betriebs- und Startzuverlässigkeit durch Detailverbesserungen der mechanischen und elektronischen Komponenten und damit verbunden die Erhöhung der Revisionsintervalle,
4. Verringerung der Schadstoffemissionen, besonders der Stickoxide, durch neuzeitliche Brennerentwicklungen.

Die Punkte 1. und 2. haben zugleich auf steigende Einheitenleistungen bei etwa gleichen Bauabmessungen und damit zur Senkung der spezifischen Investitionskosten geführt. Be-sonders ausschlaggebend waren dabei neben den verbesserten Axialverdichtern die Entwick-lungen auf dem Gebiet der Kühlung und der Oberflächenbehandlung durch Beschichtungen (z.B. VPS = Vakuum-Plasma-Spritzen) der Leit- und Laufschaufeln der Gasturbinen. Diese Entwicklungsergebnisse haben das Einsatzfeld von Gasturbinen erheblich erweitert, Ende der 80er Jahre entstand ein regelrechter Nachfrageboom nach Gasturbinen, besonders in der - im Prinzip schon vorher bekannten, aber bis dahin nur selten benutzten - Kombination mit einem Dampfkraftprozeß als GuD-Anlage [2]. Nachstehend sind die technischen Möglichkeiten der Wirkungsgradverbesserungen bei Gasturbinen und damit auch bei GuD-Anlagen aufgeführt:

- Höhere Profilwirkungsgrade der Beschaufelungen von Verdichter und Turbine,
- steigende Gaseintrittstemperaturen (vor allem der noch zu erläuternden ISO-Eintrittstemperaturen durch
  - Intensivierung der Schaufelkühlung durch
    - verbesserte Führung und Verteilung der Kühlluft in den Leit- und Laufschaufeln bei den *'offenen Kühlsystemen'*, d.h. Kühlluftentnahme aus dem Verdichter und Austritt der Kühlluft aus den Schaufeln in den Heißgasstrom der Turbinenstufen,
    - (bei GuD-Prozessen) eine innere Dampfkühlung mit Teildampfströmen aus dem nachgeschalteten Dampfkraftprozeß, als ein *'geschlossenes Kühlsystem'*, bei dem der Kühldampf wieder in den Dampfkreislauf zurückgeführt wird;
  - zweistufige Verbrennung bei niedrigeren Gaseintrittstemperaturen.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung soll nur auf das wichtigste der vorgenannten Entwicklungsthemen neuzeitlicher Gasturbinen kurz eingegangen werden: die steigenden Gaseintrittstemperaturen. Die feststehenden Leitschaufeln und die rotierenden Laufschaufeln der ersten Turbinenstufen arbeiten während des Betriebes im rotglühenden Zustand. Stähle sind als Werkstoffe bei diesen Temperaturen um 850°C ungeeignet. Man verwendet vielmehr Speziallegierungen auf der Basis von Nickel, Chrom, Kobalt und Wolfram, z.B. mit etwa 60% Ni, 16% Cr, 9% Co und Zusätzen von Ti, Al und W sowie einer Reihe weiterer Legierungsbestandteile. Auch diese Werkstoffe sind bei Temperaturen oberhalb von etwa 850°C aus Gründen der Hochtemperatur-Korrosion (HTC = High Temperature Corrosion) im Dauerbetrieb kaum mehr verwendbar. Um die Metalltemperaturen unter 850°C zu halten, werden bei modernen Gasturbinen daher die Schaufeln der ersten Stufen mit Luft aus dem Verdichter gekühlt. Dazu strömt ein Teil der Verdichterluft - je Schaufelreihe einige Prozente des Luftmassenstromes - innen als Kühlluft durch die hohlen Schaufeln, kühlt diese und tritt - nach unterschiedlichem Design der Hersteller - bei den *'offenen Kühlsystemen'* durch feine Bohrungen in der Schaufelwand nach außen. Dort mischt sich die Kühlluft mit der übrigen heißen Gasströmung (und verringert damit natürlich auch deren Temperatur). Die Metall-Temperaturen der Schaufeln lassen sich durch diese innere Luftkühlung und den sich bildenden äußeren Luftschleier - ggf. durch zusätzliche dünne keramische Schichten (Thermobarrieren) - auf $\leq$ 850°C halten, obgleich die Temperatur der umströmenden Heißgase bis 1400°C und mehr betragen kann.

Bild 2 zeigt links das Prinzip des erläuterten *'offenen Kühlsystems'* einer feststehenden Leitschaufel mit Luft, die vom Verdichter abgezweigt wird. Durch die am Schaufelende austretende Kühlluft vermindert sich in dem gezeigten Beispiel die Gaseintrittstemperatur in die nachfolgende rotierende Laufstufe um $\Delta t = 155°C$. Diese Temperaturminderung durch die Kühlluft verringert die - noch zu erläuternde - ISO-Eintrittstemperatur der Gasturbine und damit den theoretisch möglichen höheren Wirkungsgrad der Gasturbinenanlage, wenn der Kühlluftstrom nicht aus Werkstoffgründen benötigt würde.

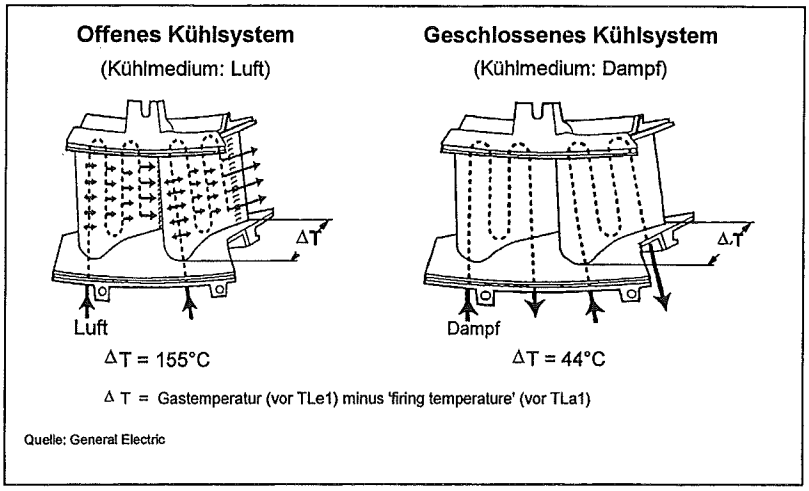


Bild 2: GE-H-Technologie mit geschlossenem Dampf-Kühlsystem im Vergleich zum offenen Luft-Kühlsystem

Die neueste Entwicklung amerikanischer Hersteller (hier als Beispiel *General Electric*) betrifft bei Gasturbinen für GuD-Anlagen das bereits kurz skizzierte *'geschlossene Kühlsystem'*, bei dem statt der Verdichterluft Dampf aus dem Dampfkreislauf hinter dem Hochdruck-Turbinenteil (HD-Turbine) entnommen und zur Kühlung in das Innere der Leitschaufeln der 1. Tur-binenstufe geleitet wird. Nach seiner Erhitzung zur Schaufelkühlung strömt dieser *'Kühldampf'* zurück in den Dampfkreislauf nach dem Zwischenüberhitzer vor dem Mitteldruck-Turbinenteil (MD-Turbine). Die Temperaturminderung des Heißgases in dieser Turbinenstufe beträgt nach bisherigen Untersuchungen nur Δt = 44°C gegenüber den bei offener Luftkühlung genannten Δt = 155°C und bietet damit eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades [7].

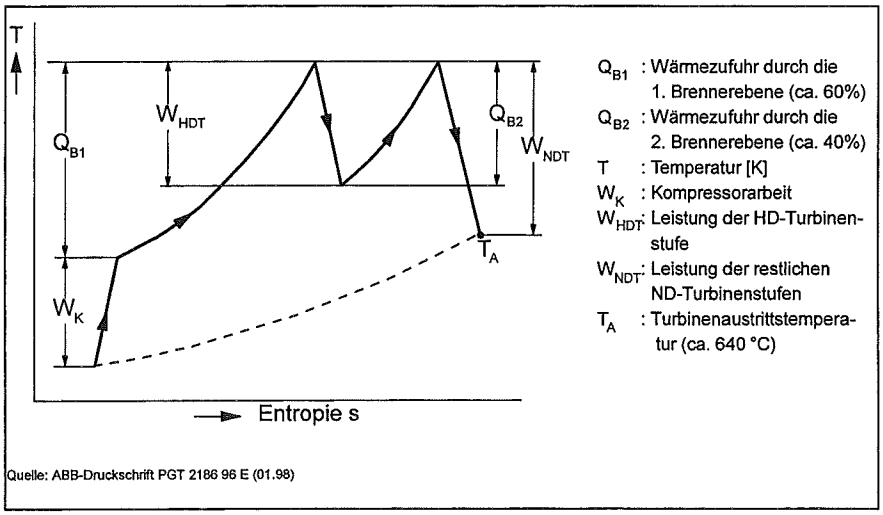


Bild 3: Gasturbinenprozeß mit zweistufiger Verbrennung (sequential combustion) im T-s-Diagramm, ABB-Gasturbinen GT 24/Gt 26

Neuzeitliche Gasturbinen des Herstellers *ABB* arbeiten mit einer *zweistufigen* Verbrennung (*'sequential combustion'*) [8]. Diese erlaubt ebenfalls eine Erhöhung der Turbinenleistung und des Wirkungsgrades, jedoch *ohne* Steigerung der Gaseintrittstemperatur in den Brennkammern. d.h. eine Erhöhung der ISO-Eintrittstemperatur infolge geringerer erforderlicher Kühl-luftströme in den ersten beiden Leitschaufelreihen. Das zugehörige T-s-Diagramm einer solchen Ausführung zeigt das Bild 3, das Druckverhältnis beträgt 30:1. Etwa 60% der gesamten Brennstoffenergie wird in der 1. Brennerebene zugeführt und die 1. Turbinenstufe (HD-Turbine) leistet die Arbeit W_{HDT}. Danach werden die restlichen 40% Brennstoffenergie in der 2. zugeführt und die verbleibende Arbeit W_{NDT} in den restlichen Stufen der (ND-)Turbine abgearbeitet, die Abgase haben (bei Nennleistung) eine Temperatur von $T_A \approx 640°C$.

Die höchsten Beanspruchungen treten bei Gasturbinen - ähnlich wie bei anderen Wärmekraftmaschinen - bei schnellen Lastwechseln auf. Die Ursache sind große Temperaturänderungen in den Turbinen-Beschaufelungen, die zu hohen instationären thermischen Beanspruchungen und damit Materialermüdungen führen, den LCF = 'Low Cycle Fatiques'. Eine einmalige plötzliche Abschaltung der Brennstoffzufuhr bei Vollast - z.B. bei einer elektrischen Störung am Generator - führt auf Beanspruchungen, die weit mehr als 10^2 Vollast-Betriebsstunden entsprechen können. Man spricht daher von den bereits anfangs erwähnten *äquivalenten Vollast-Betriebsstunden*, die auch plötzliche Lastwechsel mit ihren Auswirkungen auf die Lebensdauer hochbeanspruchter Teile berücksichtigen [3].

3. GuD-Prozeß

Eine sehr weite Verbreitung hat der bereits angesprochene 'GuD'-Prozeß (Gas- und Dampf-Prozeß, englisch 'Stag': Steam and gas oder STAG™[1]) erreicht, Bild 4. Die Wärmeenergie des Abgases von einer oder mehreren Gasturbinen erzeugt in einem Wärmetauscher - dem Abhitzekessel - überhitzten Dampf für einen nachgeschalteten Dampfkraftprozeß. Die Leistung der Gasturbine zu der der nachgeschalteten Dampfturbine verhält sich derzeit etwa wie 1,8 : 1 bis 2 : 1. Da der Dampfkraftprozeß keinerlei zusätzlichen Brennstoff benötigt, erhält man gegenüber dem reinen Gasturbinenprozeß also eine um fast 50% größere elektrische Leistung aus dem eingesetzten Brennstoff. In erster Näherung ergibt sich mit dem Wirkungsgrad η_{GT}, der Leistung P_{GT} des Gasturbinenprozesses sowie der Leistung P_{DT} des Dampfkraftprozesses der Gesamtwirkungsgrad η_{GuD} des GuD-Prozesse zu

$$\eta_{GuD} \approx \eta_{GT} \cdot (P_{GT} + P_{DT})/P_{GT} \approx 1{,}5 \cdot \eta_{GT}.$$

Die den Gasturbosätzen nachgeschalteten Dampfkraftprozesse führen im Vergleich zu modernen Dampfkraftwerken auf Steinkohle- oder Braunkohlebasis wegen der einfach aufgebauten Abhitzekessel zu deutlich niedrigeren spezifischen Investitionskosten. Ein GuD-Prozeß ist daher bei Vorhandensein von preiswertem Erdgas (oder auch leichtem Heizöl) als Brennstoff nach heutigem Stand der Technik der bestmögliche, d.h. wirtschaftlichste und umweltfreundlichste fossile Kraftwerksprozeß, der inzwischen auch sehr gute Verfügbarkeiten aufweist.

Bild 4 zeigt links unten das zugehörige T-s-Diagramm mit den eingetragenen Kreisprozessen der Gasturbine und des nachgeschalteten Zweidruck-Dampfkraftprozesses einer älteren Anlage. Die Luft wird verdichtet und von 600 K, entsprechend der Lufttemperatur von etwa 330°C nach dem Austritt aus dem Verdichter, in der Brennkammer (im vorliegenden Beispiel) auf 1300 K, also etwa 1030°C erhitzt. Hierbei wird im T-s-Diagramm die ISO-Prozeßeintrittstemperatur benutzt (die ISO-

[1] STAG: TM-trademark of General Electric Company

Prozeßeintrittstemperatur ist eine rechnerische Größe, die aus der zugeführten Brennstoffenergie und dem Luftmassenstrom am Ende des Verdichters einschließlich der Kühlluftströme für die Innenkühlung der Gasturbinenschaufeln ermittelt wird). Die heiße, verdichtete Luft gibt ihr mögliches Arbeitsvermögen in der Gasturbine ab, die Austrittstemperatur am Turbinenende beträgt etwa 800 K, also etwa 530°C. Diese Abwärme wird im Dampfkraftprozeß genutzt und erzeugt in zwei Kesselteilen (Abhitzekessel) Dampf mit Endtemperaturen von 790 K entspr. etwa 520°C und etwa 470 K entspr. etwa 200°C, der in der Dampfturbine sein Arbeitsvermögen abgibt, im Kondensator kondensiert und als Wasser wieder über den Entgaser/Speisewasserbehälter in den Kessel zurückgepumpt wird. Nach Nutzung der Wärmeenergie verlassen die Abgase den Abhitzekessel.

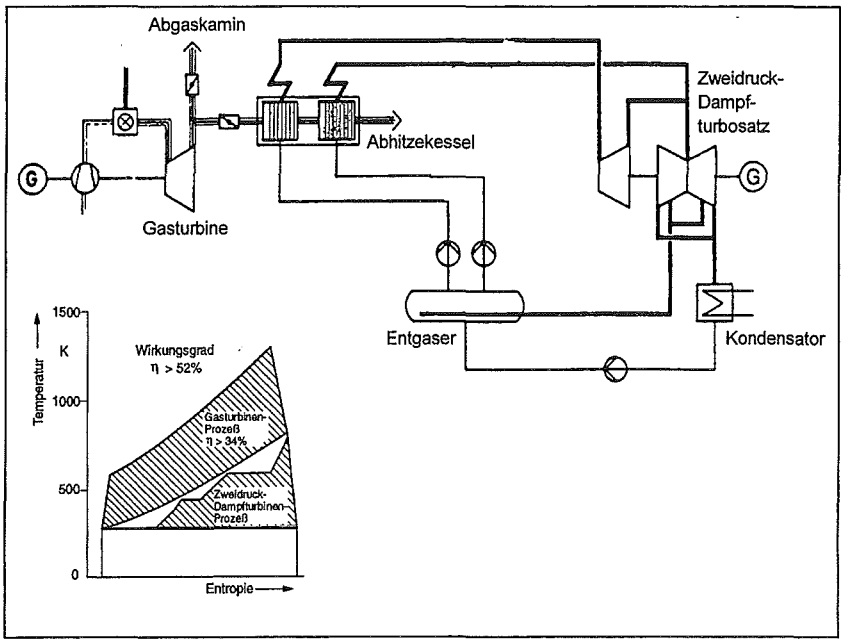


Bild 4: Prinzipschaltbild des GuD-Prozesses mit T-s-Diagramm

Die zugehörigen Dampfturbinen weisen demzufolge die bereits erwähnten recht konventionellen Frischdampfdaten (im Bereich von 100 bis 160 bar und 520 bis 560°C) auf. Allerdings sind die Turbinen in konstruktiven Details den jeweiligen Anforderungen der GuD-Kraftwerke angepaßt [9; 10] - beispielsweise als 1-Druck, 2-Druck oder 3-Druck-Turbinen ohne oder mit Zwischenüberhitzung - oder auf Wunsch mit seitlich oder axial angeordneten Kondensatoren zum Verringern der Bauhöhe.

Eine Einschränkung des heutigen breiten Einsatzes von GuD-Kraftwerken ist der Einsatz von Erdgas oder (leichtem) Heizöl als Brennstoff. Sind diese Brennstoffe kostengünstig verfügbar, so ist der Einsatz von GuD-Kraftwerken in jedem Fall gegenüber den herkömmlichen Dampfkraftwerken vorzuziehen. Nachstehend sind im Vergleich zu Dampfkraftwerken wesentliche Besonderheiten der GuD-Kraftwerke in wichtigen Teilbereichen aufgelistet:

- Wirtschaftlichkeit
  optimaler Brennstoffeinsatz
  niedrige spezifische Investitionskosten
  geringe Anfahrverluste
  hohe Teillastwirkungsgrade
- Auslegung und Betrieb
  einfacher Aufbau
  möglicher schrittweiser Ausbau
  kurze Lieferzeiten
  geringer Personalbedarf
  verbrauchernahe Standorte
  kurze Startzeiten
- Umweltfreundlichkeit
  geringer Kühlwasserbedarf
  gerine Schadstoffemissionen
  geringer Platzbedarf
- Zukunftsperspektiven
  weitere Wirkungsgradverbesserungen
  umweltfreundliche Kohlennutzung durch
  integrierte Kohlevergasung

Besonderheiten von GuD-Kraftwerken

Die Kombination von 2 Gasturbosätzen mit nachgeschalteten Abhitzekesseln und einem gemeinsam aus beiden Kesseln gespeisten Dampfturbosatz wird gern benutzt. In diesem Fall haben die 3 Generatoren etwa die gleiche Leistung und lassen sich identisch ausführen. Bei allfälligen Revisionen und Inspektionen läßt sich reihum jeweils ein Maschinensatz abschalten und es können noch etwa 2/3 der Gesamtleistung eines Blockes in Betrieb bleiben.

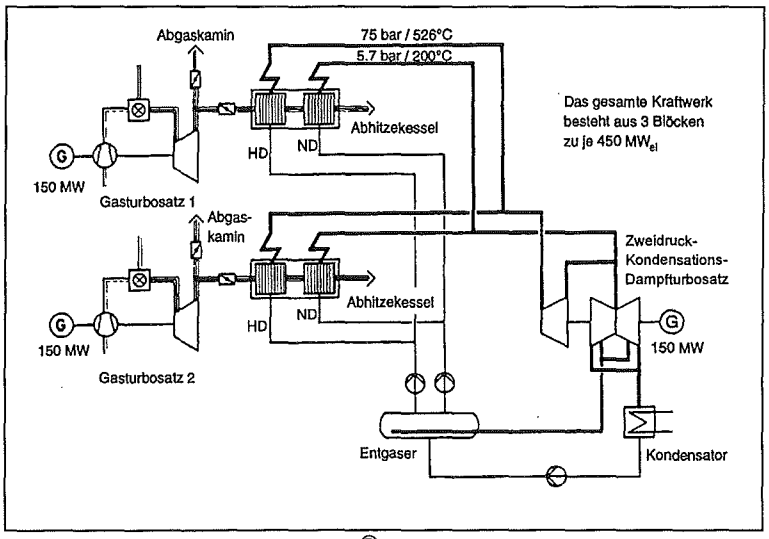


Bild 5: Prinzipschaltbild des GUD ®-Blockes des 1 350-MW_{el} -Kraftwerkes Ambarli (Türkei)

Bild 5 zeigt das vereinfachte Schaltbild einer solchen Kombination in einem der ersten Groß-kraftwerke dieser Art, dem 1350 MW-GUD®[2])-Kraftwerk Ambarli in der Türkei, das insgesamt 6 erdgasgefeuerte Gasturbosätze und 3 nachgeschaltete Dampfturbosätze umfaßt und deren erste Maschinensätze 1988 in Betrieb genommen worden sind [11]. Es handelt sich hier ebenfalls um 2-Druck-Anlagen, mit je einen Hochdruck- und Niederdruckkessel und entsprechend ausgelegten Dampfturbinen. Die gemessenen Gesamtwirkungsgrade lagen damals bereits bei über 52,5%.

[2] GUD®: Eingetragenes Warenzeichen der Siemens AG

Es lassen sich auch 3-Druck-Anlagen, ggf. mit Zwischenüberhitzung des Dampfes nach Teilexpansion in der HD-Turbine, mit noch höheren Wirkungsgraden, aber auch höheren Investitionskosten ausführen [12]. Neuere Anlagen mit noch höheren Eintrittstemperaturen bei Gasturbinen erreichen in ausgefeilter Technik Wirkungsgrade bis zu 58%, noch höhere Werte bis 60% werden ab 1999 bei der beschriebenen Anlage mit dampfgekühlten Schaufeln in der 1. Gasturbinenstufe erwartet. Andererseits bevorzugen manche Kunden bei sehr niedrigen Brennstoffkosten auch GuD-Anlagen mit einfachen 1-Druckkesseln und niedrigeren spezifischen Investitionskosten. Allen GuD-Anlagen gemeinsam sind kurze Bauzeiten ab Bestellung infolge weitgehender Vorfertigung, sie können bei etwa 1½ Jahren und weniger liegen.

Zunehmend sind auch andere Maschinenanordnungen im Gebrauch, etwa Einwellenanlagen mit einer Gasturbine und einer Dampfturbine, bei denen der Generator zwischen beiden Turbinen angeordnet ist [12]. Vorteilhaft sind dabei im Vergleich zu der genannten Anordnung von 3 Maschinensätzen der geringere Platzbedarf, der etwas höhere Gesamtwirkungsgrad der Anlage, da nur *ein* Generator von 3-facher Leistung benutzt wird, die geringeren spezifischen Investitionskosten und die einfachere Bedienung infolge der geringeren Anzahl von Komponenten. Die Dampfturbine wird häufig über eine lösbare, selbstsynchronisierende Kupplung mit dem Generator verbunden, um die Gasturbine mit dem Generator zunächst ohne Dampfturbine starten und belasten zu können.

Ein sehr modernes GuD-Kraftwerk mit Fernwärmeerzeugung wurde 1996 in Berlin-Mitte in Betrieb genommen, Bild 6 zeigt das Schaltbild [13]. Bei diesem Kraftwerk arbeiten 2 Gasturbi nen mit einer maximalen Leistung von je 136 MW_{el} mit einer nachgeschalteten Gegendruck- Dampfturbine zusammen. Der abströmende Dampf gibt seine Wärme in das Fernwärmenetz ab. Wegen des Gegendruckbetriebes erreicht der Dampfturbosatz nur die Leistung von 108 MW_{el}, die Gesamtleistung des Kraftwerkes ist auf 380 MW_{el} und max. 380 MW_{th} ausgelegt, es wird wärmegeführt betrieben werden, d.h. maßgebend ist der jeweilige Wärmebedarf des Fernwärmenetzes.

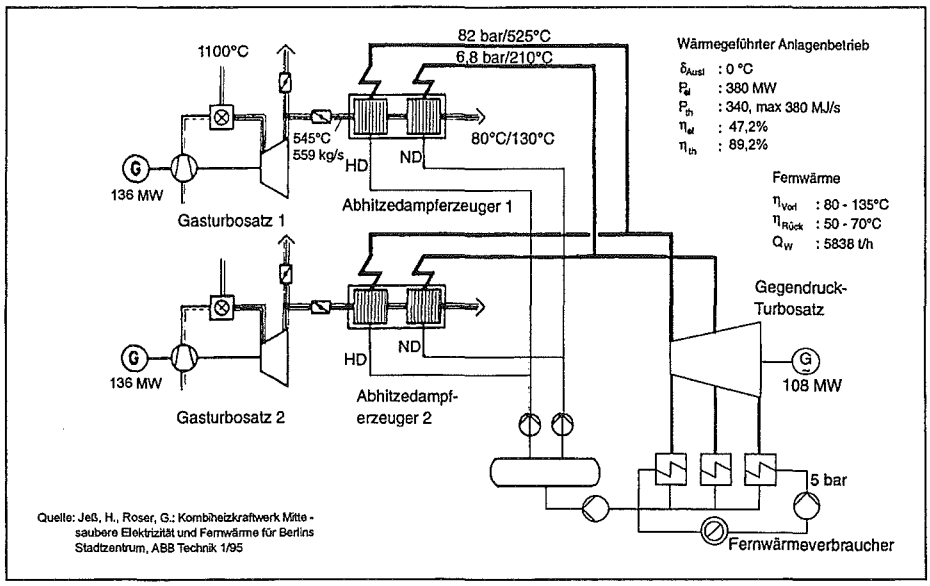


Bild 6: Prinzipschaltbild des 380-MW $_{el}$ /380-MW_{th} -GuD-Kraftwerkes Berlin-Mitte

4. Kohlevergasung

Das Hauptproblem der hinsichtlich der Wirkungsgrade und Emissionen hervorragenden GuD-Kraftwerke bilden die teuren und wertvollen Brennstoffe Erdgas und leichtes Heizöl. Es hat daher nicht an Versuchen gefehlt, Kohle bei Gasturbinenprozessen einzusetzen. Die direkte Nutzung der Kohle als Brennstoff scheiterte bisher an den bereits erwähnten Aschebestandteilen, die die Turbinenschaufeln wegen der hohen Strömungsgeschwindigkeiten in kurzer Zeit durch Erosion zerstören.

Eine erfolgversprechende Entwicklung ist daher die Vergasung der Kohle und Reinigung des gewonnenen Gases, eine im Prinzip alte und bewährte Technik, die heute allerdings mit neuen Konzepten der Vergasung unter Druck erprobt wird. Bild 7 gibt das Grundschaltbild eines solchen Prozesses wieder [14]. Ein Teil der verdichteten Luft wird in flüssigen Stickstoff und Sauerstoff zerlegt, die restliche Luft wird den GT-Brennkammern als Verbrennungsluft zugeführt. Im Gasgenerator bildet sich unter Wärmeeinfluß aus der zugeführten Kohle und dem Sauerstoff Kohlenmonoxid CO als brennbares Gas. Das Gas wird von Staub und Schwefel gereinigt und als *Reingas* in den Brennkammern der Gasturbine verbrannt. Der bei der Luftzerlegung abgespaltete Stickstoff N_2 wird ebenfalls der Brennkammer als Teil des gasförmigen Arbeitsmittels zugeführt. An den Gasturbinenprozeß schließen sich wieder ein Abhitzekessel und eine Dampfturbine an. Die Gesamtwirkungsgrade solcher Anlagen liegen wegen der Energieverluste bei der Kohlevergasung mit heute möglichen Gasturbinenprozessen um 48% und damit erst etwas oberhalb der Wirkungsgrade modernster Steinkohlekraftwerke. Jedoch werden die Eintrittstemperaturen der künftigen Gasturbinen - wie erläutert - noch weiter steigen, damit erhöhen sich auch in Zukunft die Wirkungsgrade der Gesamtprozesse [15]. Heutige Versuchsanlagen dienen daher der Gewinnung von Erfahrungen, um künftig GuD-Kraftwerke umweltfreundlich und wirtschaftlich mit Kohle als Brennstoff betreiben zu können.

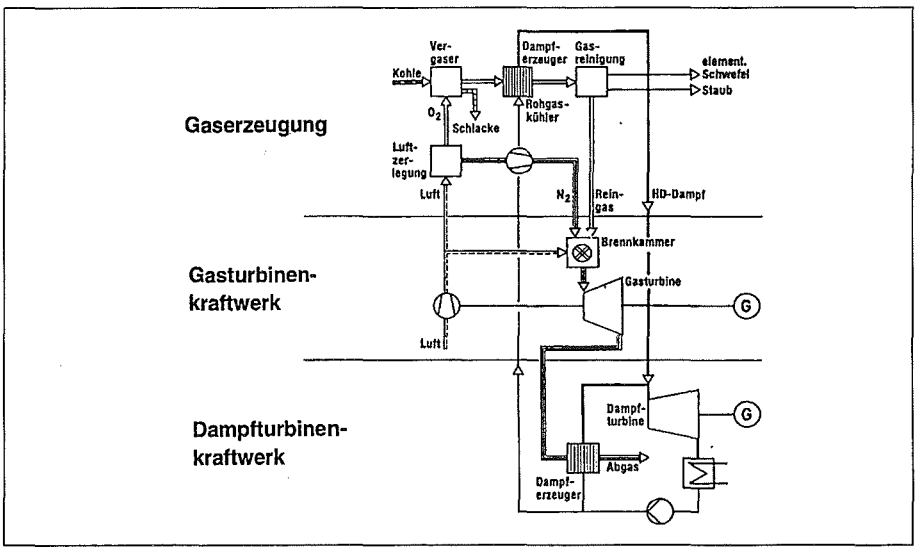


Bild 7: Prinzipschaltbild einer GuD-Anlage mit Kohlevergasung

Größere Pilot-Anlagen wurden in Europa 1994 mit einer Nettoleistung von 253 MW_{el} im niederländischen Buggenum und 1997 im spanischen Puertollano mit einer Nettoleistung von

300 MW_{el} in Betrieb genommen. Bezeichnenderweise stammt die Kohledruckvergasung in Buggenum von der SHELL AG, man kann daraus erkennen, welche Anstrengungen heutige Mineralölfirmen für die Zukunftssicherung unternehmen, wenn eines nicht mehr allzufernen Tages die Erdölvorkommen zur Neige gehen. Weltweit sind eine Reihe von Pilot-Anlagen in Betrieb oder im Bau [16]. Die bisherigen Ergebnisse sind technisch zufriedenstellend, jedoch die spezifischen Investitionskosten noch zu hoch, um einen rentablen Betrieb zu ermöglichen.

5. Weitere kombinierte Kraftwerksprozesse

Die Erweiterung bereits bestehender - meist kohlebefeuerter - Dampfkraftwerke durch *Vorschalten* [17] einer erdgas- oder (selten) auch ölgefeuerten Gasturbine ist eine kostengünstige und leistungssteigernde Nachrüstungsmöglichkeit - das *'Topping'*, Bild 8. Das Abgas einer Gasturbine mit den genannten hohen Temperaturen beinhaltet nicht nur eine große Wärmeenergie, sondern auch noch einen Restsauerstoffgehalt von etwa 15% gegenüber dem ursprünglichen Luftsauerstoffanteil von 21%, da die Flammen in den Brennkammern nur einen Teil des Luftsauerstoffes benötigen. Wärmeenergie und Restsauerstoffgehalt lassen sich daher im Dampfkessel noch als vorgewärmte 'Frischluft' für die Kohlefeuerung des normalen Dampfkraftprozesses nutzen. Die Wirkungsgrade solcher Kombiblöcke erreichen dann etwa 45%, das Leistungsverhältnis von Gasturbine/Dampfturbine liegt bei etwa 1:6 bis 1:8.

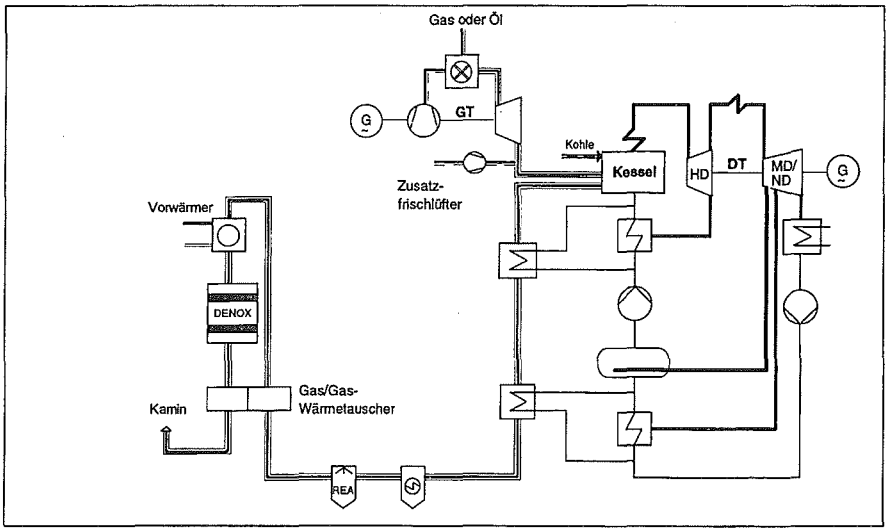


Bild 8: Prinzipschaltbild einer Dampfkraftanlage mit vorgeschaltetem Gasturbosatz (Topping)

Eine weitere - allerdings seltenere - Schaltungsvariante vorzugsweise für Neuanlagen mit Kohle als Hauptbrennstoff und Erdgas oder Heizöl als Zusatzbrennstoff ist die Parallelschaltung eines kohlebefeuerten Hauptdampferzeugers und eines unbefeuerten Abhitzekessels, der ähnlich dem GuD-Prozeß die Abwärme der Gasturbine zur Dampferzeugung nutzt, Bild 9. Der Dampfstrom wird an geeigneter Stelle in die nachgeschaltete Dampfturbine eingespeist. Die Wirkungsgradverbesserung hängt von den gewählten Dampfparametern und vom Leistungsverhältnis Gasturbine/Dampfturbine ab, üblicherweise im Bereich um etwa 1:5 bis 1:6.

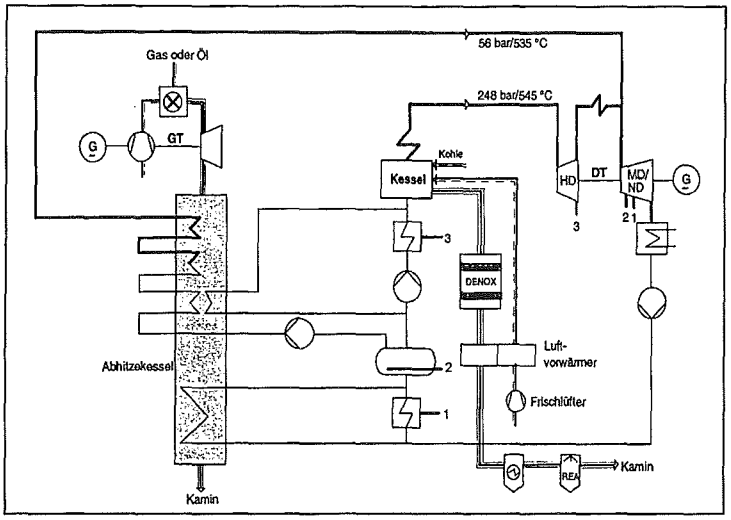


Bild 9: Prinzipschaltbild einer Dampfkraftanlage mit parallelgeschaltetem Gasturbosatz

6. Ausblick

Bild 10 zeigt die erreichbaren Wirkungsgrade verschiedener Kraftwerksprozesse in Abhängigkeit der 'ISO-Prozeßeintrittstemperatur'. Die werkstofftechnisch und kühltechnisch wichtige Größe ist - wie bereits erläutert - die tatsächliche Gastemperatur mit heute erreichbaren Werten bis zu > 1400°C vor der ersten Turbinenleitschaufelreihe. Diese liegt je nach Art der Schaufelkühlung um etwa 180 bis 250°C über der hier als Maß benutzten ISO-Prozeßeintrittstemperatur. Weiter verbesserte Kühlverfahren und keramische Beschichtungen als Thermobarrieren sowie auch die beschriebene Dampfkühlung für die Turbinenschaufeln in den ersten Stufen werden weiter steigende Gaseintrittstemperaturen und damit weitere Wirkungsgradverbesserungen der großen stationären Gasturbinen und damit auch der GuD-Prozesse ermöglichen [7; 18]. Vor allem das beschriebene Prinzip der Kohlevergasung wird den Einsatzbereich der GuD-Kraftwerke weltweit vergrößern.

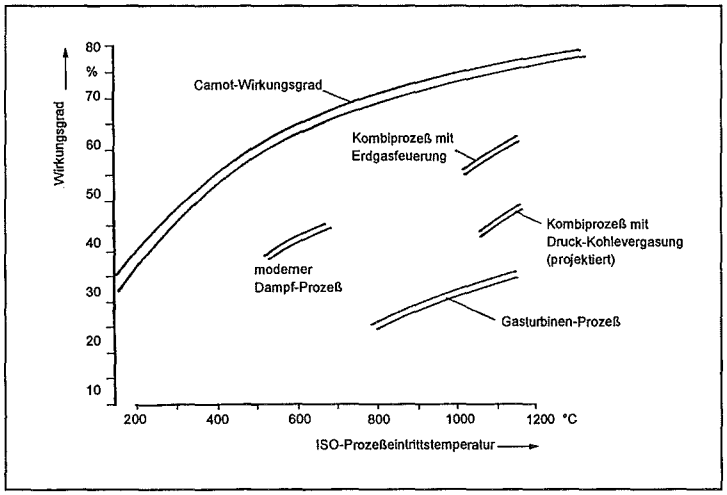


Bild 10: Kraftwerkswirkungsgrade in Abhängigkeit von der ISO-Prozeßeintrittstemperatur

Einen interessanten Vorschlag für künftige Kraftwerke in sonnenreichen Gegenden zeigt das letzte Bild 11 [19]. Anstelle autarker solarthermischer 'Solarfarmkraftwerke' nur mit Parabolspiegel-Konzentratoren wird eine Kombination mit einem GuD-Prozeß vorgeschlagen. Die Solarstrahlung dient als 'Fuel Saver', indem die Gasturbinenleistung in dem Maße zurückgenommen wird wie solar erzeugter Dampf für den nachgeschalteten Dampfkraftprozeß zur Verfügung steht. Von wesentlicher Bedeutung ist hier die Direktverdampfung des Wassers, deren technische Lösung erst in den letzten Jahren vorgestellt worden ist. Ein GuD-Kraftwerk mit einem derartigen 'Fuel Saver' oder 'Fuel Booster' könnte nach derzeitigen Abschätzungen bei gleichem Brennstoffeinsatz etwa 40% mehr elektrische Arbeit als ein nur erdgasbefeuertes GuD-Kraftwerk liefern.

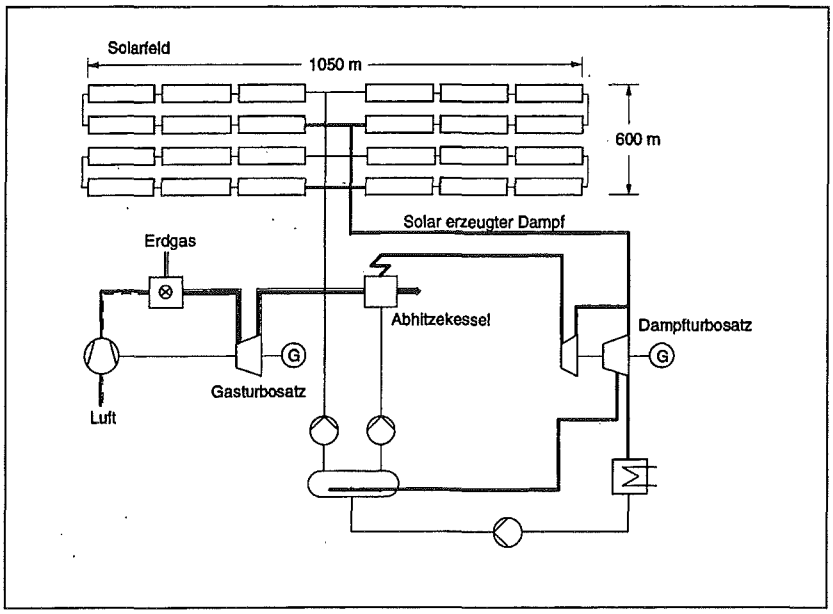


Bild 11: Prinzipschaltbild einer GuD-Anlage mit einem Solarfarm-Prozeß

Die wichtigste Konkurrenz für GuD-Anlagen könnten durch künftige Weiterentwicklungen die Brennstoffzellen werden, die mit Wirkungsgraden bis 60% schadstoffarm die direkte Umwandlung von Wasserstoff (oder Erdgas über Reformatoren) und Sauerstoff in Elektrizität ermöglichen.

Literatur:

[1] Riedle, K., Rukes, B., Wittchow, E. (1990): Die Erhöhung des Kraftwerkswirkungsgrades in Vergangenheit und Zukunft. VGB 'Kraftwerkstechnik 2000'.

[2] Maslak, C.E., Tomlinson, L.O. (1995): GE Combined-Cycle Experience. Druckschrift GER-3651D, GE Company, Schenectady, NY, 1995.

[3] Deblon, B. (1994): How High Quality Maintenance Assures Reliable Gas Turbine Operation. Publikation für: "Power Gen Asia '94", Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen 1994.

[4] Keppel, W. (1994): 20 Jahre Gasturbinen Typ 13: von 55 bis 165 MW - Spiegelbild einer Evolution. VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994) 4.

[5] Becker, W., Finckh, H.H. (1996): Die 3A-Gasturbinen kombinieren bewährte und neue KWU-Technologie mit Triebwerk-Know-how. Siemens Power-Journal 2/95, Erlangen 1996.

[6] Brandt, D.E., Wesorick, R.R. (1994): GE gas turbine design philosophy. Druckschrift GER-3434D, GE Company, Schenectady, NY, 1994.

[7] Corman, J. C., Paul, Th. C. (1995): Power Systems for the 21st Century 'H' Gas Turbine Combined Cycles. Druckschrift GER-3935, GE Company, Schenectady NY, 1995.

[8] ABB-Druckschrift PGT 218698 E: The GT 24/GT 26 gasturbines. ABB Power Generation Ltd, Baden (Schweiz) 1/1998.

[9] Kehoe, P.T. (1994): Steam Turbines for STAG Combined-Cycle Power Systems. Druckschrift GER-3582C, GE Company, Schenectady, NY, 1994.

[10] Balling, L., Joyce, J.S., Rukes, B. (1995): A new Generation of Advanced GUD Combined-Cycle Blocks. Publikation für: Power-Gen Europe '95, Amsterdam, Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen 1997

[11] Das GUD-Kraftwerk Ambarli - Ein Kraftwerk setzt Maßstäbe. Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen 1993.

[12] Balling, L., Fränkle, M., Wolf, E., Feldmüller, A. (1997): Operating Experience with the Latest Combined Cycle Technology using Advanced Gas Turbines. Publikation für: Power-Gen Asia '97, Singapore, Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen 1997.

[13] Jeß, H., Roser, G. (1995): Kombiheizkraftwerk Mitte - saubere Elektrizität und Fernwärme für Berlins Stadtzentrum. in: ABB Technik 1/95.

[14] The Puertollano Integrated Coal Gasification Combined Cycle (IGC-GUD®) Power Plant in Spain (Plant Desciption). Druckschrift der Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen 1995.

[15] Buskies, U., Ullrich, N., Baumann, H.-R., Haupt, G., Tränkenschuh, H.-C., Zimmermann, G., Pruschek, R., Oeljeklaus, G. (1997): IGCC - A Progressive and Profitable Power Plant Technology. Publikation für: Power-Gen Europe '97, Madrid, Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen 1997.

[16] Emsperger, W., Haupt, G., Karg, J. (1996): IGCC Technology Provides Clean and Efficient Power. Publikation für: Power-Gen Asia '96, New Delhi, Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen 1996.

[17] Heusinger, K., Wittchow, E. (1994): Leistungssteigerung fossilbefeuerter Dampfkraftwerke durch Umbau zu kombinierten Anlagen. in: SIEMENS Power-Journal 2/94.

[18] Tomlinson, L.O., Moore, J.H., Maslak, C.E., Smith, R.W. (1995): Advanced Technology Combined Cycles. Druckschrift GER-3936, GE Company, Schenectady, NY, 1995.

[19] Ökonomie und Ökologie im Konsens; in: Kraftwerk-Perspektiven '94, Jahresbericht des SIEMENS-Bereiches Energieerzeugung, Erlangen 1995.

Photovoltaik: Steigender Umsatz und fallende Kosten

Heribert Wagner

Institut für Schicht- und Ionentechnik, Abteilung Photovoltaik (ISI-PV)

Forschungszentrum Jülich

Einleitung

Photovoltaische Energieumwandlung, das heißt die Umsetzung von Sonnenlicht in elektrische Leistung, wird heute praktisch ausschließlich zur Bereitstellung der Stromversorgung von Satelliten eingesetzt. Für die terrestrische Nutzung dieser regenerativen Energiequelle sind zur Zeit zwar bestimmte Anwendungsbereiche unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erschließbar (z.B. Stromversorgung in netzfernen Gebieten insbesondere der dritten Welt, Telekommunikation, Hobbymarkt), einer generellen Markteinführung für die Stromerzeugung stehen jedoch u.a. die noch zu hohen Kosten der Solarzellen und der daraus gefertigten Solarmodule entgegen. Größere Massenfertigung wird zwar zu einer wesentlichen Kostenreduktion führen, doch müssen Technologieverbesserungen und neue, inhärent kostengünstigere Technologien hinzukommen, um breitere Anwendungsfelder nicht nur aus ökologischer sondern auch ökonomischer Sicht zu erschließen.

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die derzeitige Marktsituation, die von der sogenannten Silizium-Wafertechnologie geprägt ist, über den Aufbau neuer Produktionskapazitäten, die zu erwartende Kostenreduktion durch Massenfertigung sowie bereits existierende bzw. geplante staatliche Förderprogramme zur Unterstützung der Markteinführung in netzgekoppelten Systemen. In einem weiteren Abschnitt wird auf die Produktionsschritte der Wafertechnologie detaillierter eingegangen und auf einige, kostensparende technologische Verbesserungen oder Varianten hingewiesen, die bereits eingesetzt werden oder in Entwicklung sind. Ein weiterer Abschnitt behandelt den derzeitigen Einsatz und Entwicklungsstand der sogenannten Dünnschicht-Technologie, denen das größte Potential zur Kostenreduktion eingeräumt wird. Im letzten Abschnitt werden Ergebnisse einer von der EU in Auftrag gegebenen Studie (APAS RENA CT 94 0008) mitgeteilt, die die weiteren Prespektiven der Wafertechnologie sowie der Dünnschichttechnologien im Hinblick auf die zu erwartenden Modulkosten bei Massenfertigung aufzeigen. Hieraus kann man auch die zu erwartenden Kosten für PV-Strom ableiten.

Der heutige und absehbare Photovoltaik-Markt

Der derzeitige Photovoltaikmarkt (PV Markt) wird von der Silizium-Wafertechnologie beherrscht, die Dünnschichttechnologien spielen heute noch eine untergeordnete Rolle. Abb. 1 zeigt die Marktentwicklung der vergangenen Jahre. Die Angabe MW pro Jahr gibt die elektrische Leistung an, die die verkauften PV Module in – salopp gesagt – prallem Sonnenschein liefern würden. Gerade in den letzten Jahren ist ein merklicher Anstieg zu verzeichnen, der bis zu 35 % betrug. Es ist jedoch festzustellen, daß der erreichte Absolutwert von ca. 125 MW/Jahr energiewirtschaftlich überhaupt noch nicht ins Gewicht fällt. Für einige Nischenmärkte gilt dies aber schon nicht mehr.

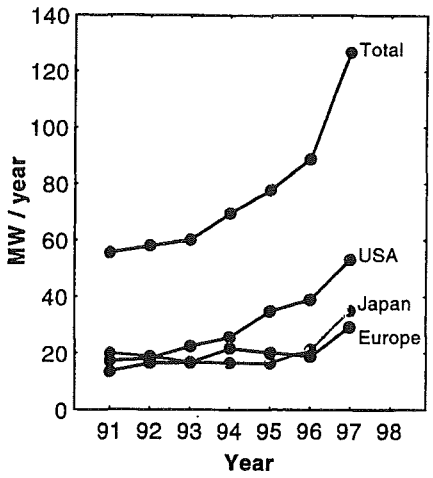


Abbildung 1

Die zu verzeichnende Zunahme des Marktes bewirkt einen weiteren Ausbau der Produktionskapazitäten, die in Abb. 2 für den Zeitraum der nächsten beiden Jahre aufgelistet sind. Man erkennt, daß einmal die Produktion bei der Wafertechnologie um 145 MW/Jahr zunimmt, was bereits einer Verdopplung des derzeitigen Marktes entspricht (Abb. 1). Aber auch die Dünnschichttechnologien legen kräftig zu und werden in den kommenden Jahren einen merklichen Marktanteil haben. Bemerkenswert ist weiter, daß durch ASE, Shell/Pilkington und ANTEC auch in Deutschland die PV-Modulproduktion stark ausgebaut wird.

Ausbau der PV-Produktion

	Firma	Wafer-Technologie	Thin-Film Technologie
USA	Siemens	6 MW	
	Solarex	14 MW	10 MW
	USSC		5 MW
	BP		15 MW
JAPAN	Sharp	14 MW	20 MW
	Kyocera	18 MW	
	Matsushita	5 MW	
	Canon		10 MW
EUROPA	BP	10 MW	
	Photowatt	20 MW	
	Shell/Solar	20 MW	
	ASE	13 MW	
	Shell/Pilkington	25 MW	
	ANTEC		10 MW
	Σ	145 MW	70 MW
	zusammen		215 MW

Quelle: PV News Feb. 98
PV Insider Report Jan. 98

Abbildung 2

Mit der Zunahme der PV-Produktion und des PV-Marktes geht entsprechend einer Lernkurve auch eine Preissenkung für PV-Module einher. Dies ist für die letzten 2 Jahrzehnte in Abb. 3 dargestellt. Wenn Ende der siebziger Jahre noch über 20 $ für ein Wp (Watt-peak elektrischer Modulleistung) gezahlt werden mußte, waren es 1995 ca. 10 $, und heute sind es bereits nur 3.50 – 4.00 $ pro Wp. Trotzdem ist dieses Preisniveau für eine breitere Markteinführung noch zu hoch. Technologieverbesserung, Massenproduktion und insbesondere der Übergang zu Dünnschichttechnologien sollen die Kosten unter 1 $ / Wp sinken lassen.

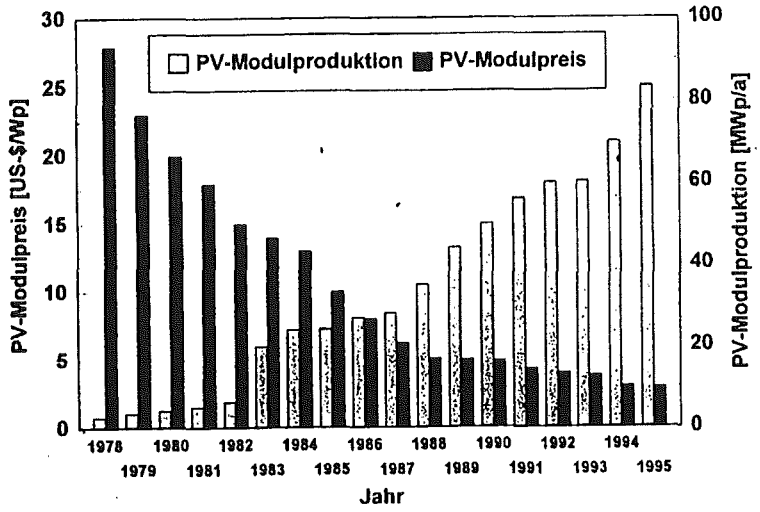


Abbildung 3

Die Aufteilung der PV-Modulproduktion nach Anwendungen ist in Abb. 4 aufgezeigt. Die Bereiche „Industrielle Anwendungen" sowie „Kleinverbraucher" sind wirtschaftlich selbsttragende Nischenmäkte, wohingegen die Bereiche „Netzgekoppelte Anwendungen" und „Netzferne ländliche Anwendungen" mehr oder weniger durch nationale Förderprogramme oder andere Fördermaßnahmen (z.B. in Deutschland Greenpricing, kostendeckende Vergütung von Solarstrom) finanziell unterstützt bzw. subventioniert werden.

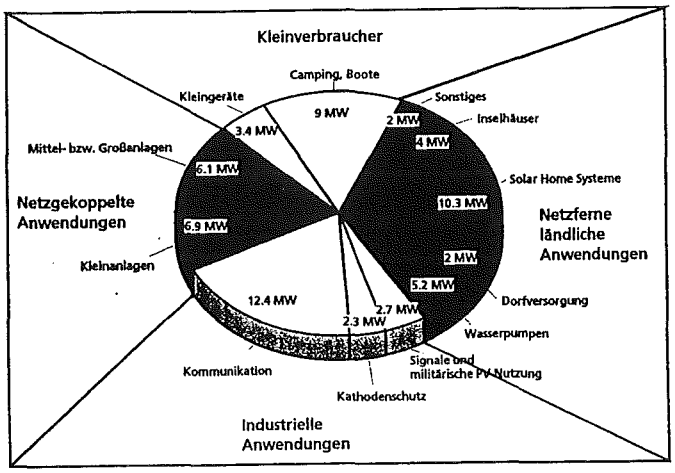


Abbildung 4 Aufteilung der PV-Modulproduktion nach Anwendungen

Für die breitere Markteinführung insbesondere in Industrieländern sind nationale Förderprogramme wichtig. Hierdurch wird der PV-Industrie eine gewisse Planungssicherheit für den Ausbau der PV-Produktion gegeben und damit die Grundlage für die weitere Kostensenkung durch Massenproduktion und neue kostengünstigere Produktionsvorhaben gelegt. Abb. 5 zeigt staatliche Förderprogramme, die - wenn durchgeführt – zu Modulproduktionen bereits im GW-Bereich führen werden.

Markterweiterung durch

Staatliche Programme

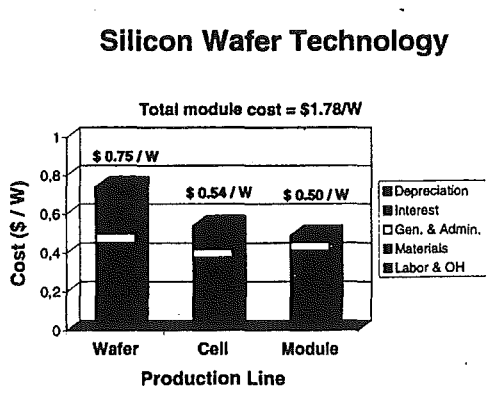
- Japan
  70.000 Dächerprogramm
  bis 2000
  ca. 245 MW

- USA
  President's Million Roof
  Projekt bis 2010
  ca. 3,5 GW

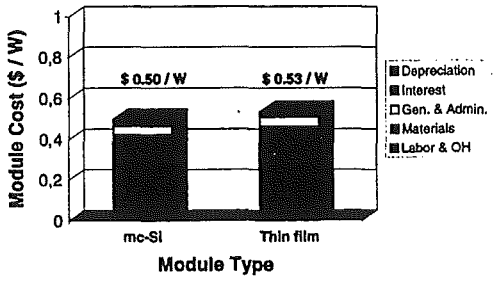
- Europa
  Energy for the Future
  500.000 Dächer
  500.000 PV-Systeme für Dritte Welt
  bis 2010
  ca. 1,6 GW

Abbildung 5

Die zu erwartende Kostenreduktion durch Massenfertigung bei der Silizium-Wafertechnologie zeigt Abb. 6. Für eine 25 MWp / Jahr Produktion für multikristalline Si-Zellen und daraus gefertigter Module ergeben sich Produktionskosten von 1,78 $ / Wp, die sich aufschlüsseln lassen in die Kostenanteile für multikristalline Wafer, Zellenherstellung und Modulfertigung. Ein wesentlicher Kostenfaktor kommt hierbei den Wafern zu, die aus hochreinem Siliziummaterial (Kosten ca. 20 $ / kg) hergestellt werden. Immerhin liegen bereits die Modul-Produktionskosten etwa um den Faktor 2 unter den derzeitigen Modulpreisen. Der untere Teil der Abb. 6 zeigt im Vergleich den auf die Modulherstellung entfallenden Kostenanteil für die Wafertechnologie sowie die Dünnschichttechnologie. Beide Anteile sind in etwa gleich. Hier ist anzumerken, daß für die Dünnschichttechnologie der für die Wafertechnologie wesentliche Waferkostenanteil praktisch entfällt – ein erster Hinweis auf die insgesamt niedrigeren Produktionskosten bei den Dünnschichtsolarzellen.



Multi-crystalline silicon PV manufacturing costs at 25 MW/year



Module line cost elements for mc-Si and thin-film modules

Source: Prog. Photovolt. Res. Appl., 5, 309-315 (1997)

Abbildung 6

Produktionsschritte bei der Silizium-Wafertechnologie

Hochreines Silizium wird durch ein aufwendiges Reinigungsverfahren (Destillation von Trichlorsilan) aus metallurgischem Silizium hergestellt. Für die PV-Industrie existiert zur Zeit noch keine unabhängige Reinstsiliziumherstellung, vielmehr „lebt" die PV-Industrie von Abfallprodukten der Halbleiter- oder Chipindustrie und nutzt etwa 10 % (1000 t / a) von deren Siliziumbedarf. Aufgrund der gestiegenen Nachfrage hat sich der Pries für dieses „reject-material" in letzter Zeit mehr als verdoppelt. Für die Waferherstellung wird das Reinstsilizium aufgeschmolzen und dann entweder mit dem Czochralski-Verfahren zu einkristallinen Stäben oder durch geeignetes Gießen und gerichtetes Erstarren zu multikristallinen Blöcken verarbeitet. Aus den Stäben bzw. Blöcken werden mit Drahtsägen etwa 0,3 mm dicke Wafer geschnitten, wobei etwa die gleiche Menge an Reinstsilizium durch den Sägevorgang verloren geht. Die Siliziumwafer sind in der Regel p-leitend (Bor-dotiert). Der wesentliche Schritt vom Wafer zur Solarzelle ist die Herstellung des p-n Übergangs (Halbleiterdiode), die durch Eindiffusion von Phosphor in Röhrenofen bei ca. 900°C erfolgt. Aufbringen der Frontfinger – und Rückseitenkontakte - durch Siebdruckverfahren und Maßnahmen zur Vermeidung der Lichtreflexion durch Antireflexschichten und/oder Oberflächenstrukturierung vervollständigen die Solarzelle. Hintereinander-

schaltung der Zellen zu Strings und Einbettung z.B. zwischen Glasplatten mit Gießharz oder Laminatfolien sowie das Herausführen der elektrischen Anschlüsse sind die wesentlichen Schritte der Modulherstellung.

Perspektiven der Silizium-Wafertechnologie

Die Produktionskosten in $ /Wp geben an, wieviel Geld ein Modul pro elektrischer Ausgangsleisstung kostet. Dies bedeutet, daß bei gleicher Modulfäche die Kosten sinken, wenn sich der Wirkungsgrad der Zellen verbessert und sich dadurch die Leistung erhöht. Es ist daher ein Anliegen, durch Technologieverbesserung den Wirkungsgrad zu steigern, ohne aber die Produktionskosten zu erhöhen.

PERL / LBSF - Solarzelle

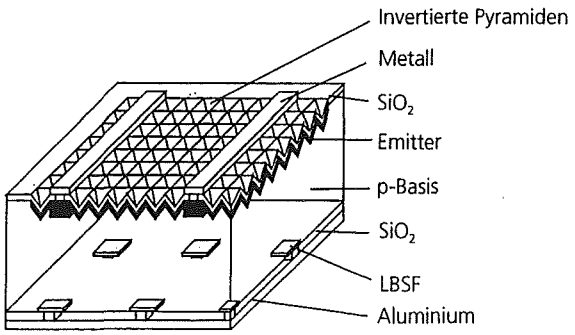


Abbildung 7

Gegenwärtig haben Module aus multikristallinem Silizium einen Wirkungsgrad von 11 – 12 % und solche aus einkristallinem Silizium bis zu 15 %. (Der Wirkungsgrad gibt an, wieviel Prozent der auf das Modul einfallenden Lichtleistung in elektrische Leistung umgewandelt wird). Aufwendige Laborzellen, die z.B. an der Universität in Sydney oder auch im Fraunhofer-Institut in Freiburg entwickelt wurden, zeigen Wirkungsgrade über 24 %. Abb. 7 zeigt den Aufbau einer solchen Hocheffizienzzelle. Aufwendige lithographische Prozesse sind hierbei notwendig, um die Oberflächenstrukturierung (invertierte Pyramiden), die sogenannte Oberflächenpassivierung (SiO_2) oder auch die Punktkontakte der Rückseite (LBSF) herzustellen. Diese Zelle ähnelt bereits einem elektronischen Bauteil der Chipindustrie. Für großflächige Module würde diese Art Zellen trotz ihres hohen Wirkungsgrades aus Kostengründen nicht in Frage kommen.

Die Weiterentwicklung der Silizium-Wafertechnologie für die industrielle Umsetzung verfolgte mehrere Wege, um kostengünstigere Produktionsprozesse zu erreichen. Einmal versucht man z.B. im FhG-Freiburg möglichst hohe Wirkungsgrade zu erreichen, jedoch die Produktionsprozesse der Hocheffizienz-Zellen (im Sinne von Abb. 7) wesentlich zu vereinfachen und die Prozessschritte zu reduzieren. Abb. 8 zeigt eine vereinfachte Zelle mit einem sehr hohen Wirkungsgrad von 22 %.

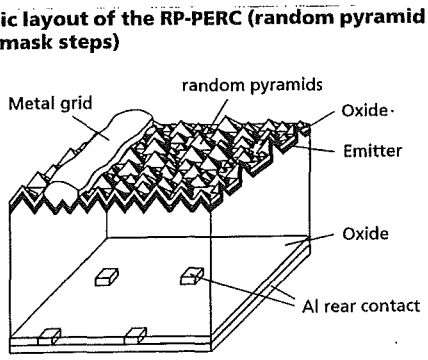
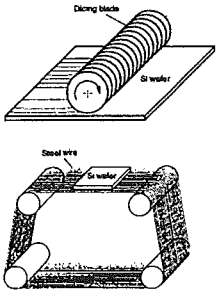


Abbildung 8

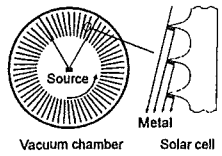
Die Einsparung von hochreinem Siliziumgrundmaterial und die Vermeidung des Wafersägeprozesses erreicht die Firma ASE (Angewandte Solartechnik in Alzenau) durch den in ihrer amerikanischen Firma entwickelten EFG-Prozeß (Edge-Defined Film-Fed Growth), mit dem oktagonale Siliziumröhren aus der Siliziumschmelze gezogen werden, aus denen dann direkt die multikristallinen Wafer mittels Laser ausgeschnitten werden. Hierbei spart man nicht nur den aufwendigen Drahtsägeprozeß sondern vermeidet auch den damit einhergehenden Materialverlust an hochreinem Sililzium (Abb. 9). Mit dieser Technologie produziert ASE demnächst in Alzenau PV-Module mit einer jährlichen Leistung von 13 MW.

Abbildung 9

Die Effizienzsteigerung der Waferzellen durch die in den Abbildungen 7 und 8 dargestellten Oberflächenstrukturen zur optimalen Lichteinkopplung gelingt nur bei monokristallinen Siliziumwafern durch geeignete Ätzprozesse. Um entsprechende Strukturierungen auch gewinnbringend auf multikristallinen Siliziumwafern nutzen zu können, werden an der Uni Konstanz sowie dem ISFH in Hameln mechanische Schleif- und Läppverfahren entwickelt (Abb. 10), wodurch optimierte Rillenstrukturen erzeugt werden können. Gleichzeitig gestatten diese Strukturen auch eine einfache Realisierung der Frontkontakte.



Mechanische Oberflächenstrukurierung durch Profilschleifen bzw. Drahtläppen



Metallisierung durch Schrägbedampfung im Vakuum

Abbildung 10

Ein letztes Beispiel für ein kostensparendes Produktionsverfahren ist die sogen. HIT Zelle der Firma Sanyo, welche bereits in einigen MW produziert wird. Ausgehend von monokristallinen Wafern wird hierbei der p-n Übergang durch Aufbringen von dotierten amorphen Siliziumschichten realisiert, die bei Temperaturen um 200°C aus der Gasphase abgeschieden werden. Man spart hierbei u.a. Kosten durch Vermeidung des Hochtemperaturprozesses der Phosphordiffusion. Abb. 11 zeigt diesen Zellentyp, mit dem Modulwirkungsgrade von über 15 % erreicht werden.

Diese Beispiele (von vielen) mögen genügen, um aufzuzeigen, welche Art Technologieverbesserungen und kostensparende Prozeßschritte möglich sind oder bereits eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang muß auch auf den Einsatz konzentrierender Systeme hingewiesen werden. Hierbei wird das Sonnenlicht durch kostengünstige Spiegel oder Linsen (z.B. Fresnelllinsen aus Plastik) um den Faktor 100 – 200 gebündelt, so daß in diesem Fall nur ein kleiner Bruchteil der bestrahlten Fläche von der Solarzelle benötigt wird. Allerdings können diese Systeme nur für die direkte Sonneneinstrahlung verwendet werden. Die ariden Wüstengebiet (mit wolkenlosem Himmel!) sind für diese Technik prädestiniert.

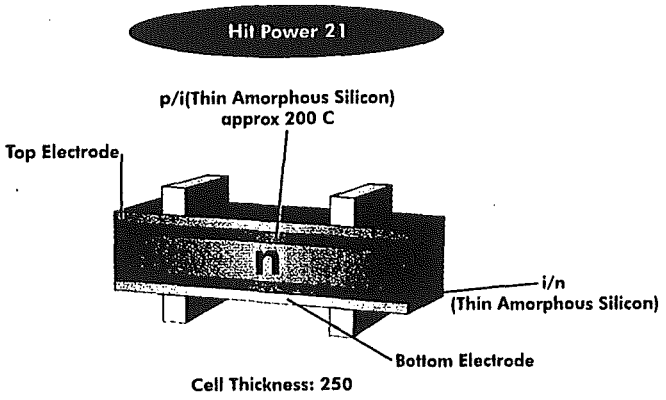
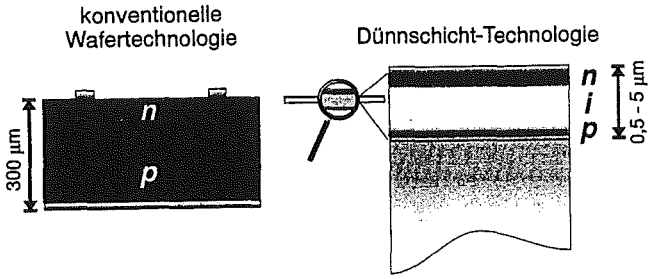


Abbildung 11

Dünnschichtsolarzellen

Dünnschichtsolarzellen tragen ihren Namen zurecht, denn sie benötigen nur wenige Mikrometer für die eigentliche Zellenstruktur (im Vergleich zu den 300µm der Si-Wafer). Im wesentlichen vier Dünnschichttechnologien werden entwickelt, sind im Pilot-Erprobungsstadium oder werden bereits industriell eingesetzt. Sie unterscheiden sich in der Hauptsache durch das PV-aktive Halbleitermaterial (Si, CdTe, $CuInSe_2$, Farbstoff auf TiO_2) sowie die zur Schichtherstellung benutzten Depositionsverfahren. Abb. 12 stellt die Silizium-Wafertechnologie den Dünnschichttechnologien gegenüber.



monokristallines Silizium polykristallines Silizium monokristallines GaAs	Dünnschicht-Silizium (amorph, dünn-kristallin) CIS ($CuInSe_2$) CdTe Farbstoffzellen
- ausgereifte Technologie - hoher Wirkungsgrad - Hochtemperaturprozesse - hoher Materialbedarf - begrenztes Potential zur Kostensenkung	- neuere Technologien - Potential für hohe Wirkungsgrade - Niedertemperaturprozesse - geringer Material- u. Energiebedarf - preisgünstige, großflächige Substrate - hohes Potential zur Kostensenkung

Abbildung 12

Dünnschichtzellen werden auf kostengünstigen Substraten (Glas, Metall- oder Kunststofffolien) bei relativ niedrigen Temperaturen großflächig (~ 1 m^2) mit unterschiedlichen Aufdampfverfahren hergestellt. Wegen der geringen Dicke der Halbleiterschichten fallen die Materialkosten hierfür kaum ins Gewicht. Auch ist der Energieeinsatz kleiner als bei den Waferzellen, so daß für die Dünnschichtzellen die Energierückzahlzeit in etwa halbiert wird. Mit den Beschichtungstechniken für Dünnschichtsolarzellen läßt sich auch vorteilhaft das Konzept der Stapelzellen zur besseren Ausnutzung des solaren Spektrums realisieren. Bei diesem Konzept werden zwei bis drei Solarzellen seriell übereinander aufgebracht. Die einzelnen Zellen unterscheiden sich dabei durch die Bandlücke des Halbleitermaterials. Die der Strahlung zugewandte Zelle besitzt die größte, die darunter liegenden jeweils kleinere Bandlücken. Damit wird der blaue Teil des Spektrums in der oberen, der grüne Teil in der mittleren und schließlich der rote Teil in der untersten absorbiert. Durch diese Maßnahme wird die Energie der absorbierten Photonen zu einem größeren Teil in elektrische Energie umgesetzt, als es mit nur einem Halbleitermaterial (z.B. kristallines Silizium) möglich ist.

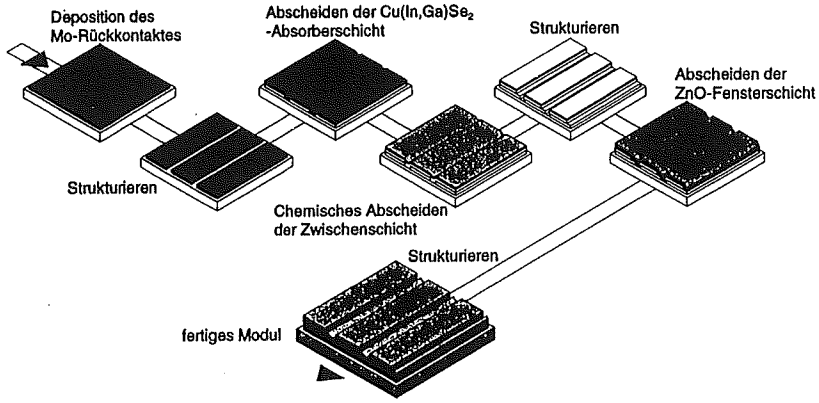
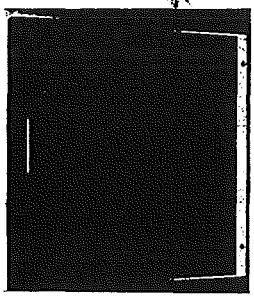


Abbildung 13

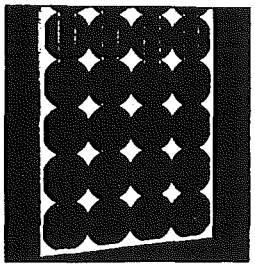
Ein weiterer Vorteil bei Dünnschichtsolarzellen ist die bei der Zellenherstellung mögliche serielle Verschaltung einzelner Solarzellenstreifen. Abb. 13 zeigt diese Verschaltungstechnik anhand der CIS-Technologie ($CuInSe_2$). Bei dieser Technik werden alle Beschichtungsschritte großflächig (so groß wie das gesamte Modul) ausgeführt. Nach den Depositionen der Rückkontaktschichte (Mo), der Solarzellenschicht (CIS, Zwischenschicht) sowie der leitenden Frontkontaktschicht (ZnO) werden jeweils die Schichten durch „Laserschneiden" oder mechanisches Ritzen in Streifen getrennt und zwar etwas versetzt zueinander. Dadurch wird erreicht, daß nun die Solarzellenstreifen seriell verbunden sind, d.h. der Frontkontakt der vorangehenden Zelle ist mit dem Rückseitenkontakt der nachfolgenden Zellen galvanisch verbunden. Die Verbindungstechnik erlaubt (wie die gesamte Beschichtungstechnik) eine hohe Automatisierung. Die integrierte Serienverschaltung der Solarzellenstreifen in einem großflächigen Modul führt auch zu einem unterschiedlichen Erscheinungsbild dieser Module verglichen mit einem solchen der Wafertechnologie (Abb. 14).

Vereinfachte Modulfertigung bei Dünnschichtsolarzellen



Integrierte Serienverschaltung bei Dünnschichtsolarzellen

zum Vergleich:



Wafertechnologie: Verschaltung einzelner Solarzellen

Abbildung 14

Perspektiven der Kostenentwicklung für PV-Technologien

Bereits in einem vorangehenden Abschnitt wurde auf die Kostenentwicklung bei der Siliziumwafertechnologie für mittlere Produktionsvolumina eingegangen. In einer jüngsten Studie der EU, an der maßgebliche PV-Firmen und Forschungsinstitute beteiligt waren, wurde das langfristig erreichbare Kostenniveau für die Wafertechnologie und die Dünnschichttechnologien unter Einbeziehung aller Prozeßschritte und relevanten Rohmaterialien ermittelt. Die Studie trägt den Namen „Multi-Megawatt Upscaling of Silicon and Thin Film Solar Cell and Module Manufactoring – MUSIC-FM". Für einen Produktionsumfang von 500 MWp/a und multikristalliner Wafertechnologie ergeben sich Produktionskosten von 0,91 ECU/Wp (1.70 DM/Wp). Für das oben erwähnte Band-Silizium von ASE sind diese Kosten noch niedriger. Diese Kosten sind etwa um den Faktor 2 kleiner als die oben angegebenen für ein kurzfristig erreichbares Produktionsvolumen von 50 MWp/a. Für die Dünnschichttechnologien gibt die Studie Modulproduktionskosten von 0,70 ECU/Wp (1.31 DM/Wp) an, allerdings für ein wesentlich geringeres Produktionsvolumen von „nur" 60 MWp/a.

Zum Abschluß sei noch kurz auf die erzielbaren Stromgestehungskosten (mit Netzintegration) eingegangen. Hier spielen nicht nur die eingesetzten Modulkosten eine Rolle, sondern auch feste Systemkosten wie z.B. Wechselrichter und flächenabhängige Systemkosten wie Montagestrukturen, Verkabelung etc. Aus den resultierenden Gesamtkosten sowie den Ansätzen für Betriebsdauer und Finanzierungskosten ergeben sich dann nach Maßgabe der Sonnen-Einstrahlung (Standort) Strompreise pro KWh. Mit Modulkosten von 1.70 DM/Wp (multikristalline Wafer) werden in unseren Breiten ca. 0,35 DM/KWh und etwa 0,20 DM/KWh in Südeuropa errechnet. Diese Strompreise können durch den Einsatz von Dünnschichtsolarzellen auch noch unterboten werden.

Fusionsforschung

Jochem Eidens, Gerd H. Wolf

Projekt Kernfusion (KFS)

Forschungszentrum Jülich

1 Grundlagen der Kernfusion

1.1 Einleitung

Erst in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts hat man verstanden, aus welcher Quelle die Sonne ihre Energie schöpft, mit der sie seit Milliarden Jahren in den Weltraum strahlt: Ihre Energiequelle ist eine Kernreaktion, nämlich die Verschmelzung (Fusion) sehr leichter Atomkerne zu schwereren. Der notwendige Zusammenhalt dieser sehr leichten und heißen Teilchen wird auf der Sonne mit Hilfe ihrer – im Vergleich zur Erde – ungeheuer großen Gravitationskraft bewirkt. Arbeiten zur kontrollierten Kernfusion gelten dem Ziel, die Vorgänge in der Sonne auf entsprechend abgewandelte Weise hier bei uns nachzuvollziehen, um eine technisch nutzbare Energiequelle zu erschließen. Übrigens: Da die von der Sonne kommende Strahlung die Energie für die Photosynthese der Pflanzen liefert, ist die Kernfusion letztlich auch Grundlage für die Entstehung der organischen und der fossilen Brennstoffe (wie z.B. Holz und Erdöl).

Ähnlich wie der Energieumsatz chemischer Reaktionen durch die Bindungsenergie der Elektronen der Atomhülle bestimmt ist, hängt er bei Kernreaktionen von der Bindungsenergie der Atomkernbausteine (Nukleonen) ab, wobei freilich dort wegen der viel größeren Bindungsenergie die pro Kernreaktion umgesetzte Energie rund 1 Million mal höher ist. Die Bindungsenergie pro Kernbaustein nimmt zunächst mit steigender Kernmasse A zu – bis etwa A = 56 (Eisen) – und fällt dann allmählich wieder ab. Daher läßt sich Energie sowohl dann gewinnen, wenn man sehr leichte Kerne miteinander verschmilzt als auch wenn man sehr schwere Kerne spaltet (Abb. 1). Diese Energie wird hauptsächlich als kinetische Energie der Reaktionsprodukte freigesetzt. Wegen der Impulserhaltung müssen mindestens zwei Reaktionsprodukte entstehen.

Von den zahlreichen Kernverschmelzungsreaktionen sind in den oberen drei Zeilen der Tabelle 1 die für eine mögliche technische Nutzung der Fusionsenergie wichtigsten Prozesse zusammengestellt, nämlich die Verschmelzungsprozesse der schweren Isotope des Wasserstoffs, Deuterium (D) und Tritium (T). (Beim Deuterium, dem "schweren Wasserstoff", enthält der Kern neben dem Proton noch ein Neutron, beim Tritium, dem "überschweren Wasserstoff" noch zwei Neutronen). Belastbare Nutzungskonzepte existieren derzeit allerdings – wegen der größeren Reaktionswahrscheinlichkeit – nur für die Verschmelzung von Deuterium mit Tritium, während beim Deuterium-Deuterium-Prozeß bezüglich der zu erreichenden Betriebsbedingungen um bis zu zwei Größenordnungen höhere Anforderungen bestehen, deren technische Erfüllbarkeit zur Zeit nicht erkennbar ist.

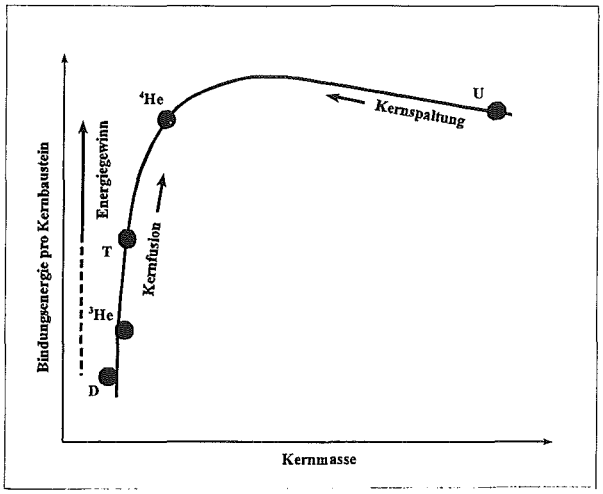


Abb. 1: Energiefreisetzung durch Kernreaktionen; Bindungsenergie pro Kernbaustein in Abhängigkeit von der Kernmasse.

Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium kommt wegen seiner kurzen Halbwertszeit von nur 12,3 Jahren in der Natur nicht in technisch verwertbaren Mengen vor, es kann jedoch mittels der in den Zeilen 3a) und 3b) der Tabelle 1 angegebenen Reaktionsprozesse aus Lithium erbrütet werden. Die dazu benötigten Neutronen liefert die D-T-Reaktion selbst, so daß in einem zukünftigen Fusionsreaktor der Brennstoff Tritium in einem geschlossenen Brennstoffkreislauf benutzt werden wird. Tabelle 1 zeigt in der letzten Zeile zum Vergleich die erheblich geringere Reaktionsenergie bei einer chemischen Verbrennung (Feuer).

1a)	D	+ D	→	^{3}He	+ n	+	3,25	MeV
1b)	D	+ D	→	T	+ p	+	4,0	MeV
2)	T	+ D	→	^{4}He	+ n	+	17,6	MeV
3a)	^{6}Li	+ n	→	^{4}He	+ T	+	4,8	MeV
3b)	^{7}Li	+ n	→	^{4}He	+ T + n	−	2,5	MeV
4)	C	+ O_2	→	CO_2		+	4,2	eV

Tab. 1: Wichtige Reaktionen für die Fusion.

Das Deuterium kommt mit einem Isotopenanteil von 0,015 % in der Natur vor. Das Meereswasser, aus dem es durch Elektrolyse gewonnen werden kann, bildet daher, wenn wir die – im Vergleich zu einer chemischen Reaktion millionenfach höhere – Energiefreisetzung bei Fusionsreaktionen berücksichtigen, wahrscheinlich den größten Energievorrat, der der Menschheit hier zur Verfügung steht. Der erforderliche Brutstoff Lithium ist ebenfalls in großen Mengen vorhanden. Genaue Angaben über die tatsächlichen Lithium-Reserven sind derzeit nicht möglich, da dieses leichte Metall bislang nur geringfügig Verwendung findet und deshalb so gut wie gar nicht prospektiert worden ist; es gibt jedoch aus mehreren unabhängigen Quellen Schätzwerte für die Lithium-Vorräte zu Land, die bei rund 100 Millionen Tonnen liegen, und das Wasser der Weltmeere enthält zusätzlich etwa die tausendfache Menge. Der stündliche Verbrauch an Primärrohstoffen der Kernfusion, Deuterium und

Lithium, berechnet sich für ein Kraftwerk mit 2000 MW elektrischer Leistung zu ca. 25 g Deuterium und ca. 700 g Lithium, wobei die genaue Lithium-Menge noch von der gewählten Isotopenzusammensetzung und vom gewählten Brutkonzept abhängt.

Die Kernfusion gehört zu den wenigen Optionen für eine allen Kontinenten und Ländern gleicherweise zugute kommende langfristige und ausreichende Energieversorgung. Diese Tatsache begründet die großen Anstrengungen, die weltweit von allen Industrienationen - von einigen nunmehr seit etwa 40 Jahren - gemacht werden, um schrittweise die physikalischen Voraussetzungen zu erforschen und zu erfüllen, sowie die dazugehörigen technischen Lösungen zu finden, die in ihrem Zusammenwirken letzlich eine praktische Nutzung dieser Energiequelle ermöglichen sollen.. Derzeit beläuft sich der finanzielle Aufwand für Fusionsforschung weltweit auf schätzungsweise 2-3 Mrd. DM jährlich, davon ca. 0,8 Mrd. DM in der Europäischen Union. Daß trotz dieses Aufwandes an Zeit und Mitteln und trotz der schon gemachten Fortschritte das Ziel eines kommerziell nutzbaren Fusionskraftwerks erst gegen Mitte des nächsten Jahrhunderts erreichbar scheint, liegt – neben einer Vielzahl schwieriger und neuartiger Aufgaben – vor allem an der Abfolge großtechnischer Entwicklungsschritte zur Vorbereitung und Erprobung der wesentlichen Komponenten einer solchen Anlage.

1.2 Bedingungen für die Freisetzung der Fusionsenergie

Ein wesentliches Problem auf dem Weg zur Kernfusion besteht in der Tatsache, daß die zu Fusionsreaktionen führenden sehr starken Bindungskräfte zwischen den Atomkernen nur über äußerst kurze Entfernungen (ca. 10^{-13} cm) wirksam werden, während bei "größeren" Abständen der Kerne die abstoßende Wirkung der elektrischen Ladungen überwiegt. Um diese elektrische Abstoßung zu überwinden, müssen die zu fusionierenden Kerne mit großer Geschwindigkeit aufeinandertreffen. Solche Geschwindigkeiten kann man zwar leicht in Teilchenbeschleunigern erzeugen, aber deren Strahlen sind aus verschiedenen Gründen nicht geeignet, daraus eine energieliefernde Apparatur zu bauen. Statt dessen bemüht man sich, das Reaktionsgemisch auf so extreme Temperaturen aufzuheizen, daß sich die erforderlichen Geschwindigkeiten der Teilchen aus deren Temperaturverteilung ergeben; dazu werden etwa 100 Mio. K benötigt. Schon bei Bruchteilen dieser Temperatur zerfallen die Atome in ihre Bestandteile, nämlich den Kern und die Elektronen. Diesen Zustand der Materie nennt man ein Plasma. Kerne und Elektronen fliegen dabei regellos durcheinander, wobei es immer wieder auch zu solchen Stößen kommt, die zur Fusion führen, siehe Abb. 2. Die Elektronen werden zwar zur Fusion selbst nicht benötigt, aber sie sorgen dafür, daß das Brennstoff-Plasma nach außen elektrisch neutral ist. In Erfüllung dieser Aufgabe tragen sie allerdings zum gasdynamischen Druck des Plasmas bei; außerdem sind sie an jenen Prozessen beteiligt, die Energie bzw. Wärme vom Plasmainneren nach außen tragen und so zur Abkühlung des Plasmas führen.

Folgende Bedingungen müssen in einem heißen Fusionsplasma erfüllt werden, damit daraus ein selbsterhaltendes, energielieferndes System entstehen kann:

1. Stationärer oder quasi-stationärer Einschluß des Plasmas,
2. Aufheizung bis zur Zündung (100 Mio. K),
3. Wärmedämmung gegen zu rasche Abkühlung.

Diese Bedingungen sind analog zu denen in einem chemischen – d.h. molekularen – Feuer, nur die Größen der Parameter unterscheiden sich beträchtlich.

Bei den Sternen erfolgt die Aufheizung bis zur Zündung durch Kompression der anfänglichen Gaswolken infolge der eigenen Schwerkraft. Letztere hält sich im gezündeten Zustand mit dem Gasdruck des heißen Plasmas die Waage und sorgt so für den nötigen Zusammenhalt (Einschluß) der Teilchen.

Die Schwierigkeit, kontrollierte Kernfusion bei irdischen Bedingungen zu erreichen, besteht nun darin, daß dieser Zusammenhalt nicht durch die Schwerkraft erfolgen kann. (Sie ist nicht auf das Zentrum eines Reaktionsgefäßes gerichtet und außerdem viel zu klein). Deswegen benötigt man andere Einschlußprinzipien. Dafür gibt es zwei mögliche Alternativen: die Massenträgheit und die auf elektrisch geladene Teilchen im Magnetfeld wirkende Kraft.

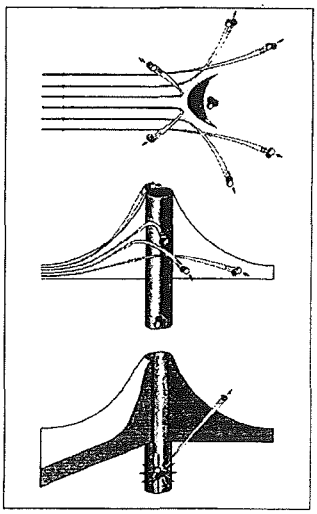


Abb. 2: Prinzip der Kernfusion. Damit ein Stoß zweier leichter Atomkerne zur Fusion führt, muß das Projektil genügend kinetische Energie haben, um den Potentialberg zu überwinden, und es muß in das Loch auf dem Gipfel treffen. Ein Energiegewinn kommt dadurch zustande, daß der Boden des Schachtes viel tiefer liegt als das Grundniveau außen.

Beim "Trägheitseinschluß" soll der zunächst in Form Stecknadelkopf-großer Kügelchen vorliegende Brennstoff durch eine Implosionswelle für einen winzigen Moment zusammengepreßt und im Inneren gezündet werden. Damit dann während der „thermonuklearen" Mikro-Explosion genügend Energie freigesetzt wird, d. h. eine insgesamt positive Energiebilanz erzielt werden kann, muß das "Fusionsprodukt" (Temperatur T mal Dichte n mal Energieeinschließungszeit τ_E; oder anschaulicher: Druck p mal Energie-Einschließungszeit τ_E) einen bestimmten Wert erreichen. τ_E ist die Zeit, in der bei abgeschalteter Reaktionsleistung der Energiegehalt im Reaktionsvolumen um den Faktor $e = 2{,}72$ abnimmt; bei stationärer Betriebsweise einfach: Energieinhalt/Leistung. Man versucht hier also die Idee einer Mikrobombe zu realisieren. Trägheitsfusion wird im Europäischen Programm nicht systematisch entwickelt, sie wird deshalb hier auch nicht weiter behandelt.

Einen anderen, dem stationären Brennen auch „molekularer Flammen" viel näherkommenden Ansatz verfolgt das Prinzip des magnetischen Einschlusses: Magnetische Käfige schließen den (aus elektrisch geladenen Teilchen bestehenden) Brennstoff ein. Dies erfordert nur sehr geringe Dichten, die fast um den Faktor 10^6 unter den Normalbedingungen liegen, jedoch bei Temperaturen von 100 bis 200 Mio. K; das Produkt aus beidem entspricht Drücken von nur wenigen bar. Der Brennstoff befindet sich dabei im sogenannten vierten Aggregatzustand der Materie, dem Plasma. Um Zündung zu erreichen, sind Energieeinschlußzeiten von einigen Sekunden erforderlich. Unter der Zündung

(oder genauer: dem Brennen) eines thermonuklearen Fusionsplasmas versteht man dann jenen möglichst stationären Betriebszustand, bei dem aus der Energie der geladenen Reaktionsprodukte (aus der Fusionsreaktion) dem Plasma unmittelbar gerade so viel Leistung zugeführt wird, wie dieses wieder nach außen abgibt. Eine hierzu ausreichend hohe Reaktionsrate erfordert aber eine – die Geschwindigkeitsverteilung der Stoßpartner bestimmende – Mindesttemperatur, die im Falle der Deuterium-Tritium-Fusion, selbst wenn Leistungsverluste durch elektromagnetische Strahlung („Strahlungsverluste") auf das unvermeidliche Maß reduziert würden, deutlich über 50 Mio. K liegen muß (entsprechend einer kinetischen Energie der Kerne von deutlich über 5 keV). Da aber selbst bei dieser Temperatur die Zahl der nicht zu einer Verschmelzung führenden elektrostatischen Coulomb-Stöße immer noch bei weitem überwiegt, muß man den Kernen ausreichend häufig die Möglichkeit geben, auf einen Partner zu treffen, d.h. sie müssen hinreichend dicht und lange genug eingeschlossen sein: Für die Fusion von Deuterium mit Tritium muß deshalb das Produkt aus Plasmadruck p und Energieeinschlußzeit τ_E einen Wert erreichen, der im Arbeitsbereich von 100 bis 200 Mio. K mit rund 10 bar • s ein flaches Minimum durchläuft. Die entsprechende Kurve "Brennen" für die D-T-Fusion ist in Abb. 3 eingetragen.

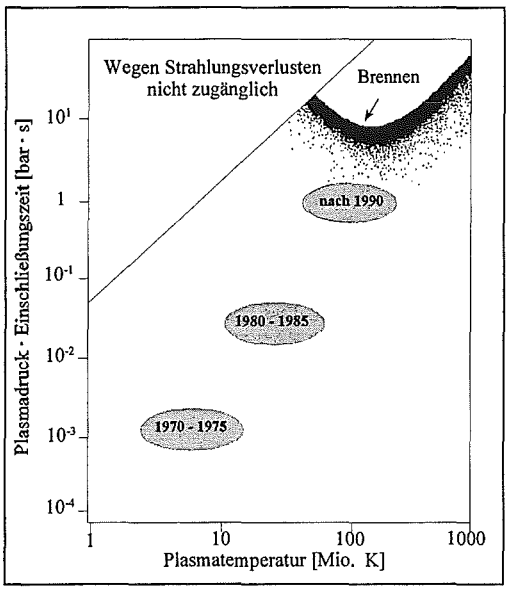


Abb. 3: Experimentelle Fortschritte in der Annäherung an ein brennendes Deuterium-Tritium-Fusionsplasma. Die heutigen Rekordwerte von JET (Joint European Torus) liegen nur noch weniger als einen Faktor 10 unterhalb der Kurve "Brennen".

1.3 Plasmaeinschluß im Tokamak

Das Prinzip der magnetischen Einschließung von Plasmen wird am Beispiel der erfolgreichsten Magnetfeldkonfiguration, des Tokamaks, erläutert. Auf ein sich im Magnetfeld bewegendes elektrisch geladenes Teilchen wirkt eine Kraft, die senkrecht zur Richtung seiner Geschwindigkeit und senkrecht zur Richtung der Magnetfeldlinien gerichtet ist. Die Teilchenbahn wird dadurch zu einer Schraubenlinie, deren Achse – jedoch nur näherungsweise – dem Magnetfeld folgt, weil darüber hinaus noch andere Kräfte eine Rolle spielen, wie z. B. die Fliehkraft oder die von elektrischen Feldern stammende Kraft. Daraus entstand der Gedanke, Magnetfeldanordnungen zur Einschließung

des Plasmas zu nutzen, deren innere Feldlinien die Gefäßwände nicht schneiden bzw. durchdringen. Die einfachste Konfiguration eines solches Feldes erreicht man, wenn man Magnetspulen fächerartig so anordnet, daß sich das von ihnen erzeugte Magnetfeldvolumen zu einem Torus biegt (Abb. 4).

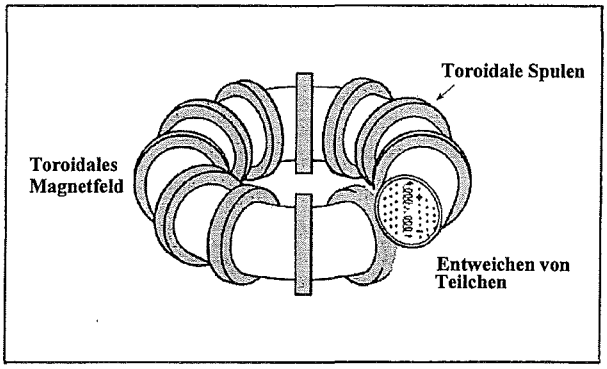


Abb. 4: Einfachste Form eines toroidalen Magnetfeldes. Teilchen werden nicht stabil eingeschlossen, da die magnetische Feldstärke ortsabhängig ist. Dies führt zu Driftbewegungen der Teilchen.

Die gewünschte Einschließung stellt sich allerdings in dieser Anordnung noch nicht ein, da die stromführenden Leiter der Spulen außen weiter voneinander entfernt sind als innen und somit auch das Magnetfeld nach außen abnimmt. Deswegen und wegen der beim Umlauf um den Torus wirkenden Zentrifugalkraft überlagert sich der schraubenförmigen Bewegung der Teilchen eine Driftbewegung. Diese lenkt rechtsschraubende negative Teilchen (Elektronen) und linksschraubende positive Teilchen (lonen) in verschiedene Richtungen ab. (Abb. 4). Die dadurch erzeugte Ladungstrennung führt zu einer Beschleunigung des Plasmaschlauchs nach außen, d. h. in das Gebiet des schwächeren Magnetfelds.

Um dies zu vermeiden, verschraubt man die magnetischen Feldlinien entlang ihres Weges im ringförmigen Gefäß durch Überlagerung eines zusätzlichen Magnetfeldes, das von einem Strom im Plasma selbst – innerhalb des Torus – erzeugt wird. Jede dieser solche verschraubten magnetischen Feldlinien umhüllt dann während vieler Umläufe im Torus ihrerseits jeweils eine der ineinander geschachtelten schlauchartigen (d. h. torusförmigen) Flächen (Abb. 5) und kann dabei nach einer genügenden Anzahl von Umläufen jedem Punkt auf dieser Fläche beliebig nahekommen. Die Ladungsträger und insbesondere die Elektronen können sich längs der Magnetfeldlinien auf diesen sogenannten Flußflächen sehr schnell bewegen und damit eine Ladungstrennung verhindern bzw. zu einem Druckausgleich entlang der ganzen "magnetischen Oberfläche" führen.

Um den erforderlichen Plasmastrom seinerseits im Gleichgewicht zu halten und seine Position zu regeln, legt man zusätzlich mittels sogenannter Vertikalfeldspulen (Abb. 5) ein vertikales Magnetfeld an. Den Plasmastrom induziert man nach dem Transformator-Prinzip mit Hilfe der Primärspulen. Anders als gewöhnlich in einem Transformator fließt dort in den Primärspulen kein sinusförmiger Strom, sondern ein zeitlich in etwa sägezahnförmig ansteigender Strom, der seinerseits während dieser Betriebsphase eine den Plasmastrom treibende Ringspannung erzeugt.. Da dies nicht unbegrenzt lange geschehen kann, muß eine solche Maschine vom Grundprinzip her in repetierenden Pulsen betrieben werden. Allerdings scheint es möglich, in einem nach dem Tokamakprinzip arbeitenden Fusionsreaktor die Dauer der einzelnen „Pulse" jeweils bis auf einige Stunden zu dehnen.

Darüber hinaus gibt es Konzepte, durch zusätzliche Effekte und Verfahren den Strom noch weiter zu verlängern oder gar beliebig lange aufrechtzuerhalten.

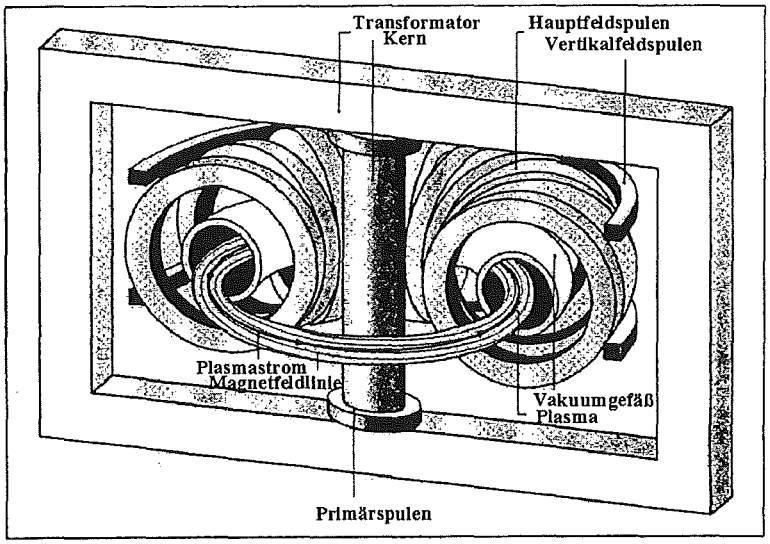


Abb. 5: Prinzipskizze einer Tokamakanordnung. Das einschließende Magnetfeld wird durch die Hauptfeldspulen, den im Plasma nach dem Transformatorprinzip induzierten Strom und die Vertikalfeldspulen erzeugt.

Um den thermonuklearen Brennvorgang einzuleiten (das Fusionsplasma zu zünden) muß das Reaktionsgemisch auf etwa 100 Mio. K aufgeheizt werden. Einen Beitrag dazu kann der im Torus fließende Plasmastrom selbst leisten. Dieser Strom ist allerdings begrenzt; denn proportional zum Strom wächst das von ihm erzeugte Magnetfeld, das die Verschraubung der Feldlinien erzeugt, und diese Verschraubung darf aus Stabilitätsgründen nicht zu stark werden. (Eine Feldlinie darf den Plasmaschlauch nicht öfter umkreisen als die Torusachse.) Mit dem Strom ist aber auch seine Heizleistung begrenzt. Da außerdem der Plasma-Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt, läßt sich mit den technisch erreichbaren Magnetfeldern auf diese Weise noch keine Zündung erreichen. Man wendet daher zusätzliche Heizverfahren an, die von außen her auf das Plasma einwirken.

Die bisher erfolgreichste Methode ist, von Strahlen hochenergetischer neutraler Wasserstoffatome in das Plasma einzuschießen. Diese können wegen ihrer Neutralität das Magnetfeld ungehindert passieren (Abbildung 6). Im Plasma werden diese Atome ionisiert, sind somit als elektrisch geladene Teilchen magnetisch eingefangen und geben ihre (Überschuß-) Energie an das Plasma durch Stöße mit den Plasmateilchen sukzessive ab. Die andere mit Erfolg praktizierte Heizmethode ist die Einkopplung von Radiowellen hoher Leistung mittels geeigneter Antennen. Dabei werden einzelne Plasmateilchen — ähnlich wie in Teilchenbeschleunigern — auf höhere Energien beschleunigt, um dann ihrerseits über Stöße mit den Plasmateilchen letztere „aufzuheizen".

Zur Messung sehr hoher Plasma-Temperaturen gibt es verschiedene Methoden, z.B. Linienverbreiterung von gestreutem Laser-Licht, Energieverteilung der emittierten Röntgenstrahlung, Energieanalyse an durch Rekombination entstandenen neutralen Atomen, die das Magnetfeld verlassen oder Ausbeute der durch Fusion entstandenen Neutronen.

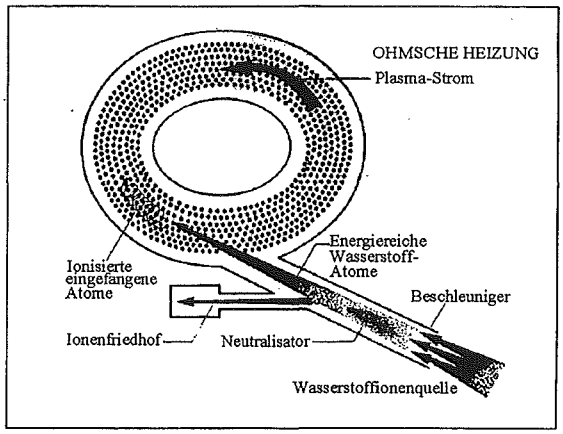


Abb. 6: Heizung eines Tokamak-Plasmas durch Einschuß hochenergetischer Wasserstoffatome.

Mit dem Tokamak-Prinzip (siehe Abb. 7 und Abb. 8) hat man die besten Erfolge auf dem Wege zu den für die Fusion erforderlichen Plasma-Temperaturen und zu ausreichend hohen Werten für das Produkt aus Druck p und Energieeinschlußzeit τ_E erzielt. Abb. 3 zeigt die Fortschritte, die mit Tokamak-Apparaturen seit etwa 1970/1975 erreicht wurden: Sie betragen etwa den Faktor 1000 im Gütemaß $p \cdot \tau_E$. Die Großmaschinen der JET-Generation (JET in Europa, TFTR in USA, JT-60-Upgrade in Japan), die im letzten Jahrzent in Betrieb genommen wurden und schrittweise auf ihre vollen Auslegungswerte ausgefahren sowie mit Zusatzaggregaten (insbesondere zur Heizung) ausgestattet worden sind, nähern sich der Brennkurve (d.h. jenem Bereich, wo die physikalische Machbarkeit der thermonuklearen Fusion demonstriert wäre) bis auf weniger als eine Zehnerpotenz hinsichtlich des Produkts $p \cdot \tau_E$. Abb. 3 macht auch deutlich, daß in diesen Anlagen die zur Zündung erforderlichen Plasmatemperaturen bereits seit einigen Jahren erreicht werden konnten.

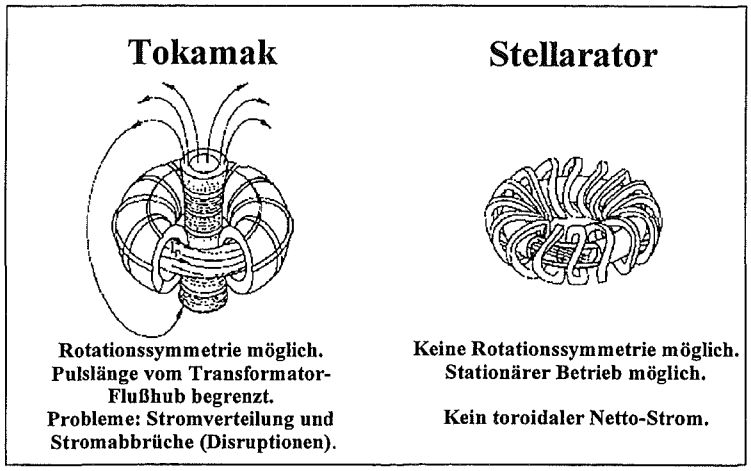


Abb. 7: Magnetfeldkonfigurationen des Tokamaks und des Stellarators.

Neben dem Tokamak-Prinzip wird in Deutschland derzeit nur noch eine weitere Variante der magnetischen Einschließung verfolgt: der Stellarator (siehe Abb. 7 und 9) im IPP Garching und demnächst

am neuen Fusionsstandort Greifswald. Dieses Einschließungskonzept zeichnet sich dadurch aus, daß seine Magnetfeldkonfiguration ohne einen im Plasma selbst benötigten Ringstrom allein durch das Magnetfeld der außenliegenden Spulen erzeugt wird und somit ohne weitere Hilfsmittel beliebig lange aufrechterhalten werden kann, während der Tokamak ohne aufwendige Zusatzaggregate vom Prinzip her zunächst nur auf gepulste Plasmaentladungen angelegt ist. Allerdings muß die Magnetfeldkonfiguration eines Stellarators dafür auf die im Tokamak mögliche Rotationssymmetrie – die mit verschiedenen Vorteilen verbunden ist – verzichten: Magnetfeld und Spulen sind echt dreidimensionale, fast exotische Gebilde, deren Herstellung – und auch deren Verständnis – eine zusätzliche Erschwernis bilden.

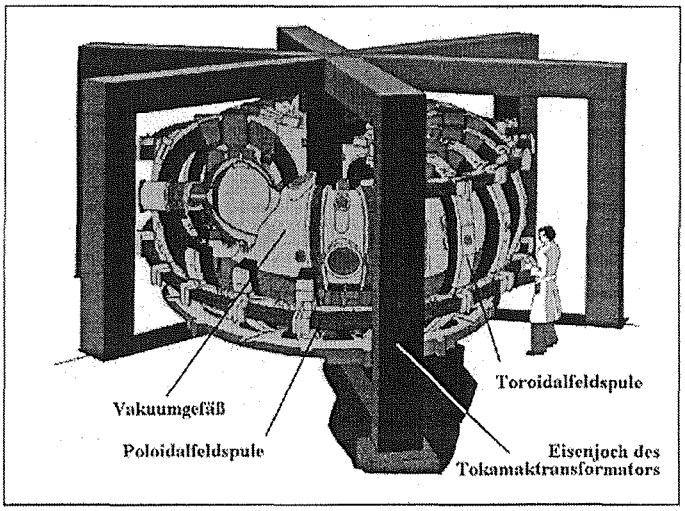


Abb. 8: Skizze des Tokamaks "TEXTOR" im Forschungszentrum Jülich

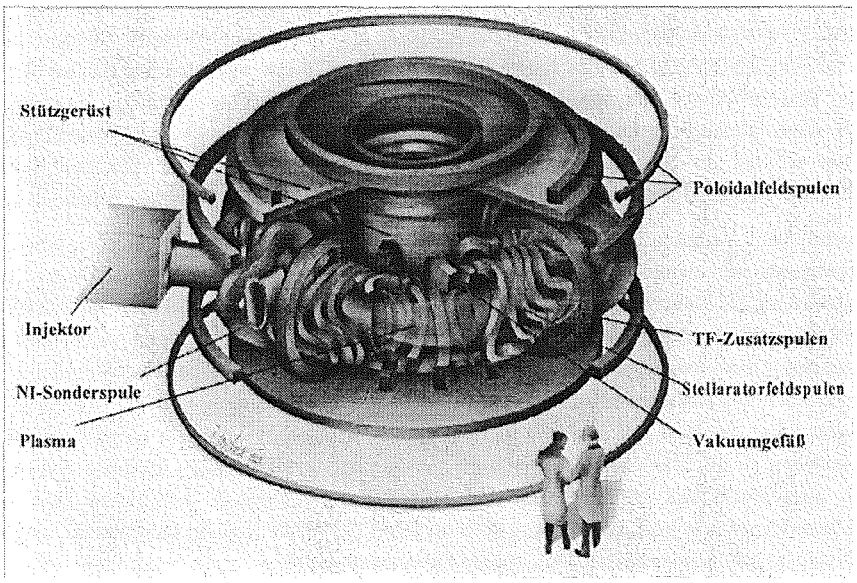


Abb. 9: Skizze des Stellarators "Wendelstein VII-AS" im IPP Garching.

1.4 Status, Probleme, nächste Schritte

Der heutige Status auf dem Weg zum Fusionsreaktor ist dadurch gekennzeichnet, daß die Erreichbarkeit eines ausreichenden Plasmaeinschlusses im Prinzip als gelöst betrachtet werden kann; empirische Skalierungsgesetze dienen zur Extrapolation bei der Auslegung eines Tokamaks, in dem Zündung erreichbar ist. Übrig bleibt der Nachweis, daß die Skalierungsgesetze bis dorthin gültig sind sowie daß die zum Brennen erforderliche "nukleare" Selbstheizung des Plasmas problemlos funktioniert. Letztere wird die durch die beim Fusionsprozeß entstehenden hochenergetischen α-Teilchen bewirkt. Aus theoretischen Vorhersagen kann zur Zeit nicht ausgeschlossen werden, daß die vielen α-Teilchen im Plasma Turbulenzen erzeugen, die sich ihrerseits schädlich auf das Einschließungsvermögen der magnetischen Käfige auswirken.

Den eindrucksvollen Fortschritt beim erreichten Wert des Fusionsproduktes $n \cdot T \cdot \tau_E$, nämlich 7 Größenordnungen in 35 Jahren, zeigt Abb. 10; dies ist eine etwas andere Darstellung des bereits in Abb. 3 enthaltenen Sachverhalts.Den Weltrekord im Plasmaeinschluß hält das europäische Gemeinschaftsprojekt JET (bei Oxford/England). Auch bei der Freisetzung von Fusionsleistung aus einem fusionsreaktortypischen Brennstoffgemisch von 50 % Deuterium und 50 % Tritium führt JET: Im Jahre 1997 wurden Spitzenwerte von 16 MW erreicht, nachdem im Jahre 1994 die amerikanische Anlage TFTR in Princeton 10 MW erzielt hatte. Weitere Anlagen, wie JT-60 in Japan, DIII-D in San Diego / USA, ASDEX-Upgrade in Garching und TORE SUPRA in Cadarache / Frankreich, tragen zur Datenbasis für die Skalierungsgesetze, zur Entwicklung von Wandkonzepten und zum Verständnis der Elementarprozesse bei. Allerdings wurden die bisherigen Bestwerte nur während einer transienten Phase von rund 1 Sekunde Dauer erzielt: Die besten Betriebsbedingungen führen nämlich meistens zu einem instationären Anwachsen der Teilchendicht oder anderer kritischer Parameter (wie Druckgradienten etc.), sie enden nach einer Übergangsphase bei einem Einschlußregime verminderten Energieinhalts. Auch kann die Überlastung von Wandelementen zu Verunreinigungsflüssen in das Plasma hinein führen, welche die Energieeinschließung ebenfalls verschlechtern.

Nächste Aufgabe ist es deshalb, gute Einschlußeigenschaften mit den Bedingungen für (quasi)-stationären Betrieb in Einklang zu bringen. Dies ist zur Zeit das Kernproblem der "Plasma-Wand-Wechselwirkung". Es beinhaltet die Aufgabe, die vom Plasma emittierte Energie so auf die Wand (und das Kühlsystem) zu übertragen, daß dabei keine Schäden auftreten und daß der Brennvorgang im Plasma nicht durch aus der Wand herausgeschlagene Verunreinigungen zum Erlöschen gebracht wird. Gleichzeitig muß das entstehende Helium – die Fusions- Asche – ausreichend rasch abgesaugt werden. In Kapitel 2 werden die Probleme der Plasma-Wand-Wechselwirkung am speziellen Beispiel des Jülicher Fusionsprogramms mit TEXTOR-94 ausführlicher behandelt.

Aufbauend auf diesem weltweit fortschreitenden Wissensstand werden von einem "interkontinentalen" Planungsteam die Konstruktionsunterlagen für den Fusions–Versuchsreaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) erarbeitet (Abb. 11). Dem ITER–Projekt als beabsichtigtem Schritt zwischen dem heutigen "Weltrekordhalter" JET und einem zukünftigen vollständigen Demonstrationsreaktor DEMO fallen wesentliche Aufgaben zu. Erstmalig in der Geschichte der Fusionsforschung soll ITER – von seinen Linearabmessungen und weiteren Auslegungsdaten her – in der Lage sein, die thermonukleare Zündung zu erreichen und ein brennendes Fusionsplasma einzuschließen. (Entgegen einer gelegentlich anzutreffenden Meinung war JET dazu niemals ausgelegt.) Dies erläutert auch Abb. 10: Die dort naheliegende Extrapolation, daß bei gleichbleibendem Fortschritt die Zündung etwa im Jahre 1995 hätte erreicht sein müssen, scheitert am Nicht-Vorhandensein einer ausreichend großen Fusionsanlage.

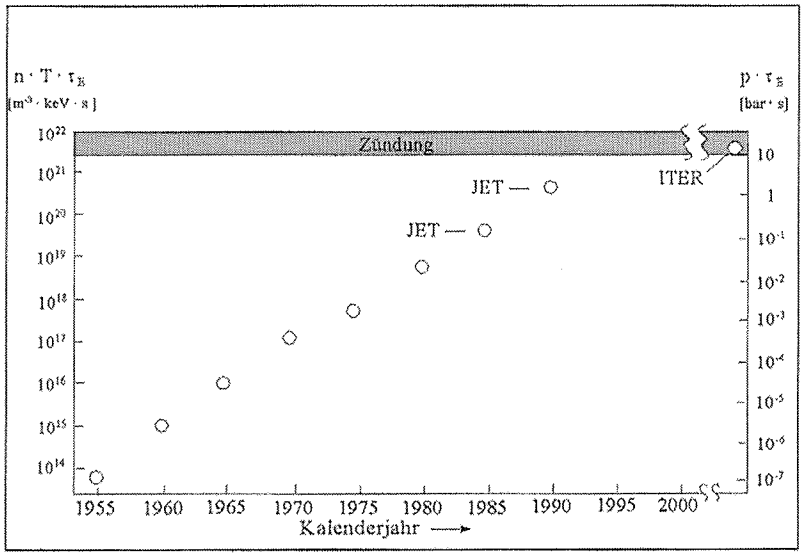


Abb. 10: Historische Entwicklung auf dem Weg zum Erreichen der Zündbedingung. Gütemaß der magnetischen Einschließung ist das Produkt aus Plasmadichte n, Plasmatemperatur T und Energieeinschlußzeit τ_E (linke Skala) bzw. aus Plasmadruck p und Energieeinschlußzeit τ_E (rechte Skala). Werte bis 1985 nach dem Lehrbuch von Wesson.

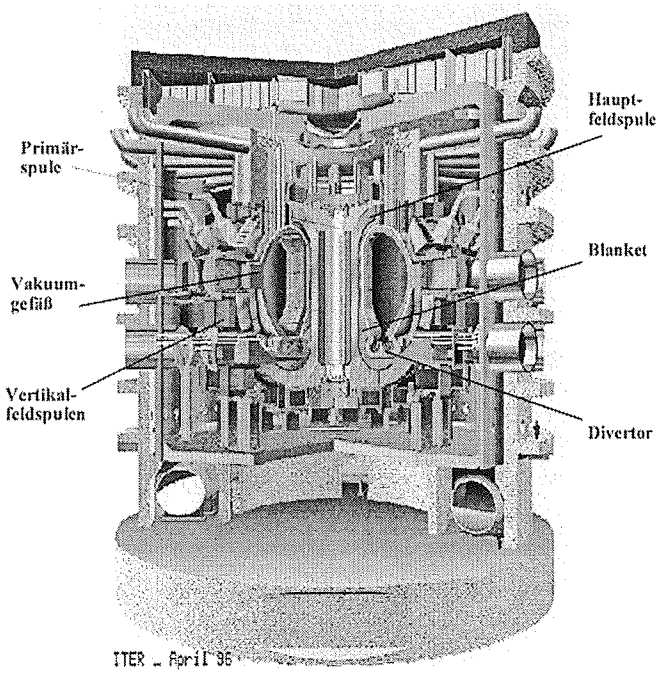


Abb. 11: Skizze des in der Planung befindlichen Tokamaks ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), der eine Fusionsleistung von rund 1,5 GW während jeweils 1000 Sekunden Brenndauer erzeugen soll.

Mit dem Ziel, eine thermonukleare Fusionsleistung von rund 1,5 GW über 1000 Sekunden zu erzeugen, wird ITER zwangsläufig in die Dimension eines zukünftigen Kraftwerk-Reaktors vorstoßen. Dementsprechend ist später auch bei DEMO und bei kommerziellen Reaktoren mit Einheitengrößen zu rechnen, die den heutigen Kohle- oder Kernkraftwerken entsprechen. "Small and beautiful" ist die Energie also auch aus Kernfusion nicht zu haben. Darum wird das personelle und finanzielle Engagement bei ITER (geschätzte Baukosten für die Basismaschine ca. 7 Mrd. US $) auch interkontinental auf vier Partner verteilt: Europäische Union, Japan, USA und Rußland. Neuere, politisch motivierte Überlegungen, einen ITER zu bauen, der nur noch zwei Drittel oder gar die Hälfte der genannten Baukosten erfordert, lassen sich nur mit schmerzvollen Einbußen bei dessen Leistungsfähigkeit und Aussagekraft, insbesondere unter Verzicht auf die Demonstration des selbsttätigen Brennens des Fusionsfeuers, realisieren.

Die weitere Zeitvorstellung geht von einer (bei JET verifizierten) Nutzungsdauer eines Großprojekts von gut 20 Jahren (gerechnet ab Baubeginn) aus. Dabei ist eine Risiko-minimierende, nicht überlappende Vorgehensweise angenommen: Der Bau eines Reaktors der jeweils nächsten Entwicklungsgeneration wird erst dann begonnen, wenn auf die maßgeblichen Ergebnisse des gerade laufenden Projekts aufgebaut werden kann. Unter diesen Prämissen kommt man zu der Aussage, daß Fusionsenergie in kommerziell brauchbarer Form erst ab Mitte des kommenden Jahrhunderts zur Verfügung stehen könnte.

1.5 Der technische Weg zum Fusionsreaktor

Die üblicherweise unter dem Begriff Fusionsreaktortechnologie zusammengefaßten Fragestellungen betreffen im wesentlichen die Probleme der Plasmaheizung, der Wärme–Auskopplung, des inneren und äußeren Tritiumkreislaufs, die Fragen der Abschirmung von Strahlung und die der Radioaktivierung sowie die Probleme der Magnettechnologie, der elektrischen Energieversorgung und der Steuerung. Bezüglich der Magnettechnologie muß hier der Hinweis genügen, daß die Entwicklung von supraleitenden Magneten mit maximalen Feldstärken größer als ca. 10 Tesla, die beim Tokamak zudem noch gepulst betrieben werden müssen, einen beträchtlichen Aufwand erfordert. Daß man hier erhebliche Fortschritte erzielen konnte, zeigen die Errichtung und der Betrieb des mit supraleitenden Spulen ausgestatteten Tokamaks TORE SUPRA im südfranzösischen Cadarache ebenso wie der erfolgreiche Verlauf des internationalen Projekts "Large Coil Test" in Oak Ridge (USA). Zu den anderen Fragen soll hier etwas ausführlicher Stellung genommen werden. Der Schwerpunkt der Arbeiten zur Fusionsreaktortechnologie liegt in Deutschland beim FZK Karlsruhe.

Unter dem inneren Tritiumbrennstoffkreislauf versteht man die Bereitstellung des Tritiums für das DeuteriumTritium-Brennstoffgemisch im Torus, seine Wiedergewinnung im "Auspuff" des Entladungsgefäßes durch Abtrennung von Verunreinigungen und durch Isotopentrennung vom leichteren Deuterium mit dem Ziel einer möglichst quantitativen Wiederverwendung. Der jeweilige Verbrauch während einer Brennperiode beträgt nur einige Prozent der umlaufenden Tritiummenge. Die Sicherheitsprobleme, die sich dabei stellen, sind im wesentlichen mit dem sicheren Einschluß des Tritiums verbunden, das bei hohen Temperaturen leicht durch Metallwände diffundieren kann.

Der äußere Tritium-Brennstoffkreislauf beginnt im sogenannten "Blanket", wo aus dem Brutstoff Lithium neuer Tritium-Brennstoff erzeugt wird. Als Blanket bezeichnet man eine die torusförmige Brennkammer umhüllende Röhrenstruktur, die aus Konstruktions- und Wartungsgründen im allgemeinen modulartig aufgebaut sein wird. Sie weist in ihrer radialen Anordnung eine Schichtung verschiedener Materialien auf, die den mehrfachen Funktionen des Blankets genügen sollen. Die erste Aufgabe ist es, eine ausreichende Brutrate für Tritium zu gewährleisten; hierfür kann das Blanket den

Brutstoff Lithium entweder in metallischer Form (vorzugsweise als Legierung) oder aber als keramische Verbindung enthalten. Es wird nötig sein, die Zahl der aus dem Fusionsplasma in das Blanket eingefallenen Neutronen durch geeignete Neutronen-Multiplikator-Materialien so weit zu vermehren, daß mindestens ebenso viele Tritium-Atome im Blanket erzeugt als insgesamt verbraucht werden. Die Fragen, welches Tritiuminventar sich im stationären Gleichgewicht im Blanket ansammelt sowie die damit verbundenen Permeationsprobleme, und welche Verfahren zur kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Extraktion des Tritiums aus dem Blanket man verwendet, sind insbesondere von der Auswahl der Lithiumverbindung abhängig und befinden sich heute noch in der Diskussion.

Die zweite Aufgabe des Blankets ist die Abfuhr der aus dem Fusionsplasma einfallenden Leistung. Wegen des Impulserhaltungssatzes teilt sich die gesamte beim Fusionsprozeß freiwerdende Energie im umgekehrten Verhältnis der Massen der Endprodukte auf, so daß auf das Neutron 4/5, d.h. 14,1 MeV, und auf das ^{4}He (Alphateilchen) 1/5, d.h. 3,5 MeV, entfallen. Die Neutronen tragen als ungeladene Teilchen diese Energie ungehindert aus dem Plasma weg und deponieren sie im Blanket durch Wechselwirkung mit den dortigen Materialien. Die hierbei freigesetzte Wärmeleistung muß durch geeignete Kühlmittel, z.B. Druckwasser oder Helium, abgeführt und entsprechenden externen Wärmetauschern zur Elektrizitätserzeugung oder zur Prozeßwärmebereitstellung angeboten werden.

Schließlich hat das Blanket die Aufgabe, die vom Plasma kommende Strahlung (vor allem Neutronen) so weit zu absorbieren, daß die weiter außen liegenden supraleitenden Magnetspulen vor zu starken Strahlungsdosen abgeschirmt bleiben, um diese Spulen in ihrer Funktionstüchtigkeit nicht zu beeinträchtigen. Dennoch strebt man eine möglichst geringe Dicke des Blankets an, damit die aufwendigen und teuren Magnetfeldspulen nicht größer gebaut werden müssen als unbedingt nötig.

Die Lösung des Materialproblems, bei welchem widersprüchliche Anforderungen – u.a. nach niedriger Aktivierbarkeit, nach geringer Nachwärme sowie nach hoher Resistenz der Wärmeleitfähigkeit und der mechanischen Festigkeit gegen eine Schädigung durch Strahlung – miteinander in Einklang gebracht werden müssen, wird sich als eine Schlüsselfrage für die Brauchbarkeit des Fusionsreaktors als zukünftige Energiequelle herausstellen. Obwohl Materialien verfügbar sind, deren Neutronen-induzierte Radioaktivität bereits nach einigen Jahrzehnten auf "hands-on level" abklingen würde, ist es – wegen der unterschiedlichen Zielvorgaben bei der Materialauswahl – bei einer Gesamtoptimierung schwer, heute schon eine präzise Antwort auf die Frage zu geben, wie groß der radioaktive Abfall sein wird, welcher durch die Aktivierung der Brennkammer entsteht. Mit dem Materialproblem befindet man sich also bereits mitten in der Diskussion der Umwelt- und Sicherheitsaspekte der Fusion.

Schon bei den Planungsarbeiten zu ITER werden die Sicherheits- und Umweltaspekte von vornherein mit eingefaltet. Hierbei wird mit demselben methodischen Rüstzeug gearbeitet, das für die Sicherheit der Kernspaltungsreaktoren entwickelt wurde. Das Ziel ist, von Anfang an durch entsprechende technische Auslegung jene Störfälle mit Gewißheit auszuschließen, die durch Freisetzung von zu viel radioaktivem Material die Verzehr- und Lebensgewohnheiten der benachbarten Bevölkerung beeinträchtigen oder gar Evakuierungsmaßnahmen erforderlich machen würden.

Deswegen muß bei ITER sichergestellt werden, daß Tritium und radioaktiven Stäube nur in geringen Mengen freigesetzt werden können. Der radioaktive Brennstoff Tritium ist seit langem als das für eine Radioaktivitätsfreisetzung maßgebliche Gefährdungspotential erkannt. Nach dem heutigen Kenntnisstand über die Umwandlung von gasförmig emittiertem T_2 (bzw. HT und DT) in wasserdampfförmiges T_2O (bzw. HTO und DTO) wird es nötig sein, die Menge des im schlimmsten Fall insgesamt freisetzbaren Tritiums auf etwa 100 g zu begrenzen. Außerdem ist in den letzten Jahren deutlich geworden, daß möglicherweise in der Freisetzung radioaktiver Stäube ein Gefährdungs-

potential ähnlicher Größenordnung schlummert. Diese radioaktiven Stäube können sich in der Brennkammer durch Erosion von Erste–Wand–Material bilden; das Radioaktivitätsproblem entsteht bei Graphit durch das eingelagerte Tritium, bei Metallen durch deren neutroneninduzierte Eigenaktivität. Wenn auch die ständige Entfernung der durch Erosion entstehenden Stäube schon aus betrieblichen Gründen geboten ist, so muß möglicherweise – bislang noch – bei einer Disruption (störfallbedingter Abbruch des induzierten Ringstroms) mit einer Staubbildung von bis zu 1 kg gerechnet werden. Ein auf graphitischer Basis konzipiertes Erste-Wand-System, wie es wegen vielerlei Vorzüge zumindest für die erste Phase von ITER vorgesehen ist, birgt weiterhin einige Sicherheitsprobleme insbesondere bei Kühlmittelverlust, Ausfall der Kühlung oder Zusammenbrechen des Vakuums (LOFA, LOCA, LOVA). Mögliche Gegenmaßnahmen wären unter anderem: Übergang auf keramische Materialien oder Schutzschichten, Einhüllen des Vakuumbehälters mit einem Inertgas; Beschränkung der Kühlwassertemperaturen auf unter 100°C oder Übergang zu Heliumkühlung.

Demgegenüber werden jene sicherheitsrelevanten Fragen, die mit dem Tritium-brütenden Blanket verbunden sind, bei ITER noch nicht in vollem Umfang auftreten, sondern müssen erst beim DEMO umfassend gelöst werden. Das Grundprinzip eines späteren Fusionsreaktors ist in Abb. 12 dargestellt.

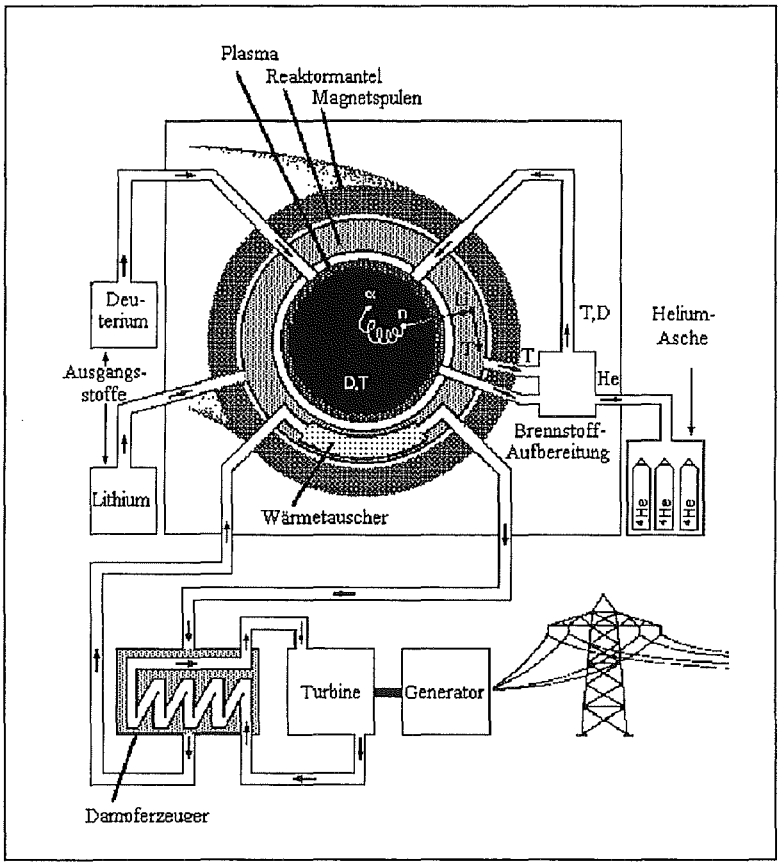


Abb. 12: Schematische Darstellung der grundsätzlichen Funktionsweise eines stromliefernden Deuterium-Tritium-Fusionsreaktors.

Insgesamt bietet der Fusionsreaktor bei den nuklearen Sicherheitsfragen im Vergleich zum Spaltungsreaktor spezifische Vorteile durch das Fehlen radioaktiver Reaktionsprodukte aus dem physikalischen Elementarprozeß selbst sowie durch die Tatsache, daß das in der Brennkammer vorhandene Brennstoffinventar nur jeweils für eine Betriebszeit von Minuten ausreicht. Inwieweit die Studien über eine vergleichsweise geringere Aktivierung des Strukturmaterials ihre Aussagekraft behalten, kann man angesichts der vielfältigen noch offenen Werkstofffragen heute nur schwerlich verbindlich beurteilen. Das maßgebliche nukleare Gefährdungspotential des Fusionsraktors (durch Tritium und aktivierte Stäube) ist von vornherein um Größenordnungen geringer als das eines Spaltungsreaktors gleicher Leistung. Deshalb erscheint auch für einen Fusionsreaktor realistisch, daß bei allen denkbaren Störfällen die Folgen auf das Anlagengelände begrenzt bleiben und daß außerhalb des Zaunes keine Einschränkungen der Lebens- und Verzehrgewohnheiten für die Bevölkerung erforderlich werden. Prognosen über das wirtschaftliche und soziale Umfeld, in dem ein solcher Reaktor etwa ab Mitte des nächsten Jahrhunderts seinen Markt zu finden hätte, gehören heute noch ins Reich der Spekulation.

2 Jülicher Beiträge zur Fusionsforschung

2.1 Ausgangslage im Forschungsumfeld

Fusionsforschung wird in der Europäischen Union in einem gemeinschaftlichen Programm durchgeführt, das von der Europäischen Kommission fachlich koordiniert und finanziell unterstützt wird. In Deutschland sind drei Mitglieder der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) als "Fusions-Assoziationen" an diesem Gemeinschaftsprogramm beteiligt (in Klammern die jeweiligen jährlichen F&E-Aufwendungen gemäß dem HGF-Programmbudget 1997):

— IPP Garching (ca. 190 Mio. DM)

— Forschungszentrum Karlsruhe (ca. 70 Mio. DM)

— Forschungszentrum Jülich (ca. 45 Mio. DM)

Die wichtigsten Plasmaeinschluß-Apparaturen im deutschen Fusionsprogramm sind:

- der Stellarator WVII-AS in Garching
- sowie sein im Bau befindlicher Nachfolger W 7-X in Greifswald,
- der "Divertor"-Tokamak ASDEX-Upgrade in Garching,
- der "Limiter"-Tokamak TEXTOR-94 in Jülich.

Mit ASDEX-Upgrade (bzw. dem Vorläufer-Experiment ASDEX) und TEXTOR (der nach einer maßgeblichen Ertüchtigung jetzt als TEXTOR-94 weiterbetrieben wird) sind zwei unterschiedliche Randschichtkonfigurationen – Divertor und Pump-Limiter – realisiert (siehe Abb. 13), um die Wärme- und Teilchenabfuhr aus dem Plasma auf die Wand zu bewerkstelligen und um den Zusammenhang dieser Aufgabe mit den Problemen der allgemeinen magnetischen Plasmaeinschließung zu untersuchen.

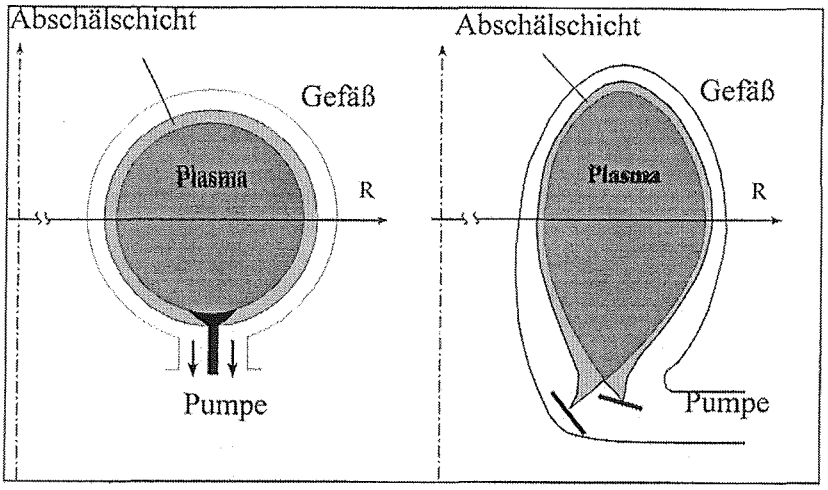


Abb. 13: Poloidaler Schnitt durch ein torusförmiges Tokamakplasma; links mit kreisförmigem Querschnitt und Pumplimiter; rechts mit elongiertem Querschnitt, magnetischem Divertor, Separatrix und Divertorprallplatten.

Beim Divertor wird die Plasmarandschicht magnetisch ausgekoppelt. Die rechte Hälfte von Abb. 13 zeigt einen Querschnitt durch den toroidalen Plasmaschlauch, der durch die äußerste geschlossene magnetische Oberfläche („Separatrix") begrenzt wird. Randschichtteilchen, die über die Separatrix weiter nach außerhalb gelangen, werden auf "divergierten" Magnetfeldlinien (in Abb. 13 nahezu senkrecht zur Zeichenebene) auf Divertorplatten (die sich über den ganzen toroidalen Umfang verteilen) in mehr oder minder entfernte Positionen außerhalb des eigentlichen Plasmavolumens geführt. Auf diesen Platten deponieren die Teilchen des Plasmas ihre bis dahin mitgeführte Wärmelast, während sie selbst, nach Umwandlung in neutrale Atome oder Moleküle größtenteils wieder in das Plasma eindringen und dort re-ionisiert werden („recycling"), aber auch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aus dem Gefäß abgepumpt werden. Beim Limiterkonzept (Abb. 13 links) wird das Plasmavolumen mechanisch begrenzt ("limitiert"); der Limiterkopf berührt bzw. definiert den äußersten Rand des magnetisch noch eingeschlossenen Plasmas, während alle Plasmateilchen, die über diesen Bereich hinausgelangen, einesteils auf den Limiter auftreffen, ihre Wärmelast dort deponieren und dann „recycled" werden, anderenteils unterhalb des Limiters in Pumpkanäle gelangen und dort abgepumpt werden.

Über die Untersuchung allgemeiner Probleme der Heizung und Einschließung fusionsrelevanter Plasmen hinaus, die sowohl Aufgabe von ASDEX-Upgrade wie von TEXTOR-94 ist, beschäftigt sich ASDEX-Upgrade schwerpunktmäßig mit dem Divertorkonzept im Hinblick auf seine Brauchbarkeit für ITER. TEXTOR-94 ist ein "dedicated device" zur Plasma-Wand-Wechselwirkung und konzentriert sich außerdem auf die Nutzung und Weiterentwicklung des Limiterkonzepts. Der in Abb. 13 im Schnitt gezeigte Pumplimiter erstreckt sich in TEXTOR-94 über den ganzen toroidalen Umfang.

TEXTOR-94 ist das zentrale Forschungsgerät des "Trilateralen Euregio Clusters" (TEC), ein Zusammenschluß der Fusionsaktivitäten im hiesigen Dreiländereck, mit der Jülicher, der belgischen und der niederländischen Fusions-Assoziation als Partnern. Darüber hinaus besteht ein "IEA Implementing Agreement on TEXTOR" mit den Ländern Kanada, Japan, der Schweiz und USA. Das gemeinsame Programm der TEC-Partner ist auf das Verständnis des physikalischen

Gesamtzusammenhangs ausgerichtet, der durch die voneinander abhängigen Einzelprozesse bestimmt wird. Die folgende Auswahl der zum Thema "Plasma-Wand-Wechselwirkung" besonders relevanten Jülicher Beiträge führt bedauerlicherweise dazu, daß einige der wichtigsten Ergebnisse unserer TEC-Partner – wie z.B. Plasmaheizung und Plasmaeinschluß – dem Platzmangel zum Opfer fallen.

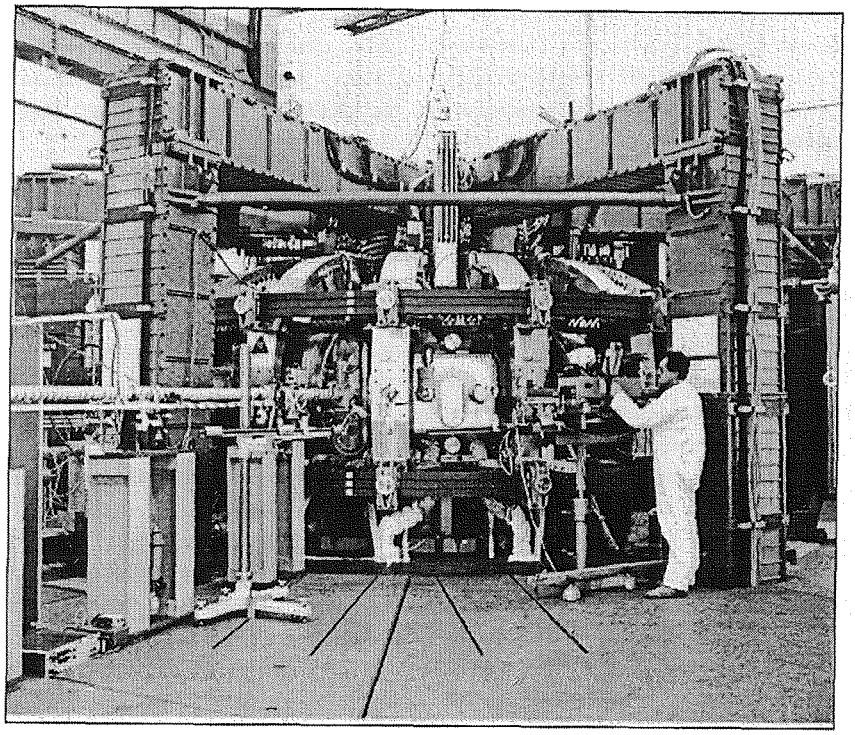


Abb. 14: Blick auf den Tokamak TEXTOR (kurz nach seiner Fertigstellung 1983).

Ebenso muß leider darauf verzichtet werden, die u.a. auch in Jülich entwickelten wichtigen Meßverfahren ("Diagnostiken") zu beschreiben, mit denen sich die verschiedenen Plasmaeigenschaften und -prozesse erfassen lassen, eine Voraussetzung für die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse. TEXTOR-94 gilt heute als eine der weltweit am besten mit Diagnostiken ausgestatteten Fusionsanlagen.

2.2 Saubere Plasmen durch Wandbehandlung

Wenn Verunreinigungen von außen in das – aus Wasserstoff bzw. seinen schweren Isotopen bestehende – Plasma durch die Randschicht hindurch bis zur heißen Kernzone eindringen, haben sie dort eine zweifache nachteilige Wirkung: Zum einen kühlen sie das Plasma durch Strahlungsverluste ab, und zwar bei einer zu hohen (wenngleich immer noch sehr geringen) Konzentration bis unterhalb der erforderlichen Brenntemperatur, zum anderen senken sie die Häufigkeit der Fusionsprozesse, d. h. die nutzbare Fusionsleistung durch Verdünnung des Brennstoffs (nämlich der Wasserstoffisotope). Die Strahlungsverluste sind um so intensiver, je höher die Kernladungszahl solcher Verunreinigungen ist: Da derartige Verunreinigungen vorwiegend aus jenen Wandkomponenten stammen, die in besonders intensiver Berührung mit der Plasma-Randschicht stehen, ist der Kontakt des Plasmas mit

metallischen Gefäßwänden besonders problematisch. Die Jülicher "Karbonisierung", ein plasmachemisches Verfahren zur in-situ-Deposition einer amorphen, wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschicht, die alle inneren Wandoberflächen bedeckt, hat das Problem der metallischen Verunreinigungen quantitativ beseitigt. Was blieb, waren kleinere Mengen der leichteren Verunreinigung O (und C), die – im Umweg über die Bildung von CO – ihrerseits Anlaß zu Erosionsprozessen boten. Hier hat die an TEXTOR erstmalig demonstrierte "Borierung" Abhilfe gebracht: Praktisch alle maßgeblichen Fusionsanlagen (mit der begründeten Ausnahme von JET) haben inzwischen die "Borierung" übernommen und gerade damit die Voraussetzungen zum Betrieb mit ausreichend reinen Wasserstoffplasmen geschaffen, wodurch das Erreichen von spektakulären Spitzenwerten der Plasmaeinschließung erst möglich wurde.

Auch eine in Jülich entwickelte Methode zur Messung der Erosion und Redeposition dieses Wandmaterials mittels Colorimetrie wurde inzwischen von mehreren auswärtigen Tokamakanlagen übernommen.

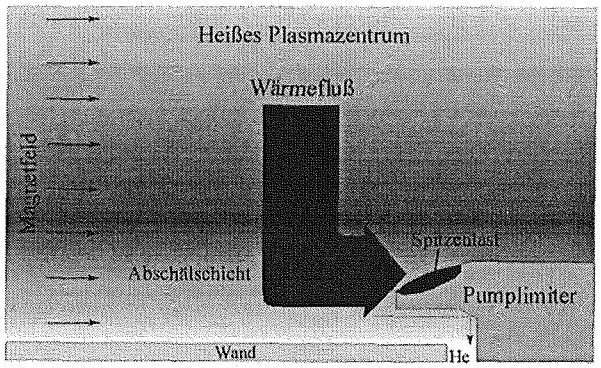
2.3 Abfuhr von Verunreinigungen und Heliumasche

Nicht nur das Eindringen von zu vielen, von der Wand stammenden Verunreinigungen in den Plasmakern macht das stationäre Brennen eines Fusionsplasmas unmöglich. Eine vergleichbare Wirkung kann auch das Helium zeigen, das als Asche des eigentlichen Reaktionsprozesses (Fusion von schwerem mit überschwerem Wasserstoff) unvermeidbar im Plasmazentrum anfällt, wobei sich das Helium-Erzeugungsprofil praktisch mit dem Energie-Freisetzungsprofil deckt. Gelingt es nicht, die Heliumasche (und die anderen Verunreinigungen) aus dem Plasma wieder nach außen abzuführen, so erlischt die Fusionsflamme. Von einer Jülicher Gruppe konnte gezeigt werden, daß man deswegen das in Abb. 3 dargestellte Zündkriterium noch durch eine erschwerende Zusatzbedingung ergänzen muß: Die Aufenthaltsdauer eines Asche-Teilchens (Helium) im brennenden Plasma darf nicht länger als etwa 10 τ_E sein. Bei Annäherung an diese obere Grenze verschiebt sich die Brennkurve deutlich weiter nach oben und schrumpft gleichzeitig auf einen immer kleineren Arbeitsbereich. Mit dem Pumplimitersystem von TEXTOR konnte weltweit erstmals der Nachweis einer für Reaktorzwecke wohl gerade ausreichenden Abfuhr von Helium demonstriert werden. Später wurden auch Divertor-Tokamaks mit einem effizienten Pumpsystem ausgerüstet und konnten unter den Betriebsbedingungen der sogenannten "ELMy H-Mode" (siehe auch Kapitel 2.5) inzwischen eine ausreichende Heliumabfuhr demonstrieren.

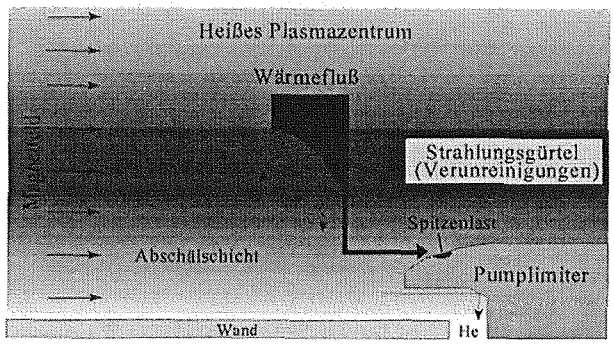
2.4 Leistungsauskopplung durch Strahlungskühlung

Würde in einem Fusionsreaktor die volle, in einem brennenden Plasma erzeugte Wärmelast auf die einen Limiter oder auf Divertor-Prallplatten konzentriert, würden diese wegen extremer Überhitzung zerstört. Deswegen wird weltweit nach Verfahren gesucht, diese Wärme möglichst großflächig auf die Oberfläche der Brennkammer zu verteilen. Als für dieses Ziel besonders attraktive Lösung wird angestrebt, zur Entlastung des Pumplimiters – oder des Divertors – das Prinzip eines (den toroidalen Plasmaschlauch einhüllenden) "kalten Strahlungsgürtels" anzuwenden, was mit Erfolg erstmalig an TEXTOR demonstriert werden konnte. Grundgedanke dieses Prinzips ist es, durch geregelte Beigabe und Abfuhr geeigneter Verunreinigungen (z.B. Neon) den Anteil der von der Peripherie des Plasmas durch Strahlung (und damit nahezu gleichförmig in alle Richtungen) abgegebenen Wärmeleistung so weit zu erhöhen, daß der den Limiter – oder Divertor – beaufschlagende Rest beherrschbar wird. Durch dieses Prinzip, das in Abb. 15 erläutert ist, kann man vermeiden, daß der Wärmefluß in unzulässiger Weise auf einen kleinen Bruchteil der inneren Brennkammerwand fokussiert wird; statt dessen wird er fast gleichmäßig auf die gesamte Wandoberfläche verteilt. Dies erleichtert nicht nur

das Problem der Wärmeübertragung, sondern reduziert auch die von den Plasmateilchen hervorgerufene Erosion des Wandmaterials.



Abstrahlung vom Plasma: schwach
Wärmebelastung des Limiters: zu hoch



Abstrahlung vom Plasma: stark
Wärmebelastung des Limiters: erträglich

Abb. 15: Schematischer Vergleich der Verhältnisse in der Plasmarandschicht und auf dem wärmebelasteten Pumplimiter bei Anwesenheit eines Strahlungsgürtels (links) und ohne einen solchen (rechts).

Dieses bereits früher in der Literatur vorgeschlagene Konzept führte vordem zu keiner praktikablen Lösung, weil man einen Abfuhrmechanismus für die an den Plasmarand gelangenden Verunreinigungen benötigt, der durch den Pumplimiter in TEXTOR erstmalig verfügbar wurde. Außerdem ging man – unter vorschneller Verallgemeinerung des im Kapitel 2.2 Gesagten – davon aus, Verunreinigungen des aus Wasserstoff bestehenden Plasmas seien in jedem Falle zu vermeiden. Dabei wurde jedoch die Tatsache nicht ausreichend berücksichtigt, daß Plasmaverunreinigungen auch eine vorteilhafte Eigenschaft haben, nämlich dort am intensivsten zu strahlen (und damit die Elektronen des Plasmas abzukühlen), wo die kinetische Energie der Elektronen im Bereich der jeweiligen Ionisationsenergie liegt. Deswegen kann man zum Zweck der Strahlungskühlung des Plasmarandes Verunreinigungen nach dem Kriterium auswählen, inwieweit sie in den zu kühlenden äußeren Bereichen des Plasmaschlauchs besonders stark strahlen, während sie in der heißen Brennzone des Plasmazentrums unter günstigen Umständen nur einen geringen, noch zulässigen Beitrag zum Wärmeverlust leisten. Dies setzt allerdings voraus, daß der Plasmatransport quer zum Magnetfeld

nicht dazu führt, daß sich die Verunreinigungen bevorzugt im Plasmazentrum ansammeln; sonst wäre das Konzept der Strahlungskühlung untauglich.

2.5 Verbesserter Plasmaeinschluß auch im Limiter-Tokamak

Im Zuge der Untersuchungen zur Heliumabfuhr und zur Strahlungskühlung wurde an TEXTOR ein neues Plasmaregime mit verbesserten Einschlußeigenschaften entdeckt, die RI-Mode (R steht für „radiative", I für "improved confinement"). Überraschenderweise wurde beobachtet, daß sich im Zuge der durch Abstrahlung erzeugten Abkühlung der Außenbezirke des Plasmas die magnetische Wärmedämmung im heißen Inneren des Plasmaschlauches so weit erhöht, daß der gesamte Energie-Inhalt des Plasmas steigt. Diese Zustände lassen sich in Verbindung mit einem besonders großen Anteil der Strahlungskühlung an der gesamten Verlustleistung erzeugen. Bei den erwünschten hohen Plasmadichten zeigt die RI-Mode in TEXTOR eine so gute Einschließungsqualität, wie sie vordem nur in Divertor-Tokamaks mit der sogenannten "ELMy H-Mode" erreicht wurde. Die bei der RI-Mode gleichzeitig einstellbaren Charakteristika (starke Heizleistungsdichte, hohe Elektronendichte, signifikante Strahlungskühlung und guter Energieeinschluß) sind Bedingungen, die bei einem stationär brennenden Fusionsplasma zwingend erfüllt sein müssen. Daher wird die RI-Mode jetzt auch bei den Planungen für ITER als ein mögliches alternatives Szenario in Erwägung gezogen. Es bedarf jedoch noch weiterer experimenteller Nachweise, daß die RI-Mode auch an größeren Tokamaks implementiert werden kann. Erste Versuche wurden an TFTR (Princeton) und DIII-D (San Diego) durchgeführt. Mit TEXTOR-94 gelang es, bei einer RI-Mode-Plasmaentladung alle wesentlichen Plasmaparameter über rund 7 Sekunden (das entspricht 160 Energieeinschließungszeiten) konstant zu halten; Vergleichbares ist bislang weltweit in keiner Fusionsanlage gelungen.

2.6 Neues Vorhaben: Dynamischer Ergodischer Divertor

Die 1994 an TEXTOR realisierte Ertüchtigungsmaßnahme zur Verlängerung der Plasmaentladung auf etwa 10 Sekunden hatte die Möglichkeit geschaffen, die an TEXTOR erarbeiteten Methoden zur Plasma-Wand-Technologie auch unter den erschwerten Langpulsbedingungen weiterzuentwickeln, die den in einem Fusionsreaktor zu realisierenden "stationären" Zuständen besser angenähert sind. Der so ertüchtigte TEXTOR-94 ist besonders geeignet, um an ihm das Konzept des "Dynamischen Ergodischen Divertors" zu erproben, mittels dessen man auf den Transport von Verunreinigungen im Randbereich des Plasmarings Einfluß nehmen möchte. Die beiden an TEXTOR erfolgreich angewendeten Verfahren zur kombinierten Heliumabfuhr und Strahlungskühlung hängen nämlich so stark von den jeweiligen Transporteigenschaften des Plasmas ab, daß bezüglich ihrer Übertragbarkeit auf einen Fusionsreaktor noch offene Fragen – und Besorgnisse – bestehen. Aus diesem Grund ist es außerordentlich wichtig, ein zusätzliches, bisher nicht verfügbares Instrument zur Beeinflussung des Teilchen- und Energietransports in der Plasmarandschicht zu entwickeln. Eine magnetische Verwirbelung der Plasmarandschicht – als Ergodisierung bezeichnet – wurde unter maßgeblicher Jülicher Mitwirkung schon Anfang der 80er Jahre vorgeschlagen. Das Ergodisierungsverfahren fand – nach einem vorläufigen Test an TEXTOR – in der Folgezeit auch an anderen Tokamaks Anwendung; besonders systematisch und erfolgreich wurde es an TORE SUPRA (in Cadarache, Frankreich) eingesetzt und untersucht. Das dazu erforderliche magnetische Störfeld liefert zwar bezüglich Randschichtverbreiterung und Abscheidung von Verunreinigungen sehr ermutigende Ergebnisse, führt aber immer noch nicht zu einer hinreichend gleichmäßigen Verteilung der Wärmeflüsse auf die Wandelemente.

Aus diesem Grund wurde bereits 1988 in Japan an einer recht kleinen Versuchsanlage das Konzept untersucht, solche magnetischen Störfelder hinreichend rasch rotieren zu lassen. Indem man auf diese Weise den Parameter Zeit (Frequenz) als weitere Dimension einführt, eröffnet man zusätzliche Einfluß- und Untersuchungsmöglichkeiten, die über das ursprüngliche Ziel, nämlich die Wärmebelastung der Wand gleichmäßig zu verschmieren, deutlich hinausgreifen. In TEXTOR-94 wird man dazu auf der Innenseite des Vakuumgefäßes ein "helikales" System elektrischer Leiter montiert, wie es in Abb. 16 gezeigt ist. Es wird mit einem mehrphasigen Wechselstrom von bis zu 15 Kiloampere im Frequenzbereich zwischen 50 Hertz und 10.000 Hertz beaufschlagt werden. Der „Dynamische Ergodische Divertor" soll in einer ersten Ausbaustufe im Jahre 2000 in Betrieb gehen.

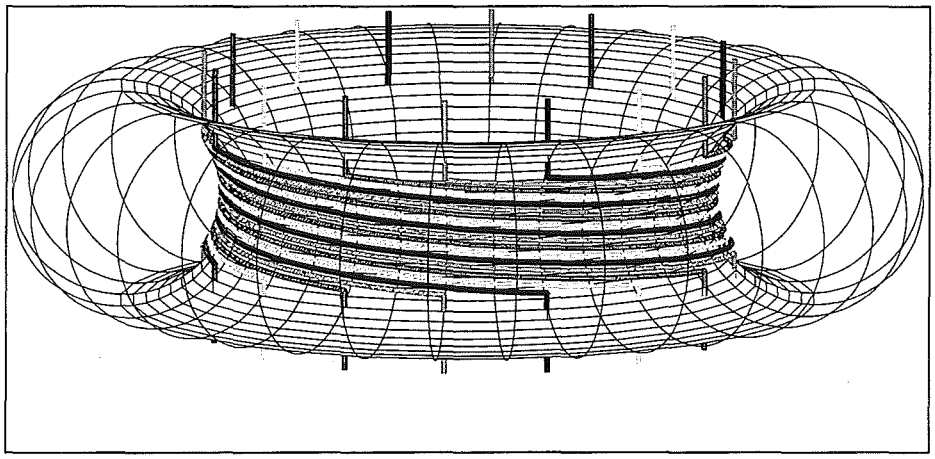


Abb. 16: Schematische Darstellung der Leiteranordnung für den im Bau befindlichen "Dynamischen Ergodischen Divertor" von TEXTOR-94. Die an der Innenfläche des torusförmigen Vakuumgefäßes angebrachten Leiter werden von einem mehrphasigen Wechselstrom gespeist. Die Anordnung hat Ähnlichkeit mit dem Stator eines Drehstrommotors.

2.7 Mittelfristiges Programm

Übergreifendes Ziel des Fusionsprogramms von TEXTOR-94 im Rahmen des Trilateralen Euregio Clusters ist es, zur Erarbeitung eines kohärenten und konsistenten Konzepts beizutragen, das die widersprüchlichen Anforderungen von Energieeinschluß einerseits sowie Teilchen- und Wärmeauskopplung andererseits integrieren kann. Ein wichtiges Werkzeug dazu ist die Entwicklung möglichst allgemeingültiger numerischer Modelle der Transportvorgänge im Plasmakern und der Randschicht. Der geplante "Dynamische Ergodische Divertor" gehört zu den ganz wenigen derzeit noch denkbaren zusätzlichen Eingriffmöglichkeiten zur Beeinflussung der Plasma-Wand-Wechselwirkung mit ihren Schwerpunkten Wärmeauskopplung und Teilchenabfuhr.

Literaturhinweise

Weiterführende Lehrbücher zu Kapitel 1:

Kadomtsev, B.B. "Tokamak Plasma: A Complex Physical System", Institute of Physics Publishing, Bristol und Philadelphia (1992)

Rebhan E. "Heißer als das Sonnenfeuer - Plasmaphysik und Kernfusion", Piper-Verlag, München (1992)

Wesson, J. "Tokamaks", 2. Aufl., Clarendon Press, Oxford (1997)

Proceedings of the 3rd Carolus Magnus Summer School on Plasma Physics, Spa, September 1997, *Transactions of Fusion Technology* 33 (1998), 1-434

Spezielle Veröffentlichungen zu Kapitel 2:

Finken, K.H. *et al.* "Helium Removal Experiments on TEXTOR", in *Contributions to High-Temperature Plasma Physics*, Akademie-Verlag, Berlin (1994), 390-402

Finken, K.H. (Hrsg.) "Dynamic Ergodic Divertor (DED) for TEXTOR-94", *Berichte des Forschungszentrums Jülich,* Nr. 3285 (1996)

Finken, K.H. (Hrsg.): Special Issue: "Dynamic Ergodic Divertor", *Fusion Engineering and Design* 37 (1997), 335–448

Messiaen, A.M. *et al.* "High Confinement and High Density with Stationary Plasma Energy and Strong Edge Radiation in the Upgraded Torus Experiment for Technology Orientied Research (TEXTOR-94)", *Phys. Plasmas* 4 (1997), 1690 ff.

Reiter, D./ Wolf, G.H./ Kever, H. "Burn Condition, Helium Particle Confinement and Exhaust Efficiency", *Nuclear Fusion* 30 (1990), 2141-2155

Samm, U. "Energieabfuhr im Fusionsplasma durch kalten Strahlungsgürtel", *Physikalische Blätter* 50 (1994), 462-465

Winter, J. *et al.* "Boronization in TEXTOR", *Journal of Nuclear Materials* 162-164 (1989) 713-723

Wolf, G.H. et al. "Quasi-stationary ELM-free High Confinement with Edge Radiative Cooling in TEXTOR-94", *Fusion Energy* 1 (1997), 177-185

Antriebskonzepte nach 2005

Karl E. Noreikat

Alternative Antriebssysteme

Daimler-Benz AG, Stuttgart

1 Einleitung

Der hohe Lebensstandard in den Industrieländern geht einher mit einem immer höheren pro Kopf Energieverbrauch. Dies gilt für den industriellen genauso wie für den privaten Verbrauch, für Transport und Verkehr. Die Veränderungen der Lebensgewohnheiten haben zunehmend negative Auswirkungen auf die Lebensbedingungen. Ressourcenerschöpfung und Umweltbeeinträchtigung sind die Folgen hiervon. Seit in den Sechziger Jahren der Club of Rome in einer Mahnschrift auf die „Grenzen des Wachstums" unserer Gesellschaft hingewiesen hat, wuchsen die Sorge und in deren Folge die Diskussion und Bemühungen, alternative Szenarien für unsere weitere gesellschaftliche und industrielle Entwicklung zu erarbeiten.

Ziel war die Schaffung eines Rahmens für ein dauerhaftes stabiles Zusammenwirken zwischen industriellen, gesellschaftlichen und natürlichen Prozessen. Verwendete Ressourcen müssen erneuerbar sein, entstehende Emissionen und Abfälle dürfen natürliche Kreisprozesse nicht belasten.

2 Antworten der Automobilindustrie

So unbestritten die Tatsache ist, daß die Automobilindustrie mit ihren Produkten erheblich zu den positiven Elementen heutiger Lebensform wie Mobilität, Wohlstand, Individualität beigetragen hat, so umstritten ist sie aber in der Diskussion um die negativen Folgewirkungen. Kein Unternehmen kann sich auf Dauer der öffentlichen Kritik entgegenstellen. Um Lösungen bemüht, wurden die Emissionswerte bei Verbrennungsmotoren in den vergangenen zwanzig Jahren um mehr als 90 % herabgesetzt. Der Kraftstoffverbrauch sank im gleichen Zeitraum um durchschnittlich 20 %. Beim Recycling der verwendeten Werkstoffe wurde ein Grad von mehr als 80 % erreicht, und in den Produktionsprozessen wurden Wasser-, Öl-, Betriebsmittel- und Abfallkreisläufe eingeführt, die beispielhaft sind für andere Industriezweige. Im gleichen Zuge wurden auch die Emissionen von Produktionsanlagen drastisch reduziert. Es wurde an alternativen Fahrzeug-, Antriebs- und Kraftstoffkonzepten gearbeitet. Gas-, Wasserstoff-, Alkohol-, Methanol-, Biodieselfahrzeuge wurden vorgestellt, Elektrofahrzeuge entwickelt und produziert. Keines dieser Konzepte fand trotz positiver Ansätze die Marktakzeptanz. Nachteile in Funktionalität, Nutzen und Kosten verhinderten dies.

Je ausgereifter konventionelle Fahrzeuge sind, umso höher ist der Aufwand, um weitere Verbesserungen zu erzielen. Deshalb wächst ständig die Hoffnung auf einen „Durchbruch", d. h. auf einen völlig neuen Ansatz, der prinzipbedingt Potentiale bietet, die aufgezeigten Forderungen bezüglich Ressourcen, Emissionen und natürlichen Kreisprozessen zu erfüllen.

Das Potential, heutige Antriebstechniken hinsichtlich Umweltverträglichkeit, Kundennutzen, Lebensdauerkosten und Wirtschaftlichkeit zu überflügeln, bietet die Brennstoffzellentechnik.

Vor über fünf Jahren begannen Daimler-Benz und Ballard Power Systems ein gemeinsames Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die PEM-Brennstoffzellen-Anwendung im automobilen

Bereich. Seitdem konnten deutliche Fortschritte erzielt und demonstriert werden, so daß heute die Brennstoffzelle als Alternative zum Verbrennungsmotor ernsthaft von allen großen Automobilunternehmen geprüft wird und bedeutende Mittel bereitgestellt werden, um diese Technologie weiter zu entwickeln. Die Automobilindustrie arbeitet somit an einem vielversprechenden Ansatz, der die Weiterentwicklungen am heutigen Verbrennungsmotor flankiert und die Chance für einen erheblichen Evolutionssprung bietet.

3 Die PEM-Brennstoffzelle

In einer Brennstoffzelle reagieren Wasserstoff und Sauerstoff in einer kontrollierten, „kalten" Verbrennung zu Wasserdampf, wobei elektrische Energie unter sehr hohen Wirkungsgraden und ohne Schadstoff-Emissionen (ZERO EMISSION) erzeugt wird. Dabei hat sich das Prinzip der Proton-Exchange-Membran (PEM)-Brennstoffzelle als beste Lösung für mobile Anwendungen erwiesen.

Die PEM ist eine Spezialfolie, die sowohl den Elektrolyten darstellt als auch die beiden Gase Wasserstoff und Sauerstoff voneinander trennt und damit eine „heiße" Verbrennung verhindert. Durch Katalysatormaterial wird der Wasserstoff ionisiert. Die positiven Wasserstoff-Ionen, d. h. die Protonen durchdringen die durchlässige Folie, während die Elektronen zurückbleiben. Auf der anderen Seite der Membran reagiert das Wasserstoff-Ion mit dem Luftsauerstoff. Der Elektronenüberschuß auf der Wasserstoffseite der Membran und der Elektronenmangel auf der Sauerstoffseite erzeugen ein Potentialgefälle. Ein elektrischer Strom kann nun durch einen äußeren Stromkreis fließen.

Die PEM ist eine wenige Zehntel Millimeter dicke Polymerfolie, die auf beiden Seiten mit Platin und gasdurchlässigen Elektroden beschichtet ist. Diese Einheit wird MEA (Membrane Electrode Assembly) genannt. Die Bipolarplatten, die den Wasserstoff und die Luft dem Katalysatormaterial durch labyrinthähnliche Kanäle zuführen, umschließen die einzelnen Zellen nach beiden Seiten. Des weiteren dienen diese wassergekühlten Platten der Wärmeabfuhr und der elektrischen Verbindung zu den benachbarten Zellen. Durch Reihenschaltung vieler solcher Zellen entsteht ein Stack, der die notwendige Spannung für den Fahrzeugbetrieb sicherstellt.

4 Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge

Seit 1991 arbeitete die Daimler-Benz Forschung am Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug NECAR (New Electric Car). 1994 wurde mit NECAR I die generelle Machbarkeit und prinzipielle Eignung der PEM-Brennstoffzelle für Fahrzeugantriebe nachgewiesen. Zwischenzeitlich wurden Leistungsdichte und Funktion des Brennstoffzellenantriebs kontinuierlich verbessert.

1997 wurde ein Brennstoffzellensystem für einen Nahverkehrsbus (NEBUS) erstellt. Das 250 kW Wasserstoff-Brennstoffzellensystem dieses Busses wird mit Wasserstoff, der sich in Druckgasbehältern auf dem Dach des Fahrzeugs befindet, betrieben. Die gespeicherte Wasserstoffmenge reicht aus für Fahrstrecken von 250 km, was der Tagesfahrleistung von Stadtbussen entspricht.

Neben dem NEBUS wurden von Daimler-Benz weitere Pkw mit Brennstoffzellensystemen vorgestellt. NECAR I, einen MB 100 Transporter, mit dem erstmals ein 50 kW PEM-Brennstoffzellensystem auf die Straße kam. Dieses Fahrzeug war ein rollendes Labor. Das System, bestehend aus 12 einzelnen Stacks der Firma Ballard, 2 x 1 x 1 m groß, wog rund 800 kg und füllte den gesamten Laderaum aus. Gemeinsam mit der Fa. Ballard Power Systems wurde ein kompakter Hochleistungsstack entwickelt. Bereits zwei Jahre später folgte NECAR II. In einem V-Klasse-Fahrzeug fand das System, bestehend aus zwei 25-kW-Stacks, unter der Rückbank Platz. Mit einer Tankfüllung Wasserstoff hatte das Fahrzeug eine Reichweite von rund 320 km im neuen europäischen Fahrzyklus. Der Wirkungs-

grad - von der Wasserstoffflasche bis zum Rad - bestimmte sich bei Rollenprüfstandsmessungen zu 29 %. Für vergleichbare Fahrzeuge mit Dieselmotor lassen sich Wirkungsgrade von ca. 24 % erzielen.

Neben den ZERO-EMISSION-Fahrzeugen wurde 1997 anläßlich der Internationalen Automobilausstellung in Frankfurt erstmals ein besonderes Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug vorgestellt.

Für Individualfahrzeuge ist ein flüssiger Kraftstoff als Energieträger geeigneter als gasförmiger Wasserstoff, da die Betankung des Fahrzeugs einfacher ist und die Bereitstellung des Kraftstoffes über eine nur gering zu modifizierende, vorhandene Infrastruktur erfolgen kann. In diesem Fall wird der Wasserstoff für die Brennstoffzelle an Bord des Fahrzeugs aus dem flüssigen Kraftstoff (i. e. Methanol) während der Fahrt hergestellt. Bei der Gaserzeugung fällt allerdings CO_2 als Nebenprodukt an, und die Effizienz des Antriebs wird, im Vergleich zu Wasserstoffsystemen, geringfügig reduziert. Mit dem Gaserzeugungssystem von NECAR 3 wurde Neuland betreten. Es handelt sich dabei um ein zweisitziges A-Klasse-Fahrzeug. Kofferraum und Fondsitze mußten dem Gaserzeugungssystem weichen. Zukünftige Methanol-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge werden allerdings wieder vollwertige Fondsitze und einen Kofferraum vorweisen können. Es sind vergleichbare Entwicklungsfortschritte zu erwarten, wie zwischen NECAR I und NECAR II. Der prinzipielle Aufbau des gesamten Methanol-Brennstoffzellensystems, einschließlich Luftversorgung und Kühlsystem, ist z. Z. noch relativ aufwendig. Der im Kraftstoff enthaltene Kohlenstoff wird in Kohlendioxid gewandelt und emittiert. Der Ausstoß ist dabei ca. 30 % geringer als bei vergleichbaren Verbrennungsmotoren.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse hat sich Daimler-Benz entschlossen, die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie zur Marktreife als strategisches Unternehmensprojekt zu betreiben.

5 Von der Forschung zur Serienentwicklung

Um neben dem Verbrennungsmotor ein neues Antriebskonzept auf den Markt zu bringen, bedarf es eines höheren Kundennutzens, einer umsetzbaren Marktunterstützungsstrategie und starker Partner.

5.1 Kundennutzen

Brennstoffzellenfahrzeuge müssen besseren Kundennutzen bieten als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Die Schadstofffreiheit spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle, solange die gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte von den Verbrennungsmotoren ebenfalls erreicht werden. Verbesserter Kundennutzen heißt vor allem höhere Wirtschaftlichkeit und bessere Funktionen. Der hohe Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs muß gegenüber dem Verbrennungsmotor einen deutlichen Vorteil bei den Betriebskosten bewirken. Weitaus schwieriger wird es sein, bei den Anschaffungskosten mit heutigen Motoren zu konkurrieren. Dieses wird vermutlich nur gelingen, wenn man die gesamte Fahrzeugkonzeption auf den Brennstoffzellenantrieb hin optimiert. Vorteile gegenüber den verbrennungsmotorischen Fahrzeugen können geringere Anforderungen bzgl. Geräusch- und Schwingungsisolierungen, Nutzung der verfügbaren höheren elektrischen Spannungen im elektrischen Bordnetz und neue elektrische Aktuatoren sein. Sonderentwicklungen sind zu vermeiden, um Kosten so niedrig wie möglich zu halten und die Chancen einer elektrischen Energieversorgung an Bord eines Fahrzeugs zu nutzen, die auch im Stand geräusch- und emissionsfrei betrieben werden kann. Darüber hinaus sollten im Sinne des evolutionären Ansatzes so viele Komponenten wie möglich von den konventionellen Antriebskonzepten übernommen werden, z. B. Wasser- und Ölpumpen, Kompressoren, Kühler, Sensoren und Einspritzkomponenten.

5.2 Umsetzbare Marktentwicklungsstrategie

Wasserstoff und Methanol sind die geeignetsten Kraftstoffe für Brennstoffzellenfahrzeuge. Das Fehlen einer dazugehörigen Infrastruktur für die Betankung der Fahrzeuge wird gern als das größte Hindernis für eine Markteinführung angesehen. Dieses ist einerseits richtig, andererseits kann es aber auch als eine große Chance angesehen werden. Jeder Staat ist sich den Risiken der Abhängigkeit von Erdöl angesichts der damit verbundenen Abhängigkeiten und der begrenzten Verfügbarkeit bewußt. Mit alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff, Erdgas und Alkohole können die mit dem Erdöl verbundenen Probleme hinsichtlich Verfügbarkeit und Umweltverträglichkeit gelöst werden. Die Diskussion um die Brennstoffzelle wird daher von vielen Staaten zum Anlaß genommen, Szenarien einer alternativen Kraftstoffwirtschaft zu entwickeln und zu prüfen. Dieses gilt auch für die Kraftstoffindustrie, die ein unternehmerisches Interesse hat, Zukunftssicherung zu betreiben und langfristig ebenfalls Alternativkonzepte zu entwickeln und einzuführen. Daimler-Benz ist daher sowohl mit der Politik als auch mit der Mineralölindustrie in intensiven Gesprächen, um gemeinsam Markteinführungsstrategien für Brennstoffzellenfahrzeuge zu entwickeln.

5.3 Starke Partner

Den Evolutionssprung Brennstoffzelle allein zu bewältigen, ist selbst für ein Unternehmen wie Daimler-Benz schwer. Deshalb wurde von Beginn an eine enge Zusammenarbeit mit starken Partnern angestrebt. Die seit 1991 bestehende Forschungs- und Entwicklungspartnerschaft zwischen Daimler-Benz und Ballard Power Systems wurde 1997 in eine Kooperation überführt. 1998 wurde die Kooperation um einen weiteren Partner, der Ford Motor Company, erweitert. Der Vertrieb von Brennstoffzellen-Elektro-Antriebssystemen erfolgt weltweit durch die Ballard Automotive.

Die Zusammenarbeit von Fahrzeugherstellern, der Mineralölindustrie und Technologieunternehmen ist von elementarer Wichtigkeit bei der erfolgreichen Überführung der Brennstoffzellentechnologie in die Serienfertigung. Führende Automobilunternehmen agieren in dieser Weise und zeigen damit, daß sie aktiv und in geeigneter unternehmerischer Breite die Zielsetzung verfolgen, mit der Brennstoffzelle für ein dauerhaftes stabiles Zusammenwirken zwischen industriellen, gesellschaftlichen und natürlichen Prozessen zu sorgen.

6 Zusammenfassung

Es ist schwer, sich an den Gedanken zu gewöhnen, eine Alternative zum Verbrennungsmotor entwikkeln zu wollen. Es spricht jedoch gegen die Evolutionserfahrung, wenn man glaubt, daß eine Technologie auf Dauer dominieren würde. Der Verbrennungsmotor hat gezeigt und zeigt noch immer, daß er den immer strenger werdenden Umweltanforderungen gerecht werden kann. Der Aufwand wird dabei immer höher, ein typisches Merkmal der Sättigungstendenz einer technischen Entwicklung.

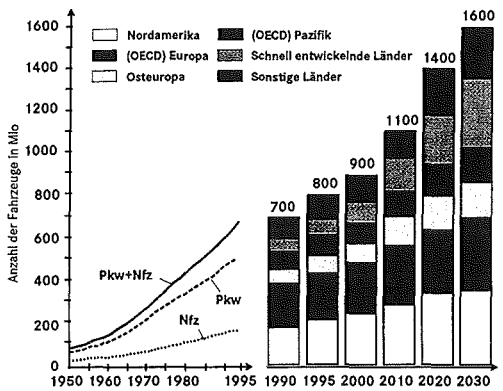
Die Brennstoffzelle weist Eigenschaften auf, die die Aussicht bieten, ein dauerhaftes stabiles Zusammenwirken zwischen industriellen, gesellschaftlichen und natürlichen Prozessen zu schaffen. Die Chance für einen Evolutionssprung in der Antriebstechnik ist damit gegeben. Um ihn erzielen zu können, ist es fundamental, sich nicht allein auf die Zielsetzung der Umweltverträglichkeit zu verlassen. Hohe Umweltverträglichkeit, verbunden mit höheren Kosten und geringerem Kundennutzen, wird vom Markt nicht akzeptiert. Höhere Wirtschaftlichkeit und verbesserte Funktionalität führen zur Begeisterung des Kunden.

Antriebskonzepte nach 2005

Dipl.-Ing. Karl E. Noreikat

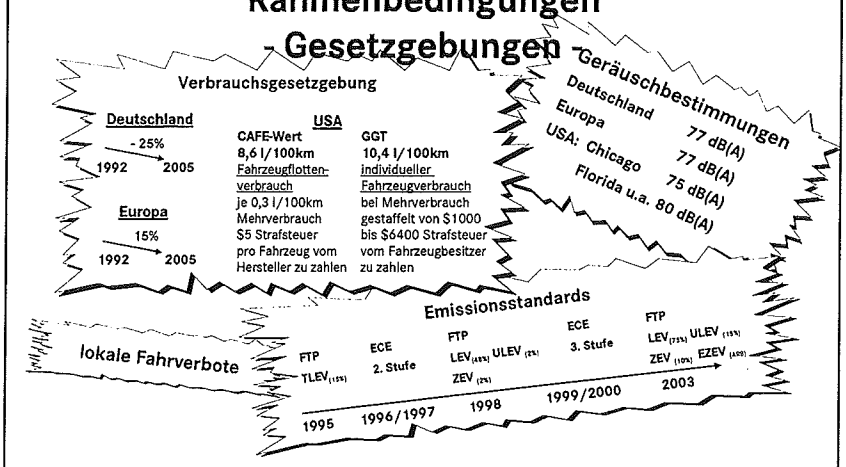
Daimler-Benz AG

Kfz-Bestand weltweit



Quelle: AAMA World Motor Vehicle Data 1994 Edition
European Conference of Minister of Transport: Transport Policy and Global Warming 1993

Rahmenbedingungen - Gesetzgebungen



DAIMLERBENZ AKTIENGESELLSCHAFT

© DaimlerBenz, FT1/EA, Loechle, c:\daten\vortrag\publich.ppt, 24.07.1998 Seite 3

Motivationen zur Entwicklung alternativer Antriebe

- Der Verkehrssektor als größter Ölverbraucher mit weltweit hohen Wachstumsraten, sollte frühzeitig Alternativen erschließen, damit die Mobilität erhalten bleibt!
- Alternative Energieversorgungskonzepte benötigen lange Vorlaufzeiten bis zur Marktdurchdringung. Deshalb ist ein rechtzeitiger/früher Start erforderlich!

DAIMLERBENZ AKTIENGESELLSCHAFT

© DaimlerBenz, FT1/EA, Loechle, c:\daten\vortrag\publich.ppt, 24.07.1998 Seite 4

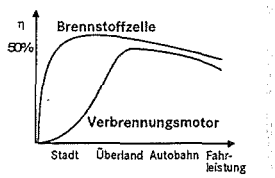
Strategische Ziele für Antriebe

- Reduktion des Energieverbrauchs
- Reduktion der CO_2-Emission
- ZEV-Gesetzgebung erfüllen
- keine weiteren Emissionen
- hohe Kundenakzeptanz durch
  - Verwendung vorhandener Infrastruktur,
  - einfache Betankung,
  - vergleichbare Reichweiten.

Eigenschaften und Vorteile der BZ

- für den mobilen Einsatz -

- Wirkungsgrad der Brennstoffzelle ist höher als der vom Verbrennungsmotor
- Teillastwirkungsgrad ansteigend



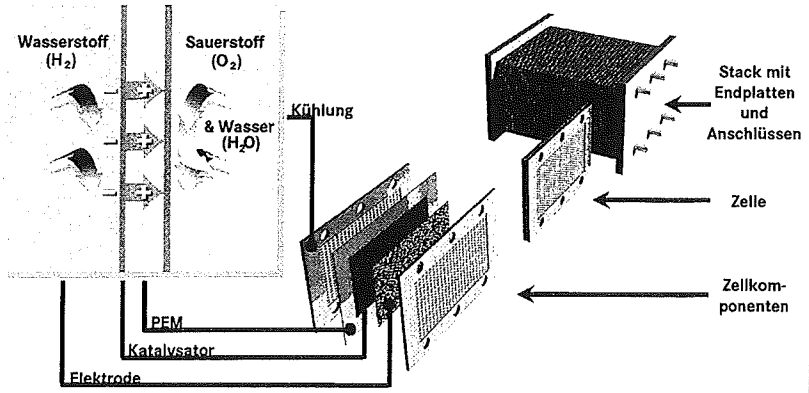
- Brennstoffzelle mit Wasserstoffbereitsstellung führt zu "Zero Emission"
- Reduzierung der CO_2-Emission bei Brennstoffzellen mit Methanol-Reformer
- Keine Schadstoffemissionen
- Dynamik der Brennstoffzelle direkt für E-Antrieb geeignet. Keine Pufferbatterie notwendig.

	Verbr.-motor	BZ
CO_2	●	○
CO	●	◉
HC	●	◉
NO_x	●	◉

Vorteile der Brennstoffzelle

- hoher elektrischer Wirkungsgrad
  (keine Beschränkung durch Carnot-Wirkungsgrad)
- Emissionsarmut / Emissionsfreiheit (keine oder wenig lokale Emission)
- Geräuscharmut (vibrationsfrei und leise)
- mechanische Einfachheit
  - keine bewegten Teile im Zellenblock
  - einfaches/ bzw. kein Getriebe
  - bei Direktradantrieb keine Gelenkwelle, kein Differential, keine Antriebswelle
- geringer Wartungsaufwand, Ölfreiheit, hohe Lebensdauer
- gute Driveability (Fahrleistung elektrisch regelbar)
- kein Energieverbrauch im Stillstand
- einfache Auspuffanlage
- leistungsstarke Bordenergieversorgung (Klimatisierung, Heizung)
- hohe Flexibilität durch modularen Aufbau

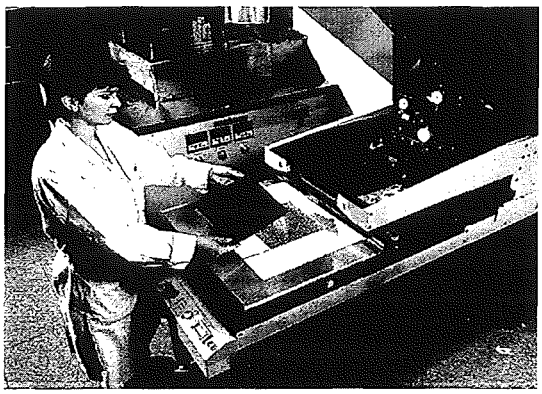
Die PEM-Brennstoffzelle



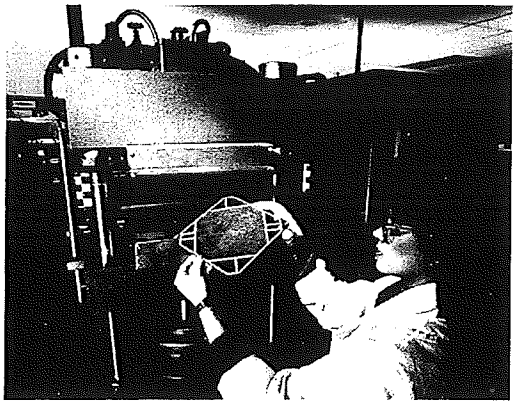
Die Proton Exchange Membrane

- Der Elektrolyt besteht aus einer Polymerfolie
- Lediglich einige Zehntel Millimeter dick
- Beidseitig mit einem platinhaltigen Katalysator beschichtet
- Der Wasserstoff wird auf einer Seite der Membran ionisiert; die Wasserstoffionen durchdringen die Membran, reagieren mit dem Sauerstoff auf der anderen Seite und bilden Wasser.

Die Katalysatorbeschichtung

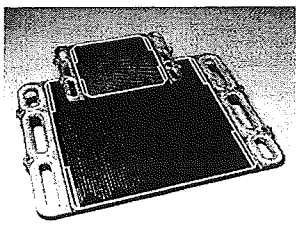


MEA - Membrane Electrode Assembly



© DaimlerBenz, FT1/EA, Loechle, c:\daten\vortrag\pptpubl\publ.ppt, 24/07/1998 Seite 11

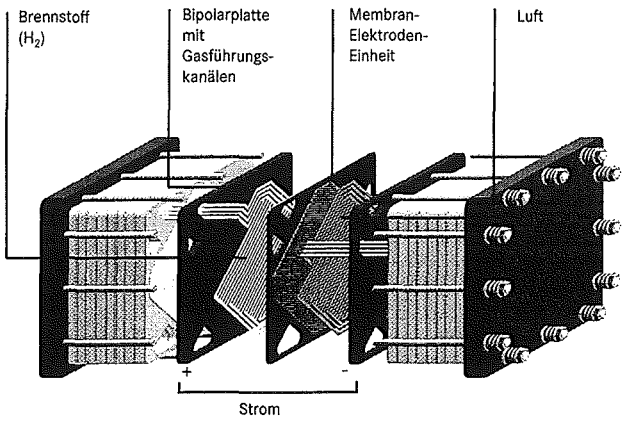
Die Bipolarplatten



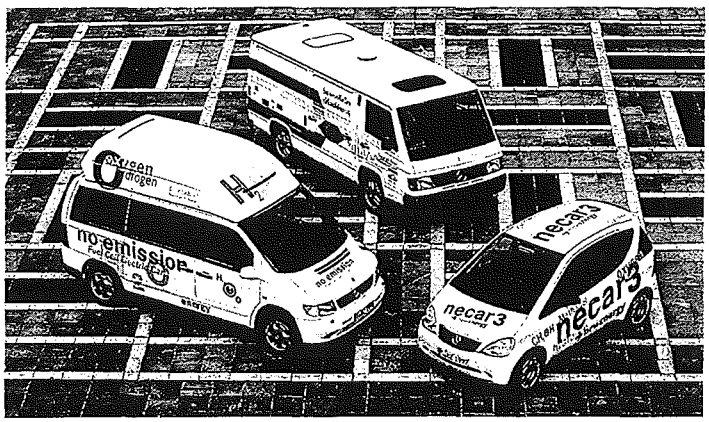
- Lenken den Wasserstoff und die Luft in einem Kanalsystem über die Oberflächen des Katalysators
- Schließen die Zelle auf beiden Seiten ab
- Leiten die Reaktionswärme ab und stellen die elektrische Verbindung zur angrenzenden Zelle her.

© DaimlerBenz, FT1/EA, Loechle, c:\daten\vortrag\pptpubl\publ.ppt, 24/07/1998 Seite 12

Der Aufbau des Stacks



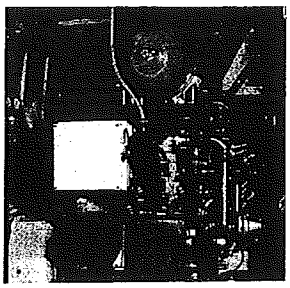
NECAR I, II und 3



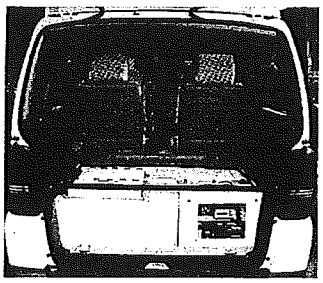
Entwicklungsfortschritt

- Brennstoffzellensysteme für NECAR I und II -

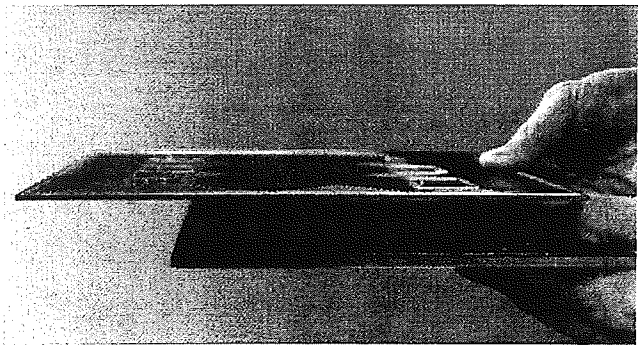
NECAR I



NECAR II



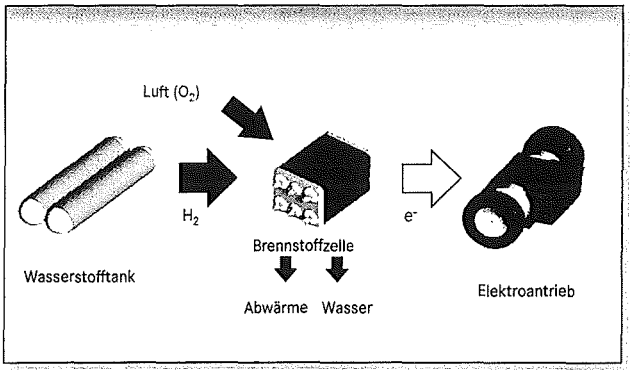
Entwicklung der Bipolarplatten



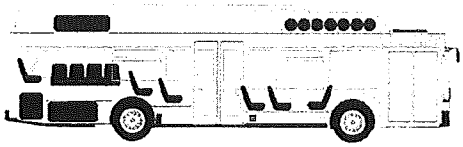
NEBUS

Energiekette NEBUS

- Wasserstoff Brennstoffzellenantrieb -



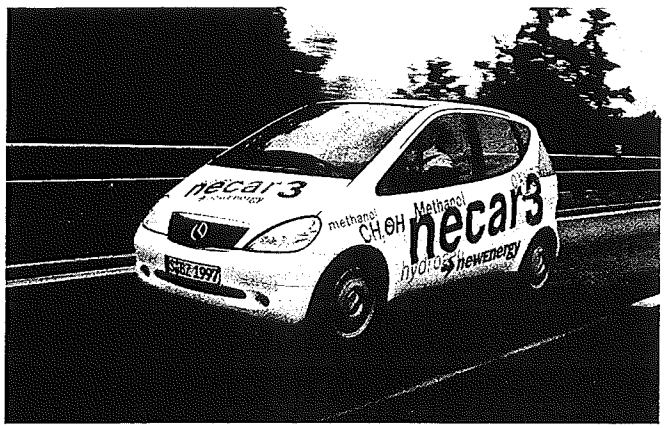
NEBUS



➢ Brennstoffzellensystem	Leistung (10 Stacks)	250 kW
	Leistungsdichte	5,6 kg/kW (178 W/kg)
	Spannungsniveau	440 - 720 V
➢ Wasserstoff-Drucktanks	Volumen	1050 l
	Druck	300 bar
➢ Antriebssystem	Elektro-Antrieb	Dauerlstg. 2 x 50 kW maximal 2 x 75 kW
	Höchstgeschwindigkeit	80 km/h
	Reichweite	250 km
➢ zul. Gesamgewicht		18 000 kg

© DaimlerBenz, FT1/EA, Loechle, eMail: loechle@dbag.ulm.daimlerbenz.com, 24/07/1998 Seite 19

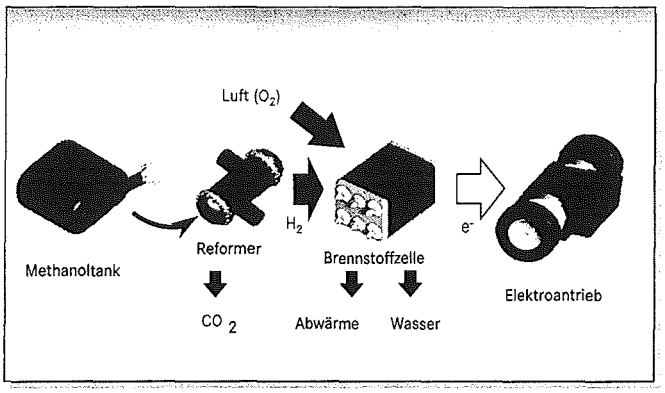
NECAR 3



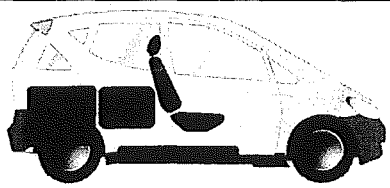
© DaimlerBenz, FT1/EA, Loechle, eMail: loechle@dbag.ulm.daimlerbenz.com, 24/07/1998 Seite 20

Energiekette NECAR 3

- Methanol Brennstoffzellenantrieb -

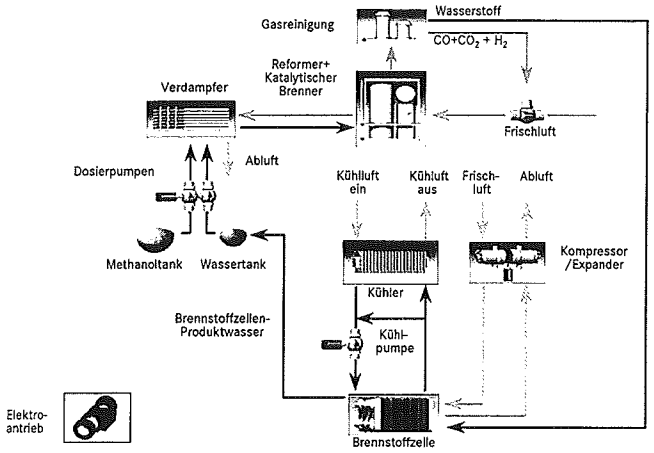


NECAR 3



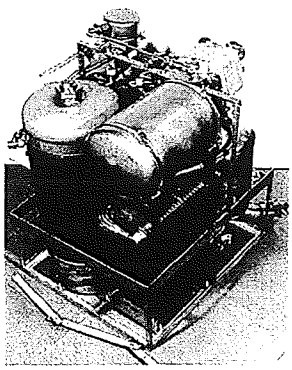
➢ Brennstoffzellenantrieb	Leistung (2 Stacks)	50 kW	
	Leistungsdichte	15 kg/kW (66 W/kg)	
	Spannungsniveau	185 - 280 V	
➢ Tank	Volumen	38 l	
➢ Antriebssystem	Elektro-Antrieb	Dauerleistg.	33 kW
		maximal	45 kW
	Reichweite	400 km	
➢ zul. Gesamtgewicht		1750 kg	

Das Methanol-Luft-Brennstoffzellensystem



Gaserzeugung NECAR 3

- Reformer & Katbrenner -



Reformer

$CH_3OH + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO_2$
[endotherm] (+ CO)

Katbrenner

$H_2 + 0{,}5\ O_2 \rightarrow H_2O$

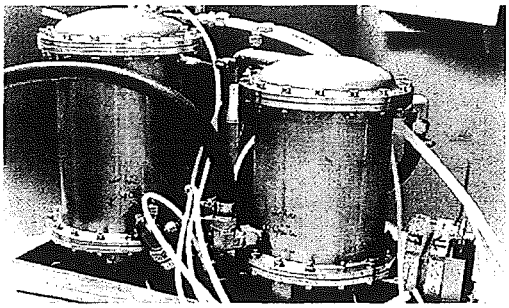
$CH_3OH + 1{,}5\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
[exotherm]

Gasreinigung NECAR 3

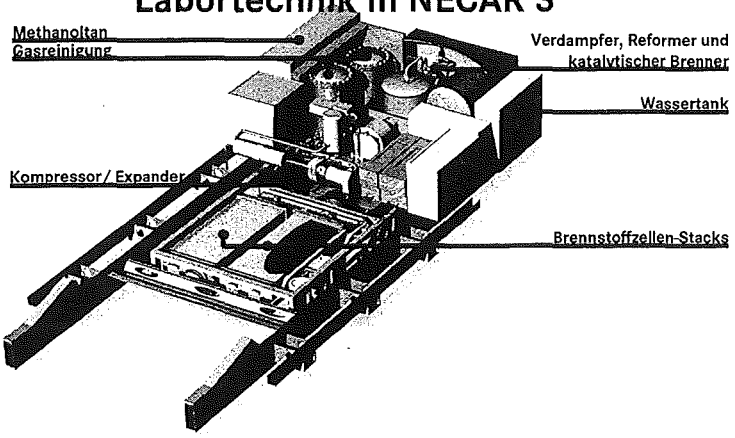
- 3 stufiger CO-Oxidator -

CO-Oxidator

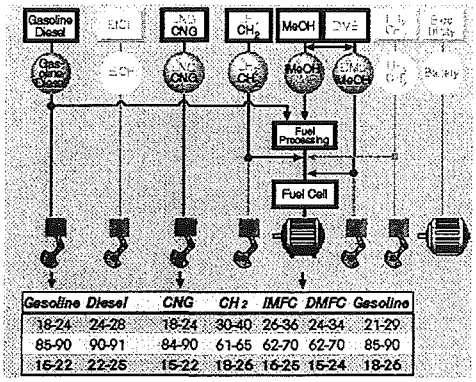
$CO + 0{,}5\ O_2 \rightarrow CO_2$



Labortechnik in NECAR 3



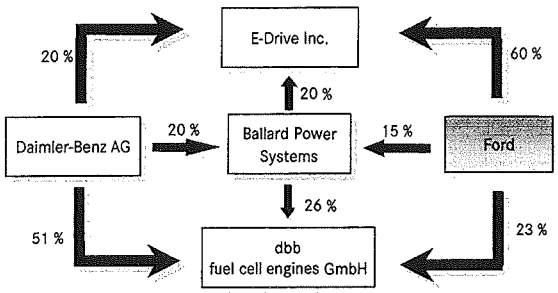
Primärenergetischer Vergleich verschiedener Kraftstoffe



Wirkungsgrade [%]	Gasoline Diesel		CNG	CH_2	IMFC	DMFC	Gasoline
Fahrzeugbetrieb	18-24	24-28	18-24	30-40	26-36	24-34	21-29
Kraftstoffbereitstellung	85-90	90-91	84-90	61-65	62-70	62-70	85-90
Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugbetrieb	16-22	22-25	15-22	18-26	16-25	15-24	18-26

- Quelle: Prof. Höhlein - KFA Jülich / Dr. Isenberg - Daimler-Benz AG -

Die Daimler-Benz/ Ballard/ Ford Kooperation



Ballard Automotive

BPS dbb E-Drive

Stand: 2/98

Energiewirtschaft

Energie und Wirtschaft

Joachim Grawe

Universität Stuttgart

I. Definitionen

Die Wirtschaft braucht Energie. Zugleich stellt sie Energie bereit.

Unter „Energie" werden die ökonomisch definierten Arten der Energie auf den verschiedenen Stufen verstanden,

- 1. Stufe: Primärenergie (Rohenergie)
- 2. Stufe: Endenergie (teils Primär-, teils Sekundärenergie)
- 3. Stufe: Nutzenergie

Erbracht werden sollen letztlich bestimmte „Energie-Dienstleistungen". Dieser Begriff ist wenig glücklich, weil mehrdeutig. Er bezeichnet sowohl eine Tätigkeit (etwa in der Zusammensetzung „Energie-Dienstleistungs-Unternehmen") wie das Ergebnis des Zusammenwirkens dieser Tätigkeit mit anderen Faktoren (Geräte, Verbraucher-Verhalten) zur Bedürfnis-Befriedigung.

„Wirtschaft" umfaßt alle Aktivitäten des gesellschaftlichen Wirtschaftens:

- Urproduktion (Bergbau, Landwirtschaft)
- Verarbeitendes Gewerbe (Industrie, Handwerk)
- Verkehr/Transport
- Handel
- die verschiedenen Dienstleistungen, die zusammen mit Handel und Verkehr den tertiären Sektor bilden (u.a. Banken, Versicherungen, Gaststätten).

Teil der Wirtschaft ist auch die Energiewirtschaft (siehe III).

II. Die Wirtschaft als Energieverbraucher

Die Wirtschaft ist vor den privaten Haushalten und dem Staat der bedeutendste Energie-Verbrauchs-Sektor (1).

1. Anteil am Energie- und Stromverbrauch

Das gilt sowohl für die Endenergie insgesamt wie für die besonders wichtige Elektroenergie (Abb. 1 und 2). Die abweichende Einteilung beruht auf dem verfügbaren statistischen Daten-Material. Der Rückgang der Industrie und der Anstieg sowohl von Gewerbe/Handel/Dienstleistungen wie des Verkehrs zeigen Trends an. Vom verbrauchten Strom stammt rd. ein Sechstel aus Eigenanlagen der Industrie und der Bahn. Den überwiegenden Teil liefern die Kraftwerke der öffentlichen, d.h. der Allgemein-Versorgung dienenden, Elektrizitätswirtschaft.

Verbrauchssektor	1970	1990	1996
Industrie	122,7	101,6	81,9
	41,5	31,5	24,9
Verkehr	46,8	81,1	88,7
	15,8	25,2	27,0
Übrige Wirtschaft	45,9	53,4	56,7
	13,5	16,6	17,3
Haushalte	74,4	81,2	100,1
	25,1	25,2	30,5
Militär/Staat	6,2	4,8	1,1
	2,1	1,5	0,3
Gesamtverbrauch	295,9	322,1	328,5
	100	100	100

Anmerkung: Alle Werte für Gesamtdeutschland (1996 vorläufig). Der Verkehr schließt den privaten Verkehr ein (Anteil: etwa 50 %). Die „übrige Wirtschaft" umfaßt 1990 und 1996 Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, 1970 alle noch nicht näher aufgeschlüsselten „Kleinverbraucher".
Quelle: BMWi nach AG Energiebilanzen

Abb. 1: Endenergieverbrauch nach Verbrauchssektoren in Mio t SKE (oben) und Prozent (unten)

Verbrauchssektor	1970	1990	1996
Industrie	131,8	232,1	230,7
Verkehr	7,9	15,3	16,5
Handel/Gewerbe	19,4	56,8	57,5
Landwirtschaft	5,1	9,3	7,9
Haushalte	43,1	122,2	128,2
Öff. Einrichtungen	11,3	37,2	36,9
Gesamtverbrauch	218,6	472,9	477,8

Anmerkungen: 1 TWh = 1 Milliarde kWh. Die Zahlen für 1970 beziehen sich nur auf die alten Bundesländer. Das Jahr 1991 wurde gewählt, weil dafür erstmals eine gesamtdeutsche Strombilanz vorliegt. Der westdeutsche Verbrauch betrug 1990 398,2 TWh.
Quelle: BMWi, VDEW

Abb. 2: Stromverbrauch nach Verbrauchssektoren in TWh

Energie wird von der Wirtschaft teilweise auch als Rohstoff, also zu nicht-energetischen Zwecken, eingesetzt, vor allem Koks in Hochöfen und Erdgas sowie Mineralöl-Produkte in der Chemie. Hierfür werden jährlich nochmals mehr als 30 Millionen (Mio) t SKE verbraucht (2).

In eine energetische Gesamt-Bilanz für die einzelnen Güter und Leistungen geht auch die Energie ein, die für die Herstellung von Vorprodukten und das Sachkapital (Gebäude, Maschinen, Werkzeuge) aufzuwenden war. Man schätzt, daß diese indirekte oder „graue" Energie im Durchschnitt mehr als nochmals so hoch ist wie der direkte Energieaufwand, bei starker Streuung zwischen den Branchen (3).

2. *Energie als Produktions-Faktor*

Ohne ein Mindestmaß an Energie kann nicht produziert werden. Diese läßt sich, soweit überhaupt, nur in Grenzen durch Kapital oder Arbeit substituieren, jedenfalls wenn wir nicht in primitive Verhältnisse zurückfallen wollen.

Energie ist daher heute als essentieller Produktions-Faktor anerkannt. Es kommt jeweils auf die optimale Kombination von Energie mit Arbeit und Kapital sowie mit Rohstoffen und Kreativität (4) bzw. Knowhow an. Der Beitrag der Energie (wie derjenige der anderen Produktions-Faktoren) wird bestimmt durch ihre an den Preisen ablesbare – Knappheit, Grenz-Produktivität und Substitutions-Elastizität (5). Energie wird für praktisch alle Produktions-Prozesse gebraucht. Auch der tertiäre Sektor kommt regelmäßig ohne beträchtlichen Einsatz von Energie für Raumheizung, Beleuchtung, Büromaschinen, Kommunikation, Zubereitung von Speisen und Getränken etc. nicht aus. Besonders hoch ist der Energieverbrauch (besser: „Energieaufwand" in der Grundstoff- und der Produktionsgüter-Industrie) Anteil am industriellen Energieverbrauch zusammen 70 Prozent) sowie im Transport-Sektor. Die deutschen Exportgüter sind im Durchschnitt energie-intensiv. Im Verarbeitenden Gewerbe werden schätzungsweise gut 50 Prozent der Endenergie für Prozeßwärme, 25 Prozent für Raumwärme, etwa 20 Prozent für Kraft (mechanische Energie) und weniger als 4 Prozent für Beleuchtung aufgewandt.

3. *Energie und Strukturwandel*

Die staunenswerten Produktivitäts-Fortschritte der letzten 200 Jahre wurden getragen von dem vermehrten Energie-Einsatz. Zwischen Energie und wirtschaftlichem Strukturwandel besteht ein enger Zusammenhang. Sie beeinflussen sich gegenseitig. Das läßt sich sowohl am intra-industriellen (innerhalb einer Branche) wie am inter-industriellen (zwischen den Branchen) Strukturwandel aufzeigen (6). Geht der Anteil der Grundstoff-Industrie zurück, so sinkt tendenziell der gesamtwirtschaftliche Energieverbrauch. Umgekehrt kann dieser Rückgang durch Probleme bei der Bereitstellung preisgünstiger Energie verursacht sein. In der Chemischen Industrie hat der Übergang von der Herstellung chemischer Grundstoffe sowie von Düngemitteln zu veredelten Produkten maßgeblich beigetraten zur Halbierung der Energie-Intensität von 1970 noch 406 auf 1995 200 kg SKE je 1000 DM Brutto-Wertschöpfung.

4. *Die besondere Rolle des Stroms*

Besonders hervorzuheben ist die Rolle der Elektroenergie für Mechanisierung und Automation in der gewerblichen Wirtschaft, aber auch z.B. historisch bei der Erhaltung des Handwerks durch den Elektromotor (in Konkurrenz zu großen industriellen Fertigungen mittels Dampfmachinen) (7). Strom hat die Arbeit erleichtert und die Arbeitsplätze „humanisiert" (übrigens auch in den privaten Haushalten). Er ist die „Modernisierungs-Energie" schlechthin. Als exakt regelbare, nahezu verlustfrei einsetzbare, emissionsfreie „Fein-Energie" ersetzt die Elektroenergie immer mehr die fossilen Brennstoffe. Damit ermöglicht sie energiesparende Produktions-Verfahren und hohe Umwelt-Standards.

Der Anteil des Stroms am gesamten Energie-Verbrauch der Industrie ist 1960-95 kontinuierlich gestiegen von 11 auf 28 Prozent (8). Alle Prognosen erwarten eine weitere Erhöhung zu Lasten vor allem der „Grob-Energien" Kohle und Öl. Anders als deren Verbrennung soll der industrielle Strombedarf noch absolut leicht zunehmen. Im tertiären Sektor soll die Zunahme ausgeprägter

ausfallen. Der Anteil der Industrie am Stromverbrauch würde dadurch weiter zurückgehen. Im Verkehr hängt die Entwicklung davon ab, ob Personen- und Güter-Transporte künftig stärker auf die Schiene (Elektro-Traktion) verlagert werden können.

5. *Energie als Standort-Faktor*

Im 19. Jahrhundert spielte das reichliche Vorhandensein preisgünstiger Energie, etwa von Steinkohle im Ruhrgebiet oder Wasserkraft am Hochrhein eine zentrale Rolle für den Aufbau energie-intensiver Industrien und die Errichtung von Kraftwerken. Auf bayerische Initiative wurden in den 1960er und 1970er Jahren als wichtiger Impuls für die wirtschaftliche Entwicklung Öl-Pipelines in den süddeutschen Raum gelegt und Raffinerien angesiedelt.

Die Küstenländer hatten über die Anlandung von Öl und Importkohle in ihren Häfen Vorteile. Über Flüsse und Kanäle waren auch Kraftwerke in Süddeutschland (z.B. Mainz, Mannheim, Erlangen) günstig mit Steinkohle zu versorgen. Bis zu etwa 500 km ist der Kohle-Transport nach wie vor billiger als derjenige von im Revier oder an der Küste erzeugten Strom (9). Mit dem Aufkommen der Kernenergie und dem Ausbau eines weiverzweigten Erdgas-Netzes hat die Ressourcen-Nähe als Standort-Faktor entscheidend an Bedeutung verloren.

6. *Energiekosten und –preise*

Zunehmend wichtiger werden dagegen im internationalen Wettbewerb die Energiekosten für die Wirtschaft. Zwar beträgt ihr Anteil an den gesamten Produktionskosten der Industrie nur knapp über 2 Prozent. Doch damit übersteigen sie die bei 1,5 Prozent liegende Umsatz-Rendite (10). Der Durchschnitts-Wert täuscht zudem. Einzelne Branchen wie die Eisenschaffende Industrie (11,1 Prozent), die Zellstoff-, Holzschliff-, Papier- und Pappe-Erzeugung (9,1 Prozent) und die Nichteisen-Metall-Erzeugung und –Halbzeuge (5,2 Prozent) ragen heraus. Innerhalb dieser Branchen kommen bestimmte energie-intensive Produktionen (Aluminium-Erzeugung, Herstellung chemischer Grundstoffe wie Chlor u.a.) auf noch wesentlich höhere Werte. Ferner besteht eine „Energiepreis-Sensibilität" bei Betrieben, die große Mengen an Energie beziehen, so daß die Energiekosten absolut ins Gewicht fallen. Schließlich können Produktions-Einstellungen oder –Verlagerungen ins Ausland, für die die Energiekosten mit ausschlaggebend waren, sich mittelbar auf Zulieferer und Weiterverarbeiter auswirken (11).

Wegen des Vordringens des Stroms wird verstärkt auf dessen Kosten geachtet. Die deutschen Strompreise sind zwar in den letzten 10 Jahren real um 30 Prozent gesunken. Außer für Größtkunden sind sie aber weiterhin um 3 bis 4 Pfg je kWh (entsprechend einem Viertel) höher als in Frankreich, den Niederlanden und Skandinavien (Abb. 3). Dies liegt in politischen Sonderlasten der Versorgungsunternehmen hierzulande und in strukturellen Nachteilen (weniger Wasserkraft) begründet. Die Ausgleichsabgabe auf den Stromverbrauch zur Subventionierung der heimischen Steinkohle („Kohlepfennig") ist zwar 1996 weggefallen, nachdem das Bundesverfassungsgericht sie für grundgesetzwidrig erklärt hatte. Dafür subventionieren die Stromverbraucher seit 1991 nach dem (volkswirtschaftlich als schlechtes Mittel zum guten Zweck verfehlten und wohl ebenfalls verfassungswidrigen) Stromeinspeisungsgesetz die Betreiber von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien mit jährlich steigenden Beträgen (Subventions-Anteil an den Einspeise-Vergütungen 1997: mehr als 400 Mio DM). Weitere Belastungen stellen die künstliche Verteuerung der Kernenergie durch vielfältige Behinderungen, häufige Auflagen zur Verkabelung von Leitungen auch höherer Spannung und die in Europa strengsten Umweltschutz-Anforderungen für Kraftwerke dar, die dringend der Harmonisierung bedürfen (12).

1. STROMPREIS für einen Industriekunden (10 MW, 5000 Stunden/Jahr) in Pfg. je kWh bei	
- Electricité de France	9,5
- Energie-Versorgung Schwaben	13,9
- DIFFERENZ	4,4
2. Die deutsche hatte im Vergleich zur französischen Stromversorgung folgende MEHRKOSTEN	
- gesellschaftlich bedingt (Lohnkosten, Verkabelung)	2,4
- politisch bedingt (Umweltschutz, Behinderung KE,STREG,KA)	1,8
- natürlich bedingt (weniger Wasserkraft)	0,3
SUMME	4,5

Anmerkungen: MW=Megawatt, KE=Kernenergie, StrEG=Stromeinspeisungsgesetz, KA=Konzessionsabgabe, Quelle: EVS, EWI Köln

Abb. 3: Preis- und Kosten-Differenz 1996 Deutschland-Frankreich beim Strom

7. *Energie-Intensität und Energie-Produktivität*

Beträchtlich gemindert werden konnten die Energiekosten durch Erfolge bei der Energie-Einsparung. Deutschland hat 1996 zur Erzeugung von 1000 DM Brutto-Inlandsprodukt (BIP) 158 kg SKE Primärenergie aufgewandt. Das entspricht etwa die Hälfte des durchschnittlichen spezifischen Energieverbrauchs aller Länder und 75 Prozent desjenigen der OECD-Staaten. Die Energie-Produktivität (BIP durch Primärenergie-Verbrauch) ist daher hierzulande hoch. Ihr Kehrwert, die Energie-Intensität, ist in Westdeutschland zwischen 1973 und 1995 von 217 auf 149 kg SKE gesunken. Unter den Industrie-Nationen liegt Deutschland hinsichtlich der Erfolge bei der rationelleren Energie-Verwendung in den letzten Jahrzehnten mit an der Spitze (Abb. 4). Bezogen nur auf die Industrie fielen diese noch deutlicher aus. Von dem Ausgangswert 180 im Jahre 1970 ging der Energie-Eiunsatz bis 1996 auf weniger als 100 kg SKE je 1000 DM Netto-Produktion zurück. Der spezifische Brennstoff-Verbrauch wurde halbiert. Dagegen blieb die Strom-Intensität in etwa konstant, da sogar überproportionale Effizienz-Verbesserungen durch Substitutions-Effekte ausgeglichen wurden.

Land	Energie-Intensität		Veränderung
	1973	1994	in Prozent
Deutschland	425	274	-36
Irland	443	304	-31
Grossbritannien	452	312	-31
Dänemark	297	212	-29
Niederlande	462	330	-29
Italien	274	196	-28
Österreich	297	220	-26
Belgien	496	368	-26
Frankreich	316	271	-14
Finnland	368	351	-5
Schweden	337	322	-4
Spanien	237	269	+14
Griechenland	318	394	+24
Portugal	256	373	+46
EU-Mittel	396	312	-22

Anmerkungen: Werte für Gesamtdeutschland. Luxemburg ist ein nicht vergleichbarer statistischer Sonderfall. Quelle: OECD/IEA, VDEW

Abb. 4: Entwicklung der Energie-Intensität in Europa 1973 bis 1994 in kg SKE je 1000 $ (1990) realem BIP und Prozent

Weitere technische Energiespar-Potentiale sind vorhanden. Angaben über deren Größenordnung sind aber, selbst wenn sie auf differenzierten Branchen-Analysen beruhen, mit Vorsicht aufzunehmen. Die Situation der einzelnen Betriebe ist zu unterschiedlich. Aus ökonomischen, finanziellen oder nicht dem Kalkül zugänglichen Gründen läßt sich immer nur ein Teil des technischen Potentials realisieren. Andererseits kann sich dieses durch neue Entwicklungen vergrößern. Erhebliche Auswirkungen könnte weiteres Recycling von Altmaterial haben. Heute werden z.B. 90 Prozent der grünen und je 50 Prozent der braunen und weißen Flaschen sowie des Papiers wiederverwertet. Der Energieverbrauch zur Papier-Herstellung kann dadurch halbiert, derjenige zur Glasschmelze um 25 Prozent und derjenige zur Aluminium-Erzeugung um 90 Prozent gesenkt werden.

III. Die Energiewirtschaft als Teil der Wirtschaft

Gesondert zu betrachten ist die Energiewirtschaft. Sie liefert Energie, aber sie verbraucht zugleich Energie, etwa in Kraftwerken. Im Rahmen dieses Vortrags können nur Schlaglichter auf ihre Struktur geworfen werden.

1. Wechselwirkungen mit der verbrauchenden Wirtschaft

Zur Energiewirtschaft zählen alle mit der Deckung des Energiebedarfs befaßten , also in Gewinnung, Umwandlung, Transport, Verteilung, Lagerung, Ein- und Ausfuhr sowie Anwendung bei Dritten (samt Energieberatung und Energie-Dienstleistungen) von Energie tätigen Unternehmungen. Sie sind unterschiedlichen Stufen im Sinne von II 1 zuzuordnen.

Zwischen der Wirtschaft, die Energie (ver)braucht, und der Energiewirtschaft, die diese bereitstellt, bestehen vielfältige Wechselbeziehungen. So beeinflußt die Energie-Nachfrage die Struktur der Energiewirtschaft, sowohl die relative Bedeutung ihrer Teil-Sparten wie innerhalb dieser die Anzahl und Größe der Unternehmen. Der umgekehrte Einfluß wurde schon in II 3 skizziert.

2. *Umsatz, Investitionen, Arbeitsplätze*

Das volkswirtschaftliche Gewicht der Energiewirtschaft läßt sich anhand einiger Kennzahlen verdeutlichen. Seit der Wiedervereinigung verbraucht Deutschland jährlich rd. 500 Mio. t SKE Primärenergie. Es ist damit der fünftgrößte Energiemarkt der Welt (Abb. 5). Die Unternehmen aller Sparten der Energiewirtschaft mit 20 und mehr Beschäftigten setzen 1995 rd. 338 Milliarden (Mrd.) DM um. Das entspricht knapp einem Sechstel des Wertes für das gesamte Produzierende Gewerbe (Bergbau + Verarbeitendes Gewerbe). Zur Erwirtschaftung des BIP trägt die Energiewirtschaft mir ihrer Wertschöpfung schätzungsweise 6 Prozent bei (13).

Energieträger	Mio t SKE	Prozent
Mineralöl	195,4	39,5
Erdgas	101,8	20,6
Steinkohle	69,7	14,1
Kernenergie	63,4	12,8
Braunkohle	54,3	11,0
Wasserkraft + Windenergie	2,5	0,5
Sonstige	7,3	1,5
Insgesamt	494,4	100

Anmerkungen: Vorläufige Werte. Die Position „Sonstige" umfaßt Holz, Torf, Klärschlamm, Müll sowie den Außenhandels-Saldo beim Strom. Quelle: AG Energiebilanzen

Abb. 5: Primärenergieverbrauch im Inland 1997 (vorläufig) nach Energieträgern

Deutlich höher ist ihr Anteil an den Investitionen. 1995 investierte sie knapp 30 Mrd. DM und damit ein Viertel des Volumens des gesamten Produzierenden Gewerbes. 2/3 davon entfielen auf die Elektrizitätswirtschaft (einschließlich Eigenanlagen von Industrie und Bahn). Die öffentliche Elektrizitätswirtschaft ist seit Jahren der größte Investor.

Von allen Beschäftigten im Produzierenden Gewerbe sind nur 5 % (450000 Personen) in der Energiewirtschaft tätig. Diese geringe Zahl (1,3 Prozent aller Erwerbstätigen) einerseits und die hohe Investitions-Quote (Verhältnis Investitionen zu Umsatz) andererseits zeigen die hohe Kapital-Intensität und geringe Arbeits-Intensität der Energiewirtschaft heute. Umstrukturierungen in diesem Bereich, wie einige politische Kräfte sie anstreben, würden nur geringe Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt haben.

3. *Importe von Energie*

4. *Mineralölwirtschaft*

5. *Kohlewirtschaft*

6. *Gaswirtschaft*

Diese 4 Abschnitte sind aus Platzgründen nicht mit abgedruckt. Der Leser wird auf das zitierte Werk von Schiffer verwiesen.

7. *Elektrizitätswirtschaft*

Der in Deutschland verbrauchte Strom wird fast ausschließlich im Inland erzeugt. Ein- und Ausfuhren über das europäische Verbundnetz halten sich in den meisten Jahren weitgehend die Waage. 88 Prozent der Netto-Stromerzeugung stammten 1997 aus den Kraftwerken der öffentlichen Versorgung. Die Industrie steuerte 10, die Deutsche Bahn und private Kleineinspeiser je 1 Prozent bei.

Nach wie vor existieren mehr als 900 Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) in Deutschland. Zumeist sind es kleine, auf lokale Verteiler-Funktionen beschränkte, aber im (horizontalen) Querverbund mit Gas, Wasser u.a. arbeitende Werke. Manche größeren haben eigene Erzeugungs-Kapazitäten. Alle drei Stufen (Erzeugung, Fern-Übertragung, Verteilung) vereinigen 5 der 8 großen Gesellschaften in sich, denen Teile des europäischen Verbundnetzes gehören, nämlich RWE Energie, Energie Baden-Württemberg (seit kurzem enflochten unter einer Holding), VEW Energie, Hamburgische Electricitäts-Werke (HEW) und Berliner Licht und Kraft (Bewag). Die ostdeutsche VEAG betreibt Verteilung gar nicht, Preußen Elektra und Bayernwerk nur unmittelbar über Beteiligungsgesellschaften.

Die Elektrizitätsversorgung ist durch technisch-wirtschaftliche Besonderheiten wie Leitungsgebundenheit und mangelnde Speicherfähigkeit gekennzeichnet. Beide bedingen, da zur Vermeidung volkswirtschaftlich kostspieliger Versorgungs-Ausfälle stets jede nachgefragte Leistung bereitgestellt werden und entsprechende Kapazitäten vorgehalten werden müssen, eine extrem hohe Kapital-Intensität und langfristige Kapital-Bindung. Seit Ende April 1998 ist der deutsche Strommarkt jedoch liberalisiert (14). Der örtliche und regionale Gebietsschutz wurde aufgehoben. Die Erzeugung ist frei. Schon im Vorgriff darauf haben sich Struktur-Veränderungen abgezeichnet: Fusionen, Beteiligungen, Engagements ausländischer Unternehmen in Deutschland, Bestrebungen zu dauerhaften Kooperationen (z.B. gemeinschaftlicher Einkauf), Markt-Eintritt von Stromhändlern und verstärktes Contracting.

8. *Verflechtungen*

Auch dieser Abschnitt kann nicht abgedruckt werden. Die beste Quelle hierfür ist nach wie vor die jeweils aktuelle Ausgabe des Handbuchs der Commerzbank „Wer gehört zu wem?"

IV. Erwartungen der verbrauchenden Wirtschaft an die Energiepolitik

Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit (Minimierung der volkswirtschaftlichen Kosten, Erschwinglichkeit) und Umweltverträglichkeit (einschließlich der Klima-Vorsorge) sind die Oberziele der Energiepolitik. Sie dienen zugleich einer nachhaltigen Entwicklung („Sustainable development"). Ihnen ist auch die Energiewirtschaft verpflichtet. Dabei gilt es, in der jeweiligen konkreten Situation zwischen den drei konkurrierenden Zielen ein hohes Maß an Kongruenz herbeizuführen. Keines von ihnen, erst recht keine einzelne Handlungs-Option wie etwa das Energiesparen, darf verabsolutiert werden. Energie-Knappheit und hohe Energiepreise können, wie viele Volkswirtschaften der 3. Welt belegen, die Wirtschafts-Tätigkeit negativ beeinflussen. Die Aufgabe besteht in der Optimierung (nicht Maximierung oder Minimierung) des Energie-Einsatzes. In der aktuellen Auseinandersetzung um das relative Gewicht der Ziele zueinander kommt der Energie verbrauchenden Wirtschaft ein gewichtiger Part zu. Sie formuliert ihre Erwartungen an Politik und Energiewirtschaft.

1. Liberalisierung der Energiemärkte

Seit Mitte der 80er Jahre die Energiemärkte wieder in Käufermärkte umschlugen, hat die Wirtschaft massiv auf den Abbau der Subventionen für die heimische Steinkohle und die Liberalisierung der Strom- und Gasmärkte gedrängt. Für beide Bestrebungen fand sie Verbündete. Sie sind erfolgreich gewesen.

1997 verständigten sich Bundesregierung, Bergbau und die damalige Industrie-Gewerkschaft Bergbau und Energie auf einen neuen Finanzrahmen für die Unterstützung der heimischen Steinkohle. Die Absatzhilfen werden danach von 1996 mehr als 10 bis 2005 auf 5,5 Mrd. DM jährlich abgesenkt. Die Kohle-Förderung wird entsprechend weiter zurückgeführt auf 30 Mio. t (1996: 48 Mio. t). Elektrizitätswirtschaft und Eisen- und Stahl-Industrie als die wesentlichen Abnehmer beziehen zu Weltmarkt –Preisen (15). Mit dieser Regelung sind die Forderungen der verbrauchenden Wirtschaft, zu denen insoweit auch die Kraftwerke gehören, erfüllt. Die Beibehaltung eines Sockels an inländischer Produktion macht auch in ihren Augen Sinn wegen der spezifischen Qualitäten sowie der Standortnähe und der damit gesicherten schnellen Verfügbarkeit von Ruhr- und Saar-Kohle.

Der Strommarkt ist liberalisiert (siehe III 7). Für den Erdgasmarkt ist am 22.06.1998 die parallele Binnenmarkt-Richtlinie erlassen worden (16). Sie ist bis zum August 2000 in nationales Recht umzusetzen. Das neue deutsche Energierecht hat dafür teilweise schon Vorsorge getroffen. Bei der Umsetzung in die Praxis, in erster Linie bei den „Durchleitungen" durch Netze Dritter, wird auch die Kartellaufsicht eine Rolle zu spielen haben. Für die verbrauchende Wirtschaft sind neben der bilateralen Verständigung („Verbändevereinbarung über die Bestimmung von Durchleitungs-Entgelten" vom 22.05.1998) ausreichende Kompetenzen wie Engagement der Kartellbehörden und die möglichst rasche Klärung von Streitfragen wichtige Anliegen.

2. Verläßlicher Ordnungsrahmen

Daß der Staat im Sinne der drei energiepolitischen Oberziele tätig werden muß, ist unstreitig. Es geht um das „Wie". Energieverbraucher und Energieanbieter vereint die Forderung nach einem konsistenten „kalkulierbaren und verläßlichen Ordnungsrahmen für die Energieversorgung. Das bedeutet zunächst die Absage an kurzatmigen hektischen Aktionismus einerseits und politisch-ideologisch bedingte radikale Kurswechsel andererseits. Die Grundrichtung der Energiepolitik soll auf längere Zeit, über Legislatur-Perioden und Regierungswechsel hinaus, gleichbleiben. Selbstverständlich soll es der Politik nicht verwehrt sein, auf neue Herausforderungen zu reagieren

und das System weiterzuentwickeln. Für die Energiewirtschaft folgt diese Forderung aus der Kapital-Intensität und Langlebigkeit der Anlagen in allen Sparten. Jede größere Kursänderung führt mit hoher Wahrscheinlichkeit zum „Stranden" vorher sinnvoll getätigter Investitionen. Die Industrie befürchtet davon zu Recht Rückwirkungen auf die Preise.

Weit verbreitet in der Wirtschaft ist die erhebliche Skepsis gegenüber Einzel-Eingriffen in die Energiemärkte („Interventionismus"). Das liegt auf ihrer generell anti-dirigistischen Linie. Der Staat soll auch im Energie-Sektor, jedenfalls in „normalen" Zeiten, die Spielregeln des Wettbewerbs bestimmen, dafür Rahmen-Daten setzen (z.B. für Verbraucherschutz, Fusions-Kontrolle) und es den Unternehmen überlassen, auf dieser Basis bei grundsätzlich freier Wahl der Mittel zur bestmöglichen Ziel-Erreichung beizutragen. Das Risiko des „Politikversagens" wird für mindestens ebenso groß gehalten wie das Risiko des „Marktversagens" (17). Auf jegliche wettbewerbs-verzerrende Maßnahmen soll der Staat verzichten. So lehnen der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) und der Deutsche Industrie- und Handelstag das Stromeinspeisungsgesetz ab und verweisen auf den Weg gezielter Förderung marktnaher Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien über die öffentlichen Haushalte. Befristete Anreize werden dabei als sinnvoll angesehen, Dauer-Subventionen jedoch abgelehnt.

3. Maßnahmen zur Klima-Vorsorge und Nachhaltigen Entwicklung

Diese Grundhaltung bestimmt auch die Position der Wirtschaft in Bezug auf die Klimavorsorge und die Nachhaltige Entwicklung.

Abgelehnt werden insbesondere Öko-Steuern, nicht zuletzt eine allgemeine Energiesteuer (18). Sie ist ein grobschlächtiges Instrument. Ihre Umwelt-Wirksamkeit läßt zu wünschen übrig. Die bisher vorgeschlagenen Modelle erfüllen nicht den Anspruch, die externen Kosten sachgerecht zu internalisieren (wobei diese Intention im übrigen nicht auf die Energie beschränkt werden dürfte). Das Ziel des Klimaschutzes würde geradezu konterkariert, wenn – wie meist angedacht – die Photovoltaik trotz der ihr zuzurechnenden beachtlichen CO_2-Emissionen aus der Produktion der Materialien für die Solarzellen-Anlagen freigestellt, die effizientesten CO_2-Minderer, die Kernenergie und die „große" Wasserkraft, aber mit der Steuer belegt würden.

Die Behauptung, Öko-Steuern würfen über einen Umwelt-Vorteil hinaus sogar eine „doppelte Dividende" ab in Form zusätzlich entstehender Beschäftigungsmöglichkeiten, ist durch neuere Untersuchungen sehr fragwürdig geworden. Kontra-produktiv wäre dafür allemal eine Besteuerung des Stroms (siehe II 4). Sein Einsatz erhöht die Produktivität von Arbeit und Kapital und ist vielfach die Voraussetzung für die Schaffung dauerhafter qualifizierter Arbeitsplätze. Die teilweise erwarteten Steigerungen der Energie-Effizienz lassen sich weitgehend nur mit Hilfe von Strom erreichen. Beispiele sind u. a.: Die Steuerung industrieller Fertigungsprozesse, die Ersetzung von fossiler Energie durch Elektrowärme sowie von Wärme durch Kraft, Kommunikationstechniken, die das Verkehrsaufkommen verringern (z. B. durch Tele-Arbeitsplätze, Video-Konferenzen, Internet) und den Verkehrsfluß lenken, die stärkere Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene, geregelte Lüftung, Gebäude-Leittechnik sowie die Ersetzung von Braunkohle- und Ölheizungen durch elektrische Wärmepumpen.

Statt auf Steuern setzt die Wirtschaft auf Selbstverpflichtungen und speziell zur Abwehr der Klimagefahren zusätzlich auf das Instrument der „Joint Implementation".

Selbstverpflichtungen haben in Deutschland eine gute Tradition. Nach den Ölpreiskrisen der 70er Jahre haben sich beispielsweise die Elektro- und die Automobil-Industrie zur Senkung der spezifischen Energieverbräuche von Haushaltsgroßgeräten bzw. der Kraftstoffverbräuche ihrer Fahrzeuge in bestimmtem Umfang verpflichtet. Die Zusagen wurden eingehalten. Neue Elektroherde, Kühlschränke, Geschirrspüler und Waschmaschinen verbrauchten 1988 im Schnitt nur halb so viel Strom wie die Vorgänger-Generation von 1970 (Abb. 5). Das hat sich auf den Stromverbrauch der Haushalte spürbar ausgewirkt. Im März 1995 haben sechs Spitzenverbände, darunter Gas- und der Elektrizitätswirtschaft, unter Führung des BDI eine Erklärung zur Minderung des spezifischen Energieverbrauchs bzw. des spezifischen CO_2-Ausstoßes abgegeben. Diese Erklärung wurde ein Jahr später konkretisiert und erweitert (19). Bis 2005 wird eine Rückführung der CO_2-Emission je Produkt-Einheit (in einigen Fällen auch der absoluten Emissionen der jeweiligen Branche) im Vergleich zu 1990 um mindestens 20 Prozent zugesagt. Die Realisierung wird durch eine jährlichen „Monitoring-Bericht" des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung (RWI) für die Bundesregierung überwacht. Wie der erste Bericht im Herbst 1997 gezeigt hat, haben die meisten Verbände das selbst gesetzte Ziel schon zu einem erheblichen Teil erreicht (20).

„Joint Implementation" meint die gemeinsame Verwirklichung klimafördernder Vorhaben in kapitalschwachen Ländern Osteuropas und der 3. Welt durch Partner aus diesen Regionen und aus Industriestaaten (21). Letztere steuern das Kapital und das Knowhow bei. Auf diese Weise werden Beiträge zur Abwendung des befürchteten anthropogenen „Treibhaus-Effekts" bei optimaler Aufwand-Nutzen-Relation geleistet. (Die entsprechende Maßnahme, z. B. die Ersetzung einer ineffizienten alten durch eine moderne Stromerzeugungsanlage würde hierzulande weniger bewirken und mehr kosten). Zugleich findet ein Technologie-Transfer statt. Kapital und Knowhow sind entscheidende Faktoren für die Verbesserung der Energieversorgung und der Umweltverhältnisse und damit auch für eine schnellere wirtschaftliche Entwicklung im „Osten" wie im „Süden" der Erde.

Das komplexe Thema „Nachhaltige Entwicklung" kann hier nicht näher behandelt werden. Es geht dabei nicht einseitig um Umweltschutz oder Ressourcenschonung. Die schon legendäre Veranstaltung in Rio de Janeiro 1992 hieß sehr bewußt „Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung". In Deutschland hat die Chemische Industrie formell das Branchenleitbild „Sustainable Development" beschlossen (22). Die Elektrizitätswirtschaft verfolgt die ähnliche „Eta.Initiative für Energievernunft" (23). Sinnvollerweise kann aber nicht die Energie im Mittelpunkt der Diskussion stehen, wie nachhaltige Entwicklung am besten gewährleistet werden kann. Die Energie-Ressourcen sind noch auf lange Zeit nicht knapp (vom Erdöl vielleicht abgesehen). Für die Verbesserung der Umwelt kommt es auf die Stoffströme, nicht auf die Energieströme an. Nicht so sehr Umwelt und Ressourcen begrenzen eine Entwicklung, die unseren Nachkommen ihre Chancen läßt und ihnen nicht unerträgliche Risiken aufbürdet, sondern eher Technikfeindlichkeit und Risikoaversion der gegenwärtigen Wohlstandsgeneration.

V. Erwartungen der Wirtschaft an die Energie-Anbieter

Auch an die Energie-Anbieter richten sich klare Erwartungen der verbrauchenden Wirtschaft. Dabei wird die Sicherheit der Versorgung heute geradezu als selbstverständlich erachtet. Das Interesse konzentriert sich auf die Lieferanten von Strom und von Gas. Dies hängt damit zusammen, daß beide Energieträger kontinuierlich die anderen substituieren und daß die Liberalisierung der Strom – und Gasmärkte die Aufmerksamkeit derzeit hierauf lenkt.

1. Wettbewerbsfähige Angebote

Die mit Abstand wichtigste Erwartung betrifft niedrige bzw. im Vergleich um (europäischen) Ausland wettbewerbsfähige Energiepreise, Organisationen der gewerblichen Energieverbraucher wie der Verband der industriellen Kraft- und Wärmewirtschaft (VIK) und der Verband der Energieabnehmer (VEA) haben sie seit Jahren gefordert. Neuere Umfragen bei Unternehmensleitern haben bestätigt, daß es diesen vor allem auf den Preis ankommt (24). Über den realen Rückgang der Industriestrompreise hinaus (siehe II 6) hat es deshalb schon im Vorfeld der Marktöffnung im Zuge von Neuverhandlungen vielfach Preisnachlässe gegeben, in erster Linie bei Großkunden. Mit einem weiteren Absinken der Preise wird gerechnet.

2. Dienstleistungen

Tendenziell wird der Wettbewerb auf dem Strom- und dem Gasmarkt zu einer Angleichung des Preisniveaus führen. Allerdings werden womöglich starke Differenzierungen bei den Angeboten dem teilweise entgegenwirken. Mittelfristig dürften diejenigen Anbieter von Gas und Strom am ehesten erfolgreich sein, die ihren Kinden in der Wirtschaft nicht nur einen auf deren jeweilige Bedürfnisse zugeschnittenen Vertrag, sondern darüber hinaus für diese attraktive Dienstleistungen anbieten. Zwar zeigen die genannten Umfragen, daß vorläufig noch wenig Bereitschaft besteht, hierfür zu zahlen. Das dürfte sich zunehmend ändern, sobald erkannt wird, wie wertvoll ein individuell geschnürtes „Dienstleistungspaket" für das eigene Unternehmen sein kann, zumal dann, wenn dort die Konzentrationen auf die „Kern-Kompetenzen" und das „Outsourcing" von Randaufgaben verfolgt werden.

Anmerkungen

(1) Die Daten wurden im wesentlichen folgenden Quellen entnommen:
- H. Bradke, Energienutzung in der Industrie, in J.-F. Hake/W. Kuckshinrichs u.a. (Hrsg.) Forschungszentrum Jülich, 3. Ferienkurs Energieforschung, Jülich 1997, S. 305 ff.
- Bundesministerium für Wirtschaft, Energiedaten, verschiedene Jahrgänge, Bonn
- Deutsches Nationales Komitee des Weltenergierates (DNK). Energie für Deutschland, Düsseldorf 1998
- H.-W. Schiffer, Energiemarkt Bundesrepublik Deutschland, 6. Aufl. Köln 1997
- Verband der industriellen Kraft- und Wärmewirtschaft (VIK), Statistik der Energiewirtschaft, verschiedene Jahrgänge, Essen
- Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW). Die öffentliche Elektrizitätsversorgung verschiedene Jahrgänge bis 1995, Frankfurt a.M.
- dies., Strommarkt Deutschland 1996, Frankfurt a.M. 1997
- dies., Strom-Zahlen '97, Frankfurt a.M. 1998

(2) Verwandt wird hier die in Deutschland traditionelle energiewirtschaftliche Einheit „Steinkohleneinheiten" (SKE). Eine Tonne SKE entspricht in etwa dem Heizwert einer Tonne deutscher Steinkohle Umrechnung: 1 Megajoule (MJ) = 0,034 kg SKE – 1 kg SKE = 29,4 MJ

(3) R. Bauerschmidt, Direkter und indirekter mengenmäßiger Energie- und Arbeitseinsatz nach Sektoren, in:
V. Hauff (Hrsg.), Energie, Wachstum, Arbeitsplätze – Argumente in der Energiediskussion, Bd. 4/5, Villingen 1978, S. 271 ff.

(4) K. Knizia, Kreativität, Energie und Entropie, Düsseldorf 1992

(5) C.C. von Weizsäcker/h. Welsch/F. Stähler, Energie und Wirtschaftswachstum, in D. Schmitt/H. Heck (Hrsg.), Handbuch Energie, Pfullingen 1990, S. 242 ff.

(6) L. Scholz, Strukturwandel der deutschen Wirtschaft – Folgewirkungen von Verknappungs- und Verteuerungstendenzen im Energiebereich, in: Hauff a.a.O. S. 299 ff., Bradke a.a.O. S. 309 f.

(7) Th. Herzig, Wirtschaftsgeschichtliche Aspekte der deutschen Elektrizitätsversorgung 1880 bis 1990, in: W. Fischer (Hrsg.), Die Geschichte der Stromversorgung, Frankfurt a.M. 1992, S. 123/132

(8) Bradke a.a.O. S. 312 f.; Schiffer a.a.O. S. 284 f.

(9) Th. Hartmann/W. Glaunsinger, Primärenergietransport versus Stromübertragung über größere Entfernungen, in: Elektrizitätswirtschaft 1994, 782 ff.

(10) Bradke a.a.O. S. 306; Siemens AG, Verteuerung der Energie führt zu noch höherer Arbeitslosigkeit, Argumente SG Nr. 208 vom 01.06.1997, Erlangen 1997

(11) H. Graf/G. Sauer, Energie als Standortfaktor, in: Schmitt/Heck a.a.O. S. 60/67 f.

(12) A. Nolden/I. Hensing/Ch. Riechmann/W. Schulz, Strompreisunterschiede zwischen Frankreich und Deutschland, in: Elektrizitätswirtschaft 1997, 1088

(13) P. Ramner, Die Bedeutung der Energiewirtschaft für die Bundesrepublik Deutschland, in: Hauff a.a.O., S. 249/266 f. (ältere Zahlen)

(14) Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts vom 24.04.1998 (BGBl. I Nr. 23 vom 28.04.1998)

(15) Vgl. zu dem Ganzen: Schiffer a.a.O. S. 113 ff. und S. 105

(16) Richtlinie 98/30 EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22.06.1998 betreffend gemeinsame Vorschriften für den Erdgasbinnenmarkt (Abl. I 204/1 vom 21.07.1998)

(17) Vgl. dazu G. Dahlmanns, Mehr oder weniger Staat in der Energiewirtschaft?, in: Schmitt/Heck a.a.O. S. 232 ff H. Gröner, Energieversorgung in der Marktwirtschaft, ebd. S. 302.

(18) BDI, Umsteuern mit Ökosteuern?, BDI-Drucksache Nr. 278, Köln o.J. (wohl 1995); R. Farnung, Energiesteuern und Binnenmarkt, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 1998, 376 ff; H.-W. Schiffer,Perspektiven der Besteuerung von Energie in Europa, in: VIK-Mittelungen Nr. 3/1997 S. 50 ff; Siemens AG, Besteuerung der Modernisierungsenergie Strom ist verfehlt, argumente Nr. 95 (SG-Nr. 203) vom 15.11.1995; VDEW, Argumente, verschiedene Ausgaben aus den Jahren 1994, 1995 und 1997

(19) J. Grawe/Th. Hoffmann, Stand der Umsetzung der CO_2-Selbstverpflichtungserklärung der deutschen Stromversorger, in: VGB-Kraftwerkstechnik 1997, 161 ff.; M. Hildebrand, Klimaschutz in deutschen Elektrizitätsversorgungsunternehmen, in: VDEW (Hrsg.), Tagungsband VDEW-Symposium „Treibhaus oder Eiszeit?" 22./23.10.1997 in Mannheim, Frankfurt a.M. 1997

(20) B. Hildebrand u.a., CO_2-Monitoring der deutschen Industrie (Untersuchungen des RWI Heft 23), Essen 1997

(21) Th. Hoffmann/M. Hildebrand, Joint Implementation – ein Element grenzüberschreitender Klimapolitik, in: Elektrizitätswirtschaft 1996, 778 ff., F. Schafhausen, Joint Implementation als Element der nationalen und internationalen Klimavorsorge, ebd. S. 733 ff.

(22) Verband der Chemischen Industrie (VCI), Substainable Development, Frankfurt a.M. 1995; Hoechst AG, Sustainable Development – Umwelt, Sicherheit, Gesundheit, Frankfurt a.M. 1995

(23) Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft (IZE), Vom Wirkungsgrad zur Energievernunft, Frankfurt a.M. o.J. (wohl 1995 oder 1996); H.W. Riemer, Mit Eta für mehr Energievernunft, in: Elektrizitätswirtschaft 1995, 914 ff.

(24) S. Löbbe/G. Kalny, Achtung, der Kunde kommt: Herausforderungen für die Elektrizitätsversorgungsunternehmen im liberalisierten Markt, in: VIK-Mitteilungen Nr. 3/1997 S. 31 ff.; H. Edelmann, Wie zufrieden sind die großen Stromkunden?, in: Elektrizitätswirtschaft Heft 16/1998 S. 9 ff.

Konzentration in der Energiewirtschaft

Thomas Schuppe

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln

1 Einleitung

Wettbewerb ist ein grundlegendes Element jeder Marktwirtschaft. Der Staat versucht im Rahmen seiner Ordnungspolitik die wettbewerblichen Rahmenbedingungen aufrechtzuerhalten und wettbewerbsbeschränkende Strategien zu unterbinden. So steht die Wettbewerbspolitik beispielsweise vor der Aufgabe, wettbewerbsschädliche Absprachen zwischen Unternehmen (wie z.B. Kartelle), die Behinderung dritter Unternehmen (Mißbrauch von Marktmacht) sowie die Unternehmenskonzentration zu kontrollieren.[1]

Die wettbewerbliche Organisation der deutschen *Energiewirtschaft* ist in den einzelnen Sektoren (sowie auf deren einzelnen Marktstufen) sehr unterschiedlich.[2] Während beispielsweise auf den Mineralöl- und Kohlenmärkten vergleichsweise intensiver (brancheninterner[3]) Wettbewerb herrscht, ist dieser bei den leitungsgebundenen Energieträgern Strom und Erdgas stark eingeschränkt. Insbesondere aufgrund der natürlichen Monopoleigenschaften der *leitungsgebundenen Energieversorgung* waren die Strom- und Gasmärkte in der Vergangenheit als sog. wettbewerbliche Ausnahmebereiche organisiert und von einigen Vorschriften des Kartellgesetzes freigestellt. Die kartellrechtliche Ausnahmestellung ermöglichte den Strom- und Gasversorgungsunternehmen den Abschluß von Demarkations- und (exklusiven) Konzessionsverträgen und somit der wirtschaftlichen Aktivität in *geschlossenen Versorgungsgebieten*, in denen der direkte Wettbewerb weitgehend oder vollständig ausgeschlossen war.

Im Zuge der gegenwärtig anstehenden *Liberalisierung* der leitungsgebundenen Energiemärkte[4] werden sich die wettbewerbspolitischen Rahmenbedingungen für die Energieversorger zukünftig nachhaltig verändern. Durch die Beseitigung der Gebietsmonopole und Einführung von diskriminierungsfreien Zugang zu den Strom- und Gasnetzen (Durchleitung) wird sich der Wettbewerbsdruck sukzessive erhöhen und zu einer schnellen und tiefgreifenden Veränderung der Unternehmensstrukturen bzw. der Konzentration auf den Energiemärkten führen.

---

[1] Eine Einführung in die Wettbewerbspolitik bietet z.B. Herdzina (1993).

[2] Unter wettbewerbspolitischen Gesichtspunkten kann die Energiewirtschaft u.a. in die folgenden Marktsegmente untergliedert werden:
- Primärenergieträger: Mineralölerzeugnisse, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle
- Umwandlungsbereich: Raffinerien, Stromerzeugung
- Transport/Verbund, Speicherung, Systemsteuerung:Elektrizität, Erdgas
- Endenergieträger: Verkehrsmarkt, Wärmemarkt, Elektrizität

[3] Unter brancheninternen Wettbewerb wird der direkte Wettbewerb in einem Markt verstanden, wenn beispielsweise Stromversorger miteinander konkurrieren. Im Ggs. dazu stehen im Substitutionswettbewerb verschiedene Energieträger in Konkurrenz zueinander, wie z.B. auf dem Wärmemarkt, wo insbesondere die Versorgung mit Erdgas und Heizöl im Wettbewerb stehen.

[4] Sowohl auf nationaler (Novelle von Energiewirtschaftsgesetz und Kartellrecht) als auch auf europäischer Ebene (Binnenmarktrichtlinien für Strom und Erdgas der Europäischen Union).

2 Begriffsbestimmung: Konzentration

Im ursprünglichen Sinne bedeutet Konzentration die „Vereinigung um einen Mittelpunkt". Im wirtschaftspolitischen Sinne wird unter Konzentration die Ballung ökonomischer Größen verstanden.

Im Rahmen der Wettbewerbspolitik dient die Messung der wirtschaftlichen Konzentration als Kriterium zur Erfassung bzw. Kontrolle von Marktstrukturen[5], aus denen sie Aufschluß über die Funktionsfähigkeit des Wettbewerbs erlangen will. Hohe Konzentrationen werden traditionell als „wettbewerbsschädlich" beurteilt und dementsprechend kontrolliert.[6] Als zentrales wettbewerbspolitisches Instrument wird die Fusionskontrolle durch das Bundeskartellamt und die Landeskartellbehörden angewendet.

Die Untersuchungen von Konzentration in der Energiewirtschaft beschäftigen sich vor allem mit der sog. Betriebs- oder Unternehmenskonzentration. Nach der Art des Wachstums können dabei zwei Formen der Unternehmenskonzentration unterschieden werden:

(1) *Internes Wachstum*, d.h. ein Unternehmen weist ein im Vergleich zu seinen Konkurrenten überproportionales Wachstum auf,

(2) *Externes Wachstum*, d.h. ein Unternehmen wächst durch Beteiligungen oder Fusionen.

Formen der Unternehmenskonzentration können darüber hinaus hinsichtlich der Richtung bzw. Markt-/Produktionsstufe unterschieden werden:

(1) Horizontale Konzentration als Vereinigung von Unternehmen, die auf der gleichen Marktstufe und demselben relevanten Markt[7] tätig sind. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn sich Ferngasgesellschaften; z.B. die Ruhrgas AG, an anderen Ferngasgesellschaften, z.B. Verbundnetz Gas AG beteiligen oder Verbundunternehmen der Stromwirtschaft (z.B. VEBA/Preussen-Elektra AG, VIAG/Bayernwerk AG und RWE (Energie) AG an anderen Verbundunternehmen (z.B. VEAG) beteiligt sind.

(2) *Vertikale Konzentration* als Vereinigung von Unternehmen, die auf aufeinanderfolgenden Markt- bzw. Produktionsstufen tätig sind. So weisen beispielsweise in der Erdgaswirtschaft die meisten Erdgasförderer an den nachgelagerten Ferngasgesellschaften Kapitalbeteiligungen auf, diese wiederum sind häufig an nachgelagerten Stadtwerken beteiligt. Auch langfristige Lieferverträge, die neben den Kapitalverflechtungen zudem häufig zwischen den Unternehmen bestehen, sind ein weiteres Instrument der vertikalen *Integration*, wie diese Form der Unternehmenskonzentration auch bezeichnet wird.

(3) *Diagonale oder konglomerate Konzentration* als Vereinigung von Unternehmen in verschiedenen Märkten. Beispiel für diese Form der Unternehmenskonzentration sind die Engagements von Energieunternehmen in unternehmensfremden Energiesektoren oder auch im Entsorgungs- und/oder Telekommunikationsbereich.

---

[5] Neben der Konzentration werden der Marktstruktur auch Elemente wie Eigenschaften des angebotenen Gutes, Marktzutrittsbedingungen oder Nachfragebedingungen zugeordnet.

[6] Dabei wird in zweierlei Hinsicht differenziert: Zum einen wird angenommen, der Wettbewerb wird um so schwächer, je geringer die Anzahl der Marktteilnehmer wird (absolute Konzentration), zum anderen, je ungleichmäßiger die Verteilung des Gesamtmerkmalsbetrags (z.B. Umsatz oder Absatz) auf die Marktteilnehmer wird (relative Konzentration). Zur Problematik der Wettbewerbspolitik, aus Marktstrukturen einen Aufschluß über die Funktionsfähigkeit des Wettbewerbs zu erlangen, siehe Drasdo et al. (1988), S. 83ff.

[7] Die Konzentrationsmessung setzt die Abgrenzung eines relevanten Marktes voraus. Dabei ist vorab zu klären, welche Güter (und Unternehmen) miteinander in Konkurrenz stehen und sich somit auf demselben Markt befinden. Siehe zu den Konzepten der Marktabgrenzung z.B. Drasdo et al. (1998), S. 88ff oder Kantzenbach/Krüger (1990).

3 Konzentrationsmessung

Die quantitative Messung der Marktstruktur bezieht sich i.d.R. auf Anzahl, absolute und relative Größe der Anbieter auf abgegrenzten Märkten. Über bestimmte Merkmale (z.B. Umsatz oder Absatz) ermittelte Häufigkeitsverteilungen der Merkmalsträger, also der Unternehmen, dienen dabei als Grundlage für die Berechnung von Konzentrationsmaßen. Die Interpretation der Ergebnisse ist vor dem Hintergrund der *Offenheit der Märkte* vorzunehmen: Im Fall der Strom- und Gasmärkte ist in diesem Sinne zu berücksichtigen, daß die Energieversorgung bislang (zumeist) in geschlossenen Liefer- und Versorgungsgebieten erfolgte und der direkte (brancheninterne) Wettbewerb somit größtenteils ausgeschlossen war. Insofern handelt es sich hier – streng genommen – um eine Strukturanalyse der in der leitungsgebundenen Energieversorgung tätigen Unternehmen (Anzahl, Größenverteilung, Integrationsgrad u.a.) und nicht um eine Marktstrukturanalyse im eigentlichen Sinne (Anzahl und Größenverteilung der Marktanteile der Anbieter auf dem relevanten Markt).

Bei der Untersuchung ***horizontaler Konzentration*** wird gewöhnlich zwischen absoluter und relativer Konzentration unterschieden.[8] Als natürlicher Ausgangspunkt für die Konzentrationsbestimmung dient die empirische (relative oder absolute) Häufigkeitsverteilung einer Merkmalssumme (z.B. Umsatzsumme oder Güterabsatz) auf die Gesamtheit der Merkmalsträger (z.B. Unternehmen). Gebräuchliche Maße für die absolute Konzentration sind *Konzentrationsraten* (veranschaulicht durch *Konzentrationskurven*) und *Herfindahl-Index* sowie für die relative Konzentration *Lorenzkurven* und *Gini-Koeffizient*. Im folgenden wird an einem Beispiel erläutert, in welchem Zusammenhang diese Konzentrationsmaße zur Häufigkeitsverteilung der betrachteten Grundgesamtheit stehen. Ein einfaches Zahlenbeispiel soll helfen, die Maße zu veranschaulichen:

Betrachtet wird eine Grundgesamtheit von N=9 Unternehmen. Die beobachtete Merkmalsgröße sei der Umsatz. Die Umsätze teilen sich in drei Klassen (Abbildung 1):

(1) 0 - 100 Mio. DM (sechs Unternehmen),

(2) 101 - 500 Mio. DM (zwei Unternehmen) und

(3) 501 -1000 Mio. DM (ein Unternehmen).

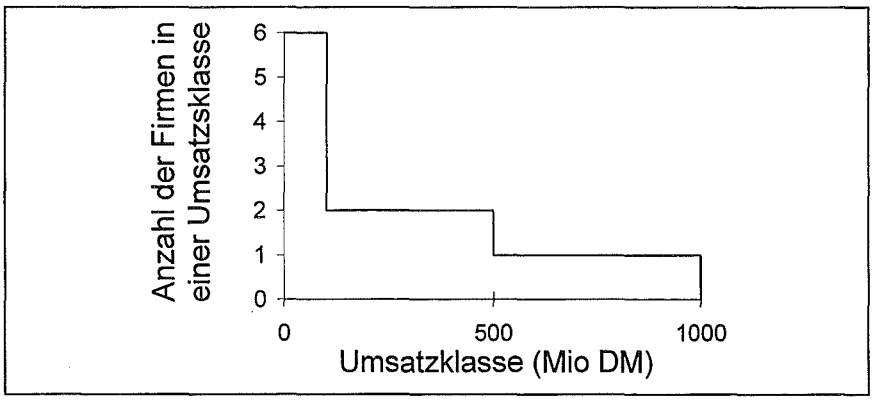


Abbildung 1: Absolute Häufigkeit von Unternehmen einer Merkmalsklasse

[8] Siehe Fußnote 6.

Absolute Konzentrationsmaße

Die *Konzentrationskurve* (Abbildung 2) beschreibt, welchen Anteil des Gesamtumsatzes die i größten Unternehmen auf sich vereinigen. So hat das größte Unternehmen einen Umsatzanteil von 38%, die 3 größten Unternehmen haben einen Umsatzanteil von 77% usw. Die Gerade unterhalb der Konzentrationskurve beschreibt den hypothetischen Fall gleicher Umsatzanteile aller Unternehmen. Hier entspricht der Anteil der i Unternehmen exakt ihrem Anteil an der Gesamtzahl aller Unternehmen (1/9). Im Gegensatz zur später betrachteten relativen Konzentrationsmessung ist hier aber auch noch über die Gleichverteilung ersichtlich, wie viele Unternehmen insgesamt die Merkmalsausprägung auf sich vereinen.

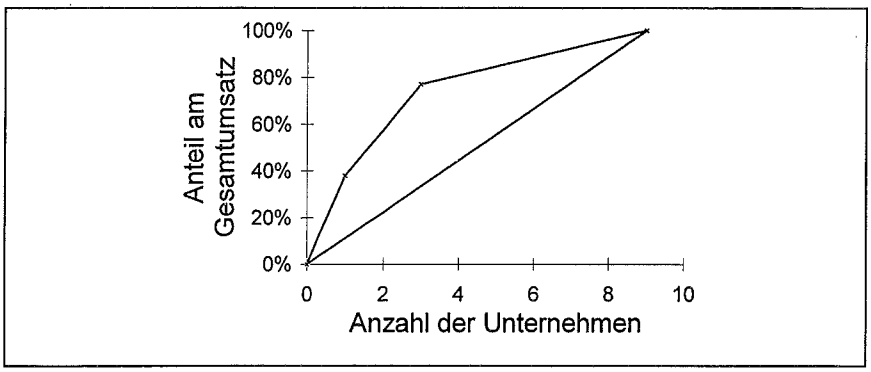


Abbildung 2: Konzentrationskurve - Anteil der i größten Unternehmen an der betrachteten Merkmalssumme

Als Kennzahl für die absolute Konzentration können die *Konzentrationsraten* KR_i bezüglich der i = 1, 3, 6, 10, 25 größten Merkmalsträger und der *Herfindahl-Index* H verwendet werden. Bezeichnet x_j den Merkmalswert (z.B. den Umsatz) des j-ten Unternehmens und N die Anzahl aller im Markt agierenden Unternehmen, dann lassen sich die Kennzahlen mit $X = \sum_{j=1}^{N} x_j$ wie folgt definieren:

$$KR_i = \frac{\sum_{j=1}^{i} x_j}{X}; \qquad \frac{i}{N} \le CR_i \le 1, \qquad i = 1,3,6,10,25$$

$$H = \sum_{j=1}^{N} \left(\frac{x_j}{X}\right)^2; \qquad \frac{1}{N} \le H \le 1.$$

Im Unterschied zum Herfindahl-Index können die Konzentrationsraten unmittelbar aus der Konzentrationskurve abgelesen werden. Daß der Herfindahl-Index zur Messung der horizontalen Konzentration ein besonders anschauliches Maß liefert, verdeutlicht folgendes Beispiel: Auf einem Markt mit N Anbietern eines homogenen Gutes beträgt der Marktanteil des j-ten Anbieters $p_j = \frac{x_j}{X}$. Dieser läßt sich als Wahrscheinlichkeit interpretieren, mit der ein Nachfrager auf den Anbieter j stößt. Zwei Nachfrager, die sich unabhängig voneinander für einen Anbieter entscheiden, treffen demnach mit der

Wahrscheinlichkeit $\sum_{j=1}^{N} p_j \cdot p_j = H$ auf denselben Anbieter. Diese Wahrscheinlichkeit steigt bei zunehmender Konzentration.

Aufschlußreich ist die Entwicklung der zu bestimmten Stichtagen ermittelten Konzentrationsmaße im Zeitablauf. Beim Vergleich der Konzentrationsgrade zu unterschiedlichen Zeitpunkten bietet es sich an, auf den etwaigen Wechsel in den Rangfolgen „von oben" bzw. „von unten" kumulierter Unternehmen zu achten.

Relative Konzentrationsmaße

Die *Lorenzkurve* (Abbildung 3) gibt an, welcher Anteil der Unternehmen (von unten kumuliert) welchen Anteil am Gesamtumsatz des Marktes auf sich vereinnehmen. Die 6 umsatzschwächsten bzw. nach dem Umsatz geordneten ersten 67% aller Unternehmen haben in dem gewählten Beispiel hieran einen Anteil von 23% am Gesamtumsatz usw. Die Gerade oberhalb der Lorenzkurve zeigt den hypothetischen Fall gleicher Umsatzanteile aller Unternehmen. Hier hätten die ersten 67% der Unternehmen exakt 67% des Gesamtumsatzes der Branche.[9]

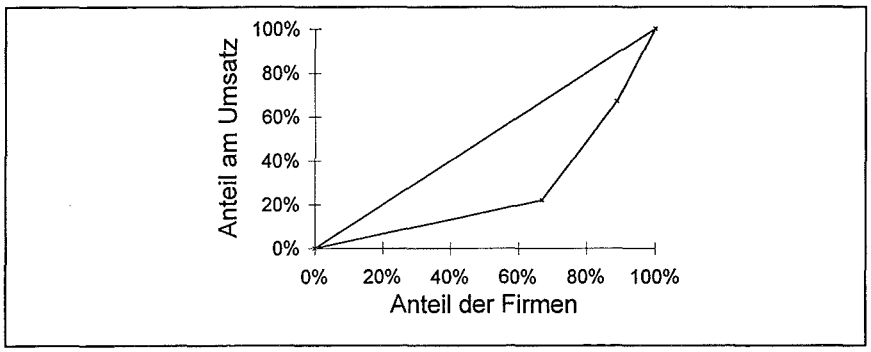


Abbildung 3: Lorenzkurve - Abbildung des Anteils der Unternehmen auf den Anteil der Merkmalssumme

Als eindimensionales Lorenzsches Konzentrationsmaß für die relative horizontale Konzentration wird häufig der *Gini-Koeffizient* verwendet, der als das Zweifache der Fläche zwischen Diagonale und Lorenzkurve definiert ist. Da er für verschiedene sich schneidende Lorenzkurven unter Umständen gleiche Werte annimmt, ist er im Vergleich zur Lorenzkurve selbst weniger informativ.

Im Unterschied zur horizontalen Konzentrationsmessung befaßt sich die ***vertikale Konzentrationsmessung*** mit der Anzahl und Häufigkeitsverteilung von Unternehmen auf einem Markt, die auch auf vor- und/oder nachgelagerten Märkten tätig sind. Allerdings ist der Rückschluß von vertikalen Marktstrukturen auf Marktergebnisse (wie z.B. Preise) unter Außerachtlassung der horizontalen Dimension

---

[9] Ein zentraler Schwachpunkt der relativen Konzentrationsmessung ist, daß zwischen Situationen, in denen lediglich zwei Duopolisten mit jeweils 50% des Gesamtumsatzes auf einem Markt agieren und einer Situation mit 1000 Anbieter, die alle einen Marktanteil von 1/1000 halten, kein Unterschied ersichtlich wird. Die Lorenzkurve entspricht in beiden Fällen der Winkelhalbierenden. Die tatsächlich hohe Konzentration auf dem ersten Markt ist nicht ersichtlich. Diese Schwäche in der Aussagekraft wird durch die absolute Konzentrationsmessung vermieden.

gänzlich unmöglich. Eine Firma, die ihre Inputs vollständig von einer integrierten Einheit bezieht, kann kaum als Indikator für mangelhaften Wettbewerb dienen. Eine horizontale Dimension muß daher ebenfalls berücksichtigt werden.[10]

Die ***diagonale Konzentrationsmessung*** befaßt sich mit der Anzahl und Häufigkeitsverteilung von Unternehmen auf einem Markt, die nicht nur auf vor- und/oder nachgelagerten Märkten, sondern auch in weiteren, dem fokussierten Markt sachlich weniger verwandten Geschäftsfeldern tätig sind. Die Quantifizierung diagonaler Konzentration steht dabei vor dem zusätzlichen Problem der Erfassung der sachlichen Distanz zwischen einzelnen voneinander abgegrenzten Märkten. Als Ersatz für eine quantitative Konzentrationsmessung kann eine qualitative Analyse der Unternehmensverflechtungen (über Kapitalbeteiligungen) dienen, die in Verbindung mit horizontalen Konzentrationsmaßen eine Vorstellung vom Ausmaß diagonaler Konzentration vermittelt.

Die Einbeziehung von ***Kapitalverflechtungen*** in die Konzentrationsmessung bietet sich speziell für die Energiewirtschaft an, da hier eine Vielzahl von Kapitalbeteiligungen bestehen: Insbesondere sind eine Vielzahl von Großkonzernen direkt oder indirekt über Tochtergesellschaften kapitalmäßig verflochten, so daß die eigentlichen wirtschaftlich selbständigen Entscheidungseinheiten nicht immer zwangsläufig auf das rechtlich selbständige Unternehmen zurückgeführt werden können.

Wie stark die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Einflußnahme ist, hängt vor allem von der Höhe der jeweiligen Kapitalbeteiligung ab (Minderheitsbeteiligung, Sperrminorität, Mehrheitsbeteiligung). Prinzipiell bietet sich die Verwendung von zwei Konsolidierungsverfahren an.

- *Konsolidierung nach den einfachen (durchgerechneten) Kapitalbeteiligungen*
  Die Beteiligungsquoten werden „durchgerechnet", indem die direkten Beteiligungsquoten (z.B. 20%) über mehrere Verflechtungsebenen miteinander multipliziert werden.
- *Konsolidierung nach (geschachtelten) Mehrheitsbeteiligungen*
  Besteht eine Mehrheitsbeteiligung (≥ 50%) erfolgt eine 100%-ige Zurechnung zur Muttergesellschaft, bei einer Beteiligung von weniger als 50% erfolgt keine Zurechnung. Diese Zurechnungskonvention wird auch bei Beteiligungen über mehrere Ebenen beibehalten.

Die Konsolidierungskonventionen werden an folgendem Beispiel verdeutlicht: Unternehmen V hält eine Beteiligung von 60% an V1. V1 wiederum hält eine Beteiligung von 60% an V2a und von 40% an V2b. Nach der Methode der einfachen (durchgerechneten) Kapitalbeteiligungen ergibt sich eine Beteiligung von 36% an V2a und von 24% an V2b. Entsprechend dieser Quoten würde das interessierende Merkmal, z.B. Gasabgabe, von V2a und V2b dem Unternehmen V zugerechnet. Nach der Methode der geschachtelten Mehrheitsbeteiligungen würde dem Unternehmen V die Gasabgabe von V2a vollständig zugerechnet, die Gasabgabe von V2b würde ihm überhaupt nicht zugerechnet (da V1 an V2b nur eine Minderheitsbeteiligung hält).

---

[10] Auf die Bestimmung möglicher vertikaler und diagonaler Integrationsmaße soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Zur weiteren Information bzgl. vertikaler Konzentrationsmaße sei hier lediglich auf Monopolkommission (1982, S. 252f.) verwiesen.

4 Konzentration in der deutschen Energiewirtschaft

Basierend auf den obigen Ausführungen werden nachfolgend einige Beispiele für Unternehmensstrukturen und Kapitalverflechtungen in der deutschen Energiewirtschaft aufgezeigt. Die folgenden Ausführungen beziehen sich lediglich auf die leitungsgebundene Energieversorgung mit Strom und Gas und sind dem Gutachten „Konzentration und Wettbewerb in der deutschen Energiewirtschaft" des Energiewirtschaftlichen Instituts entnommen.[11]

Unternehmensstrukturen

Auf den leitungsgebundenen Energiemärkten für Strom und Gas sind (z. T. über verschiedene Versorgungs- bzw. Marktstufen hinweg) unterschiedliche Unternehmensgruppen tätig.

Die *Erdgasförderung* in Deutschland, die ca. 1/5 des Verbrauchs deckt, konzentriert sich auf eine geringe Anzahl von inländischen Gas- und Ölproduzenten. Eine überragende Stellung in der deutschen Gasförderung nimmt die BEB Erdgas und Erdöl GmbH ein, die nahezu 60% der betrieblichen Förderleistung erbringt. Fast 4/5 des in Deutschland verbrauchten Erdgases wird - überwiegend durch 6 Ferngas- (FGG) aber auch durch 2 Fördergesellschaften - importiert. Auf die Ruhrgas AG dürfte mehr als die Hälfte der Gesamtimporte entfallen. Die nächstgrößten Importeure waren 1995 die Wingas GmbH/WIEH, die BEB Erdgas und Erdöl GmbH und die Thyssengas GmbH.

Das *Großhandelsgeschäft mit Erdgas* wird größtenteils durch die importierenden und von Produzenten beziehenden FGG bestimmt. 1995 waren nach der BGW-Statistik in Deutschland 16 FGG tätig, auf die ein Anteil von rd. 3/4 der gesamten (mittelbaren) Gasabgabe[12] an Gasversorger entfiel. 1995 konzentrierte sich auf die größten 3 FGG (Ruhrgas AG, Verbundnetz Gas AG (VNG) und Gasversorgung Süddeutschland GmbH (GVS)) nahezu 2/3 der mittelbaren Gasabgabe aller FGG. Die Versorgung der Letztverbraucher wird überwiegend durch die rd. 700 Orts- und Regionalgasversorgungsunternehmen (OVU) wahrgenommen, z. T. aber auch durch FGG und Produzenten (insbesondere industrielle Großkunden). Über alle Unternehmensgruppen hinweg entfiel 1995 auf die 10 (50) größten Anbieter ein Anteil von ca. 30% (59%) an der gesamten Gasabgabe an Endverbraucher. Seit 1970 hat die Konzentration abgenommen (Abbildung 4). Streng genommen handelt es sich hierbei jedoch nicht um Verschiebungen der Absatzanteile auf einem Markt. Vielmehr hat der Anteil der größten Anbieter deshalb abgenommen, weil der Gasabsatz bei den von ihnen belieferten Abnehmergruppen (Großindustrie, Industrie und HuK in größeren Städten) langsamer gewachsen ist als der Gasabsatz in den Absatzgebieten der kleineren OVU.

---

[11] Drasdo et. al. (1998). Die Zusammenfassung der Studie (BMWi, 1998) kann kostenlos beim Bundesministerium für Wirtschaft - Referat Öffentlichkeitsarbeit - erworben werden.

[12] Mit mittelbarer Abgabe wird die Abgabe an Weiterverteiler (z.B. regionale oder lokale Versorgungsunternehmen (Stadtwerke)) bezeichnet. Im Ggs. dazu wird von der direkten oder unmittelbaren Abgabe gesprochen, wenn Endkunden (z.B. Industriekunden oder private Verbraucher) beliefert werden.

Jahr	1970	1975	1980	1985	1990	1994	1995	1990*	1994*	1995*
Unternehmensanzahl	539	497	503	540	559	564	561	568	662	699
Gesamtabsatz (Mrd. kWh)	219	410	523	528	596	657	699	654	752	828
KR(3)	39,7%	30,6%	25,0%	20,5%	18,8%	17,5%	16,6%	17,8%	17,1%	16,3%
KR(6)	53,3%	42,7%	35,5%	29,3%	26,9%	24,2%	23,6%	26,0%	24,2%	23,3%
KR(10)	61,9%	54,5%	44,7%	38,1%	35,1%	31,2%	31,0%	34,0%	30,7%	29,8%
KR(25)	77,6%	73,0%	63,1%	54,9%	52,2%	48,4%	47,2%	51,9%	46,6%	44,5%
KR(50)	85,9%	82,6%	75,0%	67,7%	66,2%	62,9%	61,8%	66,4%	60,4%	58,5%
Herfindahl-Index (*1000)	82,6	55,9	40,8	27,8	24,2	18,9	17,4	21,9	17,0	15,4
1/N (*1000)	1,9	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,4
								Anmerkung:* Ind. NBL		

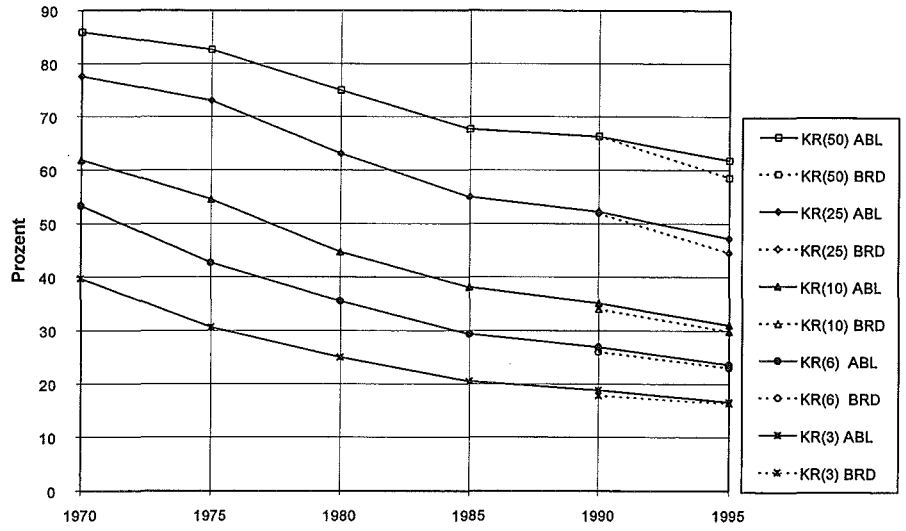


Abbildung 4: Konzentrationsraten und Herfindahl-Index für Gasversorgungsunternehmen - Merkmal *(unmittelbare) Abgabe an Verbraucher*

Trotz dieses Trends haben die FGG eine starke Position in der Abgabe an Letztverbraucher behalten. Die Ruhrgas AG ist der mit Abstand größte Lieferant an Letztverbraucher, gefolgt von der VNG AG. Wie Tabelle 1 zeigt, befinden sich unter den größten 10 Gasversorgungsunternehmen - gemessen an der unmittelbaren Gasabgabe - nur 5 OVU.

	unmittelbare Gasabgabe (in Mrd. kWh)	Anteil an Gesamtabgabe (Prozent)
1 Ruhrgas AG	62,8	7,6
2 Verbundnetz Gas AG	42,8	5,2
3 EWE AG Ortsversorgung Oldenburg	29,5	3,6
4 Gaswerke GmbH Hamburg	23,7	2,9
5 Stadtwerke München	17,2	2,1
6 Wintershall Gas GmbH (WINGAS)	16,8	2,0
7 Thyssengas GmbH	14,6	1,8
8 Maingas AG, Frankfurt (Main)	13,3	1,6
9 GASAG Berliner Gaswerke AG Berlin	13,1	1,6
10 BEB Erdgas und Erdöl GmbH	13,1	1,6
restliche Gasversorgungsunternehmen	581,1	70,2

Tabelle 1: Top Ten - unmittelbare Gasversorgung der GVU

Für die *Elektrizitätserzeugung* (öffentliche Versorgung) sorgten 1996 rd. 500 Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EltVU), wobei allerdings die Stromerzeugung stark auf die größten Unternehmen konzentriert war. Die Entwicklung der Konzentration in der Stromerzeugung ist in

Tabelle 2 dargestellt.

Jahr	1970	1980	1990	1994
Unternehmensanzahl	377	331	431	470
Gesamterzeugung TWh	153,5	291,4	432,1	420,9
KR (3)	40,6%	44,4%	39,3%	39,4%
KR (6)	53,9%	55,7%	49,7%	51,0%
KR (10)	62,9%	66,9%	60,6%	62,9%
KR (25)	82,9%	85,4%	82,0%	82,5%
KR (50)	95,9%	96,3%	95,0%	94,9%
Herfindahl-Index (*1000)	102,51	113,74	72,03	73,45
1/N (*1000)	2,7	3,0	2,3	2,1

Tabelle 2: Konzentration in der öffentlichen Stromerzeugung (nach juristisch selbständigen Unternehmenseinheiten)

Ordnet man den Erzeugungsunternehmen ihre Anteile an Gemeinschaftskraftwerken unter Berücksichtigung der Kapitalbeteiligungen zu, steigt die Konzentration erheblich an. In dieser Betrachtungsweise entfällt auf die 3 größten Unternehmen mehr als die Hälfte der gesamten Stromerzeugung (RWE (Energie) AG, VEBA AG (PreussenElektra AG) und VEAG).

	Erzeugung (in TWh)	Anteil (in %)	kumulierter Anteil (in %)
1 RWE AG, Essen (RWE Energie AG)*	105,6	25,1	25,1
2 VEBA AG (PreussenElektra AG)*	71,1	16,9	42,0
3 VEAG AG	49,5	11,8	53,7
4 VIAG AG (Bayernwerk AG)*	31,5	7,5	61,2
5 VEW AG	19,7	4,7	65,9
6 EVS Schwaben AG Stuttgart	15,8	3,8	69,6
7 Badenwerk AG	15,2	3,6	73,2
8 BEWAG AG	9,6	2,3	75,5
9 Hamburgische Elektrizitäts-Werke (HEW) AG	8,2	1,9	77,5
Summe der neun Verbundunternehmen	*326,1*	77,5	77,5
10 Neckarwerke Elektrizitätsversorgungs-AG Esslingen	8,0	1,9	77,5
11 Isar-Amperwerke AG München	6,8	1,6	79,1
12 TWS AG Stuttgart	4,7	1,1	80,2
13 Stadtwerke München	4,5	1,1	81,3
14 Stadtwerke AG Bremen	3,4	0,8	82,1
15 Stadtwerke AG Düsseldorf	3,2	0,8	82,8
16 ELEKTROMARK AG	3,1	0,7	83,6
17 Stadtwerke GmbH Bielefeld	2,5	0,6	84,2
18 Stadtwerke AG Hannover	2,5	0,6	84,8
19 Elt.-Werk Wesertal GmbH Hameln	2,5	0,6	85,3
20 Elektrizitätswerk Minden-Ravensberg GmbH Herford	2,5	0,6	85,9
21 GEW AG Köln	2,1	0,5	86,4
22 Pfalzwerke AG Ludwigshafen	1,9	0,4	86,9
470 Gesamte öffentliche Versorgung	420,9	100,0	100,0

Anmerkung: * Erzeugung der direkten jeweiligen Tochter

Tabelle 3: Konzentrationsraten bei Zuordnung der Gemeinschaftskraftwerke nach Kapitalbeteiligungen

Stromerzeugung, Stromübertragung und Stromverkauf im Großhandel (mittelbare Stromabgabe an Weiterverteiler) werden durch die Verbundunternehmen dominiert, die zudem auch in der Versorgung von Letztverbrauchern (unmittelbare Stromabgabe) eine bedeutende Rolle spielen. Im Großhandel entfallen auf die drei größten Verbundunternehmen RWE (Energie) AG, VEBA AG (PreussenElektra AG) und VIAG (Bayernwerk AG) mehr als die Hälfte der Summe der mittelbaren Abgabe über alle EltVU. Neben den Verbundunternehmen sind in der Stromversorgung noch ca. 50 Regionalversorger und über 800 kommunale Versorgungsunternehmen tätig. An der Belieferung von Letztverbrauchern (unmittelbare Stromabgabe) partizipierten Verbundunternehmen, Regionalunternehmen und Lokalunternehmen in 1994 etwa zu gleichen Teilen. Auf die 6 größten Stromverteiler entfiel 1994 ein Anteil von nahezu 30% der gesamten unmittelbaren Stromabgabe in Deutschland. Bezogen auf die alten Bundesländer hat sich der Anteil der größten Unternehmen an der unmittelbaren Stromabgabe seit 1970 leicht verringert.

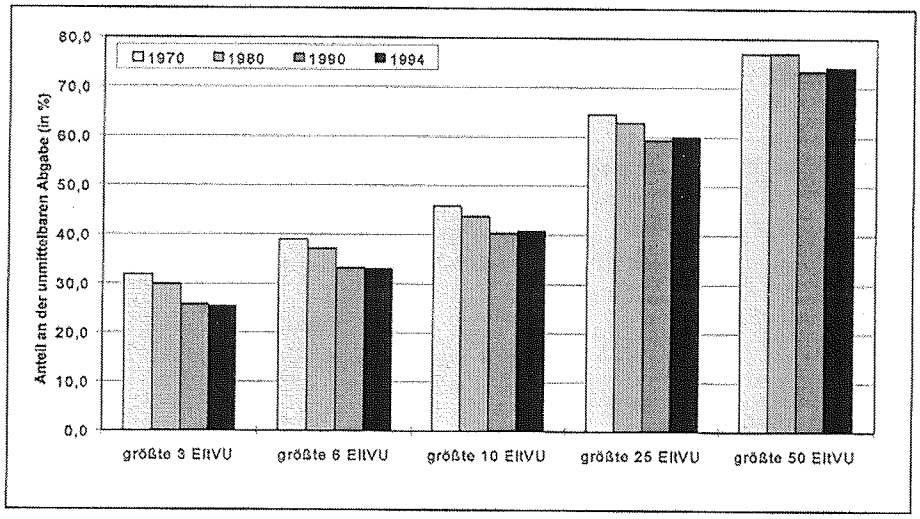


Abbildung 5: Anteile an der unmittelbaren Stromabgabe durch die größten EltVU in den alten Bundesländern

Kapitalverflechtungen in der Gaswirtschaft

Die deutschen FGG befinden sich zum Großteil im Eigentum anderer Energieunternehmen, insbesondere von nationalen und ausländischen Ölunternehmen, daneben bestehen auch Beteiligungen der öffentlichen Hand. Der Einfluß großer internationaler Ölkonzerne - Shell, Esso, BP und Mobil - über direkte und indirekte Kapitalbeteiligungen ist auf der Ferngasstufe besonders ausgeprägt bei Ruhrgas AG, EVG Münster mbH, Thyssengas GmbH, Ferngas Salzgitter GmbH und VNG AG. Auf der Ferngasstufe werden die bei weitem umfangreichsten Kapitalbeteiligungen von der Ruhrgas AG gehalten. Die wesentlichen Kapitalverflechtungen zwischen Förder- und Ferngasgesellschaften (nach dem Stand 1994) zeigt Abbildung 6.

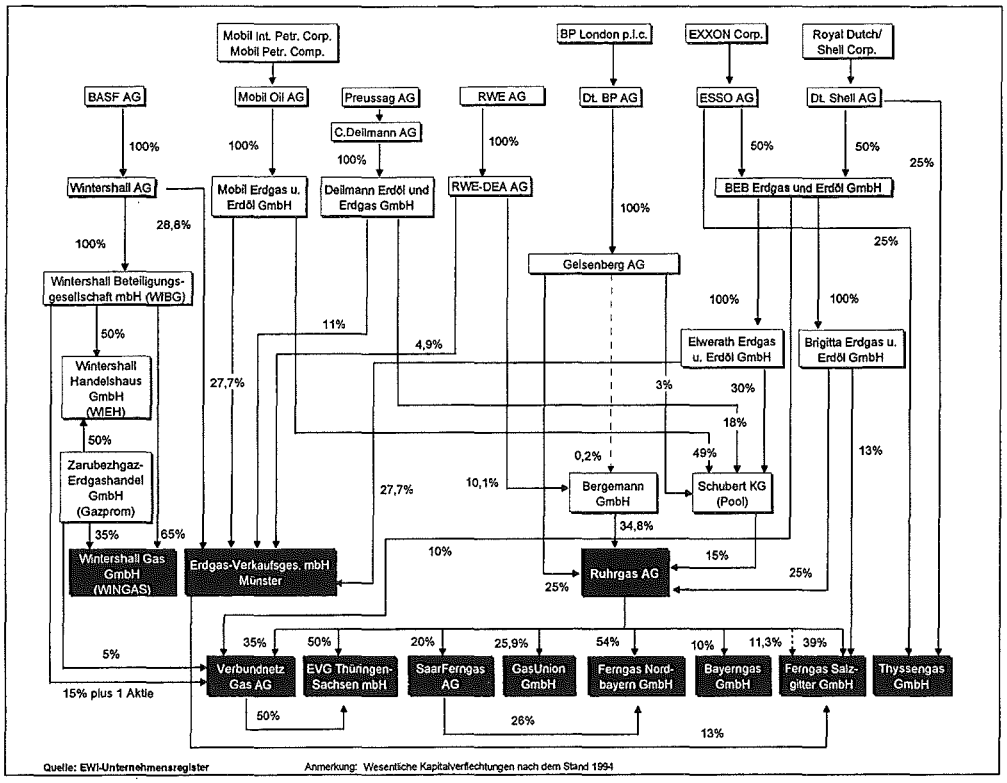


Abbildung 6: Kapitalverflechtungen in Gaswirtschaft 1994

Kapitalverflechtungen in der Elektrizitätswirtschaft

In der Elektrizitätswirtschaft spielen insbesondere die Kapitalbeteiligungen von Verbundunternehmen an anderen EltVU auf der Verbund-, Regional- und Lokalstufe eine bedeutende Rolle. Abbildung 7 illustriert die Kapitalverflechtungsstruktur für die größten deutschen Stromerzeugungsunternehmen der öffentlichen Versorgungswirtschaft.[13] Darüber hinaus halten die großen Verbundunternehmen RWE Energie AG, PreussenElektra AG und Bayernwerk AG vielfältige Kapitalanteile an nachgelagerten regionalen und kommunalen Versorgungsunternehmen.

[13] Die Abbildung zeigt die Kapitalverflechtungen nach dem Stand 1996 unter der Annahme, daß sämtliche zu diesem Zeitpunkt geplanten Kapitalbeteiligungen durch die Kartellbehörden erlaubt werden.

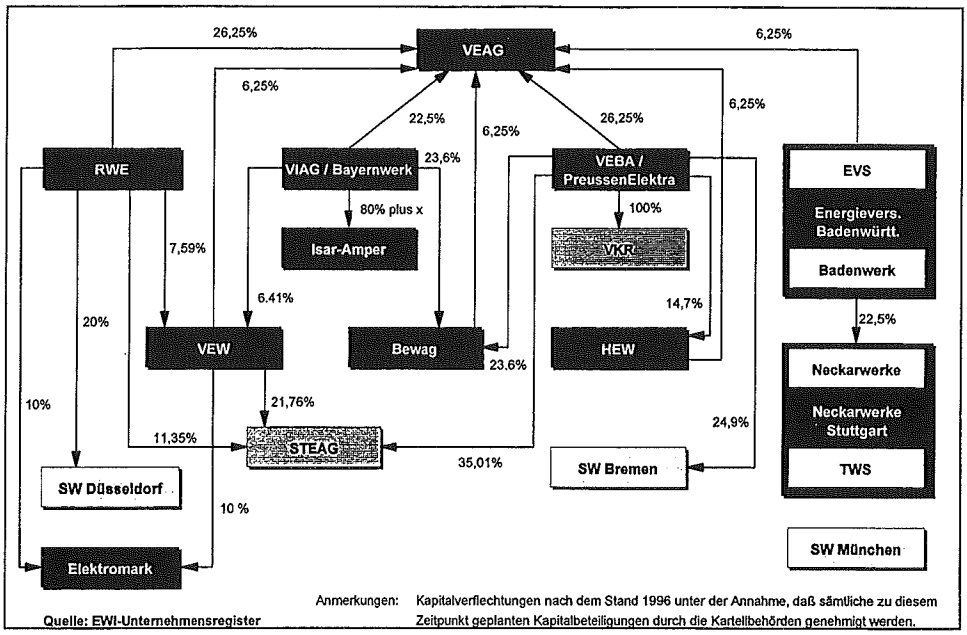


Abbildung 7: Kapitalverflechtungen in der Elektrizitätserzeugung

Unternehmensverflechtungen zwischen Elektrizitäts- und Gaswirtschaft

In der jüngeren Vergangenheit hat sich das Engagement von Unternehmen der Elektrizitätswirtschaft, insbesondere der drei Mischkonzerne RWE AG, VIAG AG und VEBA AG (direkt über die Holdinggesellschaften oder über deren Elektrizitätstöchter) in der Gaswirtschaft deutlich verstärkt, wie insbesondere auch das Beispiel des Tauschgeschäfts von RWE Energie AG und Bayernwerk AG zeigt[14]. Einen Überblick über die wesentlichen Beteiligungsaktivitäten der drei Mischkonzerne RWE AG, VIAG AG und VEBA AG an Unternehmen der deutschen Gaswirtschaft (nach dem Stand 1994 mit Aktualisierungen bis 1997) gibt Abbildung 8.

[14] Bei dem Aktientausch zwischen RWE Energie AG und Bayernwerk AG hat die RWE Energie AG einen 50%-igen Bayernwerk-Anteil an der Thyssengas GmbH im Tausch gegen eine 25,01%-ige RWE-Beteiligung an der Isarwerke GmbH übernommen.

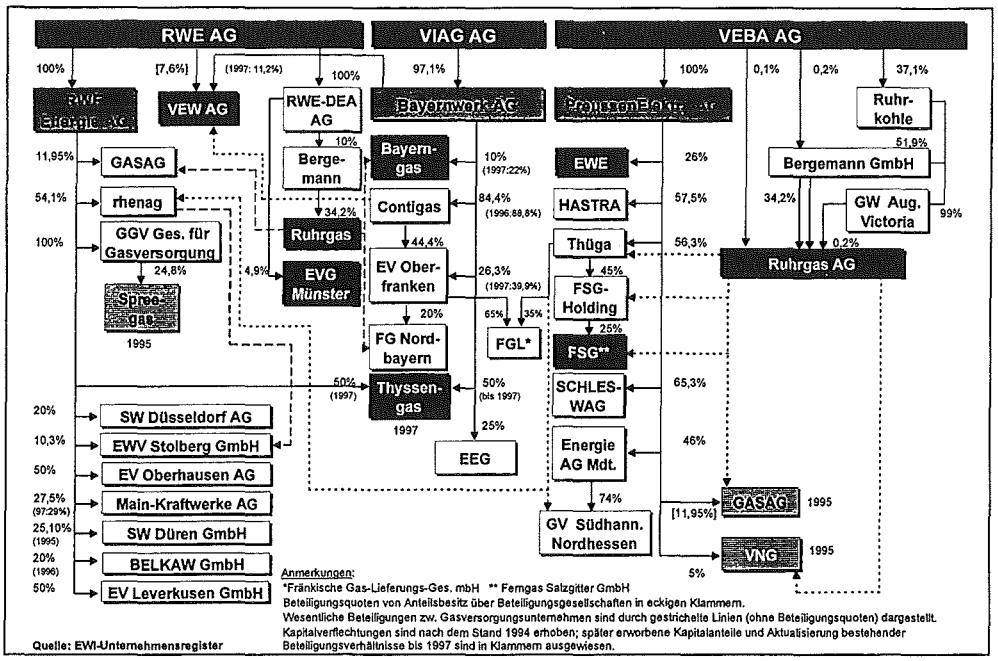


Abbildung 8: Kapitalverflechtungen zw. Elektrizitäts- und Gaswirtschaft

Auswirkungen von Kapitalverflechtungen auf die Unternehmensstruktur

Die Vielzahl der Kapitalverflechtungen innerhalb der deutschen Energiewirtschaft besitzt bedeutenden Einfluß für die Unternehmensstrukturen auf den einzelnen Energiemärkten. Durch die quantitative Berücksichtigung der Kapitalverflechtungen zwischen den EVU konnte in der Studie des Energiewirtschaftlichen Instituts „Konzentration und Wettbewerb in der deutschen Energiewirtschaft" u. a. festgestellt werden:

- Daß sich die Position der Verbundunternehmen sowohl in der Elektrizitätserzeugung als auch auf dem Großhandelsmarkt (mittelbare Stromabgabe) und bei der Belieferung der Letztverbraucher auf dem Einzelhandelsmarkt (unmittelbare Stromabgabe) deutlich verstärkt. Die Position der Verbundunternehmen in der unmittelbaren Stromabgabe unter Berücksichtigung der Kapitalbeteiligungen ist in (konsolidiert nach durchgerechneten Kapitalanteilen; saldiert) dargestellt. Deutlich wird die unterschiedliche Beteiligungspolitik der Verbundunternehmen. Die Abbildung 9 zeigt, daß die verwendete Konsolidierungsmethode nur bei der RWE AG einen starken Einfluß auf die konsolidierte unmittelbare Abgabe hat, weil die RWE AG in stärkerem Umfang als andere Verbundunternehmen Minderheitsbeteiligungen an nachgelagerten EltVU der regional- und Lokalstufe hält.
- Daß die Engagements von EltVU in der Gaswirtschaft über Kapitalbeteiligungen eine Größenordnung erreicht haben, die einige Verbundunternehmen aus der Elektrizitätswirtschaft auf eine Stufe mit Ferngasgesellschaften stellen. Im Mai 1997 hat die Bayernwerk AG 50% der Kapitalanteile an der Thyssengas GmbH an die RWE Energie AG abgegeben. Unter Berücksichtigung dieser geänderten Eigentümerverhältnisse ergibt für 1997 das folgende Bild: während sich die Beteiligungsabgabe der VIAG AG erheblich vermindert, steigt sie bei der RWE AG hingegen auf rd. 100 Mrd. kWh an. Somit liegt die RWE AG in der Rangordnung der drei betrachteten Unternehmen nach beiden Konsolidierungsverfahren an erster Stelle (Abbildung 10).

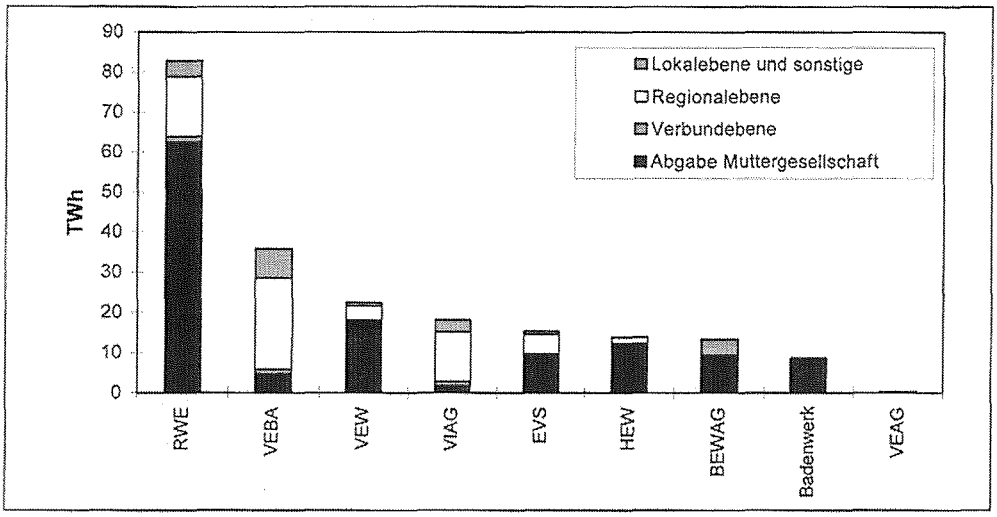


Abbildung 9: Unmittelbare Stromabgabe der Verbundunternehmen konsolidiert nach durchgerechneten Kapitalanteilen; saldiert

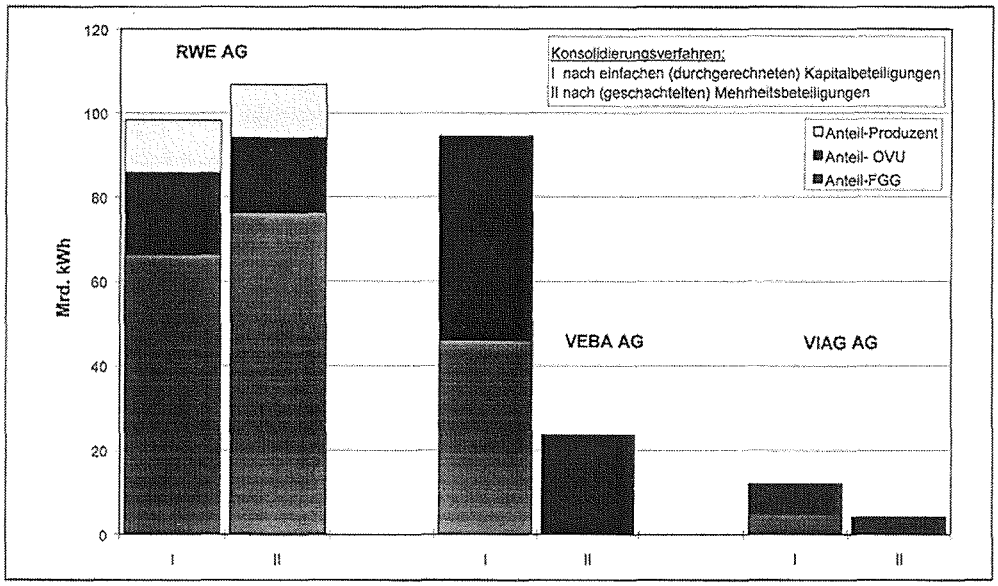


Abbildung 10: Konsolidierte Beteiligungsabgabe von RWE AG, VIAG AG und VEBA AG unter Berücksichtigung geänderter Eigentümerverhältnisse bei der Thyssengas GmbH 1997 (drei Beteiligungsstufen) - Merkmal *Gasabgabe insgesamt* 1994

Die beispielhaft dargelegten Kapitalverflechtungen charakterisieren die Unternehmensstrukturen auf Märkten, die in der Vergangenheit durch (fast) vollständige Monopolisierung gekennzeichnet waren. Durch die Liberalisierung der Energiemärkte werden die wettbewerblichen „Ausnahmebereiche" und die überkommenen Strukturen gegenwärtig erstmalig einem Markttest ausgesetzt, der zu nachhaltigen Veränderungen führen wird.

Literaturhinweise

BMWi (1998), *Konzentration und Wettbewerb in der deutschen Energiewirtschaft*, Kurzfassung, Studienreihe Nr. 100, herausgegeben vom Bundesministerium für Wirtschaft – Referat Öffentlichkeitsarbeit -, 1988.

Drasdo, Peter; Drillisch, Jens; Hensing, Ingo; Kreuzberg, Martin; Kreuzberg, Peter; Nolden, Alexander; Perner, Jens; Riechmann, Christoph; Schulz, Walter; Schuppe, Thomas; Starrmann, Frank (1998), *Konzentration und Wettbewerb in der deutschen Energiewirtschaft*, Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts Bd. 52, München, Oldenbourg, 1988.

Gabler-Wirtschaftslexikon, 14., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Bd. 3 u. 4, Wiesbaden, 1997.

Herdzina, Klaus (1993), *Wettbewerbspolitik*, 4., überarb. Auflage, Stuttgart, G. Fischer, 1993.

Kantzenbach, Erhard und Reinald Krüger, *Zur Frage der richtigen Abgrenzung des sachlich relevanten Marktes bei der wettbewerbspolitischen Beurteilung von Unternehmenszusammenschlüssen*, in: WuW 6/1990, S. 473-481.

Monopolkommission (1982), *Viertes Hauptgutachten der Monopolkommission 1980/1981 – Fortschritte bei der Konzentrationserfassung*, Baden-Baden, 1982.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHES INSTITUT AN DER UNIVERSITÄT KÖLN (Hrsg.)

(P. Drasdo, J. Drillisch, I. Hensing, M. Kreuzberg, P. Kreuzberg, A. Nolden, J. Perner, C. Riechmann, W. Schulz, T. Schuppe, F. Starrmann)

Konzentration und Wettbewerb in der deutschen Energiewirtschaft

Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts; Bd. 52.

582 S., 221 Abb., 95 Tab.

R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1998, ISBN 3-486-26427-3, DM 248,--

Die letzte umfassende Bestandsaufnahme der wettbewerbspolitischen Situation der deutschen Energiewirtschaft wurde in den 70er Jahren erstellt. Diese Arbeit ist jetzt aktualisiert und erweitert worden. Die aktuelle Studie enthält eine systematische Untersuchung der Marktstrukturen, Unternehmenskonzentration und Kapitalverflechtungen in allen Zweigen der deutschen Energiewirtschaft im Zeitraum 1970 bis 1995. Aufbauend auf einer umfangreichen Datenbank der Energieunternehmen werden für das Stichjahr 1994 alle wesentlichen Kapitalverflechtungen innerhalb und zwischen den Energiewirtschaftszweigen dargestellt und in ihrem Einfluß auf die horizontale, vertikale und konglomerate Konzentration untersucht. Die jüngsten Entwicklungen, insbesondere die verstärkten Kapitalbeteiligungen und Zusammenschlüsse in der Elektrizitäts- und Gaswirtschaft sind gesondert dargestellt.

Einkauf von Strom und Erdgas: Chancen und Risiken des neuen Rechtsrahmens

Peter Born

Akzo Nobel Faser AG, Wuppertal

Die Energiewirtschaft ist in Bewegung gekommen; denn der Rechtsrahmen hat sich verändert. Nachdem die Kommission der EU die Diskussion um die Liberalisierung der Elektrizitäts- und Gasmärkte seit Ende der 80er Jahre vorangetrieben hatte, hat das Parlament der Europäischen Union zuerst die Elektrizitätsmärkte und nun auch die Gasmärkte mittels einer Richtlinie formal geöffnet.

Im EWG-Vertrag vom 25.3.1957[1] ist festgelegt, daß „... eine Verhinderung, Einschränkung oder Verfälschung des Wettbewerbs..."[2] mit dem gemeinsamen Markt nicht vereinbar ist. Die deutsche Energiewirtschaft hatte aber aufgrund des Energiewirtschaftsgesetzes[3] seit 1935 eine per Gesetz definierte gemeinwirtschaftliche Aufgabe zu erfüllen. Wettbewerb wurde damals als schädlich angesehen.[4]

Diese monopolistischen Strukturen haben über Jahre zu unterschiedlichen Preisen für gleiche Verbrauchsstrukturen geführt.[5] Die Verbraucher hatten sich seit vielen Jahren über die ihrer Meinung nach ungerechtfertigt hohen Preise beschwert. Dabei war insbesondere der Vergleich der Einkaufspreise mit denjenigen der Konkurrenten im In- und Ausland immer wieder Gegenstand von Vertragsverhandlungen. Andererseits hat die Politik mehrfach die Gelegenheit genutzt, die Strom- und Gasverbraucher zur Finanzierung des Staatshaushalts heranzuziehen.[6]

Mit dem Erstarken des Europäischen Parlaments wurde auch die Initiative ergriffen, die Effektivierung der Energiewirtschaft durch Beseitigung der Monopole zu betreiben und so zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft beizutragen. Diese Initiativen haben nun zu dem Erfolg der vorliegenden Richtlinien geführt. Sie sind nun in praktikable Gesetze in den Nationalstaaten umzusetzen und es bleibt zu prüfen, ob es zu effektivem Wettbewerb kommen wird.

Die Bedeutung der Energiekosten ist für einige Branchen erheblich und somit werden Unterschiede in den Energieeinkaufskosten zu echten Vor- oder Nachteilen im Wettbewerb. Dabei muß weiterhin berücksichtigt werden, daß auch bei der Herstellung der Produktionsrohstoffe wie beispielsweise dem Zellstoff bei der Papierherstellung Energien aufgewendet worden sind. Berücksichtigt man den direkten und auch den vorgelagerten, indirekten Energieaufwand, so ergeben sich am Bruttoproduktionswert gemessen Energiekostenanteile von ca. 39 % (10 % direkt) bei dem Sektor Stahl, 29 % (11 % direkt) bei Papier, 23 % (7 % direkt) bei Nicht-Eisen-Metallen, 18 % (7 % direkt) bei der chemischen Industrie.[7]

Bei der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie auch die Energiewirtschaft zu liberalisieren und so wettbewerbsfähige Preise zu ermöglichen, ist eine richtige Entscheidung.

Die Stromrichtlinie

Am 30.1.1997 ist die Richtlinie für den Elektrizitätsbinnemarkt publiziert worden.[8] Sie muß von den Mitgliedstaaten bis spätestens 19.2.1999 in nationales Recht umgesetzt sein. Sie enthält folgende Vorgaben:

Zugelassene Kunden sind Verbraucher, mit einem Verbrauch > 40 GWh/a. Die Marktöffnung muß mindestens 20 % sein. Falls der Grad der Marktöffnung 30 % überschreitet, können die Zugangskriterien neu definiert werden. Der Grad der Marktöffnung soll nach 3 Jahren erhöht werden, so daß dann auch Verbraucher mit > 20 GWh/a und nach 6 Jahren mit> 9 GWh/a am Wettbewerb teilnehmen können.

Die Versorgungsunternehmen müssen die Konten für Produktion, Transport, Verteilung und Speicherung getrennt führen (Unbundling). Wettbewerb wird ermöglicht durch Netzzugang und das Recht zum Bau einer direkten Leitung. Der Netzzugang kann über das System des verhandelten Netzzugangs (Negotiated-third-party-access, NTPA) oder über das System des Alleinkäufers (Single-buyer) realisiert werden. Bei verhandeltem Netzzugang sind im 1. Jahr Richtwerte für die Durchleitungsentgelte zu veröffentlichen.

Bestimmte nationale Besonderheiten haben in den Entscheidungen zu Einschränkung geführt. So darf der Mitgliedstaat einheimische Primärenergieträger bis zu 15 % einsetzen. Der Mitgliedstaat darf Vorrang für regenerative Energien oder KWK-Anlagen geben. Stromimport muß nur dann genehmigt werden, wenn der Verbraucher auch im Ausland berechtigt ist, am Wettbewerb teilzunehmen (Reziprozität).

Die Gasrichtlinie

Die Gasrichtlinie ist in der Fasung vom 6.5.1998 beschlossen worden.[9] Sie schreibt folgende Regelungen für die Einführung des Wettbewerbs vor: Zugelassene Kunden sind nach Artikel 18 gasgefeuerte Stromerzeuger sowie Kunden mit einem Verbrauch > 25 Mio m3/a. Die Marktöffnung soll in drei Schritten erfolgen. Im ersten Schritt muß die Marktöffnung mindestens 20 % betragen. Falls sie größer als 30 % ist, können die Zugangskriterien neu definiert werden. Im zweiten Schritt wird der Mindestverbrauch auf 15 Mio m3/a gesenkt und die Marktöffnungsquote auf mindestens 28 % erhöht. Die Obergrenze verschiebt sich auf 38 %. Im dritten Schritt wird das Verbrauchsvolumen auf 5 Mio m3/a gesenkt. Die beiden anderen Werte verschieben sich auf mindestens 33 % bzw. maximal 43 %.

Das Unbundling ist durch getrennte Führung der Konten für Produktion,Transport, Verteilung und Speicherung zu realisieren. Die Mitgliedstaaten können Wettbewerb durch Netzzugang über das System des verhandelten Netzzugangs (NTPA) oder über System des regulierten Zugangs einführen. Außerdem kann eine direkte Leitung gebaut werden. Hierbei besteht auch das Recht auf den Zugriff auf das vorgelagerte Rohrleitungsnetz, welches die Förderfelder mit dem Festland verbindet.

Die Zugangsverweigerung ist möglich bei Marktrisiken sowie bei Gefahr für Sicherheit, bei Anwendung der öffentlichen Dienstleistungsverpflichtung, bei wirtschaftlichen Schwierigkeiten, die aus der Take-or-pay-Verpflichtung herrühren, bei Kapazitätsmangel und bei nicht gegebener Reziprozität. Für entstehende Märkte ist eine Sonderregelung vorgesehen. Für die Zugangsverweigerung aufgrund der Take-or-pay-Verpflichtung sind in der Richtlinie eine Reihe von Kriterien genannt, die zu erfüllen sind, um den Zugang verweigern zu können.

Das neue deutsche Energiewirtschaftsgesetz

Mit diesen Vorgaben hat die Bundesregierung ein Gesetz erlassen, welches am 28.4.1998 veröffentlicht worden ist.[10] Es enthält folgende Regelungen:

Ziel ist die Einführung von Wettbewerb für Strom und Gas, so daß die Versorgung mit diesen Energien sicher, preisgünstig, umweltverträglich erfolgt. Zugelassene Kunden sind „andere Unternehmen". Das bedeutet, daß die Verbrauchsgrenze aus der EU-Richtlinie nicht in Deutschland gilt. Das Unbundling bei Strom soll dadurch eingeführt werden, daß das Übertragungsnetz eine eigene Betriebsabteilg. (§ 4) wird und daß getrennte Konten für Erzeugung, Übertragung, Verteilung geführt werden. Der Wettbewerb bei Strom wird durch das System des verhandelten Netzzugangs (§ 6) erreicht. Die Veröffentlichung von Richtwerten zur Durchleitung muß erstmals im Jahr 2000 erfolgen. Das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) kann Kriterien für die Bestimmung von Durchleitungsentgelten festlegen. Der Bundesrat muß dann zustimmen. Im Ausnahmefall kann sich ein Versorgungsunternehmen auf Antrag auch für das Alleinkäufermodell (§ 7) entscheiden. Das ist allerdings begrenzt bis maximal Ende 2005. Das BMWi berichtet an den Deutschen Bundestag im Jahr 2003 (§ 8) über den Erfolg des Gesetzes; dann kann gegebenenfalls eine Änderung erfolgen.

Voraussetzung für einen effektiven Wettbewerb ist unter anderem, daß die heutigen Demarkationsvereinbarungen sowie die Ausschließlichleitsklauseln in den Konzessionsverträgen für ungültig erklärt werden. Diese Voraussetzung hat der Gesetzgeber durch Änderung des Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB) erfüllt.

Die Verweigerung des Zugangs zum Stromnetz ist möglich, wenn die Durchleitung nicht möglich oder nicht zumutbar ist (§ 6,1). Dabei kann berücksichtigt werden, ob Strom aus fernwärmeorientierter, umwelt- und ressourcenschonender, technisch-wirtschaftlich sinnvoller Kraft-Wärme-Kopplung oder aus erneuerbaren Anlagen verdrängt wird und damit deren wirtschaftlichen Betrieb verhindert. Außerdem ist nicht gegebene Reziprozität (Art. 4, § 2) ein Verweigerungsgrund; dies ist allerdings limitiert bis zum 31.12.2006. In den fünf neuen Bundesländern kann eine nicht ausreichend hohe Verstromung der Braunkohle (limitiert bis Ende 2003, optional bis Ende 2005) als Verweigerungsgrund dienen. Konzessionsabgaben sind auch für durchgeleitete Energie zu bezahlen (§ 14). Dieses Gesetz führt den Wettbewerb erst in der Stromwirtschaft ein, denn die Regelungen für die Gaswirtschaft wurden wegen der zum Zeitpunkt der Beschlußfassung noch fehlenden EU-Gasrichtlinie nicht eingebracht.

Die Opposition hatte zwar vehement gegen dieses Gesetz gestimmt, weil sie erhebliche Nachteile für die Kommunen und deren Stadtwerke fürchtet; letztlich aber das Gesetz nicht verhindern können. Inzwischen ist von der SPD-Bundestagsfraktion eine Normenkontrollklage eingereicht worden.[11]

Die Kriterien zur Bestimmung von Durchleitungsentgelten

Mit diesem Gesetz ist allein noch kein Wettbewerb über den verhandelten Netzzugang möglich, denn es gibt darin keine Bestimmungen, wie die Entgelte für die Netzbenutzung zu ermitteln sind. Hierzu hatte das BMWi die betroffenen Verbände aufgefordert, eine Vereinbarung zu treffen. Seit dem 22.5.1998 liegt diese Vereinbarung vor und gibt eine Anleitung für die Ermittlung der Durchleitungsentgelte beim Strom.[12]

Dort sind im einzelnen folgende Regelungen gegeben: Die Entgelte werden getrennt für das Übertragungs-, das Verteilnetz, für Umspannen und für Systemdienstleistungen ermittelt. Beim Übertragungsnetz wird unterschieden zwischen einem Strukturjahresleistungspreis und einem Entfernungsleistungspreis. Beim Verteilungsnetz wird der Strukturjahresleistungspreis für das

jeweilige Netz ohne die Kosten für das Umspannen errechnet. Außerdem wurde eine mittlere Übertragungsentfernung eingeführt, die angeben soll, ob die nächst höhere Spannungsebene benutzt werden muß. Das Umspannen ist eine Pauschale aus den jeweiligen Kosten je Ebene. Die Systemdienstleistungen sind ebenfalls einePauschale aus den jeweiligen Kosten je Ebene für die Frequenz- und Spannungshaltung, den Versorgungswiederaufbau und die Betriebsführung (Messen und Verrechnen). Die Verluste werden als durchschnittliche Verluste je Ebene gerechnet. Deren Ausgleich kann über die Beschaffungskosten des Betreibers oder durch Mehreinspeisung erfolgen. Die Grenzentfernungen sind die jeweilige mittlere Übertragungsentfernung je Netzebene (10 kV: Stadt 2,6 km/Land 9,4 km).

Für die Durchleitung bei Erdgas ist eine solche Vereinbarung zur Bestimmung der Kriterien für die Durchleitung in Vorbereitung.

Auswirkungen auf die Stromverträge

Der Wettbewerb im deutschen Elektrizitätsmarkt beginnt gerade. Die Stromversorger sind jetzt eher bereit, auf Kundenwünsche einzugehen; denn der Kunde könnte sich tatsächlich einen anderen Versorger suchen. Damit wird der bisher im Kartellrecht verankerte „Als-ob-Wettbewerb“[13] für die Sonderkunden in realen Wettbewerb überführt. Oft werden heute Rabatte von 5 bis 10 % angeboten, wenn der Kunde bereit ist, einen längerfristigen Vertrag zu unterzeichnen. Bei länger laufenden Verträgen ist die Ausstiegs- oder die Sprechklausel von besondere Bedeutung. Sie soll zu jedem Zeitpunkt eine Anpassung der vereinbarten Konditionen an die Marktentwicklungen ermöglichen.

Mit dem Aufbrechen der Monopole sind auch andere Varianten der Vertragsgestaltung möglich geworden. So ist es nun für Verbraucher mit einer großen Anzahl von Einzelverbrauchern - wie Ketten von Supermärkten - möglich, in einem einzigen Vertrag alle Verbraucher unterzubringen und die Vielzahl von Einzelabrechnung zu einer zusammenzuführen. Diesen Service liefern viele Stromversorgungsunternehmen. Auch Unternehmen aus anderen Branchen als dem Einzelhandel sind an solchen Lösungen interessiert, sofern sie viele Verbrauchsstellen haben.

Weiterhin haben sich einzelne Unternehmen, die sonst nur wenig Einkaufsvolumen und damit Einkaufsmacht besitzen, entschlossen, eine Einkaufsgemeinschaft zu gründen, um mit einem größeren Volumen für die Versorger als Kunde interessanter zu sein. Entscheidend für den dauerhaften Erfolg einer solchen Einkaufsgenossenschaft ist die Gestaltung der inneren Struktur. Es muß klar und fair geregelt sein, wer welchen Rabatt erhält und wie auftretende Mehrkosten oder Veränderungen der Bezugsstruktur gehandhabt werden.

Die neuen Risiken bestehen zunächst darin, daß ein Stromeinkäufer die neuen Entwicklungen nicht nutzt, um seine Verträge den jeweils aktuellen Marktkonditionen anzupassen. Die Wettbewerbsfähigkeit seines Unternehmens wird damit sinken. Für die Zukunft ist mit dem Aufbau einer Strombörse zu rechnen. Vorbereitungen dazu werden bereits z. B. in Amsterdam getroffen. Diese wird neue Möglichkeiten eröffnen, Reservestrom, Spotmengen usw. einzukaufen und außerdem Sicherungsgeschäfte zu tätigen, die Preisschwankungen reduzieren werden. Es ist damit zu rechnen, daß das heutige Portfolio an Verträgen sich deutlich ändern wird.

Auswirkungen auf die Gasverträge

Da die Umsetzung der EU-Richtlinie in nationales Recht noch nicht in Deutschland erfolgt ist, verhält sich die Versorgungswirtschaft im wesentlichen noch nach dem alten Muster. Dennoch ist auch zu beobachten, daß die Vertriebsaktivitäten von einigen Gasversorgungsunternehmen steigen, um jetzt schon mehr Kundenbindung zu erreichen. Sobald die Umsetzung in nationales Recht nach der Bundestagswahl von der neu formierten Bundesregierung erfolgt ist und eine Verbändevereinbarung zur Bestimmung der Kriterien für die Durchleitungsentgelte vorliegt, werden sich durchgängig Änderungen ergeben.

Die Risiken für den zukünftigen Gaseinkauf werden sich ähnlich wie bei den Stromverträgen ergeben. Als Ort für einen Handelspunkt käme z. B. die Anlandestelle des Interconnector am Kontinent infrage.

Auswirkungen auf die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Die Wirtschaftlichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung fußt im wesentlichen auf den Preisen für Elektrizität und den Brennstoff. Die Differenz zwischen dem Preis für nicht die eingekauften Strom und den eingesetzten Brennstoff kann als Meßlatte für die Zukunft der KWK verwendet werden. Da zunächst Wettbewerb in der Stromwirtschaft eingeführt wird, ist zuerst dort mit sinkenden Preisen zu rechnen. Der Brennstoffpreis, für diesen Fall Erdgas, wird erst nach der Einführung von Wettbewerb sinken.

Es ist also damit zu rechnen, daß für heutige KWK-Anlagen zunächst der Fremdstrompreis sinkt, während der Gaspreis noch auf der selben Höhe bleibt. Damit wird die Differenz Strom- zu Gaspreis geringer und somit wird auch der Vorteil der KWK geringer ausfallen. Die Wirtschaftlichkeit steht damit aber noch nicht gleichzeitig in Frage; hier muß im Einzelfall gerechnet werden.

Mit der Einführung von Wettbewerb in der Gaswirtschaft ist dann damit zu rechen, daß sich die Differenz von Strom- zu Gaspreis generell wieder vergrößert.

Durch den kommenden Wettbewerb eröffnen sich aber noch weitere Chancen für die KWK. Während heute schwankende Brennstoffpreise ein nicht gut einzuschätzendes Risiko darstellen, kann bei der Verfügbarkeit einer Börse mit solchen Risiken anders umgegegangen werden. Es wird sich dann die Möglichkeit bieten, die Differenz Strom- zu Gaspreis über Börsengeschäfte besser zu kontrollieren. Das wird zwar Kosten zur Folge haben, kann sich aber langfristig dennoch auszahlen.

Ein kurzer Blick auf das Stromgeschäft im europäischen Ausland

In Großbritannien begann die Deregulierung 1990. Es ist Wettbewerb in der Stromwirtschaft eingeführt worden. Die Koordination zwischen England und Wales wird über einen Strom-Pool vorgenommen. Folge des Wettbewerbs sind sinkende Preise insbesondere für Großkunden.

In Norwegen begann die Liberalisierung 1991, 1995/1996 folgten Schweden und Finnland. Es ist eine Strombörsen in Helsinki eingerichtet worden. Haushalte können am Wettbewerb teilnehmen und wöchentlich ihren Versorger wechseln.

In der Schweiz wird ein Großhandelspreis für kurzfristige Lieferungen (Swiss Electricity Price Index) veröffentlicht. Beteiligt sind daran die Energiegesellschaft Laufenburg, die Aare Tessin AG für Elektrizität und Dow Jones als Informationsanbieter.

In den Niederlanden ist die Einrichtung einer Strombörse für 1999 geplant.

---

1 Vertrag zur Gründung der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft vom 25.3.1957 i. d. F. vom 22.7.1975

2 idem, Artikel 85 (1)

3 Gesetz zur Förderung der Energiewirtschaft (Energiewirtschaftsgesetz = EnWG) vom 13.12.1935 i. d. F. vom 19.12.1977

4 idem, Präambel.

5 siehe hierzu auch die Preisvergleiche des VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft in Essen.

6 z. B. Finanzierung der deutschen Steinkohle über die Ausgleichsabgabe oder die Erdgassteuer.

7 Statistisches Bundesamt. Input-Output-Tabellen für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden: Verschiedene Jahrgänge.

8 Richtlinie des Europäischen Parlaments und der Rates vom 19.12.1996 betreffend gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 40. Jahrgang, Brüssel: 30.12.1997.

9 Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates betreffend gemeinsame Vorschriften für den Erdgasbinnenmarkt in der Fassung vom 6.5.1998

10 Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1998, Teil 1, Nr. 23, Bonn: 28.4.1998.

11 Presseerklärung der SPD-Bundestagsfraktion vom 1.7.1998

12 Vereinbarung über die Kriterien zur Bestimmung von Durchleitungsentgelten. BDI, Köln, VDEW, Frankfurt, VIK, Essen: 22.5.1998.

13 Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen. § 103 (1).

Die Rolle der Braunkohle im Energiemix der Bundesrepublik Deutschland

Hans-Wilhelm Schiffer

Rheinbraun AG, Köln

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland betrug 1997 rund 494 Millionen Tonnen Steinkohleneinheiten (Mio. t SKE). Wichtigste Energieträger bei der Deckung dieses Verbrauchs waren Mineralöl (39,5 %) und Erdgas (21,6 %). Es folgen Steinkohle (14,1 %), Kernenergie (12,8 %) und Braunkohle (11,0 %). Wasserkraft und sonstige Energieträger hielten 2,0 % (Grafik 1).

Rund 72 % des Energiebedarfs mußten 1997 durch Importe gedeckt werden. Wenn man die Kernkraft den heimischen Energien zurechnet, beträgt die Energieimportquote immer noch 60 %. Nennenswerte eigene Vorkommen sind in Deutschland im wesentlichen auf Steinkohle und Braunkohle beschränkt. Dabei ist die im Tagebau abgebaute Braunkohle - gemessen an der Fördermenge - der wichtigste Energieträger. Die Braunkohle ist zudem der einzige heimische Energieträger, der in ausreichender Menge und zugleich subventionsfrei zu wettbewerbsfähigen Bedingungen verfügbar ist.

Braunkohle gehört - neben Kernenergie und Steinkohle - zu den Säulen der Stromerzeugung in Deutschland (Grafik 2). So basierten 1997 von der gesamten Brutto-Stromerzeugung in Deutschland von rund 547 Milliarden Kilowattstunden 25,5 % auf Braunkohle, 26,3 % auf Steinkohle (davon etwa 19 %-Punkte deutsche Steinkohle und rund 7 %-Punkte Importsteinkohle), 31,1 % auf Kernenergie, 8,8 % auf Erdgas, 1,1 % auf Öl, 4,6 % auf erneuerbare Energien und 2,6 % auf sonstige Energieträger.

Gewinnung nach Revieren

1997 wurden in Deutschland 177,2 Mio. t Braunkohle gewonnen. Diese Fördermenge entspricht einem Heizwert von 53,6 Mio. t SKE. Einfuhren an Braunkohlen trugen 1997 mit 1,2 Mio. t SKE, und damit mit lediglich 2 %, zum Aufkommen bei.

Die Braunkohlenförderung konzentriert sich in Deutschland vor allem auf drei Regionen. Das sind das rheinische Revier im Westen von Köln, das Lausitzer Revier bei Dresden und das Mitteldeutsche Revier bei Leipzig. Daneben wird - in allerdings deutlich geringerem Umfang - bei Helmstedt Braunkohle in zwei Tagebauen gewonnen (Grafik 3).

Im Rheinland waren Förderung und Verwendung von Braunkohle in den letzten Jahrzehnten einem weitreichenden Strukturwandel unterworfen, der von einer umfassenden Modernisierung und Rationalisierung dieses Wirtschaftszweiges begleitet war. Fünf entscheidende Punkte sind in diesem Zusammenhang zu erwähnen.

- 1960 wurden insgesamt 81 Mio. t Braunkohle in 17 Tagebauen gewonnen. 1997 wurden aus den verbliebenen vier Tagebauen rund 100 Mio. t abgebaut (Grafik 4).
- Die Betriebskonzentration war begleitet von einem Zusammenschluß der Braunkohleunternehmen. Heute ist die Rheinbraun AG das einzige im Rheinland verbliebene Bergbauunternehmen.
- Rheinbraun beschäftigt heute 11 630 Mitarbeiter (Stand: 30.06.1998) - im Vergleich zu mehr als 20 000 Beschäftigten im Jahr 1960. Entsprechend hat sich die Arbeitsproduktivität in diesem Zeitraum mehr als verdoppelt.

- Effizienzsteigerung durch Übergang auf Großgeräte mit einer Kapazität von 240 000 m³ pro Tag. Diese Geräte werden von lediglich fünf Mitarbeitern in drei Schichten bedient.
- Schließlich der Wandel der Nachfrage (Grafik 5). In der Vergangenheit war Braunkohle vorrangig für Heizzwecke genutzt worden. Heute werden mehr als 85 % der geförderten Braunkohle in tagebaunahen Kraftwerken zur Stromerzeugung eingesetzt. Sämtliche Kraftwerke sind mit hochwirksamen Rauchgasreinigungsanlagen nachgerüstet worden.

Der Strukturwandel, der sich im rheinischen Revier über mehrere Jahrzehnte erstreckte, mußte in den ostdeutschen Revieren Lausitz und Mitteldeutschland nach der Wiedervereinigung in einem Viertel der Zeit nachvollzogen werden. So hatte sich die Zahl der Tagebaue in diesen beiden Revieren von 37 im Jahr 1990 bis Ende 1997 auf 10 reduziert. Die Förderung wurde von 301 Mio. t im Jahr 1989 auf 74 Mio. t im Jahr 1997 reduziert. Die Herstellung von Briketts, dem wichtigsten Veredlungsprodukt, mußte von 47,2 Mio. t im Jahr 1989 auf 2,0 Mio. t im Jahr 1997 vermindert werden. Dieser Prozeß war begleitet von einem Belegschaftsabbau von 138 831 Beschäftigten im Jahr 1989 um fast 125 000 in den beiden Revieren Lausitz und Mitteldeutschland auf 14 100 Mitarbeiter zur Jahresmitte 1998.

Von der gesamten Fördermenge in der Lausitz entfielen 1997 rund 50,2 Mio. t auf die privatisierte Lausitzer Braunkohle AG (LAUBAG) und 9,3 Mio. t auf die staatliche Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV). Die LAUBAG verfügt über insgesamt fünf Tagebaue. Die LMBV wird ihre jetzt noch in zwei Tagebauen betriebene Braunkohlengewinnung bis zum Jahr 2000 beenden. Wichtigstes Unternehmen des Mitteldeutschen Reviers ist die Ende 1993 von einem anglo-amerikanischen Konsortium erworbene Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG).

Im Helmstedter Revier fördert die Braunschweigische Kohlen-Bergwerke AG (BKB), die über ihren Anteilseigner PreussenElektra AG in den VEBA-Konzern eingebunden ist, in zwei Tagebauen Braunkohle.

Verwendung der Braunkohle

Angesichts ihres Wassergehalts von durchschnittlich etwa 55 % ist der Transport von Rohbraunkohle über größere Entfernungen nicht wirtschaftlich. Vielmehr erfolgen die unmittelbare Verwendung oder die Veredlung zu Braunkohlenprodukten überwiegend in der Nähe der Tagebaue.

Schwerpunkt der Braunkohlennutzung ist die Stromerzeugung. So wurden 1997 153,3 Millionen Tonnen Braunkohle aus inländischer Förderung an Kraftwerke der öffentlichen Versorgung abgesetzt. Das entsprach über 86 % der gesamten Gewinnung.

- Im rheinischen Revier betreibt die RWE Energie AG, wie die Rheinbraun AG ein Konzernunternehmen der RWE AG, fünf Braunkohlenkraftwerke mit einer Brutto-Engpaßleistung von insgesamt 9 898 Megawatt (MW). Daraus wurden 1997 rund 74,1 Milliarden Kilowattstunden Strom erzeugt. Die Ausnutzungsdauer der Kraftwerke, die sämtlich in den achtziger Jahren mit hocheffizienten Rauchgasreinigungsanlagen nachgerüstet worden waren, betrug 7 489 Stunden. Dies entspricht einer Ausnutzung der möglichen Leistung von 85,7 % (Grafik 6).
- Im Lausitzer Revier wurden 4 000 MW Kraftwerkskapazität der VEAG Vereinigte Energiewerke AG bis Mitte 1996 mit Rauchgasreinigungsanlagen nachgerüstet. Als Ersatz für stillzulegende nicht wirtschaftlich nachrüstbare Altkraftwerke sind zwei neue Blöcke auf Braunkohlenbasis mit jeweils rund 800 MW in den Jahren 1997 bzw. 1998 am Standort Schwarze Pumpe in Betrieb genommen worden. In Boxberg befindet sich ein weiterer Block mit einer Leistung von rund 900 MW im Bau.

Der Bau eines vierten Blocks richtet sich nach der Entwicklung des Stromabsatzes. Einschließlich weiterer Anlagen auf kommunaler Ebene werden damit künftig Braunkohlenkraftwerke mit einer Leistung von insgesamt über 7 000 MW in der Lausitz zur Verfügung stehen.

- Die im mitteldeutschen Revier bestehenden Altkraftwerke werden durch moderne Blöcke mit Wirkungsgraden von über 40 % und hochwirksamen Rauchgasreinigungsanlagen ersetzt. Das erste dieser neuen Kraftwerke ist Ende 1995 mit einer Bruttoleistung von rund 1 000 MW ans Netz gegangen. An dieser Anlage der VEBA Kraftwerke Ruhr AG sind auch zwei Gesellschafter der MIBRAG beteiligt. Zusätzlich werden am Standort Lippendorf im Südraum von Leipzig zur Zeit zwei Kraftwerksblöcke von je 933 MW errichtet. Gesellschafter dieser Anlagen, deren Inbetriebnahme in den Jahren 1999 und 2000 zu erwarten ist, sind die Stromverbundunternehmen VEAG Vereinigte Energiewerke AG, Bayernwerk AG und Energie Baden-Württemberg AG (EnBW). Damit werden in Mitteldeutschland langfristig Großkraftwerke auf Braunkohlenbasis mit einer Gesamtkapazität von knapp 2 900 MW verfügbar sein.
- Die bei Helmstedt gewonnene Braunkohle wird in zwei Kraftwerken der Braunschweigische Kohlen-Bergwerke AG (Gesamtleistung 705 MW) zur Stromerzeugung genutzt.
- Die bayerischen Braunkohlenkraftwerke Arzberg (243 MW) und Schwandorf (518 MW), die zum Bayernwerk-Konzern gehören, verfeuern hauptsächlich tschechische Hartbraunkohle.

Nach den Kraftwerken der öffentlichen Versorgung repräsentieren die Veredlungsbetriebe den wichtigsten Abnahmebereich der Rohbraunkohle. 1997 wurden rund 17,6 Mio. t Rohbraunkohle in den Fabriken des Braunkohlenbergbaus zur Herstellung im wesentlichen fester Produkte eingesetzt.

In den letzten Jahren hat der Braunkohlenbergbau erheblichen Aufwand betrieben, um umweltgerechte, in der Anwendung komfortable Braunkohlenprodukte - wie Braunkohlenstaub, Wirbelschichtbraunkohle und Braunkohlenkoks - mit den dazugehörigen Techniken des Transports und des Einsatzes zu entwickeln. Damit konnte eine Verlagerung vom traditionellen Hausbrandprodukt Brikett in Richtung zukunftsträchtiger Erzeugnisse für die Industrie erreicht werden.

Veränderungen im deutschen Strommarkt

Die Energiewirtschaft - und insbesondere der aus Sicht der Braunkohle wichtige Strommarkt - befinden sich gegenwärtig national und international in einem grundlegenden Strukturwandel. Das Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts, das auch der Umsetzung der EU-Binnenmarktrichtlinie Strom in nationales Recht dient, ist am 29. April 1998 in Kraft getreten. Mit dieser Reform sind die geschlossenen Versorgungsgebiete abgeschafft und der Strommarkt in Deutschland für den Wettbewerb geöffnet worden.

Darüber hinaus wurden weitere energiepolitische Rahmenbedingungen verändert, die den künftigen Mix der Einsatzenergien in der Stromerzeugung beeinflussen (Grafik 7). So verringert sich der Beitrag der deutschen Steinkohle aufgrund der Rückführung der staatlichen Hilfen deutlich. Ferner ist zweifelhaft, daß altersbedingt vom Netz gehende Kernkraftwerke durch neue Anlagen auf Kernenergiebasis ersetzt werden. Bei zwei Säulen der künftig zudem noch leicht wachsenden Stromversorgung in Deutschland sind somit Einbußen absehbar (Grafik 8). Vor diesem Hintergrund ist ein stabiler Versorgungsbeitrag der Braunkohle energiewirtschaftlich erforderlich. Dies gilt für das Rheinland ebenso wie für die Lausitz und für Mitteldeutschland.

Garzweiler II

Im Rheinland ist hierfür der Aufschluß des Anschlußtagebaus Garzweiler II notwendig, der den ab dem Jahr 2006 allmählich auslaufenden Tagebau Garzweiler I ersetzen soll (Grafik 9).

Am 31. März 1995 war der Tagebau Garzweiler II von der Landesregierung Nordrhein-Westfalen genehmigt worden. Das Bergamt Düren hat am 22. Dezember 1997 die Zulassung des Rahmenbetriebsplans für den Tagebau Garzweiler I/II erteilt. Die Zulassung bezieht sich auf das gesamte beantragte und im Braunkohlenplan festgelegte Abbaugebiet und gilt für den Zeitraum 2001 bis 2045. Die Rahmenbetriebsplanzulassung stellt eine belastbare bergrechtliche Grundlage für den Anschlußtagebau Garzweiler II dar. Unter Berücksichtigung aller vorliegenden Gutachten und Stellungnahmen wurde damit die grundsätzliche Beherrschbarkeit des Projektes festgestellt. Dies gilt insbesondere auch für die wasserwirtschaftlichen Aspekte.

Der Antrag für die grundlegende Genehmigung nach Wasserhaushaltsgesetz für den Tagebau Garzweiler II, die wasserrechtliche Erlaubnis für die Sümpfung, wurde von Rheinbraun bereits am 21. Dezember 1995 eingereicht. Als Investor erwartet das Unternehmen von der nordrhein-westfälischen Landesregierung, daß auch die wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren nach Recht und Gesetz und ohne Verzögerungen durchgeführt werden. Sachliche Gesichtspunkte stehen einer Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis nicht im Wege. Das Unternehmen geht daher davon aus, daß die Maßnahmen zur Grundwasserabsenkung im Jahr 2001 und der Abbau im Feld Garzweiler II im Jahr 2006 planmäßig beginnen werden.

Im April 1998 wurden die gegen Garzweiler II beim Europäischen Parlament anhängigen Petitionsverfahren abgeschlossen. Der Petitionsausschuß kam auf Grundlage des von der Europäischen Kommission vorgelegten Untersuchungsberichtes zu dem Ergebnis, daß der Braunkohlenplan Garzweiler II in vollem Umfang europäischem Recht entspricht.

Nach Abweisung der Klagen gegen den Braunkohlenplan durch den Verfassungsgerichtshof Nordrhein-Westfalen Mitte 1997 und der Zulassung des Rahmenbetriebsplanes Ende 1997 erfolgte hiermit ein weiterer wichtiger Schritt zur Realisierung von Garzweiler II.

Umweltpolitische Weichenstellungen

Neben der Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts standen die Beschlüsse der Vertragsstaatenkonferenz in Kyoto sowie die kontroverse Debatte über die Einführung von Energiesteuern im Mittelpunkt der aktuellen energie- und umweltpolitischen Diskussion.

Die in Kyoto im Dezember 1997 vereinbarten Verpflichtungen zur Emissionsminderung beziehen sechs klimarelevante Spurengase ein, sie sind also nicht auf Kohlendioxid verengt. Gleichzeitig wurde in Japan beschlossen, auch flexible Instrumente zuzulassen, um die Reduktionsziele möglichst kostengünstig zu erreichen. Die Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz wird diesem Ansatz gerecht.

Zur Erreichung der im Dezember 1997 in Kyoto eingegangenen Reduktionsverpflichtungen im Bereich der Treibhausgas-Emissionen legte der Umweltministerrat der EU im Juni 1998 die Lastenverteilung für die einzelnen Mitgliedstaaten der Gemeinschaft fest. Danach ist für Deutschland eine Senkung der klimarelevanten Emissionen bis zum Zeitraum 2008/2012 um 21 % gegenüber dem Basisjahr 1990 vorgesehen.

Die in diesem Zusammenhang - neben anderen Instrumenten - diskutierte Einführung einer kohlendioxidorientierten Energiesteuer wäre energie- und beschäftigungspolitisch unvertretbar.

- Durch die damit verbundene Diskriminierung der subventionsfreien deutschen Braunkohle gegenüber den Importenergien Erdgas und Steinkohle würde der bewährte ausgewogene Energiemix gefährdet. Ein weiterer Anstieg der Importabhängigkeit unserer Energieversorgung wäre die Folge. Arbeitsplätze und Wertschöpfung im Inland gingen verloren.
- Die Stromerzeugung aus Kernkraftwerken würde massiv begünstigt. Angesichts des fehlenden Konsenses für einen Ausbau der Kernenergie in Deutschland käme es auch hier zu Verlagerungseffekten etwa durch Importe von Atomstrom aus Frankreich.
- Eine CO_2-orientierte Steuer stellte - angesichts des relativ hohen Kohlenanteils an der deutschen Energieversorgung - auch bei europaweiter Einführung eine Sonderbelastung für den deutschen Standort dar.
- Schließlich würde eine CO_2-basierte Steuer - anders als ein vom Energieeinsatz zur Stromerzeugung unabhängiger einheitlicher Steuersatz auf Elektrizität - Importe aus dem Ausland selbst dann begünstigen, wenn der Strom dort umweltbelastender erzeugt wird als in Deutschland. Auf Stromeinfuhren könnten nämlich in Abhängigkeit von der Einsatzenergie unterschiedlich hohe Steuern nicht erhoben werden.

Auch unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Klimaschutzes ließe sich eine Steuer, die nur auf CO_2 abzielt, nicht rechtfertigen. Bezieht man nämlich andere Spurengase in die Betrachtung ein, wie dies gemäß Kyoto-Protokoll vorgesehen ist, so gleicht sich die Klimarelevanz der fossilen Energieträger Braunkohle, Steinkohle, Öl und Erdgas stark an.

Herausforderungen für die Braunkohle

Die Braunkohle hat zur Zukunftssicherung insbesondere folgende Aufgaben zu bewältigen:

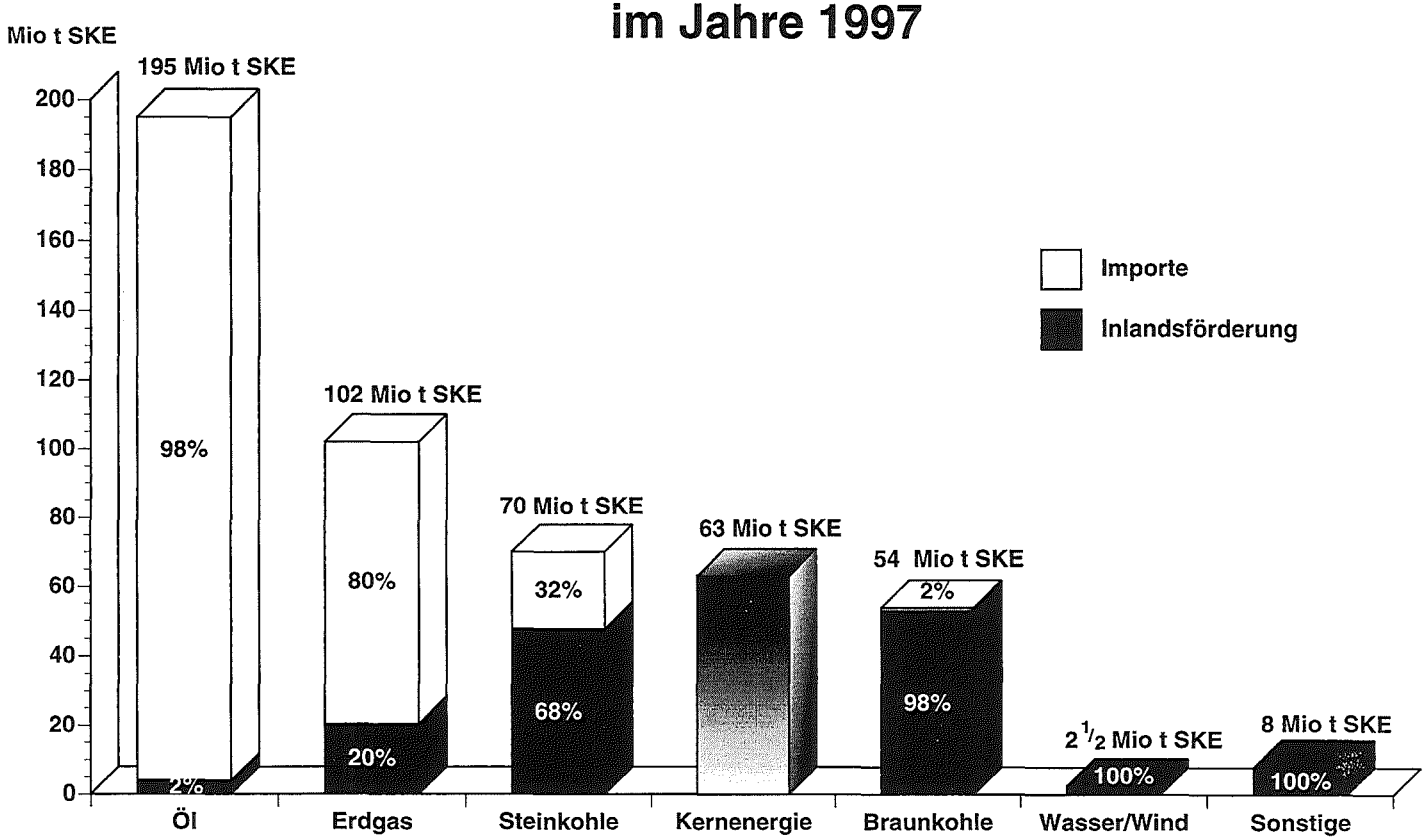
- Sie muß ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Importenergien bewahren. Hierzu sind umfassende Rationalisierungsmaßnahmen in allen Unternehmensbereichen eingeleitet worden. Braunkohle kann deshalb künftig nicht zur zu real sondern sogar zu nominal sinkenden Preisen angeboten werden. Dadurch wird die Wettbewerbsfähigkeit erhalten bleiben.
- Die Anforderungen des Klimaschutzes erfordern einen Einsatz der Braunkohle in noch effizienteren Anlagen. Im rheinischen Revier hat RWE Energie Retrofitmaßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung an 21 bestehenden Braunkohlenblöcken durchgeführt. Ferner hat RWE Energie am 3. August 1998 am Standort Niederaußem mit dem Bau eines Braunkohlenkraftwerks mit optimierter Anlagentechnik (BoA) begonnen. Dieses neue Kraftwerk, das eine Leistung von 950 MW haben und 2002 ans Netz gehen wird, wird mit einem Wirkungsgrad von mindestens 43 % den Wirkungsgrad der zuletzt im Rheinland gebauten Blöcke um ein Fünftel überschreiten (Grafik 10). Zur Erschließung weiterer Wirkungsgradpotentiale entwickeln Elektrizitätswirtschaft und Braunkohlenindustrie neue fortschrittliche Kraftwerkstechniken: Mit dem Braunkohlenkraftwerk mit optimierter Anlagentechnik und mit separater vorgeschalteter Kohletrocknung (BoA-Plus) können Wirkungsgrade von 48 bis 50 % erzielt werden (Grafik 11).

Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, daß in Deutschland langfristig eine Braunkohlenförderung von rund 170 Mio. t/Jahr realisiert werden kann. Dann wäre die Braunkohle auch im

Jahr 2020 noch mit rund einem Viertel an der Deckung des Strombedarfs in Deutschland beteiligt (Grafik 12).

Anfang August 1998 wurde der PROGNOS AG, Basel, vom Bundesministerium für Wirtschaft der Auftrag zur Erstellung einer neuen Energieprognose für Deutschland erteilt. Prognosehorizont der Studie mit dem Titel 'Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt' ist - wie auch bei dem Ende 1995 vorgelegten Gutachten - das Jahr 2020. Dem Institut wurde der Auftrag erteilt, eine erste Trendskizze bereits bis Dezember 1998 vorzulegen. Als Abgabetermin für das Gesamtwerk wurde der 30.07.1999 vereinbart. Diese Prognose wird eine wichtige Grundlage für die Neuauflage eines Energieprogramms nach der Bundestagswahl am 27. September 1998 darstellen.

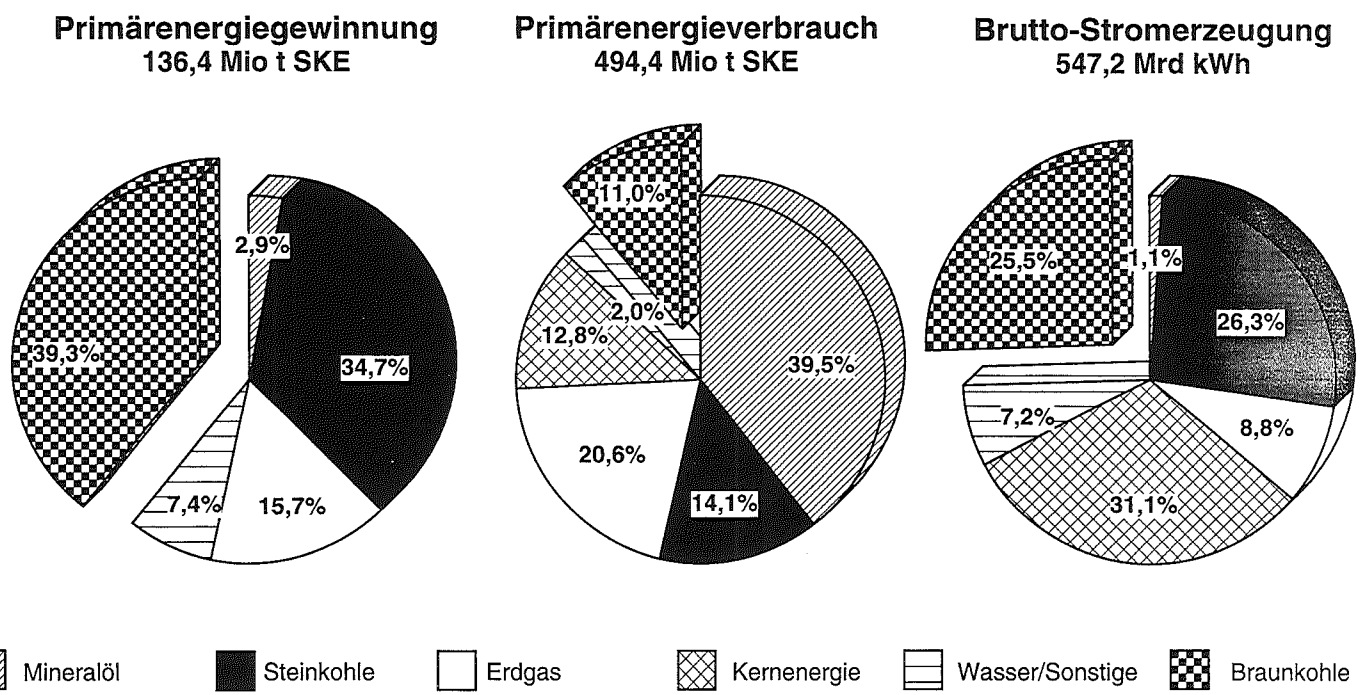
Energie-Importabhängigkeit der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1997



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 01/98 und eigene Berechnungen

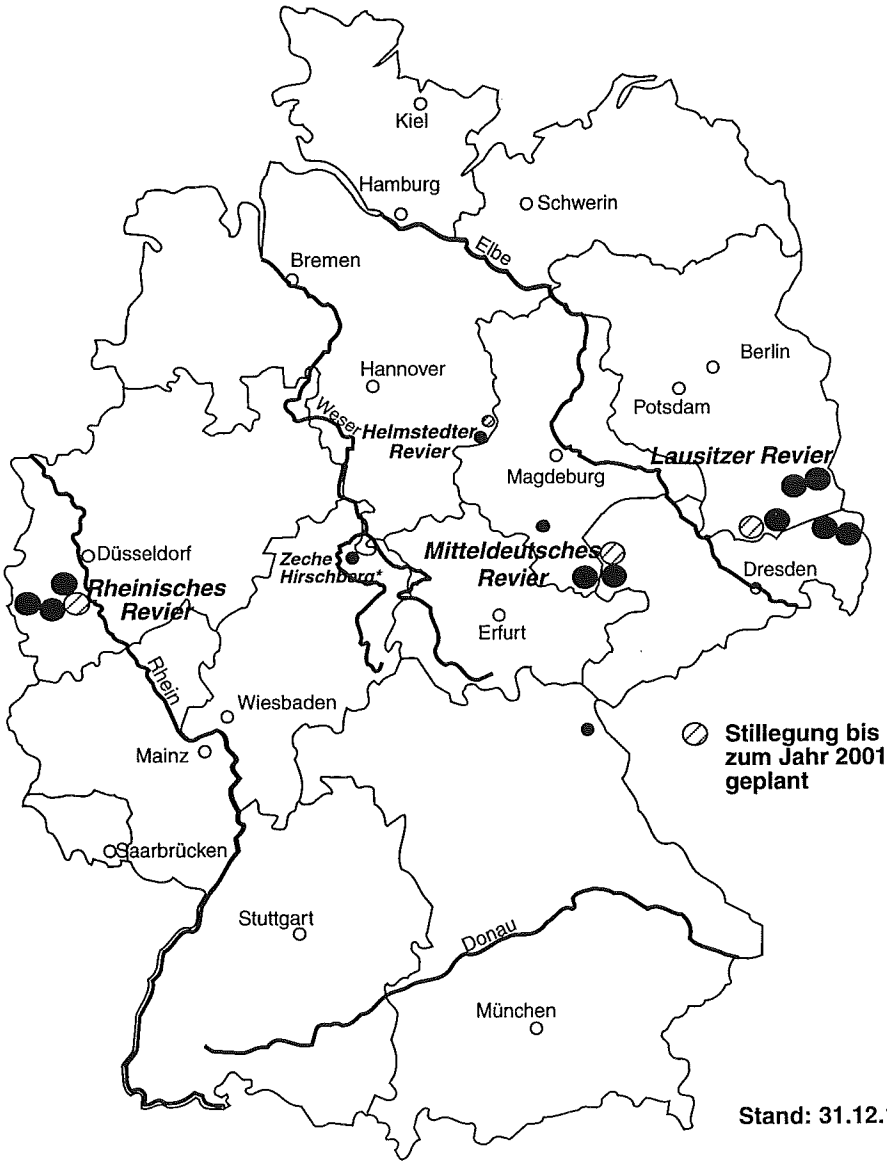
RHEINBRAUN

Die Stellung der Braunkohle in der Energiewirtschaft Deutschlands 1997



RHEINBRAUN

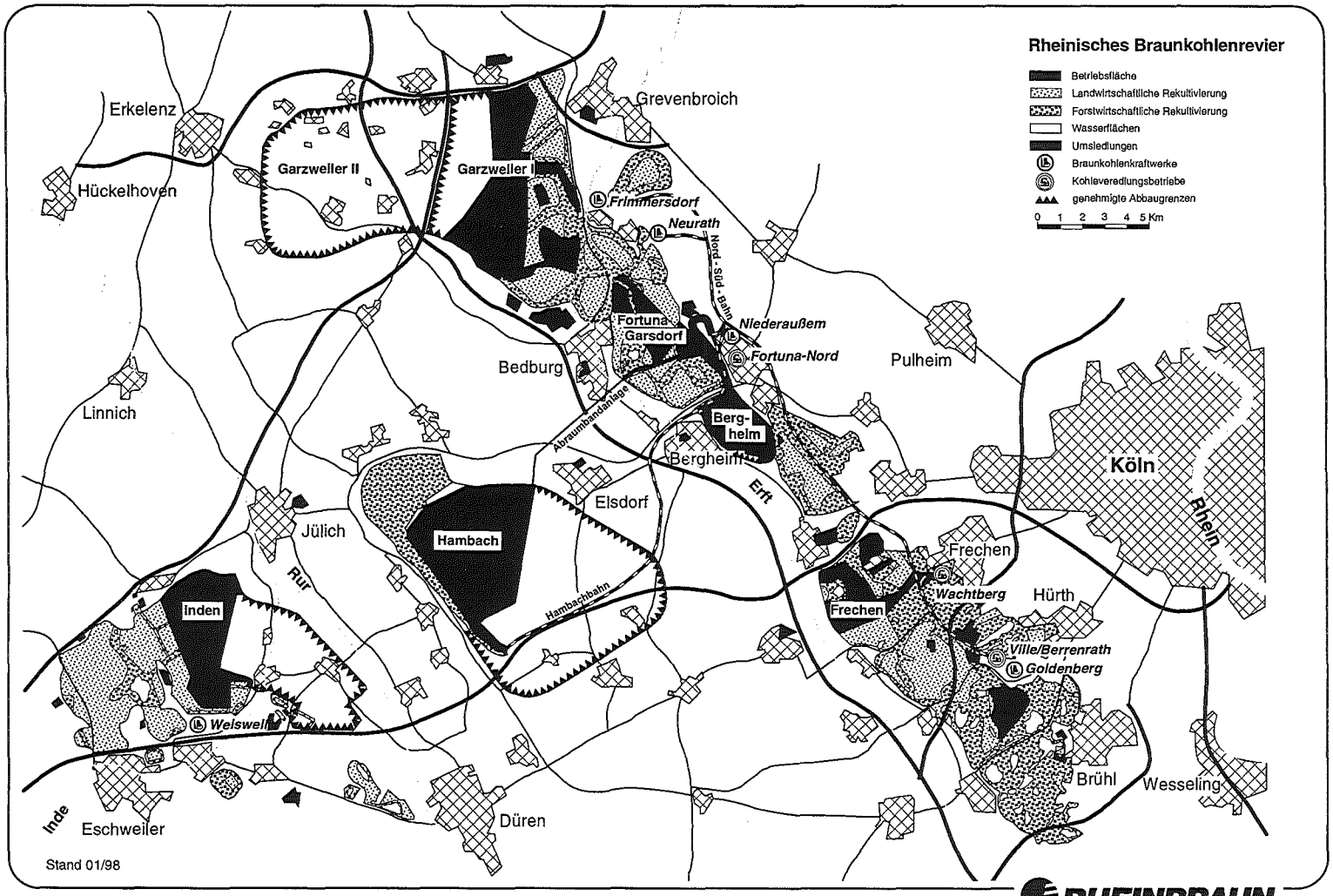
Braunkohlentagebaue in der Bundesrepublik Deutschland



* zum Teil Tiefbau

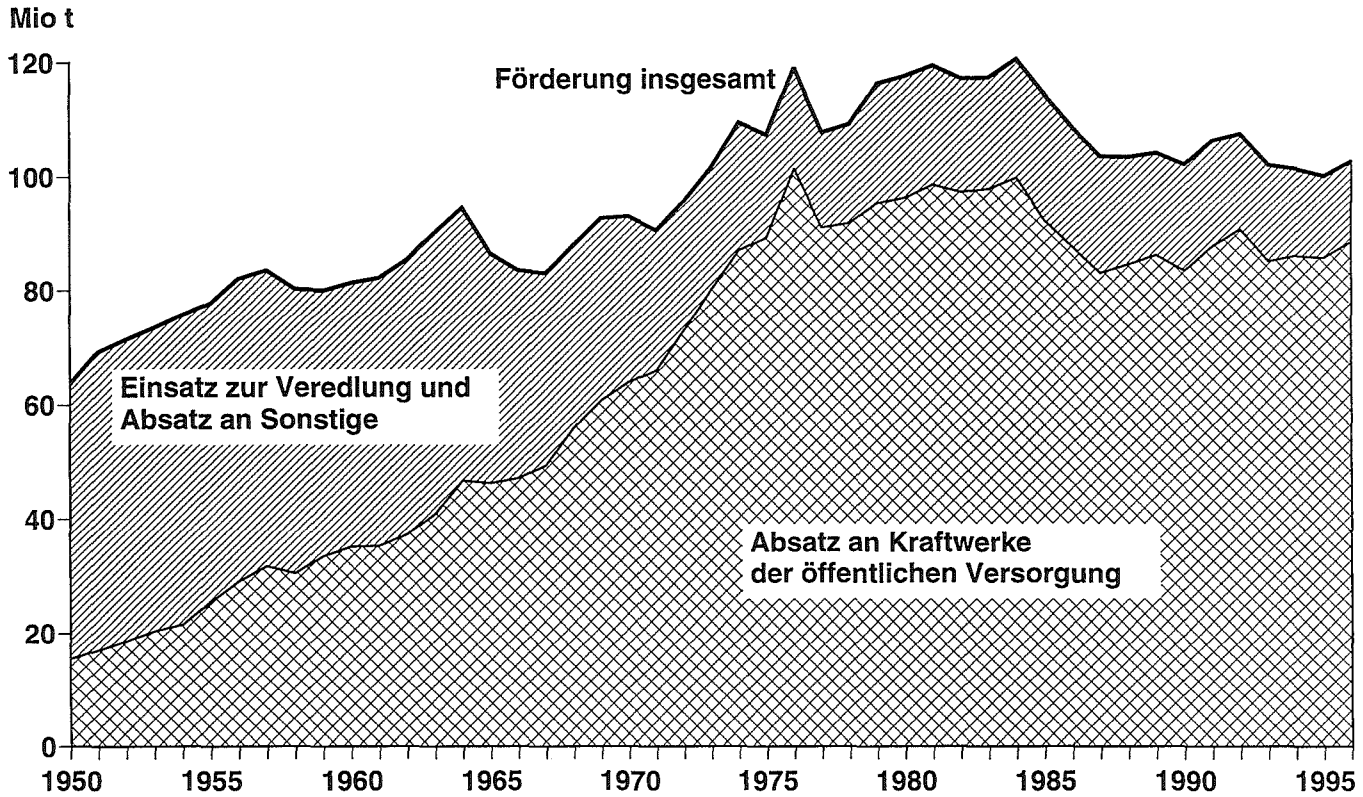
GA 1/1 GZ-D8/0034 - S 21

RHEINBRAUN



BT 1 Zi. 26.03.98 98REZ020.Ds4

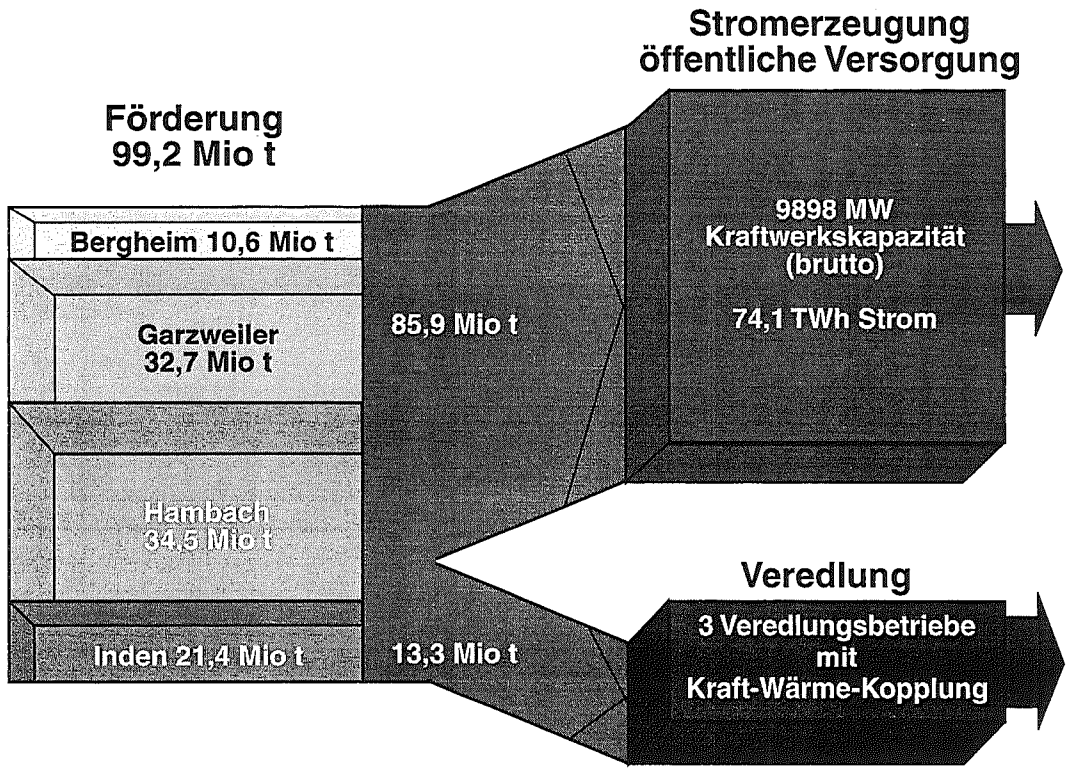
Strukturveränderung der Braunkohlennutzung
(Beispiel Rheinisches Revier)



GA 1/1 GZ- D6/0812 - S 21

RHEINBRAUN

Braunkohle im Rheinland 1997



Strom

51 % des RWE-Strom-aufkommens

54 % der Stromerzeugung der öffentlichen Versorgung in NRW

15 % der Stromerzeugung der öffentl. Versorgung in Deutschland

Veredlungsprodukte

Braunkohlenstaub
Braunkohlenbrikett
Wirbelschichtbraunkohle
Braunkohlenkoks

davon:
3/4 für Industrie
1/4 für Hausbrand

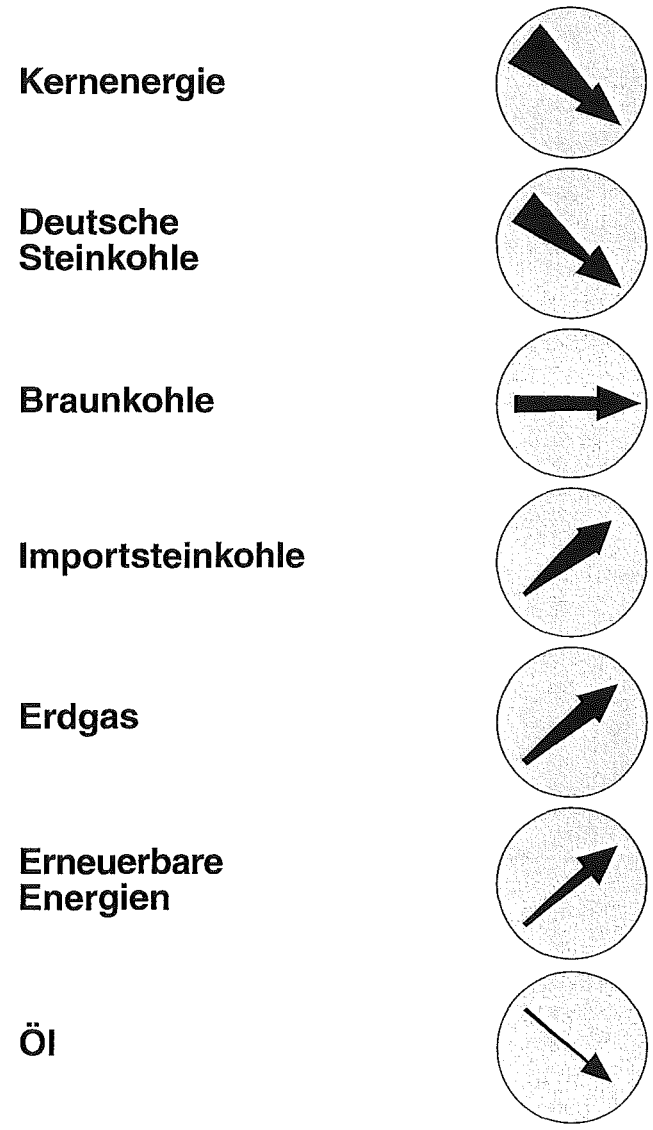
RHEINBRAUN

Rahmenbedingungen der Stromversorgung

	Vergangenheit	Aktuelle Situation
Generelle Situation	Gebietsmonopole; Versorgungssicherheit mit hohem Stellenwert	Liberalisierung der Strommärkte; Vorrang für Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit
Kernenergie	Wettbewerbsfähige Option in der Grundlast	Fehlender energiepolitischer Konsens
Braunkohle	Vorteil bei den Brennstoffkosten gegenüber allen fossilen Energien	Behauptung der Wettbewerbsfähigkeit kein Selbstläufer mehr; Investitionssicherheit eingeschränkt
deutsche Steinkohle	Jahrhundertvertrag - flankiert durch Zuschüsse aus Kohlepfennig	Ermöglichung wettbewerbsfähiger Preisstellung durch Umstellung des Subventionssystems
Importsteinkohle	Beschränkung der Einfuhren	Aufhebung der Kontingentierung
Erdgas	Energiepolitische Restriktionen	Entfall der Genehmigungspflicht zum Bau neuer Erdgaskraftwerke
Erneuerbare	Ausschöpfung der wettbewerbsfähigen Potentiale	Starke Subventionierung - insbesondere durch Stromeinspeisungsgesetz
Heizöl	Energiepolitische Restriktionen	Aufhebung der Vorschriften zur Beschränkung der Errichtung vor Ölkraftwerken und des Einsatzes von Ölkraftwerken

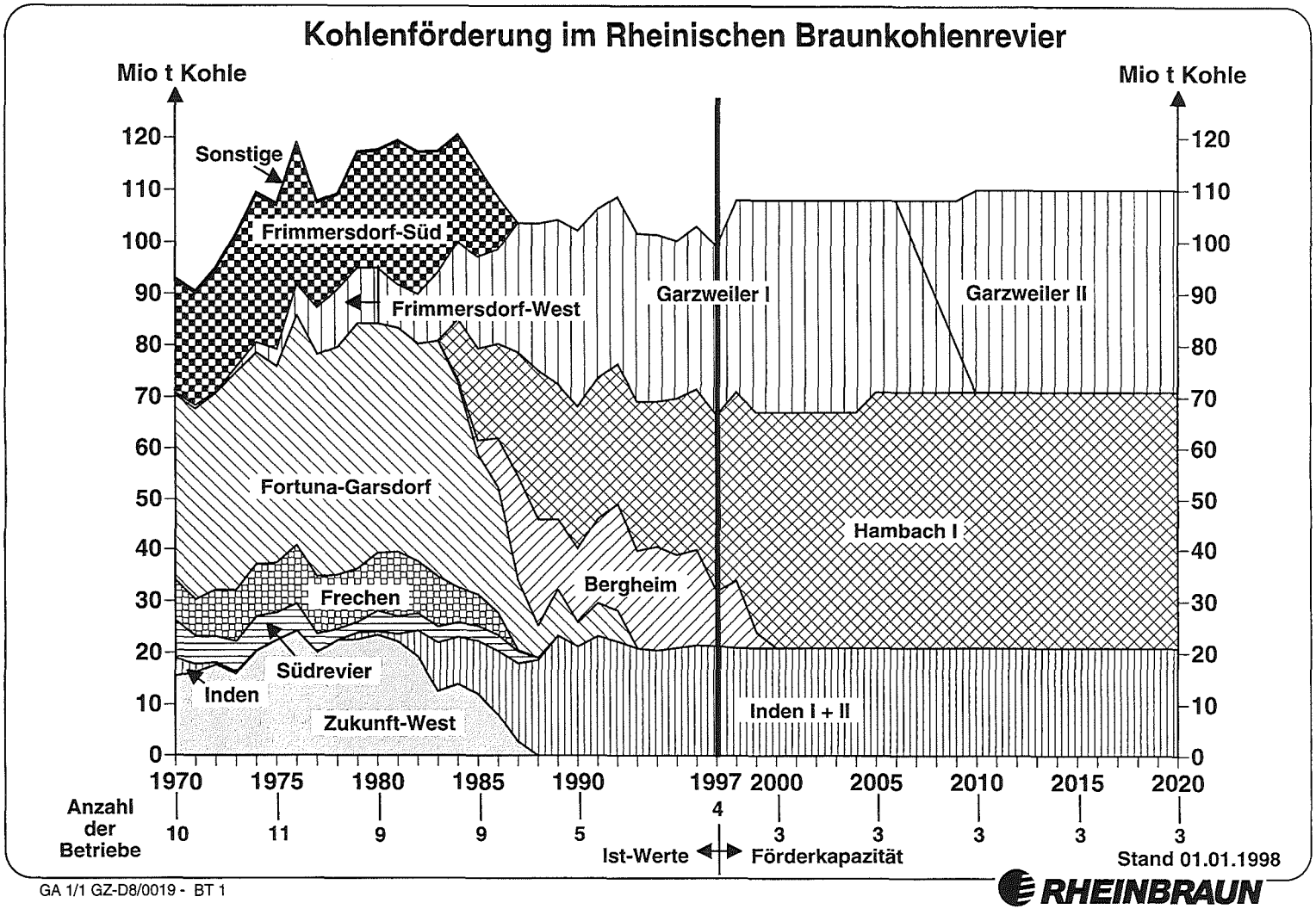
RHEINBRAUN

Künftige Entwicklung des Energieeinsatzes zur Stromerzeugung in Deutschland

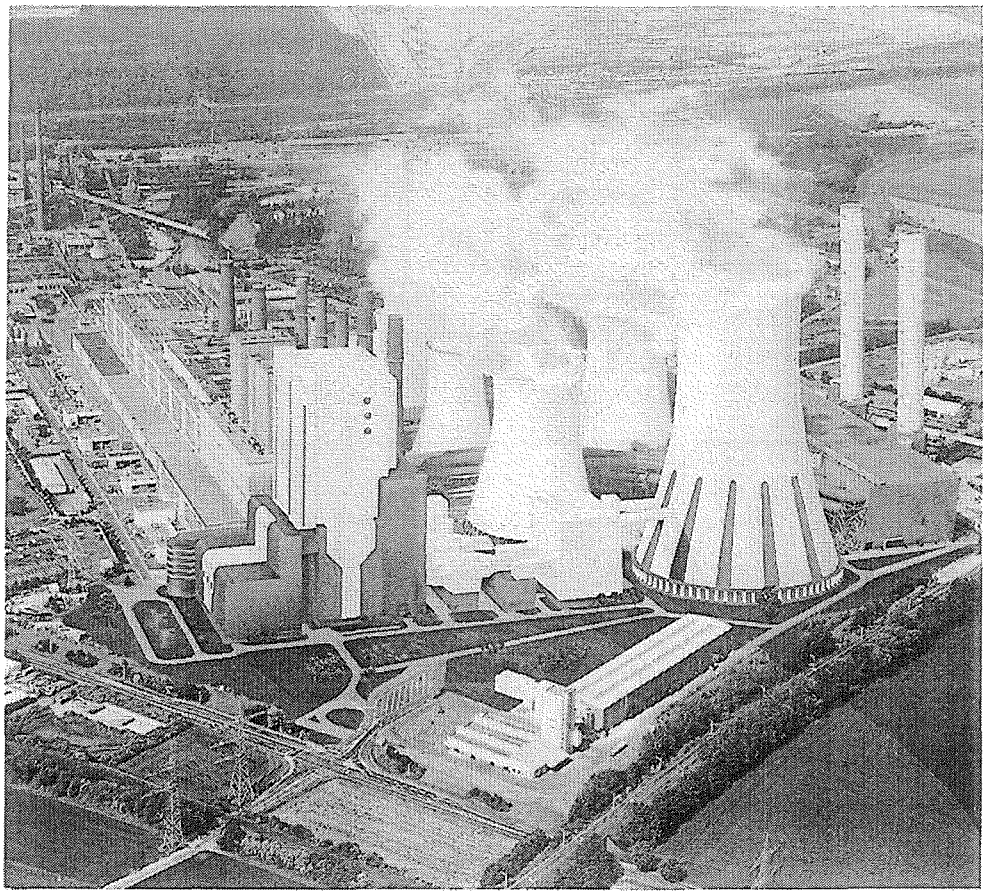


GA 1/1 GZ-D6/1382 - S21

RHEINBRAUN


Kohlenförderung im Rheinischen Braunkohlenrevier
Mio t Kohle
Mio t Kohle
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Sonstige
Frimmersdorf-Süd
Frimmersdorf-West
Garzweiler I
Garzweiler II
Fortuna-Garsdorf
Hambach I
Bergheim
Frechen
Südrevier
Inden
Zukunft-West
Inden I + II
1970
1975
1980
1985
1990
1997
2000
2005
2010
2015
2020
Anzahl der Betriebe
10
11
9
9
5
4
3
3
3
3
3
Ist-Werte
Förderkapazität
Stand 01.01.1998
GA 1/1 GZ-D8/0019 - BT 1
RHEINBRAUN

Die neue Kraftwerksgeneration 1. BoA-Block der RWE Energie AG in Niederaußem

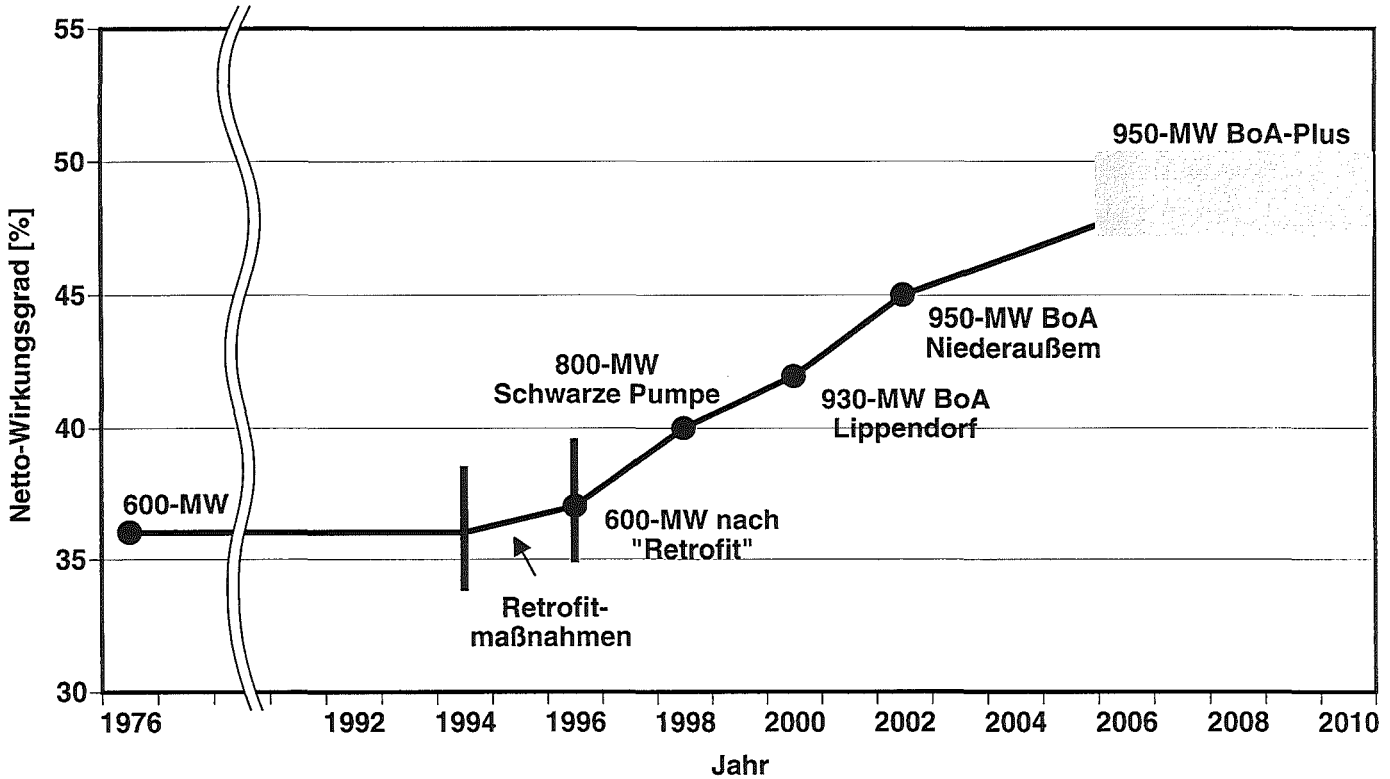


Blockleistung	**978 MW**
Nettowirkungsgrad	**> 43 %**
Investitionsvolumen	**2,7 Mrd. DM**

GA 1/1 GZ-D8/0571 - S 21

RHEINBRAUN

Entwicklung der Wirkungsgrade in der Braunkohlekraftwerkstechnik

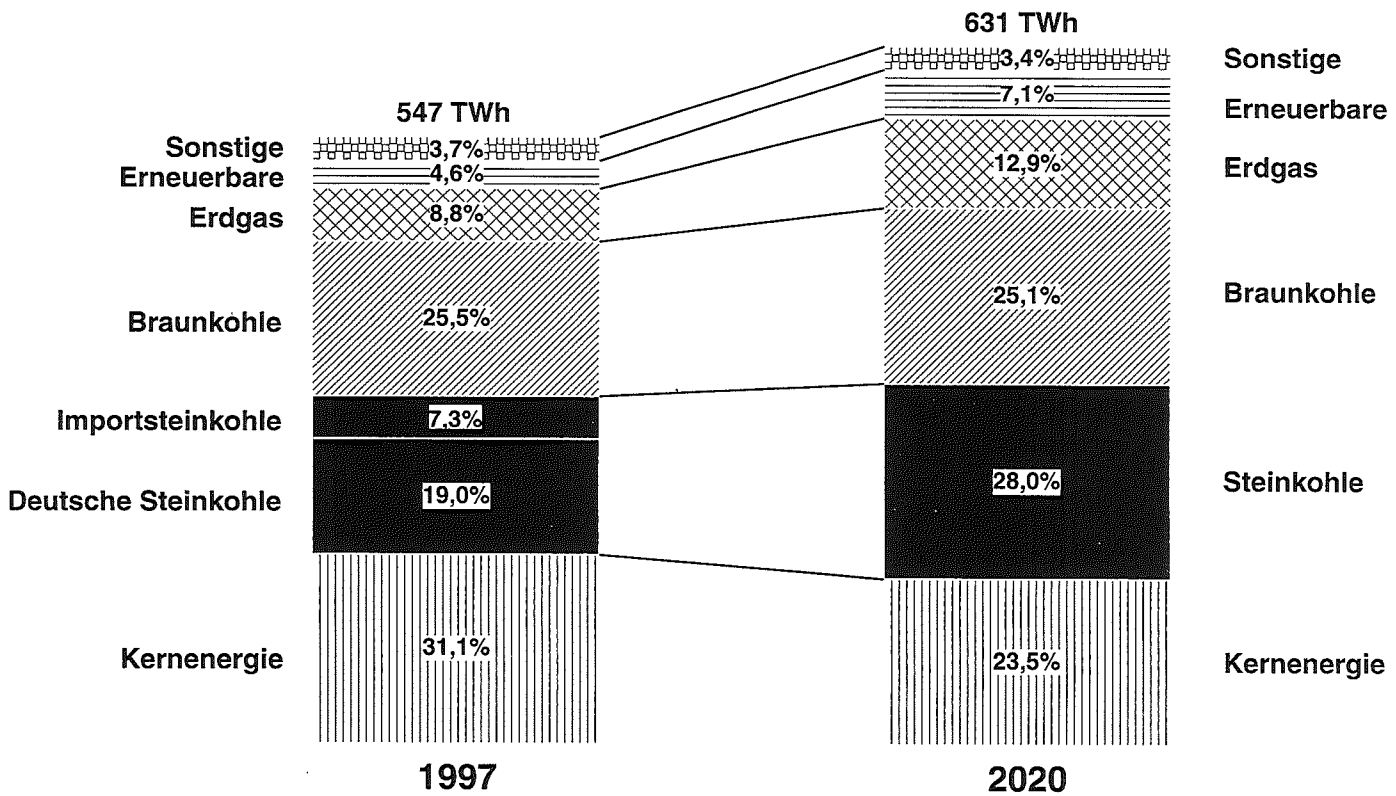


Quelle: RWE Energie AG

GA 1/1 GZ- D8/0573 - S 21

RHEINBRAUN

Stromerzeugung im Jahr 2020 nach PROGNOS



RHEINBRAUN

Energy and labour market

Wolfgang Pfaffenberger

Bremer Energie-Institut

1. Introduction

In a time of high unemployment it is understandable that the labour market consequences of any interference with the energy sector is an important issue. What happens to employment if an energy tax is introduced, how does the promotion of renewable energy affect employment, what are the consequences of deregulation in the energy markets? These are the questions that are intensively discussed within the political sphere at the moment.

An economy is a complex interrelated system. In general, the employment of labour is just one aspect of economic development. Looking at the implications for employment of changes in the energy economy, of course, requires to use a model that can describe the interactions between the energy sector and the rest of the economy.

In the following paper I will talk about the methodological side: how can employment effects be derived? I will also show employment consequences of energy developments with the help of two case-studies about renewal energy and deregulation.

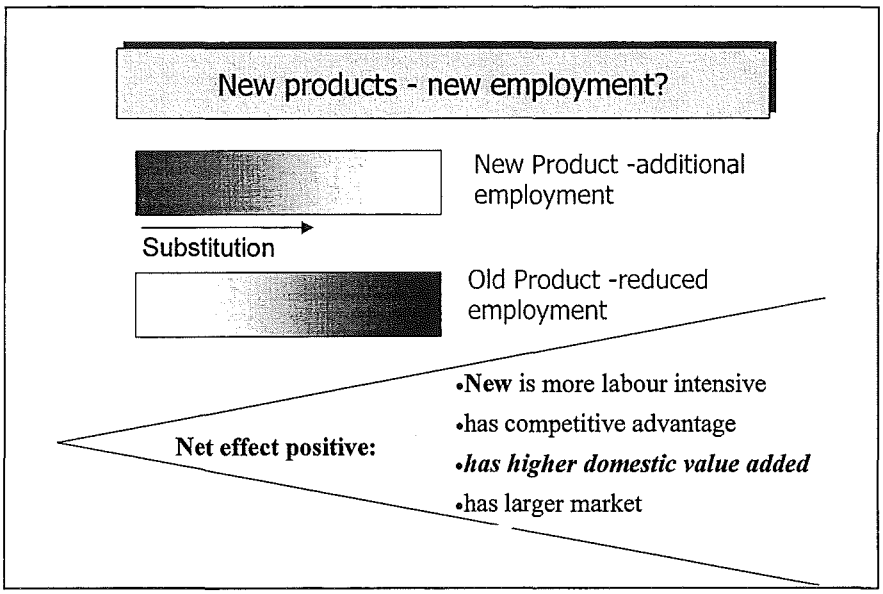


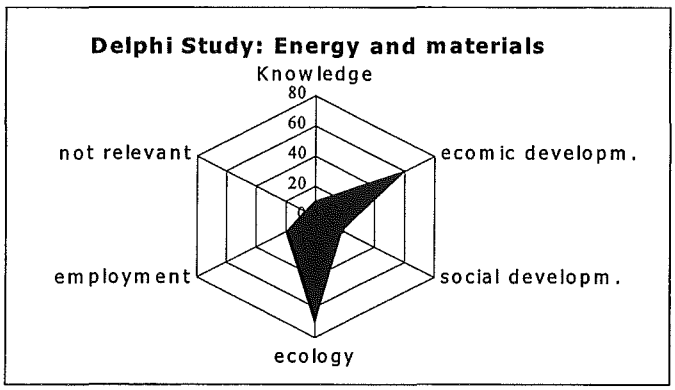
Figure 1: Substitution and employment

It may be useful to develop a general idea about what we can call employment effect. If a new product comes to the market, certainly a specific amount of labour is required to produce this new product. Some studies showing the employment effects of e.g. renewable energy concentrate just on the actually employed people who produce this product. But how does the economy as a whole benefit from

this production? Usually, a new product is a substitute for an existing product, so that the old product will be produced at a lower level than before (see also figure 1). So the reduced employment of the old product and the additional employment in the new product have to be balanced out to find out what the real employment effect for the economy is. A positive net effect can be reached, if a new product is more labour intensive, which depends on the relative price of labour, if it has an international competitive advantage, if the domestic value added is higher than in the case of the old product (import substitution) or if the market for the new product is larger than the market for the old product, so that general growth is connected with the new product.

For the energy market particularly the third alternative could be of importance: more efficient use of energy, which often comes about by substituting energy with capital or the use of renewable energy, where imported fuels, which have been substituted by domestic capital could actually show a net employment gain.

What do people actually think about the employment effects of the energy system? In a recent survey conducted by the Ministry of Research in Germany, scientific experts were asked about the relevance of a large number of future technologies in many aspects. Figure 2 shows the result for the energy sector. It can be seen that most experts think that future energy technologies are very important for economic development and important for the solution of ecological problems but almost unimportant for employment of labour. On the other hand, in the political sector there is a strong wish to connect the solution of ecological problems with the solution of the employment problem. It is hoped that introducing ecological text reform or promoting the market penetration of renewable energy will lead to a significant increase in the employment of labour.



Source: Delphi Studie BMBF 1998

Figure 2: Results of Delphi study on energy

2. Methodology

2.1. Separation of effects

How can employment effects be measured? First of all, a clear definition of employment effects is needed. It makes sense to separate two different groups of effects:

- the production of the energy system itself and
- the effect of the energy system on the economy.

Regarding the first point there certainly are employment benefits in the case of investment, and here we can distinguish between the direct effect connected to investment (e.g. expenditure for the construction of a power plant) and the indirect effects experienced by all those manufacturers, who deliver parts to the original manufacturer. Due to the interrelationships between almost all sectors of the economy, these indirect effects have to be estimated by using input - output techniques. Sometimes, for the evaluation of investment effects also multiplier effects are being regarded. As this seems acceptable, only in very special circumstances such effects in general should not be considered.

Employment also arises from the operation of an energy system. Again, here we have to distinguish between direct and indirect effects. In the case of energy systems the substitution of fuel may play a role. In the case of renewable energy for instance, imported fossil fuel could be replaced by domestic capital, which will have an effect on the employment balance.

The second group of effects are the effects extending from the energy system on the economy. Here we can distinguish micro-economic and macro-economic effects. Micro-economic effects can result from a change in relative prices that results from the new energy system, which can have consequences on the international competitiveness and on the substitution of energy relative to other factors of production. Price signals of this kind will, so to say, spread through the economy and will lead to changes in the optimal combination of factors, thereby influencing all sectors of the economy.

Looking at the economy from top to bottom, this could result in a change in the sectoral structure (e.g. in the case of wind energy, substitution of coal mining industry by machine building industry), and also through the change in prices budget effect may result. By this we mean that the consumer of the final services of the energy system has to reallocate his budget in order to cope with the change in price for the service rendered. If the production of a new energy system leads to higher employment in the first place, the higher cost associated with this and the higher price that consumers have to pay may change the allocation of the consumer budget. In the case of renewable energy, for instance, consumers will have to buy an additional product "environmental quality", which could be forced on to them by the way in which the renewable energy is being financed. This product, however, has no market price for itself, it is included in the new energy product being sold to consumers. In order to finance this new product, consumers have to reduce their spending on other products that they used to buy before. Thus, there will be a substitution between the new product and the old product as described in my introduction. The employment gains from the new product itself, therefore has to be balanced out against these budget effects. A number of other effects have to be considered when looking at changes in the economy resulting from new energy systems.

Dynamic effects describe the fact that with a new product a new market may arise, which could become a growth pole by leading to more innovation and new chances in market conditions. In addition, we have to consider that there may be international effects: there may be changes in the imports and exports of goods and services and capital resulting from the new system. All these changes can go both ways, so that it may be difficult to find out what the net effect will be. An example should make this clear: increased production of wind energy in one country may lead to a reduced import of fuel from abroad. In the fuel exporting country this leads to reduced income and therefore spending on investment formally imported from the fuel importing country will be reduced. The gain in employment from the substitution of imported fuel by domestic capital will then be (partly) offset by a loss in employment through reduced export of equipment.

3. Case studies[1]

3.1. Renewable energy

The following effects were considered in an empirical study on the employment effects of renewable energy:

- investment effect: jobs created by the investment into renewable energy systems
- substitution effect: jobs connected to fossil fuel substituted
- operation: jobs for operating renewable energy systems
- income effects: job effect of additional costs of renewable energy.

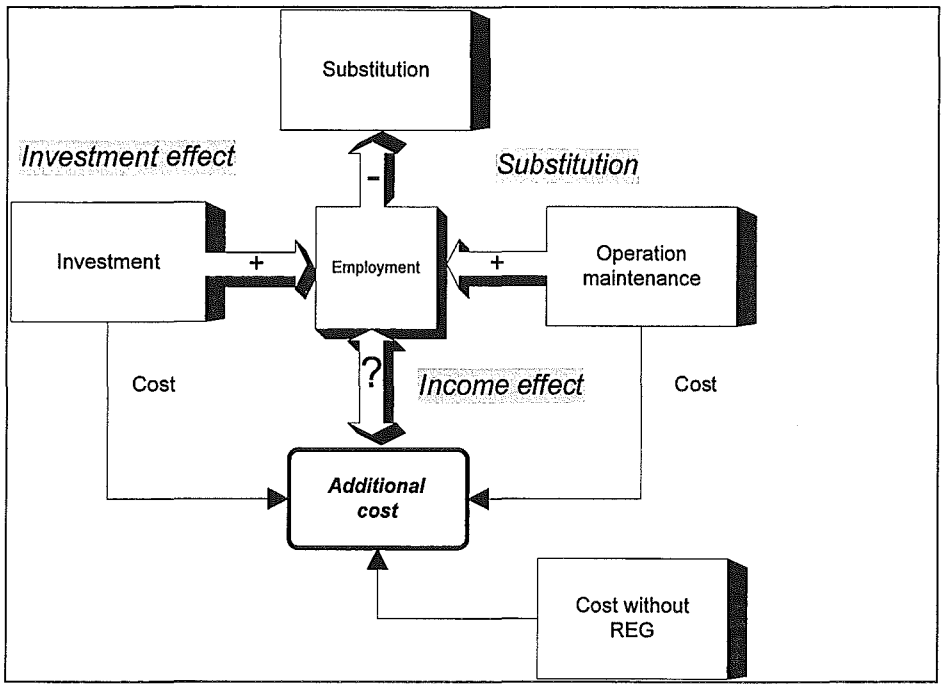


Figure 3: Effects of renewable energy

All these effects have been quantified by using micro-data and have been used as an input for an input/output study to find out what the total effect on the economy would be. The input/output methodology is a methodology of a comparative static nature. In this case, this methodology seems applicable because renewable energy is a very small part of the economy so that it seems admitable to just keep the rest of the economy constant.

---

1 A more detailed description of this case study can be found in the annex.

The study was done for wind energy and for a mix of renewable energy following a very ambitious path of expansion (the path developed by the group *Energie 2010*).

The various effects are being derived in the following way:

Investment: The investment expenditure separated by branch (construction, machinery, equipment, etc.).

Substitution: Figure 4 shows a daily load curve of the electricity demand. If renewable energy is being introduced into the system, the load supplied by conventional power plants will be reduced. In the case of wind because of a stochastic nature of wind energy this does not necessarily lead to reduction in the peak load. In general, it can be assumed that base load plants will not change their operation if wind energy is added. Thus, we experience a reduced input of coal or other fuels in the medium and peak load plants.

In our study we assume that wind energy replaces coal. In Germany domestic coal is being subsidised and the quantities are fixed so that it makes sense to assume that wind energy will replace imported coal rather than domestic coal. Both cases were, however, analysed. The amount of substituted fossil fuel is being measured by using the average degree of efficiency of coal fired power plants. This may be wrong because due to the stochastic nature of wind the actual amount of fossil fuel saved may be smaller than the average, because the short term changes in the load supplied by the renewable energy will necessitate the parallel operation of the fossil plant with variable output.

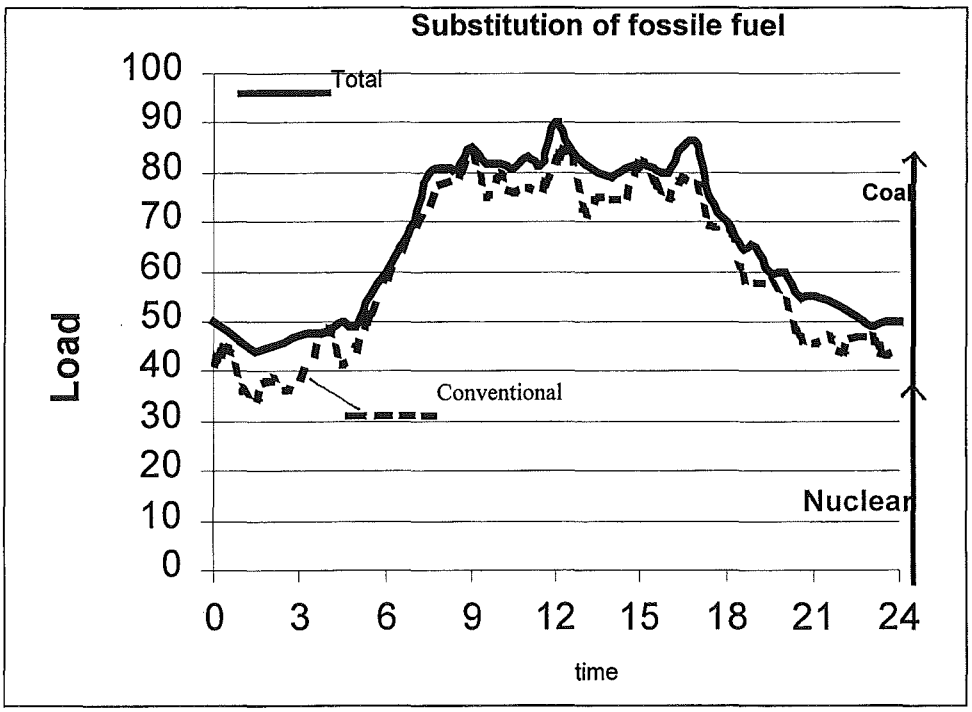


Figure 4: Influence of renewable energy on load curve

Operation: The operation effect is measured by using a percentage of the investment to estimate operation costs.

Budget effect: Figure 5 shows the evaluation of the budget effect for wind energy. In the legal framework of Germany the suppliers of renewable energy receive a fixed minimum price of 0.17 DM/kWh. As shown before, the value of the power supplied by the wind energy converter has to be measured by the fuel replaced in the system. Using world market prices and adding a certain credit for replaced network costs, the total value of wind energy may be in the region of 0.07 DM/kWh. Thus, 0.10 DM/kWh will be the extra costs associated with this form of energy. It was assumed, that this budget effect will lead to reduced spending by consumers of their average consumer budget.

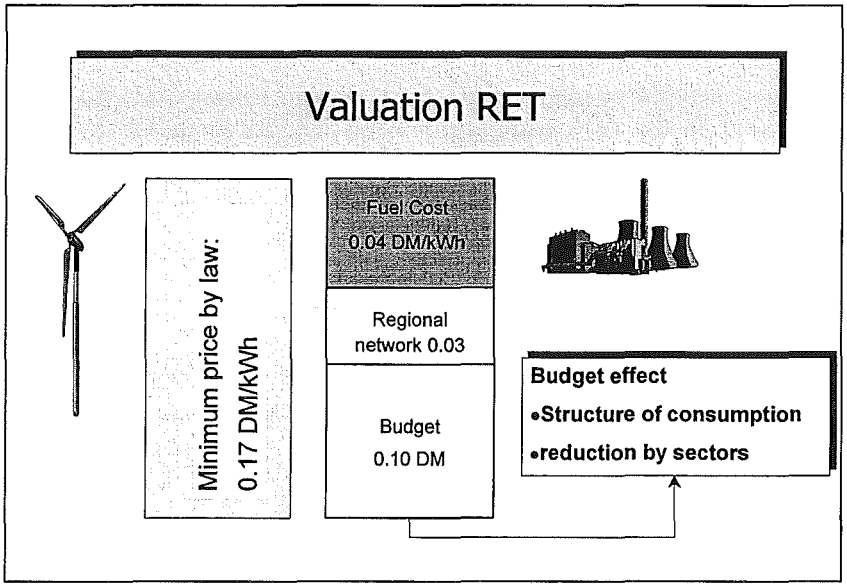


Figure 5: Valuation of renewable energy

Table 1 shows the effect of wind energy, assuming an expansion of 500 Megawatt of capacity per year (the rate of expansion in Germany in the past years). The net effect in employment will be + 2600 jobs, if imported coal is being replaced and will be - 6100 jobs, if domestic coal is being replaced.

Substitute	Jobs
Imported coal	+2600
Domestic coal	-6100
Domestic coal: only world market price equivalent considered	

Table 1: Net effect of 500MW programme in wind energy

Figure 6 shows the employment effects of the renewable energy scenario by the group *Energie 2010*. In this scenario, up to 30.000 persons per year are being additionally employed through the substitution of traditional fuels by renewal energy. In this scenario, a rising investment over time is being assumed, which will lead to a continuous running away of the investment effect from the negative effect of substitution and budget. Therefore, such a path of development can create additional employment for the economy. It must be said, however, that the relative number of jobs created by this investment, is relatively small compared with the amount of money being needed.

In conclusion, it must be stressed, that in this study, dynamic effects and additional international effects could not be estimated. At the same time, it was not possible to evaluate the additional benefits created by environmental improvement or the learning effects connected with investment into future technologies.

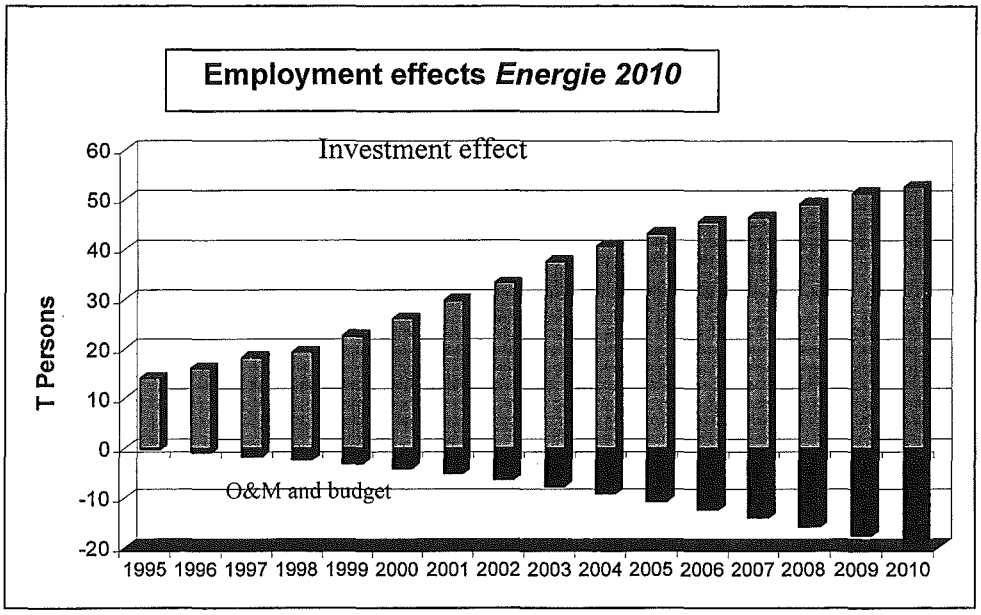


Figure 6: Employment effects *Energie 2010*

3.2. Employment effect of liberalisation

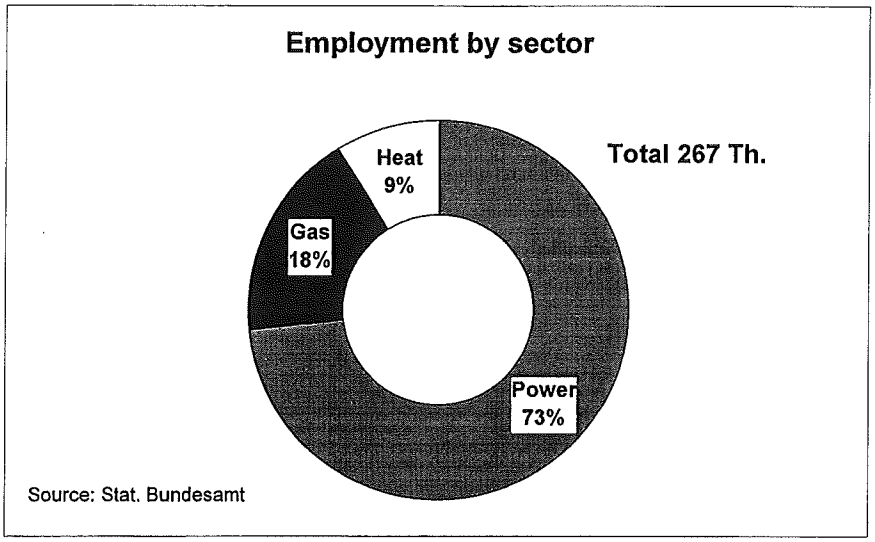


Figure 7: Employment in the energy sector

Figure 7 shows the employment situation in the energy sector (electricity, natural gas, district heating). Roughly 200.000 employees are at present working in the electricity industry. The productivity of labour in this sector is relatively low compared to international standards. A comparison with Great Britain is shown in Figure 8. This can have different reasons: in other countries the degree of outsourcing could be higher, so that the physical productivity of those employed within the electricity sector is automatically higher.

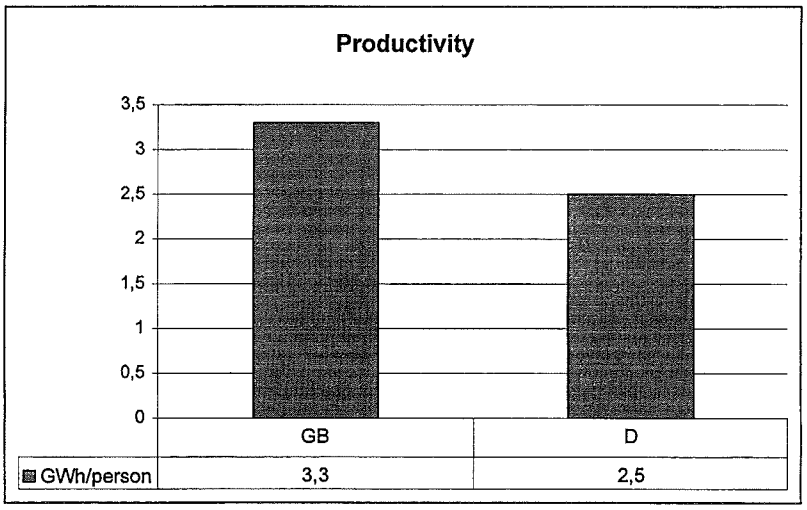


Figure 8: Productivity of labour in power sector

However, detailed statistics about the employees per power station show that the figures are considerably higher than in other countries. Therefore, it can be assumed, that with the opening up of the

electricity market and competitive pressures beginning to be felt, the strategy towards employment will be changed and efficiency reserves will be used to increase productivity.

The prices charged for electricity in Germany are relatively high, although they have been constantly declining in the past, as is shown in Figure 9. Also the prices for tariff customers have continuously declined in the last ten years. It is very likely that particularly prices for the more competitive part of demand (industrial demand) will continue to decline over the next years and probably also at an accelerated pace. This can only bee achieved by reducing cost wherever possible. Certainly employment will be one of the parameters used in this case.

What are the effects on the economy as a whole: whereas employment will be lowered in the electricity industry itself, it could, on the other hand, be increased in other sectors, so that the overall balance would at least not be negative. The following micro-economic effects could be expected:

- Intersectoral change of employment through outsourcing on the input side and the development of new services on the output side. The balance of this would at least not be negative. The level of wages in the electricity industry is relatively high. Outsourcing would open the possibility of employing less well paid persons and it is, at the moment being applied by electricity companies in order to reduce employment in their core business.
- Price cuts for consumers, due to competition, could act as a growth incentive for other sectors. Spending less money on the same amount of electricity would leave a certain budget for all consumers free, which then could be devoted to the purchase of other goods and services, which in turn, would enable them to employ more people. Model calculations with the help of the model MIS show, that the balance of reduced employment in the electricity industry and increased employment through this budget effect would be slightly positive.
- For energy intensive sectors, the price reduction would mean a change in their international competitiveness. This would not necessarily lead to an increased share of the market for these companies, but at least it would enable them to defend their position in a better way, so that the employment balance of this effect would be positive or stable. In general, the level of employment connected with liberalisation of the electricity industry is quite considerable and at least as important as the level of employment connected with the promotion of renewable energy.

It is often assumed that deregulation of the energy markets will lead to increased employment problems. An overall economic analysis does however lead to a different result. In the energy sector itself deregulation and cost reduction will reduce employment whereas the stimulating effects in other sectors caused by falling energy prices will lead to the opposite result. The balance between the two tendencies depends on the sectoral structure of both driving forces. The discussion is similar to the one about energy taxation, only assuming a negative tax. One of the open questions is whether energy efficiency will be reverted by a declining price trend which in turn would have consequences for the investment expenditure.

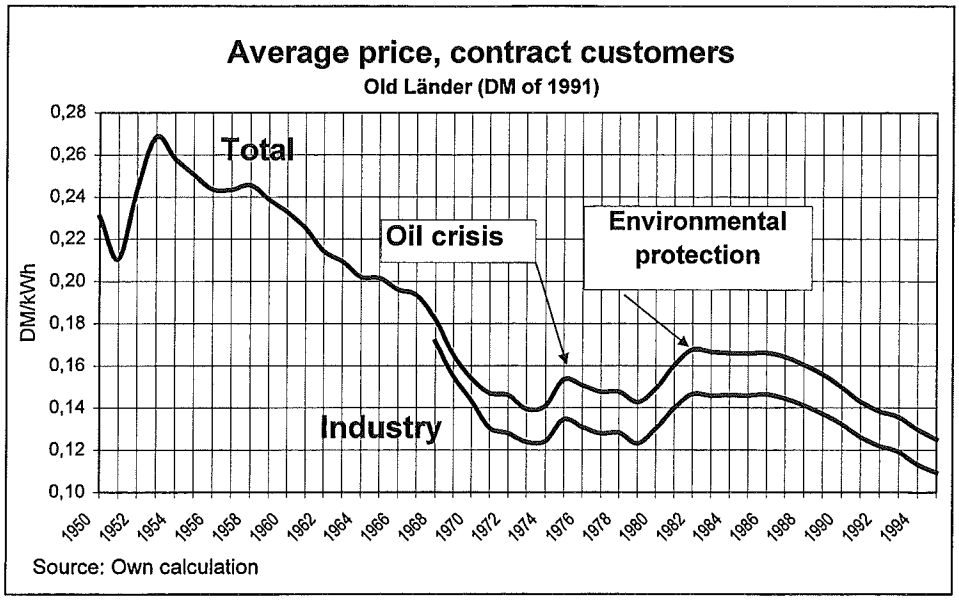


Figure 9: Real electricity price for contract customers

References

[1] Altner, G., Dürr, H.-P., Michelsen, G., und Nitsch, J.,(1995): Zukünftige Energiepolitik- Vorrang für rationelle Energienutzung und regenerative Energiequellen, Bonn.

[2] Forum für Zukunftsenergien, (1996): Änderung der sektoralen Beschäftigungsstrukturen durch verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, Bonn.

[3] Kaltschmitt, M., und Wiese, A., (1995): Erneuerbare Energien- Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Berlin u.a.

[4] Pfaffenberger, W. unter Mitarbeit von Kemfert, C. und Scheele, U. (1996): Arbeitsplatzeffekte von Energiesystemen, Frankfurt.

[5] Pfaffenberger, W., Kemfert, C. (1997): Liberalisierung der Energiewirtschaft und Beschäftigung, in: VDI-GET (Hrsg.): Industriestandort Deutschland - Arbeitsplätze und Energie: Tagung Heilbronn 22./23.4.97 : VDI Berichte 1361, Düsseldorf und VDI Jahrbuch 1998

[6] The Impact of Increased Competition in the Electricity and Gas Industries on Consumer Prices and Disposable Income, Energiewirtschaftliches Institut Köln, 1997

Annex: Beschäftigungseffekte des Ausbaus erneuerbarer Energie

1. Volkswirtschaftliche Grundlagen

Wie wirkt ein vermehrter Einsatz regenerativer Energiequellen auf die Volkswirtschaft und insbesondere die Beschäftigung? Beim Ausbau erneuerbarer Energie wird Energie durch Kapital ersetzt. Diese Verlagerung könnte zu einem positiven Effekt für die Beschäftigung in der Volkswirtschaft führen, wenn die entsprechenden Kapitalgüter im Inland hergestellt werden. So könnte sich als Nebeneffekt einer verbesserten Umweltqualität auch ein positiver Beschäftigungseffekt ergeben. Auf der anderen Seite könnte der Preis für die verbesserte Umweltqualität aber auch höher sein als bei anderen Möglichkeiten, diese Umweltqualitätsverbesserung zu erreichen. Bei der gegenwärtig hohen Arbeitslosigkeit ist es für Entscheidungsprozesse über umwelt- und energiepolitische Maßnahmen von großem Interesse, etwas über die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Förderung erneuerbarer Energieträger zu erfahren.

Unterschiedliche Studien über die Auswirkungen von Veränderungen im Energiesystem auf die Beschäftigung kommen zu recht verschiedenen Ergebnissen. Wie so oft hängt dies mit unterschiedlichen Definitionen zusammen. Was sind eigentlich Beschäftigungseffekte? (Ausführlich hierzu siehe [4]). Je nach zugrunde gelegter Definition umfassen Beschäftigungseffekte nur eine statistische Zurechnung von Arbeitsstunden bzw. Beschäftigten auf ein Produkt. Es wird dann die Frage beantwortet: Wieviele Arbeitseinheiten sind erforderlich, um ein bestimmtes Produkt herzustellen. Solche Fragen scheinen leicht zu beantworten. Wird über Beschäftigungseffekte erneuerbarer Energie gesprochen, so wird häufig an die unmittelbar mit der Produktion von Anlagen für die Gewinnung erneuerbarer Energie Beschäftigten gedacht.

Wenn dagegen gefragt wird, welche Folgeeffekte im volkswirtschaftlichen Netzwerk dadurch ausgelöst werden, daß erneuerbare Energie stärker ausgebaut wird. So ist diese Fragestellung weniger genau zu beantworten als die erste, denn sie erfordert eine Modellieren der volkswirtschaftlichen Zusammenhänge. Jede Modellierung basiert auf bestimmten Annahmen. Die Ergebnisse sind dann immer auch durch die Annahmen verursacht. Unsere Untersuchung [5] bezieht sich auf den volkswirtschaftlichen Zusammenhang. Eine Volkswirtschaft ist ein komplexes vernetztes System, in dem jede Aktivität vielfältige Rückwirkungen auslösen kann. Man muß deshalb die Untersuchung solcher Rückwirkungen auf bestimmte für wesentlich gehaltene eingrenzen. Wir beschränken uns hier auf die Rückkopplungseffekte, die aufgrund der Gegebenheiten ohne allzu große Spekulation quantifiziert werden können. In Abbildung 1 sind die wesentlichen Effekte dargestellt. Bei den Rechenergebnissen sind nur die Effekte 1 - 4 berücksichtigt. Im einzelnen sind diese Effekte folgendermaßen zu erklären:

1. Investitionseffekt

Immer wenn an einer Stelle der Volkswirtschaft eine Investition vorgenommen wird, entsteht durch diese Investition ein Beschäftigungseffekt in dem Sinne, daß beim Hersteller des Investitionsgutes und seinen Vorlieferanten Arbeit eingesetzt wird, um dieses Investitionsobjekt herzustellen. Jede Investitionsmaßnahme kann so als ein Ausgabeimpuls betrachtet werden, durch den eine Vielzahl von Produktionsaktivitäten angestoßen wird. Denn der unmittelbare Erzeuger des Investitionsobjekts (z.B. einer Windenergieanlage) erstellt in der Regel diese Anlage nicht allein, sondern greift auf vielfältige Vorleistungen von anderen Lieferanten zurück. Diese wiederum werden ebenfalls weitere Vorlieferanten beauftragen usw. Die Ermittlung dieser direkten und indirekten Produktionseffekte kann mit Hilfe des Modells der Input-Output-Analyse abgeleitet werden. Nachdem die Anlage erstellt ist, tre-

ten in dieser Hinsicht keine weiteren Beschäftigungswirkungen auf, bis zu einem späteren Zeitpunkt die Anlage eventuell durch eine neue Anlage ersetzt wird.

Beschäftigungseffekte

1. **Investitionseffekt**
   Investition in neue Anlagen für erneuerbare Energie löst Beschäftigungseffekt aus.
2. **Verdrängungseffekt**
   Erneuerbare Energie ersetzt bisher genutzte Brennstoffe und damit verbundene Leistungen.
3. **Betriebseffekt**
   Wartung und Betrieb der Anlage.
4. **Budgeteffekt**
   Mehrkosten der erneuerbaren Energie ersetzen andere Ausgaben der Strombezieher.
5. **Dynamischer Effekt**
   Marktveränderungen durch Förderung: Neue Märkte, neue Produkte. Erneuerbare Energie als Versicherung gegen steigende Primärenergiepreise.
6. **Außenhandelseffekt**
   a. Export / Import von Anlagen
   b. Verringerte Deviseneinnahmen für Energielieferanten (Öl, Gas, Importkohle) mit Konsequenzen für deren Käufe von Gütern bei uns (internationaler Budgeteffekt).

Abbildung 10: Beschäftigungseffekte

2. Verdrängungseffekt

Für erneuerbare Energie, die zur Strom- oder Wärmeerzeugung eingesetzt wird, ist typisch, daß sie möglicherweise sonst eingesetzte fossile Brennstoffe verdrängt. Wenn z.B. genügend Wind weht, um mit Hilfe eines Windenergiekonverters Strom zu erzeugen, so wird in dieser Zeit ein anderes Kraftwerk in seinem Beitrag entsprechend reduziert. Bei der Analyse des Beschäftigungseffektes aus dem Betrieb der Anlage muß also diese Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger berücksichtigt werden. Dieser Effekt läßt sich aber nur modellhaft darstellen, da er ja stark davon abhängig ist, welche Energie durch den Betrieb der Anlage verdrängt wird. Es ist sinnvoll anzunehmen, daß bei der Stromerzeugung die Kraftwerksleistung im Mittellastbereich zurückgefahren wird, dabei handelt es sich typischerweise um Steinkohlekraftwerke auf Importkohlebasis.

Bei der Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Quellen werden i.a. fossile Brennstoffquellen aus Import verdrängt. Die typischen Einsatzenergieträger für die Wärmeerzeugung sind heute Öl und Gas. Von beiden werden erhebliche Verbrauchsanteile importiert. Beschäftigungseffekte im Inland liegen daher beim Transport von der Grenze zu den Verbrauchern über Netze oder durch andere Transportmittel.

3. Betriebseffekt

Produziert die einmal erstellte Anlage, so ist eine bestimmte Anzahl von Beschäftigten für den Betrieb zuständig. Bei Anlagen zur Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Energiequellen handelt es sich im wesentlichen um die notwendige Wartung und Reparatur. Dies sind die unmittelbar mit dem

Betrieb verbundenen Effekte. Auch diese können wieder hinsichtlich der direkten und indirekten Effekte unterschieden werden, wobei der Gesamteffekt wieder mit Hilfe des Modells der Input-Output-Analyse ermittelt werden kann, da ja auch Wartungsaufwendungen zu Vorleistungslieferungen innerhalb der Volkswirtschaft führen.

4. Budgeteffekt

Investitionen in neue regenerative Energiesysteme verursachen den Betreibern Kosten. Diese Kosten können und werden letztlich als Preise an die Abnehmer der Energie weitergegeben. Dies führt bei den Abnehmern zu Mehrausgaben. Diese Mehrausgaben können sie nur tätigen, wenn sie im Rahmen ihres Budgets auf andere Ausgaben verzichten. Es findet also auf der Seite der Verbraucher der Energie eine Verlagerung von bisher getätigten Ausgaben für bestimmte Güter zu den nunmehr zusätzlich zu kaufenden erneuerbaren Energieträgern statt. Man kann sich vorstellen, daß dieser Budgeteffekt in bezug auf die Beschäftigung in etwa neutral ist, wenn die zusätzlich gekauften Energieträger etwa genauso viel kosten wie die früher gekauften.

Ist die durch die Investitionsmaßnahme erzeugte erneuerbare Energie teurer als die bisherige Energie, d.h. müßten die Verbraucher einen Teil ihres bisher für andere Ausgaben verwendeten Budgets einsetzen, so wird der Budgeteffekt negativ sein. Die durch die Investitionen und den Betrieb angestoßenen Beschäftigungseffekte werden dann quasi durch die Mehrausgaben wieder aufgezehrt oder möglicherweise sogar übertroffen, so daß per Saldo sogar ein negativer Beschäftigungseffekt entstehen kann.

5. Dynamischer Effekt

Eine Volkswirtschaft ist mit einem Organismus vergleichbar. Ändern sich bestimmte Größen, so paßt sich das System an diese Veränderungen an. Ändern sich z.B. die Energiepreise, so werden alle Energieverbraucher ihre Verbrauchsentscheidungen überprüfen und den Energieeinsatz im Verhältnis zu anderen Produktionsfaktoren neu überdenken. Eine Preisänderung löst also einen Anpassungsdruck aus, auf den Wirtschaftssubjekte in unterschiedlicher Weise und vielfältig reagieren können. Solche Anpassungseffekte sind zum Teil vorhersehbar, zu einem wesentlichen Teil aber auch nicht, weil durch den Anpassungsdruck Innovationen erzeugt werden, die zu einer Veränderung vieler anderer technischer Strukturen sowie Preise und Kosten in der Volkswirtschaft führen können.

Dynamische Effekte sind für die Volkswirtschaft im Zusammenhang mit der Umgestaltung des Energiesystems in Richtung von mehr Umweltfreundlichkeit ausgesprochen bedeutsam. Ihre unmittelbare Auswirkung auf die Beschäftigung ist aber schwer zu übersehen. Unter anderem hängt dies wesentlich auch davon ab, wie sich die Kosten für die Erzeugung regenerativer Energie selbst ändern werden. Die Vorhersage von Kostenänderungen im Rahmen des technischen Fortschritts ist hochgradig spekulativ. Wir sind deshalb im Rahmen dieser Untersuchung auf solche Vorhersagen und die damit möglicherweise verbundenen Auswirkungen nicht eingegangen. Der Leser sollte sich aber daran erinnern, daß unsere Untersuchung sich auf die aktuellen Begebenheiten bezieht, daß diese aber nicht für alle Zeit festgeschrieben sind, sondern Veränderungen in größerem Umfang möglich und wahrscheinlich sind. Die Entwicklung der Kostensituation bei der Windenergie in den letzten Jahren ist dafür ein Beispiel.

Weiterhin muß berücksichtigt werden, daß die in dem Budgeteffekt zum Ausdruck kommenden Mehrkosten der erneuerbaren Energie vom Preisniveau für konventionelle Energie abhängig sind. In dieser Studie gehen wir davon aus, daß diese Preise konstant bleiben. In gewisser Weise ist dies also eine Berechnung des *worst case*. Die Prognose von Preisänderungen auf den Weltenergiemärkten ist eine hochgradig spekulative Angelegenheit. Sind derzeit Preissteigerungen für viele Brennstoffe auch

wenig wahrscheinlich, so kann sich dies auf mittlere bis längere Sicht anders darstellen. Das Geschehen an den Weltenergiemärkten ist von sehr vielen Einflußfaktoren geprägt.

Die Entwicklung von erneuerbarer Energiequellen kann deshalb auch als eine Art Versicherungsprämie gegen zukünftige Preissteigerungen von fossiler Energie angesehen werden. Steigt der Preis für die fossiler Energie, so sinken die Mehrkosten der erneuerbarer Energie und ab einem bestimmten Preis ist der Einsatz vorteilhaft. In unserer Terminologie bedeutet dies dann, daß der Budgeteffekt der erneuerbaren Energie positiv wird. Bei der Interpretation unserer Ergebnisse ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

6. Außenhandelseffekt

Führt die Entwicklung neuer Produkte, wie z.B. von Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energie, zu einer verbesserten Exportfähigkeit, so entsteht ein Beschäftigungseffekt durch die Investitionen des Auslandes in solche Anlagen. Der Betrieb solcher Anlagen wirkt sich aber praktisch nicht aus, so daß die Analyse sich auf den Investitionseffekt beschränken kann. Andererseits muß berücksichtigt werden, daß Inländer auch im Ausland hergestellte Anlagen erwerben können. In diesem Fall findet der Investitionseffekt der in Deutschland aufgestellten Anlagen im Ausland statt, der Betriebseffekt (der unter Umständen negativ sein kann, wenn inländisch erzeugte Energie verdrängt wird oder Mehrkosten zu tragen sind), findet jedoch im Inland statt.

ABL 1995	Exportquote %	Umsatz Mrd. DM
Maschinenbau	43,7	239
Herstellung von Geräten der Elektrizitätserzeugung, -verteilung u. ä.	33,3	116

Quelle: (Statistisches Bundesamt, 1996), S. 203

Tabelle 2: Exportquote bei ausgewählten Investitionsgütern

Wird in größerem Umfang bisher importierte Energie ersetzt, so sinken die Einnahmen der Produzenten aus dem Verkauf fossiler Energieträger, wenn entweder ihr Absatzvolumen sinkt oder der sinkende Absatz nur durch geringere Preise kompensiert werden kann. Dies kann sich auf die Käufe dieser Länder von deutschen Exportprodukten auswirken. Die Exportquote ist nun gerade in den Wirtschaftszweigen besonders hoch, die durch Investitionen in erneuerbare Energiesysteme besonders betroffen sind wie Tabelle 2 zeigt. Da solche Rückwirkungen von sehr vielen Faktoren abhängen, die nur im Rahmen eines globalen Modells systematisch analysiert werden können, haben wir sie in dieser Studie nicht berücksichtigt.

2. Ergebnisse

2.1. Beschäftigungseffekte der Windenergie

Anhand einer repräsentativen Anlage werden die Beschäftigungseffekte der Windenergie abgeschätzt. Ausgegangen wird von einer Anlage von 500 kW mit einer Ausnutzung von 2000 Vollaststunden. Die Parameter der Anlage sind [2] und [3] entnommen. Die Effekte hängen wesentlich von zwei Faktoren ab:

- der verdrängten Energie. Wir unterstellen hier, daß Mittellaststrom durch Windenergie ersetzt wird, der mit Importkohle erzeugt wird.
- dem der Windenergie zugemessenen Wert für das Stromsystem. Dieser bestimmt wesentlich den Budgeteffekt. Wir unterstellen hier, daß der Windstrom 0,07 DM wert ist (angenommener Arbeitspreis eines regionalen Verteilers). Die Mehrkosten gegenüber dem durch das Einspeisegesetz festgelegten Wert betragen dann ca. 0,10 DM.

Effekt	Personen
Investitionseffekt einmalig	13,4
Betriebs- und Budgeteffekt über 15 Jahre	-10,5
Gesamt	**2,9**
Gesamt pro MW bei einer Anlagengröße von 500 kW	*5,8*
Bei einem kontinuierlichen Ausbau von 500 MW jährlich werden dauerhaft Arbeitsplätze in Anspruch genommen	*2900*

Tabelle 3: Beschäftigungseffekt Windenergie

Diese Berechnung stellt eine Momentaufnahme dar. Veränderungen in den Effekten aufgrund zukünftiger möglicher Änderungen zeigt die folgende Abbildung.

Zukunftstendenzen

- Kostensenkung bei Anlagen
  verringert den Investitionseffekt
  verringert den Budgeteffekt — Beschäftigungseffekt: +
- Vordringen in Standorte mit geringeren Windgeschwindigkeiten
  vergrößert den Budgeteffekt — Beschäftigungseffekt: -
- Höherer Preis für Importkohle
  verringert den Budgeteffekt — Beschäftigungseffekt: +
- Energiesteuer
  verringert den Budegeteffekt: — Beschäftigungseffekt: +

Abbildung 11 Zukunftstendezen

2.2. Regenerative Energieträger bei "Energie 2010".

Beispielhaft wird eine Abschätzung der Arbeitsplatzeffekte auch für das Szenario der Gruppe Energie 2010 [1] durchgeführt. In diesem Szenario werden wachsende Investitionen für die Entwicklung der erneuerbaren Energieträger in einem bestimmten Mix angenommen. Der Einsatz der erneuerbaren Energie führt bei heutigen Energiepreisen zu Mehrkosten. Diese bestimmen den Budgeteffekt. Die Tabelle zeigt den mit diesem Entwicklungsprogramm verbundenen Arbeitsplatzeffekt.

	Gesamt	Investitions-effekt	Betriebs- und Budgeteffekt
Jahresdurchschnitt 1995 - 2010 in Tausend Personen	20,6	34,1	-13,5

Tabelle 4: Beschäftigungseffekte des Programms "Energie 2010", Szenario I

Der Beschäftigungseffekt einer solchen Entwicklungsstrategie ist positiv, aber relativ klein. Ausschließlich unter Beschäftigungsaspekten betrachtet wäre es daher sinnvoller, mit den entsprechenden Mitteln andere Investitionen zu finanzieren. Die volkswirtschaftlichen Vorteile des Einsatzes erneuerbarer Energie liegen vorrangig in ihrer Umweltfreundlichkeit und darin, daß durch ihre Entwicklung Lerneffekte entstehen, die kostengünstigere Entwicklungen auch für diese Energiesysteme ermöglichen können. Ein größeres Investitionsprogramm dient also in großem Maße auch dazu, den technischen Fortschritt auf diesem Gebiet weiterzutreiben, ohne daß sich dies unmittelbar in Beschäftigungswirkungen ausdrückt.

2.3. Nicht analysierte Effekte

Zur Vermeidung von Mißverständnissen sei abschließend noch einmal darauf hingewiesen, welche möglichen Wirkungen von unserer Analyse **nicht** erfaßt werden:

- Reaktionen der Verbraucher auf geänderte Energiepreise durch verstärkte Anstrengungen zur Energieeinsparung mit folgenden möglichen Wirkungen:
  - Rückgang des Energieverbrauchs (Beschäftigungseffekt: -).
  - Anstieg der Investitionen in das Verbrauchskapital (Beschäftigungseffekt:+).
- Reaktionen der Investoren auf Energiepreisänderungen. Implizit haben wir unterstellt, daß die Merkosten der erneuerbaren Energie ausschließlich von den Verbrauchern getragen werden. Bei einer anderen Form der Förderung der erneuerbaren Energie können andere Budgeteffekte auftreten.
- Reaktionen des Auslandes.
  - Durch die Förderung der erneuerbaren Energie wird die Marktposition der Anbieter solcher Anlagen gestärkt, so daß sie bei geschicktem Vorgehen auf Auslandsmärkten zumindest für eine bestimmte Zeit einen Vorteil entwickeln können, der zu verstärktem Export führen kann. Dies kann aber auch zu Kostensenkungen aufgrund steigenden Marktvolumens führen, was den Budgeteffekt verringert. (Beschäftigungseffekt:+).
  - Ebenso kann die auf längere Sicht angelegte Förderung ausländische Anbieter anlocken und damit einen Teil des errechneten Beschäftigungseffektes ins Ausland verlagern. Dies kann auch zu verstärkter Preiskonkurrenz führen und damit den Budgeteffekt verringern (Beschäftigungseffekt:-/+).
  - Die verringerte Nachfrage nach fossilen Energieträgern kann sich auf die Preise auswirken, was den Budgeteffekt vergrößern würde. Diese Wirkungskette ist allerdings wenig wahrscheinlich. Hauptsächlich wird durch Anlagen zur Erzeugung von Strom nach unserer Rechnung Importkohle verdrängt. Der internationale Kohlemarkt ist aber ein Markt mit hoher Wettbewerbsintensität, auf dem im Gegensatz zu den Märkten anderer fossiler Energieträger keine Renten erzielt werden, die den Anbietern entsprechende Preisspielräume gewähren.

- Schließlich kann der Rückgang des Imports fossiler Energie und der damit verbundene Einkommensrückgang bei den Anbietern dieser Energie die Importausgaben dieser Länder reduzieren, was sich für die Bundesrepublik als Exportminderung auswirken könnte.

3. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

1. Jede Investition wirkt positiv auf die Beschäftigung, wenn betrachtet wird, wieviel Arbeitsplätze im Zusammenhang mit der Erstellung des Investitionsobjekts stehen.

   So betrachtet liegen die Beschäftigungseffekte bei Investitionen bei erneuerbarer Energie im Rahmen des üblichen, denn die Investitionen bestehen aus gängigen Leistungen und Produktionstechniken. Bei speziellen Produkten (wie z.B. photovoltaischen Zellen) kann dies allerdings je nach Verfügbarkeit von Kapazitäten im Inland oder Ausland anders aussehen.

2. Volkswirtschaftlich betrachtet ergibt sich jedoch ein Beschäftigungseffekt nur, wenn die Investition für erneuerbare Energie im Gesamtzusammenhang des Energiesystems gesehen wird. Dazu ist es erforderlich die durch erneuerbare Energie verdrängte Energie ebenso zu betrachten, wie die durch die erneuerbare Energie evtl. anfallenden Mehrkosten.

   Wird eine solche Betrachtung durchgeführt, so fallen bei der Windenergie positive Beschäftigungseffekte an, wenn unterstellt wird, daß durch die Windenergie Importkohle verdrängt wird. Geht dagegen der Ausbau der Windenergie zu Lasten der deutschen Steinkohle, so sind die Beschäftigungseffekte negativ, weil berücksichtigt werden muß, daß mit jeder zusätzlichen Energieeinheit aus Wind entsprechende Kohlemengen und deren Produktion wegfallen.

3. Für ein globales Szenario zur Entwicklung der erneuerbaren Energie, wie es von der Gruppe 2010 dargestellt wurde, ergeben sich positive Beschäftigungseffekte. Bei einem solchen Szenario wachsen die Investitionen in die erneuerbare Energie und erzeugen damit über einen längeren Zeitraum einen entsprechenden Beschäftigungseffekt. Die mit der erneuerbaren Energie verbundenen Mehrkosten wachsen jedoch nur allmählich mit den Investitionen, so daß zumindest während der Ausbauphase der erneuerbaren Energie sich für die Volkswirtschaft ein positiver Beschäftigungssaldo ergibt. Dieser hängt im wesentlichen von den Energiepreisen und den Kosten für erneuerbare Energie ab.

4. Die Beschäftigungswirkungen im Zusammenhang mit erneuerbarer Energie sind niedriger als bei Investitionen, die ex ante wirtschaftlich sind wie z.B. viele Investitionen zur Erhöhung der Energieeffizienz. Unsere Untersuchung zeigt jedoch, daß ein positiver Beschäftigungssaldo erzielt werden kann.

5. Nicht berücksichtigt haben wir in unserer Untersuchung dynamische Wirkungen, d.h. die Veränderung der Märkte im Inland und Ausland, die sich durch eine Förderung von erneuerbarer Energie ergeben kann. Diese sind zwar mit ein wesentliches Ziel von Förderprogrammen, lassen sich aber kaum seriös quantifizieren. U.a. hängen diese Wirkungen auch von der Form der Förderung ab, die nicht Gegenstand unserer Untersuchung war.

Literatur

[1] Altner, G., Dürr, H.-P., Michelsen, G., und Nitsch, J.,(1995): Zukünftige Energiepolitik-Vorrang für rationelle Energienutzung und regenerative Energiequellen, Bonn.

[2] Forum für Zukunftsenergien, (1996): Änderung der sektoralen Beschäftigungsstrukturen durch verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, Bonn.

[3] Kaltschmitt, M., und Wiese, A., (1995): Erneuerbare Energien- Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Berlin u.a.

[4] Pfaffenberger, W. unter Mitarbeit von Kemfert, C. und Scheele, U. (1996): Arbeitsplatzeffekte von Energiesystemen, Frankfurt.

[5] Pfaffenberger, W. Kemfert, C.: Beschäftigungseffekte erneuerbarer Energie, erscheint demnächst als Veröffentlichung des Forums für Zukunftsenergien

Ökosteuern

Wolfgang Ströbele

Lehrstuhl für Volkswirtschaftstheorie

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

1. Ökosteuern als umweltpolitisches Instrument

Das derzeit dominierende umweltpolitische Instrumentarium des Ordnungsrechts wie etwa die Großfeuerungsanlagen-Verordnung mit dem Einsatz von Ge- und Verboten steht bei den Ökonomen tendenziell in schlechtem Ruf: Dadurch, daß jeder Emittent die gleichen Emissionsstandards einhalten muß, unabhängig davon, ob er dieses relativ kostengünstig oder nur sehr aufwendig erreichen kann, wird eine volkswirtschaftlich vermeintlich ineffiziente Lösung gewählt. Gegenseitige Verrechnungen von Mehr- oder Minderemissionen - wie sie im Zertifikatsmodell möglich wären - scheiden aus. Die ausgelösten Ineffizienzen lassen sich allerdings nur unter bestimmten Modellannahmen konstatieren: Wenn aufwendige Meßtechnik für variable Emissionen erforderlich ist oder wenn es eine Vielzahl von Emittenten mit ähnlicher Emissionstechnik gibt wie im Falle des Pkw mit dem Katalysator, dann ist die Auflage i.d.R. kein so schlechtes Instrument wie oft behauptet.

Anstelle eines ordnungsrechtlichen Eingriffs wird als effizientere Lösung oftmals auch eine Steuer auf die Emissionen vorgeschlagen. Diese bereits über 70 Jahre alte Idee, die auf Pigou zurück geht, setzt eine einheitliche Preisbelastung für jede Emissionseinheit an. Gesamtwirtschaftlich entspricht die optimale Steuer dem Schattenpreis der Umweltrestriktion, wenn eine bestimmte Gesamtemissionsmenge nicht überschritten werden soll. Unter bestimmten Modellannahmen entsteht dabei eine gegenüber dem Ordnungsrecht effizientere Lösung. Eine wichtige Annahme ist, daß die Erhebung der relevanten Emissionsdaten und die Eintreibung der Steuer von den Steuerpflichtigen etwa genauso kostengünstig zu realisieren ist wie die Durchsetzung eines einheitlichen Standards. Der volkswirtschasftliche Effizienzgewinn entsteht dadurch, daß diejenigen Emittenten, die relativ leicht Emissionen verringern können, stark in Umweltschutz investieren, während diejenigen mit hohen (Grenz-)Vermeidungskosten lieber die Steuer zahlen: Im Ergebnis wird eine Zielgröße „Emissionsverringerung gegenüber einem Basisjahr" kostengünstiger erreicht als bei einheitlichen Standards.

Die optimale Steuer t* müßte in einem Suchprozeß gefunden werden. Damit kommt eine Steuer als Instrument nur für bestimmte Emissionen in Frage: Sie ist geeignet für diejenigen Emissionen oder Rohstoffnutzungen, von denen keine akute gesundheitsschädigende Wirkung oder vergleichbare Gefahr ausgeht. Andernfalls wäre das Ordnungsrecht mit Ge- und Verboten vorzuziehen.

Aus der Sicht der Emittenten ist diese gesamtwirtschaftliche Sicht mit der tendenziell positiven Bewertung von Umweltsteuern für die geeignete Klasse von Schadstoffen allerdings wenig bedeutend: Im Falle eines Standards erhält er ein Emissionsrecht bis zur Standardgrenze gratis und bezahlt bei Überschreitung einen „sehr hohen" Preis z.B. in Form einer vorübergehenden oder dauerhaften Betriebsstillegung. Im Falle einer Steuer muß er für die verbleibende Emissionsmenge eine Steuerbelastung in Kauf nehmen. Eine Rückerstattung dieser Steuereinnahmen z.B. in Form einer geringeren Besteuerung an anderer Stelle begünstigt ihn eventuell nur gering, so daß eine Umweltsteuer zumindest bei relevanten Schadstoffmengen gravierende Umverteilungen auslösen

kann. Dies erklärt, daß die Industrie trotz mehrfacher Proteste oftmals doch mit Auflagen zufriedener ist als mit anderen umweltpolitischen Instrumenten.

In der Abbildung 1 emittieren in der Ausgangssituation beide Unternehmen (mit unterschiedlichen Verläufen der Grenzvermeidungskosten für Emissionen) in den Punkten P_1 bzw. P_2. Wenn nun die Umweltpolitik die Emissionen beschränken will und beiden eine einheitliche maximale Emission Q* (= Q_1 = Q_2) vorgibt, dann entstehen unterschiedliche Grenzvermeidungskosten in den beiden Unternehmen. Im Beispiel bedeutet dies, daß Unternehmen 1 zuviel und zu teuer reduzieren muß, Unternehmen 2 könnte dies kostengünstiger. Eine einheitliche Steuer t* führt natürlich in der Summe zu den gleichen Emissionen, nämlich 2·Q*, hat aber geringere Gesamtkosten. Der „Schönheitsfehler" aus der Sicht der Emittenten und „Charme" aus der Sicht des Finanzministers besteht im Steueraufkommen t*·[OR_1 + OR_2], was bei der Auflagenpolitik entfiel. Wie die Abbildung zeigt, müssen im Falle der Umweltsteuer die Unternehmen die Gesamtkosten $OP_1B_1C_1$ bzw. $OP_2B_2C_2$ für Filtertechnik und Steuerzahlungen aufwenden, was für jedes Unternehmen in diesem Falle größer ist als die Aufwendungen beim Ordnungsrecht, die den jeweils schraffierten Flächen entsprechen.

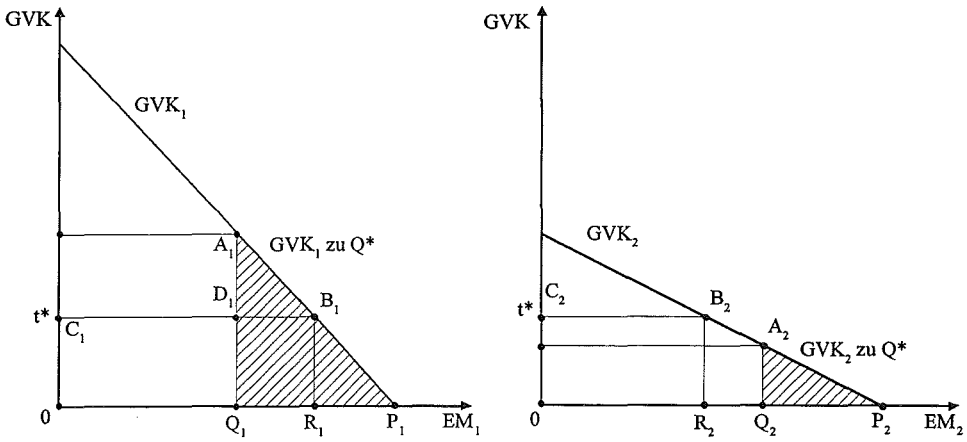


Abbildung 1: Die Ineffizienz einer einheitlichen Auflage Q* gegenüber einer einheitlichen Emissionssteuer t*

2. Die Diskussion um die „doppelte Dividende"

Das heutige Steuer- und Abgabensystem in der Bundesrepublik wirkt verzerrend auf die Marktpreise: Hohe Lohnnebenkosten und die Einkommenssteuer treiben einen Keil zwischen die Kalkulationsgrundlage des einzelnen Unternehmens und dem beim Arbeitnehmer schließlich ankommenden Nettobetrag für eine Stunde Arbeit. Eine solche Verzerrung wirkt zulasten der Beschäftigung und erzeugt volkswirtschaftliche Ineffizienzen. Beispielsweise verlagert sie bisher auf Märkten gehandelte Aktivitäten in die Schattenwirtschaft in Form etwa von Schwarzarbeit, oder diese Aktivitäten werden in Eigenarbeit erbracht, die nicht der Steuer unterliegt. Ein Ingenieur mit brutto 100 DM Stundenlohn (netto heute bspw. 55 DM) renoviert sein Wohnzimmer selbst, weil der Maler 60 DM zuzüglich Mehrwertsteuer nimmt - beim arbeitenden Malergesellen kommen davon vielleicht 25 DM netto an. Zahlreiche Ingenieurstunden ersetzen somit die weniger qualifizierte Arbeit des Malergesellen - offensichtlich ein ineffizientes Ergebnis, das durch das Steuer- und Abgabensystem ausgelöst wird.

Wenn auf der anderen Seite bestimmte Umweltübernutzungen oder zu intensive Entnahme von Rohstoffen staatlichen Interventionsbedarf nahelegen, dann wird aus umwelt- und ressourcenökonomischer Sicht nach den obigen Ausführungen eine Besteuerung der unerwünschten Aktivitäten als Signal in die richtige Richtung gesehen. Diese Besteuerung führt im Regelfall zu positiven Einnahmen des Staates durch Belastung der (optimalen) Restverschmutzungsmenge.

Wenn somit einerseits ein Teilbereich der Umwelt- oder Ressourcennutzungsziele mit Hilfe von Steuern und Abgaben angestrebt werden kann, andererseits die existierenden Steuern und Abgaben schädlich für die Beschäftigung sind, dann kommt sehr schnell die vermeintlich naheliegende Verklammerung beider Aspekte ins Blickfeld. Durch Einführung von „Ökosteuern" ließe sich ein zusätzliches Steueraufkommen erzielen. Wenn der Staat dieses Aufkommen zur gleichzeitigen Senkung von Lohnnebenkosten oder zur allgemeinen Steuersenkung nutzt, dann könnte man eine sogenannte **„doppelte Dividende"** in Form von mehr Umweltschutz und gleichzeitig höherer Beschäftigung erzielen. Mehrere Studien haben in den letzten fünf Jahren für Deutschland den Eindruck erzeugt, dieses Ergebnis ließe sich erreichen. Am Beispiel der in der jüngsten Vergangenheit schwerpunktmäßig diskutierten Energie- oder CO_2-Steuer soll im folgenden dieser Frage nachgegangen werden.

Jede Steuer erfordert einige grundsätzliche Regelungen:

- Der zu besteuernde Tatbestand, d.h. die Steuerbemessungsgrundlage, muß definiert werden.
- Ein Steuersatz muß festgelegt werden.
- Die Steuerpflichtigen, d.h. die Zahler an das Finanzamt, sind zu bestimmen.
- Die Eintreibung der jeweiligen Steuerschuld ist zu organisieren.

Je nach Zielsetzung ergeben sich hier bereits erste Konflikte. Wenn ein Umweltziel verfolgt wird, sind i.a. andere Steuersätze anzusetzen, als wenn vorrangig eine hohe Einnahmenerzielung für die Staatskasse angestrebt wird.

Eine Ökosteuer in den bisher diskutierten Versionen kann vor allem dann ein hohes Aufkommen **(= fiskalisch ergiebige Quelle)** erbringen, wenn sie vor allem die rohstoff- und energieintensiven Prozesse erfaßt: Dort wirkt sie dann aber tendenziell als Innovationsbremse und bewirkt Standortverlagerungen und damit global gesehen ökologisch mehr Probleme als Nutzen. Fiskalisch ergiebig und auf Dauer ertragreich ist eine Steuer ja nur, wenn die besteuerten Wirtschaftssubjekte bzw. die Bemessungsgrundlage geringe Möglichkeiten zum Ausweichen haben. Eine fiskalisch motivierte Steuer bspw. auf Energie oder CO_2 muß geradezu dort ansetzen, wo die Substitutionsmöglichkeiten durch Kapital oder CO_2-freie Techniken gering sind, kann also die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie und den Energieumwandlungsbereich nicht ausnehmen.

Die Ausgestaltung eines **Ökosteuerungsinstruments** als Anreiz zur Innovation und zur Ressourcenschonung hat demgegenüber bei geeigneter Ausgestaltung eine sehr viel geringere fiskalische Ergiebigkeit. Hier müßten die Instrumente besonders dort ansetzen, wo die leichtesten Einspar- bzw. Substitutionsmöglichekeiten gegeben wären. In Bezug auf die Energie-/CO_2-Problematik wären dies die Bereiche Verkehr und Raumwärme. Als Folge einer richtig ausgestalteten Ökosteuer ginge dann eventuell sogar das Aufkommen im Zeitablauf zurück.

Neben diesen akademischen Argumenten sind zusätzlich die politischen Aspekte zu berücksichtigen: Es besteht natürlich die Gefahr, daß eine primär fiskalisch motivierte Politik unter dem Deckmantel der ökologischen Debatte Ökosteuern diverser Art durchsetzt. Im Ergebnis könnten damit die **Kassenzwänge des Staates** industrielle Arbeitsplätze und Produktionsstandorte in der Grundstoff-

und Produktionsgüterindustrie bzw. in der Energiewirtschaft gefährden, Innovationspotential und -chancen in Deutschland vertun, Abwanderung von Industrien ins weniger strenge Ausland befördern, so daß bei global wirkenden Schadstoffen wie etwa CO_2 ökologisch sogar kontraproduktive Resultate zustande kommen.

Betrachtet man beispielsweise die **erforderlichen Volumina zur effektiven Senkung von Lohnnebenkosten**, um damit zusätzliche Beschäftigung zu induzieren, dann sind mindestens zweistellige Milliardenbeträge erforderlich. Will man etwa einen Betrag von 50 Mrd. DM jährlich durch eine Besteuerung des Primärenergieeinsatzes erzielen, wobei regenerative Energieträger üblicherweise ausgenommen werden sollten, dann ist die Steuerbemessungsgrundlage mit rund 480 Mio. t SKE für das Jahr 2000 anzusetzen. Der erforderliche Steuersatz für das angestrebte Aufkommen läge dann bei über 100 DM/t SKE, was bei Steinkohle mehr als eine Verdopplung des aktuellen Preises bedeuten müßte. Daß damit in einem europäischen Binnenmarkt die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Kohlekraftwerke gegenüber ausländischen Anbietern verloren ginge, so daß der deutsche Primärenergieeinsatz wegen dieser Wettbewerbssituation stark zurückginge, ist offensichtlich: Die Steuerbasis erodierte, so daß eine noch höhere Steuer für das Aufrechterhalten des Aufkommens notwendig würde. Andernfalls ließe sich die ohnehin sehr schwache Senkung der Lohnnebenkosten nicht durchhalten. Natürlich würden zudem Transfereinkommensbezieher wie Bafög-Studenten, Rentner oder Kindergeldempfänger dadurch eine reale Schlechterstellung ihrer Situation hinnehmen müssen.

Ähnliches gälte für eine CO_2-Steuer oder Mischkonstruktionen. Für ein Erreichen massiver Impulse auf dem Arbeitsmarkt ist die Steuerbasis (450 - 500 Mio. t SKE bzw. 800 - 900 Mio. t CO_2) selbst beim Energieverbrauch oder den Kohlendioxid-Emissionen zu schwach, wenn man als realistische Nebenbedingung fordert, daß keine Erdrosselung der Wirtschaft oder der Haushalte stattfindet. Die Einhaltung derartiger Nebenbedingungen wird aber von juristischer Seite gefordert.

Dennoch haben bestimmte Studien wie die des DIW im Auftrage von Greenpeace oder die mit Unterstützung der Volkswagen-Stiftung entstandene Studie des Osnabrücker Ökonomie-Professor Bernd Meyer deutlich positive Ergebnisse in Richtung einer doppelten Dividende ermittelt. Einen Vergleich ergibt die nachfolgende Tabelle 3.1.

3. Der analytische Rahmen: Ökosteuern und Kompensation

Die Abschätzung der Wirkungen von Ökosteuern kann nur in einem Modellexperiment ex ante vorgenommen werden: Ein reales Experimentieren verbietet sich angesichts der eventuell dramatischen Effekte. Es gibt nun eine Mehrzahl geeigneter Modelltypen, die unterschiedlich intensiv die betroffenen Sektoren detailliert untersuchen. Da alle derartigen Modelle beanspruchen, für die reale Entscheidung nützliche Analysen zu liefern, müssen sie eine empirische Basis haben, d.h. sie müssen im Idealfall die deutsche Volkswirtschaft samt den besonders betroffenen Sektoren aus Vergangenheitsdaten und theoretischen Konzeptionen möglichst gut abbilden.

Folgende Punkte erschweren objektiv derartige **Modellierungsarbeiten**:

- Die deutsche **Wiedervereinigung** im Jahr 1990 hat in den nachfolgenden Jahren erhebliche Anpassungsprozesse auch in den Alten Bundesländern ausgelöst. In den Neuen Bundesländern ergab sich ein massiver ökonomischer Einbruch vor allem in den industriellen Bereichen, der erst jetzt schrittweise überwunden wird. Eine verläßliche Datenbasis über eine „normale Entwicklung„ gibt es somit nicht. In der Regel basieren die meisten Modellrechnungen deshalb auf Analysen für die Alten Bundesländer und übertragen die Konsequenzen für die Neuen Bundesländer durch Analogieschlüsse.

- Mit der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes im Jahr 1998 und der Europäischen Richtlinie für die leitungsgebundenen Energieträger werden in Zukunft **andere Spielregeln für wichtige Teile der Energiemärkte** gelten. In den Daten der Vergangenheit findet man nur die bisherigen Strukturen wieder.
- Die angestrebten Klimaschutzziele der Bundesregierung haben in den letzten Jahren zu starken Veränderungen in den **ordnungsrechtlichen Standards** wie bspw. der Wärmeschutzverordnung für Neubauten geführt. Dies ist in geeigneter Form in den Modellen abzubilden. Nicht alle Modelltypen sind dafür aber ausgelegt.
- Die Lenkungswirkungen über Ökosteuern sind im Bereich Energie in allen Untersuchungen nur dann deutlich spürbar, wenn sehr hohe Steuersätze zugrunde gelegt werden. Es gibt aber keine **empirische Basis für die Produktionstechnikwahl** oder Außenhandelseffekte, wenn Energieträgerpreise nach einer Steuereinführung etwa verdoppelt oder verdreifacht sind, geschweige denn für eine Verfünf- oder Verzehnfachung.

Die Wirkungen auf die Volkswirtschaft sind zusätzlich auch unterschiedlich, welches Kompensationsmodell verwendet wird, d.h. in welcher Form die erzielten Einnahmen aus Ökosteuern an Haushalte oder Unternehmen zurückfließen.

Studie	Ökosteuer	Kompensation	Beschäftigung / BIP
DIW 1994	progressiv steigende Energiesteuer	Sozialversicherungsbeiträge der Arbeitgeber und pauschaler Ökobonus	Beschäftigung: + BIP: 0 -
IER 1997 Böhringer	Vorschläge der Parteien zu Energie- / CO_2-Steuer	Varianten: Abgabensenkung auf Arbeit, Kapital, Konsum oder pauschaler Ökobonus	Beschäftigung: 0 - BIP: 0 -
IEW 1997 (Meyer OS)	stark progressiv steigende CO_2-Steuer	Sozialversicherungsbeiträge der Arbeitgeber	Beschäftigung: ++ BIP: 0 -
RWI 1996	wie DIW	wie DIW	Beschäftigung: - - BIP: -

Tabelle 1: Ökosteuerstudien - Annahmen und Ergebnisse

Gemeinsam ist allen Studien die Erhebungsinstanz. Es ist jeweils der Bund.

Begründung der Unterschiede:

- Unterschiedliche Annahmen über die „Leichtigkeit der Substitution„ zwischen Kapital, Arbeit und Energie durch die jeweiligen Modellierer,
- unterschiedliche Modellierung der Wirkungen des Außenhandels bzw. möglicher Standortverlagerungseffekte (Leakage-Effekte),
- unterschiedliche Modellierung der (Real-)Lohnpolitik (größte Beschäftigungseffekte dann, wenn die Tarifparteien eine starke Reallohnsenkung zulassen),

- Berücksichtigung der im aktuellen Steuersystem bestehenden Verzerrungswirkungen,
- unterschiedlich hohe Steuersätze im langfristigen Ansatz (IEW bewirkt eine Verzehnfachung der Kohlepreise; DIW und RWI mittlere Ansätze; IER eher mäßige Steigerung).

Ein großes Problem aller Studien sind die für die politische Umsetzung deutlich zu machenden Bedingungen, wie sich die **Modellrechnungen** in **reale politische Entscheidungen** umsetzen lassen. Beispielsweise ist im Modell des Osnabrücker Professor Meyer (IEW) unterstellt, daß es keinen Stromimport gibt (der durch ein unterstelltes Verbot oder einen prohibitiv hohen Grenzausgleich verhindert wird) und daß keine Kernenergiekapazitäten zugebaut werden dürfen. Damit wäre das Modell für eine Implementierung in der EU nicht anwendbar. Als Ersatz müßte man das Computer-Modell als Abbild eines europäischen Konzeptes interpretieren. Dies kann aber mit einem auf deutschen Daten basierenden National-Modell nicht dargestellt werden, da ein Export bspw. von französischem Kernenergiestrom nur mit einem europäischen Modell zu erfassen sein müßte. Frankreich wird kaum Zubau von Kernkraftwerken wegen einer deutschen Modellierungsarbeit unterbinden. Hier wird leider mehrfach die Modellierungsarbeit in ihren realen Umsetzungsmöglichkeiten gefährlich überstrapaziert. Insbesondere die Medien nehmen derartige Einschränkungen nicht hinreichend zur Kenntnis.

4. Die soziale Dimension einer Ökosteuer

Die Änderung des Steuersystems in Richtung einer stärkeren Besteuerung des Energieeinsatzes bei gleichzeitiger Kompensationslösung durch Senkung von Lohnnebenkosten führt zu einer starken Umstrukturierung der Volkswirtschaft. Der Kapitalbestand energieintensiv produzierender Unternehmen wird tendenziell entwertet, Arbeitsplätze dort abgebaut, wogegen - sofern das Konzept einer Ökosteuerreform aufgeht - Anreize zur zusätzlichen Produktion in arbeitsintensiven Branchen geschaffen werden. Parallel zur Entwicklung des physischen Kapitalbestandes kommt es im schrumpfenden Sektor jedoch auch zu einer Entwertung es Humankapitalbestandes der Beschäftigten. Selbst wenn es gelänge, eine - quantitativ betrachtet - beschäftigungsneutrale Ökosteuer zu konstruieren, so hätte eine solche doch erhebliche Wirkungen auf den Humankapitalbestand und die Humankapitalstruktur der Volkswirtschaft.

Viele der bislang konzipierten Ökosteuermodelle treffen ganze Branchen (Zementindustrie, Stahlindustrie, Grundstoffchemie, Kohlebergbau, Elektrizitätswirtschaft), so daß hier mit erheblichen Humankapitalentwertungen zu rechnen ist. Für die Politik ergibt sich daraus die Aufgabe, diese Entwertungsprozesse abzufedern. Da die Entwertung des Humankapitals mit der Entwertung des physischen Kapitals einhergeht, sind auch ähnliche Maßnahmen gegen eine (zu schnelle) Entwertung des Humankapitals denkbar. So können Branchen oder Produktionsprozesse komplett von einer Ökosteuer ausgenommen werden, oder über einen Anpassungszeitraum einem ermäßigten Satz unterworfen werden, so daß sich die Entwertung langsamer vollzöge. Dieser Zeitgewinn kann dann genutzt werden im Rahmen der beruflichen Weiterbildung oder in Umschulungsmaßnahmen neue Humankapitalinvestitionen zu tätigen, um somit das Produktivitätsniveau des Faktors Arbeit zu erhalten oder neu aufzubauen. An dieser Stelle ist auch der Staat gefordert, der - ähnlich wie er bei Anpassungs- oder Ausnahmeregelungen auf eine Teil seiner Ökosteuereinnahmen verzichtet - Teile des Ökosteueraufkommens dazu verwenden kann, solche Umschulungsmaßnahmen zu finanzieren. Dieses ist um so dringlicher erforderlich, je allgemeiner die neuen Humankapitalinvestitionen sind, da mit zunehmender Allgemeinheit der Investitionen die Bereitschaft der Unternehmen sinkt, diese zu finanzieren.

Wenn also zur Lösung **akuter Beschäftigungsprobleme** eine Ökosteuer vorgeschlagen wird, so kollidiert diese Empfehlung mit den erforderlichen Zeithorizonten für die Anpassungsprozesse in den betroffenen Branchen und für die betroffenen Wirtschafssubjekte in ihrer Eigenschaft als Autofahrer, Mieter oder Arbeitnehmer.

5. Der rechtliche Rahmen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Einführung von „Ökosteuern„ werden durch nationales, durch europäisches und hinsichtlich der außenwirtschaftlichen Beziehungen durch das Welthandelsrecht abgesteckt.

Hierbei ergeben sich erhebliche Einschränkungen der Gestaltungsmöglichkeiten. Beispielsweise ist eine Kopplung von Steuererhebung mit gleichzeitiger Rückerstattung (Kompensationsmodell) mit dem bisherigen deutschen Finanzverfassungsrecht nicht ohne weiteres verträglich. In allen bisher vorgeschlagenen Ökosteuern ist die Erhebungsinstanz der Bund. Mögliche Kompensationsmodelle treffen aber auch direkt oder indirekt die Länder und die Gemeinden. Im Steuergefüge von Bund, Ländern und Gemeinden ist auf die Ausgewogenheit der Steuereinnahmen zu achten - andernfalls scheitert ein Ökosteuerkonzept bereits im Bundesrat oder vor dem Verfassungsgericht..

Dasselbe gilt bezüglich der Ausgestaltung von erforderlichen Grenzausgleichsmechanismen im Falle von nationalen Primärenergie- oder CO_2-Steuern: Einfache oder pauschalierte Grenzausgleichsabgaben etwa für Elektrizität sind nach internationalem und europäischem Recht nicht zulässig. Aktuell hat gerade Finnland eine derartige Erfahrung machen müssen: Der Europäische Gerichtshof hat im April 1998 das finnische Grenzausgleichssystem für Stromimporte als unzulässig kassiert. Finnland hatte eigene Stromerzeugung nach Energieträger differenziert besteuert und wollte für Importstrom ein pauschaliertes Verfahren anwenden.

Ähnliche Einschränkungen ergeben sich auch aus den WTO-Spielregeln: Selbst wenn sich die EU auf eine einheitliche Umweltschutzpolitik verständigen könnte und dazu eine einheitliche Linie hinsichtlich von Ökosteuern entwickelte, wäre immer noch offen, ob gegenüber dem Nicht-EU-Ausland ein Grenzausgleichssystem mit WTO-Regeln kompatibel gestaltet werden kann. Ohne ein solches Grenzausgleichssystem ließe sich wiederum das Abwandern oder das Zusammenbrechen der unter Importdruck geratenden energieintensiven Industrien kaum vermeiden.

Contracting-Modelle als Instrument zur Umsetzung der rationellen Energieverwendung in Nordrhein-Westfalen

Christian Tögel

Energieagentur NRW, Wuppertal

Zahlreiche Kommunen stehen aufgrund immer schwieriger werdender finanzieller Probleme vor der Frage, ob die Finanzierung der notwendigen Infrastrukturmaßnahmen auf konventionelle Weise auch zukünftig erfolgen kann. In diesem Zusammenhang können Maßnahmen der Drittfinanzierung, beispielsweise Contracting-Modelle als Alternative erhebliche Bedeutung für die Kommunen erlangen.

Bund, Länder, halbstaatliche Einrichtungen, vor allem aber Kommunen betreiben eine Vielzahl großer Gebäude mit komplexen haustechnischen Anlagen und Einrichtungen. Das ungenutzte Potential zur Reduzierung des Energieverbrauchs, insbesondere im Bereich der Wärmeversorgung, reicht nach Einschätzung von Experten in die Milliarden-Größenordnung. Um diese Beiträge könnten die Betriebskosten in den öffentliche Haushalten gesenkt werden. Darüber hinaus könnten Energieeinsparungen einen nennenswerten Beitrag leisten, um die Schadstoffbelastung der Umwelt zu vermindern.

Die Kommunen haben zwar die Notwendigkeit der zum Handeln erkannt, jedoch reichen die, insbesondere in den kommunalen Vermögenshaushalten zur Verfügung stehenden Investitionsmittel nicht aus, um den enormen Investitionsbedarf zu decken.

Das ifo-Institut hat in einer Prognose veröffentlicht, daß bis zum Jahr 2000 für die ökologische Sanierung der neuen Bundesländer ein Investitionsvolumen von ca. 211 Mrd. DM erforderlich sein wird. Das Institut der deutschen Wirtschaft ermittelt für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2010 ein Investitionsvolumen alleine für den Bereich Abwasserbeseitigung von 160 - 280 Mrd. DM.

Die finanziellen Handlungsspielräume, insbesondere bei den Kommunen werden zunehmend enger.

Daher werden für Investitionen von Kommunen zunehmend Finanzierungs- und Betreiberkonzepte auf der Basis von public-private-partnership-Modellen / Drittfinanzierungsmodellen gewählt.

Die kommunale Energiebewirtschaftung steht vor großen Herausforderungen. Man muß sich nur einmal die Situation eines Hochbauamtes einer Großstadt in Nordrhein-Westfalen vor Augen führen. Die nachfolgend aufgeführten Aspekte drängen die Verantwortlichen einerseits zum Handeln, andererseits stehen der Umsetzung von Maßnahmen etliche Hinderungsgründe im Weg:

Die Politiker drängen auf die Erstellung und Umsetzung von Energiekonzepten, CO_2-Minderungskonzepten und Klimaschutzkonzepten. Dagegen stehen knappe kommunale Investitionsmittel. Es gibt ein Auseinanderfallen von Verwaltung- und Vermögenshaushalten und das Prinzip der Kameralistik. Wir stellen eine fehlende Motivation von Hausmeistern und Gebäudenutzern wegen mangelnder Anreize zum Energiesparen fest, es gibt energietechnische und energiewirtschaftliche Kenntnismängel. Die mangelnde Koordination zwischen Ämtern, Finanzierungsengpässe, veraltete haustechnische Anlagen, die Verschlechterung der Bausubstanz und erhöhte Umweltbelastung setzen die Mitarbeiter der Hochbauämter in den Kommunen zunehmend unter Druck.

Daneben gibt es eine Privatisierungsdebatte, die Forderung nach Lean-Management in der öffentlichen Verwaltung und einen Zwang zur Effektivitätssteigerung.

Beispielhaft möchte ich die Situation einer Kommune, einer typischen Großstadt in Nordrhein-Westfalen anhand von einigen Zahlen beschreiben. Es handelt sich hierbei um eine Stadt mit mehr als 500.000 Einwohnern. Ich werde nur den Bereich der Wärmeversorgung der Liegenschaften betrachten. Die Anzahl der vom Hochbauamt verwalteten Liegenschaften beträgt ca. 800. Dies reicht vom größten Theater-/Operngebäude bis zum kleinsten Kindergarten in der Stadt. Von diesen 800 Liegenschaften werden ca. 200 mit Fernwärme versorgt. Es bleiben 600 Gebäude übrig, die objektversorgt sind. Das Durchschnittsalter der Kesselanlagen beträgt z.Z. 18,5 Jahre. Selbst bei "großzügiger" rechnerischer Lebensdauerabschätzung von 25 Jahren für die Heizzentralen ergibt sich ein rechnerischer Erneuerungsbedarf pro Jahr in Höhe von ca. 21 Heizzentralen, um den Status quo zu erhalten.

Tatsächlich jedoch wurden im Durchschnitt der letzten 3 Jahre nur 6 Heizzentralen pro Jahr erneuert: ein jährlicher Investitionsstau von 15 Heizzentralen.

Contracting - allgemeine Definition

Contracting könnte das Hilfsmittel sein, um all die eben beschriebenen Hemmnisse zu überwinden. Contracting hat zu tun mit dem Thema Outsourcing, mit dem Profit-Center-Gedanken, technisch oft mit Kraft-Wärme-Kopplung. Es hat etwas zu tun mit dem Begriff "Verringerung der Fertigungstiefe" oder letztlich mit der These "Make or Buy", also erbringe ich eine Hilfsleistung selbst oder kaufe ich sie mir lieber von einem Dritten zu. Welche Alternative ist wirtschaftlicher?

Sie haben in der Vergangenheit schon einmal einen der folgenden Begriffe gehört im Zusammenhang mit Investitionen in die Energietechnik:

- Drittfinanzierung
- Betreibermodelle
- Third-Party-Financing
- Performance-Contracting
- Projekt-Finanzierung
- Independent Power Producer
- Anlagen-Leasing etc. etc.

All diese Bezeichnungen werden im Zusammenhang mit Contracting gebraucht, also ein sehr diffuser Begriff. Bei all diesen Begriffen geht es erstens immer um eine Form der Objekt-Finanzierung - unmittelbar oder mittelbar - , und zweitens geht es fast immer um die Bereitstellung von Nutzenergie. Es geht um Anlagen zur Erzeugung und Fortleitung von Energie und um die Realisierung von Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung.

Bevor wir zur Definition von Contracting kommen, vorab die Darstellung des Ablaufs der konventionellen Investitionsfinanzierung der Kommune.

Im Zentrum steht die Kommune mit der energiebewirtschaftenden Stelle, die nach der jeweiligen Ämtergliederung zuständig ist. In Nordrhein-Westfalen ist dies das Hochbauamt. Die Kommune ist der Energienutzer, aber die Kommune ist auch der Investor für Investitionen in die Energietechnik.

An dieser Stelle kann schon ein Grundsatz aufgestellt werden, der wichtig ist:

> **Investor** und **Nutzer** der Energieerzeugungsanlage **sind identisch**
> bei der **konventionellen Investitionsfinanzierung**.

Das Hochbauamt sorgt für die Ist-Analyse, für Energieberatung; vom Hochbauamt aus wird ein Planer eingeschaltet, ein Hersteller/Anlagen-Lieferant errichtet die Anlage, die Finanzierung erfolgt in der Regel über ein Kommunal-Kredit. Die Kommune sorgt im Rahmen eines Energie-Liefervertrages für den Primärenergiebezug vom Versorger, beispielsweise vom örtlichen Gasversorger, ein SHKL-Betrieb wird mit der Wartung, Instandhaltung etc. etc. beauftragt. Dies ist der Status quo.

In einer weiteren Darstellung habe ich einmal alle Tätigkeiten, die von einem kommunalen Hochbauamt zu leisten sind, im Rahmen einer Energie-Umwandlungskette oder Wertschöpfungskette von der Primärenergie bis zur Nutzenergie dargestellt:

- Ist-Analyse
- Energie-Beratung
- Konzept-Entwicklung
- Analyse und Optimierung vorhandener Systeme
- Wirtschaftlichkeitsuntersuchung
- Planung
- Genehmigungsverfahren
- Ausführung
- Anlagenbau
- Bauüberwachung
- Kostenkontrolle
- Finanzierung
- Primärenergie-Bezug/Brennstoffbeschaffung
- Betrieb der Anlage
- Bedienung/Kontrolle
- Wartung/Instandhaltung
- Reparaturen/Notdienst
- Energie-Controlling
- Abrechnung

Aus der Fülle dieser Tätigkeiten erkennt man, was ein Hochbauamt in der Energiebewirtschaftung alles zu leisten hat.

Im Gegensatz dazu liegt bei der Abwicklung im **Contracting** - das Beispiel Wärmelieferung ist gewählt, weil es das gängigste Beispiel ist, um das Prinzip zu erklären - **keine Identität zwischen Nutzer und Investor vor.** Grundsätzlich ist die Contracting-Gesellschaft der Investor, der die Energieanlage auf eigenen Namen für eigene Rechnung errichtet und betreibt; die kommune als Energienutzer bezieht lediglich die Nutzenergie und zahlt dafür ein entsprechendes Entgelt, den Wärmepreis.

Hiermit ist schon der wesentliche Charakter eines Contracting-Modells erläutert.

Bei der konventionellen Finanzierung sind Investor und Nutzer identisch, beim **Contracting** sind **Investor** und **Nutzer verschieden.**

Nunmehr der Versuch, eine konkrete Definition von Contracting als Alternative zum Kauf und zur "klassischen Eigenversorgung" zu geben.

Kennzeichnend für das Contracting ist, daß ein Fremder, also ein außenstehendes Contracting-Unternehmen, ein Dritter, die Investitionen im Bereich der Energietechnik im eigenen Namen und für eigene Rechnung durchführt. Im Full-Service-Contracting berät, plant, errichtet, betreibt und finanziert das Contracting-Unternehmen die Energie-Erzeugungsanlage. Die Bezahlung des Contracting-Unternehmens erfolgt i Idealfall vollständig, sonst teilweise, aus den erzielten Kosteneinsparungen beim Kunden.

Bis heute existiert keine allgemein akzeptierte Definition von Contracting. Aber bei jedem Definitionsversuch ist der Kern die Auslagerung einer bzw. mehrerer Funktionen an einen Dritten.

Als wesentlicher Vorteil des Contracting oder der Drittfinanzierung ist zu nennen, daß die Investition unmittelbar ohne Kapitaleinsatz der Kommune erfolgen kann.

Bei einem Unternehmen würde man sagen, das Eigenkapital, die Kreditlinien und auch die bankmäßigen Sicherheiten bleiben bei dieser Investitionsform unberührt. Die Contracting-Kosten sind monatlich wiederkehrende Zahlungen, die parallel zur Nutzung des Objektes anfallen. Da im Idealfall die Ersparnis aus dem Objekteinsatz höher liegt als die Contracting-Kosten, finanziert sich das Investitionsgut aus den von ihm erwirtschafteten Ersparnissen.

Im Falle der Kommunen liegt der Effekt im wesentlichen darin, daß die Contracting-Zahlungen als Ausgaben der laufenden Verwaltung gewertet werden können.

Unterscheidung

- versorgungsorientiertes Contracting
- Einspar-Contracting (Performance-Contracting)

Es haben sich mehrere Formen von Contracting-Modellen gebildet. Zunächst das Modell des versorgungsorientierten Contracting:

Bei dieser Contracting-Unterform handelt es sich um das vertragstechnisch und vertragsrechtlich einfachste Modell. Auf der einen Seite steht der Energieabnehmer, in unserem Fall die Kommune, die eine entsprechende Nutzenergielieferung von der Contracting-Gesellschaft erhält und diese Nutzenergielieferung mit einem Entgelt vergütet. Im Fall der Wärmelieferung wäre das der Wärmepreis.

Kennzeichen eines solchen versorgungsorientierten Contracting-Modells ist, daß hier die Energieerzeugungsanlage im Eigentum des Contractors steht. Die Anlage ist individuell zugeschnitten auf den Nutzenergiebedarf des Kunden, beispielsweise auf den Kraft- und Wärmebedarf im Falle einer BHKW-Anlage. Die Preise für die Nutzenergielieferungen sind Projektbezogen kalkuliert und werden in der Regel aufgesplittet nach einem Grund- und Arbeitspreis, wobei im Grundpreis die Kapitalkosten enthalten sind und Arbeitspreis die verbrauchsgebundenen Kosten. In der Regel findet im Rahmen der vertraglich festgelegten Laufzeit eine Vollamortisation statt, d.h. alle Aufwendungen der Contracting-Gesellschaft einschließlich des Gewinnes werden durch die Zahlungen, die der Energienutzer im Rahmen der nicht kündbaren Laufzeit leistet, gedeckt.

Nun zur Energieeinsparung in diesem Modell. Wesentlicher Kernpunkt dieses versorgungsorientierten Contracting-Modells ist, daß die Vergütung des Contractors unabhängig ist von der Energieeinsparung beim Kunden.

Beim Performance-Contracting-Modell hingegen haben wir eine erfolgsbezogene Vergütung, abhängig vom Energieeinspar-Erfolg beim Kunden.

Energieeinsparung wird beim Kunden aber auch beim versorgungsorientierten Contracting eintreten, denn ich gehe einmal davon aus, daß diese Anlage, wenn sie denn intelligent geplant ist, eine bessere technische Lösung ist als das, was der Kunde vorher hatte.

Im Gegensatz zum versorgungsorientierten Contracting haben wir beim Einspar-Contracting die eingesparten Energiekosten als Grundlage für die Finanzierung der Maßnahmen und Investitionen des Contracting-Unternehmens. Auszugehen ist zunächst vom Ist-Zustand, dem Zustand, der gegeben ist bis zu dem Zeitpunkt, zu dem der Contractor auf den Plan tritt. Es liegen bestimmte Energiekosten vor. Der Contractor nimmt nun die Installation der Anlagentechnik vor, er optimiert die Haustechnik. Dies kann durch Steuerungs- und Regelungssystem geschehen, dies kann aber auch geschehen, durch Ersatz von Kessel- und Brenneranlagen im Wärmebereich.

Unmittelbar nach dem Investitionszeitpunkt durch den Contractor sinken die Energieverbrauchskosten, also in der Regel die Kosten für den Bezug von Primärenergie, und ab diesem Zeitpunkt tritt auch die Umweltentlastung ein. Die Vertragspartner vereinbaren eine bestimmte Vertragslaufzeit und im Rahmen dieser Vertragslaufzeit zahlt die Kommune die nun geringeren Primärenergiekosten. Die eingesparten Energiekosten zahlt die Kommune an die Contracting-Gesellschaft. Aus der Differenz zwischen Referenzkosten und jetzigen Energiekosten refinanziert die Contracting-Gesellschaft ihre Maßnahmen und Investitionen. Ist die Investition beim Contracting-Unternehmen voll amortisiert, so geht die Anlage ins Eigentum des Kunden über.

Zu diesem Zeitpunkt erfolgt das Vertragsende mit der Contracting-Gesellschaft und von nun an profitiert die Kommune alleine von der Kostenreduktion. Es sind am Markt aber auch andere Vertragstypen zu beobachten. Es gibt Unternehmen, die schließen sogenannte Erfolgsbeteiligungsverträge ab. In diesen Verträgen partizipiert der Kunde von Anfang an zu beispielsweise 20% oder 25% an der Energieeinsparung, ohne Eigenmittel für die Modernisierung der Anlagentechnik einsetzen zu müssen. Die Contracting-Unternehmen tragen im Rahmen der Vertragslaufzeit die Kosten für die Effizienzsteigerung und sorgen für die Wartung der installierten Systeme. Möglich sind auch Modelle, in denen der Kunde die Anlagentechnik kaufen oder leasen kann, wobei hier die Contracting-Gesellschaften die Energiegewinne in gewisser Höhe garantieren.

Auch in diesem Modell verbleibt die Anlage während der Vertragslaufzeit im Eigentum der Contracting-Gesellschaft. Wie im Modell des versorgungsorientierten Contracting, erfolgt in der Regel Vollamortisation und ein Übergang der Anlagenkomponenten ins Eigentum der Kommune.

Im Gegensatz zum versorgungsorientierten Modell ist jedoch die Vergütung hier abhängig von der Energieeinsparung, also erfolgsabhängig. Tritt beispielsweise die prognostizierte Energieeinsparung nicht ein, so geht dies zu Lasten der Contracting-Gesellschaft.

Oft wird der Eindruck erweckt, als würden die Energiespar-Gewinne - so will ich sie einmal nennen - ausreichen, um die gesamten Investitionskosten des Contractors und die Betriebskosten zu decken.

Nach unseren Erfahrungen kann die Vollkostendeckung über Energiegewinne jedoch nicht in jedem Projekt realisiert werden.

Trotz alledem, es gibt eine Fülle von Projekten, bei denen das funktioniert.

Allerdings ist es nur möglich, wenn es sich wirklich um Anlagen mit extrem schlechter Effizienz handelt und wenn die Maßnahme, die der Contractor durchführt, keine hochinvestive Maßnahme darstellt.

Geht es beispielsweise nur um Steuer- und Regelungstechnik, Beleuchtungstechnik, so kann man hier sicher mit kurzen Amortisationszeiten und - bezogen auf die Investitionssumme - mit relativ hohen Einspar-Gewinnen rechnen. Geht es aber um den Ersatz einer Kesselanlage, so wird dieses Modell des Energieeinspar-Contractings in der Regel nicht durchführbar sein.

Voraussetzung für einen Einspar-Contracting-Vertrag ist demnach ein ausreichend hohes Energieeinsparpotential. Ich darf Ihnen aus der Erfahrung der Energieagentur NRW berichten, daß wir auch schon solche Performance-Contracting-Gesellschaften in unsere Initialberatung eingebunden haben; daß aber auch in zwei Fällen die Gesellschaften nach einer Grob- und Feinanalyse von der Projektdurchführung Abstand genommen haben mit der Begründung, die Anlagen seien nicht in so schlechtem Zustand, daß ein Einspar-Contracting in vertretbaren Vertragslaufzeiten durchgeführt werden könnte.

Meine Damen und Herren , eine pauschale Bewertung von Drittfinanzierungsmodellen fällt schwer, da es sich um ein relativ neues Instrument handelt.

Im Gegensatz zu Unternehmen der privaten Wirtschaft fallen bei Kommunen die steuerlichen und bilanziellen Vorteile, die Contracting bietet , nicht ins Gewicht.

Innovative Finanzierungs- und Betreibermodelle, Drittfinanzierungsmodelle, Contracting-Modelle sind im Bereich der öffentlichen Hand in einen übergreifenden Zusammenhang einzuordnen.

Es geht im Grunde um die Privatisierung von Aufgabenbereichen, die die öffentliche Hand bisher selbst abwickelt.

Im übrigen muß erwähnt werden, daß es konzeptionell vergleichbare Modelle auch im Bereich Bau und Betrieb der kommunalen Abwasserbeseitigung oder der Müllentsorgung gibt, es gibt also nicht nur Drittfinanzierungsmodelle im Energiebereich.

Die Besonderheit im Energiebereich stellen eigentlich die beschriebenen, erfolgsabhängigen Einspar-Contracting-Modelle dar.

Jedes Contracting-Projekt ist verschieden, es geht immer um eine individuelle Problemlösung vor Ort für einen Individuellen Kunden.

In der jüngeren Vergangenheit sind zunehmend Contracting-Modelle realisiert worden, und ich glaube die Erfahrungen mit diesen Modellen sind überwiegend positiv. In der Regel verspricht Contracting wirtschaftliche Vorteile für die Kommunen und Kostensenkung bei der Versorgung von kommunalen Liegenschaften, darüber hinaus Verwaltungsvereinfachung.

Aber auch ein kritischer Punkt an diesen Modellen darf nicht verschwiegen werden.

Aus Sicht der kommunalen Behörden und ihrer Beschäftigten sind Drittfinanzierungs-Modelle ganz eindeutig eine Form der Privatisierung bisher öffentlicher Aufgaben. Daher ist es erforderlich, sich zukünftig bei der Realisierung solcher Modelle auf Widerstände einzustellen, die aus dem Bereich der Mitbestimmung oder Mitwirkung der Personalvertretungen der öffentlichen Hand kommen.

Die Energieagentur NRW unterstützt und fördert die Umsetzung von Drittfinanzierungsmodellen. Die angestrebten CO2-Minderungsziele sind wohl nur mit derartigen Modellen erreichbar.

In jedem Einzelfall ist jedoch die Vorteilhaftigkeit und die Wirtschaftlichkeit im Verhältnis zur "klassischen Eigenversorgung" eingehend zu prüfen.

- Versorgungsunternehmen
- Anlagen- und Komponentenhersteller
- Ingenieurbüros
- Handwerksbetriebe
- Energieagenturen
- Projekt- oder Betreibergesellschaften
- Brennstofflieferanten
- Banken

Bild 1: Contracting-Unternehmen

- Realisierung von Investitionen in Energiekosten-senkende Anlagen ohne eigenen Kapitaleinsatz
- unmittelbare Betriebskostensenkung und Umweltentlastung durch Einsatz modernster Energie-effizienztechnologie
- Nutzung des Spezialisierungs-Know-Hows des Contractors
- keine Kapitalbindung, somit größere Liquidität
- Konzentration des Nutzers auf seine Kernkompetenzen
- Übertragung des Investitions- und Betriebsrisikos (ganz oder teilweise) auf den Contractor
- hohe Betriebssicherheit durch Kompetenz und Erfahrung des Contractors

Bild 2: Attraktivität des Contracting aus der Sicht des Nutzers

Kölner Rahmenkonzept einer energiesparenden und umweltschonenden Wärmeversorgung – auf dem Prüfstand im liberalisierten Energiemarkt

Martin Keiner

GEW Köln AG

Einleitung

Die in Köln seit vielen Jahren erprobten Maßnahmen zur Energieeinsparung/Emissionsminderung stehen vor dem Hintergrund eines liberalisierten Energiemarktes auf dem Prüfstand. Ihre zukünftige Bedeutung soll hier diskutiert werden.

Nach einer kurzen Vorstellung des Unternehmens GEW wird auf die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen im deutschen Energiemarkt eingegangen. Mit Blick auf die Kölner Situation wird im folgenden dargestellt, wie die Energieversorgungsunternehmen in Köln in der Vergangenheit bei der Energieerzeugung und –verteilung Umweltentlastung und Energieeinsparung realisiert haben. Anschließend werden die zukünftigen Maßnahmen angesprochen, die auch unter veränderten marktwirtschaftlichen Randbedingungen zu einer umweltschonenden Energieversorgung beitragen. Zum Abschluß erfolgt ein Ausblick in die Zukunft.

1. Vorstellung der GEW

Die Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke Köln AG – kurz: GEW – ist ein kommunales Dienstleistungs- und Wirtschaftsunternehmen, das die Einwohner sowie Handels-, Gewerbe- und Industriebetriebe der Stadt Köln sicher, preiswert und umweltschonend mit Energie und Wasser versorgt.

Als Querverbundunternehmen bietet GEW die Energiearten Strom, Gas, Fernwärme und Industriedampf aus einer Hand an. Die Bedarfsdeckung wird so optimiert, dass für Kunden und Unternehmen das günstigste Ergebnis erzielt wird.

Ein Drittel des Strombedarfs deckt GEW aus eigenen Heizkraftwerken, der übrige Teil wird wie auch das gesamte Erdgas durch Fremdbezug eingekauft. Die Fernwärme und der Industriedampf werden zu über 90 % in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt. Dabei entstehen Strom und Wärme in einem Prozess.

Für die Trinkwasserversorgung gewinnt GEW in drei Wasserwerken Rohwasser aus Grundwasservorkommen, die aus versickertem Niederschlagswasser und infiltriertem Oberflächenwasser gespeist werden.

Das Unternehmen GEW, das mit vier weiteren Gesellschaften zum Stadtwerkekonzern Köln gehört, ist mit 1,79 Mrd. DM Jahresumsatz und rd. 2.700 Mitarbeitern ein bedeutender Wirtschaftsfaktor für den Kölner Raum.

Absatz		1996	1997
Stromverkauf	Mio. kWh	6.031	6.043
Gasverkauf	Mio. kWh	9.220	8.549
Wärmeverkauf	Mio. kWh	5.520	4.974
Dampfverkauf	Mio. kWh	303	514
Wasserverkauf	Mio. m³	60,6	56,2
Umsatz	Mio. DM	1.759	1.793
Mitarbeiter		2.717	2.681

Tabelle 1: Unternehmensdaten der GEW Köln AG auf einen Blick

2. Aktueller Stand in der energiepolitischen Gesetzgebung

Bis zum 29. 4. 1998 war der deutsche Energiemarkt geprägt durch 9 große Verbundunternehmen, die ca. 78 % des Strombedarfs erzeugten und rd. 980 regionale und kommunale Versorgungsunternehmen, deren Eigenerzeugung etwa 22 % des Bedarfs deckte. Diese Unternehmen belieferten durch Demarkationsverträge voneinander abgegrenzte Gebiete und zahlten den Städten und Kreisen für das in Konzessionsverträgen verbriefte ausschließliche Recht der Energieversorgung eine Abgabe.

Die Energieerzeugung wurde durch hohe Anforderungen seitens des Gesetzgebers (Großfeuerungsanlagenverordnung und TA Luft im Rahmen des Bundesimissionsschutzgesetz) und der langfristigen Planungssicherheit der Versorgungsunternehmen auf einem technisch hohen Niveau realisiert, das neben einer sehr großen Zuverlässigkeit auch zu höheren Kosten führte, als dies beispielsweise im Ausland der Fall ist.

Die Neuregelungen des energiepolitischen Umfelds begannen mit der Verabschiedung der EU-Richtlinie Strom vor zwei Jahren, die bis zum 19.2.1999 in jeweiliges nationales Recht umzusetzen ist. Dies ist mit dem verabschiedeten neuen Energiewirtschaftsgesetz in Deutschland geschehen. Dieses Gesetz ist am 29.4.1998 in Kraft getreten und hebt die kartellrechtliche Freistellung der oben beschriebenen Demarkationsverträge auf.

Somit ergeben sich für alle bisherigen Unternehmen auf dem Energiemarkt neue Herausforderungen, die durch das Auftreten neuer, internationaler Akteure (als Energieanbieter, -händler oder Broker) zusätzlich verschärft werden.

3. Bisherige Entwicklung der Energieeinsparung und Umweltentlastung in Köln

Wie bereits angeführt setzt GEW bei der Versorgung der Einwohner, Gewerbe- und Industriebetriebe der Stadt Köln auf die ressourcenschonende Kraft-Wärme-Kopplung zur Erzeugung von Wärme, Dampf und Strom und das Angebot von Erdgas zur dezentralen Erzeugung von Wärme. Damit wurden die Grundlagen für eine energiesparende und umweltschonende Energieversorgung in Köln gelegt.

Als wesentlich für eine deutliche Reduzierung der klimaschädigenden Gase werden neben den Maßnahmen zur Energiesenkung die Umstellung der Brennstoffe von den höher kohlenstoffhaltigen (Kohle, Öl) auf geringer kohlenstoffhaltige (Erdgas) sowie die Kraft-Wärme-Kopplung zur gemeinsamen Erzeugung von Wärme und Strom angesehen. Somit kommt dem Ausbau der Erdgas- und Fernwärmeversorgung in Köln eine besondere Bedeutung zu.

Die Festschreibung einer positiven Entwicklung und die Quantifizierung der aus den unterschiedlichsten Maßnahmen resultierenden Emissionsminderungen erfolgte erstmals Mitte der achtziger Jahre in einem umfassenden Konzept unter Beteiligung der Stadt Köln, der GEW und der beiden auf Kölner Stadtgebiet tätigen Gasversorgungsunternehmen (Rechtsrheinische Gas- und Wasserversorgung AG – RGW, Gasversorgungsgesellschaft mbH Rhein-Erft – GVG): Energie für Köln, Rahmenkonzept einer energiesparenden und umweltschonenden Wärmeversorgung.

In diesem Konzept wird aufgezeigt, wie und in welchem Umfang die zukünftige Entwicklung zur weiteren Energieeinsparung und Umweltentlastung im Wärmemarkt in Köln für den Planungszeitraum von 1984 bis 2000 positiv gestaltet werden kann. Zur Umsetzung des Konzeptes haben zwischenzeitlich sowohl die EVU als auch die Stadt Köln große Anstrengungen unternommen. So haben die drei Energieversorgungsunternehmen allein in den letzten 13 Jahren (1984-1997) für den konsequenten Ausbau der Erdgas- und Fernwärmeversorgung Investitionen in Höhe von 921 Mio. DM getätigt.

Entsprechend konnte der Anteil der leitungsgebundenen Energieträger an der Deckung des für Raumwärme benötigten Endenergiebedarfs im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher (HuK) von 51,5 % im Jahre 1984 auf 78,9 % im Jahre 1997 gesteigert werden (siehe Bild 1).

Die Betrachtung der letzten 13 Jahre zeigt, daß der Anteil der leitungsgebundenen Energieträger mit 78,9 % an der Deckung des Raumwärmebedarfs den ursprünglichen Prognoseansatz für das Jahr 2000 (72,3 %) bereits in 1997 deutlich überschritten hat.

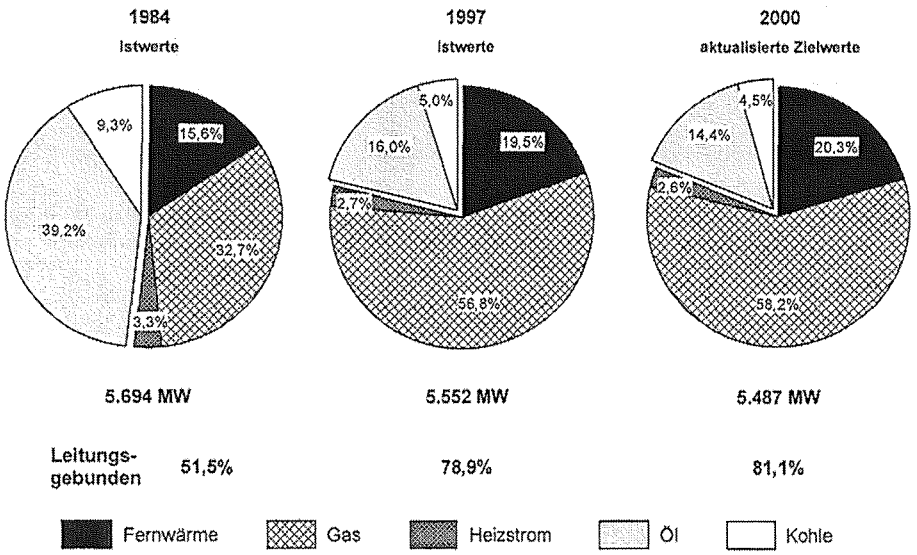


Bild 1: Anteile der Energieträger an der Deckung des Raumwärmebedarfs für Haushalte, öffentliche Gebäude und Kleingewerbe in Köln 1984, 1997 und 2000

Mit dem weiteren konsequenten Ausbau der Erdgas- und Fernwärmeversorgung wird nach derzeitigem Planungsstand der Anteil der leitungsgebundenen Energieträger durch weitere Substitutionserfolge von Fernwärme und Gas auf 81,1 % bis zum Jahre 2000 ansteigen. Das bedeutet, daß in Köln im Jahre 2000 dann vier Fünftel der Bausubstanz des HuK-Sektors mit leitungsgebundenen Energieträgern beheizt werden.

Eine besondere Bedeutung kommt der leitungsgebundenen Energieversorgung in der Kölner Innentadt (Stadtbezirk 1) zu. Auf die Kölner Innenstadt konzentriert sich ca. ein Fünftel des Raumwärmeedarfs der Haushalte und Kleinverbraucher von Köln.

Im Jahre 1984 betrug hier der Anteil der leitungsgebundenen Energieträger am Raumwärmemarkt bereits 60,3 %. In den vergangenen Jahren konnte dieser Anteil auf 82,8 % im Jahr 1997 gesteigert werden.

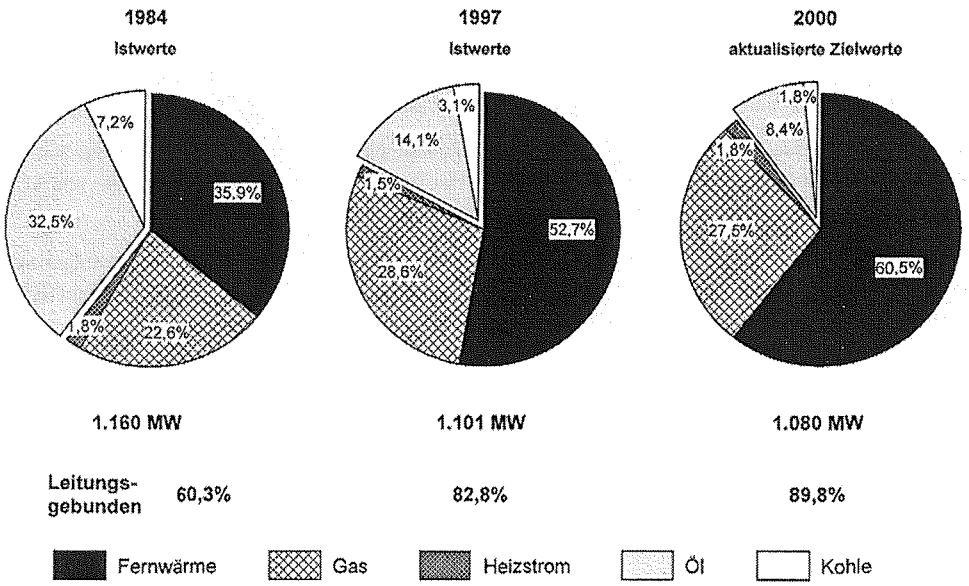


Bild 2: Anteile der Energieträger an der Deckung des Raumwärmebedarfs in der Kölner Innenstadt (Stadtbezirk 1) 1984, 1997 und 2000 für Haushalte, öffentliche Gebäude und Kleingewerbe

Mit Abstand dominierender Energieträger zur Wärmeversorgung im Stadtbezirk 1 ist die Fernwärme mit einem im Jahr 1997 erreichten Anteil von 52,7 % (siehe Bild 2). Bis zum Jahre 2000 werden nach dem heutigen Planungsstand die leitungsgebundenen Energieträger in der Innenstadt einen Anteil von 89,8 % an der Raumwärmebedarfsdeckung erreichen. Der Zielwert für die Fernwärme beträgt 60,5 %.

Wird nun der gesamte Endenergieverbrauch für Wärmezwecke inklusive der Industrie betrachtet, so wird hier ein Rückgang um 20,0 % gegenüber 1984 beobachtet. Auch hier konnte der Anteil der leitungsgebundenen Energieträger am Endenergieverbrauch über das prognostizierte Maß (58,8 %) hinaus auf 61,3 % gesteigert werden. Ausschlaggebend ist dabei der starke Zuwachs des Erdgases (siehe Bild 3).

Insgesamt ist somit festzustellen, daß die aus der Sicht von 1985/86 prognostizierte positive Entwicklung hinsichtlich der Reduzierung des Energieverbrauchs sowie des Anstiegs des Anteils der leitungsgebundenen Energieträger an der Wärmebedarfsdeckung in Köln nicht nur erreicht, sondern bei weitem übertroffen werden konnte.

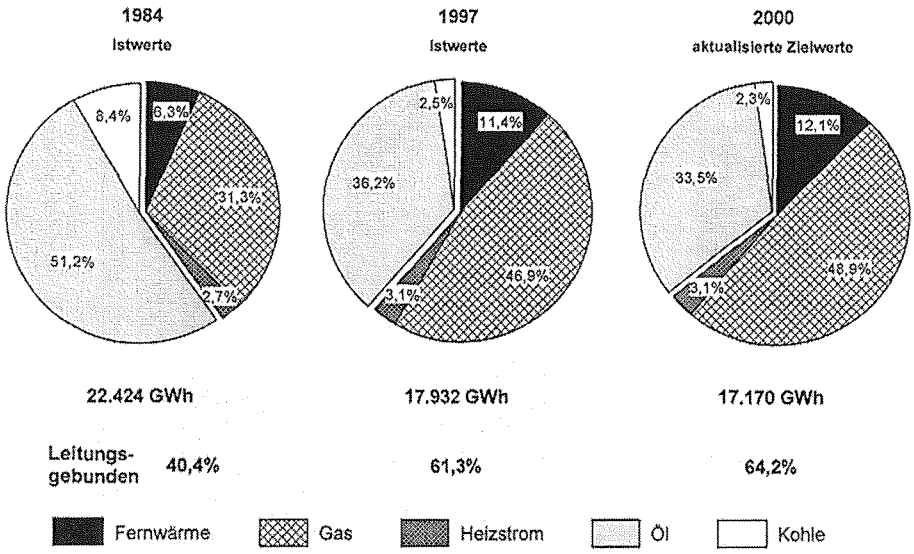


Bild 3: Anteile der Energieträger am Endenergieverbrauch für Wärmezwecke in Köln 1984, 1997 und 2000 (temperaturbereinigt)

4. Entwicklung der CO_2- und Schadstoffemissionen

4.1 CO_2-Emissionen

Ziel der Maßnahmen zur Energieeinsparung und umweltschonenden Energieversorgung ist letztlich die Reduzierung aller Schadstoffemissionen sowie der CO_2-Emissionen. Die unter dem Aspekt des Klimaschutzes relevanten CO_2-Emissionen entstehen bei der Verbrennung fossiler Energieträger und tragen zu über 50 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Zu den möglichen Folgen des anthropogenen Treibhauseffektes zählen die Erhöhung der mittleren Welttemperatur, die Verschiebung von Klimazonen und extreme Wetterereignisse. Da CO_2 das Hauptprodukt der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe ist, gibt es für dieses Gas keine Rückhalte- oder Vermeidungstechnik. Technisch sind CO_2-Emissionen nur durch Substitution kohlenstoffreicher durch kohlenstoffarme bzw. kohlenstofffreie Energieträger oder durch Energieeinsparung zu reduzieren.

Die Klimaproblematik und insbesondere die Notwendigkeit zur Verminderung der CO_2-Emissionen waren bei der ursprünglichen Erarbeitung des Rahmenkonzeptes 1985/86 noch nicht in der sich heute abzeichnenden Bedeutung relevant. Die mit der Umsetzung des Rahmenkonzeptes verbundenen CO_2-Effekte wurden in einer 1989 durchgeführten Untersuchung erstmals ermittelt und für die Folgejahre aktualisiert. Dabei hat sich gezeigt, daß die mit dem Rahmenkonzept verfolgten Ziele auch zentrale Ansatzpunkte für die CO_2-Reduzierung bilden.

Insgesamt konnten in Köln für den Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher die mit der Wärmeversorgung verbundenen CO_2-Emissionen um 17,4 % gegenüber 1984 verringert werden. Dieser Wert liegt deutlich über dem der Endenergieeinsparung in Höhe von 8,0 %. Diese Entwicklung resultiert aus den Substitutionserfolgen hin zu den CO_2-schwachen Energieträgern Erdgas und Fernwärme und die Erzeugung der Fernwärme in Kraft-Wärme-Kopplung.

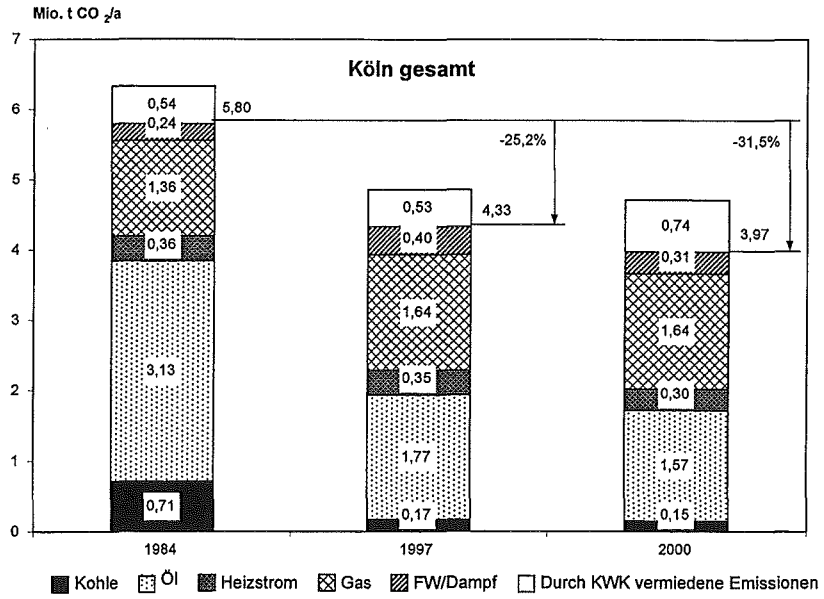


Bild 4: CO2-Emissionen in Köln 1984, 1997 und 2000 (Prognose) durch Wärmeerzeugung insgesamt (Haushalte, Kleinverbraucher und Industrie)

Im Bereich der Industrie sind die mit der Wärmebereitstellung verbundenen CO_2-Emissionen im Betrachtungszeitraum von 1984 bis 1997 um 30,7 % zurückgegangen. Ein Teil dieses Rückgangs entfällt dabei auf die Stillegung eines chemischen Grundstoffunternehmens in 1993. Ohne diesen Sondereffekt hätte sich der Rückgang in der prozentualen Größenordnung bewegt, wie er im HuK-Sektor erzielt werden konnte.

Faßt man den gesamten Energieeinsatz für die Wärmebereitstellung in Köln (Haushalte, Kleinverbraucher, Industrie) zusammen, so sind die hiermit verbundenen CO_2-Emissionen in den letzten 13 Jahren von 5,80 Mio. t auf 4,33 Mio. t reduziert worden (siehe Bild 4). Dies entspricht einer Minderung von 1,47 Mio. t, entsprechend 25,2 %.

Erweitert man nun den Blickwinkel von der reinen Wärmeversorgung hin zu einer Summenbetrachtung inklusive den Verbrauchssektoren Verkehr und Strom, so zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hier steht der hohen Reduzierung im Wärmemarkt (-25,2 %) eine mit 3,5 % wesentlich geringere im Stromsektor gegenüber. Beim Verkehr ist sogar eine entgegengesetzte Entwicklung sichtbar, hier stiegen die CO_2-Emissionen zwischen 1984 und 1997 um 7,6 %. Somit wird eine gesamte Minderung von 11,9 % erreicht, die im wesentlichen durch die Wärmeversorgung erzielt wird (siehe Bild 5).

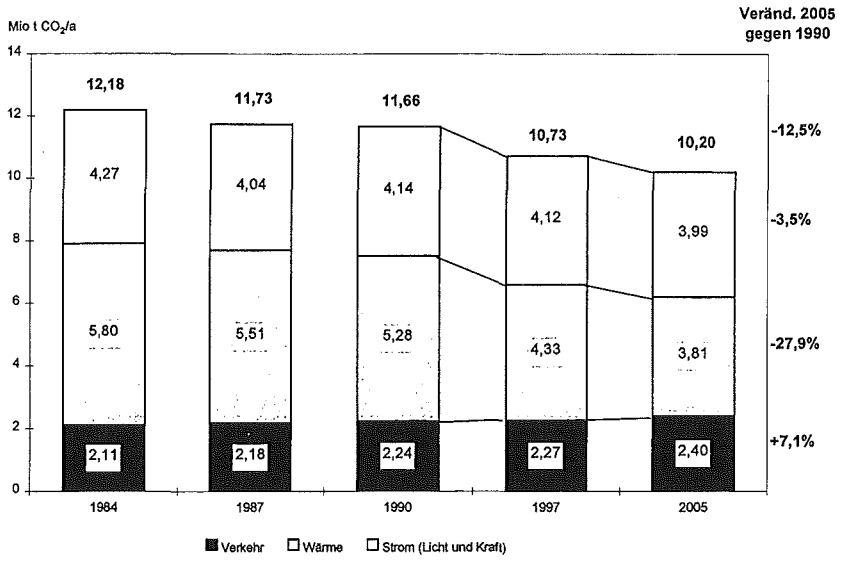


Bild 5: Entwicklung der energiebedingten CO2-Emissionen in Köln (temperaturbereinigt)

4.2 SO_2- und NO_x-Emissionen

Den Emissionen von Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxid (NO_x) wird eine große Wirkung am Zustandekommen des Phänomens „Waldsterben" beigemessen. Zudem zeigen Stickoxide in hohen Konzentrationen Wirkung als Reizgase auf Menschen und sonstige lebende Organismen sowie auch auf Materialien (Bauten etc.). Eine besondere Bedeutung kommt den NO_x-Emissionen auch bei der Bildung von Ozon-Immissionsbelastungen zu. In Bild 6 ist die Entwicklung der mit der Wärmeerzeugung insgesamt verbundenen SO_2- und NO_x-Emissionen für die Jahre 1984 und 1997 sowie die Prognose für das Jahr 2000 dargestellt.

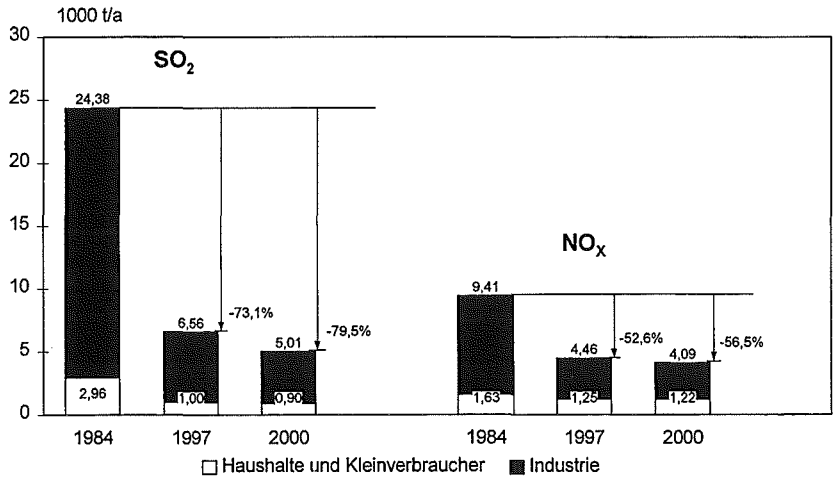


Bild 6: SO2- und NOx-Emissionen durch die Wärmeerzeugung insgesamt in Köln 1984, 1997 und 2000 (Prognose)

Aufgrund der gegenüber der Prognose gemäß Rahmenkonzept stärkeren Energieeinsparung und des höheren Anteils der schadstoffarmen leitungsgebundenen Energieträger Erdgas und Fernwärme sowie verschärfter gesetzlicher Auflagen konnte im Vergleich der Eckjahre 1984 und 1997 in den vergangenen 13 Jahren eine SO_2-Reduzierung von 73 % und eine NO_x-Reduzierung von 53 % erreicht werden. Im Jahr 2000 wird neben weiteren Einsparungen bei den Verbrauchern insbesondere der fortschreitende Ausbau der Erdgas- und Fernwärme-/Industriedampfversorgung dazu führen, daß die SO_2-Emissionen um rd. 80 % und die NO_x-Emissionen um rd. 57 % gegenüber 1984 reduziert sein werden.

Hervorzuheben ist, daß die durch die Haushalte und Kleinverbraucher verursachten SO_2- und NO_x-Emissionen nur einen geringen Anteil an den entsprechenden Gesamtemissionen ausmachen; der Anteil bewegt sich bei SO_2 in der Größenordnung von rd. 10 % und bei NO_x von rd. 25 %.

5. Zukünftige Maßnahmen der GEW im Wettbewerbsmarkt

Als großes kommunales Energieversorgungsunternehmen fühlt sich GEW nicht nur dem Verkauf von Energie und Wasser verpflichtet, sondern besonders dem Dienstleistungsgedanken für alle Bürger, Gewerbe- und Industriebetriebe in Köln. Dazu zählt neben einem Produktangebot zu Marktpreisen auch eine möglichst umweltschonende Energieerzeugung und –verteilung. Daher wird auch die Zukunft in Köln weiter durch die konsequente Umsetzung des Rahmenkonzeptes „Energie für Köln" geprägt sein. In diesem Rahmen hat GEW schon vor Jahren damit begonnen, durch zusätzliche Maßnahmen und Angebote an Kunden als Dienstleister wirtschaftlich positive Projekte durchzuführen.

Aus der Vielzahl aller Energiedienstleistungen seien die folgenden hier genannt:

- Das "Wärmepaket" der GEW bietet für Kölner Bürger in Zusammenarbeit mit über 300 örtlichen Installationsfirmen neben einer qualifizierten Beratung die komplette Betreuung und Überwachung der Umstellungs- und Erneuerungsarbeiten auf Gas oder Fernwärme bis hin zur Abnahme der fertigen Anlage sowie einer Finanzierungshilfe.
- Mit dem Nahwärme-Angebot für Büro-, Gewerbe- und größere Wohngebäude bietet GEW im Kölner Stadtgebiet eine Energiedienstleistung an, die von der Planung einer wirtschaftlichen Wärmeerzeugung über die Investitionen für Wärmeerzeugungsanlage, Nebenaggregate, Wärmeverteilung und Wärmezähler bis hin zu Betrieb, Wartung, Instandhaltung, Wärme- und Warmwasserzählung, Heizkostenabrechnung mit den Mietern und Inkasso sämtliche Leistungen umfaßt. Neben dem Angebot eines Nahwärme-Service liefert GEW auf Wunsch auch Nahkälte. Darunter wird die verbrauchernahe Erzeugung von Kälte verstanden, die dem Kunden gegenüber mit einem Kältepreis abgerechnet wird.
- Aufbauend auf einem 1995 abgeschlossenen Wärmelieferungsvertrag zwischen GEW und der Ford-Werke AG hat GEW die Wärmeversorgung für Ford übernommen. Seit Dezember 1996 deckt GEW mit 370 Mio. kWh rund 90 % des jährlichen Wärmebedarfs des Automobilherstellers. Durch die Umstellung auf die umweltfreundliche Energiegewinnung aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen verringert sich der mit der Wärmeerzeugung für Ford verbundene Ausstoß von CO_2 von bisher 160.000 Tonnen um rd. 60 % auf 70.000 Tonnen pro Jahr.
- Im Rahmen des sogenannten Heizölsubstitutionsprogramms werden von GEW, RGW und GVG veraltete Heizungsanlagen der Stadt Köln auf Erdgas oder Fernwärme umgestellt. Die Heizungsumstellung wird durch die Energieversorgungsunternehmen finanziert, wobei die Kosteneinsparung durch den geringeren Energieverbrauch der neuen, effizienten Anlagen für die Refinanzierung genutzt wird.

- Dieses Prinzip des Einsparcontractings verfolgt GEW ebenfalls in einem erweiterten Angebot an die Stadt Köln, im städtischen Gebäudebestand durch energietechnische Sanierungen zusätzliche Einsparpotentiale zu erschließen. Damit ist ein weiterer Beitrag zur CO_2-Reduktion verbunden. Analog zum Heizölsubstitutionsprogramm soll die Refinanzierung der erforderlichen Investitionen aus den erreichten Energieeinsparungen erfolgen.
- Im Rahmen des „Least-Cost-Planning" (LCP) fördert GEW u.a. die Umstellung direktstrombetriebener Heizungen auf Erdgas oder Fernwärme. Seit 1993 wurden etwa 2.230 Wohnungsumstellungen mit rund 2,2 Mio. DM finanziell unterstützt. Allein im Jahr 1997 betrug die Fördersumme 906.000,- DM.
- GEW testet den Einsatz alternativer Antriebstechniken. Zur Zeit hat GEW sechs emissionsarme Erdgasfahrzeuge im Einsatz. Bis zum Jahresende ist die Umrüstung von acht weiteren Fahrzeugen geplant. Die Betankung der Fahrzeuge erfolgt an zwei Langzeitbetankungsanlagen („Fuel-Maker") auf dem Betriebsgelände am Parkgürtel. Zusammen mit der Deutschen Shell AG hat GEW an der Escher Straße eine öffentlich zugängliche Schnellbetankungsanlage für Erdgasfahrzeuge errichtet. Diese wurde am 28. Mai 1998 eröffnet. Zugleich wird von GEW ein Förderprogramm zur Umrüstung oder Neubeschaffung von Erdgasfahrzeugen angeboten.
- GEW engagiert sich ebenfalls auf dem Gebiet neuer Energietechniken. Als eine der aussichtsreichsten Techniken zur zukünftigen emissionsarmen Erzeugung von Strom und Wärme bietet sich die Brennstoffzellentechnologie an. Zur Realisierung einer Brennstoffzellenanlage im städtischen Klärwerk Rodenkirchen werden zur Zeit Verhandlungen mit der Stadt Köln geführt. Die Umrüstung einer Brennstoffzellenanlage auf Klärgasbetrieb und ihre Einbindung in ein Klärwerk ist europaweit einzigartig.

Abgerundet werden diese Projekte durch weitere Initiativen, die den hohen Stellenwert des Umweltschutzes für das Unternehmen zum Ausdruck bringen. Bereits im Jahr 1994 wurden bei GEW ein Umweltmanagementsystem und Umweltschutzleitlinien eingeführt. Wie im vorherigen Vortrag berichtet, wurden seit 1995 sowohl für verschiedene Heizkraftwerks-Standorte als auch für die GEW-Wasserwerke und das GEW-Wasserlabor Umweltaudits erfolgreich abgeschlossen. Darüber hinaus hat GEW im Juni 1996 erstmals einen spartenübergreifenden Rechenschaftsbericht über die Umweltschutzaktivitäten des Unternehmens vorgelegt. Der im Juni 1998 zum dritten Mal erschienene Umweltbericht stellt sowohl die Umweltbelastungen als auch die getroffenen Umweltschutzmaßnahmen des Unternehmens dar.

6. Ausblick

GEW hat in der Vergangenheit auf freiwilliger Basis eine Reihe von Projekten realisiert, die in erheblichem Maße zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung beigetragen haben. Dadurch wird deutlich, daß GEW neben der Energieversorgung die Aspekte des Umweltschutzes ernst nimmt.

In Zukunft wird es durch den direkten Wettbewerb in der Energieversorgung zu einem gravierenden Wandel in der Arbeit der Energieversorgungsunternehmen kommen. Nur flexible und leistungsfähige EVU werden diesen Anforderungen gewachsen sein.

Ein wesentliches Merkmal der Leistungsfähigkeit ist die Bedienung der Kundenwünsche zu Wettbewerbspreisen. Daß darunter nicht der Umweltschutz zu leiden hat, wird zum Beispiel in der Beziehung zwischen GEW und der Ford AG deutlich. In einem bundesweit einzigartigen Vertrag sind dabei im

Jahr 1996 die Lieferung von Dampf zu konkurrenzfähigen Preisen vereinbart worden. Als Nebeneffekt konnte Ford alte Heizwerke stillegen, so daß es mit der GEW Lieferung zu einer CO_2-Einsparung von 90.000 t CO_2 jährlich kommt.

Intern hat GEW seit Anfang der neunziger Jahre ein Umstrukturierungsprogramm eingeleitet, welches alle Bereiche im Rahmen einer strikten Prozeßorientierung auf den Prüfstand stellt und entsprechend umorganisiert. Zusätzlich sind umfangreiche Kostensenkungs- und Personalanpassungsprogramme durchgeführt worden. Das alles umfassende Programm „GEW 2000" soll Ende des Jahrzehnts abgeschlossen sein.

Für die Zukunft wird GEW ein wettbewerblich ausgerichtetes innovatives Unternehmen sein, welches seine Produkte zu konkurrenzfähigen Preisen anbietet, flexibel auf Kundenwünsche eingeht und auf neuen Geschäftsfeldern einen Ausgleich für den stagnierenden Energie- und Wasserabsatz erzielt.

Energie und Umwelt

Energie und Umwelt

Hermann-Josef Wagner

Ökologisch verträgliche Energiewirtschaft

Universität-GH Essen

1 Umweltauswirkungen durch die Nutzung verschiedener Energieträger

1.1 Einteilung der Umweltauswirkungen

Emissionen sind chemische Substanzen, Geräusche, Wärme, Strahlung oder Erschütterungen, die von einer Quelle, beispielsweise einem Schornstein einer Fabrik, einem Kamin eines Privathaushaltes oder einem Auspuff eines Kfz in die Luft ausströmen.

Emissionen und ihre Wirkungen lassen sich zum einen nach den Kompartimenten (Luft, Wasser, Boden), in denen durch sie schädigende Auswirkungen stattfinden können, und zum anderen nach den Geschädigten (Menschen, Tiere, Pflanzen) charakterisieren.

Ferner können die Umweltauswirkungen durch Emissionen in direkte (z. B. wirken CO und Staub direkt auf den Organismus) und indirekte (CO_2 → Klimaproblem; FCKW → Ozonschicht; SO_2 → Waldsterben) unterschieden werden.

Die mengenmäßig wichtigste Umweltauswirkung durch die Energienutzung ist die Emission von Luftschadstoffen. In die Kompartimente Boden und Wasser werden dagegen nur geringfügig direkt Schadstoffe eingebracht. Jedoch kann es lokal durch defekte Pipeline-Netze oder Tankerunfälle zu gravierenden Schäden für Wasser und Boden kommen. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich im wesentlichen auf Schadstoffeinträge in die Luft.

1.2 Bereitstellung der Energieträger von der Gewinnungsstelle bis zur ersten Verwendungsstelle

Neben den Umweltauswirkungen, die bei der direkten Energienutzung beim Verbraucher entstehen können, sind auch bei der Förderung und bei dem Transport von Energieträgern Einflüsse auf die Umwelt zu verzeichnen. Sie müssen bei einer vollständigen Betrachtung mit berücksichtigt werden. Die nachfolgende Tab.1-1 gibt hierzu einen kurzgefaßten Überblick. In ihr ist stichpunktartig ebenfalls die Gewinnungskette dargestellt.

Bei den erneuerbaren Energien nehmen in Deutschland die Wasserkraft und die Windenergie eine vorstehende Position ein. Von beiden Energiesystemen gehen keine vergleichbaren Umweltschädigungen aus. Als geringfügige Randerscheinungen können eventl. das veränderte Landschaftsbild durch Windräder (subjektive Beurteilung) und die Beeinflussung von Fauna und Flora im Anstauungsbereich von Wasserkraftanlagen genannt werden.

Energie-träger	technische Kette	direkte und evtl. direkte Umwelt-Auswirkungen	indirekte Umwelt-Auswirkungen
Steinkohle	• Untertagebau bis in Tiefen von 900 m • Methanemission bei der Bewetterung (Belüftung der Stollen) • Bergehalden erforderlich • großer Wasserbedarf für Reinigung bzw. Absetzung von Schwefel erforderl. • z. T. große Transportwege	• Methanemissionen (im Bergbau) • partielle Absenkung der Erdoberfläche (Bergschäden) • Flächenverbrauch und Staubbelastung durch Abraumhalden • Abwasser aus der Kohle-Aufbereitung , für Flotation ca. 4,5 m^3/t Steinkohle	• Energieaufwendungen zum Betrieb des Bergwerkes
Braunkohle	• Tagebau bis 500 m Tiefe • Grundwasserabsenkung • kurze Transportwege (hauptsächlich Bänder und zum geringen Teil Eisenbahn)	• Grundwasserabsenkung • Größerer Flächenbedarf	• Umsiedlungsmaßnahmen • Energieverbrauch für Grundwasserabsenkung
Erdgas	• lange Transportwege (z. B. • Rußland - 4000 km) • Abscheidung von Schwermetallen nach Förderung • Off- und On-Shore-Gewinnung • für Verdichter (ca. alle 50 km) hoher Energiebedarf • Transport per Pipeline	• Methanemissionen durch Undichtigkeiten	• Energieverbrauch für Transport über Pipeline und Verdichter
Erdöl	• Off-Shore-Gewinnung • Transport per Pipeline oder mittels Tanker • Abfackelung von Gasen bei der Gewinnung • lange Transportwege	• Methanfreisetzung (bei der • Gewinnung) • Tankerunfälle	• Energieverbrauch für Raffinerie
Kern-energie	• geringe Konzentrationen erfordern große Tagebaue • lange Transportwege (Kanada, Australien, Rußland) • Anreicherung erforderlich • Mitverarbeitung von Plutonium bei der Brennstoffherstellung	• Landverbrauch bei Gewinnung von Uran und Thorium • Radioaktive Emissionen durch Abraumhalden (Radon) • Risiko von Spaltproduktfreisetzung bei Unfällen	• Energiebedarf bei Anreicherung
Erneuerbare Energie	• Wind direkt zu Strom • Sonne direkt zu Strom oder Wärme • Holz hauptsächlich zu Wärmeerzeugung durch Verbrennung • Biomasse → Verarbeitung zu Kraftstoffen	• Monokulturen bei großtechnischem Anbau von Biomasse. Ferner Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden erforderlich	• größerer Flächenverbrauch und Materialbedarf gegenüber konventionellen Kraftwerken

Tab.1-1: Umweltauswirkungen der Ketten von der Gewinnung der Energieträger bis zur ersten Umwandlungsstufe

1.3 Entstehung von Luftschadstoffen bei der Energiewandlung

1.3.1 Grundsätzliches zur Energiewandlung

Als Luftschadstoffe von Energiewandlungsanlagen kommen im wesentlichen

- Kohlenmonoxid CO
- Stickoxide[1]
- Schwefeldioxid SO_2
- Stäube
- Kohlenwasserstoffe C_xH_y
- radioaktive Stoffe

in Betracht. Ferner ist aufgrund der Klimaproblematik die Emission von Treibhausgasen wie z. B. CO_2 (wissenschaftlich nicht als Schadstoff definiert) für die Bewertung von Energiesystemen von großer Bedeutung. Bei der Verbrennung (von z. B. Kohle, Öl, Gas, Holz, etc.) laufen für die Energiegewinnung hauptsächlich folgende Reaktionen ab:

Kohlenstoff	+ Sauerstoff	⟶	Kohlendioxid	+ Wärme
C	+ O_2	⟶	CO_2	+ ΔH
Wasserstoff	+ SauerstoffF	⟶	Wasser	+ Wärme
H_2	+ ½ O_2	⟶	H_2O	+ ΔH

Daneben kommt es je nach Brennstoffzusammensetzung und Verbrennungsumständen zu ungewünschten Begleitreaktionen (Luftschadstoffbildung).

Die SO_2-Bildung, die aufgrund des Schwefelgehaltes im Brennstoff (z. B. Kohle) erfolgt, verdeutlicht dies:

Schwefel	+ Sauerstoff	⟶	Schwefeldioxid	+ Wärme
S	+ O_2	⟶	SO_2	+ ΔH

Der für die Verbrennung erforderliche Sauerstoff wird gewöhnlich durch Umgebungsluft zugeführt (siehe auch Tab.1-2).

[1] Mit Stickoxiden bzw. NO_x werden allgemein Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2 bezeichnet.

Zusammensetzung der trockenen Luft in Volumenanteilen				
Hauptbestandteile	Stickstoff	N_2	78,08	%
	Sauerstoff	O_2	20,95	%
	Argon	Ar	0,93	%
			99,96	**%**
Spurengase	Kohlendioxid	CO_2	350	ppm
	Neon	Ne	18	ppm
	Helium	He	5	ppm
	Methan	CH_4	1,7	ppm
	Krypton	Kr	1,0	ppm
	Wasserstoff	H_2	0,5	ppm
	Ozon	O_3	0,03	ppm in der Troposphäre
			5-10	ppm in der Stratosphäre
	Distickstoffoxid	N_2O	0,3	ppm
	Fluorchlorkohlenwasserstoffe	F 11	0,25	ppb
		F 12	0,45	ppb
ppm: 1 Teil in 1 Million d.h.. 1ppm = 0,0001%				
ppb: 1 Teil in 1 Milliarde				
Feuchte Luft kann bis zu 4 % Wasserdampf enthalten.				

Tab.1-2: Zusammensetzung trockener Luft (nach /1/, S.36)

feste Brennstoffe		Rohzusammensetzung in Gew.-%							Heizwert H_u
		C	H	O	N	S	Asche	Wasser	[MJ/kg]
Steinkohle	Ruhr und Aachen	73 - 83	3,4 - 5,3	1,8 - 6,5	1,1	0,9	4 - 7	3 - 5	30,1 - 33,0
Steinkohle	Saar	70 - 78	4,7 - 5,2	5,4 - 12,5	1,2	0,6	3 - 8	3 - 5	28,0 - 31,4
Steinkohle	Australia / USA	73,0	3,0	8,0	1,4	0,5	7,0	7,0	27,5
Steinkohle	GUS	70,4	2,0	7,0	1,3	1,0	1,0	8,0	25,6
Steinkohlebriketts	(gemittelt)	80,0	3,4	2,0	0,5	1,0	8,5	4,0	31,4
Steinkohlekoks	(gemittelt)	70,1	4,3	6,0	1,3	1,0	10,0	7,0	27,8
Braunkohle	Rheinland	25 - 32	2	9 - 12	0,3	0,2	3	50 - 60	7,5 - 10,5
Braunkohle	Sachsen / Thüringen	29,3	2,5	9,2	0,3	1,0	5,7	52	10,5
Braunkohle	Böhmen	52	4,2	12	1,0	1,0	6	24	20,1
Torf (lufttrocken)		40	5	25	2,0	1,0	7	20	15,5
Holz (lufttrocken)		44	5	35	0,5	0	0,5	15	15,5

flüssige Brennstoffe	Rohzusammensetzung in Gew.-%			Siedepunkt	Dichte	Heizwert H_u
	C	H	S	[°C]	[kg/l]	[MJ/kg]
Alkohol (rein)	52	13	-	78	0,79	27,0
Super bleifrei	88,4	11,3	-	60 - 180	0,751	41,0
Benzin bleifrei	87,5	12,1	-	60 - 180	0,735	41,5
Heizöl EL / Diesel	86,0	13,2	0,05	200 - 350	0,832	43,0
Heizöl S	85	11	1,00	>300	0,96	41,0

gasförmige Brennstoffe	Volumetrische Zusammensetzung Vol.-%						Dichte	Heizwert H_u
	H_2	CO	CH_4	C_xH_y	CO_2	N_2	[kg/m³]	[MJ/m³]
Methan	-	-	100	-	-	-	0,71	33,8
Propan	20	5	40	30	1	4	2,02	92,9
Butan	-	-	-	100	-	-	2,61	123,6
Erdgas (trocken)	-	-	90	2	1	7	0,78	33,5
Ferngas (Koksofengas)	55	6	25	2	2	10	0,50	17,4
Stadtgas	51	18	19	2	4	6	0,59	16,1
Steinkohlen-Generatorgas	12	29	2	-	3	54	1,12	5,6

Tab.1-3: Elementarzusammensetzung von Brennstoffen

Die Tab.1-3 gibt eine Übersicht über die Elementarzusammensetzung typischer Brennstoffe. Man kann anhand des Schwefels bei den Kohlen oder Rohölen gut erkennen, daß die Konzentrationen der Inhaltstoffe je nach Herkunft erheblich schwanken können. Ferner ist bemerkenswert, daß die Braunkohle zu bis zu 50 % und mehr aus Wasser bestehen kann.

Der Wasseranteil in Brennstoffen wirkt sich energetisch betrachtet in zweifacher Weise negativ auf die Gesamtenergiebilanz aus. Zum einen entzieht er dadurch, daß er bei der Verbrennung verdampft und das System über den Rauchgasweg verläßt, den übrigen Brennstoffanteilen Energie (Verdampfungsenthalpie); zum anderen kostet der Transport von nicht brennbarem Material Transportenergie. Aus diesem Grund wird z. B. in den alten Bundesländern die Braunkohle vornehmlich nur an der Gewinnungsstelle genutzt (mehrere Kraftwerke direkt um den Braunkohletagebau). In Tab.1-4 sind die Luftschadstoffe verschiedener Energieträger dargestellt.

Energieträger	Direkte Schadstoffe						
	Schwefeldioxid (SO_2)	Stäube	Stick-oxide[1] (NO_x)	Kohlenmonoxid (CO)	Kohlenwasserstoffe[1] (C_xH_y)	Radioaktive Stoffe	Treibhausgase[2]
Erdgas							
Erdöl							
Kohle							
Uran							
Biomasse							

1) Aus Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen entsteht unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung außerdem Ozon (O_3)

2) Bei Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas, sowie den daraus hergestellten Produkten, entsteht Kohlendioxid (CO_2) sowie Ozon (O_3). Bei der Kohle- und Erdgasförderung und Erdgasverteilung entweicht außerdem Methan (CH_4). Bei der Verbrennung von Biomasse entsteht Kohlendioxid nur dann, wenn nicht wieder Pflanzen im gleichen Umfang angebaut werden. Bei Biomassen-Plantagen entsteht Distickstoffoxid (Lachgas, N_2O) durch die Stickstoffdüngung.

Tab.1-4: Luftverunreinigungen bei der Energienutzung (nach /2/)

1.3.2 Luftschadstoffe im einzelnen

Im folgenden wird die Entstehung der einzelnen Luftschadstoffe detaillierter beschrieben.

Schwefeldioxid (SO_2):

Schwefeldioxid entsteht aus der Verbrennung schwefelhaltiger Stoffe (s.o.). Bei Gegenwart von Luftfeuchtigkeit und Sonnenlicht wird SO_2 zu schwefeliger Säure H_2SO_3 und Schwefelsäure H_2SO_4 oxidiert. Schwefeldioxid-Emissionen sind Hauptverursacher des „sauren Regens", der für Wald- und Materialschäden verantwortlich ist.

Beim Menschen greifen Schwefelverbindungen in Form von SO_2 oder Aerosoltröpfchen der Säuren ab bestimmten Konzentrationen die Atmungsorgane an. Ferner kommt es zur Reizung der Schleim-

häute und der Augen sowie zu einer Beeinträchtigung von Herz und Kreislauf. Schwefeldioxid ist maßgebend am „Wintersmog" beteiligt.

Nach Abschluß der bereits angesprochenen Modernisierungsmaßnahmen in den alten Bundesländern, läßt sich für Ende der 90er Jahre eine SO_2-Emission um ca. 1,5 Mio.t/Jahr abschätzen. Die Hauptemissionsquellen heute sind hierbei Kraft- und Fernheizwerke sowie die Industriefeuerungen.

SO_2-Emissionen lassen sich durch folgende Maßnahmen vermeiden bzw. beseitigen:

- Einsatz schwefelarmer oder -freier Brennstoffe
- Entfernen von Schwefel aus den Brennstoffen vor der Verbrennung
- Wirbelschichtfeuerung mit Kalksteinzugabe
- Rauchgasentschwefelungsanlagen

Stickoxide (NO_x):

Stickoxide (NO und NO_2) gehören zu den unerwünschten Nebenprodukten der Verbrennung. Bei der Verbrennung entsteht durch die Mechanismen

- thermische NO_x-Bildung
- prompte NO_x-Bildung
- Brennstoff NO_x-Bildung

zunächst hauptsächlich NO, welches dann in der Atmosphäre größtenteils zu NO_2 oxidiert. Es stellt sich ein photochemisches Gleichgewicht zwischen NO und NO_2 ein.

Die **thermische NO_x-Bildung** ist die Hauptsache von NO_x-Emissionen. Sie läuft bei Temperaturen oberhalb 1200° C ab. Bei Sauerstoffüberschuß dissoziiert molekularer Sauerstoff zu atomarem Sauerstoff und verbindet sich mit Stickstoff zu NO.

$$O_2 \longrightarrow O + O$$

$$O + N_2 \longrightarrow NO + N \qquad (1)$$

$$N + O_2 \longrightarrow NO + O \qquad (2)$$

Bei Brennstoffüberschuß kommt es zur Bildung von OH-Radikalen, die Stickstoff unter Abgabe des Wasserstoffs oxidieren.

$$N + OH \longrightarrow NO + H \qquad (3)$$

Bei der **prompten NO_x-Bildung** wird unter Beteiligung von Kohlenwasserstoffradikalen molekularer Stickstoff über Zwischenprodukte in NO umgewandelt. Dieser Prozeß findet direkt in der Flamme statt. Er ist mengenmäßig von untergeordneter Bedeutung.

Brennstoff-NO_x entsteht durch die teilweise Oxidation des im Brennstoff gebundenen Stickstoffs. Die Bildung des Brennstoff-NO ist nur wenig temperaturabhängig und läuft bereits bei niedrigen Temperaturen ab.

Als Hauptemittent des NO_x ist z. Zt. mit Abstand der Straßenverkehr zu nennen und dies in zunehmendem Maße, da insbesondere der LKW-Verkehr stetig steigt und aufgrund von Wirkungsgradver-

besserungen die Verbrennungstemperaturen bis zu 2300° C betragen können. (Im Verkehrsbereich ist der Einsatz von Diesel-Kat's zur NO_x-Reduzierung wegen der hohen Verbrennungsluftverhältnisse und der Rußproblematik derzeit großtechnisch nicht realisierbar.) Ähnlich hohe Temperaturen werden auch bei Kohlekraftwerken mit Schmelzkammerfeuerungen gefahren (≈ 1800° C).

Analog dem Schwefeldioxid bilden NO_x-Emissionen bei Vorhandensein von Luftfeuchtigkeit ebenfalls Säuren (salpetrige und Salpetersäure), die in Form von Aerosolen Mensch und Umwelt belasten. Beim Menschen greifen das NO_x oder die Aerosole der Säuren Schleimhäute und Atmungsorgane an. In der Umwelt tragen die NO_x-Emissionen großen Anteil am „sauren Regen" und sind ferner als Ozon-Vorläufersubstanz hauptverantwortlich für den „Sommersmog". Reduktionsmöglichkeiten für NO_x sind Maßnahmen, die die Verbrennungstemperatur senken, wie z. B. Stufenverbrennung, Abgasrückführung und Wirbelschicht (Dies bedeutet jedoch auch gleichzeitig Exergieverlust), sowie Maßnahmen, die entstandenes NO_x mit Hilfe von Katalysatoren und Ammoniak wieder reduzieren.

Kohlenmonoxid CO:

Kohlenmonoxid entsteht generell bei unvollständiger Verbrennung. In der Troposphäre liegt die Verweilzeit von CO bei zwei bis drei Monaten. Das Mischungsverhältnis ist hier so groß, daß sich für den Menschen zunächst keine direkten Gefahren ergeben. Da das CO jedoch mitverantwortlich für den „Sommersmog" ist, kann bei entsprechenden Witterungsverhältnissen eine indirekte Schädigung entstehen.

Um Kohlenmonoxid-Emissionen zu reduzieren, muß man technische Maßnahmen durchführen, die die vollständige Verbrennung gewährleisten (z. B. geregelte Katalysatoren bei PKW's, hohe Luftzahlen in Feuerungen). Bereits entstandenes CO kann durch Nachverbrennung oder durch Katalysatoren (z. B. bei Feuerungen) zu CO_2 aufoxidiert werden.

Kohlenwasserstoffe (C_xH_y):

Unter dem Begriff Kohlenwasserstoffe versteht man alle organischen Verbindungen, die aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Die technisch wichtigen Primärenergieträger Erdöl und Erdgas sowie alle daraus erzeugten Produkte (Benzin, Heizöl, Gas, etc.) bestehen aus niederen Kohlenwasserstoffen mit kettenförmigen Molekülen. Bei unvollständiger Verbrennung solcher Produkte kommt es in Bereichen von hohen Temperaturgradienten (z. B. an Zylinderwänden) zur Bildung bzw. Umbildung in höherzahlige Kohlenwasserstoffe mit ring- oder gitterartigen Strukturen. Weitere große Mengen von Kohlenwasserstoffen werden ferner beim Brennstoffhandling (z. B. dem Betanken von Fahrzeugen) durch Verdunsten und durch Verbrauch von Lösungsmitteln (z. B. in Lacken) emittiert. Die Gesamtemission an Kohlenwasserstoffen in Deutschland wurde Mitte der 90er Jahre (≈ 3 Mio.t) zu je 40 % durch den Verkehr und den Lösungsmittelverbrauch hervorgerufen. Beim Menschen zeigen vor allem die höherkettigen Kohlenwasserstoffe mit Ringmolekülen (z. B. Benzol, Benz-A-pyren, etc.) krebsauslösende und mutagene Wirkung. Desweiteren werden durch Kohlenwasserstoffe die Schleimhäute angegriffen. Kohlenwasserstoffe sind beim „Sommersmog" mitbeteiligt.

Kohlenwasserstoffe lassen sich durch folgende Maßnahmen reduzieren:

- optimierte Verbrennungsführung
- Absaugen von Dämpfen an den Tankstellen und Rückführen in den Tank
- Reduzierung des Lösungsmittelverbrauchs.

Stäube:

Stäube entstehen durch Abrasion von festen Werkstoffen (Schüttgüter, mechanische Bearbeitung in der Industrie) und durch nicht brennbare Anteile oder nicht verbrannten Brennstoff (Ruß) bei der Verbrennung.

Nach Abschluß der Modernisierungsmaßnahmen im Osten ist in Deutschland Ende der 90er Jahre eine Gesamtstaubemission von ca. 1,5 Mio.t/Jahr zu erwarten, die hauptsächlich durch nichtenergetische Industrieprozesse bedingt ist. Bei den energiebedingten Quellen wird der Verkehr den größten Anteil verursachen. Stäube können an sich aus toxischen Stoffen bestehen oder als Träger derartiger Stoffe fungieren. Wichtig für die toxische Wirkung ist die Korngröße. Stäube werden über die verschiedensten Filtertechniken sowie Naßwaschverfahren reduziert, wobei man allerdings auf die Korngröße der abgeschiedenen Partikel achten muß (siehe auch Tab. 1-5).

		Teilchengröße in µm
Natürliche Teilchen:	Regentropfen	250 - 2500
	Pollen	10 - 50
	Nebel	1 - 40
	Bakterien	1 - 10
	Viren	0,01 - 0,1
Stäube:	Kohlenstaub	2 - 100
	Flugasche	1 - 80
	Quarzstaub	0,5 - 5
	Ruß	0,5 - 1,5
Dämpfe/Rauche:	Schwefelsäurenebel	1 - 10
	Tabakrauch	0,01 - 0,1

Tab.1-5: Partikelgrößen ausgewählter Teilchen

Radioaktivität:

In der Kohle ist nahezu das gesamte Periodensystem der Elemente enthalten. Daraus ergibt sich, daß bei der Verbrennung von Kohle auch radioaktive Stoffe wie beispielsweise Uran, Thorium, Radium, radioaktives Blei sowie ihre Zerfallsprodukte im Staub emittiert werden.

Mit dem Staub werden diese radioaktiven Stoffe eingeatmet und können in die Blutbahn gelangen. Sie werden vor allen Dingen in den Knochen abgelagert und führen dort zu einer Strahlenbelastung. Radioaktive Stoffe werden auch von Kernkraftwerken emittiert; hier sind es vor allem radioaktive Spalt- und Aktivierungsprodukte wie Jod-131, Krypton-85, Strontium-90 oder Tritium, die sich im Körper unterschiedlich verteilen: Jod konzentriert sich vorzugsweise in der Schilddrüse, Strontium in den Knochen, während ein Edelgas wie Krypton, da es keine chemischen Verbindungen eingeht, im Körper auch nicht eingebaut werden kann.

Radioaktive Stoffe können durch ihre Strahlung das Krebsrisiko erhöhen, sie wirken also ähnlich wie gewisse Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle. Die vor einigen Jahren geäußerte Vermutung, sie würden in den vorhandenen Konzentrationen auch Waldschäden bewirken, konnte nicht belegt werden.

Chlor- und Fluorverbindungen:

Chlor- und Fluorverbindungen sind in vielen Brennstoffen enthalten (bei deutscher Steinkohle im Mittel 0,4 Gew.-% Chlor und 0,045 Gew.-% Fluor) und werden bei der Verbrennung teilweise als Chlorwasserstoff (HCl) und Fluorwasserstoff (HF) freigesetzt. Ein Teil dieser Stoffe bindet sich in der Schlacke und dem Staub ein, der andere Teil ist frei im Rauchgas enthalten und wird in der anschließenden REA fast gänzlich im Waschwasser gebunden. Für die Anlagentechnik sind Chlor- und Fluorverbindungen wegen ihrer korrosiven Wirkung problematisch.

2 Ausbreitung von Luftschadstoffen

2.1 Von der Emission zur Immission

Die von einer Schadstoffquelle (z. B. Schornstein) in die Atmosphäre emittierten Stoffe werden in dieser verteilt und verdünnt. Dabei kommt es bei vielen Schadstoffen durch energetische Aktivierung, durch Luftfeuchtigkeit und/oder durch chemische Stoffe in der Atmosphäre zu einer chemischen oder physikalischen Umwandlungen in sog. sekundäre Luftschadstoffe (vgl. Abb. 2-1). Beispielsweise wird

- SO_2 durch Luftfeuchtigkeit zu H_2SO_3 und H_2SO_4
- NO_2 und O_2 bilden unter Einfluß von Sonnenlicht über komplexe Mechanismen Ozon

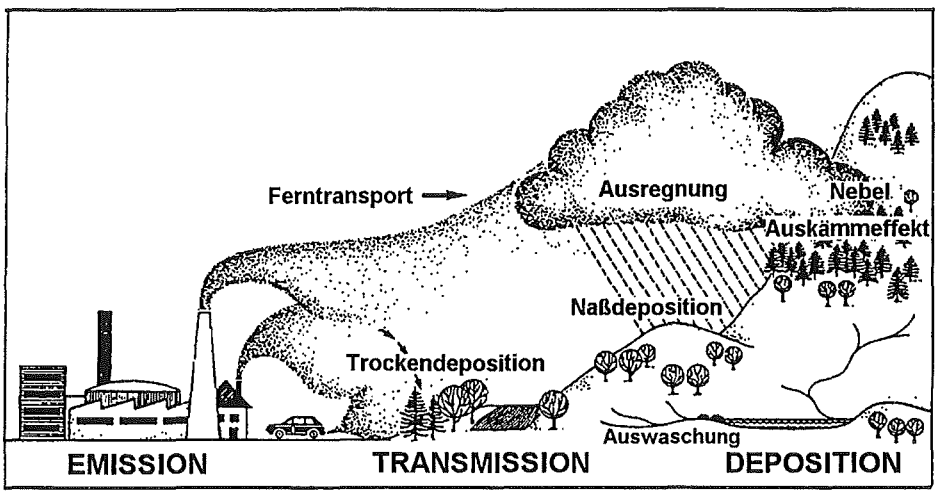


Abb. 2-1: Ausbreitung von Luftschadstoffen

Irgendwann werden die Schadstoffe auf dem Erdboden oder dem Pflanzenbewuchs abgelagert (Deposition). Dabei unterscheidet man zwischen trockener Deposition durch Schwerkraft und nasser Deposition durch Auswaschen bei Regen oder Nebel. Der Nebel stellt aufgrund seiner substantiellen Beschaffenheit (sehr feine Wassertropfen) eine große aktive Oberfläche dar, die die Luftschadstoffe auskämmt. Auf dem Boden abgelagerte Stoffe können in Regenwasser gelöst in Grund- und Oberflächenwasser übergehen.

Emission
1. Übergang luftverunreinigender Stoffe in die Atmosphäre
2. Menge der Stoffe („Spuckwert“)
(z.B. t SO_2)
Transmission
Vorgänge, die zu einer Verteilung der luftverunreinigenden Stoffe in der Atmosphäre oder zu ihrer Änderung durch chemische und physikalische Effekte führen.
Der Begriff Transmission beschreibt den Übergang von der Emission zur Immission.
Immission
Tatsächliche Schadstoffkonzentration am Ort der Einwirkung in der Atmosphäre („Schluckwert“) oder im Boden oder im Wasser (z.B. mg Schadstoff / m^3 Luft).

Tab. 2-1: Definition Emission, Transmission und Immission

In den Organismus von Lebewesen gelangen Schadstoffe generell über die Atmung (Inhalation), über die Nahrungskette (Ingestion) oder über Körperkontakt (Diffusion durch die Haut). Für die schädigende Wirkung von Luftschadstoffen ist nicht die Emission sondern ausschließlich die Immission (d.h. die Konzentration am Ort des Einwirkens „Schluckwert“) maßgebend. Daher ist das übergeordnete Ziel aller Luftreinhaltungsmaßnahmen, die Immission zu reduzieren.

Um die Immissionen zu senken, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Zum einen reduzieren sich die Immissionen durch Senken der Emissionen (bei gleichen Transmissionsbedingungen).
- Zum anderen führen höhere Quellhöhen zu einer weiteren Verteilung und damit zu einer größeren Verdünnung.

Die letzte Variante („Politik der hohen Schornsteine“) war der Anfang der Luftreinhaltepolitik. Als Folgerung von Klagen über die Versauerung skandinavischer Seen, wurde ab Mitte der 70-er Jahre verstärkt auf eine Politik der Emissionsreduzierung gesetzt.

Die Verteilung luftverunreinigender Stoffe in der Atmosphäre wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Schornsteinbauhöhe.
- Austrittsimpuls und thermischer Auftrieb des Abgases.

Beide zusammen werden als Quellhöhe bezeichnet.

Wetterlage:
- Turbulenzen in der Atmosphäre
- Topographische Verhältnisse der Erdoberfläche entlang des Ausbreitungs- weges.
- Sonneneinstrahlung (Hauptursache für die Turbulenz und Energiequelle für chemische Umwandlungen).
- Vorhandensein anderer luftverunreinigender Stoffe.
- Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Für eine exakte Ermittlung der Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre müssen alle vorstehenden Faktoren berücksichtigt werden. Da diese, mit Ausnahme der Schornsteinhöhe und der Geländetopographie, sehr dynamische Größen sind, beschränkt man sich oft auf eine Näherungsrechnung. Hierbei

wird die Wetterlage typisiert und durch Austausch- und Diffusionskoeffizienten, die z. B. der TA-Luft entnommen werden können, charakterisiert. Zur Berechnung ist das Gauß'sche-Diffusionsmodell das am häufigsten eingesetzte mathematische Verfahren (so z. B. auch bei der TA-Luft). Es bezieht sich ausschließlich auf die meteorologische Ausbreitung und berücksichtigt nicht die luftchemischen Zusammenhänge. Bei diesen Verfahren wird für die Ausbreitung davon ausgegangen, daß sich die Schadstoffausbreitung gemäß einer Gauß'schen-Normalverteilung verhält. Das Gauß'sche-Modell ist aussagefähig bei einer Verteilung im Maßstab von einigen Kilometern bis einigen zehn Kilometern. Ferner werden vereinfachte Annahmen getroffen, um bei der Vielzahl der Einflüsse noch einen ausreichend handhabbaren Berechnungsweg zu erhalten:

- Die Emissionen werden als gasförmige angenommen. Bei Staub wird davon ausgegangen, daß keine nennenswerte Sinkgeschwindigkeit vorhanden ist.
- Die Schadstoffe werden punktförmig und kontinuierlich emittiert.
- Das Ausbreitungsgelände ist ausreichend eben. Störungen durch Bebauung und Bewuchs werden nicht berücksichtigt.
- Die Diffusion- bzw. Austauschkoeffizienten sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit während der Ausbreitung sind konstant.
- Wie bereits oben beschrieben, finden keine chemischen und physikalischen Umwandlungen statt.
- Die Emission ist nach Menge und Temperatur zeitlich konstant.
- Desweiteren geht das Modell davon aus, daß die Abgasfahne keiner endlichen Begrenzung unterliegt.

Die Auflistung der vereinfachten Annahmen zeigt, daß das Gauß'sche-Modell wegen der Vielzahl der Einflüsse und der komplexen Zusammenhänge nur begrenzt exakte Aussagen liefern kann. Es ist jedoch gut geeignet, Immissionen in der Atmosphäre bei sonst gleichen Randbedingungen anzugeben. Diese sind, da das Modell Depositionen nicht berücksichtigt, als maximale Immissionen zu verstehen. Aus diesem Grund wird es auch - wie bereits erwähnt - als Standardberechnung in der TA-Luft vorgegeben, um die Immissionsbelastung bei vorgegebener Emission musterhaft zu ermitteln.

Rechnungen zeigen, daß insbesondere die Wetterlage einen erheblichen Einfluß auf die Immissionen an einem bestimmten Ort hat.

Grob vereinfacht gilt, daß bei entsprechender Wetterlage Emissionen aus sehr hohen Schornsteinen sich weit über die Landesgrenze verteilen, Emissionen aus Haushalten im Nahbereich der Städte und aus Fahrzeugen im Nahbereich der Straßen bleiben.

2.2 Mögliche gesundheitliche Auswirkungen

Wie bereits dargestellt wurde, gelangen die Luftschadstoffe über die Wege

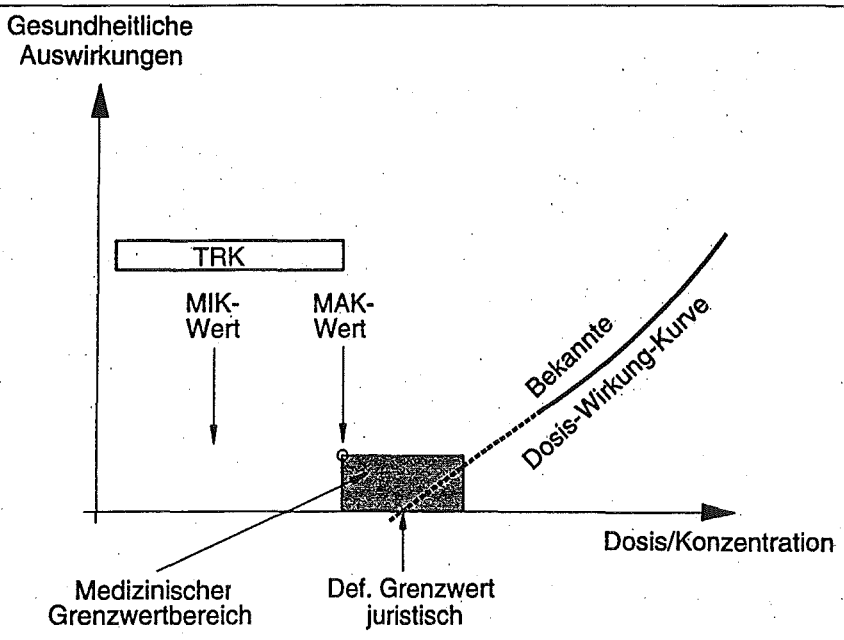
- Atmung (Inhalation)
- Nahrungskette (Ingestion)
- Körperkontakt

in den Organismus des Menschen.

Es ist jedoch aus medizinischer Sicht nicht einfach, ihre Wirkung detailliert anzugeben und bei mehreren einwirkenden Schadstoffen eine monokausale Zuordnung vorzunehmen. Im folgenden sind einige Einflußgrößen beispielhaft beschrieben.

Der menschliche Organismus ist mit inneren „Schutzfunktionen" ausgestattet, die dem Schadstoffeintrag entgegenwirken. Kommt es dennoch zur Schädigung, so werden körpereigene Reparaturmechanismen aktiviert, welche je nach Art und Grad der Schädigung in der Lage sind, diese zu beheben (dies geht jedoch nur, wenn vorher der weitere Schadstoffeintrag unterbunden wurde).

Ferner ist zu beachten, daß es Schwellwerte geben kann, unterhalb derer der menschliche Körper aufgrund seiner Physiologie keine bleibende Schädigung erfährt. Bei Überschreiten des Schwellwertes kommt es jedoch zu Auswirkungen, deren Ausmaß von der Art des Schadstoffes, seiner Konzentration und der Dauer des Einwirkens bestimmt wird.



MAK = Maximale Arbeitsplatzkonzentration

MAK-Liste hat 500 Einträge, erstellt seit 1955 von Deutscher Forschungsgemeinschaft für Gesundheitsvorsorge am Arbeitsplatz für luftgetragene Schadstoffe. Ca. 10-15% der MAK-Grenzwerte basieren auf Humanerfahrungen, weiteres Problem: Schadstoffgemische.

TRK = Technische Richtkonzentration (seit 1972)

Pragmatisch, politisch gesetzte Grenzwerte (z.T. ohne Begründung), akzeptieren Restrisiko.

MIK = Maximale Immissionskonzentration

Seit 1985 für Außenluftverunreinigung getroffen, orientiert sich an MAK-Werten (oftmals ca. 1/20 des MAK-Wertes).

Abb. 2-2: Definitionen von Grenzwerten

Ein grundsätzliches Problem ist, daß in der Regel eine Vielzahl von Luftschadstoffen gleichzeitig auftreten, wobei nicht ausgeschlossen werden kann, daß diese zu weiteren gesundheitlichen Auswirkungen (Synergismen) führen können. Auch bei sonst gleichen Voraussetzungen sind erhebliche individuelle Unterschiede in der Empfindlichkeit auf Luftschadstoffe vorhanden, welche auch durch die allgemeine gesundheitliche Konstitution beeinflußt werden.

Zur Vorsorge wurden verschiedene Kataloge von Grenzwerten festgelegt (siehe auch Abb. 2-2), die zum Teil direkt und zum Teil als Ableitung daraus zur Festlegung von Grenzwerten und Richtkonzentrationen dienen.

Die wichtigsten Wirkungen von Luftschadstoffen auf den menschlichen Organismus enthält Tabelle 2-2 im Überblick.

Stoffe	Wirkung auf den Menschen	Herkunft
CO	• Behinderung des O_2-Transports im Blut → Blockade der Atmung;	• unvollständige Verbrennung;
SO_2 (H_2SO_3) (H_2SO_4)	• Herz und Kreislauf; • Schleimhäute; • Atmungsorgane;	• Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe;
NO_x (HNO_2) (HNO_3)	• Herz und Kreislauf; • Schleimhäute; • Atmungsorgane;	• hohe Verbrennungstemperaturen; • N-haltige Brennstoffe;
C_xH_y	• Schleimhäute; • Atmungsorgane; • kanzerogen und mutagen;	• unvollständige Verbrennung; • Verdunstung und Verbrauch von Lösungsmitteln;
Stäube	• Atmungsorgane; • kanzerogen und mutagen;	• nicht brennbare Bestandteile im Brennstoff; • Industrieprozesse; • Umschlagplätze von Schüttgütern;
Ozon	• Schleimhäute; • Atmungsorgane; • kanzerogen;	• photochemische Reaktionen der Vorläufersubstanzen CO, NO_x und C_xH_y und weitere Reaktionspartner;
Radioaktivität	• kanzerogen und mutagen;	• natürliche Quellen; • Kernenergienutzung;

Tab. 2-2: Wirkung von Luftschadstoffen auf den menschlichen Organismus bei ausreichend hoher Konzentration

Kohlenmonoxid ist in höheren Konzentrationen (z. B. in direkter Nähe der Emissionsquelle) toxisch, da es sich 200 bis 300 mal stärker an das Hämoglobin des Blutes bindet als der Sauerstoff und somit den Sauerstofftransport im Blut behindert. Ferner wird CO vom Blut nur sehr langsam wieder abgegeben. Konzentrationen von z. B. 500 ppm führen schon nach einigen Stunden durch Blockade der Atmung zum Tode.

Bei **Stäuben** ist übergeordnet festzustellen, daß die Gefährlichkeit für Mensch und Tier um so größer ist, je kleiner ihre Korngrößen sind (Eindringtiefe und Beweglichkeit im Organismus).

Stäube sind für den Menschen in mehrfacher Weise schädlich. Sie können erstens aus toxischen Inhaltsstoffen, wie z. B. Schwermetallen bestehen, die im Organismus krebsfördernd wirken. Durch ihre Geometrie (z. B. scharfkantig und/oder sehr klein) können sie sich zweitens im Organismus dauerhaft einlagern und schädigend wirken (z. B. Asbestose; Staublunge). Sie können drittens als Träger von Schadstoffen (wie z. B. von Schwefel- und Stickstoffverbindungen) fungieren und zu schwerwiegenden Erkrankungen der Atmungsorgane führen. In Bezug auf Pflanzen ist zu erwähnen, daß ihr Wachstum durch Staubablagerungen behindert wird.

2.3 Material- und Waldschäden

2.3.1 Materialschäden

Luftschadstoffe, aus denen Säuren, wie z.B. H_2SO_4 oder HNO_3, entstehen können, wirken korrosiv auf Materialien. Eine schädigende Wirkung tritt stets dann ein, wenn Materialoberflächen mit Wasser benetzt sind, was bereits bei leicht erhöhter Luftfeuchtigkeit der Fall sein kann. Betroffen sind insbesondere Metallkonstruktionen sowie kalkhaltige Steine (z.B. Kalksteine, Marmor, etc.). Bei Materialien gibt es im Gegensatz zu Lebewesen und Pflanzen weder einen Schwellenwert, unter dem keine Schädigung eintritt, noch einen inneren Regenerierungsmechanismus. Desweiteren ist zu berücksichtigen, daß Pflanzen und Materialien der Einwirkung 24 Stunden pro Tag ausgesetzt sind.

Durch Materialschäden entstehen bei Sachgütern, wie z.B. Brücken, Autobahnen, Industrieanlagen durch die Reparatur, die erforderliche Überdimensionierung oder die begrenzte Lebensdauer der Volkswirtschaft zusätzliche Kosten. Bekannt ist das Beispiel des Kölner Doms, wobei zum Erhalt der Sandsteinplastiken jährlich ca. fünf Mio. DM investiert werden müssen. Derartige historische Bauwerke können nur bedingt restauriert werden, so daß letztlich auch Kulturgut irreversibel verloren geht.

2.3.2 Waldschäden

Seit Ende der 70er Jahre treten in Mitteleuropa Waldschäden in einem Umfang auf, wie sie bis dahin nicht bekannt waren. Vor allem Schwefeldioxid, Stickoxide, Photooxidantien und Schwermetalle werden nach derzeitiger Erkenntnis in Zusammenhang mit Waldschäden gebracht.

In Deutschland haben sich vor allem die höheren Lagen der Mittelgebirge (Kämme und nach Westen gerichtete Hänge) und die Alpen als Hauptschadgebiete herausgebildet. Besonders gravierend sind die Schäden im Erzgebirge, Harz, Fichtelgebirge und Schwarzwald. Während zunächst nur Nadelbäume betroffen waren, weisen heute Nadel- und Laubbäume gleich hohe Schäden auf. Anfang der 90er Jahre wurden in Deutschland über 50 % des Waldbestandes als geschädigt ausgewiesen.

Die über den Regen in den Boden eingetragenen Schadstoffe, führen zu seiner Versauerung, wodurch ursprünglich im Boden gebundene Metalle z.B. Aluminiumverbindungen gelöst werden können. Sie schädigen die Feinwurzeln und wirken bei Aufnahme in den Baum als Gift. Eine geschädigte Feinwurzel wiederum führt zur gestörten Wasseraufnahme. Der niedrige pH-Wert kann ferner zur Auswaschung von für den Boden wichtigen Nährstoffen aus dem Wurzelbereich führen. Derart geschädigte Bäume haben zusätzlich eine geringere Resistenz gegen Schädlinge. Neben den Einflüssen der chemischen Schadstoffe tragen lange Trockenperioden, strenge Winter, und Überalterung des Baumbestandes ebenso zur Schädigung bei.

Während man zu Beginn der 80er Jahre zunächst die Vermutung hatte, daß man die neuartigen Waldschäden auf wenige Luftschadstoffe zurückführen kann, zeigte die Forschung zwischenzeitlich, daß eine Vielzahl von Einflüssen unter Berücksichtigung natürlicher Gegebenheiten zur Erklärung herangezogen werden müssen. Der generelle Einfluß von Luftschadstoffen steht jedoch außer Frage.

2.4 Smog

Smog ist die Bezeichnung für eine großräumige, anhaltende und gesundheitsbedrohende Schadstoffanreicherung in bodennahen Luftschichten.

Die Gefahr des Smog ist immer dann gegeben, wenn eine austauscharme Wetterlage existiert, die eine ausreichende Verdünnung der Luftschadstoffe verhindert. D.h., in den unteren Luftschichten liegt Inversion vor und die Windgeschwindigkeit in Bodennähe ist sehr gering. Diese Wetterbedingungen existieren häufig im Winterhalbjahr. Eine „Verdünnung" der Luftschadstoffe ist dann nicht gegeben. Die häufige Gleichzeitigkeit mit Nebel führte daher zur Wortbildung Smog aus dem Englischem „Smoke" = Rauch und „Fog" = Nebel.

Im Gegensatz zum Wintersmog wird in jüngster Zeit auch der Begriff Sommersmog verwendet, dessen Ursache jedoch auf andere Schadstoffe und andere Wirkungsmechanismen als beim Wintersmog zurückzuführen ist.

2.4.1 Wintersmog

Die größte bekannte Wintersmog-Katastrophe ist die von London im Dezember 1952, wo innerhalb von zwei Wochen nach Eintritt der Smog-Bedingungen etwa 4000 Menschen mehr starben, als sonst in dieser Jahreszeit. Aus diesem Grund wird der Wintersmog auch oft als London-Smog bezeichnet.

Wintersmog tritt in der Regel nur in industriellen Ballungsgebieten oder Siedlungsgebieten auf und wird hauptsächlich durch die Emission von Staub und Schwefeldioxid sowie teilweise auch durch Kohlenmonoxid und Stickoxide bestimmt. Die Gesundheitsgefährdung liegt zum einen in der Konzentration der Schadstoffe und zum anderen in den aus ihnen gebildeten Sekundär-Luftschadstoffen wie z. B. Säure-Aerosolen.

Nach der Wintersmogsituation im Ruhrgebiet 1962 (156 Todesfälle) entstand 1964 die erste Smogverordnung in Nordrhein-Westfalen. Heute haben die Bundesländer mit Ausnahme von Mecklenburg-Vorpommern auf der Grundlage des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Smog Verordnungen (länderspezifisch) erlassen. Darin sind die gefährdeten Gebiete als Smoggebiete ausgewiesen. Die Smogalarmpläne gelten ausschließlich für diese Gebiete.

Die Smogalarmpläne sind in Abhängigkeit der Schadstoffkonzentration einheitlich in

Vorwarnstufe / Alarmstufe I / Alarmstufe II

gegliedert. Während die festgelegten Grenzwerte in allen Bundesländern einheitlich sind, differieren die einzelnen Smogverordnungen z. T. bei den durchzuführenden Maßnahmen:

In der **Vorwarnstufe** erfolgt im wesentlichen ein Aufruf an die Industrie und die Öffentlichkeit, nach Möglichkeit weitere Verunreinigungen zu unterlassen.

In **Alarmstufe I** treten in der Mehrzahl der Bundesländer Gebote für den Einsatz schwefelhaltiger Brennstoffe und Verbote für den Betrieb von Kraftfahrzeugen in bestimmten ausgewiesenen Verkehrssperrbezirken zu bestimmten Tageszeiten in Kraft.

Bei **Alarmstufe II** kommt es zum Verbot der Nutzung bestimmter Feuerungsanlagen sowie zum generellen Fahrverbot in Verkehrssperrbezirken.

Als Folge des erheblichen Rückgangs der Schwefeldioxid-, Staub- und Kohlenmonoxidemissionen - auch in den neuen Bundesländern - ist die Wahrscheinlichkeit gering geworden, daß Wintersmog überhaupt eintritt. So wurden bis Februar 1997 bereits in Schleswig-Holstein, Berlin, Hamburg, Baden-Württemberg, Niedersachsen, Brandenburg, Bremen und Rheinland-Pfalz die Wintersmogverordnungen aufgehoben. Es ist zu erwarten, daß weitere Bundesländer folgen.

2.4.2 Sommersmog

In den Sommermonaten können Wetterbedingungen eintreten, die die Bildung photochemischer Oxidantien (sekundäre Luftverunreinigungen wie z.B. Ozon) überdurchschnittlich begünstigen. Diese Photooxidantien entstehen in komplexen luftchemischen Umwandlungsprozessen aus Vorläufersubstanzen wie Stickoxiden, Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxiden bei hoher Sonneneinstrahlung und hohen Lufttemperaturen. Der Sommersmog wird auch als photochemischer Smog oder auch als „Los Angeles-Smog" (weil er dort häufiger auftrat) bezeichnet.

Die photochemischen Vorgänge sind sehr kompliziert, da es eine Vielzahl von Reaktionen gibt, die z. T. sehr instabil sind und wieder in die Ausgangsstoffe zerfallen oder neue Sekundärprodukte bilden. Insgesamt setzt man die Zahl der photochemischen Primär- und Sekundärreaktionen beim Sommersmog auf mehrere Hundert.

Vereinfacht läßt sich die Entstehung des Sommersmog in zwei Phasen einteilen. Die erste Phase ist die Bildung oxidierender Stoffe, wobei hier die Bildung des Ozon die wichtigste Reaktion darstellt. Desweiteren entstehen in der ersten Phase organische Radikale und Säure-Aerosole. In der zweiten Phase reagiert das Ozon mit vielen Ausgangsprodukten der Luftverschmutzung, wobei neue, oft sehr unverträgliche Schadstoffe entstehen. Dieses sind neben Säure-Aerosolen vor allem sehr aggressive organische Radikale, die sich aus der Oxidation von Kohlenwasserstoffen mit Ozon bilden. In einer solchen Reaktion entsteht z. B. auch das Peroxyacetylnitrat (PAN), einer der schädlichsten Stoffe des Sommersmogs.

Da die Ozonkonzentration der maßgebende Parameter für den Sommersmog ist, wird sie als Leitsubstanz für die Beurteilung des Sommersmogs verwendet. Zum Schutz der Bevölkerung vor Sommersmog werden z. B. bei einer Ozonkonzentration ab 180 $\mu g/m^3$ (2-h-Mittelwert) Verhaltensregeln an die Öffentlichkeit gegeben, (die in erster Linie die Vermeidung körperlicher Anstrengung im Freien empfehlen). Ab 240 $\mu g/m^3$ gelten nach den gesetzlichen Bestimmungen Einschränkungen für den Betrieb von Fahrzeugen ohne geregelten Katalysator. Die medizinischen Auswirkungen des Sommersmogs können nach derzeitigem Forschungsstand zu Erkrankungen der Atmungsorgane sowie Reizungen der Augen und Schleimhäute führen.

Die Ozonkonzentration ist jedoch erheblichen zeitlichen Schwankungen unterlegen. Insbesondere bei Weggang des Sonnenlichtes kann ein relativ schneller Ozonabbau erfolgen. Dieser Vorgang soll im folgendem detailliert erklärt werden.

Ozonbildung und Ozonabbau:

Sonnenlicht ($\lambda = 420$ nm) spaltet NO_2 photolytisch, in atomaren Sauerstoff und NO

$$NO_2 + h\nu \longrightarrow O + NO \qquad (1)$$

In einer weiteren Reaktion entsteht Ozon.

$$O + O_2 + M \longrightarrow O_3 + M \qquad (2)$$

M ist ein sogenannter Stoßpartner (z.B. N_2, O_2, CO_2), der nicht in die Reaktion eintritt, aber die freiwerdende Bindungsenergie abführt.

Parallel zu diesem Vorgang findet folgende Rückreaktion statt:

$$O_3 + NO \longrightarrow O_2 + NO_2 \qquad (3)$$

Die sich aus den Bildungsreaktionen (1) und (2) und der Abbaureaktion (3) ergebende Ozonmenge (netto) ist von der augenblicklichen Strahlungsintensität abhängig. D. h., während der Tagesstunden (unbewölkter Sommertag) überwiegen (1) und (2) und es kommt zum Anstieg der Ozonkonzentration. Dagegen kommt es in den Nachtstunden wegen fehlender Sonneneinstrahlung (d. h. keine Reaktion (1)) zum ausschließlichen Ozonabbau durch Reaktion (3). Der nächtliche Ozonabbau ist um so stärker, je größer die Stickoxidkonzentrationen sind. Aus diesem Grund liegen die Ozonwerte während Sommersmog-Phasen in Ballungsgebieten nachts oft unter den von Reinluftgebieten, da dort die NO-Partner fehlen. Auch können durch meteorologische Vorgänge die „Ozon-Spitzen" räumlich wandern. Ebenso schnell können durch Regen, genau wie bei Wintersmog, die verursachenden Luftschadstoffe aus der Luft herausgewaschen werden.

Ein weiterer Ozonbildungsmechanismus basiert auf einer Reaktion von Kohlenmonoxid mit aus Oxidationsprozessen bestimmter Kohlenwasserstoffe entstandenen Radikalen.

Die Vermeidung von Sommersmog läßt sich nur durch die Reduktion von Vorläufersubstanzen z. B. durch die verstärkte Einführung von Katalysatoren bei Fahrzeugen erreichen. Während dies bei der Mehrzahl der PKW bereits geschehen ist, waren im Güterverkehr vergleichbare Maßnahmen bisher nicht möglich.

2.5 Immissionen in Innenräumen

2.5.1 Allgemeine Lufthygiene

Der Mensch hält sich im Durchschnitt über 80 % seines Lebens in Räumen (Häuser, Hallen, Kraftfahrzeugen, etc.) auf. Deren Luftqualität ergibt sich zum einen aus der Qualität der Außenluft, die über Fenster, Türen und sonstige Öffnungen in permanentem Luftaustausch mit der Innenluft steht und zum anderen aus den im Raum befindlichen Emissionsquellen, wie z. B.:

- Tabakrauch
- offene Feuerungsanlagen (CO, NO_x, etc.)
- Reinigungsmittel (Chlorgase)
- Klebstoffe, Farben, Lacke (Lösemittel, C_xH_y)
- Möbel, Bodengelände (Lösemittel, Formaldehyd)
- Hausstaub, Pilzsporen
- Radongas

Hieraus ergibt sich, daß, abgesehen von der Schutzwirkung abgeschlossener Räume bei kurzzeitigen Immissionsspitzen in der Außenluft (z.B. durch Industriebrände oder Chemieunfälle), die Luftqualität in Räumen (ohne Klimaanlage) in der Regel schlechter ist als im Freien. Dementsprechend größer ist auch das Gefährdungspotential in Innenräumen, sofern keine ausreichende Lüftung besteht, die sich bei gut dichten Türen und Fenstern nicht von alleine einstellt. Die Forderung, die Lüftungswärmeverluste zu begrenzen, steht hier im direkten Widerspruch zur Lufthygiene.

Die vorstehend aufgeführten Emissionsquellen in Innenräumen sind alle, mit Ausnahme des Radongases, durch menschliche Einflüsse verursacht und können in Grenzen reduziert bzw. vermieden werden. Eine Sonderrolle nimmt das Radongas ein. Es ist ein radioaktives Edelgas, dessen Isotope beim natürlichen Zerfall von Uran, Thorium und Actinium entstehen. Da diese Elemente zwar in sehr geringen, aber dennoch gut meßbaren Spuren in allen Gesteinen und Böden zu finden sind, emittiert der Erdboden kontinuierlich radioaktives Radon.

Während auf unbebautem Grund Radonausgasungen durch die Vermischung mit der Umgebungsluft nur sehr geringe Immissionen bewirken, führen sie auf bebautem Grund zu durchaus nennenswerten Konzentrationen. Ursache hierfür ist, daß durch Öffnungen des Baukörpers zum Erdboden hin (z. B. Risse oder Porösität der Bodenplatten, Rohrschächte) Radongas in die Räume strömt und sich dort bei schlechter Belüftung zu hohen Konzentrationen anreichern kann. Weitere, jedoch untergeordnetere, Ursachen für Radonkonzentrationen in Innenräumen können Emissionen aus Baumaterialien, Leitungswasser oder Erdgas darstellen.

Radonausgasungen des Erdreiches hängen erheblich von den geologischen Verhältnissen ab und sind somit regional sehr unterschiedlich. Während sandiger oder poröser Boden die Ausgasung begünstigt, wirken tonhaltige Böden oder wasserführende Schichten ihr entgegen. Ferner kommt es durch Wettereinflüsse (Bodenfröste, Trocken- oder Regenperioden) zu Schwankungen im Ausgasungsverhalten.

Eine breit angelegte Erhebungsmessung im Bundesgebiet /3/ ergab eine durchschnittliche Radonkonzentration in Innenräumen von 50 Bq/m^3. Dieser Wert entspricht einem Fünftel der von der Strahlenschutzkommission gesetzten Obergrenze des Normalbereiches in Wohngebäuden (250 Bq/m^3). Erst darüber hinaus empfiehlt die Strahlenschutzkommission, Maßnahmen zur Reduzierung einzuleiten.

2.5.2 Definitionen und Maßeinheiten von Strahlung

Im Zusammenhang mit der dargestellten Radonproblematik enthält Tabelle 2-3 wichtige Einheitendefinitionen für die Auswirkungen radioaktiver Stoffe.

Größe	Gesetzliche Einheit (SI-Einheit)	Größendefinition	alte Einheit	Umrechnung
Aktivität	Becquerel Einheitenzeichen: Bq 1 Bq = 1 s^{-1}	Anzahl radioaktiver Kernumwandlungen pro Zeiteinheit	Curie [Ci]	1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq
Energiedosis	Gray Einheitenzeichen: Gy 1 Gy = 1 J/kg	In einem Massenelement absorbierte Strahlungsenergie	Rad [rd]	1 rd = 10^{-2} Gy
Äquivalenzdosis	Sievert Einheitenzeichen: Sv 1 Sv = 1 J/kg	Energiedosis multipliziert mit dem dimensionslosen Bewertungsfaktor der Strahlenarten	Rem [rem]	1 rem = 10^{-2} Sv
Effektive Äquivalenzdosis	Sievert Einheitenzeichen: Sv 1 Sv = 1 J/kg	Äquivalenzdosis, gewichtet über die einzelnen Organe	Rem [rem]	1 rem = 10^{-2} Sv

Tab. 2-3: Maßeinheiten für ionisierende Strahlung

Sie zeigt, daß die oben benutzte Einheit Bq keine Aussage über die gesundheitlichen Auswirkungen der radioaktiven Strahlung macht. Sie gibt lediglich an, wieviele Zerfälle (Radioaktivität*) pro Sekunde entstehen. Auch die Energiedosis gibt nur die physikalisch meßbare und von einem Körper absorbierte Strahlungsenergie an. Die Äquivalenzdosis hingegen berücksichtigt zusätzlich, über einen von medizinischer Seite festgelegten Bewertungsfaktor, die biochemische Wirkung einzelner Strahlungsarten (z. B. α-, β-, γ-, Neutronen-, Protonen-Strahlung) auf den Organismus. Die Effektive Äquivalenzdosis berücksichtigt zusätzlich die Empfindlichkeit der einzelnen Körperteile und Organe des Menschen. Um klarzustellen, daß es sich bei der Äquivalenzdosis und der Effektiven Äquivalenzdosis bei gleicher physikalischer Einheit nicht um eine Energiedosis handelt, wurde eine neue Bezeichnung, das Sievert eingeführt. Da bis Mitte der 80er Jahre auch noch die alten Einheiten gültig waren und diese noch häufig in der Literatur vorkommen, sind diese in der Tabelle ebenfalls aufgeführt.

3 Zahlengerüste

Als Basis für diesen Abschnitt dienten die im Auftrag des „Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten" entwickelten GEMIS-Studien (/4, 5/).

Die GEMIS-Studien entsprechen einer umfassenden Datenbank über Emissionen von Energiesystemen, wodurch sie für den Bereich des Energie- und Umweltmanagements ein sehr praktisches Werkzeug darstellen.

In GEMIS ist der technische Entwicklungsstand der Systeme in der Erstellung spezieller Datensätze (z.B.: IST, STANDARD, ZUKUNFT) berücksichtigt.

IST	beschreibt das Emissionsverhalten von Anlagen, die dem technischen Stand Ende der 80er Jahre entsprechen
STANDARD	beschreibt typische Neuanlagen im Bezugszeitraum von 1990 bis 1995
ZUKUNFT	beschreibt Anlagen mit optimaler Technik, deren Marktreife erst nach 1995 erweitert wird.

Die im folgenden aufgeführten Daten entsprechen dem Datensatz STANDARD und geben die Emissionen eines Energiesystems (z.B. Heizung) ohne Berücksichtigung der vorgelagerten Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren wieder. Die Emissionswerte (in $kg_{Schadstoff}/TJ_{Input}$*) sind auf den Energieinhalt (Heizwert) der eingesetzten Menge an Brennstoff bezogen** . Dadurch ist eine gute Vergleichbarkeit der einzelnen Energiesysteme gewährleistet.

Bezüglich des angegebenen Emissionsfaktors für SO_2 von 75 kg/TJ für die Verbrennung von Heizöl EL ist anzumerken, daß dieser sich aus dem bis Ende 1995 gehandelten Heizöl EL (und Dieselkraftstoff) ergibt. Ab 1996 wird aufgrund einer gesetzlichen Verordnung der Schwefelgehalt in Heizöl EL und Diesel von 0,2 Gew.-% auf 0,05 Gew.-% gesenkt. Dadurch ergibt sich ein neuer Emissionsfaktor

---

* Als Radioaktivität bezeichnet man die natürlichen Eigenschaften bestimmter Atomkerne (Nuklide), spontan Teilchen auszusenden.

* 1 TJ = ca. 34 t SKE bzw. ca.24 t RÖE

** Der in der Praxis meist verwendete Bezug auf die anfallende Rauchgasmenge führt aufgrund der zum Teil erheblich variierenden Verbrennungsluftverhältnisse oft zu Fehlschlüssen.

für SO_2 von ca. 19 kg/TJ, welcher für neue Berechnungen verwendet werden sollte. Bei der Ermittlung der SO_2-Emissionsfaktoren wird davon ausgegangen, daß die Grenzwerte nur zu jeweils 80 % ausgeschöpft werden.

System			Schadstoffe					Zum Vergleich:
Typ	thermische Leistung	Nutzungs-grad	SO_2	NO_x	Staub	CO	C_xH_y ohne Methan	Werte für die Verleihung des Blauen Engels***
	[MW]	[%]	Emissionsfaktoren in [$kg_{Schadstoff}$ / TJ_{Input}]					[kg/TJ]
Brikett-Ofen Braunkohle	0,01	65	148	75	70	2500	41,3	-
Brikett-Heizung Braunkohle	0,01	65	148	50	70	2000	20,6	-
Brikett-Heizung Steinkohle	0,01	65	450	50	102	2500	62,4	-
atmosphärischer Kessel Erdgas	0,01	85	0,3	40	0,1	40	14,0	$NO_x \leq 28$ u. $CO \leq 17$
Gebläse-Heizung Erdgas	0,01	85	0,3	30	0	30	12,6	$NO_x \leq 22$ u. $CO \leq 17$
Brennwert-Gerät Erdgas	0,01	100	0,3	30	0	30	12,6	$NO_x \leq 18$ u. $CO \leq 14$
Gebläse-Heizung Heizöl EL	0,01	85	19	30	0,1	30	3,0	$NO_x \leq 22$ u. $CO \leq 33$
Heizwerk* Braunkohle	5-10	85	48	114	19	95	9,5	-
Heizwerk** Steinkohle	5-10	85	92	114	19	95	9,5	-
Heizwerk Heizöl EL	1-5	85	19	30	0	30	3,0	-

* Wirbelschichtfeuerung mit Braunkohlestaub
** Wirbelschichtfeuerung mit Vollwert-Steinkohle
*** Stand Mitte 1995

Tab. 3-1: Emissionsfaktoren von Heizsystemen

System			Schadstoffe				
Typ	elektrische Leistung Output	elektrischer Nutzungsgrad	SO_2	NO_x	Staub	CO	C_xH_y ohne Methan
	[MW]	[%]	Emissionsfaktoren in [$kg_{Schadstoff}$ / TJ_{Input}]				
Dampfturbinen-Kraftwerk mit Schmelzkammerfeuerung für Ballaststeinkohle	700	38	102	60	6,6	6,6	1,7
Dampfturbinen-Kraftwerk mit Staubfeuerung für Vollwert-Steinkohle	700	39	71	64	7,1	17,7	2,1
Dampfturbinen-Kraftwerk mit Staubfeuerung für rheinische Rohbraunkohle	600	37	43	78	8,1	20	2,0
Dampfturbinen-Kraftwerk mit Staubfeuerung für Rohbraunkohle aus der Niederlausitz	600	37	108	72	8,2	51,3	4,1
zum Vergleich: gleiches Kraftwerk im Jahre 1989 (ohne Rauchgasreinigung)	600	37	610	195	205	102,7	20,5
Dampfturbinen-Kraftwerk mit Heizöl S-Feuerung	500	40	88	86	14,4	28,8	7,2
Dampfturbinen-Kraftwerk mit Erdgas-Feuerung	500	41	0,3	56	1,4	22,4	2,8
GUD-Kraftwerk Erdgas betrieben	600	52	0,3	42	0,4	84	8,4

Tab. 3-2: Emissionsfaktoren von Kraftwerken zur Stromerzeugung

System				Schadstoffe				
Typ	thermische Leistung	Strom Output	Wärme Output	SO_2	NO_x	Staub	CO	C_xH_y ohne Methan
	P_{th} [MW]	P_{el} [MW]	$P_{wärme}$ [MW]	Emissionsfaktoren in [$kg_{Schadstoff}$ / TJ_{Input}]				
Steinkohle Heizkraftwerk*	300	100	170	61	63	7	18	0,2
Steinkohle Heizkraftwerk**	200	50	100	61	57	8	57	0,2
Braunkohle Heizkraftwerk*	300	100	170	32	64	7	18	0,2
Braunkohle Heizkraftwerk**	200	50	100	32	57	8	57	0,2

* Staubfeuerung mit Entnahme-Kondensations-Turbine

** Wirbelschichtfeuerung mit Gegendruck-Turbine

Tab. 3-3: Emissionsfaktoren von Systemen zur Kraft-Wärme-Kopplung

Zum Vergleich von Systemen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Kraftwerken, die nur Strom erzeugen oder monovalenten Heizsystemen, müssen die Emissionsdaten zunächst auf die gelieferte Menge Endenergie (Strom oder Wärme) normiert werden. Die dafür erforderliche Aufteilung der Emissionsdaten läßt sich vereinfacht über das Verhältnis Strom zu Wärme ermitteln. In der Praxis werden üblicherweise jedoch die Verfahren Wärmegutschrift und Stromgutschrift angewandt

Das Stromgutschrift-Verfahren wird eingesetzt, wenn das KWK-System mit einem Heizsystem verglichen werden soll. Hierbei wird zunächst die gesamte Emission auf die gelieferte Wärmemenge bezogen und anschließend der Emissionsbetrag abgezogen, der bei der Erzeugung derselben Strommenge in einem Kondensations-Kraftwerk* entstanden wäre.

Die Wärmegutschrift dient dem Vergleich von KWK-Systemen mit reinen Stromerzeugern. Die Vorgehensweise ist analog dem Stromgutschrift-Verfahren. Als Wärmegutschrift kann z. B. ein mit leichtem Heizöl betriebenes Zentralheizsystem angesetzt werden.

* vornehmlich Mittellastkraftwerk (Steinkohle)

5 Literaturverzeichnis

/1/ M. Kuhn
Klimaänderungen: Treibhauseffekt und Ozon
Tatsachen, Erklärungen und Zahlenbeispiele zur menschlichen Beeinflussung des Klimas durch Spurengase
Kulturverlag, Thaur/Tirol, 1990
ISBN 3-85395-148-1

/2/ H.-J. Wagner, P. Borsch
Energie und Umweltbelastung
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998
ISBN 3-540-63612-9

/3/ Bundesumweltministerium (Hrsg.)
Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnungen der Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung
Verlag Gustav Fischer, Stuttgart, 1992
ISBN 3-437-11451-4

/4/ Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten
Wiesbaden, 1989;
Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell-Integrierter Systeme (GEMIS)

/5/ Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten
Wiesbaden, Januar 1993
Umweltanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen:
Gesamt-Emissions-Modell-Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.0
ISBN 3-89274-077-1

Internationale Klimaschutzpolitik

Wolfgang Fischer

Programmgruppe Technikfolgenforschung (TFF)

Forschungszentrum Jülich

1. Klimaschutz und internationale Politik

Menschliche Aktivitäten haben schon immer die Umwelt verändert. Die Rodung mediterraner Wälder in der Antike und mitteleuropäischer Urwälder im Hochmittelalter sind Beispiele solcher Eingriffe. Mit dem Industriezeitalter wurden sie intensiver und ausgedehnter. Heute bleibt keine Stelle des Globus von ihnen verschont. Eine Folge dieses „globalen Wandels" (WBGU, 1993[1]) ist die Emission von Spurengasen (Treibhausgasen, THG). Die um das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) versammelten Wissenschaftler erwarten aufgrund von Modellrechnungen, daß diese Erhöhung der atmosphärischen Konzentration von THG einen Anstieg der Oberflächentemperatur und weitere gefährliche Effekte bewirken wird[2].

Lange wurden die mit Klimaveränderungen verknüpften wissenschaftlichen Fragen, von der Öffentlichkeit weitgehend unbeachtet, in der Meteorologie und Geographie unter dem Paradigma „die nächste Eiszeit steht bevor" behandelt. Erst in den 80er Jahren, nun unter dem Vorzeichen einer „globalen Erwärmung", fanden Klimatologen ein breites Gehör. Ihre Warnungen vor einem drohenden anthropogenen Treibhauseffekt wurden, oft als „Klimakatastrophe" ausgemalt (Leggett, 1990), von Medien, immer mehr Staaten und schließlich Nichtregierungsorganisation (NRO)[3] aufgegriffen, in einer wachsenden Zahl internationaler wissenschaftlicher sowie dann auch politischer Konferenzen debattiert und als ernstzunehmend anerkannt. Für ein neues Thema recht rasch gelang es, die Maschinerie der internationalen Diplomatie in Gang zu setzen und Verhandlungen zu beginnen. Nach einem von Interessen- und Zielkonflikten zwischen Klimaschützern, Zauderern und Skeptikern gekennzeichneten Verhandlungsprozeß einigten sich im Mai 1992 fast 150 Staaten auf die in einem internationalen Verhandlungsgremium (INC) ausgearbeitete Klima-Rahmenkonvention (KRK). Sie wurde auf der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio de Janeiro in Juni 1992 zur Zeichnung durch die Staaten ausgelegt und trat am 21.3. 1994 in Kraft. Mitte 1998 hatten 175 Staaten und die Europäische Union die KRK ratifiziert. Sie bildet die Grundlage für die internationale Klimaschutzpolitik (vgl. Kopfmüller/Coenen, 1997), deren nächste Schritte die Mitgliedsstaaten im Kyoto-Protokoll vereinbart haben. In der **Tabelle 1** finden sich Stationen dieser Politik.

---

[1] Der WBGU ist im Internet unter http://www.awi-bremerhaven.de/WBGU/ zu erreichen.

[2] Vgl. Sachstandbericht von 1996 des Intergovernmental Panel on Climate Change, vgl. http://www.ipcc.ch; zur wissenschaftlichen Auseinandersetzung vgl. prägnant Schuh, 1997.

[3] Anfänglich zögerten NROs, sich dem Thema zu widmen, da sie fürchteten, der Treibhauseffekt werde die „kohlenstofffreie Kernenergie" wieder hoffähig machen. Sie arbeiten heute im Climate Action Network zusammen, das unter http://www.igc.apc.org.climate/Eco.html zu erreichen ist. Einen Zugang zur Wissenschaft und Politik des Klimaschutzes bietet auch das eco-net unter http://www.igc.org/igc/issues/ac/or.html; vgl. auch Sprinz/Luterbacher, 1996.

1957	Das Geophysikalische Jahr schafft Grundlagen für die weltweite Klimaforschung.
1972	Die 1. Umweltkonferenz der UNO in Stockholm erklärt die Untersuchung des anthropogenen Treibhauseffektes zu einer wissenschaftlichen Aufgabe.
1979	Erste Weltklimakonferenz der World Meteorological Organisation (WMO)[a], Beginn des World Climate (Research) Programme.
1985	Erste Klimakonferenz in Villach, organisiert von WMO, United Nations Environmental Programme, UNEP,[b] und dem International Council of Scientific Unions, ICSU).[c]
1989	Arbeitsgruppentreffen in Villach und Bellagio zur Wissenschaft und (erstmals) zur Politik des Klimaschutzes.
1988	Erste internationale politische Konferenz zum Klimaschutz in Toronto, einberufen durch die Regierung Kanadas. Resolution 43/53 der Generalversammlung der Vereinten Nationen (UNO-GV)[d] zur Gründung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[e] unter der Schirmherrschaft von UNEP und WMO zur Erforschung der Klimaveränderungen, ihren Auswirkungen und über Strategien zum Klimaschutz.
1989	Ottawakonferenz von Rechts- und Politikexperten zum Schutz der Atmosphäre. Internationale Konferenz in Neu Delhi über Entwicklungsländer und Klimaschutz unter Schirmherrschaft von UNEP und World Resources Institute (WRI).[f] Pariser Wirtschaftsgipfel der Gruppe der sieben führenden Industrieländer (G7) fordert eine Reduktion der THG-Emissionen. Internationale Ministerkonferenz (Noordwijk) fordert Klimaschutzmaßnahmen. UNO-GV Resolution 44/26 zur Einberufung der United Nations Conference on Environment and Development, UNCED
1990	Wirtschaftsgipfel der G7 in Houston betont die führende Rolle der hochindustrialisierten Länder beim Abbau der THG-Emissionen. Erster IPCC-Wissenschaftsbericht zum Stand der Forschungen. Die 2. Weltklimakonferenz fordert eine Klimaschutzkonvention. Mit der Resolution 45/212 der UNO-GV wird das Intergovernmental Negotiations Committee (INC) zur Ausarbeitung einer Klimarahmenkonvention (KRK) eingesetzt.
1991	Verhandlungsbeginn im Rahmen des INC. Eine Konferenz der Entwicklungs- und Schwellenländer in Peking lehnt Klimaschutzmaßnahmen durch Entwicklungsländer ab. G7 in London unterstützt den UNCED-Verhandlungsprozeß.
1992	IPCC-Zwischenbericht zum Stand der Klimaforschung. Einigung des INC auf eine KRK, Unterzeichnung der Konvention auf der UNCED in Rio de Janeiro. Weiterverhandlung im INC und Vorbereitung der ersten Vertragsstaatenkonferenz (COP).
1993	Verhandlungen im INC.
1994	Die KRK tritt in Kraft. Fortführung der Verhandlungen im INC zur Vorbereitung der ersten COP in Berlin. Sonderbericht des IPCC zum Stand der Forschung.
1995	Erste COP in Berlin und Verabschiedung des Berliner Mandats über Verhandlungen über ein Klimaschutzprotokoll,d.h. ein eigenständiges Abkommen auf Grundlage der KRK, das im Rahmen der ad hoc Gruppe Berliner Mandat (AGBM) ausgehandelt wird. Auf- und Ausbau der Organisationsstruktur der KRK [Sekretariat,[g] Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA), Subsidiary Body for Implementation (SBI)]. Zweiter IPCC-Wissenschaftsbericht zum Stand der Forschungen zu Klimaveränderungen, ihren Auswirkungen und über Strategien.
1996	Verhandlungen über ein Protokoll im Rahmen des AGBM. Zweite COP in Genf.
1997	Februar/März und Juli/August: Fortführung der Verhandlungen des AGBM in Bonn. Juni: Rio + 5 Konferenz (UNGASS). Oktober: Fortführung der Verhandlungen des AGBM (Bonn). Dezember: Dritte COP in Kyoto, Vereinbarung eines Protokolls.
1998	Juni: Treffen der KRK Subsidiary Bodies in Bonn zur Vorbereitung der COP. November: Vierte COP in Buenos Aires .

nach: Loske 1996; Fischer 1992; danach: Internet-Quellen. Internet-Adressen: [a]http://www.wmo.ch/ [b]http://www.unep.ch/ [c]htpp://www.imcp.jussieu.fr/icsu [d]http://www.un.org [e]http://www.ipcc.ch [f]http://www.wri.org/ [g]http://www.unfccc.de/

Tabelle 1 Wichtige Stationen der internationalen Klimapolitik

Klimaschutzpolitik ist zu einem großen Teil Energiepolitik (vgl. Mez, 1996), denn der Energiesektor setzt weltweit deutlich mehr als die Hälfte aller THG-Emissionen und etwa 80% der Kohlendioxid- (CO_2) Emissionen frei. Trotzdem kann Klimaschutz nicht bei der Energiepolitik stehenbleiben, sondern muß als Teil einer Politik konzipiert werden, deren Ziel „zukunftsfähige Entwicklung" (sustainable development) ist, die Versöhnung von weltweiter wirtschaftlich-sozialer Entwicklung und Umwelt- und Naturschutz (vgl. Huber, 1995; Binswanger, 1995; Harborth, 1991). Globaler Wandel und zukunftsfähige Entwicklung sind zwei Seiten derselben Medaille, die der Probleme und die der (noch visionären) Problemlösung. Diesem Themengeflecht widmete sich die UNCED, auf der neben der KRK noch weitere wichtige Dokumente unterzeichnet bzw. verabschiedet wurden, die zu zukunftsfähiger Entwicklung führen sollen[4]. Es sind die Konvention zum Schutz der biologischen Vielfalt; eine nur politisch bindende Deklaration über Prinzipien für eine ökologische, wirtschaftliche und soziale Entwicklung der Staaten; die ebenfalls nur politisch bindende Agenda 21, die zahlreiche umwelt- und entwicklungspolitisch relevante Probleme aufgreift und zu deren Umsetzung eine Kommission für nachhaltige Entwicklung (CSD)[5] beitragen soll, die dem Wirtschafts- und Sozialrat der UNO (ECOSOC) nachgeordnet ist; ferner einigte man sich auf eine Erklärung zum Waldschutz, da Einhelligkeit über eine verbindliche Waldkonvention nicht zu finden war; auch über eine Konvention zum Schutz vor Wüstenbildung wurde in der Vorbereitungsphase der UNCED ergebnislos verhandelt - sie konnte erst 1994 vereinbart werden.

Mit diesen Dokumenten wurde ein Prozeß eingeleitet, der darauf gerichtet ist, zukunftsfähige Entwicklung konkreter zu definieren und Schritte zu ihrer Umsetzung in den Staaten anzuregen. Zu diesem Prozeß gehören auch, erstens, internationale Konferenzen über die Entwicklung kleiner Inselstaaten[6], über Bevölkerung und Entwicklung[7], die soziale Entwicklung[8], über den Schutz wandernder Fische vor Überfischung[9]; ferner die Weltfrauenkonferenz[10] und die Konferenz über das Siedlungswesen (Habitat)[11], aber auch der Welternährungsgipfel[12]. Zweitens gehört dazu u.a. die Fortführung von Verhandlungen auf der Grundlage der Artenschutzkonvention, der Wüstenkonvention und der Klimakonvention, um ihre Bestimmungen zu verschärfen bzw. zu präzisieren. Außerdem wird im Rahmen der CSD über die Ausgestaltung der Agenda 21 gesprochen. Eine erste, eher ernüchternde Bilanz aller dieser Anstrengungen wurde auf einer Sondergeneralversammlung der UNO im Juni 1997, der Rio + 5 Konferenz[13], gezogen.

Der anthropogene Treibhauseffekt ist also nur *ein* Thema auf der umfassenden Tagesordnung, die mit der UNCED verabschiedet wurde. Er hat aber eine besondere Bedeutung: Denn der Treibhauseffekt berührt fast alle anderen Probleme, da jede anthropogene Aktivität mit der Freisetzung von THG verbunden ist. Deshalb können sie nur bewältigt werden, wenn auch die anderen Konferenzen und Abkom-

---

[4] Zugang zu Informationen über „Nachhaltigkeit" bietet http://www.itas.fzk.de/deu/infum/infum.htm; ferner http://www.mbnet.mb.ca/linkages/; vgl. auch Messner/Nuscheler (Hrsg.), 1996.

[5] http://www.un.org/esa/sustdev/csd.htm.

[6] April-Mai 1994; verabschiedet wurde u.a. ein Aktionsprogramm und eine Deklaration.

[7] Die dritte Konferenz zu diesem Thema fand im September 1994 in Kairo statt.

[8] März 1995 in Kopenhagen; sie endete mit einer Erklärung zur Abschaffung der Armut.

[9] 1995 wurde ein internationale Vereinbarung zu ihrem Schutz abgeschlossen.

[10] September 1995; verabschiedet wurde ein Aktionsprogramm und die Pekinger Erklärung.

[11] Juni 1996; vgl. zur Agenda und zur Istanbuler Erklärung http://www.unhabitat.org/.

[12] November 1996; verabschiedet wurde eine Erklärung vom Rom und ein Aktionsplan (s. dazu die Internet-Seite der Welternährungsorganisation der UNO: http://www.fao.org/).

[13] Vgl. zu der fünf Jahre nach Rio durchgeführten United Nations General Assembly Special Session (UNGASS) http://www.un.org/dpcsd/earthsummit/.

men spürbare Erfolge bringen. So ist eine umweltverträgliche Stadtentwicklung (Habitat) eine Voraussetzung, um die THG-Emissionen aus dem Verkehrs- und dem Haushaltssektor unter Kontrolle zu halten, und nur ein wirksamer weltweiter Waldschutz kann diesen wichtigen Speicher von CO_2 bewahren. Zweitens, die wesentlichen Lebensgrundlagen und die meisten Aktivitäten der Menschen sind direkt oder indirekt vom Klima beeinflußt. Hier kann der Treibhauseffekt kann nicht nur neue Probleme hervorrufen, etwa überraschende regionale Klimaänderungen[14], sondern auch vorhandene Probleme verschärfen, indem die Belastungen für die Wälder durch Veränderungen der Temperatur und der Niederschläge erhöht, die landwirtschaftliche Produktion beeinflußt[15], die Chancen für eine Entwicklung kleiner Inseln reduziert und weltweite Probleme, z.B. durch hohe, ungesteuerte Migration[16], verschärft werden. Wer also durchgreifenden Klimaschutz fordert, muß sich der vielfältigen Verflechtungen mit anderen Problemen bewußt sein - auch wenn der Energiesektor ganz an der Spitze steht.

Konsequenter Klimaschutz ist daher der Ruf nach global zukunftsfähiger Entwicklung: Soll Klimapolitik erfolgreich sein, müßte sie Querschnittspolitik werden, alle Politikbereiche und Staaten beeinflussen - davon ist sie aber noch weit entfernt (vgl. Loske, 1996, S. 294ff). Denn es nicht so, als zögen die Staaten oder die innerstaatlichen Interessengruppen an einem Strang, um das Risiko von Klimaänderungen zu reduzieren, oder als stünden die Regierungen unter dem Druck einer aktiven, um das Klima besorgten Bevölkerung. Das zeigte sich schon bei der Aushandlung der KRK und findet heute in der Klimaschutzpolitik eine Fortsetzung, die ihren Schwung und ihre gesellschaftliche Aufmerksamkeit zu verlieren scheint[17]. Während darüber, wie wahrscheinlich anthropogene Klimaveränderungen sind, weniger kontrovers diskutiert wird, ist schon strittiger, wie ausgeprägt und gefährlich ihre Folgen sein könnten[18], und welche Richtung und Geschwindigkeit die Klimaschutzpolitik einschlagen soll. Zwar ist mit der KRK die Vorsorgestrategie, d.h. eine Verhütung von Klimaveränderungen durch Emissionsreduzierung, in den Vordergrund gerückt. Sie ist aber nicht die einzige denkbare Strategie: Staaten könnten sich auch auf die Eindämmung der Folgen von Klimaveränderungen konzentrieren und dann mit (vorgeplanten oder kurzfristig konzipierten) nationalen oder mit international abgestimmten Maßnahmen reagieren, sobald sich Auswirkungen des Treibhauseffektes abzeichnen. Modellrechnungen sprechen dafür, daß ohnehin Anpassungsmaßnahmen nötig sind, da eine Temperaturerhöhung durch die Emissionen der Vergangenheit „schon eingekauft" ist. **Tabelle 2** stellt die beiden Grundstrategien und ihre Ausprägungen vor. Auch nach Kyoto ist nicht endgültig klar, wohin der Zug der internationalen Klimaschutzpolitik fährt.

---

[14] Vgl. das Interview mit Prof. Schellnhuber in der Süddeutsche Zeitung v. 18.8.98 über ein denkbares „Abschalten" des Golfstromes, was einen erheblichen Temperatursturz in Europa nach sich ziehen würde.

[15] Vermutlich werden einige Regionen ihre landwirtschaftliche Produktion steigern können, während andere zurückgehende Erträge aufweisen werden. Ob sich Anstieg und Rückgang global gesehen die Waage halten, ist umstritten (vgl. das Europäische Forschungsnetzwerk http://www.enrich.halo.hi.is/, die FAO http://www.fao.org/ und UNEP http://www.unep.ch/).

[16] Einen guten Zugang (auch) zu Informationen über Migration bietet http://www.oneworld.org/.

[17] Zum Stand der Klimaschutzpolitik vgl. Kopfmüller/Coenen 1997; Sprinz/Luterbacher, 1996; Brauch, 1996; Krägenow, 1996; Loske 1996; Müller-Kraenner, 1996; Simonis (Hrsg.) 1996.

[18] Die Einschätzung der Gefährdung durch Klimaänderungen ist wichtig, da nach Artikel 2 KRK die THG-Konzentrationen auf einem Niveau stabilisiert werden sollen, das eine *gefährliche* Störung des Klimasystems verhindert. Eine *ungefährliche* kann folglich geduldet werden.

Reaktive Politik			Präventive Politik	
Anpassungsstrategien		Interventionsstrategie	Absorptionsstrategien	Reduktionsstrategien
Spontane Anpassung	*geplante Anpassung*	*„Klima- und Geo-Engineering"*	*Sektorale Strategien*	*Umfassende Strategie*
Küsten-, Bodenschutz; Bewässerung arider Gebiete; Anpassungsprogramme für die Land- und Forstwirtschaft; Migration etc.*		Aktive gezielte Beeinflussung des Klimasystems z.B. durch „Düngung der Ozeane", Ausbringung von Aerosolen in die Atmosphäre	Schutz der Wälder und andere THG-Speicher; Erhöhung der Senkenkapazität durch Aufforstung.	Erhöhung der Energieproduktivität, Substitution von Energieträgern; Verzicht auf klimaschädliche Produkte und Aktivitäten.

Nach: Loske, 1996, S. 70. * Die Maßnahmen können lange vorbereitet umgesetzt (geplante Anpassung) oder unter dem Druck der Umstände (spontane Anpassung) durchgeführt werden. Die „Kosten" verteilen sich in beiden Substrategien sehr unterschiedlich. Das gilt insbesondere für die inter-generationale Verteilung.

Tabelle 2 Klimaschutzstrategien

Warum sind die internationale Umweltpolitik generell und der Klimaschutzpolitik speziell so schwierig, warum sind heute die Grundrisse einer „Weltumweltpolitik" (Simonis, 1996) erst skizzenhaft erkennbar und müssen deren Bausteine noch mühsam zusammengetragen werden?

Eine Grund liegt darin, daß bislang nicht klar ist, welche Kosten wir heute in Kauf nehmen wollen, um Gefahren für künftige Generationen abzuwenden. Diese ethische Grundfrage, ohne die Politik nicht handeln, die aber von Politik alleine nicht beantwortet werden kann, sondern alle gesellschaftlich Handelnden und jeden einzelnen Menschen betrifft, bildet den Hintergrund jeglicher (Klima-) Politik (vgl. Fischer, 1996)[19]. Daß sie nur zögernd beantwortet wird, hängt auch mit der Dimension der Herausforderung zusammen: Klimaänderungen sind noch zu fern, um als eine Bedrohung wahrgenommen zu werden, die einflußreiche Akteure abwenden wollen. Um das Problem zuzuspitzen: Bis heute läßt sich die Gruppe von Menschen, die direkt einen Nutzen vom Klimaschutz hat, nur sehr vage als „künftige Generationen" oder die „Menschheit als ganze" beschreiben. Diejenigen aber, denen die Schutzmaßnahmen unmittelbar Geld kosten würden, die ihre Gewinne geschmälert sehen oder die um ihre Lebensweise fürchten, sind zahlreich und warten direkt in der Lobby des Verhandlungsgebäudes[20]. Schließlich bringen die Merkmale der internationalen Politik zusätzliche Schwierigkeiten. Klimaschutz erfordert die Kooperation zumindest der großen Emittententenstaaten. Sie zu erreichen, ist eine Herkulesaufgabe, denn ihre Ziele, Interessen und Werte müssen abgestimmt werden, und die Thematik ist komplex.

Zugleich sind die nationalen politischen Systeme seit Jahren in einer Struktur- und Leistungskrise, die sich heute mit der beschleunigten internationalen Verflechtung, für die das Schlagwort „Globalisierung" geprägt wurde, weiter verschärft (vgl. Beck, 1997; Narr/Schubert, 1994; Brock/Albert, 1995; Neyer, 1995). Die Spielräume der Politik werden durch die global agierenden Kapital-und Investitionsströme[21] sowie durch große transnationale Unternehmen beschnitten. Die Frage, was Politik überhaupt noch steuern kann angesichts einer scheinbar außer Rand und Band geratenden gesellschaftlichen, wirtschaft-

[19] Vgl. Ökumenischer Rat der Kirchen, Zeichen der Gefahr, Bewährung des Glaubens, beschleunigter Klimawandel, Genf 1991; http://www.ekd.de (dort via EKD-Adressen).

[20] So ein Korrespondent im Earth Negotiations Bulletin, Heft 45 vom 10.3.1997, S. 9.

[21] Der Gründer des World Business Council for Sustainable Development, Stephan Schmidheiny, verweist darauf, daß die Finanzmärkte heute nur in Bereiche investieren, die in kurzer Zeit einen hohen Gewinn abwerfen - das Gegenteil von dem, was für nachhaltige Entwicklung nötig ist (Neue Zürcher Zeitung vom 22.3.1997).

lich-technischen Entwicklung, die von den Entscheidungen weniger großer Finanzgesellschaften, Banken und Unternehmen vorangetrieben wird, stellt sich immer schärfer und hat auch für die Klimapolitik eine zentrale Bedeutung. Verfügt die Politik überhaupt noch über Mittel und Instrumente, um diese mächtigen Akteure weltweit in Richtung auf eine emissionsarme Wirtschaft zu lenken?

Mit dem drohenden Treibhauseffekt ist das Spannungsverhältnis von staatlicher Organisation der Politik, transnationalen Wirtschafts- und Finanzmärkten, von politischem Teil- und ökologischem Gesamtsystem deutlich geworden. Ob es der Politik wirklich gelingt, weltweit einen Rahmen vorzugeben, in den sich die wirtschaftliche und soziale Dynamik so einfügt, daß sie nicht die Grenzen der ökologischen Tragfähigkeit der Erde durchbricht[22], ist offen. Sicher aber ist, und da stimmen große Teile der Wissenschaft und viele Staaten überein, daß das, was mit der KRK vereinbart wurde, unzulänglich ist, um ein zentrales globales Risiko, den Treibhauseffekt, abzuwenden. Damit endet der Konsens. Darüber, wer wie rasch und tiefgreifend handeln soll, gibt es, wie Kyoto zeigte, erhebliche Kontroversen.

2. Die Klimarahmenkonvention

Ausgangspunkt der Kontroversen sind die Bestimmungen der KRK und dort insbesondere der Artikel 4. Er beschreibt die Pflichten, die auch nach dem Kyoto-Protokoll ihre Gültigkeit behalten, soweit sie nicht für die Mitglieder des Protokolls fortgeschrieben bzw. spezifiziert wurden:

- *Alle Staaten* müssen u.a. über ihre THG-Emissionen berichten, Politiken und Maßnahmen zur Minderung des Treibhauseffektes ergreifen[23].
- Die *entwickelten* und andere *Länder*, die in einem Annex 1 aufgezählt werden[24], müssen darüber hinaus u.a. Strategien, Politiken und Maßnahmen zur Begrenzung ihrer THG-Emissionen und zum Schutz bzw. Ausbau ihrer THG-Senken und Speicher entwickeln und das Ziel verfolgen, bis zum Ende diese Jahrzehntes die Emissionen auf das Niveau von 1990 zu reduzieren[25]. Die erste Konferenz der Vertragsstaaten wird diese Verpflichtungen vor dem Hintergrund neuester wissenschaftlicher Informationen prüfen und gegebenenfalls neue Maßnahmen einleiten.
- Die *entwickelten Industriestaaten*, die im Annex 2 genannt sind[26], verpflichten sich, neue und zusätzliche finanzielle Ressourcen bereitzustellen, um die zusätzlichen Kosten der Entwicklungsländer abzudecken, die ihnen im Zusammenhang mit ihren Pflichten entstehen. Sie werden alle praktikablen Schritte unternehmen, um den Technologietransfer zu fördern und zu finanzieren.

Es fällt auf, daß die Staaten verschiedenen Pflichten unterworfen sind, was dem Gedanken der unterschiedlichen Verantwortung für die drohenden Klimaveränderungen entspricht, und diese Pflichten eher vage formuliert sind: Die Industriestaaten müssen nur das Ziel *verfolgen*, ihre Emissionen zurückzufüh-

---

[22] Es gibt nicht *die* genau zu bestimmende *Grenze der Belastbarkeit der Erde*. Jedoch sollten erkannte Gefahren abgewendet und erhebliche Risiken vorsorgend vermieden werden.

[23] Kein Gegenstand der KRK sind die Gase, die im Montrealer Protokoll zum Schutz der stratosphärischen Ozonschicht erfaßt sind. Vgl. dazu Breitmeier, 1996.

[24] Dazu gehören die Staaten, die 1992 Mitglieder der Wirtschaftsgemeinschaft OECD waren, mittel- und osteuropäische Länder, die baltischen Staaten; Rußland, Ukraine und Weißrußland.

[25] Die ersten Nationalberichte der Annex-1-Staaten sind unter http://www.unfccc.de zu finden. Deutschland hat im Frühjahr 1997 den 2. Bericht veröffentlicht; vgl. http://www.bmu.de.

[26] Die damaligen OECD-Mitglieder sowie die Europäische Gemeinschaft (Europäische Union).

ren; Entwicklungsländer müssen nur informieren, *wenn* die OECD-Staaten ihnen dabei Hilfe leisten; die OECD-Staaten sollen beim Technologietransfer nur alle *praktikablen* Schritte tun. Hier bleibt genug Raum für Dissens. Schließlich gibt es in der KRK zahlreichen Verweise auf „besondere Lagen" von Staaten, die einen Vorwand für manches Nichtstun im Klimaschutz bieten. Es überrascht nicht, daß Umweltschützer und einige Staaten schon 1992 über solche Bestimmungen unglücklich waren und sich schärfere, klarere Regelungen gewünscht hätten. Anderen Ländern, etwa den Ölexporteuren, gingen sie indes schon zu weit, und für die USA waren sie das äußerste, was sie mitzutragen bereit waren. Daher ist in der KRK, wie in einem Schnappschuß, das festgehalten, auf das sich die Staaten Anfang der 90er Jahre einigen konnten. Aber die KRK ist, und das ist in ihr festgeschrieben, nur der Startpunkt der internationalen Klimaschutzpolitik, die Prozeßcharakter haben soll und die sich institutionell verfestigt hat, was ihr Überlebensfähigkeit auch in schweren Zeiten für den Klimaschutz gibt (vgl. Fischer/Holtrup 1998). Im Rahmen dieser prozeßhaften Klimaschutzpolitik wurden mit den drei Vertragsstaatenkonferenzen in Berlin (1995), Genf (1996) und Kyoto (1997) schon drei wichtige Schritte zurückgelegt: Im Mittelpunkt der Aktivitäten der Jahre 1995-97 stand die Ad hoc Gruppe für das Berliner Mandat (AGBM), die die Aufgabe hatte, für Kyoto einen Vorschlag zur Verschärfung der Pflichten zu erarbeiten. In der AGBM trafen die widersprüchlichen Interessen und Ziele der Staaten vehement aufeinander. Man muß sie kennen, um die schwierige Konsensfindung in Kyoto zu verstehen.

3. Interessen und Akteure in der Klimapolitik

Loske (1996, S. 256) verweist darauf, daß sich in den 90er Jahren eine Verschiebung des Koordinatensystems der Klimapolitik durch die weltpolitischen und weltwirtschaftlichen Umbrüche ergeben hat, wodurch dem Klimaschutz ein kälterer Wind entgegenweht: „Stand globale Umweltpolitik an der Jahrzehntwende noch relativ weit oben auf der internationalen Agenda (...), änderte sich dies mit dem Kollaps der realsozialistischen Welt, dem wirtschaftlichen Aufstieg Asiens und der einsetzenden Krise der Weltwirtschaft deutlich. (...) Klimapolitisch bedeuteten diese Veränderungen des Umfeldes vor allem, daß selbst ehedem moderate Positionen wie die Rückführung der CO_2-Emissionen bis 2000 auf das Niveau von 1990, plötzlich als weitreichend und nur schwer erreichbar galten. Anspruchsvolle Ziele, wie das 'Toronto-Ziel',[27] das sich verschiedene OECD-Staaten immerhin als nationales Ziel gesetzt hatten, wurden nur noch von sehr wenigen Akteuren ernsthaft in die internationalen Verhandlungen eingebracht." (Loske, 1996, S. 257).

Vor diesem Hintergrund sollen grundlegende Ziele der wichtigsten Staaten bzw. Staatengruppen beleuchtet werden, die die seit 8 Jahren geführten Verhandlungen prägen[28]. Sicherlich kann man nicht einfach von „der Politik der Staaten" reden. Denn sie sprechen oft nicht mit einer Stimme, es gibt Konflikte innerhalb der Regierung (Müller, 1997) und zwischen Interessengruppen, die unterschiedliche Vorstellungen über Richtung und Geschwindigkeit der Klimapolitik haben (Sprinz/Luterbacher, 1996), und ein Regierungswechsel kann einiges ändern. Trotzdem zeigen sich Konstanten, die darauf hindeuten, daß sich bestimmte Konzepte und Interessen in den nationalen Klimapolitiken langfristig durchgesetzt haben. Diese Politiken werden mit anderen Staaten abgestimmt, um ihnen mehr Durchschlagskraft zu geben. Die so entstandenen, relativ stabilen Gruppierungen umfassen die USA und einige mit ihnen

---

[27] Abbau der CO_2-Emissionen um 20% bis zum Jahre 2005 (der Autor).

[28] Zugang zu Regierungsquellen über Umweltpolitik bietet http://www.envirolink.org/envirogov.html. Speziell für die USA: http://www.epa.gov/; für die EU http://www.europa.eu.int/index.htm; für Japan http://jin.jcic.or.ip/today/gover.html; für Rußland http://www.gov.ru/; für China http://www.ihe.org/.

verbundene Industriestaaten, die EU, China und die Gruppe der Entwicklungsländer, die aber z.T. heterogene Ziele verfolgen; dazu kommt, wenig engagiert, Rußland.

In den Augen der Öffentlichkeit, der NGOs[29] und vieler Politiker waren die USA sowohl bei den Verhandlungen über die KRK als auch in Kyoto *der* (recht erfolgreiche) *Bremser* einer wirksamen internationalen Klimaschutzpolitik. Die USA konnten Positionen durchsetzen, weil die Staaten diesen größten THG-Emittenten in eine Konvention einbinden wollten und die USA starke Unterstützung bei anderen Staaten fanden: Die anderen Mitglieder der sog. JUSCANZ-Gruppe Japan, Kanada, Australien und Neuseeland traten mit auf die Bremse. Federführend waren die USA, die mit Blick auf Kyoto lange die Festlegung verbindlicher quantitativer Ziele und Zeiträume zum Klimaschutz zu verhindern suchten und erst im Oktober 1997 einen eigenen, heftig kritisierten konkreten Vorschlag machten.

Die Klimapolitik der USA wird von den Strukturen des amerikanischen Energiesystems geprägt, das eine hohe, steigende Nachfrage durch möglichst preisgünstige Energieträger abdecken soll. Aber noch andere Hindernisse und Befürchtungen stehen einer wirksamen Klimaschutzpolitik, die in den USA vorrangig Energiepolitik sein muß[30], im Wege:

- Gesellschaftliche Rahmenbedingungen: Interessengruppen, die Kohle-, Ölindustrie und die Automobil- und Kohlearbeitergewerkschaften fürchten, ein Klimaprotokoll werde die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt beeinträchtigen, ohne den globalen Emissionsanstieg zu bremsen. Mit Fernsehspots versuchten Interessengruppen, die Bürger auf die Ablehnung eines Protokolls einstimmen[31].
- Politisch-institutionelle Faktoren: Der außenpolitisch zunehmend unbeleckte, auf innenpolitische Stimmungen fixierte Senat, der ein Klimaprotokoll ratifizieren muß, hat die „Ambition, eine globale Umweltpolitik zu definieren", die seinen Vorstellungen entspricht (Christian Science Monitor v. 9.12. 1997). Der Senat, der mit einer Delegation in Kyoto vertreten war, lehnte vor Kyoto in einer Resolution für die USA kostspielige Vereinbarungen ab und forderte, daß Entwicklungsländer zur Reduzierung der THG-Emissionen beitragen müssen[32]. Seine Haltung ist nur vor dem Hintergrund der Ablehnung zu verstehen, die im Senat und in großen Teilen der Öffentlichkeit einer „bürokratischen, von Entwicklungsländern dominierten UNO und ihren Konferenzen" entgegenschlägt. Man will nicht, daß den USA marktferne „künstliche Standards" übergestülpt werden, die von einem „UNO-Mandat stammen"[33]. Bislang versuchte Vizepräsident Al Gore vergeblich, den heißen Sommer 1998, ein „Beleg" für den Treibhauseffekt, als öffentliches Druckmittel dafür zu nutzen, die Meinung der Kongresses zum Kyoto-Protokoll zu ändern.
- Makroökonomische Faktoren: Die anhaltende wirtschaftliche Dynamik dürfe, so Kritiker des Klimaschutzes, nicht durch kostspielige energiepolitische Maßnahmen abgeschwächt werden.

---

[29] Zur Einschätzung der Klimapolitik der OECD-Staaten durch NGOs vgl. Climate Network Europe, Independent NGO Evaluation of National Plans for Climate Change Mitigation. Fifth Review, September 1997. Bruxelles (E-mail: canron@gn.apc.org oder singer@wwf.de).

[30] 85 % aller in den USA freigesetzten THG sind, bezogen auf den Erwärmungseffekt, CO_2, das fast ausschließlich aus der Nutzung fossiler Energieträger stammt.

[31] Während 1989 noch ca. ein Drittel der Bürger den Klimaschutz als vorrangiges Problem sahen, tun das heute weniger als 20%. Jedoch scheint eine Mehrheit die sehr zurückhaltende Regierungspolitik nicht zu teilen. Vgl. Die Welt v. 3.12.97; http://www.cnn.com vom 1.12.97.

[32] Vgl. Resolution 98 des Senates, 105th Congress, 1st Session, 1997; Text via Internet-Adresse http.//www.senate./gov/~rpc/rva/1051/1051205.htm.

[33] So der republikanische US-Senator Chuck Hagel (Christian Science Monitor v. 9.12. 1997).

- Kulturelle Rahmenbedingungen: Die (Auto-)Mobilität der Menschen, die durch Klimaschutzmaßnahmen, so die Furcht, bedroht wird.
- Strukturell-geographische Rahmenbedingungen: Die Größe des Landes, der damit verbundene intensive Verkehr, die weiträumigen Siedlungsstrukturen, aber auch der deutliche Zuwachs der Bevölkerung, zumeist durch Einwanderung, der den Energieverbrauch steigert.

Aus diesen Gründen sind die Reaktionen auf das Klimaproblem von wirtschaftlich-industriellen Erwägungen und der Furcht vor einer spürbaren Erhöhung der unpopulären Steuern auf Energien geprägt. Auch die Regierung Clinton, von der sich Klimaschützer eine Wende in der Politik erhofften[34], modifiziert nur zögernd die abweisende Politik der Administration Bush, die der UNCED ihren Stempel aufgedrückt hatte. Trotzdem verharrt diese Politik nicht auf einem Fleck: Die USA haben schon lange ein nationales Programm zur Luftreinhaltung. Es zeigt deutliche Erfolge, und außer bei Stickoxiden (NO_x), deren Emissionen wegen des starken Verkehrs seit etwa 20 Jahren auf einem stabilen, hohen Niveau verharren, lag bei allen anderen Luftschadstoffen der Höhepunkt der Emissionen um das Jahr 1970. Seither weisen sie einen zurückgehenden Trend auf (EPA, 1996)[35]. Das Luftreinhaltungsprogramm zielt aber nicht auf die Reduktion von CO_2 und begrenzt diese Emissionen nur mittelbar, etwa durch Effizienzsteigerungen oder eine Veränderung des Energiemix. Diese Aufgabe hat der nationale Aktionsplan von 1993, der ein Rückführen der Nettoemissionen[36] aller THG im Jahre 2000 auf das Niveau von 1990 vorsah. Das wird nicht gelingen, und dafür ist der starke Anstieg des Energieverbrauchs verantwortlich, der die CO_2-Emissionen seit 1990 um ca. 7 % nach oben trieb. Für die Zeit nach 2000 zeichnet sich ein weiterer Anstieg ab. Deshalb versuchte die US-Regierung in Kyoto, schärfere Reduktionsziele und -zeiten, die speziell zum Abbau der CO_2-Emissionen zwingen, abzuwenden, da neue, mit Kosten verbundene Maßnahmen nötig wären, für die in den USA eine breite Unterstützung fehlt. Trotzdem bewegt sich aus einer Reihe weiterer Gründe, verglichen mit der Bush-Phase, die Klimapolitik: Der Einfluß derjenigen Wissenschaftler, die der These des anthropogenen Treibhauseffektes skeptisch gegenüberstehen, ist als Folge personeller Veränderungen *innerhalb* der Administration gesunken. Außerdem findet die Umweltbewegung, deren Einfluß z.Zt. zwar schwach ist, in der Regierung einige Unterstützer, etwa Innenminister Bruce Babbit. Es gibt mehr moderne Umweltschutzindustrien, die sich neue Absatzmärkte erhoffen, und das Aktionsprogramm hat innovative Maßnahmen ausgelöst, etwa experimentelle Joint Implementation-Projekte, d.h. die gemeinsame Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen durch Staaten (vgl. Banholzer, 1996)[37].

Vor diesem Hintergrund lehnten die USA im AGBM ein Protokoll zwar nicht per se ab, hielten sich aber bedeckt und stellten die Prinzipien ihrer Politik, zu denen insbesondere „Flexibilität" zählt, in den Vordergrund: Die USA wollen Regelungen, die es erlauben, ohne ein starres zeitliches und inhaltliches Korsett kostengünstige Maßnahmen zum Klimaschutz dann umzusetzen, wenn es die geringsten Kosten

---

[34] Die Hoffnungen schienen begründet, denn Vizepräsident Al Gore hatte in seinem beachteten Buch (Gore, 1992) wesentliche Positionen der Umweltschützer übernommen bzw. beeinflußt.

[35] Die wesentlichen Ergebnisse finden sich im Internet unter: http://www.epa.gov/.

[36] Nettoemissionen = freigesetzte THG (Bruttoemissionen) abzüglich der in Senken absorbierten Gase, z.B. durch das Anpflanzen von Bäumen, die CO_2 absorbieren. Die Berechnung dieser Absorptionen ist jedoch schwierig und für Außenstehende oft schwer zu überprüfen.

[37] Ausführliche Information zu JI unter der Internet-Adresse: http://www.ji.org/.

macht. Aus verhandlungstaktischen Gründen legte Präsident Clinton den Vorschlag für eine Klimaprotokoll erst am 22. Oktober 1997 vor. Zentrale Punkte waren[38]:

- Das bindende vertragliche Ziel, in dem Zeitraum („Budgetperide") der Jahre 2008-2012 das Niveau der Emissionen von 6 THG des Jahres 1990 zu erreichen und in der Fünfjahresperiode nach 2012 die Emissionen etwas zu reduzieren, ohne genauere Angaben zu machen[39].
- Beteiligung von Entwicklungsländern am Klimaschutz als Voraussetzung für die Bereitschaft der USA, bindende Pflichten zu übernehmen.
- Umfassender nationaler und internationaler Handel mit THG-Emissionsrechten nach einer Dekade der Experimente.
- Außerdem war der Präsident die bereit, ein nationales 5 Mrd. US-$-Programm für Forschung und Entwicklung, für Steueranreize und internationale Zusammenarbeit zu starten, um energiesparende Technologien durchzusetzen (ihm muß noch der US-Kongreß zustimmen). Zudem sollen in Kooperation mit der Industrie der USA Pläne zur Emissionsminderung entwickelt werden. Damit sie zügig handelt, sollen rasche freiwillige auf spätere verbindliche Reduktionen angerechnet werden.

Die Reaktionen auf diesen Vorschlag, von dem nur ein Teil in Kyoto durchgesetzt wurde, waren gespalten. Ohne Zweifel überwogen die kritischen Stimmen aus Staaten und NGOs. So baute Greenpeace einen symbolischen Damm aus Sandsäcken am Versammlungsort des AGBM, um gegen den „Klimaschutz made in USA" zu demonstrieren. Aber zumindest bei einer wichtigen NGO, dem Environmental Defense Fund (EDF) der USA, wurden Elemente des Vorschlags gewürdigt und anerkannt, daß die USA nun wieder ein ernsthafter Mitspieler im Verhandlungsgeschehen wurden[40] und der Clinton-Vorschlag, gemessen am Emissionstrend, zu einer Einsparung von THG-Emissionen, je nach Szenario, von 20 bis 30 % führen kann. Pferdefüße des Vorschlags, etwa der faktische Verzicht auf einen Abbau der THG-Emissionen, gemessen am Basisjahr 1990, und das Beharren auf dem nicht konditionierten internationalen Handel mit Emissionsrechten, waren aber nicht zu übersehen: Würde ein solches Konzept ohne weitere Bedingungen vereinbart, könnten Staaten z.B. von Rußland Emissionsguthaben kaufen, da dort die Emissionen von CO_2 um ca. 1/4 und die aller THG um etw 5 % unter denen des Basisjahres 1990 liegen. Faktisch dürften die Emissionen dann in den Käuferstaaten weiter steigen, dem Klimaschutz wäre nicht gedient. Auch die EU machte deutlich, daß sie einen Emissionshandel mit *solchen* Resultaten nicht akzeptieren würden.

Ähnlich wie die der USA ist die Haltung der anderen JUSCANZ-Staaten, die z.T. Exporteure von Kohle (Australien) oder Öl (Kanada) sind. Sie exponieren sich weniger, aber sie stützen die abwehrende Klimapolitik der USA. Zwar haben sie vor Jahren (z.T. wieder aufgegebene) nationale Klimaschutzziele verkündet, die von einer Stabilisierung der CO_2-Emissionen pro Kopf bis zum Jahre 2000 auf dem Niveau von 1990 (Japan)[41] bis hin zum Abbau der Emissionen um 20 % reichen (Kanada, Australien)[42]. Die Umsetzung ist aber ausgeblieben, so daß die Emissionen in den JUSCANZ-Staaten steigen.

---

[38] Vgl. http://www.whitehouse.gov/Initiatives/Climate/proposal.html.

[39] Clinton verzichtete im letzten Augenblick darauf, eine Reduktion der Emissionen um 5% bis zum Jahre 2017 zu verkünden, um in Kyoto Manövrierraum zu haben.

[40] Greenpeace: http://www.greenpeace.org; EDF: http//www.edf.org.

[41] Diese im Rahmen des Aktionsprogrammes zur Einhegung des Treibhauseffektes verkündete Ziel hätte einer Erhöhung der absoluten CO_2-Emissionen Japans um 3 Prozent entsprochen.

In Japan, dem zweitwichtigsten Land dieser Gruppe, kämpft die Regierung gegen eine Wirtschafts-, Struktur- und Finanzkrise. Lange hatte ein Konflikt zwischen dem klimaschutzskeptischen Ministerium für Industrie und Handel, MITI, und dem Außenministerium bzw. der einflußarmen Umweltagentur, die weitergehende Schutzmaßnahmen wollten, eine klare Strategie im AGBM erschwert. Dieser Dissens ist ein Ausdruck der Ambivalenz japanischer Politik: Einerseits hat die Industrie die höchste Energieeffizienz der Welt, so daß weitere Reduktionen des CO_2-Ausstoßes nur noch mit hohem Kostenaufwand zu erreichen wären, der die ohnehin schrumpfende Wettbewerbsfähigkeit und Wirtschaft Japans weiter schwächen könnte. Anderseits könnte eine Klimaschutzpolitik auch Anstöße geben für neue (exportfähige) Technologien und weitere Effizienzsteigerungen, durch die auch die Milderung eines großen sicherheitspolitischen Problems Japans möglich würde, nämlich die Abhängigkeit von Erdölimporten. Der erst im Oktober 1997 vorgelegte komplizierte Vorschlag Japans[43], der für das Land nur eine Reduzierung der THG-Emissionen von maximal 2,5 % innerhalb der nächsten 15 Jahre bedeutet hätte, die vor allem mit dem Ausbau der Kernenergie erreicht werden soll, zeigt einerseits die Macht von MITI, andererseits aber das Interesse des Gastgebers an einem Kompromiß in Kyoto.

Festzuhalten bleibt: In der JUSCANZ-Staatengruppe sind Versprechungen gemacht worden, an deren Einhaltung kaum gearbeitet wurde (Loske, 1996, S. 269). Sie ist aber so wichtig, daß internationale Klimaschutzmaßnahmen gegen ihr Votum nicht sinnvoll sind.

Nicht nur die einzelnen Mitgliedsstaaten, sondern auch die Europäische Union als Gemeinschaft ist ein Mitglied der KRK (und nun auch des Protokolls) und unterwirft sich ihren Bestimmungen. Das hat zwei Folgen: Die THG-Emissionen der EU sollen gemeinschaftlich zurückgeführt werden, und die EU-Staaten sind gezwungen, ihre Klimapolitik zu koordinieren, wollen sie international als fähig zum Kompromiß und zum geschlossenen Handeln erscheinen. Politisch ist die EU *der* Gegenspieler der JUSCANZ, und sie möchte, nicht zuletzt auf Druck der klimapolitisch besonders aktiven Staaten (Deutschland, Niederlande, Dänemark, Österreich, Schweden und seit wenigen Jahren auch Großbritannien) als klimapolitischer Vorreiter und zugleich Förderer eines breiten Einvernehmens aller Staaten gelten. Der EU-Ministerrat[44] hatte festgelegt daß die Gemeinschaft ihre CO_2-Emissionen im Jahre 2000 nicht über das Niveau von 1990 steigen lassen wird. Die EU-Kommission[45] hatte dazu dem Ministerrat eine Reihe von Vorschlägen gemacht. Jedoch bleibt bis heute die Umsetzung praktischer Schritte sehr zögerlich, und insbesondere ein Herzstück des Konzeptes der Kommission, die kombinierte CO_2-/Energiesteuer, fand nicht die Zustimmung aller Staaten und wurde deshalb bislang nicht in der EU eingeführt. Daher ist es unklar, ob die EU das Klimaschutzziel erreicht (vgl. Mitchell, 1996, S. 172), und für die Zeit nach dem Jahre 2000 zeichnet sich ohne neue Klimaschutzmaßnahmen ein deutlicher Anstieg der Emissionen ab, insbesondere wegen der Zunahme des Straßenverkehrs[46]. Trotz der nur zögerlichen praktischen Klimaschutzpolitik sahen die Vorreiterstaaten das EU-Ziel als unzulänglich an.

---

[42] Australien gab sein Ziel auf und wandelte sich vom Paulus zum Saulus; die in der Klimapolitik von den Provinzen abhängige Regierung Kanadas wollte die Emissionen nur noch um 3% bis 2010 (Basisjahr 1990) reduzieren.

[43] Vgl. das Außenministerium http://www2.nttca.com:8010/infomofa/global/home.html.

[44] Der Ministerrat ist das Entscheidungsorgan der EU und setzt sich aus den Vertretern der Regierungen aller Mitgliedsstaaten zusammen, in der Regel den Fachministern.

[45] Diese supranationale Exekutive ist für Koordination, Verwirklichung und Durchführung der Gemeinschaftsziele verantwortlich, kann aber nicht gegen den Willen der Staaten entscheiden.

[46] So die EU-Umweltagentur am 6.9.96 (http://www.eea.dk/); vgl. auch den Kommissionsbericht über die Emissionsperspektiven unter http://europa.eu.int/eu/comm/dg17/clima_en.pdf.

Nach schwierigen Verhandlungen[47] gelang auf der Ministerratssitzung vom März 1997 ein Durchbruch, der im Prinzip auf den „flat-rate"-Ansatz aufbaut, aber die besonderen Lagen von EU-Staaten berücksichtigt. Die EU schlug daraufhin im AGBM den anderen Industrieländern vor, in einem Protokoll festzulegen, die Emissionen von 3 THG (CO_2, Methan [CH_4], Distickstoffoxid [N_2O]) individuell je Staat oder gemeinsam im Verbund mehrerer Staaten um 15 % bis zum Jahre 2010, gemessen am Referenzjahr 1990, zu reduzieren. Die EU selbst wollte die Emissionsreduktion gemeinschaftlich durchführen. Außerdem sollte ein Zwischenziel für das Jahr 2005 vereinbart und sollten im Protokoll bestimmte Politiken und Maßnahmen zum Klimaschutz verbindlich festgelegt werden, die überprüfbar zur Reduktion der THG-Emissionen beitragen[48]. Eine vollständige EU-interne Verteilung der Reduktion um 15 % stand aber noch aus[49], da sie zwischen den EU-Staaten strittig war. Denn sie weisen sehr unterschiedlich hohe Emissionen, auch pro Kopf, auf (s. Tabelle 2). Die Ursachen dafür sind vielfältig: unterschiedliche wirtschaftliche Entwicklungsniveaus, Industriestrukturen und Abhängigkeiten von der Kohlenutzung; differierende technologische Kapazitäten; Unterschiede der Größe, der Siedlungsdichte und des Verkehrs sowie die Lage in verschiedenen Temperaturzonen. Einige Staaten konnten sich daher, wie die folgende Tabelle ausweist, mit der Forderung durchsetzen, daß sie ihre Emissionen erhöhen dürfen. Außerdem verwiesen Frankreich, Schweden und Finnland erfolgreich auf ihre niedrigen CO_2-Emissionen pro Kopf, Folge ihrer von Kern- und Wasserkraft dominierten Stromerzeugung, die einen weiteren Abbau der Emissionen wirtschaftlich unvertretbar machen würden. Vor diesem Hintergrund hatte sich der Ministerrat im März 1997 zumindest auf die interne Verteilung von 10 % der vorgeschlagenen 15 % der Reduktion geeinigt. Da das Kyoto-Protokoll mit einer Reduzierung von 8 % weniger scharf als der EU-Vorschlag ausfiel, war nicht nur nicht die Verteilung der fehlenden 5 % überflüssig, sondern konnten sogar vom bisherigen Verteilungsschlüssel Abstriche gemacht werden. So einigte sich der EU-Ministerrat im Juni 98 nach einigen Kontroversen auf eine endgültige interne Verteilung der Kyoto-Pflichten (**Tabelle 3**).

Wie in JANZUS ist in den EU-Staaten eine Kluft zwischen Anspruch und Wirklichkeit zu erkennen: Das gilt für die gemeinschaftliche Politik wie auch für die nationalen Klimapolitiken. Einige Staaten verfolgen keine solche Politik, und partielle Erfolge, etwa in Dänemark, Großbritannien und Deutschland, sind oft Nebeneffekte anderer energiepolitischer Aktivitäten[50] oder ein Geschenk historischer Umstände[51]. Gerade die deutsche Klimapolitik wird von einigen Regierungen hämisch und von Experten skeptisch betrachtet. So betont z. B. Mitchell (1996), daß die Lücke zwischen Deklaration und Umsetzung augenfällig ist, und eine Reduktion der deutschen CO_2-Emissionen um 25% gemäß der nationalen Selbstverpflichtung wird ohne zusätzliche Maßnahmen nicht gelingen (Diekmann u.a. 1997). Deutsch-

---

[47] Kontrovers war u.a., ob die Staaten jeweils ihre Gesamtemissionen um einen bestimmten Prozentsatz abbauen („flat-rate"-Ansatz), oder ob Reduktionen auf einem differenzierten pro-Kopf-Ansatz aufbauen sollen, der die unterschiedliche Höhe der Emissionen in den EU-Staaten berücksichtigt. Hier reproduzierte sich ein Aspekt der internationalen Diskussion über Flexibilität innerhalb der EU.

[48] Der Vorschlag war keine Selbstverpflichtungen, sondern nur eine EU-Verhandlungsposition.

[49] Die interne Verteilung war nicht Teil des EU-Vorschlages im Rahmen der AGBM.

[50] Die Privatisierung der britischen Elektrizitätswirtschaft hat die Steinkohle zurückgedrängt und u.a. die Nutzung des kohlenstoffärmeren Erdgases in der Stromerzeugung gestärkt. Seit Anfang der 90er Jahre stieg der Anteil von Gas an der Stromerzeugung von 2% auf ein Drittel.

[51] Der starke Rückgang der CO_2-Emission in den neuen Ländern als Folge des Zusammenbruchs der Industrien hat den leichten Anstieg der Emissionen in den alten Ländern kaschiert. 1996 stieg erstmals wieder (z.T. wegen des kalten Winters) der deutsche Ausstoß insgesamt.

land und die EU können ihren Ruf als richtungsweisende Klimaschützer nur bewahren, wenn die deklaratorische Politik durch entschlossenere praktische Klimaschutzmaßnahmen ergänzt wird.

Es wäre wichtig, daß die EU konzeptionelle und praktische Erfolge beim Abbau ihrer Emissionen vorweisen kann (vgl. Loske, 1996, S. 280ff), denn:

- nur dann ist ihre Glaubwürdigkeit bei den Entwicklungsländern und ihre Vorreiterrolle in der internationalen Politik gewährleistet;
- die EU umfaßt Staaten mit vielfältigen Unterschieden, politischen Kulturen, wirtschaftlich-technischen und institutionellen Handlungskapazitäten. Sie ist damit ein Mikrokosmos der Klimapolitik. Zeigt sie ihre interne Konsens- und Handlungsfähigkeit, kann sie ein Vorbild für einen globalen Nord-Süd-Ausgleich in der Klimapolitik abgeben. Deshalb ist die EU-Klimaschutzpolitik nicht nur Innenpolitik, sondern sie hat international ein beachtliches Gewicht und symbolische Bedeutung.

Rußland ragt als der für die Klimapolitik mit Abstand wichtigste Nachfolgestaat unter den Ländern der Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) hervor[52]. Der Rückgang der russischen CO_2-Emissionen seit 1990 um ca. 25 % hat zu einer Abflachung des Anstiegs der weltweiten CO_2-Emissionen geführt. Obwohl es keine russische Klimaschutzpolitik gibt[53], die 1995 verkündete russische Energiepolitik bislang nur geringe Folgen zeigt und die Regierung hinsichtlich der Gefahren des Treibhauseffektes eher eine gelassene Position einnimmt, liegen die Emissionen Rußlands angesichts des wirtschaftlichen Einbruchs weit unter dem, was die KRK (und nun das Kyoto-Protokoll) verlangt:

[52] Die mittelasiatischen GUS-Staaten gelten heute als Entwicklungsländer, meist mit niedrigem Einkommen, vergleichbar Indien, Nigeria oder China. Sie verfolgen keine aktive Klimapolitik.

[53] Die Nationale Strategie zur Bewahrung der Umwelt und für nachhaltige Entwicklung, die 1995 per Dekret von Präsident Boris Yeltsin erlassen wurde, hat nur wenige praktische Folgen. Das beklagen auch russische NGOs, vgl. http://www.cci.glasnet.ru/.

Staat	Emissionen von CO_2 / Kopf 1995[1]	EU-interne Verteilung der Reduktionspflichten gemäß Artikel 4 des Kyoto-Protokolls auf die EU-Staaten[2]			
		Zunahme der Emissionen in %		*Abnahme der Emissionen in %*	
		Ministerrat 3/97[3]	*Ministerrat 6/98[4]*	*Ministerrat 3/97[3]*	*Ministerrat 6/98[4]*
Belgien	11			10	7,5
Dänemark	10			25	21
Deutschland	13			25	21
Finnland	11	+ / - 0		+ / - 0	
Frankreich	6,6	+ / - 0		+ / - 0	
Griechenland	8	30	25		
Großbritannien	10			10	12,5
Irland	9	15	13		
Italien	7,5			7	6,5
Luxemburg	31			30	28
Niederlande	12			10	6
Österreich	7,5			25	13
Portugal	4	40	27		
Schweden	7	5	4		
Spanien	6	17	15		

[1] Auf- und abgerundet; Vergleich: USA 20, Kanada 18, Japan 9,5 Tonnen.

[2] CO_2-Äquivalente, bezogen auf das Basisjahr 1990, berechnet in Global Warming Potential (GWP) über 100 Jahre gewichtet.

[3] Ministerratsbeschluß vom März 97 über die vorläufige EU-interne Verteilung des Reduktionszieles gemäß EU-Vorschlag in Kyoto, bezogen auf 3 THG (CO_2, CH_4, N_2O); die festgelegten nationalen Ziele hätten die EU-Emissionen jedoch nur um 10 % reduziert; die interne Verteilung der verbleibenden 5 % war noch strittig.

[4] Ministerratsbeschluß vom Juni 98 über die endgültige EU-interne Verteilung des Reduktionszieles gemäß Kyoto-Protokoll um 8 % zum Zeitraum 2008-12 bezogen auf 6 THG (CO_2, CH_4, N_2O, Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFCs), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFCs) und Schwefelhexafluorid (SF_6).

Tabelle 3 Interne Verteilung der Reduktionspflichten auf die EU-Staaten

Frühestens für 2010 wird erwartet, daß die Emissionen von 1990 wieder erreicht werden. Aber selbst das ist unwahrscheinlich, wenn eine (erhoffte) wirtschaftliche Entwicklung mit einer klugen Energiepolitik kombiniert wird, die einige der Potentiale für Effizienzsteigerung ausschöpft, die auf insgesamt 40 % des Primärenergieeinsatzes von 1990 geschätzt werden (Martin/Imai/Steeg, 1997, S. 71). Nutzt Rußland auch nur einen Teil seiner Möglichkeiten, könnte es im Rahmen des Kyoto-Protokolls freie Emissionsrechte an andere Annex-1-Länder verkaufen. Hier gibt es schon erste Kontakte zu Japan, und die USA gehören ebenfalls zu den Interessenten. Ebenso wichtig wird für Rußland die gemeinsame Umsetzung (JI) von Pflichten sein, die sich zu einem Schlüssel für die Modernisierung des russischen Ener-

giesektors entwickeln könnte. Im Rahmen der amerikanisch-russischen „Gore-Chernomyrdin-Kommission" gibt es dazu Überlegungen.

China, heute der zweitgrößte CO_2-Emittent mit einem jährlichen Zuwachs zwischen 4 bis 7 %, hat in der Klimapolitik eine selbstbewußte Politik verfolgt, die von der chinesischen Führung in dem größeren Zusammenhang der Ziele der Entwicklungsländer gestellt wird. China lehnt für die absehbare Zeit bindende Verpflichtungen zur Limitierung von THG-Emissionen für sich und andere Entwicklungsländer ab und hat sich bislang damit durchgesetzt. Die Industriestaaten seien für das Klimaproblem verantwortlich, und die energiepolitischen bzw. ökonomischen Implikationen einer Klimaschutzpolitik für China wären erheblich. Denn das Land hängt als größter Kohleproduzent der Welt von diesem Energieträger ab, und es gibt Pläne, die Kohleproduktion von ca. 800 Mio. auf ca. 1400 Mio. Tonnen Steinkohleeinheiten (SKE) im Jahre 2010 zu erhöhen, um die chronisch knappe Energieversorgung, ein Hemmschuh für die in einigen Regionen dynamische Wirtschaft, zu verbessern (vgl. IEA, 1996, S. 43ff). Deshalb erwarten viele Experten, trotz einiger Erfolge bei der Verbesserung der Energieeffizienz, daß die CO_2-Emissionen steigen werden: Näherungswerte sind 1.4 Mrd. Tonnen Kohlenstoff (bei einer entschlossenen Politik zur Reduktion der Emissionen) und 1.7 Milliarden Tonnen, falls solche Erwägungen keine Rolle spielen. In der chinesischen Regierung wächst die Einsicht, daß der Energieeinsatz nicht mehr mit der Geschwindigkeit wie bisher wachsen kann, sondern durch die Verbesserung der Effizienz abgebremst werden muß[54]. Denn der finanzielle Aufwand für die Erschließung und den Transport der Energierohstoffe wächst schnell, und die ökologischen Probleme werden auch aus der Sicht des Regimes immer drängender (vgl. Bechert, 1995). Dies wurde in einem offiziösen „Weißbuch über Bevölkerung, Umwelt und Entwicklung im 21. Jahrhundert" im Jahre 1994 deutlich. Zu den vorrangigen Problemen gehören danach aber weniger die globalen Gefährdungen (stratosphärischer Ozonabbau, anthropogener Treibhauseffekt), sondern die lokalen und regionalen Belastungen für Menschen und Umwelt (Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Staubbelastung). Daher verfolgt die chinesische Regierung keine ausdrückliche nationale Politik der Minderung von THG-Emissionen und wird keiner internationalen Klimaschutzpolitik zustimmen, die ihre Souveränität über die Energie- bzw. Kohlepolitik substantiell beschränkt. Denn Ziel der chinesischen Politik ist, so gibt das Weißbuch zu erkennen, die „sauberere Nutzung" der Kohle, nicht aber die (international gelenkte) Begrenzung ihres Einsatzes. Trotzdem gibt es Bewegung in der chinesischen Politik, die nicht monolithisch ist: In der Umweltbehörde NEPA, die im Sommer 1998 von einer Umweltabteilung des Staatsrates zu einem eigenständigen Ministerium aufgewertet wurde, zeigt sich eine vorsichtige, prinzipielle Bereitschaft, auch China langfristig und schrittweise an Klimaschutzpflichten heranzuführen, während das für Energiefragen zuständige Ministerium zurückhaltender ist (vgl. Umwelt 11/1997, S. 447f). Jedoch ist bei der Modernisierung des Energiesektors internationale Hilfe bzw. sind Investitionen erwünscht[55], und auch JI kann eine Rolle spielen, so daß als ein Nebeneffekt der Zuwachs von THG-Emissionen abgeflacht wird. Kurz- und mittelfristig stehen die Zeichen aber auf Anstieg: Der Übergang zur Marktwirtschaft zeigt, daß die regionalen Wirtschaftseliten der materiellen Entwicklung ihre ganze und dem Umweltschutz kaum Aufmerksamkeit widmen. Ohne eine Veränderung der internen politischen Bedingungen zugunsten des Umweltschutzes bleibt auch eine chinesische Marktwirtschaft ökologisch blind.

Der Begriff „Entwicklungsländer" wird heute kritisiert: Es gibt keine Einigkeit mehr darüber, was „Entwicklung" ist, und die Situation und die Perspektiven der Entwicklungsländer stellen sich recht heterogen dar. Es bilden sich Ländergruppen, die gemeinsame spezifische Probleme und vielfältige Un-

---

[54] Vgl. dazu http://eande.lbl.gov/EAP/groups.html (Lawrence Berkeley National Laboratory).

[55] China beteiligt sich an der Clean Coal Initiative; vgl. http://www.worldbank.org/.

terschiede zugleich aufweisen (vgl. Nuscheler, 1995). Für die KRK ist das aber insofern nicht wichtig, da sie eine klare (negative) Definition enthält: Alle Staaten, die nicht im Annex 1 aufgeführt sind, zählen zur Gruppe der Entwicklungsländer. Damit sind so unterschiedliche Staaten wie China, Brasilien, Indien, Uganda, Togo, Samoa, Südkorea, Saudi-Arabien und Bangladesh unter einem Hut. Es überrascht dann weder, daß in den USA und in anderen Staaten die Stimmen lauter werden, auch einige dieser Staaten zu Klimaschutzmaßnahmen zu verpflichten, noch daß dieser heterogene Klub nur einen begrenzten Konsens findet, den die in der Gruppe der 77 (G 77) zusammengeschlossen Staaten in Absprache mit China, das der G 77 nicht angehört, erreichen müssen. Gemeinsam vertraten die Entwicklungsländer drei Forderungen, die bislang in Verhandlungen immer durchgesetzt wurden: Erstens, keine *Verpflichtungen* für sie zur Begrenzung von THG-Emissionen oder zur Durchführung von Politiken und Maßnahmen, da das ihre Entwicklung behindern würde[56]. Zweitens, wirkungsvolle Klimaschutzmaßnahmen müssen von den Industriestaaten durchgeführt werden, da ein Bewohner der Industriestaaten pro Kopf oft mehr als das zehnfache der Emissionen als ein Mensch in Entwicklungsländern freisetzt. Drittens, Maßnahmen in den Entwicklungsländern sind nur denkbar, wenn sie durch die Industriestaaten finanziert werden. Jedoch nahm mit Argentinien im Oktober 1997 erstmals ein Land offiziell davon Abstand, als Präsident Menem beim Besuch von Bill Clinton erklärte, daß die Entwicklungsländer mit den Industriestaaten die Verantwortung teilen müßten, die THG-Emissionen zu limitieren. Noch scheint das keine breite Unterstützung zu finden,[57] und die Industriestaaten haben ihre besondere Verantwortung auch anerkannt. Aber es gibt Bewegung, und die alte Position der G 77 wird sich auf Dauer nicht mehr aufrechterhalten lassen. Dafür gibt es auch Gründe, denn die Zuweisung unterschiedlicher Verantwortung zwischen „Nord und Süd" ignoriert nicht nur den wachsenden Beitrag des Südens zu den Emissionen, sondern auch, daß neben der pro-Kopf-Diskrepanz zwischen Nord und Süd auch eine *zwischen* den Entwicklungsländern besteht - etwa zwischen Südkorea und Bangladesh[58]. Dazu kommt eine erhebliche Diskrepanz *innerhalb* dieser Länder, nämlich zwischen einer energiekonsumierenden schmalen Ober- und Mittelschicht und der Masse der sozial Schwachen und Verelendeten[59]. Solche Ungleichheiten sind bislang kaum thematisiert, und sie würden das Argument schwächen, die Emissionen der Menschen im Süden blieben per se hinter denen aus dem Norden zurück.

Über diesen Minimalkonsens hinaus gelang es dem „Süden" bis kurz vor Beginn der Kyoto-Konferenz nicht, sich auf die Unterstützung eines Vorschlages für ein Klimaprotokoll zu einigen. Dafür verantwortlich war die Gegnerschaft zwischen den Mitgliedern der nur noch 11 Staaten umfassenden Organisation der erdölexportierenden Staaten (OPEC) und der aus 36 Staaten bestehenden Allianz der kleinen Inselstaaten (AOSIS). Die OPEC-Staaten sind entschiedene Gegner eines Klimaprotokolls, wenn dadurch der Absatz von Erdöl geschmälert wird und die Preise für Erdöl(produkte) langfristig verfallen. Deshalb sucht die OPEC die Kooperation mit Ländern und NROs aus der Kohle- und Ölindustrie, die ebenfalls dem Klimaschutz skeptisch gegenüberstehen, und drängt auf die Zustimmung zu ihrer Forde-

---

[56] Daß Entwicklung und Umweltschutz vereinbar sind, betont dagegen die World Bank, 1992.

[57] In Kyoto mußte, um einen Konsens zu ermöglichen, die Forderung Argentiniens nach „freiwilligen Maßnahmen" der Entwicklungsländer in letzte Minute fallengelassen werden. Argentinien scheint aber zu beabsichtigen, das Thema in Buenos Aires erneut auf die Tagesordnung zu setzen.

[58] Die CO_2-Emission pro Kopf betragen 6,6 bzw. 0,3 metrischen Tonnen.

[59] Über diese innergesellschaftlichen Verbrauchsdifferenzen gibt es kaum Daten. Ein Anhaltspunkt ist die ungleiche Einkommensverteilung; vgl. Weltbank, 1992, S. 276f.

rung, man müsse den OPEC-Staaten einen Ausgleich für Einnahmeverluste zukommen lassen[60]. Jedoch ist ihr Einfluß geschrumpft. Eine konträre Interessenlage haben die kleinen Inselstaaten, die sich von einer Erhöhung des Meeresspiegels existentiell bedroht sehen. Die AOSIS propagiert einen tiefgreifenden Abbau der Emissionen in den Annex-1-Staaten und versucht, als potentielles Opfer des Überkonsums der Reichen eine Art Modellfall der Auswirkungen einer ungerechten Weltordnung auf den Süden zu verkörpern. Ihr unmittelbarer Einfluß auf den Verhandlungsprozeß ist gering, wird aber auf zwei Wegen ausgebaut: Indem die AOSIS die Bestimmungen der KRK nutzte, und förmlich ihren Vorschlag für ein striktes Klimaschutzprotokoll in den Verhandlungsprozeß einspeiste, und, zweitens, durch taktische Allianzen mit Staaten. So propagierte die AOSIS vor Kyoto ihre (nicht konsensfähigen) Vorstellungen, um andere - aus Sicht der Zauderer recht weitgehende - Vorschläge als Kompromiß erscheinen zu lassen. Außerdem arbeitet die AOSIS eng mit ihr gewogenen NROs zusammen, um so Regierungen zu beeinflussen. Trotz aller Interessengegensätze einigten sich OASIS und OPEC vor Kyoto darauf, einen von den Industrieländern zu speisender Kompensationsfonds zu fordern, aus dem alle Staaten entschädigt werden, wenn sie Schaden nehmen, ganz gleich ob durch Klimaänderungen oder durch Klimaschutzpolitik. Damit war der Weg frei für eine zumindest zeitweise gemeinsame Politik des „Südens" in Kyoto.

Zwischen den Extrempositionen der OPEC und AOSIS bewegt sich die große Zahl der Entwicklungsländer, die versuchen, ihre spezifischen Ziele in die Verhandlungsprozesse einzuspeisen. Dazu zählen (Loske, 1996, S. 263): Das Interesse von Exporteuren tropischer Hölzer, ihre Pläne zur wirtschaftlichen Nutzung ihrer Waldgebiete fortzuführen (z.B. Malaysia, Laos, Kambodscha, Burma, Indonesien); das Interesse, unbeeinflußt von äußeren Vorgaben ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen und für Investitionen attraktiv zu bleiben (industrielle Schwellenländer); das verbreitete Ziel, eine Einmischung in die inneren Angelegenheiten zu minimieren und nationalen Entwicklungsmodellen freien Raum zu lassen (China, Malaysia, Indonesien, Brasilien etc.). Trotzdem nehmen die meisten dieser Länder, darunter Indien[61], eine konstruktive Haltung in den Verhandlungen ein, insbesondere soweit es um die Festlegung international konsensfähiger Pflichten für die Industriestaaten geht. Ihre Kooperationsbereitschaft hängt ganz wesentlich von der Bereitwilligkeit der Industrieländer ab, finanzielle Mittel und technische Hilfe auf multi- oder bilateralem Wege zu leisten[62]. So wären viele Entwicklungsländer bereit, mit einigen Projekten zum Klimaschutz beizutragen, *wenn* sie extern finanziert wären, die Technologien zu präferentiellen Bedingungen geliefert würden, das wirtschaftliche Wachstum nicht behindert und sie zur Lösung drängender nationaler Umwelt- und Energieprobleme beitragen.

Aufstrebende junge Industriestaaten, etwa Südkorea oder Taiwan, unterstützen diese Ziele, haben aber darüber hinaus eigene Interessen. Da sie, trotz der aktuellen Krise, kaum noch Merkmale von Entwicklungsländer aufweisen, dürfen sie von den Industriestaaten auch keine finanzielle und wenig technische Hilfe zu präferentiellen Bedingungen erwarten. Statt dessen müssen sie befürchten, daß sie als eine der ersten Gruppen in die Verantwortung genommen werden, um ihre pro Kopf schon hohen und weiter wachsenden Emissionen zumindest zu begrenzen. Zwar betreiben sie z.T. schon nationale Umwelt-

---

[60] Daß dieser Wunsch nicht ganz unberechtigt und zudem für eine wirksame Klimaschutzstrategie sinnvoll sein kann, betont Massarat, 1994.

[61] Vgl. zu einigen der genannten Länder die Analysen in: IEA, 1996.

[62] Ein von G77/China gewünschter „Clean Development Fund" wurde in Kyoto vereinbart.

schutzprogramme[63], aber verbindliche Klimaschutzmaßnahmen wollen sie verhindern. Sowohl als Akteure als auch Objekte der Klimapolitik werden sie künftig stärker hervortreten.

4. Der Verhandlungsprozeß über ein Klimaschutzprotokoll

Diese langfristigen, nur mühsam veränderbaren Interessen bildeten die Fundamente für die Verhandlungspolitik der Staaten im AGBM, in Kyoto, und sie werden auf absehbare Zeit wirksam bleiben. In den Verhandlungen aber prallen Interessen nicht nur unvereinbar aufeinander, denn Verhandlungen sind Prozesse der Koalitionsbildung und der Veränderung von Standpunkten, die von allen Beteiligten auch Kompromisse erzwingen. Da die Medien über die Verhandlungen berichten und (internationale) Umweltgruppen zeitweise mit in den Verhandlungsräumen (in der Regel als Beobachter) sitzen, baut sich eine Erwartungshaltung und ein politischer Druck auf, der Staaten oft dazu zwingt, aufeinander zuzugehen, wollen sie sich nicht politisch isolieren. Dieser Prozeß hatte seit 1995 schon Annäherungen gebracht, auch wenn die wichtigsten Fragen zu Beginn der 3. COP noch ungeklärt waren, so daß ihr Scheitern alles andere als ausgeschlossen war.

Die erste COP im Frühjahr 1995 in Berlin eröffnete gemäß Art. 4.2.d der KRK die Möglichkeit, erstmals das, was mit der KRK erreicht wurde, kritisch vor dem Hintergrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse zu analysieren und Orientierungen für den Klimaschutz zu geben. Für die Weiterentwicklung der KRK stehen den Vertragsstaaten prinzipiell drei Möglichkeiten offen (Oberthür/Ott, 1995):

- Die Änderung der KRK. Sie erfordert die Zustimmung von 75 % der Vertragsstaaten - ein langwieriger, wenig erfolgversprechender Prozeß. Deshalb genoß dieses Verfahren kaum Unterstützung.
- Eine Erklärung durch die COP. Da sie völkerrechtlich nicht bindend ist, fand diese Option keine Unterstützung bei den Ländern, die schärfere und rechtlich bindende Pflichten wünschten.
- Die Verabschiedung eines Protokolls zur KRK. Zwar muß es als völkerrechtliche Verpflichtung von den Staaten ratifiziert werden. Jedoch macht die KRK bezüglich der dafür nötigen Zahl von Staaten keine Vorgaben, so daß eine COP frei entscheiden kann. Zudem kann sie flexible Verfahrensregeln für spätere Überarbeitungen des Protokolls festlegen, die eine Ratifizierung der Veränderungen überflüssig machen. Deshalb fand der Protokollansatz recht rasch Zustimmung.

Vor diesem Hintergrund verabschiedete die 1. COP nach langen Kontroversen das (rechtlich nicht verbindliche, sondern nur politisch orientierende) Berliner Mandat. Es umfaßte, erstens, die Feststellung, daß die bestehenden Pflichten nicht angemessen sind und ein Prozeß begonnen werden soll, der angemessenes Handeln für die Zeit nach dem Jahre 2000 ermöglicht, einschließlich einer Verschärfung der Pflichten der Annex-1-Länder. Zweitens soll dieser Prozeß (a) die Pflichten dieser Länder verschärfen, indem Politiken und Maßnahmen zum Klimaschutz erarbeitet werden, und (b) in einem Protokoll oder in einem anderen völkerrechtlich bindenden Instrument sollen für die Annex-1-Länder quantitative Reduktionsziele für bestimmte Zeithorizonte festgelegt werden. Dabei sollen Unterschiede in den Ausgangslagen, ökonomischen Strukturen, der Ressourcenausstattung etc. berücksichtigt werden. Drittens, Entwicklungsländer werden keinen neuen Verpflichtungen unterworfen, jedoch sollen sie die bestehenden Pflichten beschleunigt umsetzen. Alles das soll, so das Mandat, in dem AGBM, der zwischen den Vertragsstaatenkonferenzen tagt, konkretisiert, schriftlich fixiert und auf der 3. COP verabschiedet werden.

---

[63] So sieht der südkoreanische Umweltplan von 1995 u.a. den Einsatz effizienter Energieumwandlungstechniken vor, die - verglichen mit heutiger Technik - weniger CO_2 freisetzen.

Außerdem wurde in Berlin ein Konsens über eine Pilotphase für Joint Implementation erreicht. In äußerst schwierigen, kontroversen Verhandlungen konnte der Widerstand vor allem einiger Entwicklungsländer gegen JI insoweit überwunden wurde, als nun auf freiwilliger Basis alle Staaten an einer Pilotphase teilnehmen können, über deren Ergebnisse die teilnehmenden Staaten (auf der Grundlage noch festzulegender Kriterien) berichten sollen[64]. Auf Basis dieser Berichte und einer umfassenden Bewertung durch SBSTA und SBI soll bis zum Ende der Dekade geklärt werden, wie JI über die Pilotphase hinaus fortgeführt werden soll. Festgelegt wurde, daß während der Pilotphase die in den Projekten erreichten Emissionsminderungen keiner Vertragspartei angerechnet werden dürfen. Damit schien die Entscheidung über die Rolle von JI im Klimaschutz um einige Jahre verschoben zu sein.[65]

Der Verhandlungszug rollte nach der Berliner Konferenz weiter, aber weder die Gespräche im AGBM noch die 2. COP 1996 in Genf brachten einen Durchbruch auf dem Weg zu einem Klimaprotokoll. Immerhin einigte man sich in Genf darauf, daß ein Protokoll rechtlich verbindliche, quantifizierte Ziele für die Begrenzung der THG-Emissionen sowie signifikante Reduzierungsraten innerhalb bestimmter Zeiträume (Jahre 2005, 2010, 2020) enthalten soll. Dem stimmten erstmals die USA zu und bewegten sich damit auf die Mehrheit der Staaten zu. Freilich beharrten die USA darauf, diese Ziele mit flexiblen und marktorientierten Mitteln, etwa handelbaren Emissionsrechten, zu erreichen. Umstritten blieb, ob Politiken und Maßnahmen zum Klimaschutz, die recht ausgefeilt von der EU vorgeschlagen wurden, überhaupt vereinbart werden sollten, ob sie dann verbindlich und für alle Vertragsstaaten einheitlich gelten sollten, oder ob sich, ganz im Sinne einer flexiblen Klimaschutzstrategie, jeder Staat aus einem Katalog von Maßnahmen die auswählen kann, die nationalen Interessen und Möglichkeiten am besten entsprechen. Strittig blieb zwischen den Staaten auch, ob alle Annex-1-Staaten gleichen oder ob sie differenzierten, länderspezifischen Reduktionspflichten unterworfen werden sollen.

Auch die Sitzungen des AGBM im Verlauf des Jahres 1997 ebneten nicht den Weg für ein einvernehmliches Protokoll. Zwar wurde vom Sekretariat aus den Vorschlägen der Staaten ein Protokollentwurf zusammengestellt. Er enthielt aber noch immer viele Texte in Klammern oder offene Stellen, die den Dissens zwischen den Staaten ausdrückten. Nach der letzten Sitzungsrunde des AGBM im Oktober 97 waren so viele wesentliche Probleme offen, daß viele Delegierte und Beobachter zweifelten, daß sie in Kyoto noch geklärt werden können. Der Klimaschutzzug, so die Befürchtung, war dabei, in einen Sackbahnhof einzulaufen.

5. Die 3. Vertragsstaatenkonferenz in Kyoto

Als am 1. Dezember 1997 die 3. COP, an der Vertreter von 155 Staaten, 42 internationalen Organisationen und über hundert NGOs teilnahmen, begann, war Skepsis über die Erfolgsaussichten weit verbreitet. Dafür gab es gute Gründe, denn Welten lagen zwischen den die Verhandlungen prägenden Vorschlägen der EU, der USA und Japans. Und das überraschende (letztlich erfolgreiche) Drängen u.a. der USA in Kyoto auf differenzierte nationale Reduktionspflichten sowie auf die Einbeziehung von 6 statt drei THG[66] komplizierte die Verhandlungen weiter. Strittig waren weitere Punkte: Die Verpflichtung von Entwicklungsländern zur Begrenzung ihrer Emissionen und der Handel mit Emissionsrechten; ein mehrere Jahre umfassendes THG-Emissionsbudget, das auch die Möglichkeit eröffnen würde, die Emis-

---

[64] Für die Pilotphase wird der Begriff „Activities Implemented Jointly" (AIJ) verwendet. Damit sollte deutlich werden, daß JI noch kein anerkanntes Instrument der Klimaschutzpolitik ist.

[65] Jedoch wurde im Kyoto-Protokoll faktisch JI vereinbart, ohne den Abschluß der Pilotphase abzuwarten.

[66] Neben CO_2, CH_4 und N_2O die Verbindungsgruppen HFC, PFC und SF_6.

sionen zeitweise zu überziehen. Solche Vorschläge lagen auf der Verhandlungslinie vieler Staaten der Annex-1-Gruppe, die „Flexibilität in der Klimaschutzpolitik" forderten, ein Schlüsselbegriff in den Verhandlungen schon vor Kyoto (vgl. Ott, 1997). Hinter dem Begriff steckte zweierlei: Einmal die Nutzung flexibler Instrumente zur Umsetzung der Verpflichtungen (JI, Handel mit Emissionen), aber auch die Flexibilisierung der Pflichten der Staaten, d.h. unterschiedliche nationale Emissionspflichten[67]. Angesichts der Gefahr, daß, sollte man diesen vielfältigen Flexibilitätswünschen vorbehaltlos zustimmen, ein Protokoll einem Flickenteppich verschiedener, kaum noch überprüfbarer Pflichten gleichen würde, setzte die EU den Wünschen lange Widerstand entgegen. Er verlor aber schon vor Kyoto viel von seiner Überzeugungskraft, als die EU in ihrem Vorschlag von 1997 die gemeinschaftliche Emissionsminderung intern auf nur wenige Mitgliedstaaten verteilte. Kritiker verwiesen darauf, daß die EU damit faktisch ungleiche Reduktionspflichten für Staaten akzeptiert habe. Deshalb zeichnete sich schon vor Kyoto ab, daß eine Mehrheit auf „Flexibilität" beharrt - die spannende Frage war nur, was das konkret bedeuten würde.

Im Verlauf der Konferenz wurde klar, daß man sich auf ein Protokoll, sollte es überhaupt erreichbar sein, erst in den letzten Stunden einigen wird. Denn bei den zentralen strittigen Fragen erreichten die Delegationen keine Annäherung, die USA hielten aus taktischen Gründen substantielle Vorschläge zurück, und die Entwicklungsländer zeigten, unter Hinweis auf das Berliner Mandat, keinerlei Bereitschaft, für sich neue Pflichten zu übernehmen. Selbst der mit Spannung erwartete Auftritt von US-Vizepräsident Al Gore zu Beginn der entscheidenden Ministerverhandlungen hinterließ zwiespältige Gefühle: Einerseits machte der Vizepräsident deutlich, daß die USA darauf bestehen werden, daß ein Kyoto-Ergebnis „realistische Ziele und Zeiträume", „Marktmechanismen" und eine „substantielle Beteiligung von wichtigen Entwicklungsländern" beinhalten muß. Auch seien die USA darauf vorbereitet, einem „schlechten Vertrag" nicht zuzustimmen. Anderseits wies Gore die US-Delegation an, „erhöhte Verhandlungsflexibilität" zu zeigen, die jedoch nur ganz allmählich erkennbar wurde. Erst in letzter Stunde, nachdem man die Uhr anhielt, gelang in einem chaotischen Prozeß, der immer wieder von dem Konferenzvorsitzenden Raul Estrada, einem argentinischen Diplomaten, in geordnete Bahnen gelenkt wurde, einen Text zu verabschieden. Er enthielt wesentliche Elemente aus dem Forderungskatalog u.a. der USA (JI, Emissionshandel), während andere Forderungen (Verpflichtung von Entwicklungsländern) nicht durchgesetzt wurden. Zudem mußten die USA, aber auch Japan, über die von ihnen angestrebten Reduktionsziele hinausgehen. Auch die EU konnte einiges durchsetzen, etwa das Recht, die Emissionen gemeinschaftlich abzubauen, und sie verhinderte, gemeinsam mit Entwicklungsländern, das bedingungslose Festschreiben des Emissionshandels. Das Kyoto-Protokoll hatte das Licht der Welt erblickt.

Das Protokoll[68] umfaßt 27 Artikel sowie Annex A (Liste der 6 THG sowie der Emissionssektoren) und Annex B (Pflichten der Industriestaaten hinsichtlich ihrer Emissionsentwicklung). Es ist eng mit der KRK verwoben, einige Formulierungen wurden von dort übernommen, und das Protokoll nutzt die Organisationsstruktur der KRK. Nur wer Mitglieder der KRK ist, kann dem Protokoll angehören.

Artikel 1 enthält Definitionen, Artikel 4 beschäftigt sich (faktisch) mit der Stellung der EU, 5 mit dem nationalen System zur Kontrolle und Meldung der Emissionen, 7 mit der Berichtspflicht der Staaten, 8 mit der Überprüfung dieser Berichte und Artikel 9 mit der Prüfung der Hinlänglichkeit der Protokollpflichten. Artikel 10 verpflichtet nochmals alle Staaten der KRK, ihre Aufgaben gemäß Artikel 4 KRK

---

[67] Unklar bleibt auch nach der Vereinbarung des Protokolls, nach welchen Kriterien die Zuteilung von differenzierten THG-Reduktionszielen erfolgt (vgl. zum Problem: Ott, 1996).

[68] Text unter http://www.unfccc.de/.

zu erfüllen[69], Artikel 11 fordert Rücksicht auf besondere Lagen von Staaten und neues Geld für bzw. Technologietransfer in Entwicklungsländer. Die Artikel 13 ff befassen sich u.a. mit institutionellen Fragen wie den Aufgaben und der Stellung der COP[70], der Ergänzung des Protokolls, dem Stimmrecht auf Konferenzen und Fragen, die für die Zeichnung und das Inkrafttreten des Protokolls wichtig sind. Artikel 24 legt fest, daß das Protokoll erst dann in Kraft tritt, nachdem es von nicht weniger als 55 Staaten der KRK ratifiziert wurde, einschließlich von Annex-1-Staaten, die zusammen für 55 % der gesamten CO_2-Emissionen des Jahres 1990 verantwortlich sind[71].

Artikel 2 legt fest, daß die Annex-1-Länder die im Artikel aufgezählten, aber sehr allgemein formulierten Politiken und Maßnahmen zum Klimaschutz weiterentwickeln und umsetzen sollen [72]. Jedoch, und hier werden Bedenken u.a. der OPEC berücksichtigt, sollen sie so umgesetzt werden, daß schädliche Auswirkungen für Handel, Wirtschaft etc. minimiert werden. Artikel 3 beschreibt die Kernpflichten der Annex-1-Staaten: Alle zusammen sollen in dem Zeitraum der Jahre 2008-1012 die Emissionen von 6 THG um 5 %, gemessen am Basiswert 1990, reduzieren, wobei den Staaten gemäß Annex B unterschiedliche Pflichten, bezogen auf 1990, zugewiesen werden (s. **Tabelle 4**). Da die Staaten ihre Pflichten auch gemeinsam umsetzen können, reicht es aus, wenn die EU gemeinschaftlich ihre Emissionen um 8 % abbaut, so daß sie intern die Aufgaben so wie vereinbart verteilen kann (s. Tabelle 2). Sollte sie aber das gemeinschaftliche Ziel verfehlen, müssen die EU-Staaten für ihre nationale Reduktionspflichten gemäß Annex B geradestehen[73].

Fragen wirft die Formulierung des Artikels 3 auf, denn die Verpflichtung lautet, das *Ziel*[74] zu verfolgen, die Emissionen zu reduzieren. Dies erinnert an den Artikel 4, 2 (b) der KRK und läßt Raum für Diskussionen darüber, ob nicht auch das Verfehlen des Ziels - hat man sich „ehrlich bemüht" - vertragskonform ist. Außerdem dürfen die nackten Zahlen nicht isoliert betrachtet werden, denn *wie* die Staaten ihre Ziele erreichen und welche Rolle dabei der Emissionshandel[75], vor allem mit Rußland oder der Ukraine spielt, wird entscheidend sein. Prinzipiell läßt das Protokoll solchen Handel zu, wenn Artikel 16 u.a. ausführt: Die Staaten aus Annex B können am Emissionshandel teilnehmen, um ihre Verpflichtungen unter Artikel 3 zu erfüllen. Solcher Handel darf aber nur ergänzend sein zu den nationalen Bemühungen. Was das alles genau bedeutet, ist noch zu klären. Die COP in Buenos Aires soll hier ein Meilenstein sein.

Artikel 6 beschäftigt sich u.a. mit gemeinsamen Maßnahmen zur Emissionsminderung zwischen Annex-1-Ländern, d.h. JI, und formuliert Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um so erreichte Emissionsreduzierungen sich anrechnen lassen zu können und legt zudem fest, daß Richtlinien für die präzise Ausge-

---

[69] Hier werden auch die Entwicklungsländer an ihre Aufgaben erinnert, ohne ihnen neue Pflichten aufzuerlegen.

[70] Den Vertragsstaatenkonferenzen als Entscheidungsorgan kommt die zentrale Bedeutung bei der Klärung der vielen noch offenen Fragen zu, deren Lösung über die reale Bedeutung des Protokolls entscheidet.

[71] So verfügen z.B. die USA und Japan zusammen nur über etwa 39 % der CO_2-Emissionen. Sie allein könnten also das Inkrafttreten nicht verhindern.

[72] U.a. Erhöhung der Energieeffizienz; Schutz bzw. Ausbau von THG-Senken etwa durch Waldmanagement; Förderung zukunftsfähiger Landwirtschaft; Entwicklung und Bereitstellung neuer Technologien wie Erneuerbare, Abbau von subventionsbedingten Marktstörungen.

[73] Deshalb wurden im Protokoll spezielle „EU-Artikel" eingefügt, insbesondere Artikel 4.

[74] Im englische Text heißt es: „with a view to reducing their (...) emissions (...)".

[75] Er wird in Artikel 3, 10.-12. und besonders in Artikel 16 erwähnt.

staltung des Artikels noch erarbeitet werden müssen. Gleiches gilt für den Artikel 12, der den „Clean Development Mechanism" regelt, mit dem erstmals der „Süden" in JI eingebunden werden kann, ohne daß der begriff verwendet wird. Ein noch zu gründender Ausschuß wird Projekte zertifizieren, für deren Umsetzung diejenigen Staaten eine Gebühr zahlen müssen, die sich Emissionseinsparungen anrechnen lassen, die durch JI-Projekten in anderen Staaten erzielt wurden. Die so eingenommenen Gelder fließen u.a. in Projekte, die zukunftsfähige Entwicklung im Süden fördern. Offen ist, wer diesen Fonds verwaltet: Eine neue Institution (so die Entwicklungsländer), die Weltbank (Industriestaaten) oder die GEF, Global Environment Facility, (einige NGOs), die schon erfolgreich u.a. im Rahmen des Montrealer Protokolls zum Schutz der stratosphärischen Ozonschicht die zusätzlichen Kosten vor allem in Entwicklungsländern abdeckt, die bei der Umstellung auf FCKW-freie Produkte und Produktionsprozesse entsteht.

Reduktion				**Stabilisierung**	**Erhöhung**
um 8 % (bezogen auf 1990)	*um 7 % (bezogen auf 1990)*	*um 6 % (bezogen auf 1990)*	*um 5 % (bezogen auf 1990)*	*(Emissionen auf dem Niveau von 1990)*	*(bezogen auf 1990)*
Belgien Bulgarien* Dänemark Deutschland Estland* EU Finnland Frankreich Griechenland Großbritannien Irland Italien Lettland* Lichtenstein Litauen* Luxemburg Monaco Niederlande Österreich Portugal Rumänien* Schweden Schweiz Slowakei* Slowenien* Spanien Tschechien*.	USA	Japan Kanada Polen* Ungarn*	Kroatien*	Neuseeland Rußland* Ukraine*	Island 10 %, Australien 8 %, Norwegen 1%.

*Ökonomien im Übergang, Rücksichtnahme auf ihre besondere Lage ist gefordert.

Tabelle 4 Verteilung der Pflichten auf die Staaten bzw. die EU

Der Flexibilisierung dient auch die Einbeziehung von Senken in die Emissionsbilanz der Staaten, wobei nur solche Senken berücksichtigt werden dürfen, die, wie Aufforstung, auf direktes menschliches Handeln zurückzuführen sind und sie nach 1990 durchgeführt wurden. Staaten können also z.B. von ihren CO_2-Emissionen die Menge an CO_2 abziehen, die durch Aufforstung absorbiert wird. Einzelheiten müs-

sen aber noch geklärt werden, da u.a. die Berechnung der Absorption schwierig und wenig überprüfbar ist. Auf einer Sitzung von KRK-Gremien im Frühsommer 1998 in Bonn wurde das IPCC beauftragt, bis zum Jahre 2000 Vorschläge vorzulegen, wie eine sinnvolle, nachprüfbare Einbeziehung der Senken in die Emissionsbilanz aussehen könnte. Zur Flexibilisierung könnte auch die Einbeziehung der drei neuen Stoffgruppen in das Protokoll beitragen, falls sich eine kostengünstige Reduzierungen dieser THG, die 1-2 % der THG-Gesamtemissionen ausmachen, abzeichnet. HFC, ein FCKW-Ersatzstoff, PFC und SF_6 haben neben einem hohen GWP[76] wenige große, aber z.T. wachsende Anwendungsbereiche, auf deren Substitution sich das Interesse konzentrieren könnte.

Die Meinungen darüber, wie dieses Protokoll einzuschätzen ist, zeigten ein vertrautes Bild: Diejenigen, die weitreichende Forderungen stellen, waren enttäuscht[77], Verhandlungsführer sahen das Machbare erreicht[78], Beobachter betonten den Kompromißcharakter[79] und einige wirtschaftliche Interessengruppen sahen kaum erfüllbare Forderungen[80]. Nicht zu übersehen ist aber, daß die Aufgabe, die den Annex-1-Staaten gestellt ist, für einige von ihnen durchaus anspruchsvoll ist. Denn die Emissionen sind seit 1990 gestiegen, so daß sie das mit erledigen müssen, was sie eigentlich schon im Rahmen der KRK hätten tun müssen, aber versäumt haben. Außerdem würden die Emissionen ohne Maßnahmen nach dem Jahre 2000 weiter steigen, so daß auch dieser Trend abgefangen und umgekehrt werden muß[81]. Entscheidend wird sein, die potentiellen „Schlupflöcher" zu schließen: Bei Joint Implementation und Emissionshandel ist der Grat zwischen einem innovativen, kostensparenden Instrument und einem Werkzeug, mit dessen Hilfe man „heiße Luft" handelt, um ernsthaften Maßnahmen zur Emissionsminderung zu entkommen, sehr schmal. Daher ist die Festlegung der Randbedingungen und Einzelheiten ihrer Anwendung, die noch zwischen den Staaten auszuhandeln sind, eine zentrale Aufgabe der künftigen Klimaschutzpolitik. Außerdem darf, sucht man nach den dynamischen Kräften und den Widerständen im Klimaschutz, der Blick nicht starr auf Kyoto gerichtet, sondern muß das breitere Bild eines Klimaschutzregimes wahrgenommen werden, dessen vorläufige Bilanz freilich sehr gemischt ist.

6. Erfolge und Defizite der Klimaschutzpolitik

Die internationale Klimaschutzpolitik, die kaum eine Dekade zählt, hat durchaus beachtenswerte Erfolge vorzuweisen:

- Ein internationales Klimaschutzregime ist etabliert, das sich auf ein institutionelles Gerüst stützt, das an Bedeutung gewinnt. Inzwischen arbeiten 50 Personen im Klimasekretariat in Bonn, ihre Zahl soll auf 80 erhöht werden. Auch dies ist ein Novum in der internationalen Umweltpolitik, vergleicht man diese Zahl mit der durchschnittlichen personellen Besetzung von Sekretariaten anderer Umweltabkommen, die bei unter 10 Personen liegt. Die Institutionen der KRK haben ihre Gegenpole in einer wachsenden Zahl von staatlichen Institutionen, die auf nationaler Ebene mit Klimaschutz befaßt sind. Hier macht das Kyoto-Protokoll (Artikel 5) zudem weitere Vorgaben.

---

[76] Verglichen mit 1 CO2- hat 1 HFC-Molekül einen 140-11700fachen, 1 PFC einen 7000-24000fachen, 1 SF6 einen 24000fachen Erwärmungswert (atmosphärische Verweildauer 100 Jahre). Der Abbau von 1 Tonne SF6, entspricht also der Einsparung von 24000 T. CO2.

[77] Vgl. z.B. WWF (http://www.wwf.de), Greenpeace (http://www.greenpeace.de).

[78] Umweltministerin Merkel: „Ein Meilenstein", Pressmitteilung vom 11.12.97.

[79] Vgl. etwa Die Welt v. 12.12.97; Frankfurter Allgemeine v. 12.12.97; Frankfurter Rundschau v. 12.12.97.

[80] So die Stahlhersteller in Japan; http://cnn.com/EARTH/9712/11/climate/conf.reaction.reut/.

[81] Vgl. UNO Press Release v. 11.12.1997, http://www.cop3.de/fccc/info.indust.htm.

- Mit dem Kyoto-Protokoll sind erstmals materielle Pflichten für die Annex-I-Staaten über das Jahr 2000 hinaus verbindlich vereinbart worden.
- Der SBI, das Organ für die Überprüfung der Umsetzung der Vereinbarungen, findet wachsendes Interesse. Das läßt darauf schließen, daß das Augenmerk der Beteiligten bereits auf die nächste Stufe gerichtet ist, nämlich die praktische Umsetzung vereinbarter Schritte zum Klimaschutz in den Staaten und deren Überwachung (Verifikation). Damit das gelingt, wurde das Berichtswesen über die THG-Emissionen der Staaten verbessert.
- Erstmals wurde prinzipiell die Nutzung innovativer Instrumente (Joint Implementation, Emissionshandel, Budgetperiode) vereinbart, die - werden sie richtig angewandt und überwacht - eine kostengünstigere Umsetzung der Ziele ermöglichen.
- Das Bewußtsein in aller Welt für die Klimaproblematik ist gewachsen. Es gibt, neben den nationalen Politiken, eine wachsende Zahl von Aktivitäten substaatlicher Akteure (etwa Städte[82]), die z.T. in grenzüberschreitender Kooperation Klimaschutzpolitik betreiben.
- Dank der Klimaschutzpolitik ist es erstmals gelungen, die Energiefrage zu einem UNO-Thema zu machen: Die CSD wird sich im Jahre 2001 auf der Grundlage von Vorarbeiten einer zwischenstaatlichen Expertengruppe mit Fragen eines „zukunftsfähigen Energiesystems" befassen.
- Rege wissenschaftliche Aktivitäten bringen neue Einblick in das Klimasystem und seine Wechselwirkungen mit andern Umweltkompartimenten. Noch nie zuvor hat man sich so intensiv in internationaler wissenschaftlicher Kooperation einem Umweltproblem gewidmet. Es ist ungewöhnlich komplex, von großer wissenschaftlicher Unsicherheit geprägt, und seine Folgen für das wirtschaftliche und gesellschaftliche Zusammenleben auf diesem Planeten könnten langfristig schwerwiegend sein. Trotz dieser Unwägbarkeiten gelang es, Meilensteine in der Klimaschutzpolitik zu legen.

Trotzdem wiegt die Sollseite der Klimaschutzpolitik sehr schwer:

- Die meisten Staaten erreichen nicht einmal das, was mit der KRK erreicht werden sollte, nämlich die THG-Emissionen bis zum Jahre 2000 auf das Niveau von 1990 zurückzuführen - und das war ohnehin weit weniger als das, was vom IPCC gefordert wurde. Die THG-Emissionen steigen fast überall, und sogar Maßnahmen zum Klimaschutz, speziell im Energiesektor, die keine oder nur geringe Kosten bringen („no regrets"), werden oft nicht umgesetzt.
- Ein enges Verständnis von nationalen Interessen behindert die Konsensbildung. Von einer globalen Verantwortung ist wenig zu spüren. Das gilt auch für die EU, deren interne Abstimmung in der Endphase von Kyoto ebenso konfliktreich wie der EU-Prozeß zur Verteilung der Reduktionspflichten in der Vorphase von Kyoto und im Sommer 1998 war. Ohne den „geschenkten" Rückgang der deutschen Emissionen hätte der EU-Vorschlag für Kyoto wahrscheinlich sehr den Vorstellungen der JUSCANZ geähnelt.
- Das Protokoll bringt den Klimaschutz den vom IPCC anvisierten Reduktionszielen und -zeiten nur wenig näher, wichtige Probleme sind in dem Protokoll hinter Formulierungskompromissen verborgen und stehen weiter auf der Tagesordnung (vgl. Schafhausen, 1998): Sowohl die Bedingungen für den Emissionshandel als auch für JI-Aktivitäten zwischen den Annex-I-Staaten sind umstritten.

---

[82] Zum Klimabündnis, in dem europäische Kommunen und indigene Völker der Regenwälder zusammengeschlossen sind, vgl. die Internet-Adresse: http://www2..stadt-frankfurt.de/klima/.

Ähnliches gilt für den Clean-Development-Mechanismus und die Senkenfrage. „Konferenzbildende Maßnahmen", um alle diese Fragen einer Lösung näherzubringen, sind deshalb ein wesentliches Ergebnis von Kyoto. Angesichts ungeklärter Fragen ist offen, welches Land unter welchen Bedingungen das Protokoll zeichnet (bis spätestens März 1999) und dann auch ratifiziert. Deutschland, so Umweltministerin Merkel, ratifiziert nur, wenn die offenen Fragen des Emissionshandels zufriedenstellend geklärt sind. Zweifelhaft ist, ob die US-Regierung das Protokoll in seiner jetzigen Form überhaupt dem Senat vorlegt, da die Aussichten auf dessen Zustimmung zur Zeit eher gering sind.

- Die Einbindung von Entwicklungsländern und die Konditionen, unter denen das geschehen könnte, wird auch in den nächsten Jahren strittig sein. Die Notwendigkeit, diese Länder unter Berücksichtigung ihrer Probleme allmählich, aber zunehmend einzubinden (so auch UNO-Generalsekretär Annan, 1997), ergibt sich schon aus der schieren Menge an THG, die sie bald emittieren, auch wenn der pro-Kopf-Ausstoß unterdurchschnittlich bleibt[83]. Eine solche Einbindung wird aber politisch nur möglich sein, wenn die Industriestaaten zeigen, daß sie selbst reduzieren, die Einbeziehung von Entwicklungsländern vereinbar ist mit der Verbesserung der Lebensverhältnisse dort und finanzielle und technische Hilfe bereitstehen. Möglichkeiten, Umwelt- und Klimaschutz mit wirtschaftlich-sozialer Entwicklung zu verbinden, sind im Süden durchaus vorhanden[84].
- Das mögliche Hinauszögern der Inkraftsetzung des Protokolls und seine vielen offenen Probleme verhindern es, möglichst rasch, wie u.a. von Rückversicherungen und einigen Bänkern gefordert (vgl. Die Welt v. 4.12.97), längerfristige Perspektiven für den Klimaschutz festzuschreiben, damit die Kapitalanleger hinlängliche Planungssicherheit haben.
- Bedenklich stimmt, daß ein Gedanke verlorenzugehen droht (Jachtenfuchs, 1996), der Anfang der 90er Jahre auch die EU-Politik prägte, nämlich durch eine führende Position im Klimaschutz eine technologisch-gesellschaftliche Innovation auszulösen, die zum Vorteil auch im internationalen Wettbewerb gereicht. Zunehmend wird defensiv argumentiert, es fehlt das Vertrauen, daß sich ökologische Innovation, geht sie über unmittelbar realisierbare Kostenreduzierungen hinaus, lohnt.
- Das Hauptproblem ist erst angekratzt, nämlich zukunftsfähige Entwicklung zu definieren und Wege zu finden, sie global umzusetzen.

Wirksamer Klimaschutz muß heute bei rasch umsetzbaren, mit geringen Kosten verbundenen Maßnahmen vor allem im Energiebereich ansetzen. Mittel- und langfristig ist er mit dem breiteren Konzept zukunftsfähige Entwicklung verwoben. Darüber, was Zukunftsfähigkeit ist (Kriterien), woran sie gemessen wird (Indikatoren) und wie sie zu erreichen ist (Strategien), gibt es unterschiedliche Vorstellungen (IFOK 1997; Brand 1997). Am Beispiel von 3 Strategien, die alle beanspruchen, zu zukunftsfähiger Entwicklung und damit auch zur Minderung der THG-Emissionen zu führen, läßt sich das zeigen:

Die Effizienz-Strategie zielt auf eine *Steigerung der Ressourcenproduktivität* ab und baut dabei auf neue Techniken und Produktionsverfahren. Sie hat im Kern eine Optimierung der Mittel zur Erreichung unveränderter Ziele im Auge. Sie findet recht breite Zustimmung in Industrie, Politik, Gesellschaft und Wissenschaft, fügt sie sich doch in die Rhythmen wirtschaftlich-technischer, sozialer und politisch-administrativer Abläufe ein. Deshalb wird Zukunftsfähigkeit oft mit der Effizienzstrategie gleichgesetzt.

---

[83] Die Vorschläge des WBGU gehen in diese Richtung. Er schlägt aber langfristig ein THG-Emissionsmodell vor, das jedem Menschen das gleiche Emissionsrecht pro Kopf zuspricht. Vgl. zu den Kriterien für die Zuteilung der Emissionsrechte WBGU, 1997, S. 8f.

[84] Das belegen zahlreiche Länderstudien, etwa der Weltbank (vgl. http://www.worldbank.org/).

Keinen Konsens gibt es darüber, wie groß die Effizienzverbesserungen sein können. Außerdem, so kritische Einwände (Sachs, 1993; Jänicke u.a., 1992), werden sie durch wirtschaftliches Wachstum wieder aufgezehrt oder sogar überkompensiert, so daß der globale Trend zu steigenden Emissionen zwar abgeflacht, aber nicht umgekehrt wird[85].

Die Strategie der *Suffizienz* greift die Debatte der 70er Jahre über Selbstbegrenzung oder - nahezu einhellig abgelehnt - Begrenzung durch Zwang („Ökodikatatur") auf. Suffizienz heißt auch Verzicht auf einige materielle Güter und Konsum, vor allem aber ein neues Verständnis von Wohlstand (Bund/Misereor (Hrsg.), 1996). Freilich sind die Zweifel an der Umsetzbarkeit dieser Strategie wegen der geringen gesellschaftlichen Resonanz auf die Forderungen nach Umkehr nicht zu überhören.

Die Strategie der *Kreislaufwirtschaft*. Die Stoffströme sollen „weitgehend störsicher im abgeschlossenen technischen Eigenkreislauf (...)" bleiben oder „mit den Stoffwechselprozessen der umgebenden Natur so übereinstimmen, daß sie sich, auch in großen Volumina, relativ problemlos darin einfügen." (Huber 1994, S. 15). Die Umsetzung dieses Gedankens ist aber noch weit weg von der Praxis.

Heute besteht ein weitreichender verbaler, aber noch nicht wirklich handlungsleitender Konsens in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, daß der Ressourceneinsatz reduziert werden muß. Es zeichnet sich aber nicht ab, daß technische Innovationen und Effizienzsteigerungen alleine ausreichen werden, um angesichts einer wachsenden Weltbevölkerung und steigenden Konsums, der in sich grenzenlos ist, die ökologischen und sozialen Probleme zu bewältigen. Deshalb werden Suffizienz und Konsistenz an Gewicht gewinnen müssen. Das stellt hohe Anforderungen nicht nur an die gesellschaftlichen Systeme, die ihre innige Verflechtung mit stetigem Wachstum, gemessen am Bruttosozialprodukt[86], lockern müssen, sondern auch an jeden einzelnen, sich für neue Wohlstandsmodelle zu öffnen, die weniger ressourcen- und energieintensiv sind. Technologische Innovation kann dabei zur Hand gehen, aber diese Erneuerung nicht ersetzen.

Als Fazit bleibt festzuhalten: Der Zug der internationalen Klimapolitik ist nicht in Kyoto stehengeblieben. Das ist ein Erfolg. Ob er aber Fahrt aufnehmen wird, darüber wird die praktische Politik der nächsten Jahre entscheiden. Es gibt Hoffnung, daß er, mit dem neuen politischen Instrument eines Klimaprotokolls im Gepäckwagen, langsam aber kontinuierlich den globalen Klimaschutz weiter voranbringen wird. Aber gesichert ist das noch nicht, und die Hoffnung lebt davon, daß Staaten, gesellschaftlichen Akteure und jeder Bürger sich der Grenzen der ökologischen Tragfähigkeit der Erde bewußt werden, danach handeln, andere zum Handeln bewegen und dabei einen langen Atem haben.

---

[85] In Deutschland bzw. anderen OECD-Staaten ist das Bild gemischt: starke Emissionsreduzierungen bei einigen Schadstoffen und spärliche Erfolge in anderen Bereichen; vgl. OECD, 1993.

[86] Der Club-of-Rome Bericht (van Dieren, 1995) fordert statt dessen ein Ökosozialprodukt, das sich, wie das Statistische Bundesamtes (http://www.statistik-bund.de/) gezeigt hat, aber nicht erstellen läßt.

7. Literatur

Annan, Kofi: We need decisive action in Kyoto to limit greenhouse emissions, in: United Nations Climate Change Bulletin 15, 4th Quarter 1997, S. 1-2.

Banholzer, Kai: Joint Implementation - Ein Instrument der globalen Klimapolitik, in: Simonis, 1996, S. 87-101.

Bechert, Stefanie: Die Volksrepublik China in internationalen Umweltregimen. Münster 1995.

Beck, Ulrich: „Was ist Globalisierung". Frankfurt/M 1997.

Binswanger, M.: Sustainable Development: Utopien einer wachsenden Wirtschaft? Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, 1/1995, S. 1-19.

Brand, Karl-Werner (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung. Opladen 1997.

Brauch, Hans-Günther (Hrsg.): Klimapolitik. Berlin 1996.

Breitmeier, Helmut: Wie entstehen globale Umweltregime? Opladen 1996.

Brock, Lothar/Albert, Mathias: Entgrenzung der Staatenwelt. Zeitschrift für Internationale Beziehungen, 2, 2/1995, S. 259-285.

BUND/Misereor (Hrsg.): Zukunftsfähiges Deutschland. Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie. Basel 1996.

Diekmann, Jochen u.a. (Bearbeiter): Politikszenarien für den Klimaschutz. Hrsg. von G. Stein/B. Strobel, Jülich 1997, FZJ-Jülich (Band 1).

EPA, Environmental Protection Agency: National Air Pollutant Emissions Trends, 1900 - 1995. EPA-454/R-96-007, Washington D.C. 1996.

Fischer, Wolfgang/Holtrup, Petra, Erfolge und Defizite der internationalen Klimaschutzpolitik, in: Peter Borsch/ürgen-Friedrich Hake (Hg.), Klimaschutz. Eine globale Herausforderung. Landsberg/Lech1998, S. 243-292.

Fischer, Wolfgang:, Nachhaltige Entwicklung - eine Norm für die Gestaltung unserer Zukunft, in: W. Fischer/C. Karger/F. Wendland (Hrsg.): Wasser: Nachhaltige Gewinnung und Verwendung eines lebenswichtigen Rohstoffes. Konferenzen des Forschungszentrums Jülich, Band 12. Jülich 1996, S. 3-21.

Gore, Al: Wege zum Gleichgewicht. Frankfurt/M 1992.

Harborth, H.-J.: Dauerhafte Entwicklung statt Selbstzerstörung. Berlin 1991.

Huber, J.: Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Der Hallesche Graureiher 94-6. Halle 1994.

Huber, J.: Nachhaltige Entwicklung. Strategien für eine ökologische und soziale Erdpolitik. Berlin 1995.

IEA, International Energy Agency: Climate Change Policy Initiatives. 1995/96 Update, Vol. II, Selected Non-IEA Countries. Paris 1996 (OECD).

IFOK, Institut für Organisationskommunikation (Hrsg.): Bausteine für ein zukunftsfähiges Deutschland. Wiesbaden 1997.

Jachtenfuchs, Markus: Regieren durch Überzeugen: Die Europäische Union und der Treibhauseffekt, in: Ders./B. Kohler-Koch (Hrsg.), Europäische Integration. Opladen 1996, S. 429-454.

Jänicke, Martin u.a.: Umweltentlastung durch industriellen Strukturwandel?. Berlin 1992.

Jänicke, Martin/Bolle, Hans-Jürgen/ Carius, Alexander (Hrsg.): Umwelt Global. Berlin usw. 1995.

Kopfmüller, J./Coenen, R. (Hrsg.), Risiko Klima. Frankfurt/M 1997.

Krägenow, Tim: Verhandlungspoker um Klimaschutz. Freiburg 1996 (Öko-Institut).

Leggett, J. (Hrsg.): Global Warming. Die Wärmekatastrophe und wie wir sie verhindern können. Der Greenpeace Report. München/Zürich 1990.

Loske, Reinhard: Klimapolitik. Im Spannungsfeld von Kurzzeitinteressen und Langzeiterfordernissen. Marburg 1996.

Martin, William F./Imai, Ryukichi/Steg, Helga: Energiesicherheit im globalen Kontext. Bonn 1997 (DGAP Arbeitspapiere zur Internationalen Politik 97).

Massarat, Mohssen: Energiesteuer - Ökologie auf Kosten der Natur. Überlegungen zu Alternativen. Kommune, 12, 7/1994, S. 42-50.

Messner, Dirk/Nuscheler, Franz (Hrsg.): Weltkonferenzen und Weltberichte. Ein Wegweiser durch die internationale Diskussion. Bonn 1996.

Mez, Lutz: Klimaschutzpolitik als CO_2-Minderungspolitik, in: Jänicke/Bolle/Carius (Hrsg.), S. 137-150.

Mitchell, John V. (with P. Beck and M. Grubb): The New Geopolitics of Energy. London 1996 (The Royal Institute of International Affairs).

Müller, Edda, Neue Spielregeln für die Umweltpolitik,. in: Hünter Altner u.a, Jahrbuch Ökologie 1998, München 1997, S. 40-50.

Müller-Kraenner, Sascha (Hrsg.): Klimapolitik - Handlungsstrategien für die Erdatmosphäre. Basel 1996.

Narr, Wolf-Dieter/Schubert, Alexander: Weltökonomie. Die Misere der Politik. Frankfurt/M 1994.

Neyer, Jürgen: Globaler Markt und territorialer Staat. Zeitschrift für Internationale Beziehungen, 2, 2/1995, S. 287-315.

Nuscheler, Franz: Lern- und Arbeitsbuch Entwicklungspolitik. Bonn 1995[4].

Oberthür, Sebastian/Ott, Hermann: Stand und Perspektiven der internationalen Klimapolitik. Internationale Politik und Gesellschaft, 4/1995, S. 399-415.

OECD: Environmental Performance Reviews. Germany. Paris 1993.

Ott, Hermann: Das internationale Regime zum Schutz des Klimas, in: T. Gehring/S. Oberthür (Hrsg.): Internationale Umweltregime, Opladen 1997 S. 201-218.

Ott, Hermann: Völkerrechtliche Aspekte der Klimarahmenkonvention, in: Brauch (Hrsg.): Klimapolitik, S. 61-74 (=Ott, 1996).

Sachs, W.: Global Ecology and the Shadow of 'Development', in: Ders. (Ed.): Global Ecology. A New Arena of Political Conflict. London/New Jersey/Halifax 1993, S. 3-21.

Schafhausen, Franzjosef, Kyoto - und was kommt danach?, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 48, 1-2/1998, S. 11-16.

Schuh, Hans: Geoforscher warnen: Es könnte im Treibhaus recht frisch werden, in: Die Zeit Nr. 49 vom 28.11.1997.

Simonis, Udo E. (Hrsg.): Weltumweltpolitik. Grundriß und Bausteine eines neuen Politikfeldes. Berlin 1996.

Sprinz, Detlef/Luterbacher, Urs (principal authors/editors): International Relations and Global Change. Potsdam Institute for Climate Impact Research, 1996; zugänglich via Internet: http://www.pik-potsdam.de/.

van Dieren, W. (Hrsg.): Mit der Natur rechnen. Der neue Club-of-Rome Bericht: Vom Bruttosozialprodukt zum Ökosozialprodukt. Basel 1995.

WBGU, Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen: Welt im Wandel. Grundstrukturen globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen. Jahresgutachten. Bonn 1993.

WBGU: Ziele für den Klimaschutz 1997. Stellungnahme zur dritten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention 1997. Göttingen 1997.

World Bank: World Development Report 1992. Development and the Environment. Oxford usw. 1992.

Entsorgung

Reinhard Odoj

Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR)

Forschungszentrum Jülich

1. Einleitung

Im Bereich der Energieforschung werden die unterschiedlichsten Energietechniken diskutiert. Die derzeit angewandten Techniken zur Energieerzeugung wie Kernspaltung, Kohle-, Öl- und Gasverbrennung, mittelfristigen Techniken wie Photovoltaik und Brennstoffzellen oder langfristigen Techniken wie Fusion, alle diese Techniken haben eines gemeinsam, sie erzeugen Abfall. Dieser kann entstehen bei der Herstellung einzelner Technikkomponenten, beim Betrieb der Energieanlagen oder bei der Stillegung dieser Anlagen. Das Problem des Abfalls bzw. Mülls ist jedoch nicht nur ein Problem der Energietechnik.

Geschichtliche Daten belegen: Müll gab es schon immer - nur die Müllberge, das ist eine Errungenschaft der Nachkriegszeit. In Deutschland wurde aus der Aufbau- die Wohlstands- und aus dieser die Wegwerfgesellschaft. Im letzten Jahrzehnt produzierte jeder Bewohner der Bundesrepublik im Durchschnitt pro Jahr 350 kg Müll. Bei einer Bevölkerung von ca. 80 Millionen bedeutet dies allein 28 Millionen Tonnen Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle aus Kleingewerbe und Dienstleistungsbereich. Daneben fallen Gewerbe-/Industriemüll sowie Bodenaushub/Bauschutt und Klärschlämme von etwa 262 Mio. t/a an, wovon allein aus dem Bereich Krankenhäuser 1 Mio. Tonnen resultieren.

Diese Abfälle werden in Oberflächendeponien der Klasse 1 - 4 entsorgt.

Deponieklasse 1	Bodenablagerung
Deponieklasse 2	Mineralstoffe
Deponieklasse 3	Siedlungsabfälle
Deponieklasse 4	Gewerbe- und Industrieabfälle

Neben diesen gewöhnlichen Abfällen fallen jährlich 5 Millionen Tonnen Sondermüll in der Bundesrepublik an. Diese Sonderabfälle können entweder in einer Oberflächendeponie für Sonderabfälle (Klasse 5) oder in einer Untertagedeponie für Sonderabfälle (Klasse 6) abgelagert werden.

Auf die Emission an Schadstoffen wie CO_2, NO_X, SO_X und toxischen Metallen und organischen Komponenten wie Dioxinen wird hier nicht weiter eingegangen.

Die Deponierung der Abfälle soll eine unkontrollierte Freisetzung in die Biosphäre verhindern. Im Hinblick auf die Bedeutung der Löslichkeit von Inhaltsstoffen als vorrangiges Gefährdungspotential bei der Deponierung sind daher Bestimmungen überwiegend im Eluat der Abfälle vorgesehen. Als Grundlage für die Entscheidung, welche Abfallarten auf einer Deponie zugelassen werden können, werden für die einzelnen Deponieklassen Konzentrationen dieser Abfallarten im Eluat angegeben.

Wie aus den obigen Zahlen ersichtlich, sind die Mengen an radioaktiven Abfällen mit ca. 200 m^3/Kernkraftwerk und Jahr, d.h. etwa 4000 m^3/Jahr in der Bundesrepublik verschwindend gering. Von diesen Abfällen sind 80 % schwach aktiv (< 10^{10} Bq/m^3), 15 % mittelaktiv (< 10^{14} Bq/m^3) und 5 % hochaktiv (> 10^{14} Bq/m^3).

Die Toxizität von Sonderabfällen ist mit der von radioaktiven Abfällen vergleichbar, wie aus der Abb. 1 ersichtlich ist.

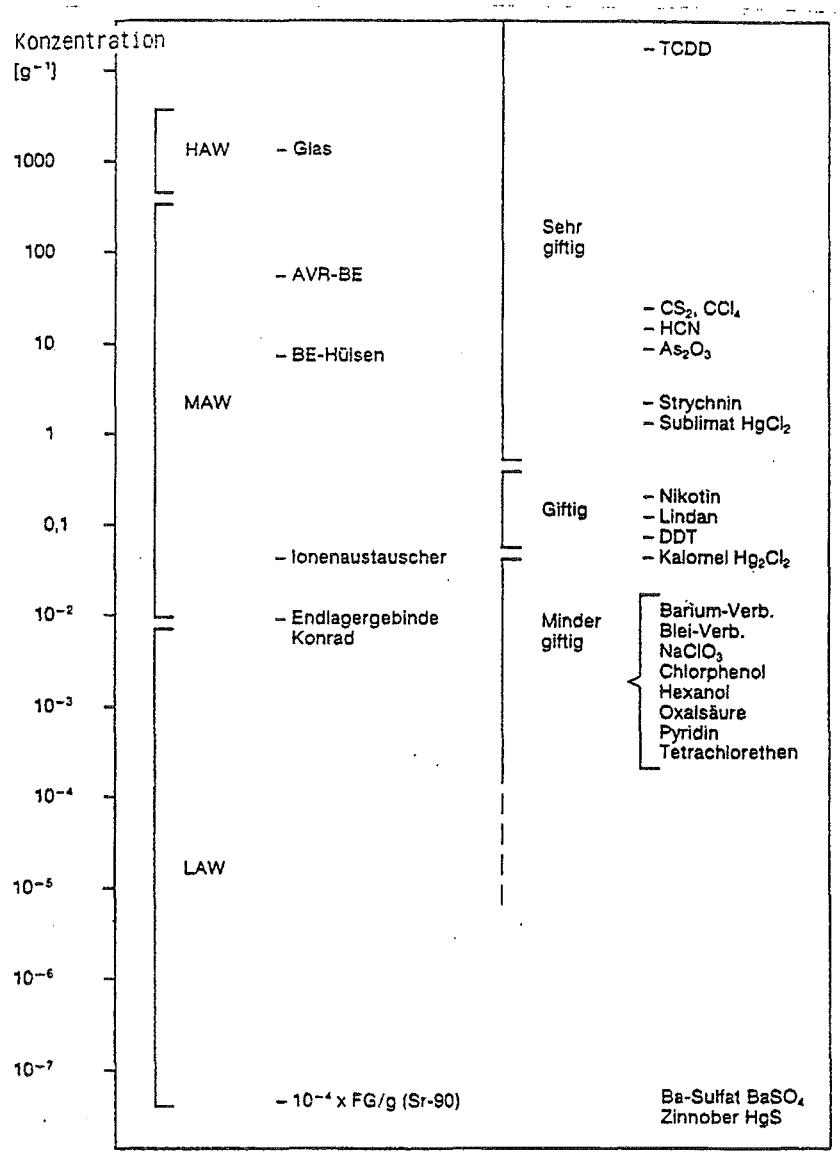


Abb. 1: Toxizitätsvergleich radioaktiver Abfälle und chemischer Substanzen

Die umweltgerechte Behandlung und Deponierung auch der nichtradioaktiven Abfälle ist eine neue Herausforderung für den Umweltschutz. Trotz vieler Appelle und Bemühungen und trotz der Festlegung im Abfallgesetz, daß die Abfallvermeidung Vorrang hat vor der Abfallverwertung und Abfallbeseitigung, konnten bisher keine großen Reduzierungen bei der Abfallmenge außer bei Hausmüll erzielt werden. Dies resultiert nicht aus einer wachsenden Industrieproduktion oder Nicht-Befolgen des Abfallgesetzes, sondern vielmehr führen auch sinnvolle und gewünschte Umweltschutzmaßnahmen zu einer Vergrößerung der Abfallmenge. Filterstäube, Gips aus der Rauchgasentschwefelung und Klärschlämme aus der Abwasserbehandlung sind Beispiele hierfür. Luft und Boden werden reiner, aber die Abfallmengen werden größer. Alleine die Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen (TA-Luft) führt zu einer Vergrößerung des Sekundärabfalles. Größere Mengen an Abfällen bedeuten aber auch größere Mengen an Deponievolumen, der oft nicht vorhanden und wenn vorhanden, dann sehr teuer ist.

Daher werden zunehmend Verfahren entwickelt, um das Abfallvolumen aufzukonzentrieren. Durch die Aufkonzentration wiederum fallen Deponieprodukte an, deren Lagerungseigenschaften ähnlich wie bei den radioaktiven Abfällen zunehmend kritisch bzgl. der Mobilität der Schadstoffe betrachtet werden müssen. Für die Aufkonzentration der Abfallvolumina gewinnt zunehmend die Abfallverbrennung an Bedeutung, auch bzgl. der Abfallkostenexplosion.

2. Schutzziele

Die Einbringung der Abfälle in übertägigen bzw. untertägigen Deponien hat als Schutzziel, daß die toxischen Abfälle über vertretbare Zeiträume hinweg sicher eingeschlossen sind und ein freier Zutritt primär über den Wasserpfad in die Umwelt nicht oder nur kontrolliert erfolgen kann. Hierbei haben, im Gegensatz zu vielen nicht radioaktiven chemischen Substanzen, die radioaktiven Abfälle den Vorteil, daß sie im Laufe der Jahre automatisch zerfallen und irgendwann kein radioaktives Risiko mehr darstellen. Zur Erreichung der vom Gesetz vorgeschriebenen allgemeinen Schutzziele und Kriterien der Entsorgung wurde das Prinzip der Mehrfachbarrieren entwickelt. Dieses Prinzip besagt, daß die Barrieren in ihrer Gesamtheit den weitgehenden Ausschluß der toxischen Substanzen von der Biosphäre sicherstellen. Das Mehrfachbarrierensystem besteht aus den künstlichen oder technischen Barrieren (man-made) und der natürlichen Barriere der Geologie, wie die nachfolgende Abb. 2 beispielhaft für radioaktive Abfälle zeigt.

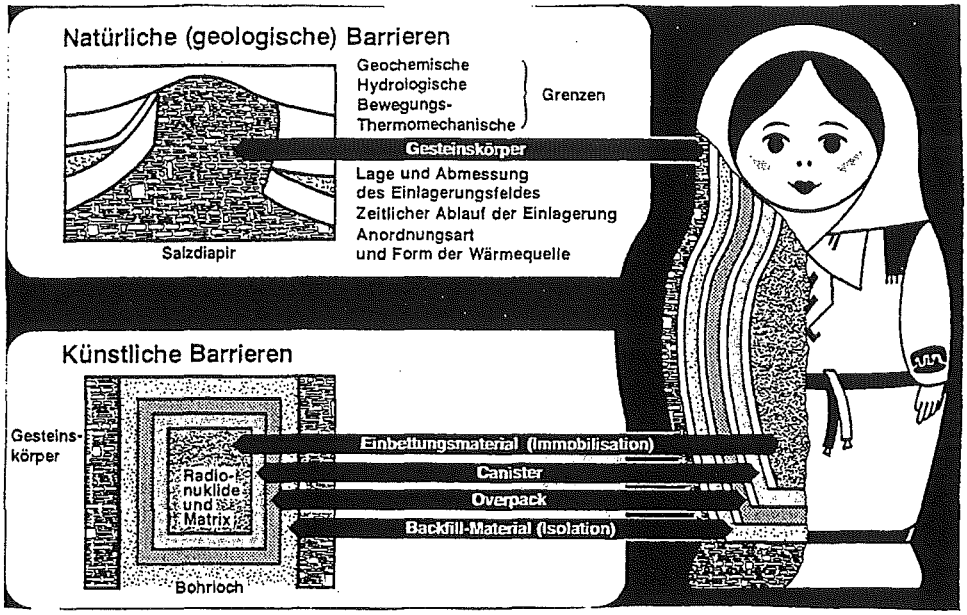


Abb. 2: Mehrfachbarrierensystem für die Lagerung von Abfällen in der Geologie

Die künstlichen Barrieren werden unterteilt in die Produktform (evtl. Einbindungsmatrix), den Behälter, das Verfüllmaterial für Stollen und Schächte und das Endlager selbst (Größe und Lage der Grube). Die Entsorgung von Schadstoffen in einer Oberflächendeponie beinhaltet im Prinzip die gleichen Schutzziele.

Die oberflächennahe Deponierungstechnik baut darauf, daß die Deponieoberfläche abgedichtet wird, um Infiltration vom Niederschlag zu vermindern und damit auch die Menge des Sickerwassers.

Eine effektive Abdichtungsschicht kann z.B. aus Kohlenasche, die mit Zement, Kalk oder mit Entschwefelungsprodukten stabilisert ist bestehen. Die Effektivität der Abdichtungsschicht kann durch oben aufliegende Dränierungsschichten verbessert werden. Schließlich soll die Deponie mit einer Erdschicht abgedeckt und bepflanzt werden. Auf diese Weise kann die Sickerwasserproduktion und damit die Auslösungsgeschwindigkeit von Schadstoffen um 75 - 90 % verringert werden.

Zusammenfassend beinhaltet die Deponierungsstrategie eine Verhinderung oder Begrenzung der Auslösung von Schadstoffen und, falls notwendig, eine kontrollierte und „optimierte" Verdünnung. Schutzziel ist es, die Zufuhr von Schadstoffen in die Bio- oder Geosphäre zu verhindern oder so zu beschränken, daß sie keine ökologischen Auswirkungen hat. Diese Bedingungen würden dann erfüllt sein, da dauerhaft keine Null-Emission garantiert werden kann, wenn der anthropogene Zuwachs so gering ist, daß die Konzentrationserhöhung in der Erde, im Wasser und im Biota gering ist im Vergleich mit dem natürlichen Zustand.

So beträgt beispielsweise die natürliche Strahlenbelastung des Menschen im Bundesmittel 2,4 m Sv/Jahr.

Kosmische Strahlung (je nach Höhe)	0,3 - 1,1 mSv/Jahr
terrestische Strahlung (je nach Wohnort)	0,55 - 10 mSv/Jahr
innere (Körper)Strahlung	0,25 - 0,3 mSv/Jahr

Das Schutzziel für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle ist eine maximale Individualdosis von 0,3 mSv pro Jahr, diese Dosis liegt innerhalb der Schwankungsbreite der mittleren natürlichen Strahlenbelastung in der Bundesrepublik.

3. Endlagerungsbedingungen

Das Ziel der Entsorgung und damit der Endlagerung von radioaktiven Abfällen in der tiefen Geologie ist der langfristige Schutz von Menschen und Umwelt vor der Schädigung durch die ionisierende Strahlung der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide. Bei den chemotoxischen Abfällen ist es der Schutz vor eben diesen chemischen Substanzen. Die grundsätzlichen Anforderungen, die bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle berücksichtigt werden müssen, hat der Bundesminister des Innern 1983 auf Empfehlung der Reaktorsicherheitskommission in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk festgelegt. Danach ist im Rahmen einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse der Nachweis zu erbringen, daß die Schutzziele langfristig gewährleistet sind. Die Endlagerbarkeit der radioaktiven Abfälle wurde in Sicherheitsanalysen

- des bestimmungsgemäßen Betriebes
- von unterstellten Störfällen
- der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins
- zur Kritikalitätssicherheit und
- der radiologischen Langzeitauswirkung

untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Endlagerungsbedingungen, d.h. Anforderungen an radioaktive Abfälle jeweils separat aus den einzelnen Sicherheitsanalysen abgeleitet worden. Sie bestehen getrennt und müssen unabhängig von einander erfüllt werden. Es gilt jeweils die restriktivste Anforderung. Für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen wurden 27 quantitative Kriterien abgeleitet. Beim Kriterium Radioaktivitätsinventar sind mehr als 150 Radionuklide quantitativ zu deklarieren.

Bei der Deponierung chemisch-toxischer Abfälle gibt es derzeit keine Anforderungen an standortspezifische Sicherheitsanalysen. Die Behandlung und Lagerung der nicht-radioaktiven Abfälle ist in der TA-Abfall festgelegt. Dies gilt sowohl für die oberirdische Deponierung als auch für die Untertagelagerung.

Entsprechend der Forderung der Großfeuerungsanlagenverordnung sind, z. B. seit dem 01. Juli 1988 in den Braunkohlenkraftwerken der RWE nasse Rauchgasentschwefelungsanlagen (=REA) in Betrieb. In diesen Anlagen fallen als Rückstände jährlich 1,27 Mio t Gips und 755.000 m^3 REA-Wasser an, die mit 6,135 Mio t der herkömmlichen Kraftwerksasche vermischt und deponiert werden. Die Mischdeponien werden im Kippenbereich von 3 Tagebauen der Rheinischen Braunkohlewerke angelegt, in denen das Deponat allseitig mit einer Tonabdichtung umgeben wird. Für die Abdichtung werden die geforderten Grenzwerte der Durchlässigkeit von $k \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s und $k \leq 1 \times 10^{-10}$ m/s erreicht.

Bei oberirdischen Deponien sind hinsichtlich eines Ausschlusses von Schadstoffen aus der Biosphäre nicht allein die technisch aufwendigen Abdichtmaßnahmen entscheidend, sondern vor allem die Eigenschaften der abzulagernden Abfälle. Deshalb sollen die Abfälle selbst die wirksamste und dauerhafteste Barriere gegen einen Schadstoffeintrag in die Umwelt bilden. Folglich sind Abfälle erforderlichenfalls durch vorherige thermische oder sonstige chemisch/physikalische und biologische Behandlung weitgehend umzuwandeln, von Schadstoffen zu entfrachten bzw. zu mineralisieren und zu stabilisieren.

Für pastöse Abfälle, wie Neutralisationsrückstände, Flußsedimente und ähnliches mit Feuchtegehalten von 40 - 60 % oder Stäube, Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung mit großen Porenvolumen müßte eine Einbindung in eine Matrix aus hydraulischen Bindemitteln erfolgen.

Abfälle, die durch Vorbehandlung nicht ausreichend mineralisiert und stabilisiert werden können und für die bei der oberirdischen Lagerung keine dauerhaft wirksamen baulich-technischen Barrieren möglich sind, müssen unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen und Ausschlußkriterien durch untertägige Lagerung von der Biosphäre abgeschlossen werden.

Ein Katalog besonders überwachungsbedürftiger Abfälle, der sich vorwiegend auf die Herkunft der Abfallarten bezieht, ist im Anhang C der TA-Abfall ersichtlich.

Die Ausschlußkriterien für eine Untertagelagerung sind

- Abfälle, die unter Ablagerungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) selbstentzündlich, selbstgängig brennbar oder explosibel sind
- Abfälle, die durch Reaktionen untereinander oder mit dem Endlagergestein zu Volumenvergrößerung, Bildung selbstentzündlicher, toxischer oder explosiblen Stoffen führen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß für radioaktive Abfälle aus einzelnen Sicherheitsanalysen sehr konservative qualitative und quantitative Endlagerungsbedingungen abgeleitet wurden, während für die chemo-toxischen Untertageabfälle eher generische Anforderungen aufgestellt wurden nach dem Prinzip der Immissionsneutralität oder dem machbaren Prinzip des vollständigen Einschlusses, d.h. die „Entsorgung von Abfällen mit hohem Schadstoffinhalt gleichermaßen gewährleistet ist, wie für einen niedrigen". Der vollständige Einschluß wird dadurch gewährleistet, daß die einzubringenden Abfälle so abgelagert werden, daß sowohl die Standfestigkeit und Unversehrtheit des Gebirges so wenig wie möglich beeinflußt als auch das Porenvolumen des abzulagernden Abfalls so gering wie möglich gehalten werden.

Im Gegensatz zu radioaktiven Abfällen, für deren Endlagerung es eine Bundeszuständigkeit gibt, fallen jedoch der Vollzug des Abfallgesetzes und seiner ergänzenden Regelungen in den Zuständigkeitsbereich der einzelnen Länder.

Bei radioaktiven Abfällen wird über eine Abfallablieferer-unabhängige Produktkontrolle mit Dokumentationsprüfung und zerstörungsfreier und zerstörender Stichprobenanalysen der Nachweis erbracht, daß die Abfallgebinde den Endlagerungsbedingungen entsprechen. Grenz- oder Richtwerte, speziell für die Bewertung der Schädlichkeit der chemo-toxischen Abfälle aus der thermischen und chemisch-physikalischen Behandlung, gibt es z.Z. noch nicht.

4. Schlußbemerkung

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27. September 1994, welches Ende 1996 in Kraft getreten ist, unterscheidet hinsichtlich der Entsorgung von Abfällen zwischen Abfällen zur Verwertung (Wertstoffen) und Abfällen zur Entsorgung (Reststoffen). Nach § 5 (2) hat dabei die Verwertung generell Vorrang vor der Beseitigung.

Die Mengen an Reststoff-Abfällen als Sondermüll sind etwa 1000 mal größer als die Mengen an radioaktiven Abfall.

Untertagedeponien für radioaktive Abfälle werden nur nach einzelnen standortspezifischen Sicherheitsanalysen genehmigt. Der Betreiber dieser Endlager ist der Bund. Aus den Sicherheitsanalysen ergeben sich endlagerrelevante Kriterien für jedes einzulagernde Abfallgebinde. Die Einhaltung dieser Kriterien wird von einer Ablieferer-unabhängigen Produktkontrolle vor Abfallablieferung kontrolliert.

Für die Verbringung von chemo-toxischen Abfällen in die tiefe Geologie gibt es juristisch 3 Gründe:

- Versatzzweckmäßigkeit — Notwendigkeit der Verfüllung von
- Versatzpflicht — Hohlräumen in Bergwerken
- Abfalldeponie

Für die Deponierung von chemo-toxischen Abfällen gibt es 2 Anforderungen:

- Prinzip der Immissionsneutralität
- Prinzip des vollständigen geologischen Einschlusses

Der generelle Nachweis des letzten Prinzips macht die Definition von Grenzwerten für chemo-toxische Abfälle im Prinzip unnötig. Der generelle Nachweis kann erbracht werden durch die Standfestigkeit und Unversehrtheit des Gebirges (geringes Porenvolumen).

Obwohl die chemo-toxischen Sonderabfälle ein vergleichbares Risiko wie die radioaktiven Abfälle für Mensch und Umwelt haben, wird deutlich, daß die Entsorgung von radioaktiven Abfällen derzeit bedeutend höheren Sicherheitsanforderungen genügen muß.

Um vergleichbare Sicherheitsstandards zu erreichen, sollten für chemo-toxische Sonderabfälle 3 Arbeitsgebiete näher untersucht und die Eigenschaften quantifiziert werden:

- Endlagerprodukte entsprechend Abfallstoffgruppen
- Konditionierungs- und Verfestigungsuntersuchungen
- Definierung bzw. Entwicklung neuer Methoden für Bodenmechanik zur Verfüllung von Hohlräumen in Bergwerken

Ebenso wäre die Durchführung eines standortspezifischen Sicherheitsnachweises notwendig, der mögliche Belastungswerte für Umwelt und Menschen angeben würde. Diese maximalen Belastungsgrenzwerte müßten auf geeigneten Toxizitäts-/Ingestionsdaten beruhen. Diese Ansätze würden eine Festlegung von Maximalwerten für chemische Inhaltsstoffe erfordern, die als Grundlage für Belastungsrechnungen dienen, eine analoge Vorgehensweise wie bei radioaktiven Stoffen.

Umsetzung der EG-Umweltauditverordnung im Versorgungsunternehmen

Werner Linden

GEW Köln AG

1. Grundlagen des Umweltaudits

Die Verordnung (EWG) Nr. 1836/93 über die freiwillige Beteiligung gewerblicher Unternehmen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung vom 29. Juni 1993 - kurz EG-Umweltauditverordnung genannt - gilt seit April 1995 in allen Mitgliedstaaten der Europäischen Union. Ziel des eingeführten Systems ist die Förderung der kontinuierlichen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes. Dazu werden mit den Elementen der Umweltpolitik, des Umweltmanagementsystems sowie der Umweltziele und -programme neue Instrumente in den betrieblichen Umweltschutz eingeführt. Diese unterliegen einer regelmäßigen, systematischen und objektiven Überprüfung und Bewertung. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden im Wege von Umwelterklärungen als Informationen über den betrieblichen Umweltschutz der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Die organisatorischen Voraussetzungen für die Anwendung der EG-Umweltauditverordnung in der Bundesrepublik Deutschland wurden im Umweltauditgesetz vom 07.12.1995 geregelt. Dieses enthält Bestimmungen über die Anforderungen an Umweltgutachter und Umweltgutachterorganisationen, über deren Zulassung und Beaufsichtigung sowie über das Verfahren der Registrierung geprüfter Betriebsstandorte. Damit können die teilnehmenden Unternehmen ihre Umwelterklärungen durch zugelassene, unabhängige Gutachter prüfen und für gültig erklären lassen. Die Gültigkeitserklärung ist Voraussetzung für das sogenannte Registrierungsverfahren, welches - mit Unterschieden in den einzelnen Bundesländern - die Industrie- und Handelskammern und die Handwerkskammern durchführen. Im Registrierungsverfahren erfolgt eine Eintragung in ein Verzeichnis der Europäischen Union, welche das registrierte Unternehmen berechtigt, in bezug auf den Produktionsstandort eine sogenannte Teilnahmeerklärung zu führen.

Die Teilnahme am EG-Umweltauditsystem stand bereits in der Vergangenheit ausdrücklich auch den Unternehmen offen, die Gas, Heißwasser, Dampf und Strom erzeugen (Art. 2 i EG-Umweltauditverordnung). Das bedeutete für den Bereich der Energieversorgung, daß nur Energieerzeugungsanlagen nicht aber Verteilungssysteme wie Stromnetze, Fernwärmeleitungen oder Gasnetze am EG-Umweltauditsystem teilnehmen konnten. Eine weitere Besonderheit ist darin zu sehen, daß nach der EG-Umweltauditverordnung Auditgegenstand nicht das Unternehmen als solches sein kann. Im Wege einer räumlich, organisatorischen Betrachtung kommt mit dem „Standort" lediglich das jeweilige Gelände in Betracht, auf dem die auditierfähige gewerbliche Tätigkeit durchgeführt wird (Art. 2 k EG-Umweltauditverordnung).

Eine Erweiterungsklausel in der EG-Umweltauditverordnung ermöglicht eine Einbeziehung zusätzlicher Bereiche in das EG-Umweltauditsystem, indem die Mitgliedstaaten für nicht gewerbliche Sektoren, beispielsweise für den Handel und den öffentlichen Dienstleistungsbereich, versuchsweise Bestimmungen analog zu dem Umweltmanagement- und Umweltbetriebsprüfungssystem erlassen dürfen (Art. 14 EG-Umweltauditverordnung). Auf der Grundlage einer in § 3 Abs. 1 Satz 1 des Umweltauditgesetzes enthaltenen Verordnungsermächtigung ist am 10.02.1998 die Verordnung nach

dem Umweltauditgesetz über die Erweiterung des Gemeinschaftssystems für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung auf weitere Bereiche (UAG-Erweiterungsverordnung) in Kraft getreten. Danach werden jetzt neben anderen Branchen auch die Energie- und Wasserversorgung sowie die Abwasserbeseitigung und sonstige Entsorgung in den Anwendungsbereich des Gemeinschaftssystems für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung einbezogen.

2. Gründe für die Teilnahme der GEW

Die Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke Köln AG (GEW) versorgt die Stadt Köln mit Gas, Elektrizität, Wasser und Wärme. Das Unternehmen, das annähernd 2 700 Mitarbeiter beschäftigt und für das Jahr 1997 ein Umsatz in Höhe von rd. 1 750 Mio. DM ausweist, hatte bereits im Januar 1994 - veranlaßt durch die vorausgegangene Einführung des § 52 a BImSchG sowie einem allgemeinen Trend folgend - eine Umweltpolitik und ein neues Umweltmanagementsystem eingeführt. Damit war aber noch keine Entscheidung für die endgültige Beteiligung am EG-Umweltauditsystem gefallen. Diese Entscheidung wurde erst im März 1995 getroffen, wobei gleich mehrere Gründe den Ausschlag gaben. Bedeutsam war zunächst einmal, daß das kommunale Unternehmen schon immer eine Vorreiterrolle im Umweltschutz eingenommen hatte. Insofern stellten die neuen Instrumente der EG-Umweltauditverordnung eine besondere Herausforderung dar. Darüber hinaus bekundeten inzwischen auch Kunden Interesse am EG-Umweltauditsystem und es war abzusehen, daß der Energielieferant sich eines Tages der Frage ausgesetzt sehen würde, ob man nicht Strom und Wärme aus einem auditierten Heizkraftwerk liefern könne. Die Durchführung des Umweltaudit versprach desweiteren eine Minimierung von Haftungsrisiken und damit verbunden die Reduzierung von Versicherungsprämien. Vor allem aber sollte die Teilnahme zu einer weiteren Verbesserung der Umweltschutzsituation im Unternehmen beitragen. Für die Durchführung des ersten Umweltaudit wählte man den Standort Köln-Niehl aus. Hier betreibt GEW ein Heizkraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 840 MW sowie ein Gasturbinenheizkraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 95 MW. Mit diesen Anlagen, die in erster Linie mit Erdgas befeuert werden, in denen aber auch Heizöl eingesetzt werden kann, sichert GEW die Fernwärmeversorgung der Kölner Innenstadt. Zugleich wird Strom erzeugt und in das Netz der Stadt Köln eingespeist. Aufgrund der positiven Erfahrungen mit dem ersten Umweltaudit entschloß sich das Unternehmen dazu, im Jahre 1996 am Standort Köln-Merkenich ein weiteres Umweltaudit durchzuführen. Hier erzeugt GEW in einem Heizkraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 592 MW Strom, Dampf und Fernwärme. Dabei wird der Strom in das Netz der Stadt Köln eingespeist, der Dampf wird an benachbarte Industriebetriebe abgegeben und mit der Fernwärme werden die Kölner Stadtteile Bocklemünd und Neue Stadt versorgt.

Im Herbst 1997 begann man mit der Durchführung einer Umweltprüfung am Standort der Wasserwerke und des Wasserlabors. GEW versorgt mit den drei Wasserwerken Weiler, Hochkirchen und Severin den größten Teil des linksrheinischen Stadtgebietes sowie Teile der Nachbargemeinde Pulheim und die Stadt Brühl mit Trinkwasser. Daneben wird die ansässige Industrie über ein separates Brauchwassernetz mit Betriebswasser versorgt. Jährlich werden insgesamt rund 55 Mio. m^3 Trinkwasser und 1, 5 Mio. m^3 Betriebswasser an die Kunden abgegeben. Dabei wird die einwandfreie Beschaffenheit, insbesondere des Trinkwassers, im betriebseigenen Wasserlabor durch ständige Kontrollen überwacht. Gleichzeitig mit dem Umweltaudit im Bereich der Wasserversorgung führte GEW ein Arbeitssicherheitsaudit durch. Hierbei wurden der Grundgedanke des Umweltaudits und seine Instrumente auf das Aufgabengebiet des Arbeitsschutzes übertragen. Am 20.03.1998 konnte GEW das kombinierte Umwelt- und Arbeitssicherheitsaudit mit der Validierung der Umwelterklärung durch einen zugelassenen, unabhängigen Gutachter abschließen. Am 21.04.1998 wurden die Wasserwerke und das Wasserlabor in das Verzeichnis der eingetragenen Standorte aufgenommen. GEW ist

damit im Bereich der Wasserversorgung das erste Unternehmen in Deutschland, das erfolgreich ein Umweltaudit nach Maßgabe der UAG-Erweiterungsverordnung abgeschlossen hat.

3. Umweltpolitik und Arbeitssicherheitspolitik

Unter Umweltpolitik versteht die EG-Umweltauditverordnung die umweltbezogenen Gesamtziele und Handlungsgrundsätze eines Unternehmens einschließlich der Verpflichtung, alle einschlägigen Umweltvorschriften einzuhalten (Art. 2 a der EG-Umweltauditverordnung). Dabei werden in materieller Hinsicht konkrete Mindestanforderungen für die Formulierung einer Umweltpolitik vorgegeben (siehe Anhang I C, D der EG-Umweltauditverordnung). Die insofern zu berücksichtigenden Gesichtspunkte betreffen unter anderem den Umgang mit Energie, Rohstoffen und Abfällen, Lärmfragen, den produktbezogenen Umweltschutz, Praktiken bei Auftragnehmern sowie Fragen der internen und externen Öffentlichkeitsarbeit. Die Umweltpolitik der GEW wurde in Form von 10 Umweltschutzleitlinien im Januar 1994 für alle Standorte im Unternehmen eingeführt. Den Mitarbeitern wurde sie durch die Betriebszeitschrift bekannt gemacht. Sie enthält verbindliche Vorgaben für jedermann im Unternehmen an denen alle Tätigkeiten und Abläufe auszurichten sind. In diesem Sinne heißt es in den Umweltschutzleitlinien: „Umweltschutz ist eine zentrale Unternehmensaufgabe und fester Bestandteil unserer Unternehmensziele. Alle Mitarbeiter sind dem Umweltschutz in ihrem Handeln verpflichtet." Der von der EG-Umweltauditverordnung geforderten Verpflichtung zur kontinuierlichen Verbesserung (siehe Art. 3 S. 2 a der EG-Umweltauditverordnung) wird in der Umweltpolitik Rechnung getragen, indem dort „wo es technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar ist, Maßnahmen ergriffen werden, die über die gesetzlichen und behördlichen Anforderungen hinausgehen". Analog zu den Umweltschutzleitlinien führte GEW Anfang 1998 Arbeitssicherheitsleitlinien ein. Diese enthalten arbeitsschutzbezogene Gesamtziele und Handlungsmaxime und bilden damit eine Grundlage für die Entscheidungen und Aktivitäten in der Arbeitssicherheit.

4. Umweltmanagementsystem und Arbeitssicherheitsmanagementsystem

Ein Umweltmanagementsystem ist in der Regel ein Teil des gesamten unternehmensübergreifenden Managementsystems. Es umfaßt die aufbau- und ablauforganisatorischen Maßnahmen und Regelungen, die sicherstellen, daß die gesetzlichen, behördlichen und unternehmensinternen Anforderungen im Umweltschutz eingehalten werden. Dem Umweltmanagementsystem der GEW liegt das Grundprinzip zugrunde, daß Linienfunktionen, die für den Betrieb der Anlagen und Einrichtungen die Verantwortung tragen und Stabsfunktionen, die Überwachungs- und Unterstützungsaufgaben wahrnehmen, getrennt werden. Das Umweltmanagementsystem sieht hierzu vor, daß die gesetzlich geforderten Beauftragtenfunktionen im Umweltschutz sowie die Kontrolle des Stoffwesens, die Aus- und Weiterbildung im Umweltschutz, die Organisation der Entsorgung sowie die Belange des Arbeitsschutzes von der Abteilung Umweltschutz und Arbeitssicherheit für das gesamte Unternehmen zentral wahrgenommen werden. Der Leiter dieser dem Vorstand direkt unterstellten Abteilung ist als „Managementvertreter" für die Anwendung und Aufrechterhaltung dieses übergreifenden Umweltmanagement- und Controllingsystems zuständig. Als Ansprechpartner für die Abteilung Umweltschutz fungieren in den Fachbereichen sogenannte nebenamtliche Umweltreferenten. Die Zusammenarbeit der Abteilung Umweltschutz mit den Umweltreferenten der Fachbereiche und dem Betriebsrat wird einem Ausschuß für Umweltschutz sichergestellt. Das Umweltmanagementsystem wird ergänzt durch umfangreiche technische und organisatorische Maßnahmen zur Verhütung und Begrenzung umweltschädigender Unfälle. Im Rahmen der Arbeitssicherheit bilden die nebenamtlichen Betriebssicherheitsingenieure und die Sicherheitsbeauftragten die Bindeglieder zwischen den

Beschäftigten und den zentral für das gesamte Unternehmen bestellten Sicherheitsfachkräften. Dabei arbeiten die nebenamtlichen Betriebssicherheitsingenieure gemeinsam mit einem Vertreter des Arbeitgebers, den Sicherheitsfachkräften, dem betriebsärztlichen Dienst und dem Betriebsrat in dem auf gesetzlicher Grundlage berufenen Arbeitsschutzausschuß zusammen. Die Sicherheitsbeauftragten sind in dieses System über die auf Bereichsebene eingerichteten Sicherheitsausschüsse einbezogen.

5. Umweltschutzhandbuch

Das Umweltmanagementsystem der GEW ist in einem Umweltschutzhandbuch dokumentiert. Dieses enthält als zentrales Regelwerk des betrieblichen Umweltschutzes eine umfassende Darstellung der Aufbau- und Ablauforganisation im Umweltschutz. Dem vorangestellt sind die Umweltschutzleitlinien sowie eine Übersicht über die einschlägigen Umweltrechtsvorschriften mit einer knappen Einführung. Das Kapitel Aufbauorganisation enthält im wesentlichen eine Beschreibung der bereits oben genannten Funktionsträger und Organe des betrieblichen Umweltschutzes.

Der umfassendere Teil des Umweltschutzhandbuches entfällt auf die Ablauforganisation und ist in 13 Kapitel unterteilt. Den ersten 3 Kapiteln liegt ein medienbezogener Ansatz zugrunde. Im Kapitel „Luftreinhaltung" sind die Anforderungen des Immissionsschutzrechts an den Betrieb der Heizkraftwerke sowie der sich daraus ableitende Regelungsbedarf mit konkreten Aufgaben und Zuständigkeiten dargestellt. Das Kapitel „Gewässerschutz" enthält sowohl Anforderungen an die Wasserversorgung als auch an die Abwasserentsorgung unterteilt nach Direkteinleitungen und Indirekteinleitungen in Gewässer sowie Vorgaben für den anlagenbezogenen Gewässerschutz, insbesondere die Lagerung wassergefährdender Stoffe. Im Vorgriff auf anstehende gesetzliche Neuregelungen behandelt das Kapitel „Bodenschutz" den Umgang mit Altlasten und die Vorgehensweise bei Unfällen mit Auswirkungen auf den Boden.

Weitere Kapitel enthalten stoffbezogene Regelungen, wie Anforderungen an den Umgang mit Arbeits- und Gefahrstoffen sowie den Transport von Gefahrgütern. Um vorzeitig dem Entstehen von Umweltrisiken vorzubeugen, wurden auch Vorgaben für die Beschaffung in das Umweltschutzhandbuch aufgenommen. Im Hinblick auf die besondere Bedeutung in der betrieblichen Praxis nehmen die Regelungen zur Entsorgung von Abfällen und Reststoffen einen breiten Raum ein. Dazu wurde in das Kapitel „Abfallwirtschaft" eine umfassende Abfallordnung mit einer Darstellung der einschlägigen formellen Entsorgungsanforderungen aufgenommen. Weitere Kapitel des Handbuches befassen sich mit den Themen „Lärm", „Strahlenschutz" sowie „Störfallvorsorge und Störfallabwehr". Vorgaben für die Aus- und Weiterbildung im Umweltschutz sowie die Durchführung von Umweltaudits runden die prozeß- und ablaufbezogenen Inhalte des Handbuches ab. Während das Umweltschutzhandbuch eine Beschreibung von Aufgaben und Zuständigkeiten enthält, sind die sich daraus ableitenden Maßnahmen in Betriebsanweisungen geregelt.

6. Standortabgrenzung

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß nach der EG-Umweltauditverordnung Auditgegenstand nicht das Unternehmen als solches ist, sondern lediglich der Standort, d. h. die Fläche auf dem die gewerbliche Tätigkeit durchgeführt wird. Diese Definition wirft dann Fragen auf, wenn mehrere Wasserwerke in ein Versorgungsnetz einspeisen. Können diese Wasserwerke einen einheitlichen Standort bilden oder müssen die Gelände der einzelnen Wasserwerke jeweils für sich als Standort betrachtet werden? Beim Umweltaudit im Bereich der GEW-Wasserversorgung bilden die drei betroffenen Wasserwerke einen einheitlichen Standort. Ausschlaggebend dafür war der Umstand, daß

zwei Wasserwerke für einen unbemannten Betrieb ausgerüstet sind und von einem dritten Wasserwerk gesteuert werden. In diese Standortbestimmung wurden - als Infrastruktur und Ausstattung - rund 1500 km Rohrnetze, 84000 Hausanschlußleitungen, rund 1 500 Baustellen jährlich sowie Eigentumsflächen des Unternehmens innerhalb der Wasserschutzgebiete einbezogen, die einer grundwasserschonenden Bewirtschaftungsform zugeführt wurden. Neben dem Standort der Wasserwerke bildete das Wasserlabor einen eigenen Standort.

7. Umweltprüfungen und Arbeitssicherheitsprüfungen

Nach dem Verständnis der EG-Umweltweltauditverordnung handelt es sich bei der Umweltprüfung um eine erstmalige umfassende Bestandsaufnahme der umweltbezogenen Fragestellungen, Auswirkungen und des betriebliches Umweltschutzes im Zusammenhang mit der Tätigkeit an einem Standort (siehe Art. 2 b der EG-Umweltauditverordnung). Da die GEW bereits vor Durchführung der Umweltprüfungen an den betroffenen Standorten für das gesamte Unternehmen eine Umweltpolitik und ein Umweltmanagementsystem eingeführt hatte, verfolgten die Umweltprüfungen zugleich das Ziel, die Konformität dieser Instrumente mit den Vorgaben der EG-Umweltauditverordnung festzustellen. Darüber hinaus war erklärtes Ziel, die Übereinstimmung der Tätigkeiten an den Standorten mit den einschlägigen Umweltschutzvorschriften zu prüfen. Die Umweltprüfungen führte ein Auditteam durch, das sowohl mit internen und als auch externen Prüfern besetzt war. Bei der Aufstellung der Auditgruppe wurde auf eine interdisziplinäre Zusammensetzung geachtet.

Die eigentliche Prüfung umfaßte eine Dokumentenprüfung sowie eine Vor-Ort-Aufnahme bei der mit ausgewählten an den Standorten beschäftigten Mitarbeitern Interviews durchgeführt wurden. Zuvor wurden die dafür vorgesehenen Interviewpartner im Rahmen einer Eingangspräsentation über den Ablauf des Umweltaudits informiert. Der Ablauf und die Ergebnisse der Umweltaudits wurden in Prüfberichten dokumentiert. Im Mittelpunkt dieser Prüfberichte steht die Dokumentation und Bewertung der für die Standorte registrierten Energie- und Stoffströme. Die Prüfberichte waren zugleich die Grundlage für die Ableitung und Entwicklung der Umweltziele und der Umweltprogramme mit deren Hilfe bis zur Durchführung der nächsten Umweltbetriebsprüfungen an den Standorten weitere Verbesserungen angestrebt werden.

Am Standort der Wasserwerke sowie am Standort des Wasserlabors wurden in Anlehnung an die Umweltprüfungen zusätzlich sog. Arbeitssicherheitsprüfungen durchgeführt. Im Mittelpunkt dieser Arbeitssicherheitsprüfungen standen die nach dem Arbeitsschutzgesetz durchzuführenden Gefährdungsbeurteilungen. Die Ergebnisse dieser Gefährdungsbeurteilungen bildeten die Grundlage für die Festlegung von Verbesserungsmaßnahmen, die in Form von Arbeitssicherheitszielen dokumentiert wurden.

8. Programm und Ziele der kontinuierlichen Verbesserung

In der Bedeutungsrangfolge der festgelegten Umweltprogramme und Umweltziele stehen an den Standorten der Heizkraftwerke erwartungsgemäß energiewirtschaftliche Ziele ganz oben. So hat sich GEW im Rahmen des Umweltaudit am Standort Köln-Niehl zum Bau einer Gasentspannungsanlage verpflichtet, die es zukünftig ermöglicht, mit einer Leistung von 4 MW emissionsfrei weiteren Strom am Standort zu erzeugen. Desweiteren erwartet man sich von einer systematischen Überprüfung und Realisierung der energetischen Optimierungspotentiale bestimmter Aggregate eine weitere Senkung des Energieeigenverbrauchs der Anlagen am Standort. Die gleiche Zielrichtung verfolgt der Einbau von Wärmedämm- und Isoliermaterialien im Verwaltungsgebäude. Weitere Umweltziele laufen

darauf hinaus, unfallbedingte Umweltauswirkungen zu vermeiden und zu vermindern sowie Lagerrisiken zu minimieren. Im Hinblick auf die Entsorgung von Abfällen und Reststoffen soll durch Einrichtung zusätzlicher Sammelmöglichkeiten die Verwertungsquote bei Abfällen weiter gesteigert werden. Die Vielzahl der festgelegten Umweltziele und der daraus im Rahmen des Umweltprogramms entwickelten Maßnahmen wird ergänzt durch Maßnahmen zur Förderung des Umweltbewußtseins. Hierfür ist die Durchführung von Schulungen vorgesehen. Am Standort Köln-Merkenich besteht das herausragende energiewirtschaftliche Ziel in der bereits im Vorfeld des Umweltaudit geplanten Modernisierung des 100 MW-Kraftwerkblocks durch eine Gas- und Dampfturbinenanlage. Die daraus für diesen Anlagenteil resultierende Brennstoffeinsparung beträgt 35 %. Hierdurch können jährlich rund 81000 Tonnen CO_2 vermieden werden. Ein weiteres Ziel war hier die Planung und Projektierung eines Fernwärmespeichers. Andere Ziele sind ihren Inhalten nach mit den Zielvorgaben am Standort Köln-Niehl vergleichbar. Für die Umsetzung der Maßnahmen zu deren Durchführung man sich in der Umwelterklärung verpflichtet hat, sind in Abhängigkeit von der Dringlichkeit und Realisierbarkeit bestimmte Fristen vorgesehen, wobei an jedem Standort spätestens bis zur Durchführung der nächsten Umweltbetriebsprüfung nach drei Jahren alle Maßnahmen umzusetzen sind.

Am Standort der Wasserwerke zielen die im Vordergrund stehenden Umweltziele auf einen ressourcenschonenden Umgang mit Wasser sowie auf Maßnahmen zur Sicherung der Grundwasserqualität ab. Von Bedeutung sind weiter die Programmpunkte die auf eine Energieeinsparung abstellen. So ist beabsichtigt, die Werksausgangsdrücke der Wasserwerke zum Energiesparen in der Nacht um 2 % abzusenken. Im Bereich der Rohrnetze soll ein Kriterienkatalog erstellt werden, mit dem zukünftig Fremdfirmen im Hinblick auf ihre Umweltschutzbemühungen bewertet werden können. Auch für die Arbeitssicherheit wurden entsprechende Ziele festgelegt und durch zukünftige Maßnahmen konkretisiert.

9. Inhalte der Umwelterklärungen

Nach der ersten Umweltprüfung aber auch nach jedem weiteren Betriebsprüfungszyklus ist eine Umwelterklärung zu erstellen (siehe Art. 5 Abs. 1 der EG-Umweltauditverordnung). Die Umwelterklärung wird für die Öffentlichkeit verfaßt und soll in knapper, verständlicher Form geschrieben sein. Der dafür notwendige Inhalt wird von der EG-Umweltauditverordnung vorgegeben. Die Umwelterklärungen der GEW für die auditierten Standorte enthalten als wesentliche Bestandteile eine Darstellung der Umweltpolitik bzw. der Arbeitssicherheitspolitik und der betreffenden Managementsysteme des Unternehmens, eine Beschreibung der Anlagen, die Dokumentation und Interpretation der Energie- und Stoffströme sowie eine Darstellung der festgelegten Umweltziele und Umweltprogramme. Sie geben weiter Auskunft über die nächsten Betriebsprüfungen sowie die zugelassenen Gutachter, die die Umwelterklärungen für gültig erklärt haben.

10. Gültigkeitserklärungen und Eintragungsverfahren

Voraussetzung für eine Gültigkeitserklärung ist eine dem vorausgehende Prüfung durch einen zugelassenen und unabhängigen Umweltgutachter, die darauf abzielt, festzustellen, ob die Umweltpolitik, das Umweltmanagementsystem, das Umweltprogramm, die Methodik der Umweltprüfung, die voraussichtlichen Maßnahmen der Umweltbetriebsprüfung sowie die Umwelterklärung den Vorgaben und Anforderungen der EG-Umweltauditverordnung entsprechen (siehe Art. 4 Abs. 3 der EG-Umweltauditverordnung). Aufgabe des Gutachters ist es darüber hinaus zu prüfen, ob die

Angaben in der Umwelterklärung zuverlässig sind und ob die Umwelterklärung alle wichtigen Umweltfragen die für den betrachteten Standort von Bedeutung sind, in angemessener Weise berücksichtigt (siehe Art. 4 Abs. 5 d der EG-Umweltauditverordnung). Dem Gutachterauftrag durch den Betreiber, der in der Auswahl des zugelassenen Gutachters frei ist, liegt dabei ein privatrechtlicher Vertrag zugrunde. Die beauftragten Gutachter sichteten und prüften bei GEW zunächst einmal die gewünschten und ihnen zur Verfügung gestellten Dokumente. Anschließend fanden die eigentlichen Prüfungen „Vorort" statt, die auch Interviews mit ausgewählten Mitarbeitern an den Standorten umfaßten. Am Standort der Wasserwerke und am Standort des Wasserlabors begutachtete der Umweltgutachter als Sicherheitsfachkraft zusätzlich die Situation der Arbeitssicherheit.

Das positive Ergebnis der Begutachtungen in Form von Gültigkeitserklärungen setzte GEW schließlich in die Lage, die Eintragung in das Verzeichnis der eingetragenen Standorte, das von der Kommission jährlich im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften veröffentlicht wird, zu beantragen. Dieser Antrag war an die in Nordrhein-Westfalen als zentrale Eintragungsinstanz zuständige Industrie- und Handelskammer in Duisburg zu richten. Das Umweltauditgesetz sieht hierfür in § 33 Abs. 2 Satz 1 vor, daß die zuständigen Umweltschutzbehörden von der Eintragungsstelle über den Antrag auf Eintragung zu informieren sind und innerhalb von vier Wochen die Gelegenheit zur Stellungnahme erhalten. Da die innerhalb dieser Frist abzugebenden Stellungnahmen der aufgeforderten Umweltschutzbehörden positiv waren, stand einer Eintragung der GEW-Standorte nichts mehr entgegen. Die Eintragungen erfolgten unter den Registrierungsnummern DE-S-142-00006 und DE-S-142-00021 für die Standorte der Heizkraftwerke sowie unter den Registrierungsnummern DE-S-142-00039 für den Standort der Wasserwerke und DE-S-142-00040 für den Standort des Wasserlabors.

11. Resümee

Rückblickend und zusammenfassend ist das Fazit der GEW zum Umweltaudit zweigeteilt. Als uneingeschränkt positiv werden die Innenwirkungen des Umweltaudit beurteilt. So sind aufgrund der systematischen Suche nach Optimierungspotentialen Verbesserungen im Umweltschutz erkannt und eingeleitet worden. Dabei fallen die durch die festgelegten Ziele und die Umweltprogramme angestoßenen Investitionen um so leichter, weil sich viele Maßnahmen nicht nur ökologisch sondern auch ökonomisch vorteilhaft auswirken werden. Besonders hervorzuheben sind die Akzeptanz und die Mitwirkungsbereitschaft der Mitarbeiter die unter dem Gesichtspunkt des stoffbezogenen Umweltschutzes und des Arbeitsschutzes insbesondere beim Umgang mit Gefahrstoffen und Abfällen häufig persönlich an ihren Arbeitsplätzen mit Umweltschutz- und Arbeitssicherheitsfragen konfrontiert werden. Deutlich zurückhaltender fällt dagegen das Resümee für die Außenwirkungen des Umweltaudits aus. Die Absicht des Energieversorgers, Strom, Dampf und Fernwärme aus auditierten Heizkraftwerken anzubieten, wurde bisher von den Kunden nicht honoriert. Möglicherweise wird sich das aber noch im Zuge der Liberalisierung der Energiemärkte auswirken. Spürbare Erleichterungen im Genehmigungsverfahren sowie im Rahmen der behördlichen Überwachung konnte entgegen den Zusagen der Politik bisher nicht festgestellt werden. Hervorzuheben ist dagegen der deutliche Imagegewinn für das Unternehmen, der sich durch eine beeindruckende Medienresonanz belegen läßt.

Systemanalyse

Politikszenarien für den Klimaschutz

Peter Markewitz

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)

Forschungszentrum Jülich

1 Einleitung

Im Rahmen der Klimakonferenz von Kyoto hat sich die Europäische Gemeinschaft verpflichtet, die Emissionen von sechs Treibhausgasen (CO_2, CH_4, N_2O, HFC, PFC, SF6) um 8% bis zum Jahr 2010 bezogen auf das Emissionsniveau des Jahres 1990 zu senken. Im Nachgang zur Kyoto-Konferenz haben die Umweltminister der insgesamt 15 EU-Mitgliedsstaten die Reduktionsziele der jeweiligen Nationen festgelegt. Demnach muß Deutschland die Emissionen der besagten Gase um 21% reduzieren. (vgl. Tabelle 1)

Zusätzlich hält die Bundesregierung am nationalen Minderungsziel von 25% bis zum Jahr 2005 fest. Bereits 1990 hat die Bundesregierung eine Interministerielle Arbeitsgruppe (IMA-CO_2) gebildet, mit dem Ziel hierfür geeignete Reduktionsmaßnahmen vorzuschlagen, zu analysieren sowie die Voraussetzungen für eine evtl. Implementierung zu schaffen. In diesem Rahmen wurde ein Katalog erstellt, der eine Vielzahl von einzelnen Minderungsmaßnahmen enthält, die sich über alle Sektoren der Energiewirtschaft erstrecken. Das Umweltbundesamt Berlin das Forschungszentrum Jülich, das Deutsche Institut für Wirtschaft (DIW) Berlin, das Fraunhofer-Institut FHG-ISI Karlsruhe sowie das Öko-Institut Berlin die Minderungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu analysieren und Szenarien für das Jahr 2005 zu entwickeln. Im nachfolgenden werden die wesentlichsten Ergebnisse dieser Arbeiten vorgestellt. Eine umfassende Ergebnisdarstellung findet sich in /Ziesing et al. 1997/.

Luxemburg	-28%	Niederlande	-6%
Dänemark	-21,5%	Finnland	0%
Deutschland	-21%	Frankreich	0%
Österreich	-13%	Schweden	+4%
Großbritannien	-12,5%	Irland	+13%
Belgien	-7,5%	Spanien	+15%
Italien	-6,5%	Griechenland	+25%
		Portugal	+27%
EU gesamt	**-8,0%**		

Tab. 1: Reduktionsziele der EU-Mitgliedsstaaten

2 Klimagasemissionen in Deutschland

Seit 1990 haben die CO_2-Emissionen in Deutschland um ca. 12.4% abgenommen. Hauptursache hierfür sind die durch die Vereinigung bedingten Veränderungen in den neuen Bundesländern, wie z.B. die industrielle Umstrukturierung, der sektorübergreifende Rückgang des Braunkohleneinsatzes und der Einsatz moderner bzw. hocheffizienter Stromerzeugungstechniken. In der jüngeren Vergangenheit wurden CO_2-Emissionsprognosen und -szenarien von unterschiedlichen wissenschaftlichen Instituten erarbeitet. Fast alle Studien kommen zu dem Schluß, daß das Minderungsziel der Bundesregierung unter der Randbedingung einer Business-as-Usual-Fortschreibung nicht erreicht werden kann und das zum Erreichen des Ziels erhebliche Anstrengungen erforderlich sind.

Die Dimension der Nicht-CO_2-Klimagase des Kyoto-Protokolls wird im folgenden für das Jahr 1994 aufgezeigt, da für dieses Jahr entsprechende Emissionsdaten /BMU 1997/ vorliegen. Bewertet man diese Klimagase mit Treibhausgaspotentialen, liegen die entsprechenden CO_2-Äquivalentemissionen des Jahres 1994 ca. 23% über den CO_2-Emissionen (Abb. 1). Allerdings ist der Einfluß der Emissionen von HFC, PFC sowie SF6 vernachlässigbar gering. Ihr Anteil an den CO_2-Äquivalentemissionen beträgt lediglich ca. 3%. Hauptverursacher der Methanemissionen ist der heimische Steinkohlenbergbau, während für die N_2O-Emissionen im wesentlichen die Landwirtschaft, Industrieprozesse und der Straßenverkehr verantwortlich sind.

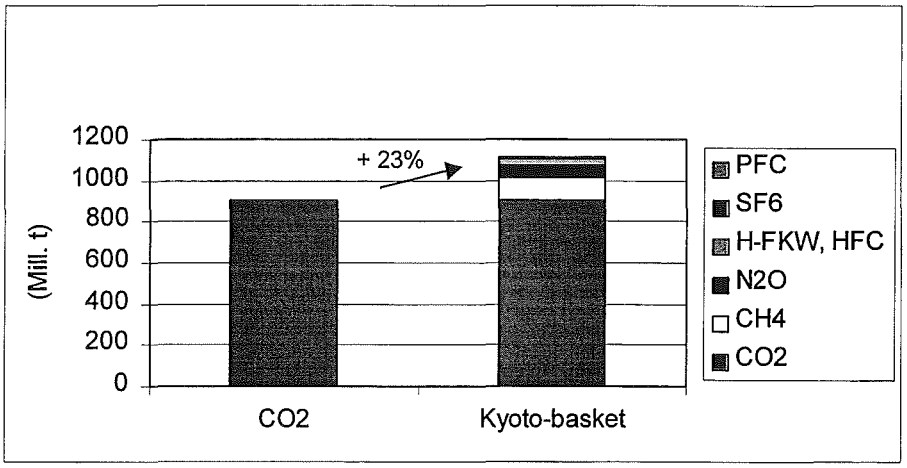


Abb. 1: Treibhausgasemissionen (als CO_2-Äquivalente) in Deutschland im Jahr 1994

3 Definition von CO_2-Projektionen und –Szenarien für das Jahr 2005

Im Rahmen der vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Studie wurden die von der Interministeriellen Arbeitsgruppe vorgeschlagenen Maßnahmen im Hinblick auf ihre Implementierung, Aktualität und Quantifizierbarkeit untersucht. Von den ca. 109 Maßnahmen, die im ersten Nationalbericht nach dem Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen aufgeführt sind, waren bereits zum Zeitpunkt der Berichterstattung 88 Maßnahmen beschlossen und umgesetzt, während sich 21 Maßnahmen noch in der Phase der Vorbereitung oder Diskussion

befanden. Inzwischen sind einige weitere klimaschutzpolitische Maßnahmen hinzugekommen, wie z.B. die Selbstverpflichtungserklärung der deutschen Industrie.

Entsprechend den Richtlinien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurden für das Jahr 2005 drei CO_2-Projektionen bzw. –szenarien aufgestellt.

- *Ohne-Maßnahmen-Szenario*

Dieses Szenario geht davon aus, daß keine Klimaschutzmaßnahmen in Vergangenheit ergriffen wurden und keine Maßnahmen unternommen werden. Das Szenario, das rein hypothetischen Charakter besitzt, kann zum Vergleich mit den anderen Szenarien herangezogen werden, um Effekte wie strukturelle Veränderungen, Bevölkerungsentwicklung etc. analysieren zu können.

- *Mit -Maßnahmen-Szenario*

Das Mit-Maßnahmen-Szenario berücksichtigt alle Reduktionsmaßnahmen, die von der Bundesregierung bis Mitte des Jahres 1996 implementiert wurden. Durch den Vergleich mit dem Ohne-Maßnahmen-Szenario werden die Auswirkungen dieser Maßnahmen deutlich.

- *Mit –weiteren- Maßnahmen-Szenario*

Mit den von der Bundesregierung bisher eingeleiteten Maßnahmen (z.B. Wärmeschutzverordnung etc.) läßt sich das Minderungsziel nicht erreichen. Daher wurden im Rahmen des Projekts weitere Maßnahmen definiert sowie deren Auswirkungen berechnet und zu einem Szenario zusammengefaßt.

Die erforderlichen Rahmendaten, wie beipielsweise die Wirtschaftsentwicklung, Bevölkerungsprognose etc. wurden dem jüngsten energiewirtschaftlichen Gutachten der Prognos AG /Prognos 1995/ entnommen, das im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft erstellt wurde. In einem ersten Schritt wurden die Auswirkungen der bis zum Jahr 1996 eingeleiteten Maßnahmen abgeschätzt. Das Ohne-Maßnahmen-Szenario wurde konstruiert, indem diese eingesparten CO_2-Mengen zu den von Prognos ausgewiesenen Emissionen addiert wurden. In einem zweiten Schritt wurden die Maßnahmen abgeschätzt, die nicht im Prognos-Gutachten enthalten sind, wie z.B. die Selbstverpflichtung der deutschen Industrie. Das Mit-Maßnahmen-Szenario wurde erstellt, indem die durch diese Maßnahmen bedingten Minderemissionen vom Emissionsniveau des Prognos-Gutachtens subtrahiert wurden. In einem dritten Schritt wurden zusätzliche CO_2-Minderungsmaßnahmen identifiziert, deren Reduktionsbeiträge von den Emissionen des Mit-Maßnahmen-Szenarios subtrahiert wurden. Zur Orientierungshilfe und zur Formulierung dieser weiteren Maßnahmen wurde u.a. ein technikorientiertes Optimierungsmodell eingesetzt, das den Energiefluß der Bundesrepublik abbildet und mit dem die kosteneffizientesten Maßnahmen errechnet werden können.

4 Ergebnisse

Im Ohne-Maßnahmen-Szenario dürften die CO_2-Emissionen in Deutschland insgesamt (ohne internationaler Luftverkehr) in Jahre 2005 mit knapp 984 Mill. t lediglich um rund 30 Mill t oder um 3% niedriger sein als 1990. Gegenüber 1990 würden sie sich sogar wieder erhöhen, und zwar um etwa 89 Mill. t oder um rund 10%. (vgl. Abb.2, Abb.3, Tabelle 2).

Unter sektoralen Aspekten ist hervorzuheben, daß es in der Industrie wie im Energiesektor in der Periode von 1990 bis 2005 durchweg zu einer kräftigen Emissionsminderung kommen würde. Hierin schlägt sich vor allem die Entwicklung in der ersten Hälfte der neunziger Jahre in den neuen

Bundesländern nieder. Daneben dürfen auch strukturelle Änderungen im Industriesektor der alten Bundesländer nicht übersehen werden.

Im Verkehrssektor wird insbesondere eine kräftige Steigerung der CO_2-Emissionen erwartet, der im wesentlichen auf ein wachsendes Mobilitätsbedürfnis zurückzuführen ist. Die Emissionen könnten im Jahre 2005 um reichlich 50 Mill. t oder um 28% höher sein als 1990.

Ohne klimaschutzpolitische Maßnahmen wäre auch bei den Haushalten mit einer spürbaren Zunahme der Emissionen zu rechnen (1990/2005: knapp 8%), während für den Sektor Kleinverbraucher über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg ein im großen und ganzen stagnierender Emissionsverlauf angenommen wird. Daher verbirgt sich eine gegenläufige Entwicklung in den Teilperioden: Während die Emissionen bei den Kleinverbrauchern von 1990 bis 1995 um rund zwei Drittel zurückgegangen waren, dürften sie von 1995 bis 2005 um mehr als zwei Fünftel zunehmen.

Sektoren	Ist-Werte		Szenario-Werte				
	1990	1995	2000	2005	90/95	95/05	90/05
	CO_2-Emissionen in Mill t.				Veränderungen in %		
Industrie	169.7	126.8	122.5	122.5	-25.3	-3.4	-27.8
Kleinverbraucher	75.7	51.9	70.5	73	-31.4	40.7	-3.6
Haushalte	128.4	135.2	135.3	138.5	5.3	2.4	7.9
Verkehr	184.9	196.1	231	236	6.1	20.3	27.6
Summe Endenergiesektoren	*558.7*	*510*	*559.3*	*570*	-8.7	11.8	2.0
Kraftwerke	353.6	317.5	331.4	345.5	-10.2	8.8	-2.3
Fernwärme	42.9	31.7	29.7	26.9	-26.1	-15.1	-37.3
übriger Energiesektor	43	24	21	19	-44.2	-20.8	-55.8
Summe Energiesektor	*439.5*	*373.2*	*382.1*	*391.4*	-15.1	4.9	-10.9
Insgesamt	*998.2*	*883.2*	*941.4*	*961.4*	-11.5	8.9	-3.7
Außerdem: Eneuerbare Energien	0	0	7.9	12.8	-	-	-
Summe energiebedingte Emissionen	*998.2*	*883.2*	*949.3*	*974.2*	-11.5	10.3	-2.4
Prozeßbedingte Emissionen	27.5	25.2	26.1	25.5	-8.4	1.2	-7.3
Emissionen insgesamt	1025.7	908.4	975.4	999.7	-11.4	10.1	-2.5
Emissionen ohne intern. Luftverkehr	*1014.2*	*894.5*	*960.4*	*983.8*	-11.8	10.0	-3.0

Tab. 2: Entwicklung der CO_2-Emissionen in Deutschland bis 2005 im „Ohne-Maßnahmen-Szenario"

Mit dem Mit-Maßnahmen-Szenario dürften die CO_2-Emissionen im Jahre 2005 um 147 Mill. t oder um 14.5% niedriger sein als 1990. Das Minderungsziel der Bundesregierung würde demzufolge nicht eingehalten (vgl. Abb. 2, Abb. 3, Tabelle 3). Gegenüber 1995 würde die Reduktion nur knapp 27 Mill. t oder 3% betragen. Die in den letzten Jahren insbesondere auf Bundesebene ergriffenen klimaschutzpolitischen Maßnahmen führen dazu, daß die CO_2-Emissionen über die gesamte Betrachtungsperiode hinweg in allen Sektoren –außer im Verkehr- sinken. Dabei kommt es –wie im Ohne-Maßnahmen-Szenario- zu einer überdurchschnittlichen starken Emissionsminderung bei der Industrie und im Energiesektor. Hervorzuheben ist in diesem Kontext die Selbstverpflichtung der deutschen Industrie, die eine CO_2-Minderung von schätzungsweise 11 Mill. t bewirkt. Aber auch bei den Kleinverbrauchern und bei den Haushalten werden sich die Emissionen deutlich reduzieren. Als wirkungsvollste Maßnahmen sind für den Haushaltssektor die Novellierung der Wärmeschutzverordnung und der Heizungsanlagenverordnung zu nennen sowie das für die neuen Länder aufgelegte KfW-Programm, mit dem energiesparende Sanierungen finanziell unterstützt werden. Im Verkehrssektor muß jedoch mit einer weiteren Zunahme der CO_2-Emissionen gerechnet werden. Im Jahre 2005

dürften sie hier um rund 40 Mill. t oder um ein Fünftel höher sein als 1990. Ursache ist –wie bereits angemerkt- der starke Anstieg der Verkehrsnachfrage, der die bislang unternommenen Minderungsanstrengungen überkompensiert.

Gegenüber dem Ohne-Maßnahmen-Szenario können die CO_2-Emissionen im Mit-Maßnahme-Szenario um 12% gesenkt werden. Besonders hohe absolute Beiträge zu dieser Reduktion leisten die Haushalte (-28 Mill t.) und der Bereich der Stromerzeugung (-27 Mill t). Trotz dieser Emissionsrückgänge wird das Minderungsziel der Bundesregierung nicht eingehalten. Um dieses zu erreichen, müßten die CO_2-Emissionen bis 2005 gegenüber dem Mit-Maßnahme-Szenario um weitere knapp 110 Mill t. oder zusätzlich um reichlich 10 Prozentpunkte verringert werden.

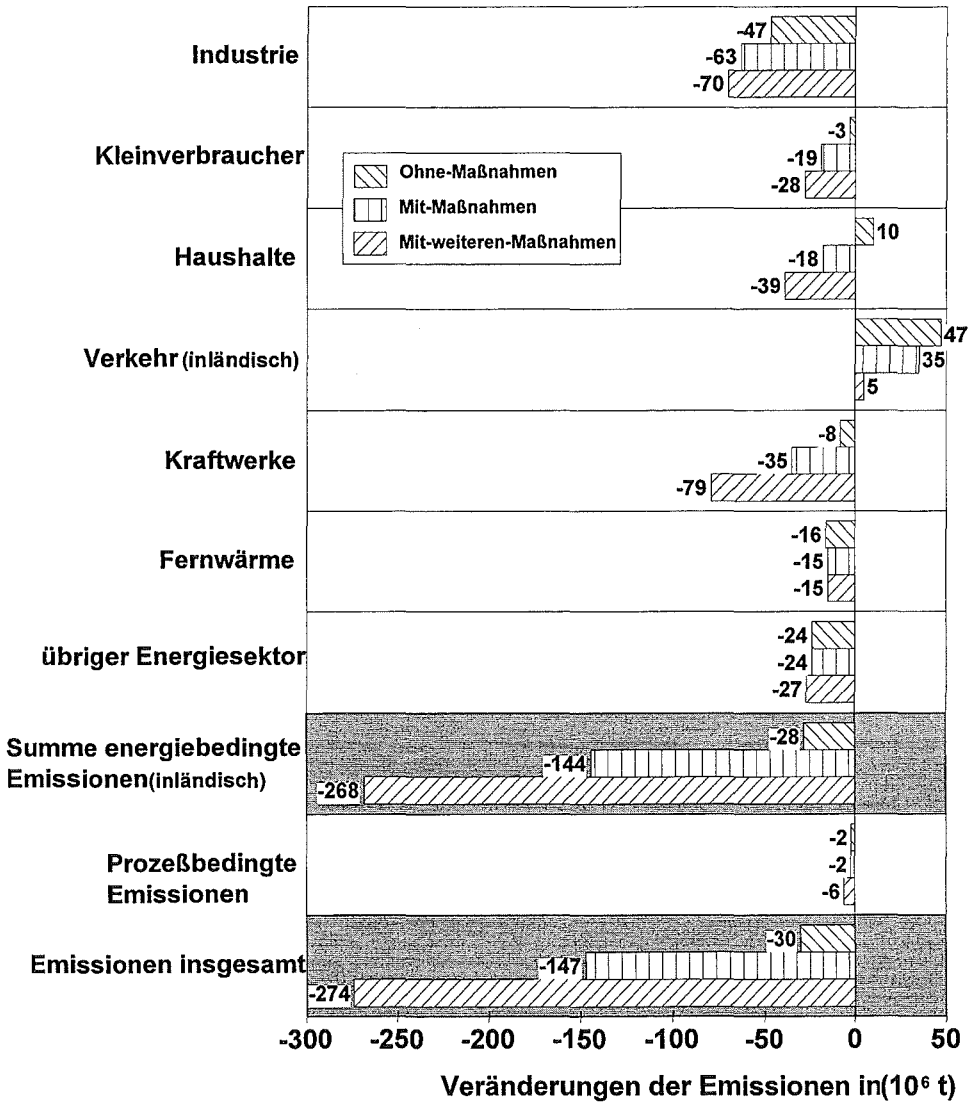


Abb. 2: Absolute Veränderungen der CO_2-Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2005 in den drei Szenarien

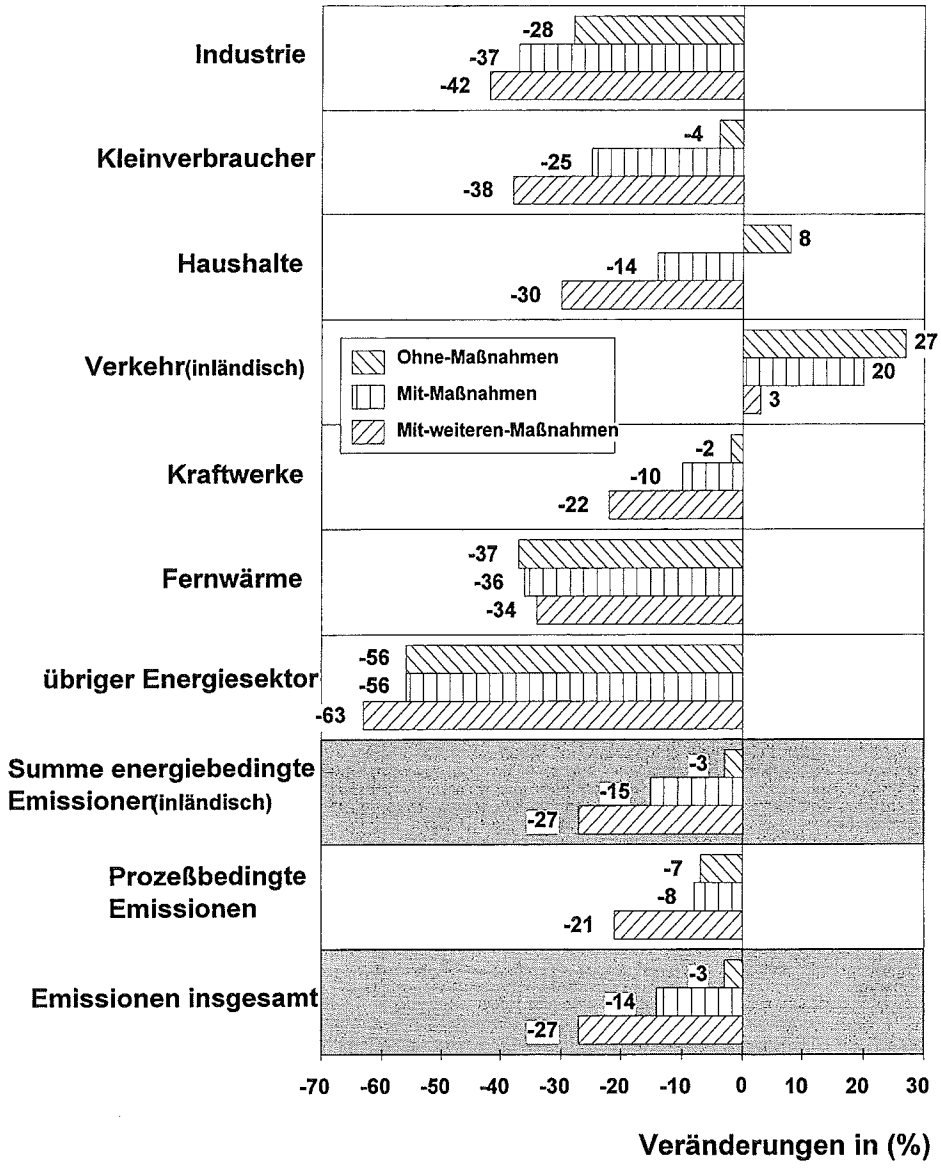


Abb. 3: Relative Veränderungen der CO_2-Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2005 in den drei Szenarien

Sektoren	Ist-Werte		Szenario-Werte				
	1990	1995	2000	2005	90/95	95/05	90/05
	CO_2-Emissionen in Mill t.				Veränderungen in %		
Industrie	169.7	126.8	116.9	107.1	-25.3	-15.5	-36.9
Kleinverbraucher	75.7	51.9	61.6	56.5	-31.4	8.9	-25.4
Haushalte	128.4	135.2	115.9	110.7	5.3	-18.1	-13.8
Verkehr	184.9	196.1	223	224	6.1	14.2	21.1
Summe Endenergiesektoren	*558.7*	*510*	*517.4*	*498.3*	-8.7	-2.3	-10.8
Kraftwerke	353.6	317.5	316.7	318.9	-10.2	0.4	-9.8
Fernwärme	42.9	31.7	30	27.5	-26.1	-13.2	-35.9
übriger Energiesektor	43	24	21	19	-44.2	-20.8	-55.8
Summe Energiesektor	*439.5*	*373.2*	*367.7*	*365.4*	-15.1	-2.1	-16.9
Insgesamt	*998.2*	*883.2*	*885.1*	*863.7*	-11.5	-2.2	-13.5
Außerdem: Eneuerbare Energien	0	0	-2.3	-5.6	-	-	-
Summe energiebedingte Emissionen	*998.2*	*883.2*	*882.8*	*858.1*	-11.5	-2.8	-14.0
Prozeßbedingte Emissionen	27.5	25.2	26	25.3	-8.4	0.4	-8.0
Emissionen insgesamt	1025.7	908.4	908.8	883.4	-11.4	-2.8	-13.9
Emissionen ohne intern. Luftverkehr	*1014.2*	*894.5*	*894*	*867.5*	-11.8	-3.0	-14.5

Tab. 3: Entwicklung der CO_2-Emissionen in Deutschland bis 2005 im „Mit-Maßnahmen-Szenario"

Sektoren	Ist-Werte		Szenario-Werte				
	1990	1995	2000	2005	90/95	95/05	90/05
	CO_2-Emissionen in Mill t.				Veränderungen in %		
Industrie	169.7	126.8	116.1	99.3	-25.3	-21.7	-41.5
Kleinverbraucher	75.7	51.9	60.6	47.3	-31.4	-8.9	-37.5
Haushalte	128.4	135.2	109	89.9	5.3	-33.5	-30.0
Verkehr	184.9	196.1	217	194	6.1	-1.1	4.9
Summe Endenergiesektoren	*558.7*	*510*	*502.7*	*430.5*	-8.7	-15.6	-22.9
Kraftwerke	353.6	317.5	303.5	274.8	-10.2	-13.4	-22.3
Fernwärme	42.9	31.7	30.1	28.1	-26.1	-11.4	-34.5
übriger Energiesektor	43	24	20	16	-44.2	-33.3	-62.8
Summe Energiesektor	*439.5*	*373.2*	*353.6*	*318.9*	-15.1	-14.5	-27.4
Insgesamt	*998.2*	*883.2*	*856.3*	*749.4*	-11.5	-15.1	-24.9
Außerdem: Eneuerbare Energien	0	0	-8	-15.1	-	-	-
Summe energiebedingte Emissionen	*998.2*	*883.2*	*848.3*	*734.3*	-11.5	-16.9	-26.4
Prozeßbedingte Emissionen	27.5	25.2	25.5	21.6	-8.4	-14.3	-21.5
Emissionen insgesamt	1025.7	908.4	873.8	755.9	-11.4	-16.8	-26.3
Emissionen ohne intern. Luftverkehr	*1014.2*	*894.5*	*858.7*	*740*	-11.8	-17.3	-27.0

Tab. 4: Entwicklung der CO_2-Emissionen in Deutschland bis 2005 im „Mit-weiteren- Maßnahmen-Szenario"

Das Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario, das die grundsätzlich als realisierbar erscheinenden klimaschutzpolitischen Maßnahmen zur Reduktion der CO_2-Emissionen in dem von der Bundesregierung angestrebten Ausmaß untersucht, kommt zu dem Ergebnis, daß die CO_2-Emissionen im Jahre 2005 um reichlich 270 Mill. t oder um rund 27% niedriger ausfallen könnten als 1990 (vgl. Abb.2, Abb.3, Tabelle 4). Unter der Voraussetzung, daß die jeweils vorgeschlagenen Maßnahmen auch umgesetzt werden, könnte also das Ziel der Bundesregierung erreicht werden.

Besonders hohe Zielerreichungsbeiträge werden von der Industrie, der Kraftwirtschaft und von den Haushalten erwartet: An der absoluten Minderung der CO_2-Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2005 sind die Kraftwerke mit 29%, die Industrie mit 26%, die Haushalte mit 14% und die Kleinverbraucher mit gut 10% beteiligt. Allerdings handelt es sich in aller Regel um drastische auf Ordnungsrecht basierende Maßnahmen. Als wesentlichste Maßnahme im Industriesektor wird die Einführung einer Wärmenutzungsverordnung gesehen, deren Minderungsbeitrag ungefähr 6.5 Mill. t beträgt. Die Einführung einer solchen Verordnung dürfte nicht unproblematisch sein, da die Industrieverbände sich seinerzeit freiwillig verpflichtet haben, CO_2-Emissionen zu reduzieren, allerdings unter der Bedingung, daß die Bundesregierung auf ordnungsrechtliche Maßnahmen verzichtet. Im Haushaltssektor wird von einer energetischen Sanierung des Altbaubestandes ausgegangen, deren Minderung ca. 11 Mill. t CO_2 beträgt. Zusätzlich wird davon ausgegangen, daß die erst 1995 novellierte Wärmeschutzverordnung noch einmal verschärft wird, wodurch fast 4 Mill. t CO_2 zusätzlich eingespart werden könnten. Im Verkehr kommt es im Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario gegenüber 1990 nur noch zu einem leichten Anstieg der Emissionen; im Vergleich zu 1995 bedeutet dies sogar eine geringe Verminderung. Es ist deutlich darauf hinzuweisen, daß das Eintreten der Ergebnisse dieses Szenarios unabdingbar davon abhängig sein dürfte, daß im Verkehrssektor zumindest eine solche deutlich abgeschwächte Entwicklung herbeigeführt werden kann. Die angestrebten klimaschutzpolitischen Ziele werden vor diesem Hintergrund also nur dann erfolgreich umgesetzt werden können wenn die Emissionstrends im Verkehrssektor gestoppt oder sogar umgekehrt werden können. Im Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario wird von einer drastischen Kraftstoffsteuererhöhung (2 DM/l) sowie einer CO_2-abhängigen KFZ-Steuer für Neufahrzeuge ausgegangen. Hierdurch soll einerseits Verkehrsnachfrage gesenkt und andererseits die Einführung sparsamer Kraftfahrzeuge erreicht werden.

Die Analysen zeigen, daß sich die Realisierung des Reduktionsziels nicht nur auf wenige Maßnahmen stützen darf sondern den Einsatz komplexer Maßnahmenbündel in allen Bereichen erfordert. Von zentraler Bedeutung für die Realisationsfähigkeit des Reduktionsziels ist der zeitliche Aspekt. Nur wenn die notwendigen Maßnahmen und Maßnahmenbündel unverzüglich umgesetzt werden, besteht in der verbleibenden kurzen Zeit von nur noch 8 Jahren die Chance auf Zielerreichung. Ansonsten wäre die Zielverfehlung von vornherein programmiert.

5 Fazit

Gegenüber dem Ohne-Maßnahmen-Szenario beträgt die CO_2-Reduktion mit den im IMA-Katalog enthaltenen Maßnahmen ca. 11%. Bezogen auf das Basisjahr des Minderungsbeschlusses beträgt der Rückgang ca. 14%, und das Minderungsziel der Bundesregierung wird nicht eingehalten. Die Analysen zeigen, daß hierfür weitaus drastischere Maßnahmen notwendig sind. Nach Einschätzung des RWI würde alleine eine Umsetzung der IMA-Maßnahmen bis zum Jahr 2005 erhebliche Zusatzbelastungen für die deutsche Volkswirtschaft bedeuten. Die privaten Haushalte müßten ca. 1,5% ihres verfügbaren Einkommens für CO_2-Minderungsmaßnahmen aufwenden. Ein Umsetzung des CO_2-Minderungsbeschlusses setzt neben dem politischen Willen auch die Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft aller Betroffenen voraus.

Bereits heute eingeleitete Minderungsmaßnahmen müssen so konzipiert sein, daß sie weit über das Jahr 2005 hinaus wirken. In Anbetracht des verbleibenden Zeitraums von nur wenigen Jahren bis zum Erreichen des Minderungsziels muß diskutiert werden, ob eine auf den Zeitpunkt 2005 fixierte Minderungsstrategie auch die effizienteste Lösung darstellt. Die Umsetzung von Technikkonzepten ist insbesondere in der Energiewirtschaft mit hohen Investitionen verbunden. Durch die hohe Lebensdauer von großen Anlagen, wie z.B. Kraftwerken, wird Kapital über einen langen Zeitraum gebunden. Ein auf einen kurzen Zeitpunkt fixiertes Minderungsziel kann deshalb mitunter dazu führen, daß Investitionen im Hinblick auf einen darüber hinaus reichenden Zeitraum nicht optimal eingesetzt werden.

6 Literatur

/BMU 1997/

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Hrsg.: Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, April 1997

/Prognos 1995/

Prognos AG: Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa – Perspektiven bis zum Jahr 2020. Untersuchung im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft, Basel, 23. Oktober 1995

/Ziesing et al. 1997/

Ziesing, H.-J., Diekmann, J., Hopf, R., Kleemann, M., Kolb, G., Markewitz, P., Martinsen, D., Jochem, E., Ostertag, K., Schlomann, B., Cames, M., Matthes, F.Chr: Politikszenarien für den Klimaschutz, Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes, Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO_2-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005, herausgegeben von Stein, G., Strobel, B., Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 5, Jülich 1997

Potentiale und Strategien zur Energie- und CO_2-Einsparung im Gebäudebestand

Manfred Kleemann, Armin Kraft, Rainer Heckler

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)

Forschungszentrum Jülich

1. Einführung

Der Haushaltssektor ist der größte Verbrauchssektor

Der gesamte Endenergieverbrauch in Deutschland betrug im Jahre 1996 rund 9630 PJ. Fast ein Drittel, nämlich 30,5 % entfielen auf den Haushaltssektor, der damit vor Industrie, Verkehr und Kleinverbrauchern als der größte Verbrauchssektor in Erscheinung tritt /1/. Damit ist klar, daß wirksame Energieeinsparungen und CO_2-Minderungen in Deutschland nur erreicht werden können, wenn der Haushaltssektor mit einbezogen wird.

Einparpotentiale und Hemmnisse bei der Altbausanierung

Da der Umfang der Neubautätigkeit pro Jahr nur ca. 1 % des Gebäudebestandes ausmacht, kann eine weitere Verschärfung der Wärmeschutzverordnung für Neubauten alleine auf absehbare Zeit keine Energie- und CO_2-Einsparung im Gebäudesektor bewirken. Zum einen ist der prozentuale Anteil der Neubauten am Bestand zu gering, um wirkungsvoll durchzuschlagen und zum anderen wird durch eine Erhöhung der Gebäudeanzahl auf jeden Fall der Gesamtverbrauch erhöht, es sei denn, daß alle neuen Gebäude Nullenergie-Häuser sind.

Problematisch ist die Situation beim Heizwärmeverbrauch der Altbauten. Im Vergleich zu den Anforderungen der geltenden Wärmeschutzverordung ist der tatsächliche Verbrauch der älteren Gebäude zwei bis dreimal zu hoch. Mit den heute am Markt verfügbaren üblichen Dämmtechniken ist ein technisches Einsparpotential je nach Alter und Zustand des Gebäudes bis 75 % realisierbar. Bei Gebäuden in besonders schlechtem energetischen Zustand ist ein Teil des technischen Einsparpotentials auch wirtschaftlich umsetzbar.

Trotz einer Reihe von guten und z.T. vorbildlichen Einzelprojekten kommt die energetische Sanierung des Gebäudebestandes nicht in nachhaltiger und durchgreifender Weise voran. Die Gründe hierfür sind eine Reihe von Hemmnissen, die von unzureichender Information über fehlende Wirtschaftlichkeit bis hin zu mangelndem Umweltbewußtsein reichen.

Zielsetzung des vorliegenden Berichtes

Ziel dieses Berichtes ist es, eine systemanalytische Übersicht zur Problematik der energetischen Bestandsanierung aus Sicht des Klimaschutzes zu geben und die Einsparpotentiale durch Szenariorechnungen aufzuzeigen. Dies soll mithelfen, die Entscheidungsbasis für eine großflächige Umsetzung der Minderungsmaßnahmen zu verbessern.

Nach einer Beschreibung der Ausgangssituation im Gebäudebestand in Kapitel 2 des vorliegenden Beitrages folgt dann in Kapitel 3 die modellgestützte Berechnung von optimalen Sanierungsstrategien

und deren Einbettung in die deutsche Energiewirtschaft. Dazu wird das MARKAL-IKADAT Modell eingesetzt, das die Abbildung und Analyse von Reduktionsstrategien auf nationaler Ebene erlaubt. Mit Hilfe des IKARUS- Raumwärmemodells wird in Kapitel 4 ein Beispiel für eine strategische Analyse am Gebäudebestand (West) vorgestellt.

2. Beschreibung der Situation im Gebäudebestand

2.1 Wohnungsbestand, Endenergieverbrauch und CO_2-Emissionen der Raumwärmeerzeugung

Wohnungen und Wohnflächen bis 2020

Der Wohnungsbestand umfaßte 1992 in Deutschland nach /2/ rund 34,4 Mio. Wohneinheiten, davon 27,6 Mio. in den alten Bundesländern und 6,8 in den neuen Bundesländern. An der gesamten Wohnfläche von 2,86 Mrd. m^2 haben die alten Bundesländer einen Anteil von 84,3 %. Mit 19,5 % ist der Bevölkerungsanteil der neuen Bundesländer größer als der Anteil von 15,7 % an den Wohnungen. Die Folge ist, daß die durchschnittliche Wohnungsgröße in den neuen Bundesländern deutlich kleiner ausfällt. Die Durchschnittswohnfläche je Wohnung (je Person) betrug 87 m^2 (37 m^2) für die alten Bundesländer und 65 m^2 (28 m^2) für die neuen Bundesländer.

Tabelle 1 zeigt die erwarteten Entwicklungen bis zum Jahre 2020. Während die Bevölkerung in Deutschland praktisch konstant bleibt, steigt die benötigte Wohnfläche im Mittel pro Jahr um etwa 0,5 %, was zu einem Gesamtanstieg der Wohnfläche von 19 % in 28 Jahren führt. Als Folge eines wachsenden Komfortbedürfnisses steigt der Wohnflächenbedarf von 35 m^2 pro Person auf 42 m^2 pro Person im Jahre 2020.

		1992	2000	2010	2020
Wohnungen (W)	Mio.	34,4	36,9	38,0	38,1
Wohnfläche	Mio. m^2	2860	3139	3335	3398
Durchschnitt/W	m^2	83	85	88	89
Bevölkerung	Mio.	80,6	82,7	83,4	81,2
Fläche/Person	m^2	35	38	40	42

Tabelle 1: Entwicklung der Wohnungen und Wohnflächen von 1992 bis 2020 in Deutschland /2/,/16/

Anteil der Altbauten

Gemessen an den geltenden Wärmeschutzstandards kann man auf jeden Fall alle Gebäude als energetisch sanierungsfähig bezeichnen, die vor Einführung der zweiten Wärmeschutzverordnung 1983 gebaut wurden und die in den letzten Jahren nicht modernisiert wurden. Die Wohnfläche der Wohngebäude, die vor 1983 gebaut wurden, beträgt 2050 Mio. m^2 in den alten Bundesländern. Das entspricht einem Anteil von rund 80 % am Bestand. Erst ein relativ kleiner Teil davon dürfte in der Vergangenheit auf das Niveau der heute geltenden Wärmeschutzverordnung saniert worden sein. In den neuen Bundesländern, die eine andere Alters- und Typstruktur haben, dürften nach /3/ zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung rund 95 % der Gebäudefläche energetisch sanierungsbedürftig gewesen sein.

Diese Zahlen zeigen, daß alleine von der Menge der Wohnfläche her im Gebäudebestand große Sanierungspotentiale schlummern.

Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Der gesamte Endenergieverbrauch zeigt in Deutschland bis 1994/95 einen leicht fallenden Trend (Tabelle 3). Ursache hierfür war der starke Rückgang des Energieverbrauchs in den neuen Bundesländern, insbesondere in der Industrie, bei den Kleinverbrauchern und im Umwandlungssektor. Dies konnte der Anstieg des Primärenergieverbrauchs in den alten Bundesländern von rund 5 % (1990 bis 1995) nicht kompensieren. Der Anstieg des Endenergieverbrauchs von 1995 auf 1996 geht nach /1/ im wesentlichen auf den gewachsenen Verbrauch im Haushalt und beim Kleinverbrauch zurück.

Beim Haushaltssektor ist zu beachten, daß der Verbrauch u.a. auch von der Außentemperatur während der Heizperiode abhängt. In kalten Wintern ist der Verbrauch deutlich höher. Der Trend bei gesamten Endenergieverbrauch wiederholt sich deshalb beim Haushaltssektor nicht in dieser Deutlichkeit. Im Mittel beträgt der Anteil des Haushaltssektors am Gesamtverbrauch in der Periode 1990 bis 1996 rund 28 %. Im Jahre 1996 waren es 30,5 %.

Struktur der Raumwärmeerzeugung

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Beheizungsstruktur für das Jahr 1992. Öl- und Gasheizungen sind die wichtigsten Techniken, sie beliefern über zwei Drittel der Wohnflächen in Deutschland mit Raumwärme. Der Anteil der Ölheizungen, der 1992 noch dominiert verringert sich stetig zugunsten der Gasheizungen. So erwartet z. B. PROGNOS für das Jahr 2005 einen Anstieg des Gasheizungsanteils von 42 %, während der Beitrag der Ölheizungen auf 35 % sinkt /2/. Soll das 25 % CO_2-Reduktionsziel der Bundesregierung bis 2005 erreicht werden, dann müßte der kohlenstoffarme Gasanteil noch stärker steigen. Der noch relativ hohe Anteil der Festbrennstoffe kommt durch den hohen Anteil der alten Braunkohleheizungen in den neuen Bundesländern zustande. Diese werden jedoch weitgehend durch Öl- und insbesondere Gasheizungen ersetzt.

	Öl	Gas	Kohle, Holz	Fern-wärme	Strom	Sonstige
Deutschland	38,2	31,2	12,8	9,5	7.2	0,8
Alte Bundesländer	44,1	34,8	4,7	7,2	8,2	1,0
Neue Bundesländer	6,3	13,3	56,7	21,8	1,8	0,0

Tabelle 2: Beheizungsstruktur in % der Wohnfläche 1992 /2/

Entwicklung der CO_2-Emissionen

Ein ähnliches Bild wie beim gesamten Endenergieverbrauch ergibt sich bei der Entwicklung der gesamten CO_2-Emissionen (Tabelle 3). Im Mittel beträgt der Anteil des Haushaltssektors an den gesamten Emissionen von 1990 bis 1996 nach Tabelle 3 rund 14 %. Das ist nur etwa die Hälfte des Endenergieanteils. Die Ursache für diese große Differenz ist, daß die CO_2-Emissionen für den Haushaltssektor in Tabelle 3 nur den direkten Anteil (ohne Strom und Fernwärme) enthalten. Die Emissionen des Umwandlungssektors werden separat bilanziert.

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Endenergie gesamt	PJ	9441	9317	9074	9173	9027	9320	9628
Davon Haushalte[1)]	PJ	2380	2515	2435	2617	2538	2755	2934
CO_2 Emission gesamt	Mio. t	1014	975	927	916	904	895	910
Davon Haushalte[2)]	Mio. t	129	132	123	133	127	135	142

[1)] Raumwärme, Warmwasser und Haushaltsgeräte

[2)] ohne Strom und Fernwärme

Tabelle 3: Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der CO_2-Emissionen von 1990 bis 1996 in Deutschland

Nach /1/ wurden im Jahre 1996 rund 27 % des Netto-Stromes vom Haushaltssektor der Bundesrepublik Deutschland verbraucht. Rechnet man 27 % der CO_2 Emissionen des Umwandlungssektors, die sich auf insgesamt 343 Mio. t belaufen, dem Haushaltsektor zu, so erreicht dieser z. B. für 1996 insgesamt eine Emission von 235 Mio. t. Diese Zahl entspricht dann einem Anteil an den Gesamtemissionen von immerhin 26 %. Dieser Prozentanteil der Emissionen ist etwas kleiner als der Prozentanteil der Endenergie, weil im Haushaltssektor überwiegend kohlenstoffarme Energieträger wie Öl und insbesondere Gas verwendet werden.

2.2 *Hohe Einsparpotentiale an Einzelgebäuden des Bestandes als Motivation für Sanierungsmaßnahmen*

Einsparpotentiale durch bauliche Maßnahmen an Einzelgebäuden bis 75 %

Im folgenden werden die Einsparpotentiale der spezifischen Heizenergie für verschiedene Typgebäude betrachtet. Dieses Einsparpotential eines Gebäudes läßt sich über die Energieeinsparung durch nachträglich angebrachten Wärmeschutz aller nicht gedämmten Bauteilflächen bestimmen. Als Bezug dient der Ist-Zustand der verschiedenen Typgebäude. Als Niveau für das technische (nicht wirtschaftliche) Einsparpotential wird der bei vergleichbaren Neubauten von der geltenden Wärmeschutzverordnung vorgeschriebene maximale spezifische Heizwärmebedarf definiert. Dieses Wärmeschutzniveau, das hier als ein Orientierungswert für das erreichbare Potential dient, ist mit den heute am Markt verfügbaren üblichen Dämmaterialen bei sorgfältiger handwerklicher Ausführung an Altbauten zu erfüllen.

Da der spezifische Heizwärmebedarf eines Gebäudes sich nach dem Alter und der Größe richtet, wird für die Erfassung des Ist-Zustandes und für die Abschätzung der Einsparpotentiale der Altbaubestand in repräsentative Typgebäude eingeteilt.

Die Rechnungen mit dem IKARUS Raumwärmemodell zeigen, daß die erreichbaren technischen Einsparraten für die spezifische Heizenergie zwei Trends aufweisen:

- Je älter die Gebäude sind, um so höher ist die mögliche Einsparung. So können bei den älteren Gebäuden die vor 1918 gebaut wurden wegen der schlechteren Dämmung, Einsparungen von 65 bis 75 %, bezogen auf den Istzustand, erzielt werden. Bei den jüngsten Gebäuden, die von 1969 bis 1983 mit energetisch günstigeren Materialien gebaut wurden, sind nur Raten von 0 bis 35 % möglich.

- Je größer die Gebäude sind, um so kleiner sind die erzielbaren Einsparraten. Dies hängt mit der Gebäudegeometrie zusammen. Freistehende Enfamilienhäuser haben größere Verluste als kompakte Mehrfamilienhäuser. Die durchschnittlichen Einsparungen liegen mit rund 55 % bei den Einfamilienhäusern und den Reihendoppelhäusern am höchsten. Mehrfamilienhäuser erreichen im Durchschnitt nur noch ca. 50 % und Hochäuser höchstens 40 %.

Insgesamt existiert also im Gebäudebestand ein erhebliches technisches Sparpotential, das über alle Gebäude in den alten Bundesländern gemittelt mit rund 50 % angegeben werden kann. Die Einsparpotentiale an den Gebäuden der neuen Bundesländer werden in der Literatur mit einem noch höheren Einsparpotential angegeben.

Einsparpotentiale durch Heizungsaustausch bis 25 %

Nach /5/ sind rund 40 % des Ölheizungsbestandes von ca. 6 Mio. Anlagen älter als 15 Jahre. Für die Gasheizkessel dürfte die Situation ähnlich sein. Außerdem ist noch ein gewisser Anteil von alten Festbrennstoff- und Einzelöfen in Betrieb.

Der Nutzungsgrad alter Heizungsanlagen (Heizung plus Verteilung) beträgt nach /6/ häufig nur 45 bis 65 %. Dafür sind folgende Gründe maßgebend:

- Veraltete Kesselbauweisen mit hohen Abgas- und Oberflächenverlusten.
- Erheblich überdimensionierte Kessel wegen der früher üblichen Auslegungspraxis.
- Unzureichende Regeleinrichtungen am Kessel und an den Heizkörpern.
- Unzureichend gedämmtes Verteilungssystem (Rohrleitungen).

Nach /5/ und /7/ kann durch eine konsequente Modernisierung der Heizungsanlagen, d. h. Austausch des Wärmeerzeugers und der Regelung der Brennstoffverbrauch gegenüber der einzelnen Altanlage um mindestens 20 bis 25 % gesenkt werden.

2.3 Maßnahmen zum Wärmeschutz am Bestand

Brennstoffe zur Beheizung von Altbauten können durch folgende Maßnahmen eingespart werden:

- Verbesserung der Wärmedämmung durch bauliche Maßnahmen.
- Austausch bzw. Verbesserung der Heizungsanlage.
- Energiebewußteres Nutzerverhalten.

Die Wirkungen dieser Maßnahmen stehen in enger Wechselwirkung. Der volle Spareffekt wird nur in einem Gebäude erreicht, das bei verbesserter Wärmedämmung auch mit einer modernen Heizungsanlage ausgestattet ist. Wird die Wärmedämmung ohne Kesselaustausch verstärkt, dann ist die alte Anlage durch den jetzt verminderten Heizwärmebedarf stark überdimensioniert. Ihr Nutzungsgrad wird dadurch noch schlechter. Durch fehlendes energiebewußtes Nutzerverhalten, d. h. übermäßiges und unkontrolliertes Lüften sowie das Einstellen unnötig hoher Raumtemperaturen können die technischen Verbesserungen zu einem erheblich Teil wieder zunichte gemacht werden.

Bauliche Maßnahmen und Kosten zur Verbesserung der Wärmedämmung

Die wichtigsten baulichen Einzelmaßnahmen zum Wärmeschutz für den Bestand, die in beliebiger Weise additiv zu Maßnahmenbündeln kombiniert werden können, sind:

- Fensteraustausch mit Isolierverglasung (k=1,3 W/m^{2}K)
- Dachdämmung (Dicke 140 mm)
- Außenwanddämmung (Dicke 80 mm)
- Kellerdeckendämmung (Dicke 80 mm)

Die Dämmdicken sind so bemessen, daß die geltende Wärmeschutzverordnung auf jeden Fall eingehalten wird.

Die Kosten für die einzelnen Maßnahmen gliedern sich in folgende Komponenten:

- *Sowieso-Kosten*: Das sind die Kosten, die nach Ablauf der Lebensdauer des entsprechenden Bauteils zu dessen baulicher Sanierung ohnehin notwendig sind. Sie können nicht dem Wärmeschutz zugerechnet werden, wenn die Maßnahmen im Renovierungszyklus durchgeführt werden. Die Sowieso-Kosten werden im Falle der Dachdämmung der gleichzeitig durchgeführten Erneuerung der Dacheindeckung zugerechnet. Bei der Außenwanddämmung werden die Sowieso-Kosten durch das Stahlrohrgerüst, die Fassadenreinigung, die Putzerneuerung, den Anstrich und eine Reihe weiterer kleinerer Reparaturarbeiten verursacht.
- *Wärmeschutz-Kosten:* Sie werden direkt durch die Wärmeschutzmaßnahmen verursacht und diesen zugeordnet.
- *Gesamtkosten*: Das ist die Summe aus Sowieso-Kosten und Wärmeschutz-Kosten.

Wirtschaftlichkeit von Wärmedämmaßnahmen

Umgerechnet nach /12/ betragen die spezifischen Investitionen für die Nachrüstung von alten Einfamilienhäusern 3,0 bis 5,0 DM/kWh und von Mehrfamilienhäusern, die vor 1978 gebaut wurden, 2,3 bis 3,3 DM/kWh. Bei einer angenommenen Lebensdauer von 50 Jahren und einer Verzinsung von 5 % pro Jahr ergeben sich Jahreskosten für den gesamten Bereich aller Typgebäude von 0,13 bis 0,27 DM/kWh a. Hierbei ist zu beachten, daß es sich im Sinne der obigen Kostenkomponenten um *Gesamtkosten* handelt. Der Anteil der *Sowieso-Kosten* kann im Einzelfall mehr als die Hälfte der Gesamtkosten ausmachen. Bei einem derzeitigen Energiepreis von 0,04 bis 0,05 DM/kWh kommen dann die Dämmaßnahmen mit den niedrigsten spezifischen Investitionen in den Bereich der Wirtschaftlichkeit. Dies sind im allgemeinen die Gebäude, bei denen aufgrund eines sehr schlechten energetischen Ausgangszustandes durch die Sanierung besonders hohe Einsparungen erzielt werden können. Dies stimmt in etwa mit den Ergebnissen in /13/ überein, wo bei einem Energiepreis von 0,045 DM/kWh ein wirtschaftliches Einsparpotential im Altbaubestand von bis zu 30 % angegeben wird. Dabei ist auch vorausgesetzt, daß die Dämmaßnahmen mit ohnehin durchzuführenden baulichen Maßnahmen gekoppelt werden. Bei einer Verdopplung des Energiepreises würde sich das wirtschaftliche Potential auf ca. 52 % vergrößern.

Außerdem darf aber nicht vergessen werden, daß eine gute Wärmedämmung ein Reihe von weiteren Vorteilen mit sich bringt, die z. T. nur schwer monetär bewertet werden können. Dazu gehören:

- die Vermeidung von Bauschäden,
- die Wertsteigerung des Gebäudes,
- die Verbesserung des Wohnkomforts und
- die leichtere Vermietbarkeit der Wohnungen.

2.4 Umsetzung der Potentiale - Instrumente und Hemmnisse

Trotz der z. T. noch unzureichenden Wirtschaftlichkeit der meisten Dämmaßnahmen muß von dem vorhandenen Einsparpotential im Gebäudebestand soviel wie möglich realisiert werden, so die Meinung vieler Politiker und Ökologen. Da der Nutzer durch Wärmeschutzmaßnahmen derzeit offensichtlich nur einen geringen oder keinen wirtschaftlichen Vorteil hat, muß die Umsetzung des Potentials durch zusätzliche Aktionen angestoßen werden. Hierzu gehören:

- ordnungsrechtliche Maßnahmen,
- preispolitische Maßnahmen,
- finanzielle Förderung,
- Forschungsförderung,
- Information, Beratung und Fortbildung.

Ordnungsrechtliche Maßnahmen

Zu den relevanten ordnungsrechtlichen Maßnahmen gehören:

- die Heizungsanlagenverordnung von 1994 (HAnlV),
- die Kleinfeuerungsanlagenverordnung von 1996 (1.BImSchV),
- die Wärmeschutzverordnung von 1995 (WSchV),
- die für das Jahr 2000 geplante Energiesparverordnung (ESpV).

Das Ziel der HAnlV ist es, vermeidbare Energieverluste durch Berücksichtigung neuer Erkenntnisse und des technologischen Fortschritts zu vermindern. So dürfen ab 1998 nur noch Niedertemperatur- oder Brennwertkessel eingebaut werden, die mit der EG Heizkesselrichtlinie konform sei müssen. Altanlagen von über 70 kW, die vor 1973 bzw. 1978 installiert wurden, unterliegen einer Austauschpflicht. Außerdem müssen bis Ende 1997 Zentralheizungen in allen Gebäuden mit regelungstechnischen Einrichtungen einschließlich Thermostatventilen ausgerüstet werden /9/.

Durch die WSchV wird ein verschärfter baulicher Wärmeschutz bei Neubauten erzielt, der je nach A/V Verhältnis des Gebäudes nur einen maximalen Jahres-Heizwärmebedarf von 100 bis 54 kWh/m^{2}a zuläßt. Darüber hinaus wirkt sich die WSchV auf den Altbaubestand aus. Das ergibt sich durch die Anforderungen zur Begrenzung des Wärmedurchgangs bei erstmaligem Einbau, Ersatz oder Erneuerung von Außenbauteilen bestehender Gebäude.

Mit der Anpassung der Kleinfeuerungsanlagenverordnung (1.BImSchV) sollen die Stickstoffoxid- und Staub-Emissionen sowie insbesondere die Abgasverluste weiter gesenkt werden. Dies betrifft kleine Anlagen bis 5MW (Heizöl EL) und bis 10 MW (Gas), die insbesondere zur Gebäudeheizung eingesetzt werden. Bei Öl- und Gasfeuerungen dürfen die Abgasverluste folgende gestaffelten Werte nicht Überschreiten: 11% (4 - 25 kW), 10 % (25 - 50 kW) und 9 % (>50 kW). Außerdem enthält die Verordnung eine Reihe von Vorschriften zur Überwachung der Feuerungsanlagen.

Mit der für das Jahr 2005 geplanten ESpV wird versucht, bauliche und anlagentechnische Anforderungen in einer Verordnung zusammenzufassen. Der Wärmedämmstandard soll gegenüber der WSchV von 1995 um weitere 30 % verschärft werden, so daß Niedrigenergiehaus-Standard erreicht wird. Die Verordnung soll in analoger Weise wie die WSchV95 auf den Bestand angewendet werden.

Die folgende Tabelle 4 zeigt eine Entwicklung des Wärmeschutzes in Deutschland. Von 1970 bis zum Jahre 2000 wird der spezifische Heizenergiebedarf im Mittel um den Faktor 6 verringert.

	Jahr	Heizenergiebedarf kWh/m²a
DIN 41089	1970	350 - 250
1. WSchV	1977	250 - 180
2. WSchV	1984	180 - 120
3. WSchV	1995	54 - 100
ESpV	2000	37 - 70

Tabelle 4: Entwicklung des Raumwärmebedarfs /10/

Preispolitische Maßnahmen

Hierzu gehören eine Reihe von teils eingeführten und teils diskutierten Maßnahmen zur Verringerung des Verbrauchs von klimarelevanten Energieträgern, die im folgenden ohne Wertung aufgelistet werden. Zu erwähnen sind die Energie- oder CO_2-Steuer (beide nicht eingeführt), die ursprünglich mit anderer Zielrichtung eingeführte Mineralölsteuer, die Steuerbegünstigung der Kraft-Wärme-Koppelung (eingeführt) oder das Stromeinspeisegesetz für Strom aus erneuerbaren Energieträgern (eingeführt).

Subventionen

Hierzu gehören alle Förderprogramme von Bund, Ländern und Kommunen, die finanzielle Anreize für die energetische Sanierung von Altbauten bereitstellen. Die verschiedenen Fördermaßnahmen umfassen Investitionszuschüsse und zinsverbilligte Kredite. Ein typisches Beispiel hierfür ist das KfW-Programm zur CO_2-Minderung. Hier werden verbilligte Kredite zur Finanzierung von Wärmeschutzmaßnahmen, effektiven Wärmebereitstellungssystemen und Niedrigenergiehäusern vergeben.

Forschungsförderung

Im Bereich Raumwärme/Gebäude fördert die Bundesregierung im Energieforschungsprogramm des BMBF (Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft, Forschung und Technologie) und im Bauforschungsprogramm des BMBau (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) verschiedene Möglichkeiten zur Heizenergieeinsparung.

Information, Beratung und Fortbildung

Zur Realisierung der Einsparpotentiale kommt einer bessern Information, Beratung und Fortbildung eine wesentliche Bedeutung zu. Typische Informationsinstrumente sind Fachzeitschriften, Mitteilungen von Verbänden, Broschüren von Ministerien oder Energieagenturen. Auch Praxisberichte über erfolgreiche Sanierungsvorhaben versprechen eine gute Wirkung.

Beratungs- und Fortbildungsprogramme werden z.T. von den verschiedenen Fachverbänden und den Energieagenturen der Länder angeboten, z.B. in /11/.

Hemmnisse bei der Umsetzung

Trotz einer Vielzahl von guten Ansätzen und vieler vorbildlicher Einzelprojekte kommt die großflächige Umsetzung der Einsparpotentiale im Gebäudebestand nicht schnell genug voran. Die Ursache hierfür sind eine Reihe von Hemmnissen wie:

- Unzureichende Wirtschaftlichkeit vieler Sanierungsmaßnahmen wegen der niedrigen Energiepreise. Maßnamen zur Wärmedämmung sind, auch wenn sie im Renovierungszyklus durchgeführt werden, in der Regel mit hohen Kosten verbunden.
- Mangelnde Information bei Eigentümern und Mietern über die technischen Möglichkeiten und die Kosten.
- Das sogenannte Investor-Nutzer-Dilemma: In vielen Fällen unterbleiben Maßnahmen, weil sie entweder für den Vermieter keinen Nutzen bringen, da nur der Mieter von den geringeren Heizkosten profitiert, oder weil der Mieter durch die Modernisierungsumlage finanziell zu stark belastet wird.
- Unzureichende öffentliche Mittel für wirksame und umfassende Förderprogramme.
- Mangelnde Motivation aufgrund eines unzureichenden Umweltbewußtseins.

Aus Sicht des Klimaschutzes ist es notwendig, die Handlungsschwellen der Gebäudeeigentümer zu senken, um die energetische Sanierung des Gebäudebestands in "breiter Front" voranzutreiben. Hierfür werden weitere geeignete und durchgreifend Instrumente gesucht, welche über die bisher eingesetzten Maßnahmen hinaus gehen.

3. Energiewirtschaftliche Einbettung von Energiesparstrategien

Im folgenden wird die Bedeutung des Raumwärmesektors im Kontext nationaler Energie- und CO_2-Sparstrategien untersucht. Um eine solche Untersuchung unter Berücksichtigung der komplexen Zusammenhänge in der Energiewirtschaft durchführen zu können, wird ein Energiemodell eingesetzt, das die Abbildung und Optimierung großer vernetzter Energiesysteme auf globaler, nationaler oder regionaler Ebene erlaubt.

3.1 Das MARKAL-Modell

Das hier eingesetzte MARKAL (Market Allocation) ist ein nachfragegesteuertes, lineares Mehrperioden-Modell, das seit den späten siebziger Jahren unter Schirmherrschaft der Internationalen Energieagentur (vgl. /14/) weiterentwickelt wurde. Dabei stellt MARKAL Methoden zur Beschreibung und Optimierung des Energiesektors bereit, der durch eine beliebige Anzahl zeitabhängiger Koeffizienten für Energieträger und Technologien beschrieben wird. Die Verbindung zur Volkswirtschaft geschieht über die exogene (modellexterne) Vorgabe der Nachfragen nach Energiedienstleistungen und der Energiepreisentwicklung für Importe im betrachteten Planungszeitraum. Diese Nachfrage wird im Modell unter Berücksichtigung aller Nebenbedingungen kostenoptimal befriedigt. Vorgaben bezüglich Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit oder gesellschaftlicher Rahmen-

bedingungen bilden dann einen Teil dieser Nebenbedingungen, indem zum Beispiel eine Obergrenze für Treibhausgasemissionen oder eine Untergrenze für einheimische Steinkohlegewinnung festgelegt wird.

Der Energiefluß wird von der Primärenergie (Import, heimische Gewinnung) über eine Vielzahl von Umwandlungs- und Transporttechnologien (Kraftwerke, Raffinerie, Gas, Strom- und Wärmenetze) bis zur Endenergienutzung beim Endverbraucher (Fahrzeuge, Heizkessel, Industrietechniken) erfaßt und nach vorgegebenen Kriterien optimiert. Als Optimierungskriterium werden hier, wie üblich, die gesamten Systemkosten der Energieversorgung gewählt, die auf einen Zeitpunkt abdiskontiert werden.

In diesem Beitrag steht die Analyse von Substitutions- und Einspareffekten bei erhöhten Umweltanforderungen im Vordergrund, wobei der Raumwärmesektor besonders detailliert modelliert und bei der Ergebnisauswertung stärker berücksichtigt wird.

3.2 Das Deutsche Energiesystem

Modellstruktur von MARKAL-IKADAT

Das für diesen Beitrag eingesetzte MARKAL-IKADAT[1]-Modell bildet die Entwicklung des deutschen Energiesektors dynamisch über einen Betrachtungszeitraum von 1990 bis 2030 ab, aufgeteilt in Fünfjahresperioden.

Die Datenbasis wurde aus technologischen und ökonomischen Daten aufgebaut, die im Rahmen des IKARUS-Projektes /15/ erhoben wurden, und besteht aus ca. 500 relevanten Technologien und 60 Energieträgern, die jeweils durch Koeffizienten beschrieben werden[2]. Die Techniken, die für Heizung- und Warmwasserbereitstellung relevant sind, wurden durch eine Kopplung an das später beschriebene IKARUS-Raumwärmemodell /20/ besonders detailliert charakterisiert, um eine genauere Analyse von Energiesparstrategien im Raumwärmesektor zu ermöglichen. Die Grobstruktur des gesamten Energiesystems mit den Ebenen Primärenergie, Energieumwandlung, Endverbrauchstechnologien und Energienachfrage sowie der stärker disaggregiert dargestellte Raumwärmesektor am Beispiel „Einfamilienhaus alt" ist in Abbildung 1 dargestellt.

---

[1] MARKAL-IKADAT = Markal-Modell mit Ikarus Modelldaten und -strukturen

[2] Die hier verwendete Datenbasis baut in einigen Teilen noch auf einem älteren IKARUS-Datensatz mit Bezugsjahr 1989 auf. Bis Ende 1998 wird die Umstellung auf eine neue Datenbasis mit Bezugsjahr 1995 abgeschlossen sein.

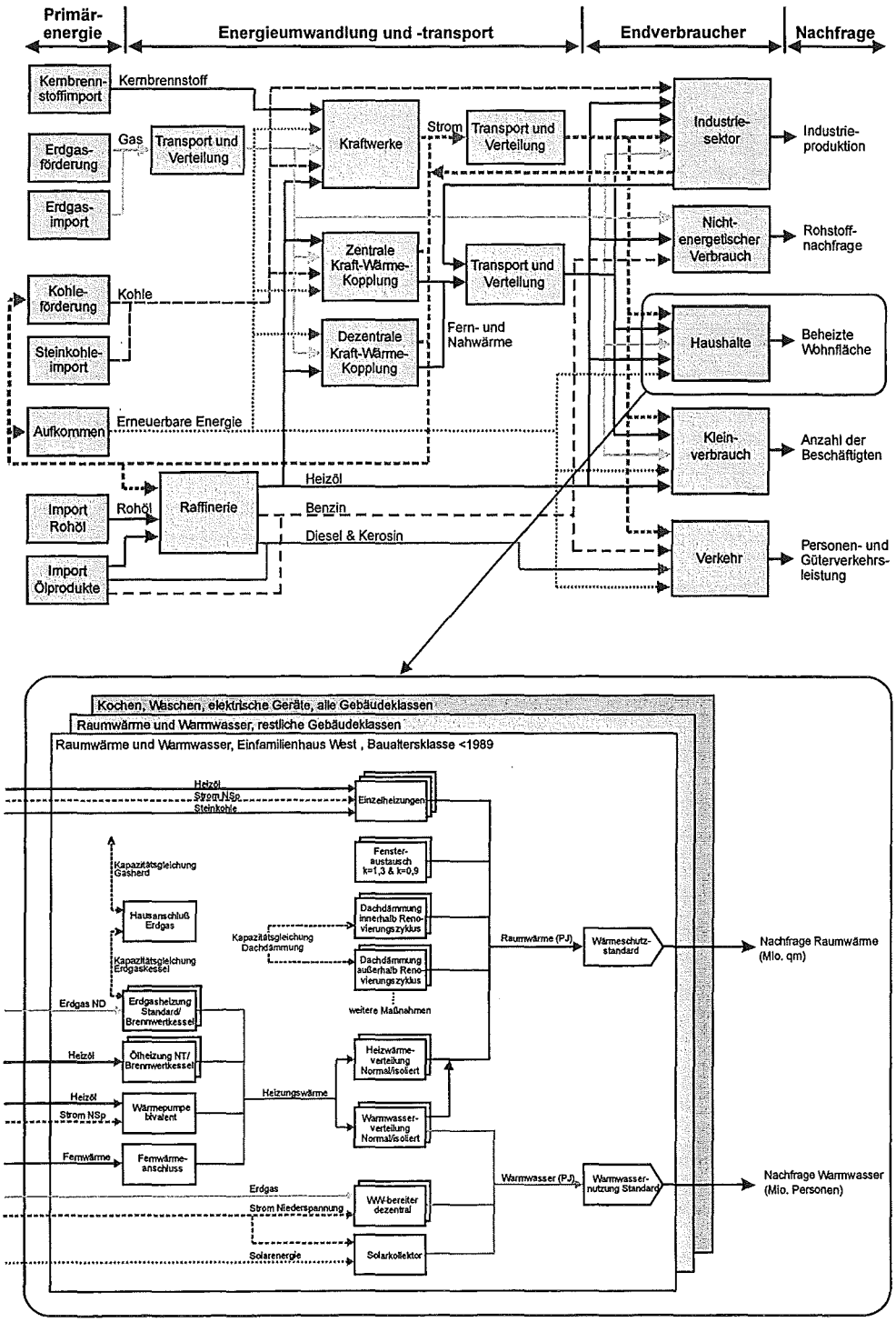


Abbildung 1: Einbettung des Raumwärmesektors in das deutsche Energiesystem

Rahmendaten

Neben den Technologiedaten werden Szenariorechnungen mit Energiemodellen entscheidend durch die angenommenen Rahmenbedingungen und ihre zukünftige Entwicklung beeinflußt, weshalb die wichtigsten allgemeinen Eingangsdaten kurz dargestellt werden sollen. Die zukünftige Entwicklung der nachfragebestimmenden Größen, die den Rechenläufen zugrunde liegt, wurde im Rahmen des IKARUS-Projektes gemäß Tabelle 5 festgelegt:

	Einheit	1990	1995	2005	2020	2030*	durch. Steigerungsrate
Rahmendaten							
Bevölkerung	Mio. Personen	78.3	81.7	83.8	81.2	77.4	~0 %/a
Bruttoinlandprodukt (BIP)	10^9 DM_{95}	-	3276	3997	5218	6032	1,8 %/a (1995-2030)
Verkehr							
Personenverkehr	10^9 Personen-km	832	890	1038	1115	1150	0,8 %/a
Güterverkehr	10^9 tonnen-km	356	412	541	723	800	2,0 %/a
Industrie							
Nettoproduktionswert	10^9 DM_{95}	-	1033	1220	1550	1770	1,5 %/a
Haushalte							
Wohnbevölkerung	Mio. Personen	78.3	81.7	83.8	81.2	77.4	~0 %/a
Wohnfläche Altbau (bis 1995)	Mio. qm	2617	3006	2972	2743	2590	-0,4 %/a (1995-2030)
Wohnfläche Neubau (ab 1995)	Mio. qm	-	-	299	655	892	4,5 %/a (2005-2030)
Kleinverbrauchssektor							
Kleinverbrauch gesamt	Mio. Beschäftigte	26.16	25.92	27.06	27.08	26.95	~0 %/a

*) Extrapolation der IKARUS-Daten

Tabelle 5: Rahmendaten und Nachfragegrößen, Quelle: /15/,/16/

Diese Rahmenbedingungen unterstellen einen weiteren Anstieg nachfragebestimmender Größen, wobei die größten Steigerungsraten im Bereich Güterverkehr und Industrieproduktion erwartet werden. Wie in Tabelle 5 gezeigt, wird ein Anstieg der Wohnfläche bei stagnierender Bevölkerungsentwicklung angenommen. Gut zu sehen ist auch, daß im Haushaltssektor auch in den nächsten Jahrzehnten der energetisch erheblich schlechtere Altbestand an Gebäuden dominiert.

Die Kostenentwicklung der wichtigsten Primärenergieträger, die in der nächsten Tabelle dargestellt ist, unterstellt ab 1995 einen moderaten Anstieg der Importpreise und der heimischen Förderkosten für Stein- und Braunkohle.

		Energieträgerpreise in DM_{95}/GJ					Steigerungsrate
		1990	1995	2005	2020	2030*	(1995-2030)
Import	Steinkohle	4,48	2,58	3,41	3,96	4,33	1,5 %/a
	Erdgas 1 (<2500 PJ/a)	4,45	4,06	4,68	6,56	7,81	1.9 %/a
	Erdgas 2 (>2500 PJ/a)	-	5,07	5,85	8,20	9,77	1.9 %/a
	Rohöl	7,43	4,36	5,85	7,71	8,95	2,0 %/a
Einheimisch	Steinkohle	9,92	9,92	9,92	13,35	15,64	1,3 %/a
	Braunkohle	3,64	3,60	3,53	4,14	4,57	0,7 %/a

*) Extrapolation der IKARUS-Daten

Tabelle 6: Entwicklung der Energieträgerpreise, Quelle: /16/

Neben den Kostenstrukturen der Primärenergieträger und der Nachfrageentwicklung sind die maximale Verfügbarkeit und die Mindestnutzung bestimmter Energieträger weitere wichtige Faktoren für die Szanariorechnungen. Die diesbezüglich getroffenen Annahmen legen einen reduzierten Lösungsraum für die Optimierung fest und beeinflussen die Modellergebnisse stark, weshalb die wichtigsten dieser energiepolitisch motivierten Rahmenbedingungen kurz dargestellt werden:

	Einheit	1995	2005	2020	2030
Einheimische Steinkohleförderung	PJ/a	=1600	>730	>300	>200
Steinkohleimport	PJ/a	=450	<1200	<1800	<2500
Steinkohleverstromung	PJ/a	>1000	>500	>150	>100
Einheimische Braunkohleförderung	PJ/a	=1700	>1450	>800	>600
Braunkohleverstromung	PJ/a	>1600	>1300	>700	>500
Erdgasimport	PJ/a	=2300	<3100	<5000	<5000
Kernenergiekapazität	GW	=22	<22	<22	<22
Windkraft	GW	=1,2	>3,5	<10	<15
Wärmeschutz im Neubau		besser WSchV 95[1)]	besser ESpV2000[2)]	besser ESpV2000	besser ESpV2000

[1)] 3. Wärmeschutzverordnung, seit 1995 gültig
[2)] Energiesparverordnung (Niedrigenergiehausstandard), geplant ab 2000

Tabelle 7: Wichtige energiepolitische Rahmendaten, Quelle: /15/, /16/, /17/

Durch die Festlegung der nachfragebestimmenden Größen, der Energiepreise und sonstiger Rahmendaten wird eine mögliche Entwicklung beschrieben, die im Rahmen gängiger Prognosen liegt, zum Beispiel verglichen mit /2/. Generell sollte man die Optimierungsergebnisse immer unter Berücksichtigung dieser Annahmen interpretieren.

Der Haushaltssektor in MARKAL-IKADAT

Wie bereits in Abbildung 1 gezeigt, ist der Haushaltssektor aufgeteilt in mehrere Subsektoren, die für eine bestimmte Gebäudeklasse stehen:

- Ein- und Zweifamilienhaus alt (EFH), alte Bundesländer (Bestand bis 1989).
- Ein- und Zweifamilienhaus alt, neue Bundesländer (Bestand bis 1989).
- Ein- und Zweifamilienhaus neu, alte und neue Bundesländer (Zubau ab 1989).
- Mehrfamilienhaus alt (MFH), alte Bundesländer (Bestand bis 1989).
- Mehrfamilienhaus alt, neue Bundesländer (Bestand bis 1989).
- Mehrfamilienhaus neu, alte und neue Bundesländer (Zubau ab 1989).

Jede Gebäudeklasse wird durch ein Modellgebäude dargestellt, das den Gebäudebestand in dieser Klasse repräsentiert. Für jeden Untersektor (In Abb. 1 ist beispielhaft der Bereich Einfamilienhäuser alt dargestellt) ist die Nachfrage vorgegeben als beheizte Wohnfläche in Mio. qm und als Anzahl der Bewohner dieses Subsektors in Mio. Personen. Diese Nachfrage muß vom Modell unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen durch einen optimalen Mix an Technologien befriedigt werden. Dabei sind neben zentralen und dezentralen Heizungssystemen auch bauphysikalische Maßnahmen als

Option vorhanden, die den Raumwärmebedarf reduzieren ohne Energieträger zu verbrauchen. Diese Wärmeschutzmaßnahmen sind jeweils als Maßnahme innerhalb der Renovierungszyklen definiert und, mit entsprechend höheren Kosten und größeren Potentialen, als zusätzliche Maßnahmen, die jederzeit durchgeführt werden können. Für den ersten Typ werden nur die zusätzlich für die Wärmedämmung anfallenden Kosten angesetzt, für die Maßnahmen außerhalb des Renovierungszykluses die erheblich höheren Gesamtkosten, die auch Gerüstbau, Putzerneuerung usw. enthalten. Ob sich erhöhter Wärmeschutz in Zukunft rechnet oder nicht, hängt von den Rahmenbedingungen ab, die einer Optimierungsrechnung zugrunde liegen.

Alle Technologien zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung sind durch Koeffizienten modelliert, die durch das IKARUS-Raumwärmemodell (vgl. /15/ ab S. 219) unter Berücksichtigung der Bestandsstrukturen der jeweiligen Gebäudeklassen berechnet wurden. So sind zum Beispiel die Energieeinsparungen durch Fensteraustausch bei Altbauten wesentlich größer (bezogen auf die benötigten Investitionskosten) als beim Neubau oder die spezifischen Investitionskosten eines Heizungssystems in DM/kW bei einem großen Mehrfamilienhaus niedriger als bei einem Einfamilienhaus. Der Modellansatz liefert so eine hinreichend genau Abbildung der realen Strukturen, um Einsparstrategien im Kontext der gesamten Energiewirtschaft zu untersuchen.

Neben den oben genannten Techniken sind natürlich auch andere Energieverbraucher wie Haushaltsgeräte, Herde und Beleuchtungstechniken im Modell abgebildet, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll.

3.3 Definition von Szenarien zur Entwicklung des deutschen Energiesystems

Da die zukünftige Entwicklung des Energiesystems unbekannt ist, führt man die Modellierung für eine Bandbreite möglicher Entwicklungen durch. Diese unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten werden mit Szenarien bezeichnet. Szenarien illustrieren mögliche Entwicklungen, treffen aber keine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Entwicklung. Die Vielzahl denkbarer Szenarien wird in dieser Arbeit auf zwei reduziert, die eine große Bandbreite zwischen einer Referenzentwicklung ohne CO_2-Reduktionsvorgaben (Referenzszenario) und einer Strategie intensiver Emissionsreduktion (Reduktionsszenario) abdecken.

Referenzszenario

Das Referenzszenario ist durch die Optimierung nach den Gesamtkosten des Energiesystems ohne Vorgaben bezüglich der CO_2-Emissionen charakterisiert. Die Ergebnisse können als eine wahrscheinliche Entwicklung des Energiesystems interpretiert werden, die ohne einschneidende Maßnahmen einträte. Einige der in den letzten Jahren beschlossenen Energiesparmaßnahmen, zum Beispiel die Verschärfung der Wärmeschutzverordnung seit 1995 und die geplante Energiesparverordnung ab dem Jahr 2000, sind aber bereits im Modell abgebildet und fließen in die Ergebnisse ein.

Für die sektorale Analyse des Haushaltssektors stellen sich z.B. folgende Fragen:

- Welchen Anteil wird der Haushaltssektor in Zukunft am Endenergieverbrauch haben ?
- Welche Heizungssysteme werden eingesetzt und welche Energieträger werden verbraucht ?
- Wieviel CO_2-Emissionen sind damit verbunden ?
- Sind Wärmeschutzmaßnahmen im Gebäudebestand bereits in einer Referenzentwicklung wirtschaftlich ? Wenn ja, welche ?

- In welchem Maße wirken sich verschärfte ordnungsrechtliche Rahmenbedingungen für Neubauten wie die geplante Energiesparverordnung 2000 auf die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs und die Emissionen aus ?
- Welche Wechselwirkungen gibt es zwischen dem Raumwärmesektor und dem übrigen Energiesystem: Wird Erdgas bei beschränkten Importmöglichkeiten eher verstärkt zur Stromerzeugung eingesetzt oder substituiert es Ölkessel im Haushaltssektor ? Unter welchen Rahmenbedingungen kann Fernwärme wirtschaftlich sein ?

Reduktionsszenario

Kohlendioxid gilt als Hauptverursacher eines anthropogenen Treibhauseffektes. Deshalb werden seit einigen Jahren nationale wie internationale Strategien diskutiert, die zu einer Stabilisierung oder sogar Senkung der Emissionen von CO_2 und anderen klimawirksamen Gasen führen sollen. Erklärtes Ziel der deutschen Bundesregierung ist es, die CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 25 % zu reduzieren, bezogen auf das Jahr 1990 (vgl. /18/). Längerfristig sollen die Treibhausgasemissionen noch stärker reduziert werden, in der Diskussion sind Reduktionsziele von 50 % bis zum Jahr 2020 und 80 % bis zum Jahr 2050.

Die Minderungsziele der Bundesregierung für das Jahr 2005 sind Hintergrund des Reduktionsszenarios, in dem eine strikte Reduktion der CO_2-Emissionen gemäß Tabelle 8 als Nebenbedingung vorgeschrieben wird. Diese Nebenbedingung muß von dem Modell durch Umstrukturierung des Energiesystems kostenoptimal erfüllt werden, wobei alle anderen Rahmenbedingungen unverändert bleiben.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Maximale CO_2-Emissionen (in Mio. t/a)	*keine Vorgabe*			750	720	690	660	630	600
Veränderung (bezogen auf 1990)	*keine Vorgabe*			-25%	-28%	-31%	-34%	-37%	-40%

Tabelle 8: Obergrenzen der CO_2-Emissionen im Reduktionsszenario

Ein solches Szenario erfüllt also automatisch immer das nationale Minderungsziele von 25 % und führt darüber hinaus auch nach 2005 zu einer weiteren Einsparung von Kohlendioxid. Vor diesem Hintergrund stellen sich beispielsweise folgende Fragen:

- Welchen Stellenwert hat der Raumwärmesektor im Kontext einer nationalen Energiesparstrategie und welchen Beitrag (absolut wie relativ) liefert er zur Senkung der Emissionen ?
- Welche Heizungstechnologien werden verstärkt eingesetzt ?
- Werden im Reduktionsszenario mehr Sanierungsmaßnahmen im Bestand vorgesehen als in der Referenzentwicklung ? Wenn ja, welche ?
- Wie hoch sind die durchschnittlichen CO_2-Minderungskosten im Haushalt im Vergleich zu anderen Sektoren ?

3.4 Ergebnisse der Szenariorechnungen

Da die Ergebnisse der Rechnungen hier nicht in allen Details dargestellt und analysiert werden können, soll hier nur beispielhaft auf einige Entwicklungen eingegangen werden.

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Referenzszenario

Die wichtigsten Entwicklungstendenzen, die sich für den Referenzfall ohne einschneidende Veränderungen der Energieversorgungsstrukturen ergeben, lassen sich gut am Beispiel des Primärenergieverbrauchs darstellen, der in Abbildung 2 gezeigt ist:

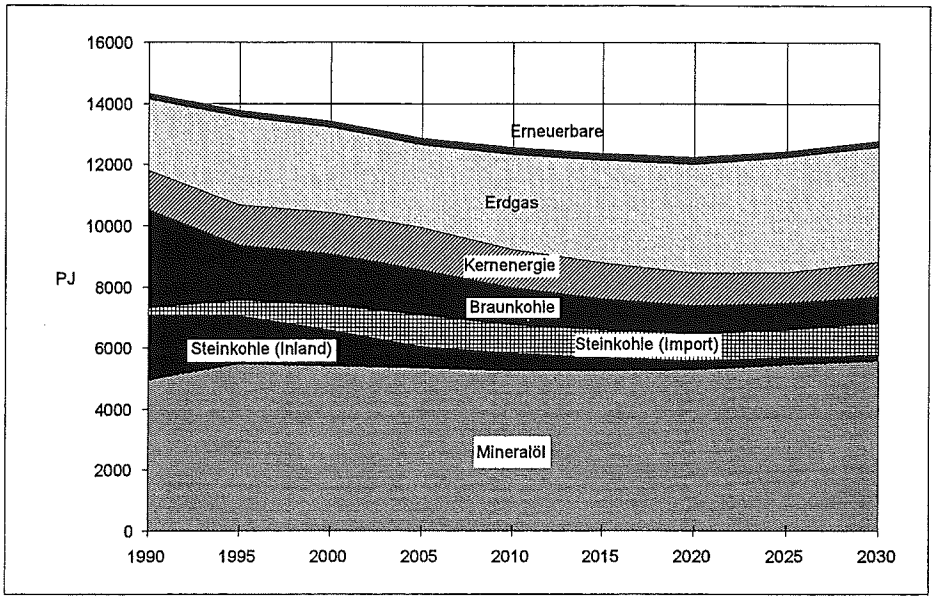


Abbildung 2: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Referenzszenario

Die so berechnete Entwicklung des Primärenergieverbrauchs läßt folgende Trends erkennen:

- Mittelfristig sinkt der Primärenergieverbrauch bis 2020 durch Effizienzsteigerungen, den Strukturwandel in Ostdeutschland und den unterstellten Produktionsrückgang einiger energieintensiver Industriezweige. Der Anstieg nach 2020 liegt an dem unterstellten Wachstum im Verkehrssektor.
- Bei den fossilen Energieträgern zeigt sich eine Substitution von Kohle und Kernenergie durch Erdgas, dessen Anteil sich deutlich erhöht. Ursache ist vor allem der wachsende Anteil effizienter Erdgasverstromung durch GuD-Anlagen im Kraftwerkssektor.
- Der Verbrauch an Öl und Ölprodukten bleibt bis 2030 weitgehend konstant bei rund 5500 PJ, verschiebt sich aber zwischen den Endverbrauchssektoren, wo zwei sich kompensierende Entwicklungen eine Rolle spielen: Im Haushalts- und Kleinverbrauchssektor sinkt der Heizölverbrauch durch zunehmenden Wärmeschutz, während im Verkehrssektor der Kraftstoffverbrauch weiter ansteigt.
- Der Beitrag der Kernenergie sinkt ab 2005 entsprechend der Altersstrukturen im Kraftwerkspark.
- Erneuerbare Energien spielen im Referenzszenario aufgrund ihrer hohen Kosten keine große Rolle. Ihr Beitrag entsteht hauptsächlich durch die Wasserkraftnutzung.

Entwicklung der CO_2-Emissionen im Referenzszenario

Die für das Referenzszenario berechnete Entwicklung der CO_2-Emissionen sind in folgender Abbildung gezeigt:

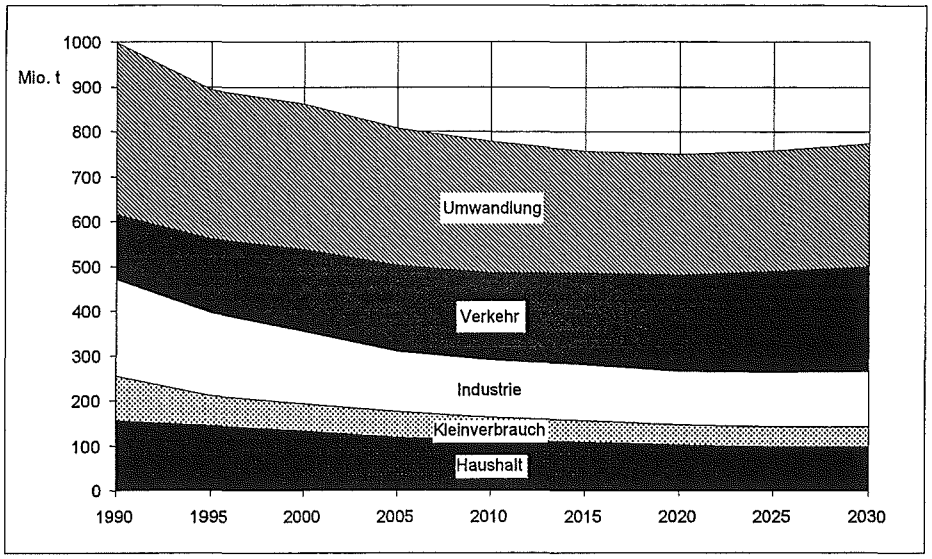


Abbildung 3: Entwicklung der CO_2-Emissionen im Referenzszenario

Wie Abbildung 3 zeigt, gehen die Emissionen mittelfristig bis 2015 auch ohne Reduktionsvorgabe zurück bis zu einer maximalen Reduktion von 23 % im Jahr 2020, verglichen mit dem Modellstartjahr 1990. Ursachen sind vor allem der Strukturwandel in den neuen Bundesländern, ein verstärkter Erdgaseinsatz in allen Sektoren und einige bereits beschlossene Maßnahmen wie die Verschärfung der Wärmeschutzverordnung oder die Förderung der Windenergie durch das Stromeinspeisungsgesetz. Längerfristig steigen die Emissionen ab 2020 wieder an, vor allem bedingt durch den weiter steigenden Verkehrsleistungsbedarf und einen sinkenden Beitrag der Kernenergie zur Stromerzeugung.

Der deutliche Rückgang in den wärmeintensiven Sektoren Haushalt und Kleinverbrauch beruht auf einem verbesserten Wärmeschutzstandard sowohl im Neubau (durch verschärfte ordnungrechtliche Maßnahmen wir die geplante Energiesparverordnung) als auch im Gebäudebestand (durch Fensteraustausch und zusätzliche Fassadenisolierung innerhalb der Renovierungszyklen) und einem allmählichen Austausch veralteter Heizungskessel. Der mittelfristige Rückgang im Industriesektor ist durch eine stärkere Verwendung von Gas statt Kohle oder Öl und einen höheren Stromeinsatz (dessen Emissionen dann im Umwandlungssektor bilanziert werden) bedingt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die „offiziellen" Reduktionsziele für das Jahr 2005 in Höhe von 25 %, bezogen auf das Emissionsniveau von 1990 in Höhe von 1014 Millionen Tonnen /1/, im Referenzszenario nicht erreicht werden.

Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Referenzszenario

Die Veränderungen des Verbrauchs an Endenergie und die sektorale Aufteilung ist in folgender Abbildung gezeigt. Dabei ist der Endverbrauch im Haushaltssektor noch genauer nach einzelnen Energieträgern aufgeschlüsselt.

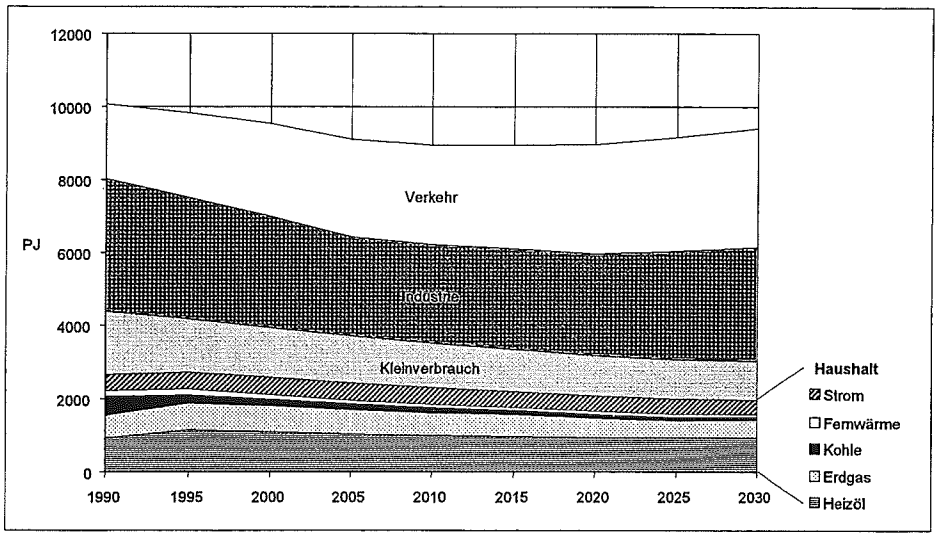


Abbildung 4: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Referenzszenario

Gut zu sehen ist, daß der Verkehrssektor als einziger Endverbrauchssektor noch einen deutlich steigenden Verbrauch hat. Der Energieverbrauch der privaten Haushalte sinkt leicht trotz des Anstiegs der beheizten Wohnflächen als Folge von Heizungsaustausch und einer besseren Wärmedämmung. Dabei lassen sich folgende Trends identifizieren:

- Es erweist sich bereits ein Teil der Wärmeschutzmaßnahmen (Fensteraustausch mit Wärmeschutzverglasung und 4 cm Außenwanddämmung), die innerhalb der Renovierungszyklen durchgeführt werden können, als wirtschaftlich.
- Die zur Wärmeerzeugung eingesetzten Energieträger verschieben sich nach 2000 leicht von Erdgas zu Erdöl gemäß der Annahme, daß Heizöl in Zukunft preiswert bleibt, wie in Tabelle 3.1 prognostiziert.
- Die Fernwärmeversorgung stellt sich im Referenzfall als nicht wirtschaftlich dar und wird nur entsprechend der unterstellten Mindestvorgaben eingesetzt
- Bei den Gasheizungen kommt verstärkt die Brennwerttechnik zur Anwendung. Bis 2010 sind ein Drittel aller Gasheizungen auf die Brennwerttechnik umgestellt.
- Durch diese Entwicklungen verringert sich der Anteil der privaten Haushalte am Endenergieverbrauch von 26 % (1990) auf 23 % bis zum Jahr 2020.

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Reduktionsszenario

Das in Abschnitt 3.3 charakterisierte Reduktionsszenario führt zu einer massiven Änderung des gesamten Energiesystems, wie die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Abbildung 5 zeigt.

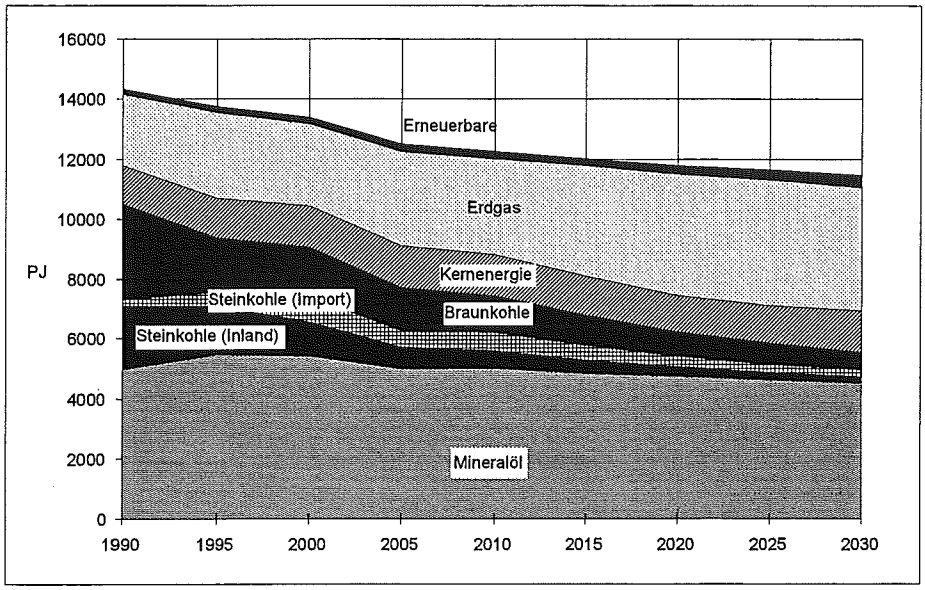


Abbildung 5: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Reduktionsszenario

Die Einhaltung der Reduktionsvorgaben erfordert erhebliche Veränderungen des Primärenergiemixes und führt zu einem stetigen Rückgang des Verbrauches, der am Ende des Betrachtungszeitraumes um 20 % unter dem Wert von 1990 liegt.

Als wichtigster Unterschied im Vergleich mit der Referenzentwicklung läßt sich erkennen, daß die kohlenstoffreichen Energieträger Stein- und Braunkohle im Vergleich der Szenarien bis zur vorgegebenen Untergrenze reduziert und durch einen stärkeren Gaseinsatz, hauptsächlich in GuD-Kraftwerken (2005: 7 GW, 2020: 30 GW) und im Bereich Raumheizung, substituiert werden. Der Import an Rohöl und Ölprodukten reduziert sich deutlich um bis zu 500 PJ (im Jahr 2020), was vor allem an einem verringerten Heizölverbrauch im Wärmemarkt liegt. Regenerative Energieträger werden verstärkt eingesetzt, allerdings ist ihr Beitrag auch im Reduktionsszenario eher gering und kommt über 5 % des Primärenergieaufkommens nicht hinaus, bedingt durch begrenzte Verfügbarkeit (Wasserkraft, Biomasse) und hohen Kosten (Photovoltaik).

Entwicklung der CO_2-Emissionen im Reduktionsszenario

Da MARKAL-IKADAT ein gesamtwirtschaftliches Modell ist, werden die Reduktionsvorgaben in volkswirtschaftlich optimaler Weise (d.h. so, daß die Grenzkosten einer weiteren Reduktion in allen Sektoren gleich sind) auf die einzelnen Umwandlungs- und Verbrauchssektoren verteilt, wie die Ausweisung der sektoralen CO_2-Minderung im Vergleich der beiden Szenarien zeigt:

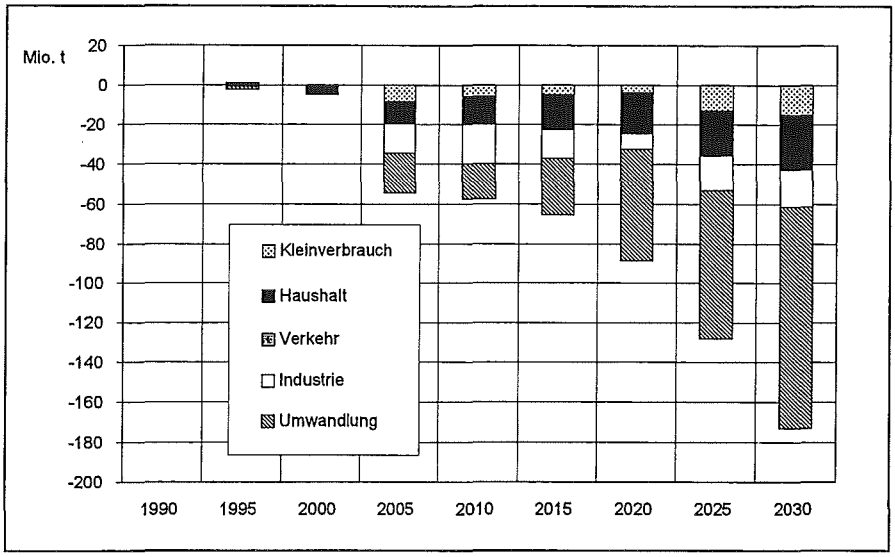


Abbildung 6: Sektorale Änderung der CO_2-Emissionen des Reduktionsszenarios im Vergleich zum Referenzfall

Der größte absolute Beitrag zur CO_2-Reduktion wird im Umwandlungsektor erbracht, wo eine erhebliche Substitution von Kohleverstromung durch Erdgaskraftwerke und ein stärkerer Kernenergieeinsatz stattfinden. Ebenfalls erhöht sich der Anteil von KWK-Strom deutlich. Der zweitgrößte Reduktionsbeitrag entfällt aber bereits auf den Bereich der Haushalte, in dem die Kohlendioxidemissionen bis 2005 um ca. 8 Mio. t reduziert werden können (im Vergleich von Referenz- und Reduktionsszenario) und bis 2020 um 20 Mio. t.

Daß dem Haushaltssektor ein große Bedeutung bei Energie- und Emissionssparstrategien zukommt, zeigt auch die Ausweisung des relativen Beitrags der einzelnen Sektoren zum Erreichen der vorgegebenen Reduktionsziele (in Tabelle 9 grau unterlegt). So reduzieren sich die Kohlendioxidemissionen im Haushaltssektor im Reduktionsfall zwischen 1990 und 2005 um 28 % und bis 2020 um 48 %, also deutlich mehr als im Durchschnitt.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Haushalte	-	-7%	-17%	-28%	-35%	-43%	-48%	-52%	-56%
sonstige Endverbraucher	-	-9%	-12%	-23%	-25%	-22%	-20%	-22%	-20%
Umwandlung	-	-14%	-15%	-25%	-28%	-37%	-45%	-49%	-58%
Durchschnitt	-	-11%	-14%	-25%	-28%	-31%	-34%	-37%	-40%

Tabelle 9: CO_2-Minderung des Haushaltssektors im Reduktionsszenario im Vergleich mit den restlichen Sektoren (bezogen jeweils auf 1990)

Im Haushaltssektor findet also bei einer gesamtwirtschaftlich optimalen Verteilung der vorgegebenen CO_2-Reduktion eine überdurchschnittlich hohe Reduktion statt. Die tatsächliche Ausschöpfung dieser Potentiale hängt natürlich entscheidend von der Beseitigung bzw. Minderung einiger bereits erwähnter Hemnisse ab, die bisher einer umfassenden Realisierung im Wege stehen.

Der Wärmemarkt im Vergleich der Szenarien

Gravierende Änderungen ergeben sich auch bei der Beheizungstruktur, die im Reduktionsfall durch einen wesentlich höheren Erdgasanteil gekennzeichnet ist. Dazu sind in Abbildung 7 die wichtigsten Heizungstechnologien dargestellt, jeweils bezogen auf ihren Anteil am Endenergieverbrauch. Während im Referenzfall ohne CO_2-Restriktionen Erdöl der wichtigste Energieträger ist und auch bis 2030 bleibt, verschiebt sich die Relation im Reduktionsfall zum Erdgas, das verstärkt in Brennwertkesseln eingesetzt wird.

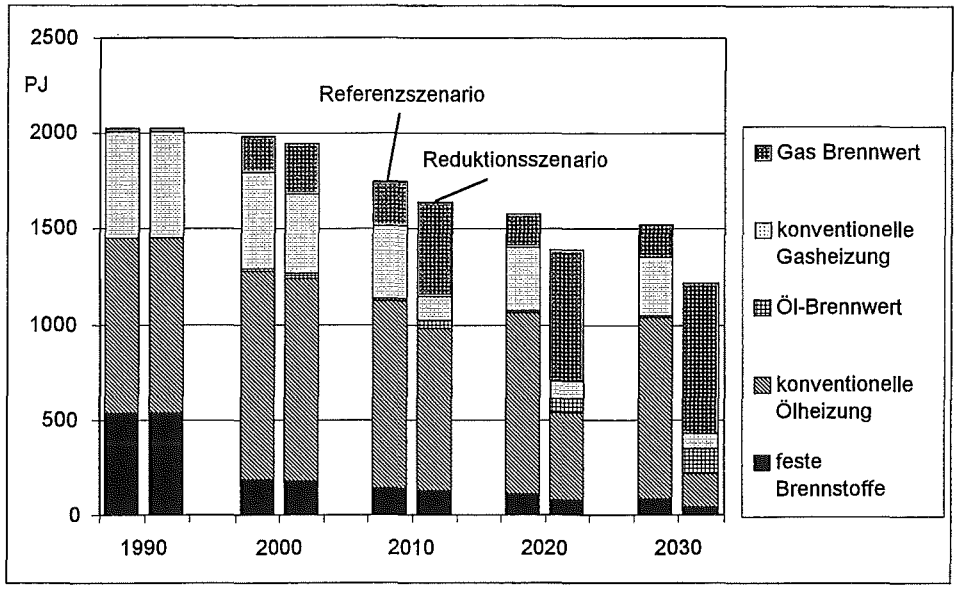


Abbildung 7: Endenergieverbrauch der wichtigsten Heizungstechniken in beiden Szenarien

Der Rückgang des Endenergieverbauchs, der auch in vorgehender Abbildung zu sehen ist, beruht neben Effizienzsteigerungen der Heizungen auch auf einem verstärkten Wärmeschutz im Neubau wie im Gebäudebestand. Wie bereits erwähnt, zeigt sich, daß einige Wärmeschutzmaßnahmen bei einzelnen Gebäudeklassen auch im Referenzfall wirtschaftlich sind und so im optimalen Technologiemix vertreten sind.

Der Beitrag des Haushaltssektors im Rahmen einer nationalen CO_2-Minderungsstrategie

Die wichtigsten Ergebnisse des CO_2-Reduktionsszenarios und die Bedeutung des Raumwärmebereichs werden noch einmal zusammengefaßt:

- Die Kohlendioxidemissionen der Haushalte reduzieren sich im Reduktionsszenario bis 2005 um 28 %, bis 2020 um 48 %, jeweils bezogen auf 1990
- Es werden verstärkt Wärmeschutzmaßnahmen vorgesehen, auch Dachdämmung (8 cm) und Kellerdämmung (4 cm) sind unter den restriktiven Bedingungen gemäß Tabelle 8 wirtschaftlich oder werden innerhalb des Betrachtungszeitraumes wirtschaftlich. Bei Außenwandmaßnahmen rechnet sich bei den meisten Typgebäuden auch die wärmetechnisch bessere Variante mit 8 cm Dämmschichtdicke.

- Maßnahmen außerhalb der Renovierungszyklen sind auch im Reduktionsfall noch weit von der Wirtschaftlichkeit entfernt, so daß sie im Modell nicht in der optimalen Lösung auftauchen. Das führt dazu, daß die Reduktionspotentiale im Gebäudebestand nur sehr allmählich über mehrere Jahrzehnte ausgeschöpft werden können.
- Der Energieträgermix verschiebt sich deutlich zum „sauberen", d.h. CO_2-armen Erdgas, dessen Anteil am Energieverbrauch der Haushalte bis 2020 auf 50 % steigt. Der gesamte Endenergieverbrauch der Haushalte inklusive Strom und Kochgas sinkt bis 2005 um 11 % und bis 2020 um 28 %.
- Als Heizungstechnologien werden bei fälligem Austausch weitgehend nur noch Gasbrennwertkessel eingesetzt. Auch Ölbrennwertkessel rechnen sich im Reduktionsfall in einigen Fällen.
- Der Einsatz von elektrischen Nachtspeicherheizungen und Kohlelöfen wird stark reduziert.
- Der Nah- und Fernwärmeanteil erhöht sich nur unwesentlich aufgrund der teuren vorgelagerten Wärmenetze.

Schlußbemerkung

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß die hier dargestellten Modellrechnungen immer im Lichte der Annahmen für verschiedene Rahmenbedingungen interpretiert werden müssen. Es ist auch nicht Sinn von Energiemodellen, die Vergangenheitsentwicklung genau abzubilden bzw. nachzurechnen oder eine exakte Prognose für die Zukunft zu liefern, weshalb die Resultate eines solchen technikorientierten „Bottom-up"-Modells durchaus etwas von offiziellen Energiebilanzen abweichen können. Dennoch liegen die Ergebnisse, was das Referenzszenario betrifft, im Rahmen gängiger Statistiken und Prognosen, zum Beispiel verglichen mit /1/ oder /2/[3].

Sinn von Modellrechnungen auf nationalem Level, wie sie hier vorgestellt wurden, ist es, Abhängigkeiten und Systemzusammenhänge aufzuzeigen, die sich bei einer Detailanalyse eines Sektors nicht ohne weiteres erfassen lassen. Diese Ergebnisse können dann wiederum als Input für weitere Sektoranalysen dienen, für die sie sozusagen einen gesamtwirtschaftlichen „Rahmen" abstecken.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Rechnungen mit dem MARKAL-IKADAT Modellsystem gezeigt haben, daß dem Haushaltssektor im Sinne einer nationalen „Optimalstrategie" eine große Bedeutung zukommt und daß die Möglichkeiten zur Energieeinsparung und zur CO_2-Reduktion in diesem Bereich mindestens ebenso wichtig sind wie beispielsweise der verstärkte Einsatz von regenerativen Energiequellen zur Stromerzeugung. Welche Konsequenzen dies auf den Raumwärmebereich im Detail hat, wird im vierten Kapitel anhand von beispielhaften Strategien mit dem IKARUS-Raumwärmemodell gezeigt.

[3] Abweichungen ergeben sich durch den unterschiedlichen methodischen Ansatz bei Prognosemodellen, die in der Regel eine Trendfortschreibung unter Berücksichtigung bestimmter Rahmenbedingungen machen und dem Optimierungsansatz des hier verwendeten MARKAL-Modells.

4. Strategien zur Ausschöpfung der Einsparpotentiale im Gebäudebestand

4.1 IKARUS Raumwärmemodell

Um einen möglichst vielseitigen Fragenkatalog, wie er sich für das Thema Raumwärme stellt, bearbeiten zu können, wurde ein dynamisches Simulationsmodell entwickelt. Dabei steht die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des gesamten Gebäudebestands im Vordergrund.

Für das *IKARUS*-Raumwärmemodell besteht die Aufgabe, den gesamten Endenergiebedarf und die damit energieträgerspezifisch verbundenen Emissionen wie z.B. CO_2, SO_2, NO_x und CH_4 zur Raumheizung und Warmwasserbereitung in der Bundesrepublik Deutschland zu ermitteln und Maßnahmen und Strategien zur Reduktion klimawirksamer Gase zu analysieren.

Um den gesamten Wärmebedarf und den daraus resultierenden Energieverbrauch des Sektors Raumwärme zu erfassen, ist die Kenntnis des Gebäudebestandes erforderlich. Die architektonische Vielfalt der Gebäude macht es erforderlich, den Bestand auf einige charakteristische Typen zu reduzieren, die mit ihrer Häufigkeit [%] an der Gesamtwohnfläche [Mio. m²] den modellmäßigen Gebäudebestand bilden. Die Qualität der Aussagen über den Gebäudebestand hängt entscheidend davon ab, wie gut diese Typgebäude mit ihren Anteilen den aktuellen Zustand des Gebäudebestandes repräsentieren.

Typische Fragestellungen an das Modell können lauten:

- Wie groß ist der derzeitige Endenergieverbrauch für die Raumwärmeerzeugung nach Energieträgern und welche Belastungen für die Umwelt sind damit verbunden?
- Was kann man tun, um den Verbrauch ohne Einbuße an Komfort und Behaglichkeit zu senken?
- Welchen Beitrag können einzelne Maßnahmen oder Maßnahmenbündel (z.B. Austausch der Fenster) zur Emissionsminderung leisten?
- Wie entwickelt sich unter bestimmten Annahmen der Endenergieverbrauch (Brennstoffverbrauch) in Zukunft ?
- Welchen Einfluß hat die demographische Entwicklung auf den Wohnungssektor?

4.2 Maßnahmen an der Gebäudehülle

Ausgangspunkt von Nutzwärmeeinsparmaßnahmen sind zum einen die Reduzierung der Wärmeverluste der Außenbauteile (Wände, Fenster, Dächer, Decken) zur Absenkung des Wärmebedarfs und zum anderen Änderungen am Heizungssystem (Modernisierung, Austausch des Wärmeerzeugers, andere Brennstoffe) zur Reduzierung des Endenergieverbrauchs, oder auch eine Kombination beider. Zu den Maßnahmen an der Gebäudehülle gehören:

- Bei Neubauten
  - Verbesserung des Wärmeschutzes z.B. durch Einsatz von Baustoffen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit (Verbesserung des k-Wertes).
  - administrative Maßnahmen, so z.B. Wärmeschutzverordnung
- Bei bestehenden Gebäuden
  - Verbesserung des Wärmeschutzes z.B. durch nachträgliche Aufbringung zusätzlicher Dämmschichten
  - neue Fensterverglasung (Wärmeschutzverglasung)
  - Wintergarten.

Das Verhalten der Bewohner sind weitere Ansatzpunkte für Energieeinsparungen. So sind etwa Absenkung der Sollinnentemperaturen als auch Heizunterbrechnung durch Nachtabsenkung weitere Maßnahmen zur Nutzwärmeeinsparung.

Zur Berechnung von Energieeinspar- bzw. Emissionsminderungs-Maßnahmen mit ihren Kosten für den gesamten Gebäudebestand ist die Vorgabe von Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenkombinationen an den Typgebäuden erforderlich. Dabei muß sich eine Maßnahme nicht auf alle Gebäude eines Typs erstrecken, sondern kann sich auch auf einen Teil der Gebäude beziehen. So können auch am selben Typ gleichzeitig unterschiedliche Maßnahmenkombinationen gerechnet werden.

Unter Umständen sind solche Vorgaben in der Realität technisch kaum machbar und ökonomisch wenig sinnvoll, doch geben sie dem Benutzer einen Einblick, welche Konsequenzen und Potentiale damit verbunden sind.

4.3 Maßnahmen am Heizungssystem

Das Spektrum der Emissionsreduktionspotentiale erstreckt sich über die Verbesserung aller konventionellen Systeme und den Einsatz schadstoffarmer Energieträger bis hin zu schadstoffsubstituierenden Heizsystemen mit Umweltenergien.

Die Maßnahmen an dem Heizungssystem beinhalten:

- Einführung von Techniken des jeweils modernsten Stands - bei festgehaltener Ausgangstechnologie z.B. den Ersatz veralteter Kessel durch moderne Brennwertkessel
- Umrüstung - soweit sinnvoll, d.h. bei vorhandener Niedertemperaturheizung auf Wärmepumpen- oder Solarheizung und -warmwasserbereitung
- Ersatz aller Feststoffbrenner (Kohle) durch Zentralheizung z.B. durch Ölkessel
- administrative Maßnahmen, so z.B. Heizungsanlagenverordnung

4.4 Strategien

Betrachtet man Maßnahmen am Gebäude nicht nur zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern über einen Zeitraum hinweg, so spricht man von einer Strategie bzw. von einem Szenario. Eine Strategie dient der Bewertung von unterschiedlichen Maßnahmen an Gebäuden (vom Einzelhaus bis zu Gebäudebeständen) durch Berechnung der durchgesetzten Energiemengen und der entsprechenden Emissionen und der Gesamtkosten aus Maßnahmen und Endenergieverbräuchen. Eine Strategie wird definiert durch Angaben von Haustypen, Maßnahmen an Gebäudehüllen und/oder an Heizungs- und Warmwassersystemen. Dazu gehört die Festlegung, zu welchen Zeitpunkten und in welchem Umfang die Maßnahmen durchgeführt werden.

Zunächst muß ein sogenanntes *Referenz-Szenario* definiert werden, das als Bezug für Energieverbrauchs-, Emissions- und Kostenanalysen anderer Szenarien dient. Dieses Referenzszenario beinhaltet nur ein Minimum an Maßnahmen, bei dem im wesentlichen bestehende Strukturen festgehalten werden und praktisch nur Brennstoffkosten anfallen.

Alternativszenarien sind alle Szenarien, die sich beim jeweils konkreten Maßnahmenkatalog (bei gleichen Basisparametern wie Brennstoffkosten, Diskontfaktor und Zeitrahmen) vom Referenzszenario unterscheiden. Zu solchen Alternativszenarien - die z.B. für Gesamtdeutschland oder West- und Ostdeutschland getrennt gerechnet werden können - werden insbesondere sogenannte

"Standardfälle" gerechnet, die auf Knopfdruck (d.h. ohne weitere Eingabe von zusätzlichen Daten) abgerufen werden können.

Die Datenvorgabe ist gegliedert nach Maßnahmen an Gebäudehüllen und Maßnahmen an den Heizungs- und Warmwassersystemen samt Wärmeverteilung in den Gebäuden ("Beheizungsstruktur"). Die Zeitschrittweite für die Festlegung von Strategiemaßnahmen ist wählbar.

Aufgrund der baulichen Maßnahmen an den Gebäudehüllen wird zunächst der resultierende jährliche Wärmebedarf des Gebäudes bzw. Gebäudebestands berechnet. Dann werden die zur Deckung des Wärmebedarfs erforderlichen Brennstoffmengen infolge der neuen Heizungsstruktur ermittelt.

Die Berechnungen liefern für jeden Zeitschritt die Jahresmengen an den einzelnen eingesetzten Brennstoffen und die entsprechenden Emissionsmengen an CO_2 und anderen Emissionen.

Aus den vorgegebenen Maßnahmen werden die jährlichen Investitionskosten und aus den Brennstoffmengen die Brennstoffkosten (inklusive Nebenkosten wie Wartung und Instandhaltung) hergeleitet.

Um Szenarien vergleichen zu können, bedient man sich der Barwertmethode (auf einen Zeitpunkt abdiskontierte Summen von Jahreswerten über den Betrachtungszeitraum). Während die Brennstoffkosten kontinuierlich anfallen, sind die Investitionen punktuelle Ereignisse. Die Barwertmethode ist eine Annuitätenmethode, die die Investitionskosten über einen Abschreibungszeitraum (z.B. Lebensdauer der Investition) in gleich große jährliche Kostenblöcke umgerechnet unter Berücksichtigung einer gewissen Verzinsung des eingesetzten Kapitals und dann daraus abdiskontierte Summen bildet.

In gleicher Weise werden auch abdiskontierte Summen der jährlichen Endenergiemengen und der jährlichen Emissionen gebildet, um sie in Relation zu den Gesamtkosten setzen zu können.

Tatsächlich kommt es aber auf die Relationen zu einem Referenz-Szenario an, dem gegenüber erst die Definition von Maßnahmen sinnvoll ist. Dem Referenz-Szenario liegen nur übliche Erneuerungen ("Sowieso"- Maßnahmen) zugrunde; zwischen diesem und einem Maßnahmen-Szenario werden die Differenzen der Barwerte der Kosten, der Endenergien und der Emissionen ausgewiesen.

Die Ergebnisse einer Strategierechnung sind die Endenergieverbräuche und Emissionen und die Strategiekosten (abdiskontierte Summe der jährlichen Gesamtkosten aus Investitionen an Gebäuden und Versorgungssystemen und den verbrauchten Endenergieträgern). Endenergien und Emissionen liegen sowohl als Jahreswerte als auch als abdiskontierte Summen vor. Diese letzteren Werte dienen zum Vergleich mit den Strategiekosten, insbesondere zur Berechnung mittlerer Kostenwerte pro Einheit vermiedener Endenergie oder vermiedener CO_2- Emission, sofern auf eine Referenzstrategie (z.B. ohne jegliche Maßnahmen) Bezug genommen wird.

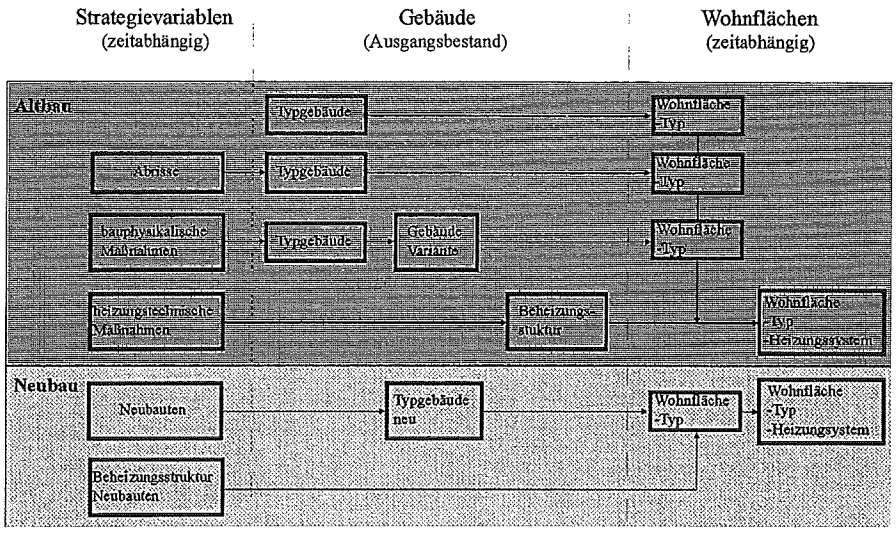


Abbildung 8: Die Elemente einer Strategie

Der Gebäudebestand wird repräsentiert durch einen Gebäudetyp und der gesamten Wohnfläche [Mio. m²]. Dabei wird unterschieden nach dem Altbaubestand zu einem definierten Zeitpunkt (1995) und dem Neubaubestand, der sich aus den nach 1995 errichteten Gebäuden bildet.

Die Entwicklung des Gebäudebestandes ergibt sich aus dem Ausgangsbestand, und den Strategievariablen, die eine zeitliche Änderung des Bestandes bewirken. Bei dem Altbaubestand sind es die Abrisse, die den Gesamtbestand verändern und beim Neubaubestand die Neubauten (Abbildung 8).

Durch Maßnahmen an der Gebäudehülle eines Gebäudetyps A erhält man eine Variante j dieses Typs. Der Benutzer kann nun vorgeben, zu welchem Zeitpunkt welche Fläche (in % der Fläche des Typs A) des Gebäudetyps A in die Variante j überführt werden soll. Um denselben Anteil wird die Fläche des Typs A reduziert.

Das heißt, hier sind die technischen und ökonomischen Kriterien festzulegen, nach denen eine Maßnahme zum Einsatz kommt. Der Angabe, wieviel % des Bestandes infolge einer Maßnahme umzurüsten sind, kann auch ein Algorithmus zugrunde liegen, so z.B. ein Renovierungszyklus

Kommen innerhalb eines Zeitintervalls $[t_1,t_2]$ Bauteile mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von $\Delta\tau$ Jahren zum Einsatz, so werden sie im Zeitintervall $[t_1+\Delta\tau,t_2+\Delta\tau]$ ersetzt. Bezieht sich das Intervall nur auf eine Baualtersklasse so läßt sich der Anteil der Umrüstungen durch $(t_2-t_1)/\Delta\tau$ im Zeitintervall $[t_1+\Delta\tau,t_2+\Delta\tau]$ approximieren.

Betrachtet man nur die Umrüstungen, dann ist zu jedem Zeitpunkt die Summe der Flächen des Typs A und seiner Varianten konstant. Zusätzlich ist aber zu berücksichtigen, daß über der Zeit die Fläche des Typs A infolge von Abrissen reduziert wird. Zum anderen wird die Flächenbilanz infolge der Neubautätigkeit um neue Gebäudetypen erweitert.

Allgemein gilt für die zeitabhängige Entwicklung des Bestandes (zum Zeitpunkt t+1) eines Gebäudetyps:

$$\text{Bestand}_{t+1} = \text{Bestand}_t + \text{Zunahme}_t - \text{Abnahme}_t$$

Bei der Zunahme der Flächen kann es sich um die Fläche von Neubauten oder um die Fläche einer Gebäudevariante handeln, die dann diesem Typ zuzuordnen ist. Das gleiche gilt auch für die Abgänge, hinter denen sich Abrisse als auch Umrüstungen (Modernisierung) verbergen.

In Abhängigkeit von der Entwicklung des Bestandes werden dann unter Vorgabe von Umrüstquoten bei den Gebäuden und Heizungssystemen die zeitliche Entwicklung des Wärmebedarfs, des Endenergiebedarfs und der Emissionen ausgewiesen.

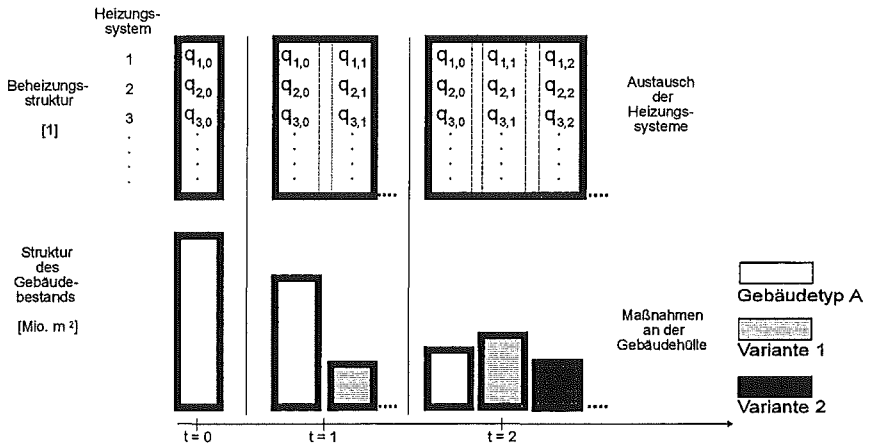


Abbildung 9: Die Entwicklung des Gebäudebestands und seiner Beheizungsstruktur

Die Ausstattung des Gebäudebestands zum Zeitpunkt t = 0 mit den Heizungssystemen wird als Beheizungsstruktur bezeichnet (Abbildung 9). Das ist der Anteil $q_{Hzg=1}$ der Fläche A des Gebäudetyps 1, das mit dem Heizungssystem Hzg=1 beheizt wird. Die Änderung der Beheizungsstruktur [% der Wohnfläche] erfolgt über die Angabe der Fläche A_2 [m²], der statt des Heizungssystems Hzg=1 das Heizungssystem Hzg=2 zugeordnet werden soll. Dabei entspricht dieser Fläche ein Wert aus dem Intervall

$A_2 \in [0 \leq A * q_{Hzg=2} \leq A * q_{Hzg=1}]$.

Für die verbleibenden Systeme werden dann die neue Anteile errechnet.

4.4 Anwendungsbeispiel

An dem folgenden Beispiel /19/ sollen mit Hilfe des Raumwärmemodells die quantitativen Auswirkungen, insbesondere von Maßnahmen an den Gebäudehüllen und Heizungssystemen von Altbauten und von verschärften gesetzlichen Vorschriften bei Neubauten für die Alten Länder der Bundesrepublik Deutschland aufgezeigt werden in bezug auf

- Wärmebedarf,
- Brennstoffverbräuchen,
- Emissionen (vor allem CO_2),
- Kosten (Investions- und Verbrauchskosten).

Dabei soll die Wirkung von Wärmedämmniveaus bei Neubauten gegenüber CO_2-absenkenden Maßnahmen an Altbauten verglichen werden. Während die Neubauten beginnend ab 1989 von ca.

28 Mio. m² auf etwa 659 Mio. m² - (siehe Abb. 10) anwachsen, nehmen die Altbauten von 2195 Mio. m² auf 1978 Mio. m² ab, wodurch die Gesamtwohnfläche ab 2010 bei etwa 2637 Mio. m² stagniert. Für die Neubauten wird ab 1.1.1996 die WSchV 95 zugrunde gelegt und ab 1.1.2000 die sogenannte Energiesparverordnung (ESpV), die dem Niedrigenergiehaus-Standard entspricht. Abb. 4 zeigt die Auswirkungen der WSchV 95 und der ESpV auf den Wärmebedarf der Wohngebäude. Hier erfolgen keine Maßnahmen an den Altbauten.

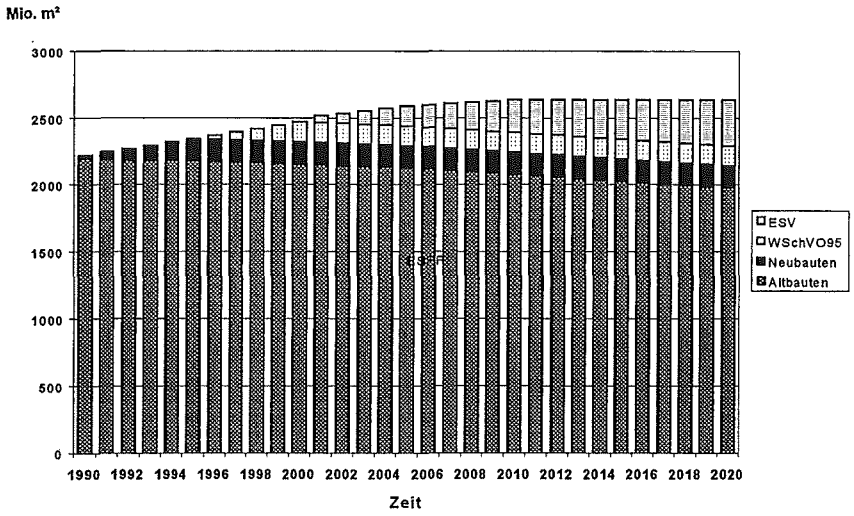


Abbildung 10: Die Entwicklung der Wohnflächen

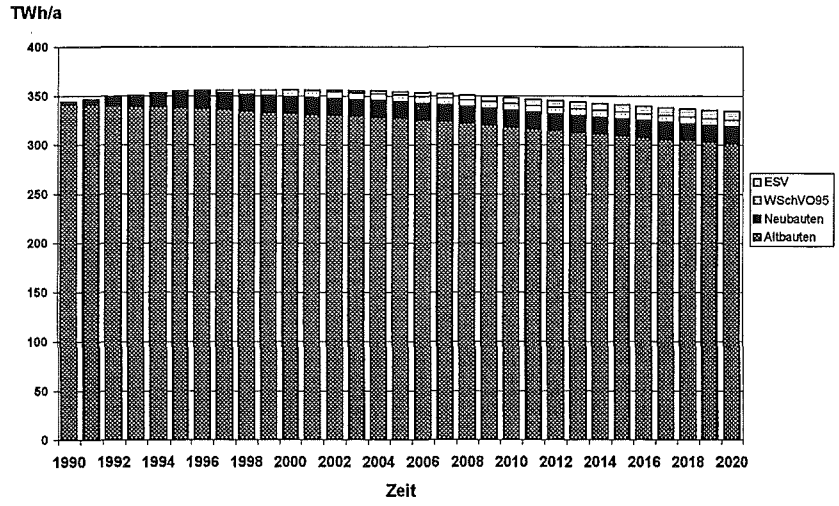


Abbildung 11: Die Entwicklung des Wärmebedarfs (Referenz)

Die wesentliche Schlußfolgerung daraus ist, daß der Wärmebedarf (und auch die Endenergiemengen und CO_2-Emissionen) zunächst steigt und etwa ab 2005 ohne bessere Neubauisolierung stagniert und nur mit verschärften Neubauvorschriften längerfristig sinkt. Daraus ist aber auch abzulesen, daß deut-

liche Reduktionen der Endenergiemengen und CO_2-Emissionen nur durch absenkende Maßnahmen im Altbaubestand zu erreichen sind, weil die Neubauten ohnehin schon sehr energie-(und emissions-) sparend sind.

Wie oben angeführt, geht es hier - aus Datengründen nur für die ABL - um den Einflußvergleich von Neu- gegenüber Altbauten und zum anderen um das Systemverhalten des Raumwärmesektors unter drei Maßnahmenszenarios für die Altbauten, jeweils im Zeitraum 1990 bis 2020.

- **Referenzszenario:** Dieses Szenario umfaßt nur Maßnahmen, die "sowieso" erfolgen. So werden beim Fensteraustausch nur Verglasungen mit dem marktüblichen –Wert eingesetzt.
- **Szenario mit Hüllenmaßnahmen**: Diese Strategie umfaßt Maßnahmen, die Niedrigenergiehausstandard erreichen. Dazu gehören verstärkte Dämmaßnahmen an den opaken Hüllflächen und ein Fensteraustausch durch Dreifachverglasung (k_F=0.9 W/m²K).
- **Szenario mit Maßnahmen an den Heizungssystemen**: Im Rahmen der Erneuerungszyklen werden die Heizungsanlagen werden auf den Stand der Technik gebracht.

Es ist klar, daß in allen drei Szenarien der Altbaubestand gegenüber den Neubauten das Gesamtverhalten dominiert. Um dies deutlich zu machen, werden in allen folgenden Abbildungen der Zeitverläufe für Endenergie (EE) und CO_2 die Beiträge der Neu- und Altbauten getrennt ausgewiesen, aber meist nicht mehr angesprochen. Nachfolgend werden der EE-Bedarf, die CO_2-Emissionen und schließlich der Wirtschaftlichkeitsvergleich vorgestellt. Die Abb. 12 – 14 zeigen die Verläufe des Endenergiebedarfs.

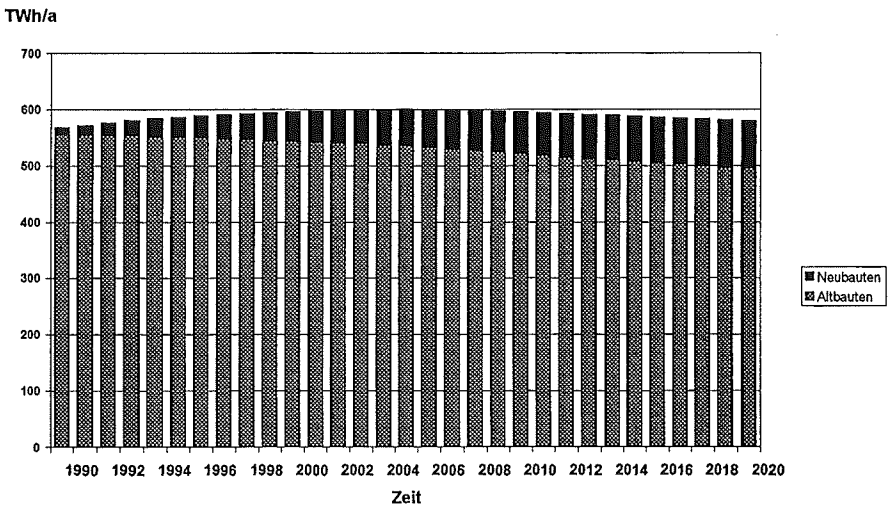


Abbildung 12: Endenergiebedarf (Referenz)

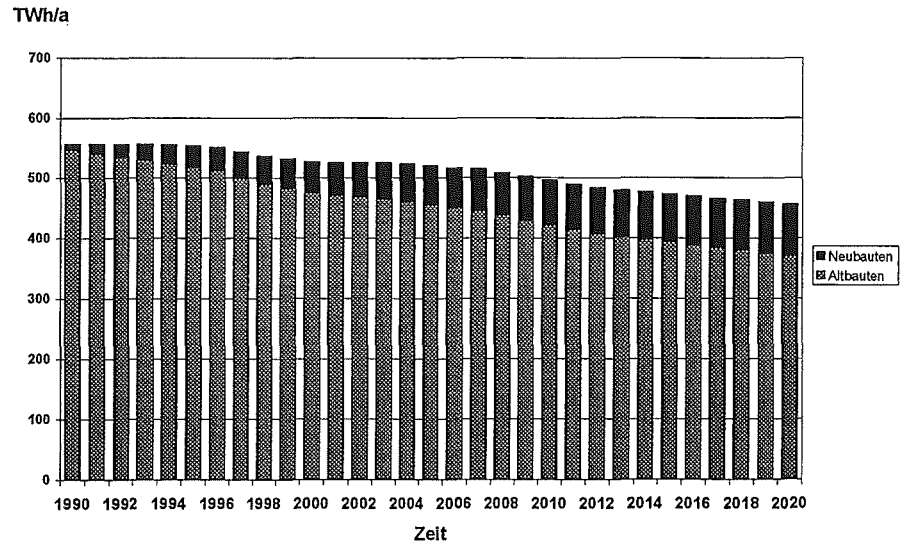


Abbildung 13: Endenergiebedarf (Niedrigenergiehaus)

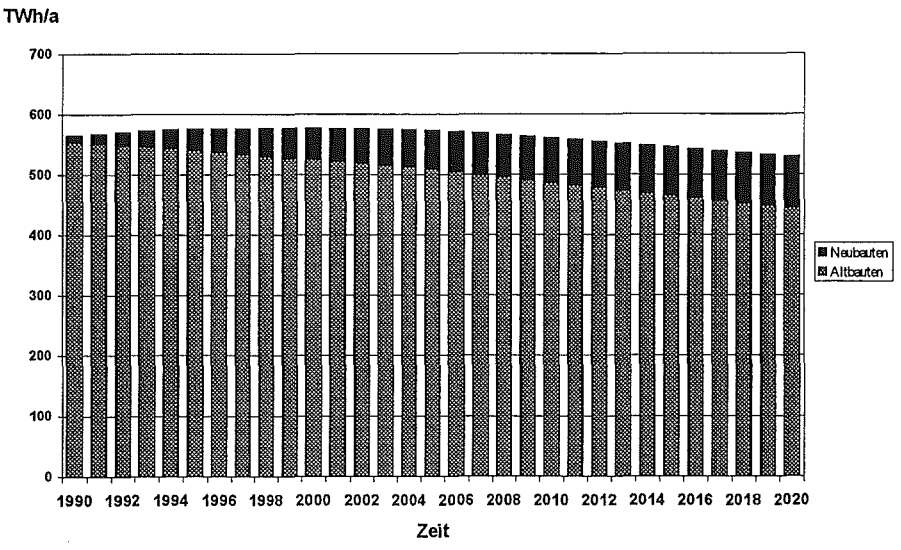


Abbildung 14: Endenergiebedarf (Heizungsaustausch)

Der Heizungsaustausch allein bringt nur wenig, weil er den Wärmebedarf nicht absenkt, sondern diesen nur mit besserem Wirkungsgrad abdeckt:

Die Hauptgründe, daß selbst Extremmaßnahmen nicht schnell greifen, sind zum einen die Expansion der Wohnflächen, zum anderen die Trägheit des Systems "Altbauten": Wie die HZ-Strategie zeigt, kommt man an einer Absenkung des Wärmebedarfs nicht vorbei, und das ist nur mit Hüllenmaßnahmen zu erreichen, die relativ zum Heizungsaustausch sehr teuer sind.

Darauf ist auch bei der Vorstellung der Reduzierungskosten (diskontierte Barwerte) hinzuweisen, aber auch auf die diesen Rechnungen zugrunde liegenden Annahmen real konstanter Brennstoffpreise und Investitionskosten. Zusätzlich ist es wesentlich, ob zum Kostenvergleich nur Zusatzkosten im Renovierungszyklus oder die Vollkosten bei Hüllenmaßnahmen herangezogen werden. Die Vollkosten sind zwar immer zu zahlen, aber die Zurechnung zu Wärmedämm- oder Renovierungsmaßnahmen ist dabei ausschlaggebend.

Der Raumwärmebereich hat in der Tat ein beträchtliches Reduktionspotential, aber innerhalb kurzer Zeit nur zugänglich im Neubaubereich und da auch nicht absolut, sondern nur relativ zum bisherigen Status der Wohngebäudeisolierung.

5. Zusammenfassende Schlußfolgerungen

Eine wirksame CO_2-Minderung kann in Deutschland nur erreicht werden, wenn der Haushaltssektor, der ca. 30 % der Endenergie verbraucht, mit einbezogen wird. Ein großer Teil der Altbauten ist unzureichend gedämmt und hat Heizungsanlagen, die z. T. mit niedrigen Nutzungsgraden arbeiten. Hier wird in großem Maße unnötigerweise Energie verbraucht, die beim heutigen Stand der Technik eingespart werden kann. Das technische Einsparpotential durch eine bessere Wärmedämmung des Gebäudebestandes liegt bei mindestens 50 %. Durch den Austausch von überalterten Heizungsanlagen kann - bezogen auf den Verbrauch der Altanlage - eine Brennstoffeinsparung von bis zu 25 % realisiert werden.

Die Wirkungen der Einsparmaßnahmen stehen in enger Wechselwirkung. So wird der volle Spareffekt nur in einem Gebäude erreicht, das bei verbesserter Wärmedämmung gleichzeitig mit einer modernen Heizungsanlage ausgestattet ist. Wird die Wärmedämmung ohne Kesselaustausch durchgeführt, dann ist die alte Anlage durch den verminderten Heizwärmebedarf stark überdimensioniert. Ihr Nutzungsgrad wird dadurch noch schlechter. Durch fehlendes energiebewußtes Nutzerverhalten, d. h. übermäßiges und unkontrolliertes Lüften sowie das Einstellen unnötig hoher Raumtemperaturen, können die technischen Verbesserungen zu einem erheblich Teil wieder zunichte gemacht werden.

Trotz der z. T. noch unzureichenden Wirtschaftlichkeit vieler Dämmaßnahmen muß von dem vorhandenen Einsparpotential im Gebäudebestand soviel wie möglich realisiert werden, so die Meinung vieler Politiker und Ökologen. Da der Nutzer durch Wärmeschutzmaßnahmen bei derzeitigen Energiepreisen offensichtlich nur einen geringen oder keinen wirtschaftlichen Vorteil hat, muß die Umsetzung des Potentials durch zusätzliche Maßnahmen angestoßen werden. Hierzu gehören: ordnungsrechtliche Maßnahmen, preispolitische Maßnahmen, finanzielle Förderprogramme, Forschungsförderung sowie Informations-, Beratungs- und Fortbildungsmaßnahmen.

Trotz einer Vielzahl von guten Ansätzen und vieler vorbildlicher Einzelprojekte kommt die großflächige Umsetzung der Einsparpotentiale im Gebäudebestand nicht schnell genug voran. Die Ursache hierfür sind eine Reihe von Hemmnissen wie die schon genannte unzureichende Wirtschaftlichkeit, mangelnde Information bei Eigentümern und Mietern, unzureichende öffentliche Fördermittel und meist auch ein fehlendes Umweltbewußtsein. Ein weiteres schweres Hemmnis ist das sogenannte Investor-Nutzer-Dilemma: In vielen Fällen unterbleiben Maßnahmen, weil sie entweder für den Vermieter keinen Nutzen bringen, da nur der Mieter von den geringeren Heizkosten profitiert, oder weil der Mieter durch die Modernisierungsumlage finanziell zu stark belastet wird.

Aus Sicht des Klimaschutzes ist es aber notwendig, die Handlungsschwellen zu senken, um die energetische Sanierung des Gebäudebestands in möglichst "breiter Front" voranzutreiben.

Daß der Gebäudebereich auch im Kontext von nationalen Energiespar- und CO_2-Minderungsstrategien eine große Rolle spielt, zeigen Modellrechnungen mit dem dynamischen Optimierungsmodell MARKAL-IKADAT, das in die Modellfamilie des IKARUS-Projektes eingebunden ist. Mit einem solchen, nationalen Modell lassen sich Optimalstrategien für eine zukünftige Reduktion von Treibhausgasen rechnen, wobei die Emissions-Reduktion als Zielvorgabe vorgegeben wird und das Modell einen kostenoptimalen Mix aus verschiedenen Maßnahmen quer durch alle Umwandlungs- und Endverbrauchssektoren bestimmt.

Bereits in einem Referenz-Rechenlauf ohne restriktive CO_2-Emissionsobergrenzen sinkt der Endenergieverbrauch der Haushalte von 2730 PJ im Jahr 1995 auf 2450 PJ im Jahr 2005 und auf 2100 PJ bis zum Jahr 2020. Daß es trotz steigender Wohnfläche zu einer Energie- und analog auch zu einer CO_2-Einsparung kommt, liegt neben einem verbesserten Wärmeschutz im Neubau auch an einem sukzessiven Austausch alter Kessel und einigen Wärmedämmaßnahmen wie Fassadenisolierung, die bereits im Referenzfall wirtschaftlich sind.

Legt man eine Einhaltung der Reduktionsziele der deutschen Bundesregierung zugrunde, werden die Sparpotentiale im Haushalt noch weiter ausgeschöpft. Es zeigt sich, daß dem Raumwärmebereich im Kontext nationaler Reduktionsstrategien eine große Bedeutung zukommt und daß er – im Vergleich mit anderen Sektoren – überproportional zum Erreichen der gesetzten Minderungungsziele beiträgt. Dabei spielen sowohl effizientere Heizungen wie die Gasbrennwerttechnik eine große Rolle sowie ein höherer Anteil des kohlenstoffärmeren Erdgases im Wärmemarkt als auch ein verstärkter Einsatz von Wärmeschutzmaßnahmen, die innerhalb der Renovierungszyklen durchgeführt werden können.

Mit diesem Maßnahmenbündel können die CO_2-Emissionen im Haushaltssektor bis 2020 auf die Hälfte und der Energieverbrauch auf 70 % des Wertes von 1990 reduziert werden.

Auch das vorgestellte Rechenbeispiel mit dem IKARUS-Raumwärmemodell verdeutlicht, daß eine deutliche Energieeinsparung mittelfristig nur zu erreichen ist, wenn Maßnahmen im Gebäudebestand einbezogen werden, sowohl an der Heiztechnik als auch beim Wärmeschutz. Da die Umsetzung von Maßnahmen, die im Einzelfall durchaus wirtschaftlich sein können, oftmals nicht oder nur sehr langsam erfolgt, müssen die politischen Rahmenbedingungen entsprechend gestaltet werden, wenn man Energieverbrauch und Emissionen bei den privaten Haushalten deutlich senken will.

Hierfür werden weitere geeignete und durchgreifende Instrumente gesucht, welche über die bisher eingesetzten Förderprogramme und Verordnungen hinaus gehen.

6. Referenzen

/1/ BMWi (1998), Energiedaten `97/`98, Nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Wirtschaft, Bonn.

/2/ PROGNOS (1995), Die Energiemärkte Deutschlands in zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020, Bericht in Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Basel.

/3/ Gülec T., Kolmetz S. und Rouvel L. (1994), Energieeinsparpotential im Gebäudebestand durch Maßnahmen an der Gebäudehülle, IKARUS, Teilprojekt 5 "Haushalte und Kleinverbraucher", Band 5-22, Forschungszentrum Jülich.

/4/ Rathert P. (1995), Wärmeschutzverordnung und Heizungsanlagenverordnung, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH., Köln.

/5/ Esso (1995), Energieprognose, Moderne Heizung - aktiver Klimaschutz, Faltblatt.

/6/ Hauser G., Stiegel T. und Otto F. (1997), Energieeinsparung im Gebäudebestand, Bauliche und anlagentechnische Lösungen, Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e. V., Berlin.

/7/ Stehmeier (1996), Umsetzung des Vollzugs zur Heizungsanlagenverordnung, Bundesverband der Schornsteinfegerhandwerks, Sankt Augustin.

/8/ Gruson C. und Kerschberger A.. (1994), Kostenermittlung für wärmetechnische Maßnahmen an der Gebäudehülle, IKARUS, Teilprojekt 5 "Haushalte und Kleinverbraucher", Band 5-10, Forschungszentrum Jülich.

/9/ Viessmann (1996), Heizungsrelevante Verordnungen, Hrsg. Fachverband Sanitär, Heizung, Klima, Broschüre der Firma Viesmann, Allendorf.

/10/ BMBF (1996), 4. Programm Energieforschung und Energietechnologien, Bonn.

/11/ Energieagentur NRW (1998), REN Impuls-Programm "Bau und Energie", Seminartermine 1998, Wuppertal.

/12/ Lehr U. (1995), Möglichkeiten der Energieeinsparung im Wohnungsbestend, RWI-Mitteilungen, Jg. 46, S. 123-140, Essen.

/13/ IWU (1995), Energieeinsparungen beim Heizwärmebedarf - ein Schlüssel zum Klimaproblem, Hrsg. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt.

/14/ ETSAP (1997), New Directions in Energy Modeling – Summary of Annex V (1993-1995), Petten

/15/ Markewitz, P., Hake, J.-Fr., Heckler, R., Kuckshinrichs, W., Martinsen, D., Walbeck, M. (1998.), Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien, Jülich

/16/ Vorläufiger, bisher unveröffentlichter IKARUS-LP-Datensatz mit Bezugsjahr 1995, Programmgruppe STE, Forschungszentrum Jülich (1998)

/17/ Ziesing, H.-J., Diekmann, J., Hopf, R., Kleemann, M., Kolb, G., Markewitz, P., Martinsen, D., Jochem, E., Ostertag, K., Schlomann, B., Cames, M., Matthes, F.Chr (1997): Politikszenarien für den Klimaschutz, Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes, Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO_2-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005, herausgegeben von Stein, G., Strobel, B., Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 5, Jülich

/18/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1997), Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Bonn

/19/ Heckler, R., Kolb, G. (1997a), Mögliche Entwicklungen des Energieverbrauchs im Sektor Raumwärme. IKARUS-Workshop am 14./15. April 1997 in Bonn "Modellinstrumente für CO_2-Minderungssstrategien", Proceedings (Hrsg. Hake, J.-Fr., Markewitz, P.), Forschungszentrum Jülich, Band 4200003, S. 37-61, Jülich 1997

/20/ Heckler, R., Kolb, G. (1997b), Strategien zur Emissionsminderung im Raumwärmesektor, Beitrag zum 3. Ferienkurs "Energieforschung", Jülich 1997

Emissionsminderung durch Verkehrsverlagerung oder Veränderung von Fahrzeugflotten

M. Walbeck, D. Sonnenschein

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)

Forschungszentrum Jülich

1. Einleitung

Zur Veränderung der Emissionen des Verkehrs gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen und denkbaren Eingriffen, die oft wegen ihrer vielfältigen Einwirkung auf das Verkehrsgeschehen nur schwer nachvollziehbar sind. Da erkennbar war, daß es im Verkehrsbereich viele Fragen nach der Wirkung von Maßnahmen, Eingriffen und Strategieänderungen geben würde, hat die STE sich entschlossen, ein Teilmodell Verkehr zu entwickeln, das diesem Bedarf gerecht wird.

Dabei wurde folgende Modellumsetzung gewählt.

Es wurde ein Simulationsmodellansatz im Sinne eines großen Kalkulationsschemas gewählt. Ein Kalkulationsschema gewährleistet die erforderliche Detailtiefe und erlaubt bei geschicktem Aufbau eine spätere Ausweitung z. B. auf Infrastrukturauswirkungen.

Es wurde die Möglichkeit berücksichtigt, baujahrbezogen die Alterung von Beständen abzulegen und den Ab-/Zubau jahresweise vornehmen zu können. Hierdurch ist die Dynamisierung des Verkehrsmodells gewährleistet. Diese Funktionalität wird in einem separaten Bestandsmodul entwickelt und sieht eine Kopplung mit dem Hauptmodul vor.

Um konsistent weitere Fahrzeugtypen aufnehmen und verwalten zu können, wurde entschieden, das Modell in einer relationalen Datenbank abzulegen.

Aus Kompatibilitätsgründen mit verfügbarem statistischen Material wurde als Grundstruktur eine Aufteilung des Modells in vier Module vorgenommen. Dies sind die Module "Personenverkehr nah", "fern" - "Güterverkehr nah", "fern". Die weitere Detaillierung dieser Grundstruktur wurde u. a. im Hinblick auf die Datenverfügbarkeit mit dem TÜV Rheinland, der die Datenaggregate für das Modell bereitstellt, abgesprochen. Um möglichst kompatibel zur Struktur der TÜV-Daten zu bleiben, wurde als relationales Datenbanksystem "Microsoft ACCESS" gewählt, das auch der TÜV nutzt.

In diesem System hat der TÜV bereits Tools zum Datenmanagement entwickelt.

Eine spätere Zusammenführung des Teilmodells Verkehr der STE und der Verkehrstools des TÜV wurde vorgesehen und unter ACCESS in einer gemeinsame Bedienerbox für möglich erachtet.

Bereits bei der Modellentwicklung wurden Bedienermasken zur Datenmanipulation und -ansicht angelegt, über die ohne weiteres eine Benutzerführung gelegt werden kann. Ferner wurde als Grundkonzept festgelegt, daß als Bestandteil des Modells Basisszenarien - dies sind Trendszenarien, die auf Grund der Vergangenheitsentwicklung eine Entwicklung für die Zukunft unter Status-Quo Bedingungen fortschreiben – für bestimmte Stützjahre 1989, 1995, 2005 und 2020 mit der Möglichkeit der Regionalisierung (alte/neue Bundesländer) abgelegt werden.

Anhand dieser Basisszenarien kann der Nutzer in seinen eigenen Szenarien ohne deren Überschreibung Änderungen vornehmen. Diese Änderungen werden in Änderungsprotokollen festgehalten und dienen zum Wiederaufbau bereits gerechneter Szenarien bei Aufruf dieser Nutzerszenarien. Sie informieren den Nutzer zugleich über die im Rahmen seiner Szenarien vorgenommenen Änderungen. Der Modellanwender kann durch diese Manipulationen, basierend auf den Strukturen der Trendszenarien eigene Technikstrukturen aufbauen indem er eigene Fahrzeugtypen (plus deren zugehörige Fahrzeugparameter: Emissionskoeffizienten usw.) sowie neuartige Antriebsarten definiert.

Es werden als Ergebnisse für den Sektor Verkehr prinzipiell angeboten:

die Emissionen CO_2, CO, CH_4, NOx, NMKW, SO_2

die Energie und

die Kosten

Als Eingriffsmöglichkeit wird dem Nutzer bei Definition seines Szenarios angeboten:

- Änderung von Fahrzeugdaten (Verbrauch, Kosten, Emissionen),
- Hinzufügen bzw. Löschen von Fahrzeugtypen, -klassen und deren zugehörige Antriebsarten,
- Änderung von wirtschaftlichen Daten (Kraftstoffkosten, Zinssatz),

Änderung von strategischen Daten (Verkehrsmenge: Mengenaufteilung auf Verkehrsträger, Fahrzeugart, -typ und -klasse; Besetzungszahlen, Beladungszahlen; Verkehrsmusterwahl, anteilige Straßenzuordnung, Bestandsänderung - nach Fahrzeugtypen, -klassen und Antriebsart).

2. Modelldaten

Die für das Modell erforderlichen Daten wurden vom TÜV Rheinland in Abstimmung mit STE bereitgestellt. Den wesentlichen Umfang machen die Fahrzeugdaten aus, die sehr disaggregiert vorliegen. Es ist eine große Typenvielfalt gegeben, eine Differenzierung in Fahrzeugklassen wurde bei Straßenfahrzeugen vorgenommen.

Enthalten sind Kosten, Bestandszahlen sowie Verbräuche und Emissionen für verschiedene Verkehrszustände. Beladungs-, Besetzungszahlen und maximale Auslastung sind erfaßt. Auch Daten zu neuen Techniken (z. B. Transrapid, alternative Fahrzeugkonzepte) sind erhoben worden und haben Eingang in die Datensätze gefunden.

Darüber hinaus wurden Verkehrsleistungen vom TÜV für die hinterlegten Basisszenarien (Trendanalyse unter Vorgabe demographischer und ökonomischer Entwicklungen) bereitgestellt, die die STE in den Basis-Fällen weiter differenziert hat (z. B. Aufteilung auf Wegearten, Aufteilung auf Fahrzeugtypen, Aufteilung auf Fahrzwecken und Gütergruppen).

3. Rechnungen und Ergebnisse

3.1 Trendszenario

Die Grundlage einer jeden Maßnahmenplanung bildet die Trendaussage, das Trendszenario. Es basiert auf zurückliegenden statistischen Zeitreihen der jeweiligen Einflußgrößen und setzt eine weitestgehend ungestörte Weiterentwicklung dieser Größen voraus (Status- quo- Entwicklung). Trendaussagen basieren vielfach auf rechnerischen/statistischen Zusammenhängen und werden üblicherweise unter Zugrundelegen von Rechenalgorithmen erstellt.

Auf dieser Grundlage wird die Verkehrsnachfrage der Jahre 2005 und 2020 unter Status- Quo-Bedingungen generiert, d. h., daß die heutigen verkehrspolitischen Rahmenbedingungen fortgeschrieben werden. Darüber hinaus wird die Vollendung des EG-Binnenmarktes, die Öffnung der osteuropäischen Märkte sowie ein weiterer Ausbau der Infrastruktur angenommen.

Ausgehend von den Annahmen eines gesamtwirtschaftlichen Wachstums wird für die Entwicklung des Nachfragevektors eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 2,4 % (1995/2005) bzw. 2,0 % (2005/2020) angesetzt. Auf dieser Basis wurde vom TÜV über Elastizitäten die Gesamtverkehrsnachfrage und in weiteren Rechenschritten die Verkehrsnachfrage der einzelnen Verkehrsträger berechnet.

Personenverkehrsleistung BRD (Mrd. Pkm)				Durchschnittl. Wachstumsrate	
Jahr	1995	2005	2020	1995-2005	2005-2020
Zu Fuß	29.9	30.6	29.3	0.2%	-0.3%
Fahrrad	23.3	23.1	21.8	-0.1%	-0.4%
MIV Gesamt	741.2	876.6	921.2	1.7%	0.3%
davon Nahverkehr		499.7	506.6		
davon Fernverkehr		376.9	414.5		
Busverkehr	68.5	71.3	70.4	0.4%	-0.1%
davon Nahverkehr		44.9	43.0		
davon Fernverkehr		26.4	27.5		
ÖPNV	8.5	8.4	8.1	-0.1%	-0.2%
davon Nahverkehr		5.3	4.9		
davon Fernverkehr		3.1	3.2		
Bahn Gesamt	63.5	69.1	94.2	0.8%	2.1%
davon Nahverkehr		15.9	14.1		
davon Fernverkehr		53.2	80.1		
Luftverkehr	25.5	36.8	61.1	3.8%	3.4%
Summe	960.4	1115.9	1206.1	1.5%	0.5%

Tabelle 1: Verkehrsnachfrage für die Jahre 1995, 2005 und 2020, Bundesrepublik Deutschland, Personenverkehr, Trendszenario

In der **Tabelle 1** sind die so berechneten Verkehrsnachfragewerte des **Personenverkehrs** - ausgedrückt durch die Personenverkehrsleistung der Jahre 2005 und 2020 - zusammen mit den entsprechenden statistischen Werten des Bezugsjahres 1995 zusammengestellt.

Der erkennbare Zuwachs der Personenverkehrsleistung in der Periode 1995 bis 2005 resultiert aus dem absoluten Anstieg der Bevölkerung sowie einer wachsenden Nachfrage nach Mobilität der Haushalte, die beispielsweise durch eine Verringerung der durchschnittlichen Arbeitszeit in Verbindung mit zusätzlichen Freizeitaktivitäten verursacht wird. Der vergleichsweise geringere Anstieg der Verkehrsleistung von 2005 bis zum Jahre 2020 berücksichtigt die sinkende Bevölkerungszahl und eine Verringerung des Verhältnisses des Nachfragezuwachses nach Mobilität zum Wachstum der Haushaltseinkommen.

Die folgende **Tabelle 2** zeigt die unter Trendbedingungen berechneten Verkehrsnachfragen für den **Güterverkehr**. Das statistische Basisjahr ist auch hier 1995. Mit aufgeführt sind die jeweiligen jährlichen Veränderungen.

Güterverkehrsleistung BRD (Mrd. tkm)				Durchschnittl. Wachstumsrate	
Jahr	1995	2005	2020	1995-2005	2005-2020
Lkw-Verkehr	279.7	367.7	489.5	2.8%	1.9%
davon Nahverkehr	71.8	99.3	110.2	3.3%	0.7%
davon Fernverkehr	207.9	268.4	379.3	2.6%	2.3%
Bahngüterverkehr	68.8	100.2	134.5	3.8%	2.0%
Binnenschiffsverkehr	64	72.8	98.8	1.3%	2.1%
Summe	412.5	540.7	722.8	2.7%	2.0%

Tabelle 2: Verkehrsnachfrage für die Jahre 1995, 2005 und 2020, Bundesrepublik Deutschland, Güterverkehr, Trendszenario

Wie zu erkennen ist, werden innerhalb des Prognosehorizonts im Güterverkehr insgesamt große Verkehrsleistungszuwächse erwartet, mit unterschiedlichen Veränderungsraten bei den jeweiligen Verkehrsträgern und im Nah- bzw. Fernverkehr. Den Ergebnissen dieses Trendszenarios liegt eine Neubestimmung der Elastizitäten zugrunde, die eine im Rahmen der Anpassung des Verkehrsmodells explizit zu erwartende überproportionale Steigerung des Transitverkehrs in Deutschland berücksichtigt. Dabei wird insgesamt ein höherer Anstieg der Güterverkehrsleistung erwartet, als dies in älteren Verkehrsnachfrageprognosen der Fall war. Die vergleichsweise größten Veränderungen treten im Straßengüterverkehr auf. Diese sind im wesentlichen auf die Vollendung des EG-Binnenmarktes und die Öffnung der osteuropäischen Märkte und dem damit zusammenhängenden erhöhten Anteil des Transitverkehrs zurückzuführen.

Um die mit diesen Verkehrsleistungen verbundenen Emissionen und den Energieverbrauch ermitteln zu können muß man Kenntnis von den zu den Verkehrsleistungen zugehörigen Fahrleistungen haben. Die Personenbesetzungs- bzw. die Beladungszahl der Fahrzeuge erlaubt die Umrechnung von Verkehrsleistungen in Fahrleistungen, indem man die jeweiligen Verkehrsleistungen durch die zugehörigen Besetzungs- bzw. Beladungszahlen dividiert. Daher muß man Annahmen treffen, welche Fahrzeuge - bei welchen Besetzungs- und Beladungszahlen diese Fahrleistungen erbringen. Je feiner hierbei die Differenzierung der Fahrzeuge, z.B. nach Fahrzeugtypen und Größen/Gewichtsklassen sowie Kraftstoffarten, erfolgt, desto spezifischer können Energie- und Emissionswerte den erbrachten Fahrleistungen zugewiesen werden. Diese Werte können ebenfalls nochmals unterschieden werden, wenn man die Fahrleistungen nach energierelevantem Fahrverhalten unterteilt. Ein Unterscheidungskriterium ist beim Straßenverkehr z.B. die Straßenart, auf der der Verkehr stattfindet.

3.1 Modell-Rechnungsablauf

Der rechentechnische Aufwand ist ohne EDV-technische Hilfsmittel erheblich. Hier bietet das in der Programmgruppe STE des Forschungszentrums Jülich entwickelte IKARUS Teilmodell Verkehr Hilfestellung. Ausgehend von den Verkehrsleistungen, wie sie z.B. in den Tabellen 1 und 2 ausgewiesen sind, können nach Vorgabe des Nutzers Energieverbrauch nach Kraftstoffarten und Emissionen (zur Zeit: CO_2 ,CO, NO_X, SO_2, Methan und NichtMethanKohlenWasserstoffe (NMKW)) weitgehend automatisch errechnet werden. Den Rechenablauf im Modell zeigen die **Abbildungen 1, 2 und 3**.

Mit der Rechnung wird auf die vorhandenen erfaßten und erwarteten Bestände aufgesetzt. Sie setzt sich aus einer Verteilungsrechnung und einer Ergebnisrechnung zusammen.

Für die Verteilungsrechnung (siehe **Abbildung 1**) ist die Startgröße die nachgefragte Verkehrsmenge im Betrachtungsjahr. Über Verteilungsvorgaben erfolgt im ersten Schritt eine Mengenverteilung des

Nahverkehrs und des Fernverkehrs aus der Tabelle 1 auf die Verkehrsmittelarten (z.B. Bahn, Flugzeug) und für die Verkehrsmittelart öffentlicher Verkehr auf die dort möglichen Wegearten Straße, Bahn, U-/Straßenbahn differenziert nach Verkehrszwecken.

Es erfolgt sodann für die jeweiligen Wegearten die Zuweisung auf die zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteltypen (z.B. Großraumbus, Normalbus, Straßenbahn etc). Analog ist das Vorgehen im Güterverkehr. Der jeweilige Verteilschlüssel wird Rechenschritt für Rechenschritt zugewiesen. Die erzielten Resultate sind jeweils sofort auf dem Bildschirm abzulesen.

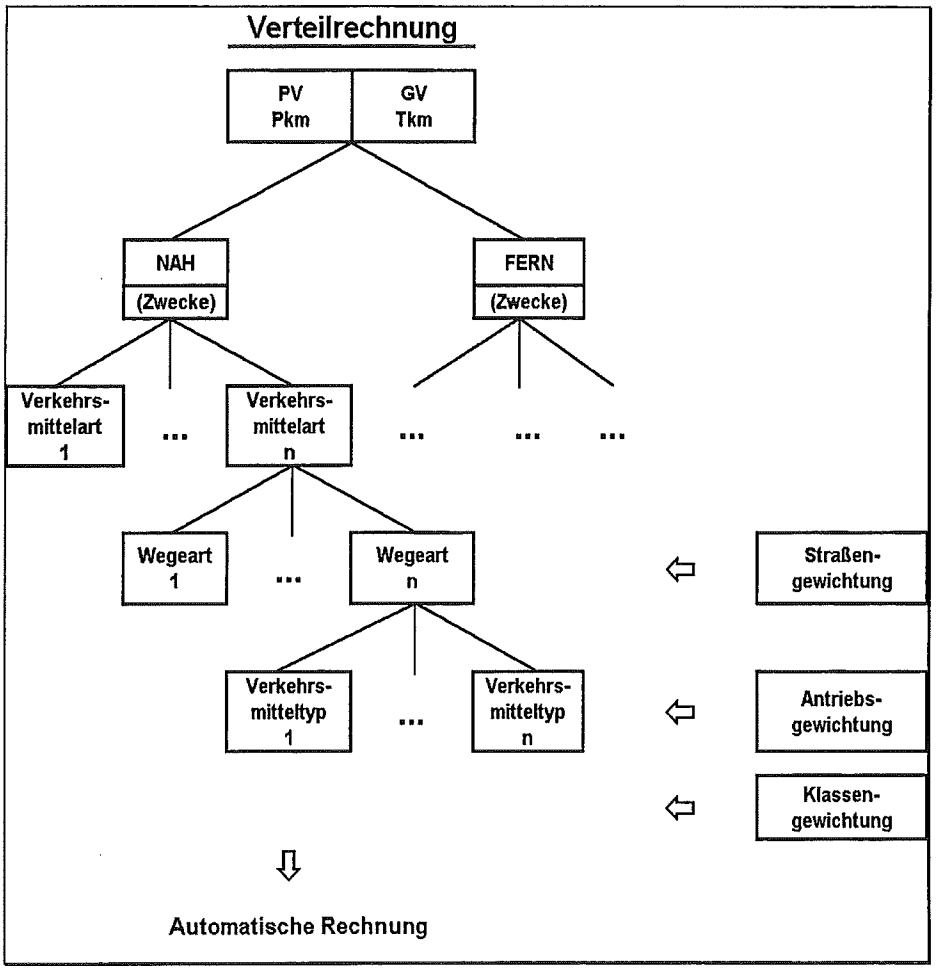


Abb. 1 Verteilungsrechnung im Verkehrsmodell

Die so generierte Verkehrsleistungsstruktur dient als Basis für die Durchführung der automatischen Ergebnisrechnung, die modulweise (z. B. Personenverkehr, nah, 1995, oder Güterverkehr, fern, 2005) unter Vorwahl eines Verkehrsmusters (energierelevanten Verhaltens), wie zum Beispiel freie Fahrt,

Stau, teilgebundener oder gebundener Verkehrsfluß, angestoßen werden kann. Die weitere Rechnung läuft sodann bis zur Ergebnisbereitstellung automatisch ab.

Folgende sequentielle Rechenschritte werden, wie in den **Abbildungen 2 und 3** dargestellt, während der automatischen Rechnung ausgeführt:

a) Verteilung der Personen- km/Tonnen- km je Verkehrsart, Wegeart, Typ auf den Antrieb a bzw. auf Antrieb b usw.
Hierbei dient als Verteilschlüssel die Relation der Anzahl der Fahrzeuge des Typs der jeweiligen Antriebsart zur Gesamtzahl dieses Typs für alle Antriebsarten. Über Gewichtungsfaktoren, die bei der Verteilrechnung voreingestellt werden, kann die Verteilung in Richtung auf bestimmte Antriebe verschoben werden. Die Fahrzeug-Zahlen werden automatisch aus den Bestandstabellen entnommen.

b) Verteilung der Pkm und Tkm auf Fahrzeugklassen entsprechend den Zulassunganteilen der Klassen bei den Verkehrsmitteltypen, die nach Klassen differenziert sind. Auch hier ist über Gewichtungsfaktoren die Verteilung beeinflußbar.

c) Verteilung der Personen-km und Tonnen-km auf die Straßenarten IO (Innerorts), AO (Außerorts), BAB (Autobahn) bei Straßenfahrzeugen gemäß Nutzervorgabe.

d) Durch Division der Verkehrsleistungen durch die Beladungs- bzw. Personenbesetzungszahl werden die Fahrleistungen differenziert nach Fahrzeugtyp, Klasse, Antrieb, Wege- und Straßenart errechnet.

e) Durch Ausmultiplikation der Fahrleistungen mit den spezifischen Daten des Verbrauchs und der Emissionen der jeweiligen Fahrzeuge werden Energie und Emissionen pro Fahrzeugart und Wegeart zum gewählten Verkehrsmuster errechnet.

f) Die Division der jeweiligen Fahrleistung, Verbräuche und Emission durch die zugehörige Fahrzeugzahl ergibt die jährliche Fahrleistung des Fahrzeugs, dessen jährlichen Verbrauch und Emissionen.

g) Die Fixkosten des Fahrzeugs pro Jahr geteilt durch die Jahresfahrleistung plus variable Kosten ergeben die Kosten pro km und Fahrzeug.

h) Division durch die Personenbesetzungszahl bzw. Beladungszahl ergibt die Kosten pro Pkm bzw. Tkm und Fahrzeug.

Alle Ergebnisse werden fahrzeugspezifisch unter dem gewählten Szenarionamen gespeichert.

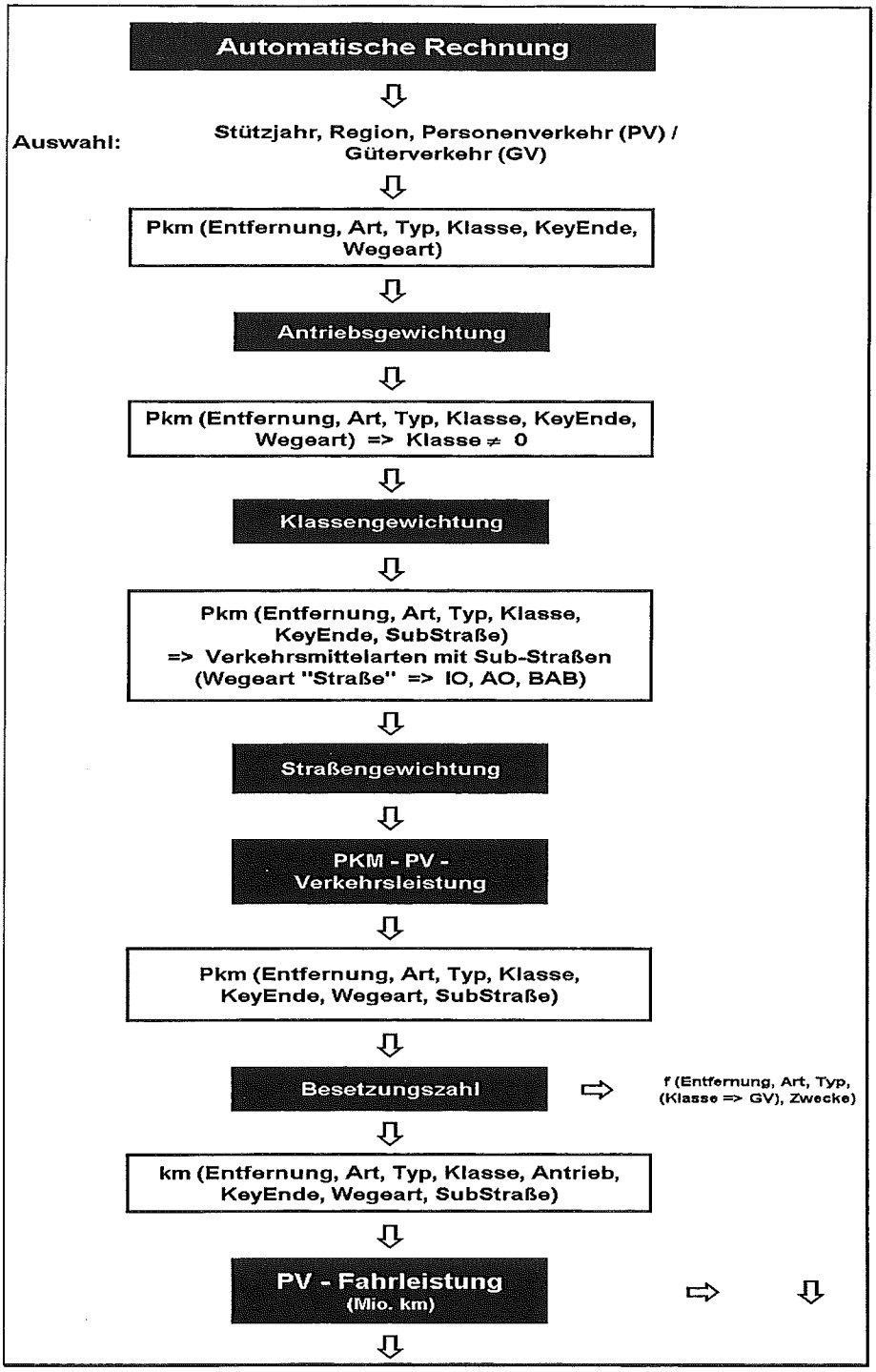


Abb. 2 **Ablauf der Ergebnisrechnung im Verkehrsmodell (1)**

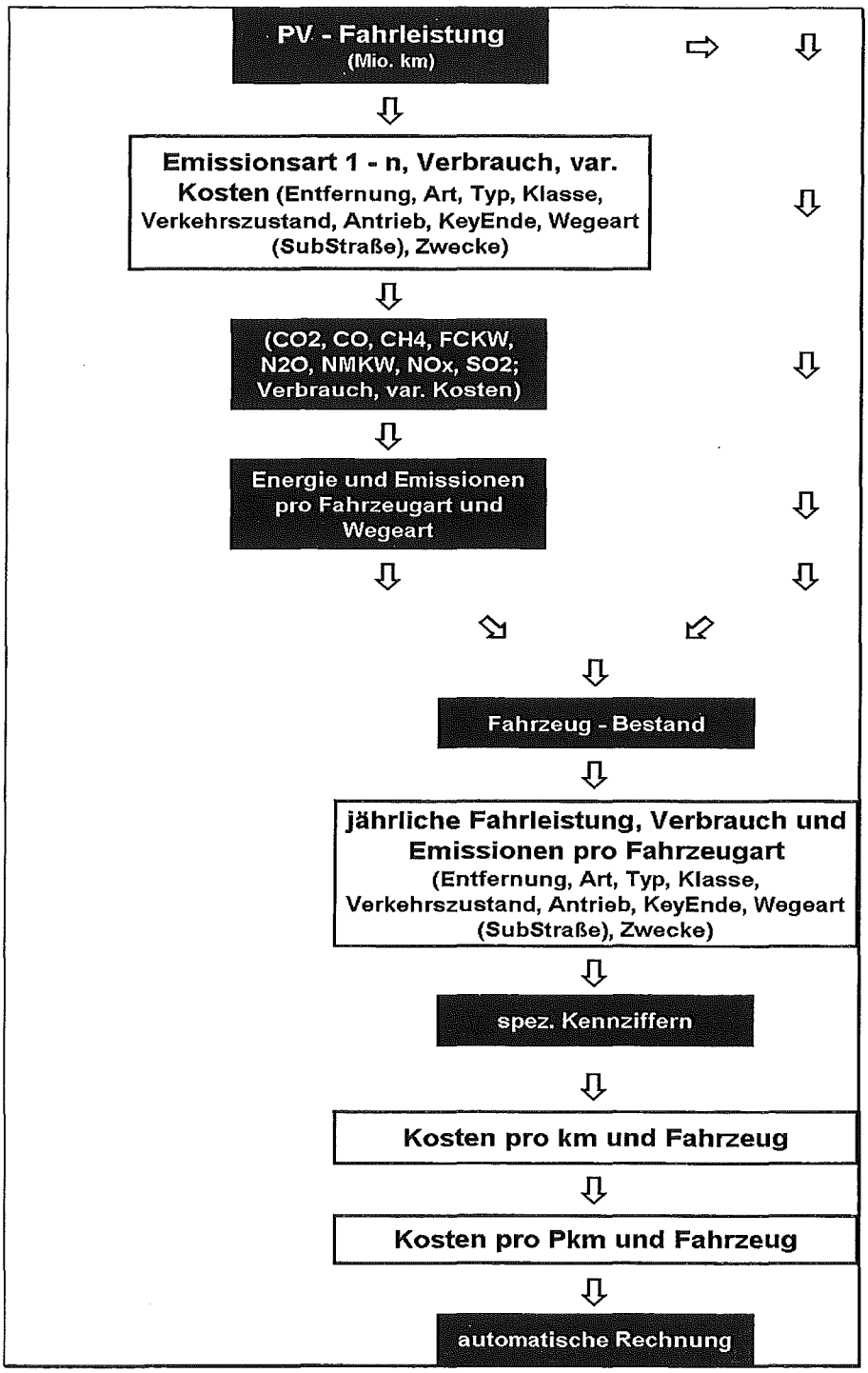


Abb. 3 **Ablauf der Ergebnisrechnung im Verkehrsmodell (2)**

3.3 Ergebnisse des Trendszenarios

Für das Trendszenario errechnen sich mit dem Teilmodell Verkehr die in den **Tabellen** 3 **bis 10** aggregiert aufgezeigten Emissionen und Energieverbräuche.

Trendszenario	Verbrauch Petajoule [PJ]		
Personenverkehr	1995	2005	2020
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	1.503	1.688	1.544
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	73	95	52
Bahn PV	26	28	37
Luft PV	30	102	72
Schiff PV	0	0	0
Σ	1.633	1.913	1.704

Tabelle 3: Energieverbrauch des Personenverkehrs im Trendszenario

CO_2 Emissionsentwicklung im Personenverkehr [kt]				% - Veränderung	
Jahr	1995	2005	2020	2005 zu 1995	2020 zu 2005
Nahverkehr:					
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	67.790,39	72.986,29	68.978,19	7,66	-5,49
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	3.246,25	4.915,39	2.126,93	51,42	-56,73
Bahn	294,48	128,70	123,11	-56,30	-4,35
Σ Nahverkehr:	71.331,12	78.030,38	71.228,23	9,39	-8,72
Fernverkehr:					
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	41.996,79	50.202,62	42.819,57	19,54	-14,71
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	1.352,66	1.547,48	979,25	14,40	-36,72
Bahn	481,95	101,65	55,95	-78,91	-44,96
Flugzeug (Inland)	2.228,24	7.458,96	5.000,16	234,75	-32,96
Σ Fernverkehr:	46.059,63	59.310,70	48.854,93	28,77	-17,63
Summe Fern- und Nahverkehr:	117.390,76	137.341,08	120.083,16	16,99	-12,57

Tabelle 4: CO_2 Emissionen des Personenverkehrs im Trendszenario

CO und NOx Emissionsentwicklung im Personenverkehr [kt]						
Jahr	1995	2005	2020	1995	2005	2020
	CO			Nox		
Nahverkehr:						
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	4.219,60	2.372,28	1.740,01	255,40	161,73	146,88
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	32,68	41,42	18,32	42,27	58,45	21,64
Bahn	0,94	0,38	0,33	4,15	1,70	1,46
Σ Nahverkehr:	4.253,22	2.414,08	1.758,67	301,82	221,89	169,98
Fernverkehr:						
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	1.943,17	1.198,25	787,98	254,99	159,54	132,87
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	6,62	6,57	3,85	16,55	16,86	9,15
Bahn	1,54	0,30	0,15	6,79	1,34	0,66
Flugzeug (Inland)	9,28	24,07	51,91	8,99	38,63	21,00
Σ Fernverkehr:	1.960,62	1.229,19	843,89	287,32	216,37	163,68
Summe Fern- und Nahverkehr:	6.213,84	3.643,26	2.602,56	589,14	438,26	333,66

Tabelle 5: Abgasemissionen – CO, NOx - des Personenverkehrs im Trendszenario

CH_4 und NMKW Emissionsentwicklung im Personenverkehr [kt]						
Jahr	1995	2005	2020	1995	2005	2020
	CH_4			NMKW		
Nahverkehr:						
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	44,68	39,87	34,52	488,32	244,50	191,88
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	0,36	0,45	0,19	6,74	7,65	3,06
Bahn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ Nahverkehr:	45,04	40,31	34,71	495,06	252,15	194,93
Fernverkehr:						
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	14,23	13,24	10,18	170,31	86,44	57,64
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	0,18	0,16	0,08	3,41	2,97	1,37
Bahn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flugzeug (Inland)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ Fernverkehr:	14,41	13,41	10,25	173,72	89,42	59,01
Summe Fern- und Nahverkehr:	59,45	53,72	44,96	668,77	341,56	253,94

Tabelle 6: Abgasemissionen – CH4, NMKW - des Personenverkehrs im Trendszenario

Trendszenario	Verbrauch Petajoule [PJ]		
Güterverkehr	1995	2005	2020
Bahn GV	18	17	19
Flugzeug GV	0	0	0
Schiff GV	27	24	32
LKW GV	740	968	1.066
sonstige Verkehrs-/Transportmittel	0	0	0
Land-/Bauwirtschaft,Militär,statist.Rest	0	0	0
Σ	786	1.009	1.116

Tabelle 7: Energieverbrauch des Güterverkehrs im Trendszenario

CO_2 Emissionsentwicklung im Güterverkehr [kt]				% - Veränderung	
Jahr	1995	2005	2020	2005 zu 1995	2020 zu 2005
Lkw-Verkehr	53.889	70.339	76.938	30,5	8,6
davon Nahverkehr	33.540	38.627	34.487	15,2	-12,0
davon Fernverkehr	20.349	31.712	42.451	55,8	25,3
Bahngüterverkehr	706	282	187	-60,0	-50,8
Binnenschiffsverkehr	1.984	1.719	2.313	-13,4	25,7
Σ	56.579	72.340	79.438	27,9	8,9

Tabelle 8: CO_2 Emissionen des Güterverkehrs im Trendszenario

CO und NOx Emissionsentwicklung im Güterverkehr [kt]						
Jahr	1995	2005	2020	1995	2005	2020
	CO			Nox		
Lkw-Verkehr	807,39	486,55	409,48	556,98	647,46	635,74
davon Nahverkehr	612,80	330,88	237,16	312,24	300,52	232,93
davon Fernverkehr	194,59	155,67	172,32	244,75	346,94	402,80
Bahngüterverkehr	2,26	0,83	0,50	9,94	3,73	2,22
Binnenschiffsverkehr	7,65	6,09	7,51	29,10	26,78	33,04
Σ	817,30	493,47	417,49	596,02	677,98	671,00

Tabelle 9: Abgasemissionen – CO, NOx - des Güterverkehrs im Trendszenario

CH_4 und NMKW Emissionsentwicklung im Güterverkehr [kt]						
Jahr	1995	2005	2020	1995	2005	2020
	CH_4			NMKW		
Lkw-Verkehr	9,77	9,36	7,24	176,79	142,91	103,72
davon Nahverkehr	7,45	6,68	4,65	133,51	95,34	58,86
davon Fernverkehr	2,31	2,67	2,59	43,28	47,58	44,86
Bahngüterverkehr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Binnenschiffsverkehr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ	9,77	9,36	7,24	176,79	142,91	103,72

Tabelle 10: Abgasemissionen – CH4, NMKW - des Güterverkehrs im Trendszenario

Wie man den Tabellen entnehmen kann, gibt es zum Teil gegenläufige Trends bei den Ergebnissen:

Energieverbrauch und CO_2-Emissionen steigen gemäß den Tabellen 3, 4 und 7, 8 bis zum Jahr 2005 mit unterschiedlichen Zuwachsraten je Verkehrsart. Wenn auch der Motorisierte Individualverkehr noch recht moderate Steigerungsraten bei Verbrauch und CO_2-Emissionen aufweist, sind doch die absoluten Steigerungen aufgrund des hohen Ausgangsniveaus beträchtlich. Allerdings erreicht der Straßengüterverkehr bei niedrigerem Ausgangsniveau ähnliche absolute Zuwächse, was auf das starke Wachstum der Güterverkehrsleistung auf der Straße zurückzuführen ist.

Der Inlandsflugverkehr ist trotz seiner hohen Zuwachsraten nicht so auffällig, da er ein geringeres Aufkommen hat. Insbesondere bei den schienengebundenen Verkehren sind zwar im Energieverbrauch, nicht aber bei den Emissionen, zum steigenden Verkehrsaufkommen parallele Zuwächse zu beobachten. Dies liegt daran, daß der Zuwachs im Schienenverkehr hauptsächlich durch Fahrzeuge in Elektrotraktion bewältigt wird. Hier sind aber nur die Emissionen im Verkehrssektor aufgeführt und nicht die indirekten Emissionen, die bei der Stromerzeugung entstehen.

Allen Verkehrsarten ist gemeinsam, daß die CO_2-Emissionen und Energieverbräuche langsamer steigen als die Nachfrage nach Verkehrsleistungen. Dies liegt daran, daß in Zukunft aufgrund des

technischen Fortschritts immer mehr energieeffizientere Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Leider reicht der Fortschritt in der Technik nicht aus, um die im wesentlichen durch den Nachfragezuwachs bis 2005 verursachten Zuwächse zu kompensieren.

Dies gelingt im Personenverkehr im Zeitraum 2005 bis 2020. Das geringere Wachstum der Verkehrsleistung kann überkompensiert werden, so daß im Ergebnis Verbrauch und CO_2 Emissionen unter das Niveau von 2005 sinken, jedoch leider nicht das von 1995 erreichen.

Im Güterverkehr ist der Trend nach 2005 noch nicht gebrochen, da dort der Zuwachs in der Verkehrsleistung höher liegt als beim Personenverkehr.

Ein eindeutigeres Bild zeigt sich bei der Entwicklung der Abgasemissionen, wie man den Tabellen 4 bis 6 und 8 bis 10 entnehmen kann. Dort sind im Personen- und auch im Güternahverkehr deutliche Rückgänge aufgrund des technischen Fortschritts zu erkennen, die zumindest im Hinblick auf die Klimagasproblematik nicht unbedingt noch weiteren Handlungsbedarf erkennen lassen. Lediglich die Abgasentwicklung im Güterfernverkehr ist noch unbefriedigend aufgrund der hohen Steigerungsraten in diesem Segment. Jedoch sinkt die Summe der Abgase im Personen- und Güterverkehr, wegen der positiven Entwicklung im Personen- und im Güternahverkehr.

3.4 Verkehrsverlagerung und Technikvariation als Maßnahmenszenarien

Die Trendergebnisse und die Kenntnis der wesentlichen Einflußgrößen bilden die Grundlage für Maßnahmenpläne, deren Ergebnisse mögliche Entwicklungen aus einer Fülle denkbarer Verläufe beschreiben.

Szenarien sind keine Prophezeiungen; sie können als Wegbeschreibungen verstanden werden hin zu einer sich unter den gewählten Randbedingungen möglicherweise ändernden Welt. Szenarien können als Denkschulung gesehen werden, die uns hilft, Verhaltensmuster zu verstehen, Veränderungsaspekte zu adaptieren und somit die zukünftige Umwelt besser zu begreifen. Szenarien helfen uns, Auswirkungen von Strategien zu testen, Lösungsvorschläge besser zu begründen. Sie sind ein unumgängliches Hilfsmittel für Entscheidungsträger.

Im Sinne der angesprochenen "Denkschulung" seien im folgenden zwei Szenarien aufgezeigt, die als Beispiel für zwei sich unterscheidende Konzepte zur Emissionsminderung stehen: Ein eher ordnungspolitisch orientierter Ansatz und ein eher technikorientierter Ansatz.

Gerade vor dem Anspruch des Szenarios, keine Prophezeiung zu sein, ist es in der Szenariotechnik üblich, durchaus große Veränderungen, die über ein in der Zeit realistischerweise erreichbares Ziel hinausgehen, anzunehmen. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, daß die durch die angenommenen Veränderungen induzierten Auswirkungen quantitativ größer ausfallen und somit im Vergleich zum Trend- bzw. Basisszenario deutlicher werden.

Stellt sich im Verlauf mehrerer solcher "Orientierungsrechnungen" eine angenommene Veränderung als besonders wirkungsvoll heraus, kann sie in ein modifiziertes Trendszenario mit kleineren Veränderungen als Handlungsalternative aufgenommen werden.

In so weit sind die hier vorgestellten Szenarios Orientierungsrechnungen, die nicht im Hinblick auf einen bestimmten Zeitraum auf Realisierbarkeit geprüft wurden.

Da sich bereits im Trendszenario mit Ausnahme der CO_2 Emissionen alle anderen Emissionen in der Summe stark verringern, werden die beiden Maßnahmenszenarien nur im Hinblick auf die auf resultierende CO_2 Minderung vorgestellt.

3.5 Verkehrsverlagerung auf öffentliche Verkehrsträger

Im Verlagerungsszenario wird unterstellt, daß motorisierter Individualverkehr - durch entsprechende Maßnahmen, wie z.B. Roadpricing, Sperrung von Innenstadtbereichen o.ä., zum öffentlichen Nahverkehr und im Fernverkehr zur Bahn abwandert, sowie daß mehr Wege zu Fuß und mit dem Fahrrad zurückgelegt werden. Weiterhin wird unterstellt, daß LKW Verkehr zur Bahn abwandert. Die erforderlichen Infrastrukturerweiterungen für die gebundenen Verkehre seien realisiert, so daß am Beispiel der Verkehrsleistungen des Jahres 2005 eine Erhöhung der Verkehrsleistung

- im öffentlichen Nahverkehr (inklusive Bahn) um rund 43 % und

- im Verkehr zu Fuß und mit dem Fahrrad um rund 24 %,

- im Bahn- und Busfernverkehr um rund 26 % sowie

- beim Bahngüterverkehr um 24 % und

- beim Binnenschiffsgüterverkehr um 8 %

unterstellt wird.

Der Motorisierte Individualverkehr und der Straßengüterverkehr verringern sich entsprechend. Errechnet man unter diesen Randbedingungen erneut die CO_2- Emissionen, erhält man die in **Tabelle 11** ausgewiesenen Werte, in die zum Vergleich die Werte des Trendszenarios mit aufgenommen wurden.

Szenariovergleich: "CO_2 Emissionsentwicklung im Personen- und Güterverkehr" [kt]			% - Veränderung
Szenario	2005 Trendszenario	2005 Modal Split	2005 Modal Split zu 2005 Trendszenario
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	123.188,91	114.839,88	-6,78
davon Nahverkehr	72.986,29	67.147,39	-8,00
davon Fernverkehr	50.202,62	47.692,49	-5,00
Lkw Güterverkehr	70.339,32	66.850,96	-4,96
davon Nahverkehr	38.626,93	38.626,93	0,00
davon Fernverkehr	31.712,39	28.224,02	-11,00
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	6.462,87	8.583,77	32,82
Bahn	230,35	327,70	42,26
Bahngüterverkehr	282,02	352,52	25,00
Binnenschiffsverkehr	1.719,12	1.856,65	8,00
Flugzeug (Inland)	7.458,96	7.458,96	0,00
Σ	209.681,54	200.270,43	-4,49

Tabelle 11: CO_2 - Emissionen des Personen- und des Güterverkehrs im Verkehrsverlagerungsszenario im Vergleich zum Trendszenario im Jahr 2005

Der Tabelle 11 kann man entnehmen, daß die so erreichte Emissionsminderung im Verkehr unter 5 % liegt. Dies erscheint bei den doch deutlichen Ausweitungen der Verkehrsleistungen der öffentlichen Verkehre und des Fahrrad- und Fußgängerverkehrs sehr niedrig.

Das Ergebnis wird aber sofort plausibel, wenn man bedenkt, daß die angenommenen Verkehrsverlagerungen nur eine Verringerung von ca. 7 % der Verkehrsleistung des Individualverkehrs und von ca. 8 % des Straßengüterverkehrs bewirken.

Berücksichtigt man, daß die unterstellte Verkehrsverlagerung nicht unerhebliche Investitionen in die Infrastruktur von Bahn und Bus erfordern würde, stellt sich die Frage, ob es nicht leichter ist, ein quantitativ ähnliches Ergebnis zu erreichen, wenn man die Verkehrsemissionen an der Quelle, das heißt bei den Fahrzeugen, verringert.

Dies soll im technikorientierten Szenario im folgenden Abschnitt untersucht werden.

3.6 Technikszenario: Verstärkter Einsatz sparsamer Straßenfahrzeuge

Am Beispiel des Jahres 2020 wird im Technikszenario die Einführung sparsamerer Fahrzeuge über das bereits unterstellte Maß hinaus unterstellt.

Im Trendszenario ist bereits unterstellt, daß z. B. im Jahr 2020

15 % der PKW und

19 % der Lkw

über den unterstellten Trend hinaus besonders sparsam sind.

Zusätzlich sei im hier untersuchten Technikszenario unterstellt, daß 50% der verbliebenen moderneren Fahrzeuge (Alter < 5 Jahre), im Lauf der Jahre bei der jeweiligen Substitution des Altbestandes durch im Verbrauch um 25% günstigere Fahrzeuge ersetzt worden wären.

Das würde bedeuten daß z. B. anstelle eines bisherigen Benzin Pkw -kleine Hubraumklasse- mit einem Verbrauch von 6,6 l/100km ein Pkw mit 5 l/100km im Drittelmix Einsatz Innerorts, Außerorts, Autobahn den Flottendurchscnitt für den moderneren Fahrzeugpark repräsentieren würde. Dieser Wert ist auch nach Aussage der Fahrzeughersteller für das Jahr 2020 nicht unrealistisch in dieser Fahrzeugklasse als Bestandsdurchschnitt.

Die **Tabelle 12** zeigt die erreichten CO_2-Emissionswerte im Vergleich zum Trendszenario.

Szenarienvergleich: "CO_2-Emissionsentwicklung im Personen- und Güterverkehr" [kt]			% - Veränderung
Szenario	2020 Trendszenario	2020 Technikszenario	2020 Technikszenario zu 2020 Trendszenario
Straße MIV und Lkw:	188.735,98	169.808,53	-10,03
MIV (motorisierter Individual Verkehr)	111.797,77	100.285,12	-10,30
LKW Verkehr	76.938,21	69.523,41	-9,64
ÖSPV (öffentlicher Straßen-Personen-Verkehr)	3.106,18	2.839,65	-8,58
Bahn	179,05	179,05	0,00
Bahngüterverkehr	187,00	187,00	0,00
Binnenschiffsverkehr	2.312,91	2.312,91	0,00
Flugzeug (Inland)	5.000,16	5.000,16	0,00
Flugzeug GV (Inland)	0,00	0,00	0,00
Σ	199.521,28	180.327,30	-9,62

Tabelle 12: CO_2-Emissionen im Technikszenario im Vergleich zum Trendszenario im Jahr 2020

Der Vergleich der Werte im Tabelle 12 zeigt, daß mit der unterstellten Annahme immerhin eine Reduktion der Emissionen um 9 % erreicht wurde.

Im Vergleich zum Verlagerungsszenario erscheint diese Reduktion mit geringerem Aufwand erreichbar, insbesondere wenn man bedenkt, daß die unterstellte Verbrauchsreduktion nicht in allen Fällen mit Mehrkosten verbunden ist, da hier auch eine Verbrauchsreduktion im Rahmen der Bestandserneuerung durch den Kauf von Fahrzeugen kleinerer Hubraumklassen bewerkstelligt werden kann. Die damit eventuell verbundenen Qualitätsverschlechterungen in der Mobilität werden vom Verkehrsteilnehmer i.A. sicher geringer eingestuft als die mit dem Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel verbundenen

4. Fazit

Die Verkehrsleistungen sind in der Vergangenheit von Jahr zu Jahr gestiegen, und es ist davon auszugehen, daß sie auch in Zukunft – insbesondere im Güterverkehr – weiter steigen. In der Vergangenheit war dieser Anstieg, neben anderen Beeinträchtigungen, auch mit einem Anstieg des CO_2 und anderer Abgase verbunden.

Dies führte dazu, daß man den Verkehr mit steigender Sorge betrachtete und über Maßnahmen nachdenkt, die negativen Begleiterscheinungen zumindest zu vermindern.

Hier sind durchaus Erfolge vorzuweisen, wie dies auch das Trendszenario aufzeigt. So sinken trotz des Verkehrsanstiegs die Abgasemissionen. Davon ist auch in Zukunft auszugehen.

Bei Energieverbrauch und CO_2 Emissionen ist jedoch, wie die Zahlen des Trendszenarios für das Jahr 2005 zeigen, mittelfristig mit einem weiteren Anstieg zu rechnen. Langfristig besteht aber auch hier die Chance einer Trendumkehr, wie man am Beispiel der Werte des Personenverkehrs für das Jahr 2020 erkennt.

Weitere Verbesserungen sind durch eine schnellere Marktdurchdringung mit modernen effizienteren Fahrzeugen möglich, wie es das technikorientierte Szenario am Beispiel des Jahres 2020 zeigt.

Verkehrslenkende Maßnahmen, wie z.B. die Verlagerung von Verkehr auf Bus und Bahn sowie zu Fuß und Fahradverkehr, werden in ihrer Wirkung oft überschätzt. Drastische Ausweitungen dieser Verkehre vermindern den motorisierten Individual- und Güterverkehr nur geringfügig und führen daher auch nur zu relativ bescheidenen Verbesserungen der Verbrauchs- und Energiebilanz.

Um Auswirkungen möglicher Maßnahmen deutlich zu machen, ist die Szenariotechnik ein wirkungsvolles Instrument. Sie ist daher insbesondere für Entscheidungsträger eine wertvolle Hilfe. Die von TÜV und STE im Rahmen des IKARUS Projektes erstellten Werkzeuge erleichtern die Gestaltung von Szenarien und erlauben somit, noch leichter Entscheidungshilfen bereitzustellen.

Es konnte gezeigt werden, daß mit dem vorgestellten IKARUS Teilmodell Verkehr detaillierte Analysen des Verkehrs im Hinblick auf die mit dem Verkehr verbundenen Emissionen möglich sind.

Vergleichende Gesamtbetrachtung von Pkw-Antrieben und Kraftstoffketten

Bernd Höhlein

Institut für Energieverfahrenstechnik (IEV)

Forschungszentrum Jülich

Kurzfassung

Auf dem globalen Automobilmarkt werden die technischen Entwicklungen auch durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen bestimmt, wobei die LEV-Gesetzgebung in Kalifornien eine herausragende Rolle spielt. In Zukunft werden Fahrzeuge mit geringem spezifischen Kraftstoffverbrauch und geringen spezifischen Emissionen auch Brennstoffzellen (PEFC) als Antriebskomponenten aufweisen, wobei Wasserstoff, Methanol oder Benzin/Diesel die Energieträger sein könnten. Im Fall von Methanol oder Benzin/Diesel als Energieträger im Tank müßte eine An-Bord Wasserstofferzeugung mit Reformer, Katalytkonverter und Gasnachbehandlung vorhanden sein. Bei Methanol könnte auch eine Direktbeaufschlagung der Brennstoffzelle (PEFC) erfolgen. Die für diese Systeme bis heute erreichten Fortschritte unterscheiden sich wesentlich. Auf der Basis der vorliegenden Labor- und Demonstrationsergebnisse mit Prototypen stehen heute Kosten- und Gewichtsreduktion bei optimierten Antriebsmanagement der Fahrzeugantriebe mit PEFC im Vordergrund. Gleichzeitig müssen Fragen des Kraftstoffmanagements, der Materialbilanzen und der Umweltansprüche diskutiert werden.

Auf der Basis von eigenen Verfahrensanalysen für die Nettostromerzeugung in Antrieben mit PEFC und Annahmen für den elektrischen Antrieb der in Zukunft zu konfigurierenden Pkw werden Bilanzen für den spezifischen Energieverbrauch und die Emissionen nicht nur für den Pkw, sondern auch für die vorgelagerten Kraftstoffketten im Vergleich zwischen Pkw mit Verbrennungsmotoren und elektrische betriebenen Pkw mit PEFC vorgestellt. In Abhängigkeit vom Stand der Technik heute und vielleicht erreichbar in 2010 weist der PEFC betriebene Pkw gegenüber dem konventionellen Pkw geringe Vorteile mit Bezug auf den spezifischen Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen und sehr große Vorteile bei den limitierten Emissionen in der lokalen Bilanzierung auf.

Abstract

Legal regulations, especially the LEV laws in California, are the driving force for more intensive technological developments with respect to a global automobile market. In the future, high efficient vehicles at very low emission levels will include low-temperature fuel-cell systems (PEFC) as units of hydrogen-, methanol- or gasoline-based electric power trains. In the case of methanol or gasoline/Diesel, hydrogen has to be produced on-board using heated steam or partial oxidation reformers as well as catalytic burners and gas cleaning units. Methanol could also be used directly for electricity generation inside the fuel cell. The development potentials and the results achieved so far for these concepts differ extremely. Based on the experience gained so far, the goals for the next few years include cost and weight reductions as well as optimizations in terms of the energy management of power trains with PEFC systems. At the same time, questions of fuel specification, fuel cycle management, material balances and environmental assessment will have to be discussed.

Based on process engineering analyses for net electricity generation in PEFC-powered power trains as well as on assumptions for both electric power trains and vehicle configurations, overall balances will present not only specific energy consumption data and emission levels (CO_2, CO, VOC, NO_x) for the vehicle but also its full fuel cycle (FFC) in comparison to FFC including internal combustion engines (ICE) after the year 2005. Depending on the development status (today or in 2010) and the FFC benchmark results, the advantages of FFC with PEFC vehicles are small in terms of specific energy consumption and CO_2 emissions, but very high with respect to local emission levels.

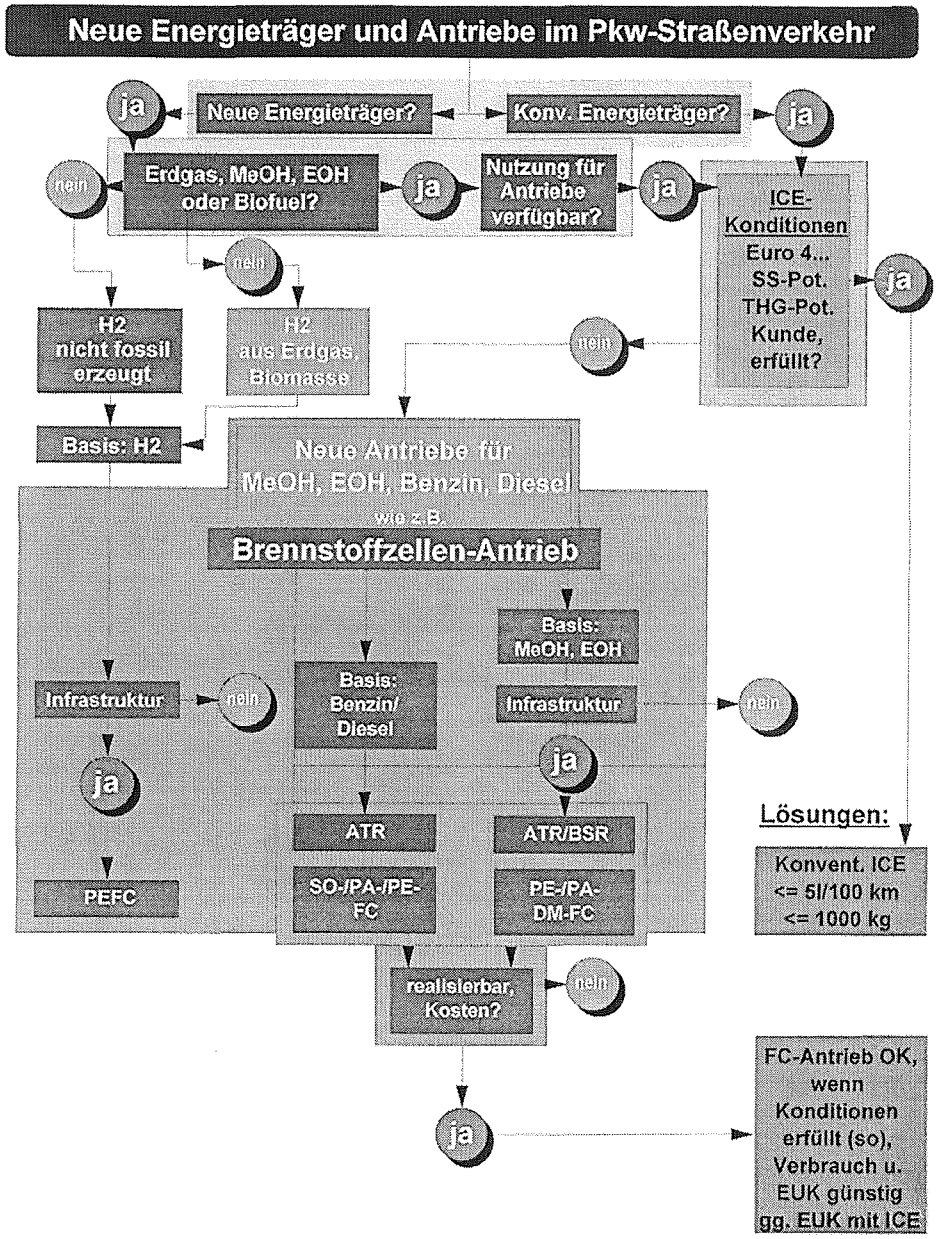
1. Einleitung

Weltweit werden bei Einsatz von Entwicklungsarbeiten, Teststand- und Prototyptests sowie Verfahrens- und Systemanalysen Anstrengungen unternommen, Energieumwandlungssysteme für Antriebe des Straßenverkehrs zu verbessern; dies geschieht auch unter Einbeziehung anderer Sekundärenergieträger als Benzin und Diesel im Tank der Fahrzeuge. Die verschiedenen Lösungsansätze dienen insgesamt der Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs der Fahrzeuge und der Kraftstoffbereitstellung wie auch der Minimierung der spezifischen Fahrzeug- und Kraftstoffketten-Emissionen. Bei den Emissionen ist von zusätzlicher Bedeutung, auch die Qualität (d.h. die Zusammensetzung) der Kohlenwasserstoff-Emissionen im Sinne einer Minimierung der Sekundärschadstoffe - wie Ozon - zu verändern (HÖHLEIN/BIEDERMANN 1996).

Bei der Entwicklung von Pkw der „Zukunft" stehen heute die konventionellen Pkw-Antriebe im Vordergrund. Doch bei den neuartigen Antrieben mit - gegenüber konventionellen Antrieben mit Verbrennungskraftmaschinen - niedrigen spezifischen Energieverbräuchen und Emissionen stellen Elektroantriebe mit Brennstoffzellen-systemen sicherlich eine große Herausforderung dar. Die vorliegende Analyse (HÖHLEIN et al. 1998) derartiger Elektroantriebe und der Vergleich mit zukünftigen konventionellen Antrieben mit Verbrennungskraftmaschinen kann Aufschluß über die Optionen neuartiger Antriebe mit Brennstoffzellensystemen für die Pkw der Zukunft geben.

2. Neue Energieträger und Antriebe im Straßenverkehr

Wenn fortgeschrittene Antriebssysteme mit Verbrennungskraftmaschinen auf Basis konventioneller Kraftstoffe die zukünftigen Emissions- beziehungsweise Energiebedarfsvorschriften erfüllen werden und langfristig weltweit betrachtet bei insgesamt steigender Mobilität, Benzin und Diesel ausreichend zur Verfügung stehen werden, dann wird man an diesen „konventionellen" Systemen für den Massenmarkt der Pkw festhalten. Doch da eher davon auszugehen ist, daß nicht alle diese Randbedingungen gleichzeitig erfüllt werden können (z.B. LEV-Gesetzgebung in Kalifornien), besteht schon heute die Notwendigkeit, sich mit der kurz-, mittel- und langfristigen Einführung neuer Antriebssysteme und Energieträger in den globalen Pkw-Massenmarkt der Zukunft auseinanderzusetzen (Abb. 1).

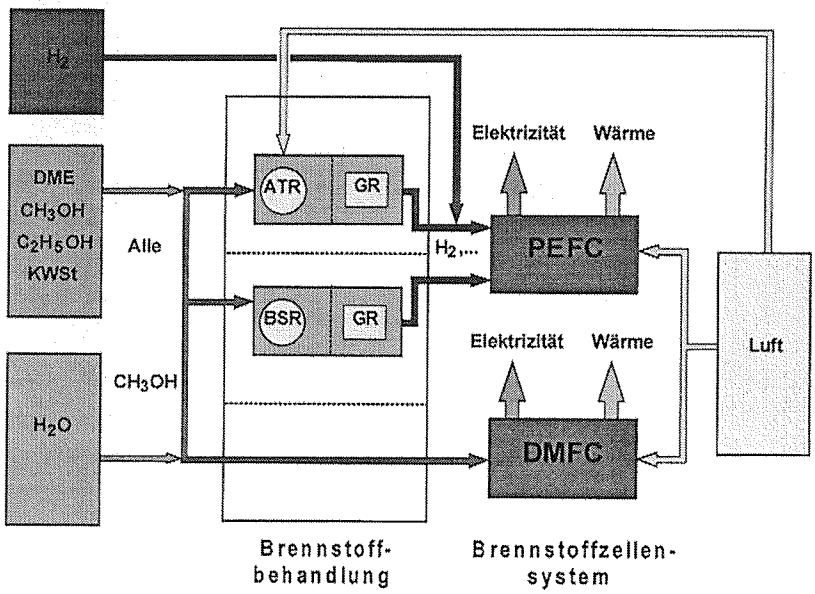


PEFC	Polymermembran BZ	BSR	Beheizter (*Steam*) Reformer	ICE	Verbrennungskraftmaschine
PAFC	Phosphorsäure BZ	THG-Pot	Treibhausgas-Potential Anforderung	EUK	Energieumwandlungskette
SOFC	*Solid Oxid* BZ			DM	Direkt Methanol
ATR	Autothermer (*Steam*-)Reformer	SS-Pot	Sekundärschadstoff-Potential (O3) Anforderung	FC	Brennstoffzellensystem (BZ)

Abb. 1: Neue Energieträger und Antriebe im Pkw-Straßenverkehr

3. Stand der Kenntnisse

Weltweite Projekte zu Brennstoffzellenantrieben insbesondere in Europa (F, D, NL, I, S, CH), USA und Japan lassen erkennen, daß der Entwicklungsstand der dargestellten Lösungsansätze mit verschiedenen Energieträgern und Brennstoffzellen als Energiewandler in einem Elektroantrieb sehr unterschiedlich ist. Große Anstrengungen der Effizienz- und Emissionsverbesserung von Fahrzeugen konzentrieren sich heute auf die konventionellen Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen für Diesel und Benzin als konventionelle und für Erdgas oder Biokraftstoffe als neue Energieträger; daneben entwickeln fast alle Automobilhersteller Fahrzeuge mit Elektroantrieb und Batterie als Energiespeicher und -wandler. Als neue Antriebe sind weltweit Brennstoffzellen und Elektromotor im Fokus der heutigen Entwicklung, wobei je nach Verwendung der in der Diskussion befindlichen Kraftstoffe diese direkt oder indirekt dem Brennstoffzellensystem als Energieträger zugeführt werden.



ATR: Autothermer Reformer, BSR: Beheizter Reformer
GR: Gas Reinigung; PEFC: *Polymer Electrolyte Fuel Cell*
DMFC: *Direct Methanol Fuel Cell,* KWSt: Kohlenwasserstoffe

Abb. 2: Verschiedene Energieträger für Brennstoffzellensysteme

Aus den in der Fachliteratur verfügbaren Projektberichten lassen sich zur Zeit sieben unterschiedliche für einen Vergleich auf der Basis des heutigen Kenntnisstandes heranzuziehende Energieumwandlungsketten (EUK) einschließlich Kraftstoffkette und Fahrzeugbetrieb beschreiben.

1	Rohöl: Raffinerie - Ottokraftstoff	Verbrennungsmotor
2	Rohöl: Raffinerie - Dieselkraftstoff	Verbrennungsmotor
3	Erdgas: Verdichtung oder Verflüssigung	Verbrennungsmotor
4	Erdgas: Reformer - H_2 - Verdichtung	PEFC - E-Motor
5	Erdgas: Reformer - MeOH - Synthese	Reformer - PEFC - E-Motor
6	Erdgas: Reformer - MeOH - Synthese	DMFC - E-Motor
7	Rohöl: Raffinerie - Benzin	Reformer - PEFC - E-Motor

Tabelle 1: Energieumwandlungsketten (EUK)

Der weltweite Fortschritt bei mit Wasserstoff betriebenen PEFC und die bereits entwickelten Antriebssysteme und Prototypen mit Wasserstoffdruckgasspeicher, PEFC und E-Motor (BALLARD 1996, FRIEDRICH et al. 1998, NOREIKAT et al. 1997, EU-JOULE Programme) erlauben hier, die Energieumwandlungskette EUK 4 mit einer heute realisierbaren Wasserstofferzeugung auf der Basis von Erdgas und angenommener Infrastruktur in den Vergleich mit zukünftigen konventionellen EUK (1, 2 und 3) mit aufzunehmen. Für die EUK 5 mit Methanol (auf der Basis von Erdgas) im Tank, einer bordeigenen Wasserstofferzeugung mittels Reformierung, PEFC und E-Motor gibt es weltweit zahlreiche Projekte (DOE/PNGV -USA Programme, EU-JOULE Programme), Arbeiten des Forschungszentrums Jülich zur bordeigenen Wasserstofferzeugung und zur PEFC (EMONTS et al. 1997, DIVISEK et al. 1998) sowie erste Pkw-Prototypen bzw. -Konzepte (DAIMLER-BENZ 1997, TOYOTA 1997, OPEL 1998). Für ein solches System wäre die Einführung einer neuen Infrastruktur für Methanol als Sekundärenergieträger erforderlich. Die Ergebnisse der technischen Arbeiten zu den Komponenten des Systems werden in vergleichenden Analysen ergänzt durch Studien mit eigenen Verfahrensanalysen (MENZER/HÖHLEIN 1997), ESPINO/ROBBINS 1997, BUCHHEIM/QUISSEK 1996 und HÖHLEIN/BIEDERMANN 1996.

Die EUK 6 basiert beim heutigen Stand nur auf Entwicklungsarbeiten zur direkten Nutzung von Methanol in einem DMFC-System ohne Wasserstofferzeugung in Reformern (GOTTESFELD et al. 1996, GROSSE/WAIDHAS 1998). In der EUK 7 wird ein Lösungsansatz vorgestellt, an Bord des Fahrzeugs aus Benzin ein wasserstoffreiches Brenngas für eine PEFC zu erzeugen. Diese neue Variante von möglichen Brennstoffzellenantrieben wird in der Literatur bisher nur in Form von Verfahrensanalysen oder ersten Benzinreformer-Ergebnissen dargestellt. (MENZER et al. 1997, MENZER/HÖHLEIN 1998, ESPINO/ROBBINS 1997, MITCHELL 1997 und BENTLEY et al. 1997).

Im Forschungszentrums Jülich (FZJ) wurden hierzu in Sachbilanzen mit Hilfe des EUK-Bilanzierungsprogramms „KRAKE“ (u.a. KRATZEL 1996, KOCH 1997, HÖHLEIN/BIEDERMANN 1996/1998) vergleichende Analysen für Energieumwandlungsketten des Straßenverkehrs für Pkw bezüglich folgender Kriterien untersucht: spezifischer Primärenergie-/Pkw-Energiebedarf, spezifische Kraftstoffketten-/Pkw-Emissionen sowie Sekundärschadstoffpotentiale. Dabei sind verfahrensanalytische Betrachtungen für die Antriebe unter Einbeziehung experimenteller Ergebnisse und Daten aus der Literatur - auch zu den Kraftstoffketten - wesentliche Voraussetzungen.

4. Definition der Referenzsysteme: Antriebsvarianten und Energieträger

Diese Analyse betrifft die Definition der Antriebsvarianten für Pkw bezüglich der Energieumwandlungssysteme und wird ergänzt durch Angaben zu den Fahrzeug-spezifiaktionen (Berechnung Energieverbrauch am Rad im neuen europäischen Fahrzyklus - NEFZ) und zu den spezifischen Emissionspotentialen (limitierte Emissionen (CO, NOx und VOC)). Insgesamt ergibt sich aus der Darstellung eine *Worst/Best Case* - Bewertung mit einer eher konservativen (*Worst*) und einer optimistischen Annahme (*Best*) für die vorgeschlagenen Antriebsvarianten basierend auf heute vorliegenden ausgewählten Verfahrensanalysen, technischen Daten aus der Literatur sowie Annahmen beziehungsweise Arbeitshypothesen oder Arbeitszielen. Die aus diesen Daten abzuleitenden absoluten, spezifischen Energieverbräuche (pro 100 km) für Pkw im neuen europäischen Fahrzyklus müssen dann noch mit den Energieverbrauchs- und Emissionsdaten für die Kraftstoffkette - von der Primärenergieförderungförderung bis zur Tankstelle - der jeweils eingesetzten Energieträger verknüpft werden, um eine ganzheitliche Bewertung vornehmen zu können.

4.1 Allgemeine Anforderungen an Pkw

Die Anforderungen an Pkw der Zukunft, d.h. bis 2005 und danach, die hier betrachtet werden sollen, lassen sich wie folgt beschreiben:

Pkw - Antrieb der Zukunft

Kunde

- •• Niedrig: Invest- und Betriebskosten
- •• Hoch: Fahrkomfort + Sicherheit

Gesellschaft

- •• Niedrig: Energieverbrauch
- •• Niedrig: Umweltbelastung
  - ••• Treibhausgase (CO_2, O_3, ...)
  - ••• Lim. Emissionen (CO, NO_x, VOC, PM)
- •• Verfügbarkeit: Kraftstoffe + Material
- •• Lebenszyklusanalyse

Hersteller

- •• siehe: Kunde und Gesellschaft
- •• Weltweiter Markt

Die in der vorliegenden Analyse als Referenzfahrzeuge dienenden Pkw mit Verbrennungsmotor und Benzin oder Diesel als Energieträger werden ständig verbessert, aber auch zunehmend herausgefordert - unter vergleichbaren Anforderungen - durch Pkw mit Verbrennungsmotor und Erdgas im Tank, Elektrofahrzeuge mit Batterie oder Brennstoffzellen als Energiewandler oder Fahrzeuge mit Hybridantrieb. Da Elektrofahrzeuge mit Batterie heutigen Reichweitenanforderungen für ein nicht nur in der Stadt zu nutzendes Fahrzeug nicht genügen, werden sie hier nicht mitdiskutiert. Auch Hybridfahrzeuge als Kombination von Verbrennungsmotor/E-Antrieb mit Batterie oder E-Antrieb mit Brennstoffzelle und einem zweiten Energiespeicher sollen hier nicht analysiert werden, was nicht einer negativen Bewertung gleichkommen soll.

4.2 Anforderungen an Brennstoffzellenantriebe

Für die gegenüber den konventionellen Pkw hier zu analysierenden Pkw mit Brennstoffzellen auf der Basis verschiedener Energieträger wie Wasserstoff, Methanol oder Benzin/Diesel (auch andere Energieträger wie Ethanol, Dimethylether oder verschiedene Rohölfraktionen sind denkbar) gelten die unten genannten Herausforderungen.

Herausforderung an Pkw-Antriebe mit PEFC

•• Niedrige Kosten	(< 100 DM / kW_{el})
•• Niedrig: Leistungsgew. / vol.	(< 6 kg / kW_{el})
•• Effizientes Energiemanagement	(p, λ, U (i), ..)
•• Effizientes Wassermanagement	
•• Effiziente Gasnachbehandlung	(Membrane, PROX, ...)
•• Opimale Materialbilanz	(Pt, Pd, Ag, CuZn, ...)
•• Schnell startendes + dyn. System	
•• Hybrid System (Speicher/Reg. Bremsen)	
•• Pkw: << EURO 4	(EU: CO_2 < 120g/km)

Allgemeine Hinweise für Antriebe mit Brennstoffzellen (PEFC)

Der Verlauf der Kennlinie einer PEFC entscheidet über den für die vorliegenden Analysen angesetzten mittleren Wirkungsgrad im NEFZ Testzyklus, der eine Aussage über die zur Verfügung gestellte elektrische Bruttoleistung auf der Basis Heizwert (LHV) des in der Brennstoffzelle umgesetzten Brennstoffs macht. Diese Kennlinie wird zu niedrigeren Spannungen verschoben, wenn mit dem Brennstoff Wasserstoff Verunreinigungen wie CO, CH_3OH und andere dem Brennstoffzellen-Stapel zugeführt werden. Reinst-Wasserstoff (H_2) steht aber nur dann zur Verfügung, wenn H_2 aus dem Tank entnommen wird oder nach einer Reformierung von MeOH oder Benzin H_2 mit Membranen abgetrennt wird. Der erste Fall kann mittelfristig nicht realisiert werden, die zweite Lösung mit Membranen könnte teuer sein. Wenn Wasserstoff aus Reformergas nicht mit Membranen (z.B. Pd/Ag-Membranen) in Reinsttform abgetrennt wird, werden katalytische Verfahren eingesetzt (CO-Konvertierung, CO-Oxidation, CO-Methanisierung beziehungsweise Kombinationen dieser Verfahren), bei denen auch Katalysatoren (auch Edelmetalle) genutzt werden. Bei diesem Kriterium für die Beeinflussung der Effektivität des Brennstoffzellensystems durch Wasserstoffverunreinigungen entscheiden also Aufwand und Kosten für die Wasserstoffdarstellung.

4.3 Definition der Antriebsvarianten

In Tabelle 2 sind die technischen Daten für ausgewählte Energieumwandlungsketten

EUK 1:	Benzin aus Erdöl / ICE (Verbrennungskraftmaschine)
EUK 2:	Diesel aus Erdöl / ICE
EUK 3:	Erdgas (CNG) / ICE
EUK 4:	Wasserstoff aus Erdgas CH_2 / PEFC + E-Antrieb
EUK 5:	Methanol aus Erdgas / PEFC + E-Antrieb (Beheizter Reformer BSR/Membran)
EUK 5a:	Basis Methanol (Erdgas) / PEFC + E-Antrieb (Autothermer Reformer ATR /SHIFT/PROX)
EUK 6:	Erdgas - Methanol / DMFC + E-Antrieb
EUK 7:	Erdöl - Benzin / PEFC + E-Antrieb (Autothermer Reformer ATR/SHIFT/PROX)

aufgeführt, wie sie bei heutigem Kenntnisstand beziehungsweise heute möglichen Annahmen in eine *Worst/Best (Klammerwerte)-Case* Analyse eingehen. Neben den Angaben zur Brenngaserzeugung und zu den Brennstoffzellen werden die aus eigenen Analysen oder Annahmen ermittelten Wirkungsgrade für die Brennstoffzelle und die Nettoelektrizitätserzeugung vom Tank bis zur Nettostromerzeugung sowie die Wirkungsgrade der elektrischen Antriebe hinter der Brennstoffzelle bis zum Rad definiert. Es ergibt sich daraus unter Annahme eines Testgewichts ein Energieverbrauch für den Pkw und mit Hilfe der Wirkungsgrade für die Kraftstofferzeugung vom Bohrloch bis zur Tankstelle nach dem EUK-Programm KRAKE (FZJ) ein gesamter auf 100 km bezogener Primärenergieverbrauch (Basis: Heizwert). Die mechanische Leistung am Rad wird auf 40 kW und die Reichweite auf 500 km festgelegt. Mit diesen Angaben lassen sich auch die spezifischen CO_2-Emissionen ermitteln. Bei den limitierten Emissionen werden für die Benzin/Diesel-ICE-EUK der EURO 2005 Emissionsstandard, für die CNG-ICE-EUK die HONDA Emissionswerte und für die Methanol-Reformer-PEFC-EUK aus Technikums-versuchen ermittelte Emissionsdaten angenommen.

EUK	Kraftstoff / Antrieb	Wirkungsgrad Antrieb in % Energie Verbrauch Pkw in MJ/100 km Primärenergie Verbrauch in MJ/100 km		
		Pkw %	Pkw MJ/100 km	EUK MJ/100 km
EUK 1:	Benzin (Öl) / ICE	21 (23)	166	189
EUK 2:	Diesel (Öl) / ICE	24 (27)	146	160
EUK 3:	Erdgas (CNG) / ICE	21 (23)	170	214
EUK 4:	Wasserstoff (CH_2) / PEFC+E-Motor	32 (40)	113	182
EUK 5:	Methanol / BSR + PEFC + E-Motor	30 (37)	125	214
EUK 5a:	Methanol / ATR + PEFC + E-Motor	27 (34)	139	238
EUK 6:	Methanol / DMFC + E-Motor	25 (31)	154	264
EUK 7:	Benzin / ATR + E-Motor	22 (27)	177	200

Tabelle 2: Technische Bedingungen für EUK (siehe auch Tab. 1 und Abb. 2) (In Klammern: Annahmen für weitere Verbesserungen)

5. Emissionspotentiale der Antriebsvarianten

Die Emissionspotentiale der in Tabelle 2 definierten Fahrzeuge sind nach den zu erwartenden Standards für Neufahrzeuge (EUK 1,2 und 3) beziehungsweise für EUK 5 nach den aus Technikumsversuchen bekannten Daten festgelegt. Für EUK 5a, 6 und 7 sind noch nicht einmal aus Technikumsversuchen abgeleitete Emissionsdaten verfügbar, deshalb wurden hier die von EUK 5 als in Zukunft realisierbar angenommen und übernommen. Basis für diese Diskussion sind die für Europa in der Diskussion befindlichen Emissionsstandards für Pkw-Neufahrzeuge ab 2005 (EURO 4: Otto-/Dieselmotoren getrennt) und der für Kalifornien nach einem Vorschlag der kalifornischen Umweltbehörde (ARB 1997) im Dezember 1997 in die Diskussion gebrachte ULEV- beziehungsweise SULEV-Emissionsstandard für alle Pkw und 120 000 Meilen. Der neue SULEV Standard würde den lange Zeit diskutierten EZEV-Standard, der 1/10 des ULEV Standards für 50 000 Meilen bedeutete, ersetzen. In EUK 1 definierte Pkw mit Benzin ICE werden 2005 den EURO 4 einhalten können; dies wird für mit Dieselöl betriebene Pkw in EUK 2 sicherlich eine größere Herausforderung darstellen, dennoch wurde der EURO 4 in 2005 auch als erreichbar angenommen (FT Automotive Environment Analyst 1998, VDI Nachrichten 1998). Mit Bezug auf den amerikanischen Fahrzyklus FTP-75 und die diesbezüglichen kalifornischen Emissionsstandards kann davon ausgegangen werden, daß der ULEV Standard für Benzin/ICE-Neufahrzeuge in 2005 erreichbar ist (HONDA 1995); für Diesel/ICE-Pkw liegen keine entsprechenden Informationen vor. Beim Erdgas betriebenen Pkw mit ICE ist im FTP-Fahrzyklus 1/10 des ULEV Standards für monovalente Antriebe erreichbar und damit auch < EURO 4 (MAIER et al. 1997; HONDA 1997). In der Studie werden die von HONDA (1997) angenommenen Werte verwendet. Für den in EUK 4 definierten Pkw wird Nullemission angesetzt. Für die nachfolgenden Pkw der EUK läßt sich nur noch für den in EUK 5 definierten Pkw mit Methanol im Tank und einem Brennstoffzellenantrieb mit Katalytkonverter und Gastrennmembran ein Emissionspotential auf der Basis von Technikumsergebnissen wie folgt definieren.

Emissionen ⇒ Antrieb ⇓	Kohlenmonoxid (CO) mg/km	Stickoxide (NO_x) mg/km	Flüchtige organische Gase ohne Methan (NMOG) mg/km	Partikel (PM 10) mg/km
EUROPA EURO 2005 OK/DK	1000 / 500	80 / 250	100/50[4]	- / 25
KALIFORNIEN [1] ULEV 50000 M old	1062	124	(VOC) 25	6
ULEV 120000 M new	1312	43	34	6
SULEV 120000 M " (US-FTP -75-Zyklus)	625	12	6	
HONDA (CNG) 100 000 M	71	11	1	0
Methanolreformer, Katalyt Konverter und Brennstoffzelle mit Elektromotor (Technikum) [2] [3]	1 +- 0,2	0,13 +- 0,025	1 +- 0,2	0

[1] Kalifornien Standards nach ARB -Vorschlag vom Dez. 1997
[2] Quelle bzgl. Emissionen: RIEDEL 1996
[3] entsprechend 1,0 - 1,4 MJ/km
[4] Summe VOC + NOx = 300 mg/km

Tabelle 3: Spezifische Pkw - Emissionen im Vergleich: EUROPA - KALIFORNIEN

Der Vergleich in Tabelle 3 zeigt die Vorteile des Brennstoffzellenantriebs für einen Pkw, der etwa 1 - 1,4 MJ/km Methanol verbraucht, wobei nur ein Teil der Energie im Katalytkonverter umgesetzt wird. Diese Werte für die spezifischen limitierten Emissionen wurden für die Pkw der EUK 5 eingesetzt und für 6 und 7 angenommen.

6. Bewertung

Die Energie- und Emissionsbilanzen basieren im wesentlichen auf den definierten Pkw und den Kraftstoffketten, wie sie sich nach dem EUK-Bilanzierungsprogramm KRAKE des Forschungszentrum Jülich (IEV) - Stand April 1998 (UCPTE für europäische Stromerzeugung und CNG-Pkw-Emissionsdaten nach HONDA 1997) - ergeben (siehe auch FVV 1998).

Für die Wirkungsgrade der Energieträgerbereitstellung in Deutschland ergeben sich nach den Bilanzen mit KRAKE (FZJ) folgende Angaben:

EUK1/7	Rohöl bis Raffinerie	97 %	Benzin an Tankstelle	88 %
EUK2	Rohöl bis Raffinerie	97 %	Diesel an Tankstelle	91 %
EUK3	Erdgas bis HD-Netz	90 %	CNG (250b) an Tankstelle	81 %
EUK4	Erdgas bis HD-Netz	90 %	GH2 (300b) an Tankstelle	63 %
EUK5/6	Erdgas bis HD-Netz	90 %	MeOH an Tankstelle	58 %

Ein erster Überblick (Abb. 3 und 4) zeigt die Energie- und CO_2-Bilanzen für 7 ausgewählte EUK mit den konservativen Pkw-Spezifikationen bis 2005 (ohne Klammer) nach Tabelle 2. Dabei ist nochmals darauf hinzuweisen, daß

- gerade für die Brennstoffzellen-Pkw erhebliche Zusatzgewichte gegenüber den konventionellen Benzin-/Diesel-ICE-Antrieben angenommen wurden (siehe 9.1),

- die Wirkungsgrad-Analysen insbesondere für den DMFC-E-Antrieb und den Benzin-Reformer-PEFC-E-Antrieb
- ebenso wie die entsprechenden Emissionsbilanzen noch undeutlich sind,
- insgesamt alle Pkw-Spezifikationen trotz der hier vorgenommenen vergleichenden Bewertung einen unterschiedlichen Entwicklungsstand aufweisen
- und neue Produktionskapazitäten und Infrastrukturen zur Methanol- und Wasserstoffversorgung aufgebaut werden müßten.

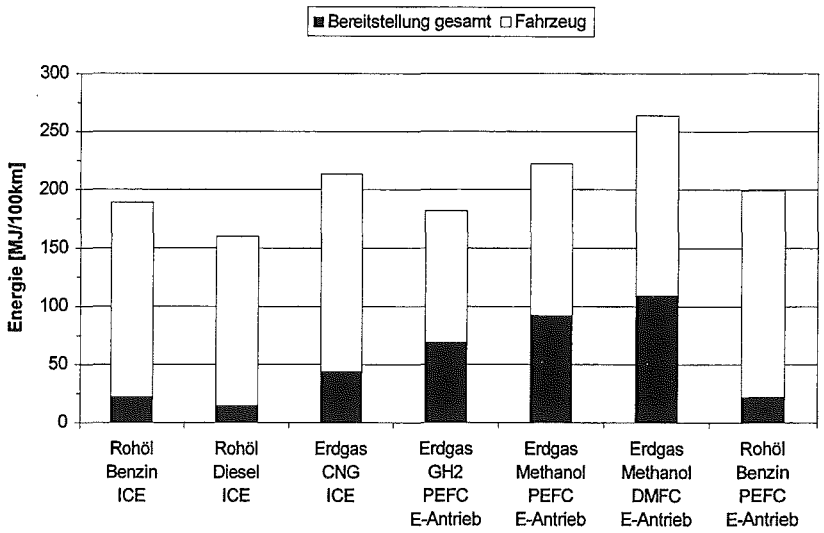


Abb. 3: Energieverbrauch für die Bereitstellung unterschiedlicher Energieträger und für unterschiedliche Antriebsarten (*Worst Case*)

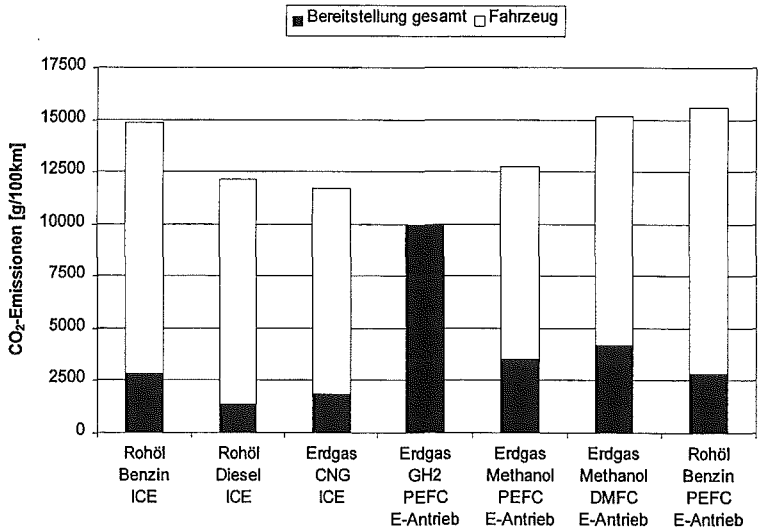


Abb. 4: CO_2-Emissionen für die Bereitstellung unterschiedlicher Energieträger und für unterschiedliche Antriebsarten (*Worst case*)

Primärenergieaufwendungen

Primärenergieeinsparungen für EUK mit PEFC-Antrieben sind gegenüber EUK mit weiterentwickelten Verbrennungsmotoren im mobilen Anwendungsbereich unter den hier getroffenen Annahmen einer *Worst Case* - Betrachtung kaum zu erreichen.

Pkw- und lokale Emissionen

Deutliche Vorteile würden sich für alle Brennstoffzellen-Pkw unter Berücksichtigung der vorab dargestellten Annahmen und Einschränkungen für die limitierten Fahrzeugemissionen und damit für die lokale Emissionssituation insbesondere in Ballungsräumen ergeben (Tab. 3). Diese Vorteile bedeuten auch die erhebliche Verminderung der lokalen Sekundärschadstoffbildung im sogenannten Sommersmog insbesondere wegen der VOC-Emissionen mit ihren im Vergleich zu ICE-Abgasen niedrigen Ozonbildungspotentialen. Bei den EUK mit PEFC betriebenen Pkw überwiegen die limitierten Emissionen (CO, NOx und NMVOC ebenso wie Methan) der vorgelagerten Kraftstoffketten erheblich gegenüber den Pkw-Emissionen. Diese Kraftstoff-Bereitstellungsemissionen vom Bohrloch bis zum Tank werden in der Literatur auch sehr unterschiedlich wiedergegeben.

Globale CO_2-Emissionen

Für die CO_2-Emissionen der gesamten EUK im Vergleich der *Worst Case* Analyse ergeben sich nur für die EUK4 mit GH2-PEFC-E-Antrieb Vorteile gegenüber der EUK mit Benzin-ICE-Antrieb von etwa 30 % und gegenüber der EUK mit Diesel-ICE-Antrieb von 15 %. Die EUK mit MeOH-PEFC-E-Antrieb zeigt nur gegenüber der EUK mit Benzin-ICE-Antrieb Vorteile von etwa 13 % (Abb. 4).

Ausblick

In den beiden Abbildungen Abb. 5 und 6 werden in Ergänzung zu der bisher wiedergegebenen Darstellung eines Vergleichs der EUK bis 2005 (jeweils 1. Säule: < 2005) auch Angaben zu den CO_2- und Primärenergiebilanzen mit den in Tabelle 2 als optimistisch angesetzten Pkw-Spezifikationen - in Klammern gesetzt - (jeweils 2. Säule: > 2005) und mit den Voraussetzungen der 2. Säule aber der Annahme gleicher Testgewichte von 1130 kg und damit gleicher spezifischer Energieverbräuche am Rad von 35 MJ/100 km (jeweils 3. Säule: >> 2005) gemacht.

Durch diesen *Worst / Best - Case* Vergleich des spezifischen Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen wird deutlich, daß eine Antriebsvariante mit einem H_2/PEFC-System bei Einsatz von Erdgas als Primärenergieträger Vorteile gegenüber herkömmlichen Pkw-Antriebsarten aufweisen würde: Dies gilt im *Best Case* auch gegenüber der EUK mit Diesel-ICE für den Primärenergieverbrauch (Abb. 5) und insbesondere für die CO_2 -Emissionen der EUK (Abb. 6).

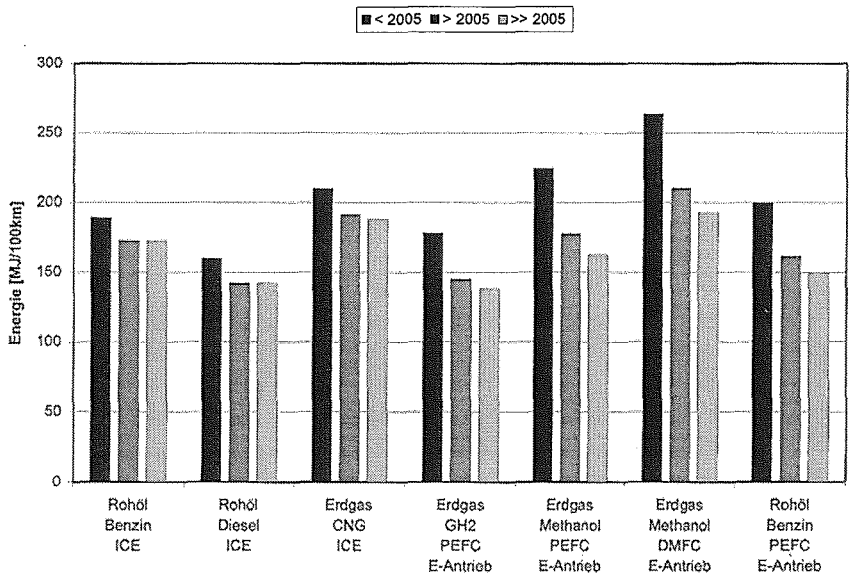


Abb. 5: Energieverbrauch für die Bereitstellung unterschiedlicher Energieträger und für unterschiedliche Antriebsarten

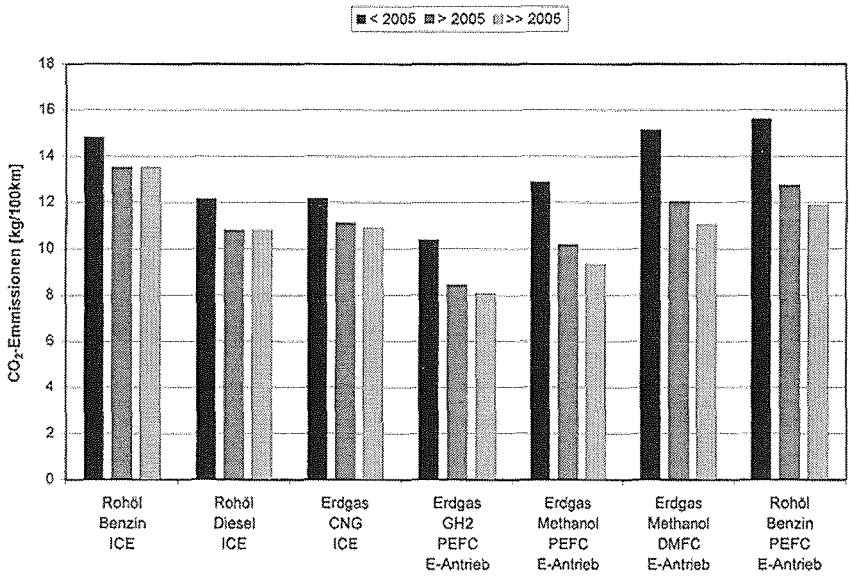


Abb. 6: CO_2-Emissionen bei der Bereitstellung unterschiedlicher Energieträger und für unterschiedliche Antriebsarten

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Analyse wird der Einsatz von Wasserstoff, Methanol und Benzin als Kraftstoff unter dem Gesichtspunkt der Stromgewinnung mittels Brennstoffzelle für Pkw-Antriebe dargestellt. Auf der Basis von Simulationsrechnungen wurden Systemwirkungsgrade der Energiewandlung ermittelt und in die entsprechenden Energieumwandlungsketten integriert. Dabei wurden der gegenwärtige und der bereits erkennbare zukünftige Entwicklungsstand sowohl für Energie-umwandlungsketten mit konventionellen Verbrennungsmotoren als auch für Energieumwandlungsketten mit Brennstoffzellen-Antrieben auf der Basis unterschiedlicher Energieträger aufgezeigt.

Mittelfristige Optionen für die Energieversorgung von Brennstoffzellen-Antrieben mit PEFC-Systemen und elektrischen Motoren sind Methanol, Ethanol und Benzin oder Diesel. Alle weisen eine hohe Energiedichte bei hinreichender Handhabbarkeit und möglicher Infrastruktur auf. Eine langfristige Option wäre Wasserstoff als Energieträger für PEFC-Systeme auf der Basis regenerativer Primärenergiequellen.

Methanol, das hier nicht näher analysierte Ethanol aus Biomasse und Benzin oder Diesel (hier nicht analysiert) müssen vor dem Brennstoffzellensystem in Wasserstoff oder ein wasserstoffreiches Synthesegas umgewandelt werden. Dazu bedarf es nicht nur eines Reformers, sondern auch einer Gasnachbehandlung (zwecks Minimierung des für PEFC-Systeme schädlichen Kohlenmonoxids) und bei manchen Verfahren eines katalytischen Brenners als Energiequelle für den Reformer. Der Katalytkonverter kann hauptverantwortlich für die Emissionen des gesamten Pkw-Antriebs sein.

Der Entwicklungsstand der hier analysierten verschiedenen Antriebe und EUK ist sehr unterschiedlich. In Abhängigkeit davon und aus der Sicht von heute oder den angenommenen Möglichkeiten für die Zukunft lassen sich folgende Feststellungen treffen: Die Vorteile von Antrieben mit Brennstoffzellensystemen gegenüber solchen mit Verbrennungsmotor bei Berücksichtigung der Kraftstoffketten sind klein mit Bezug auf den spezifischen Energieverbrauch und die CO_2 Emissionen, aber sehr hoch mit Bezug auf die lokalen Emissionen der Pkw. Andere Kriterien wurden in der vergleichenden Analyse von Pkw-Antrieben der Zukunft hier nicht diskutiert.

8. Literatur:

ARB: Proposed Amendments to California Exhaust, Evaporative, and Onboard Refueling Vapor Recovery Emission Standards and Test Procedures for Passenger Cars, Light-Duty Trucks and Medium-Duty Vehicles, Air Resources Board, EL MONTE (Kalifornien), Dez. 1997

Ballard: Zero-Emission Fuel Cell, Bus Engine Implementation Plan, Ballard Power Systems Inc, Burnaby, BC Canada, 1996

Bentley, J. M. et al. Multi-Fuel processor for Small Scale Fuel Cell Systems
38th Battery Symposium of Japan, 12. Nov., 1997

Buchheim, R./ Quissek, F.: Ecological and Economical Aspects of Future Passenger Car Powertrains, FISITA Conference, Prag, 17.-21. Juni, 1996

DAIMLER-BENZ: NECAR 3 mit Methanol in die Zukunft, Daimler-Benz Kommunikation, Stuttgart, KOM 5746-0204.00/1097, 1997

Divisek, J., Oetjen,H.-F. Peinecke, V., Schmidt, V. M., Simming, U.: Components for PEM Fuel Cell Sytems Using Hydrogen and CO Containing Fuels, Forschungs-zentrum Jülich, Jülich, zur Veröffentlichung eingereicht in Electrochimica Acta, 1998

DOE, Fuel Cells for Transportation, Research & Development: Program Abstracts, PEM Stacks & Stack Components, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20024, 1998

Emonts, B./Bøgild Hansen, J./Lægsgaard Jørgensen, S./Höhlein, B./ Peters, R., 1997: Compact Methanol Reformer Test for Fuel-Cell Powered Light-Duty Vehicles, Fifth Grove Fuel Cell Symposium, Commonwealth Institute, London, UK, 22 - 25 September 1997, Journal of Power Sources 71 (1998) 288-293

Espino, R.L./Robbins, L.J.: Fuel Infrastructure Considerations for Fuel Cell Vehicles, *Proceedings*: 30th Annual ISATA Conference, Florence, Italien, 16.-19.6.1997

Friedrich, J./Krauss, R./Spaniel, D.: Stand und Entwicklungsmöglichkeiten des Brennstoffzellenfahrzeugs, VDI-Berichte 1378 zur VDI-Tagung, Dresden, 17. u. 18. Februar 1998

FVV: Brennstoffzellen-Studie, Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen, Vorhaben Nr. 686; Beteiligte Forschungsstellen: Forschungszentrum Jülich GmbH (B. Höhlein et al.), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Stuttgart (J. Nitsch et al.), Energiewirtschaft und Kraftwerks-technik TU München (U. Wagner et al.); FVV - Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt am Main, Heft 657, 1998

FT Automotive Environment Analyst, Febr. 1998, S. 25/26

Gottesfeld, S./Cleghorn, S.J.C./Ren, X./Springer, T.E.: Polymer Electrolyte Direct Methanol Fuel Cells: An Option for Transportation Applications, in Proceedings: Commercializing Fuel Cell Vehicles Conference, Intertech Conferences, Portland USA, 17.-19. September 1996

Große, J./Waidhas, M.: Fortschritte bei der Brennstoffzellenentwicklung, VDI-Berichte 1378 zur VDI-Tagung, Dresden, 17. u. 18. Februar 1998

Höhlein, B./Biedermann, P.: Bewertung von Antrieben und Energieträgern für den Pkw-Straßenverkehr, VDI Berichte Nr. 1307, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996

Höhlein, B./Biedermann, P.: Vergleichende Analyse von Pkw-Antrieben der Zukunft, mit Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen-Systemen, VDI-Berichte 1378 zur VDI-Tagung, Dresden, 17. u. 18. Februar 1998

Höhlein, B./Biedermann, P./Grube, Th./Menzer, R.: Fuel Cell Power Trains for Road Traffic, Presentation: 6th UECT Electrochemical Symposium Ulm, 29.-30-6.1998

HONDA, Presseinformation 26.1.1995, HONDA Offenbach

HONDA 1997: Erdgas Workshop 1997; 25.8. -28.8.1997

Kratzel, H.: Computergestützte Bilanzierung von Energieumwandlungsketten im Straßenverkehr, Diplomarbeit, FH Aachen, Abteilung Jülich, Jülich, 1996

Koch, J.: Herstellung von Dimethylether (DME) aus Erdgas und Analyse der Nutzung von DME für Pkw-Antriebe im Vergleich zu anderen Energieträgern, Diplomarbeit, FH Aachen, Abteilung Jülich, Jülich, 1997

Maier, F., Müller, P., Heck, E., Langen, P., Erdgasmotorenkonzept mit EZEV-Potential, Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 58 (1997), 9

Menzer, R./Emonts, B./Höhlein, B./Peters, R./ Meusinger, J./ Stimming, U.: Fuel Processing in Fuel Cell Systems for Mobile Applications - Gasoline as Energy Carrier On-Board -, Poster: Fifth Grove Fuel Cell Symposium, Commonwealth Institute, London, UK, 22.-25. September 1997

Menzer, R./Höhlein, B.:Verfahrensanalyse der Stromerzeugung für Fahrzeugantriebe mit Methanol als Energieträger und Brennstoffzellen als Energieumwandlungssystem, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jül-3445, Jülich, 1997 oder

Menzer, R./Höhlein, B.: Analysis of Energy and Water Management in Terms of Fuel-Cell Electricity Generation, Fifth Grove Fuel Cell Symposium, Commonwealth Institute, London, UK, 22. - 25. September 1997, Journal of Power Sources 71 (1998) 294-301

Menzer, R./Höhlein, B.: Analyse von Energieumwandlungssystemen für Fahrzeuge mit Brennstoffzellen: Methanol und Benzin als Energieträger, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jül-3537, Jülich, 1998

Mitchell, W.L. : Fuel Flexible Fuel Processor for Transportation, Commercializing Fuel Cell Vehicles 97, D-Frankfurt, 20.-22. Okt. 1997

Noreikat, K. E.,/Panik, F./Franck, M. 1997: Brennstoffzellenfahrzeuge: NEBUS, NECAR I, NECAR II, ...,6. Aachener Motoren Kolloquium 1997, Aachen, 20.-22.-Oktober 1997

Opel 1998: Opel Sintra mit Brennstoffzellentechnik, Opel AG, Pressemitteilung,
Genfer Automobilsalon 1998

Riedel, E.: Untersuchung und Entwicklung eines katalytischen Brenners zur Beheizung eines Kompaktreformers, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, JÜL-3240, August 1996

TOYOTA: Neue Entwicklungen bei Toyota, IAA Frankfurt 1997, Pressemitteilung Toyota Motor Europe, Brüssel, 1997

VDI: Super Kat macht Autos zu Giftzwergen, VDI Nachrichten, 27.2.1998

Energie und Gesellschaft

Die deutsche Energiewirtschaft im Spannungsfeld von Wettbewerb, Klimaschutz und Gesellschaft

Jürgen-Friedrich Hake

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)

Forschungszentrum Jülich

1 Einleitung

Deutschlands Volkswirtschaft ist gegenwärtig drei grundsätzlichen Trends ausgesetzt:

- Eine zunehmende Verflechtung von Handelsbeziehungen zwischen Ländern, aber auch die über Ländergrenzen hinweg gehende Vernetzung von Unternehmen führt zu neuen Strukturen. Diese *Globalisierung* wirkt sich in zunehmendem Maße auf die deutsche Energiewirtschaft aus.
- Auf europäischer Ebene beeinflußt der sich entwickelnde *europäische Binnenmarkt* in zunehmendem Maße nationale Entscheidungen. Die 15 Mitgliedstaaten haben sich auf drei übergeordnete Ziele für ihre gemeinsame Energiepolitik verständigt:
  - Sie soll zur *Wettbewerbsfähigkeit* der Wirtschaft und gesellschaftlichem Wohlstand beitragen. Liberalisierte Energiemärkte schaffen dafür eine wesentliche Grundlage.
  - Es ist Aufgabe der Energiewirtschaft, im Rahmen von Marktstrukturen durch geeignete Investitionen die *sichere Versorgung mit Energie* zu gewährleisten. Die Politik hat dafür zu sorgen, daß sich ein stabiles System von leistungsfähigen Handelsbeziehungen zwischen den Ländern entwickeln kann.
  - Dem *Schutz der Umwelt* wird ein hoher Stellenwert eingeräumt. Eine europäische Energiepolitik kann durch höhere Energieeffizienz, eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen und einer geeigneten FE-Strategie dazu beitragen.

  Über die Europäische Gemeinschaft hinausgehend findet eine engere Zusammenarbeit und Abstimmung mit Ländern Osteuropas, insbesondere den an die EU assoziierten Ländern wie Polen, Tschechien, Ungarn, Estland und Slowenien statt /13/.
- Innerhalb Deutschlands wird der durch die Vereinigung der beiden deutschen Staaten eingeleitete Prozeß der Harmonisierung fortgesetzt. Strukturelle Unterschiede sind in vielen Bereichen noch vorhanden, auch wenn große Anstrengungen hinsichtlich einer Annäherung unternommen werden.

Diese drei Ebenen verdeutlichen den Kontext, in dem die deutsche Energiewirtschaft gegenwärtig operiert. Er bildet gleichzeitig den Hintergrund für zukünftige Orientierung und ist daher bei der Systemanalyse mit Hilfe von Szenarien stets zu berücksichtigen.

Der Energieverbrauch eines Landes hängt von vielen Parametern u.a. der Zahl der Einwohner, der Anzahl der Haushalte sowie vom Wohnungsbestand ab. Zu diesen Rahmendaten der Energieversorgung gehören darüber hinaus Angaben zur Motorisierung, die Zahl der Erwerbstätigen, das Bruttoinlandsprodukt und die Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes. Die zeitliche Entwicklung dieser Rahmendaten für Deutschland seit Anfang der 90er Jahre gibt Tabelle 1 wieder.

Tab. 1: Zeitliche Entwicklung der Rahmendaten für die Energieversorgung in Deutschland.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Wohnbevölkerung (Mill.)	79,3	80,0	80,6	81,1	81,5	81,8	82,0	82,1
Anzahl der Haushalte (Mill.)	34,9	35,3	35,7	36,2	36,7	36,9	37,3	-
Wohnungsbestand (Mill.)	33,8	34,1	34,5	35,0	35,6	36,0	-	-
PKW/Kombi-Bestand (Mill.)	35,5	36,9	37,9	38,9	39,8	40,4	41,0	41,4
Erwerbstätige im Inland (Mill.)	37,4	36,4	35,8	35,1	35,0	34,9	34,5	34,3
Bruttoinlandsprodukt (Mrd. DM_{1991})	-	2853,6	2916,4	2881,9	2960,2	3013,8	3054,5	3126,7
Bruttowertschöpfung des verarb. Gewerbes (Mrd. DM_{1991})	-	825,3	805,4	744,5	767,9	778,7	778,0	808,6

Quelle: EnergieDaten 97/98 /4/.

Während die Zahl der Einwohner in den letzen sieben Jahren nur leicht angestiegen ist, hat die Zahl der Haushalte pro Jahr stärker und zwar durchschnittlich um 1 % zugenommen. Dies bedeutet, daß mehr Menschen in kleineren Haushalten leben (single effect). Der Bestand an PKW/Kombi ist im betrachteten Zeitraum um durchschnittlich 2 % pro Jahr angestiegen. Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) - die Größe, die die wirtschaftliche Leistung eines Landes beschreibt - ist pro Jahr um 1,4 % gewachsen. Die Bruttowertschöpfung[1] des verarbeitenden Gewerbes - die Summe aus den zu Herstellungskosten bewerteten selbsterstellten Anlagen abzüglich der Vorleistungen - ist bis 1993 rückläufig gewesen. Der darauf folgende Anstieg drückt die konjunkturelle Erholung aus. In Verbindung mit einem wachsenden Bruttoinlandsprodukt deutet dies darauf hin, daß die Bedeutung des verarbeitenden Gewerbes für die gesamte Volkswirtschaft abnimmt und andere Bereiche die Ursache für das Wachstum darstellen.

2 Energieverbrauch in Deutschland

Seit 1990 ist der Verbrauch an *Primärenergieträgern* auf einem Niveau von 14500 PJ nahezu konstant. Die Schwankungen um diesen Mittelwert betragen 4 %. Im Jahr 1997 wurden insgesamt 14490 PJ (= 494.4 Mill. SKE) verbraucht (Abb. 1).

Vergleicht man die Struktur im Jahr 1990 mit derjenigen im Jahr 1997, so kann man starke Veränderungen feststellen. In diesem Zeitraum

- nahm der Anteil an Steinkohle von 15,5 auf 14,1 % (= 2043 PJ) ab;
- sank der Anteil von Braunkohle von 21,5 auf 11 % (= 1591 PJ);
- erhöhte Öl seinen Anteil von 35,1 auf 39,5 % (= 5727 PJ);
- stieg der Anteil an Gas von 15,4 auf 20,6 % (= 2984 PJ);
- nahm der Anteil an Kernenergie von 11,2 auf 12,8 % (= 1858 PJ) leicht zu;
- stieg der Anteil erneuerbarer Energieträger von 1,4 auf 2 % (= 287 PJ).

[1] auch Nettoproduktionswert

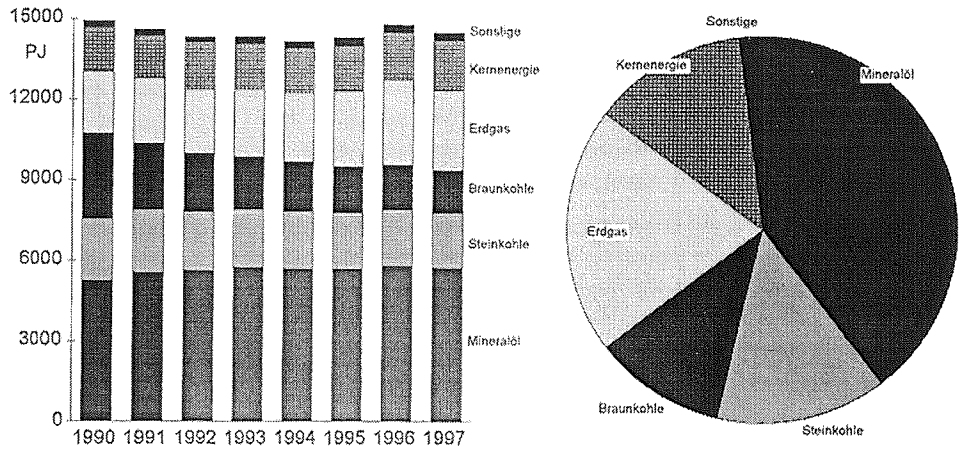


Abb. 1: Primärenergieverbrauch in Deutschland seit 1990 (links) und prozentuale Zusammensetzung für 1997.

Die zur Verfügung gestellte *Endenergie* verteilt sich auf die Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte und Kleinverbrauch (Abb. 2). Im Zeitraum 1990 bis 1996 lag der Bedarf an Endenergie insgesamt zwischen 9027 und 9628 PJ im Jahr 1994 bzw. 1996. Für 1997 liegen noch keine Angaben vor. Auch hier ändert sich die Verteilung seit 1990. Schlüsselt man den Bedarf nach Sektoren auf, so ergibt sich

- für den Sektor Industrie ein Rückgang von 31,5 auf 24,9 % (= 2400 PJ);
- für den Verkehrssektor ein Anstieg von 25,2 auf 27 % (= 2600 PJ);
- für Haushalte ein Anstieg von 25,2 auf 30,5 % (= 2600 PJ);
- für Kleinverbrauch eine leichte Zunahme von 16,6 auf 17,3 % (= 1662 PJ).
- Der Energiebedarf militärischer Dienststellen ist in diesem Zusammenhang vernachlässigbar.

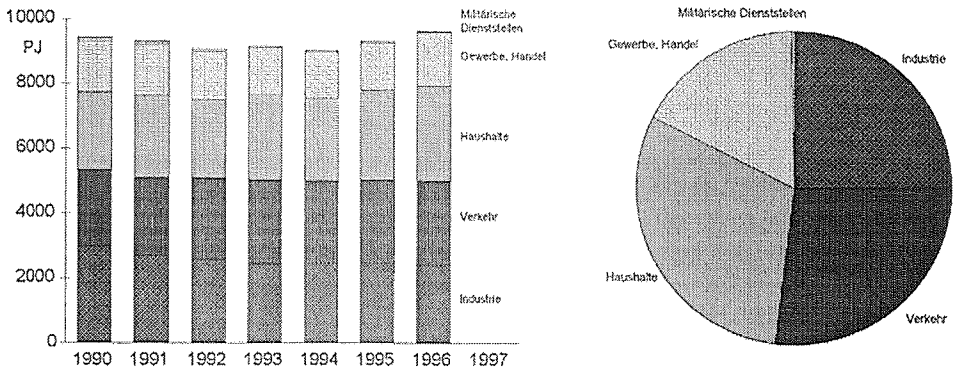


Abb. 2: Endenergieverbrauch in Deutschland seit 1990 (links) und prozentuale Zusammensetzung für 1996 nach Sektoren.

Der Energiebedarf eines Sektors setzt sich aus den Energiedienstleistungen zusammen, die dieser Sektor benötigt, um seinen Beitrag zur volkswirtschaftlichen Gesamtleistung zu erbringen. Gebäude müssen beheizt und beleuchtet werden, die Industrie benötigt Prozeßwärme, Personen und Güter werden transportiert, Energie für elektronische Kommunikation muß bereit gestellt werden. Prozeßwärme wird auf unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt. Für Transportprozesse stehen verschiedene Verkehrsträger zur Verfügung.

Zwischen der Versorgung mit Primärenergieträgern auf der einen und den Energiedienstleistungen auf der anderen Seite besteht ein komplexes Netz an Beziehungen, das vereinfacht in Abb. 3 dargestellt ist. Dieses Netzwerk muß man vor Augen haben, wenn man über Eingriffe in die Energiewirtschaft nachdenkt. Der hohe Grad der Vernetzung führt dazu, daß sich eine einzelne Veränderung an vielen Stellen – häufig unerwartet – auswirkt. In abstrakter Form bildet dieses Netz die Grundlage für wissenschaftliche Untersuchungen energiewirtschaftlicher Fragestellungen.

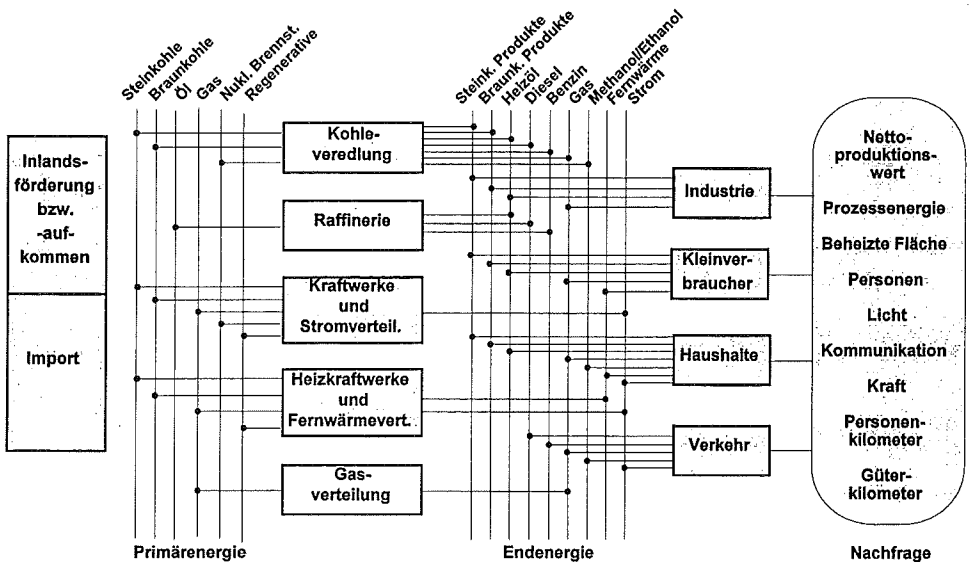


Abb. 3: Energiewirtschaftliche Vernetzung.

Wesentlich für eine Beurteilung der energiewirtschaftlichen Situation eines Landes sind auch die aus Tabelle 1 sowie die aus Daten für die Abbildungen 1 und 2 ableitbaren spezifischen Kennziffern des Energieverbrauchs (Tab. 2). So ist der Verbrauch an Primärenergie pro Kopf seit 1990 pro Jahr um 0,4 % gesunken, der Bruttostromverbrauch pro Kopf dagegen in etwa konstant geblieben. Die wirtschaftlichen Aktivitäten – ausgedrückt als Energieverbrauch pro Einheit des BIP - sind weniger Energie intensiv. Hierin spiegeln sich zwei Trends wider: zum einen der Einsatz effizienterer Verfahren und zum anderen - grob gesagt - der Wandel von der Industrie- zur Dienstleistungsgesellschaft. In der Industrie ist der Verbrauch an Endenergie zwar rückläufig, gleichzeitig wird aber mehr Strom benötigt. Der Endenergiebedarf je Haushalt und Jahr liegt bei 70,45 GJ, allerdings schwanken die Werte in Abhängigkeit von der Witterung bis zu 5 % um diesen Mittelwert. Der Kraftstoffverbrauch pro PKW auf 100 km ist seit 1990 mit durchschnittlich –1,7 % rückläufig.

Tab. 2: Kennziffern des Energieverbrauchs in Deutschland.

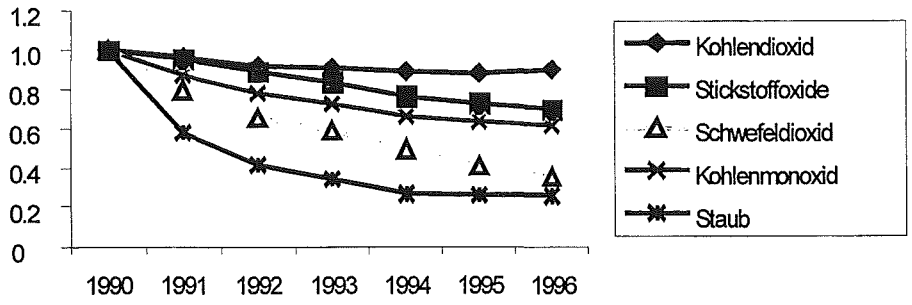
	1990	1991	1992	1993	1994	1995*	1996*	1997*
Energieverbrauch pro Kopf								
- Primärenergie (GJ)	181	183	178	176	174	175	179	176
- Bruttostromverbrauch (MWh)	-	6,74	6,60	6,49	6,49	6,60	6,62	
Energieverbrauch pro 1000 DM BIP								
- Primärenergie (MJ)	-	5120	4908	4964	4781	4744	4835	4634
- Bruttostromverbrauch (kWh)	-	189	182	183	178	178	177	
Energieverbrauch in der Industrie								
- Endenergie (MJ)	-	3263	3181	3268	3214	3173	3085	
- Strom (kWh)	-	235	235	242	242	246	248	
Energieverbrauch je Haushalt								
- Endenergie (GJ)	71,0	67,1	70,4	70,4	69,2	74,6		
Kraftstoffverbrauch pro PKW /100km (l)	10,2	9,4	9,1	9,1	9,0	8,9	8,9	8,8

*vorläufige Werte

Quelle: EnergieDaten 97/98.

3 Energie und Umwelt

Die Nutzung natürlicher Ressourcen im großen industriellen Maßstab wirkt sich aufgrund der mit ihnen verbundenen umfangreichen Stoffströme in zunehmendem Maße auf die Umwelt aus. Energieumwandlung, -transport und –nutzung haben daran ihren Anteil. Fortschritten bei der Verringerung schadstoffhaltiger Emissionen in Industrieländern wie Deutschland stehen wachsende Umweltbelastungen in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern gegenüber. In Deutschland sind die Emissionen seit 1990 aufgrund der ergriffenen Maßnahmen rückläufig. Dies gilt insbesondere für Kohlendioxid (1990: 1 Mrd. t), Distickstoffoxid (2,7 Mio. t), Schwefeldioxid (5,3 Mio. t), Kohlenmonoxid (10,9 Mio. t) und Staub (2 Mio. t) (Abb. 4).



Quelle: EnergieDaten 97/98.

Abb. 4: Relative Entwicklung von Emissionen in Deutschland.

Der anthropogene Treibhauseffekt stellt ein Beispiel dafür dar, wie durch intensives Nutzen einer Ressource Stoffströme verursacht werden und das Verhalten natürlicher Systeme beeinflußt und ggf. zum langfristigen Nachteil verändert werden kann. Bei der Diskussion um den anthropogenen Treibhauseffekt sind die atmosphärischen Treibhausgase

- Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O), aber auch
- wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), Schwefelhexafluorid (SF_6) und perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (CF_4 und C_2F_6) und schließlich
- indirekt Stickoxide (NO_x), nicht methanhaltige flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) und Kohlenmonoxid (CO) als Ausgangsprodukt für Klimagase

von besonderer Bedeutung. Ein Blick auf die Emissionen in Deutschland zeigt, daß CO_2, CH_4, und N_2O dominieren. Berücksichtigt man das Treibhauspotential der verschiedenen Gase im Vergleich zu CO_2, so stellt man fest, daß die drei Gase einen Anteil von 99 % einnehmen[2] und CO_2 allein zu 83 % beiträgt (Abb. 5).

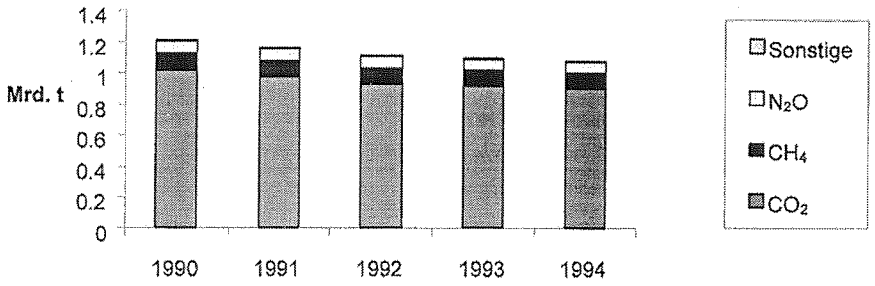


Abb. 5: Emissionen von Treibhausgasen in Deutschland.

Abb. 6 zeigt die dominierende Rolle der aus der Energienutzung entstehenden Treibhausgase. Sie stellen 85 % der in Deutschland emittierten Treibhausgase. Seit 1990 ist die Gesamtmenge rückläufig. Die Anteile der emittierenden Bereiche sind in etwa gleichgeblieben.

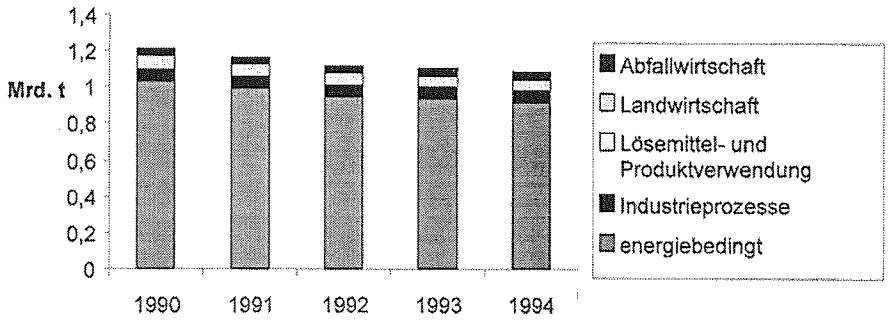


Abb. 6: Emissionen von Treibhausgasen nach verursachenden Bereichen in Deutschland.

[2] GWP(CO_2)=1, GWP(CH_4)=21, GWP(N_2O)=310.

Als Beitrag zum Klimaschutz hat sich Deutschland verpflichtet, seine CO_2-Emissionen ausgehend von 1990 mit 1 Mrd. t bis zum Jahr 2005 um 25 % zu verringern. Dieses Ziel ist – wie Fachleute festgestellt haben – ambitioniert. Man berät daher Maßnahmen und ihre Umsetzung, damit dieses Ziel erreicht werden kann. Das Minderungsziel selbst wird ebenfalls diskutiert und weiterentwickelt. Als Folge von Beratungen auf EU-Ebene und als Ergebnis der Kyoto-Konferenz gilt nun ein modifiziertes Ziel für Deutschland. Es fordert eine Reduktion der Emissionen für CO_2, CH_4 und N_2O um 25 % im Zeitraum 1990 bis 2010. Spätestens ab 2000 soll der „Kyoto-Korb" neben CO_2, CH_4 und N_2O mit HFC, PFC und SF_6 drei weitere Klimagase umfassen.

4 Optionen

Die zukünftige Ausrichtung der Energiewirtschaft kann sich nicht allein an Umweltschutzzielen orientieren, sondern wird sich im Dreieck von *Wettbewerbsfähigkeit, Versorgungssicherheit* und *Umweltschutz* bewegen müssen. Dafür stehen zahlreiche Optionen zur Verfügung.

4.1 Technik und Wirtschaft

Technischer Fortschritt findet in vielen Bereichen statt und bildet eine Grundlage für die zukünftige Entwicklung. Effizientere Verfahren führen zu niedrigeren spezifischen Verbräuchen. So konnte während der letzten 50 Jahre bei Steinkohlekraftwerken der spezifische Brennstoffbedarf auf weniger als die Hälfte gesenkt werden. Dies entspricht einer Steigerung des Nettowirkungsgrads von 20 % auf über 40 %. Bei modernen Kraftwerken wie dem VKR-Kraftwerk Heßler liegt der Wert bei 0,28 kg SKE/kWh /9/. Bei Erdgas befeuerten GuD-Kraftwerken, die zur Stromerzeugung eingesetzt werden, liegen die Nettowirkungsgrade heute bei 55 % /17/.

Diese Verbesserungen setzen sich aus einer Vielzahl kleiner Schritte zusammen. So ermöglichen neue Werkstoffe höhere Prozeßtemperaturen /19/. Riedle – Taud stellen den Einfluß der Werkstoffentwicklung auf höhere Wirkungsgrade bei Dampfkraftwerken dar /18/. Dort findet man auch, wie sich Maßnahmen zur Weiterentwicklung von Prozessen und Komponenten positiv auf den Wirkungsgrad auswirken. Die Autoren führen aus, daß in den letzen 15 Jahren bei Gasturbinen- und GuD-Technik durch eine Kombination entsprechender Maßnahmen der Netto-Anlagenwirkungsgrad von 47 % auf 58 % gesteigert werden konnte. Balling beschreibt ebenfalls verschiedene Phasen dieser Entwicklung /1/.

Ähnlich wie bei den konventionellen Techniken sind Fortschritte bei der Entwicklung von Alternativen zu verzeichnen. Beispiele hierfür sind neben einer breiten Palette an Techniken zur Nutzung regenerativer Energiequellen /12/ auch unterschiedliche Typen von Brennstoffzellen (PEFC, PAFC, MCFC, SOFC[3]) /15/. Diese Techniken können nach Ansicht vieler Fachleute in einer zukünftigen Energieversorgung eine wichtige Rolle übernehmen. Der Wirkungsgrad für verschiedene, auf Brennstoffzellen basierende Anlagenarten und –größen und ihre Konkurrenten ist in Abb. 7 dargestellt. Die untere Linie eines Bandes beschreibt den gegenwärtig erreichbaren Wirkungsgrad, die obere Linie die in Zukunft erwartete Grenze /26/. Ein ähnliche Darstellung findet man in /6/.

Der Wirkungsgrad repräsentiert aber nur ein Kriterium zur Charakterisierung einer Anlage. Weitere Kriterien sind z.B. spezifischer Flächenbedarf und letztendlich die Kosten. Ein wesentliches Hemmnis, das ein stärkeres Eindringen dieser Techniken in den Markt verhindert, besteht im noch

[3] Polymer Electrolyte Fuel Cell, Phosphor Acid Fuel Cell, Molten Carbonate Fuel Cell, Solid Oxide Fuel Cell.

benötigten Entwicklungsbedarf und in den im Vergleich zu den konventionellen Techniken z.Zt. noch zu hohen Kosten.

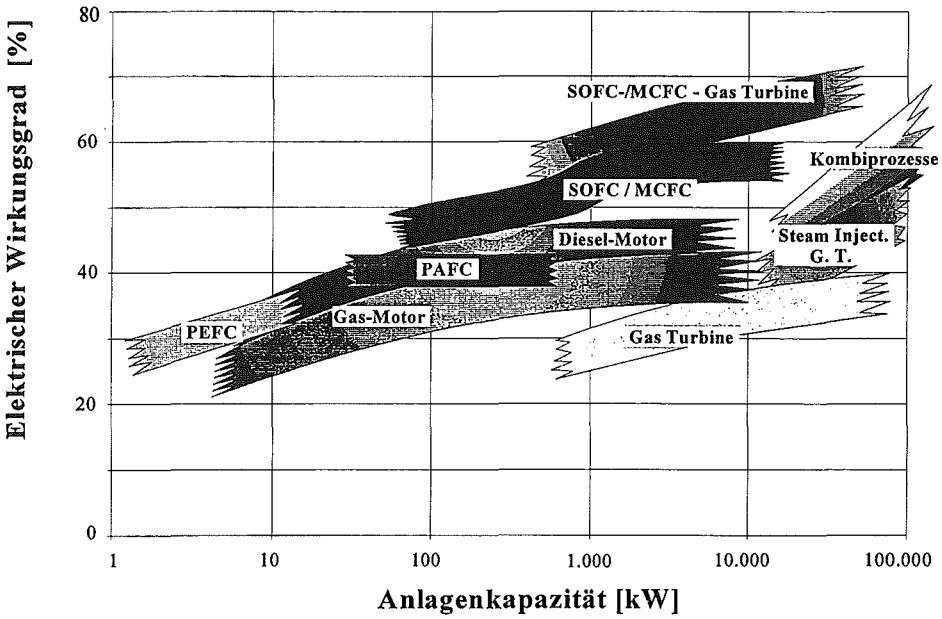
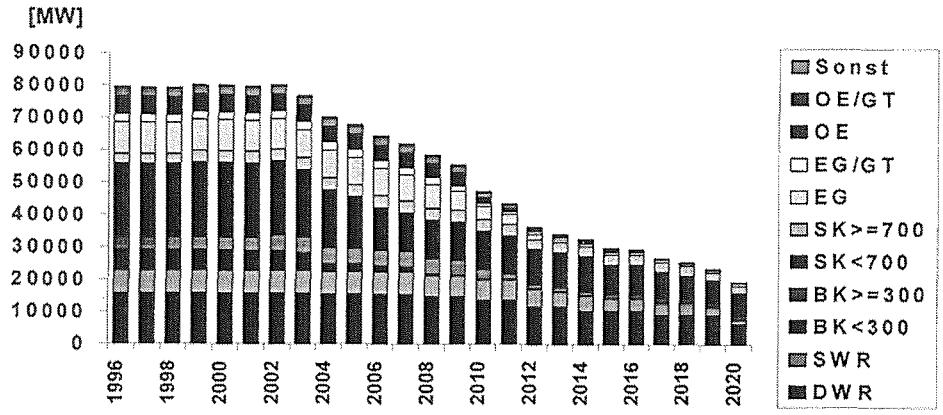


Abb. 7: Elektrische Wirkungsgrade verschiedener Techniken.

Das System der Energieversorgung bietet ebenfalls Spielraum für eine zukünftige Entwicklung. So besteht für einzelne Techniken die Möglichkeit der Substitution, d.h. konkurrierende Techniken können sich gegenseitig ersetzen. Beim PKW gilt dies für Otto- und Dieselmotor, in der Zukunft aber vielleicht auch für die Brennstoffzelle /10/. Derartige Prozesse entstehen meist durch ein Kostengefälle oder durch staatliche Reglementierung (Steuervergünstigungen, niedrigere Grenzwerte für Emissionen).

Die wirtschaftlichen Aktivitäten eines Landes verursachen die Nachfrage nach Energiedienstleistungen. Dafür existiert eine effiziente und leistungsfähige Infrastruktur. Betrachtet man beispielsweise den Bestand an Kraftwerken zur Stromerzeugung, so erkennt man eine große Vielfalt, mit der dem Bedarf und den unterschiedlichen Einsatzzwecken Rechnung getragen wird. Abb. 8 zeigt die Zusammensetzung der Kraftwerke zur öffentlichen Stromerzeugung in Westdeutschland nach unterschiedlichen Typen und Klassen. Die Kernreaktoren (DWR und SWR) und Braunkohlekraftwerke (BK bis 300 MW_{el} und BK über 300 MW_{el}) tragen die Grundlast, Steinkohlekraftwerke (SK bis 700 MW_{el} und SK über 700 MW_{el}) repräsentieren den Bereich der Mittellast, die Spitzenlast wird durch Öl- und Gaskraftwerke (OE und EG) abgedeckt. Wasser und Windkraftanlagen, deren öffentlicher Leistungsanteil bei 9 % liegt, werden in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt. Die Lebensdauer eines Kraftwerks kann durch technische (z.B. Verschleiß und Werkstoffermüdung), wirtschaftliche (nicht mehr wettbewerbsfähig) oder rechtliche (Auslaufen von Genehmigungen) Hindernisse begrenzt sein. Nimmt man aus der Erfahrung heraus eine bestimmte mittlere Lebensdauer von z.B. 35 Jahren für ein einzelnes Kraftwerk an und extrapoliert die zukünftige Entwicklung für den gesamten Bestand, so ergibt sich ausgehend vom Jahr 1995 eine abnehmende Kurve für die gesamte vorhandene Kapazität /14/. Stellt man ihr den sich für die kommenden Jahre abzeichnenden Bedarf gegenüber, so ergibt sich ein Handlungsspielraum, der den Ausgangspunkt für Investitionen bildet.



Quelle: Markewitz et al., 1998.

Abb. 8: Extrapolation der öffentlichen installierten Kraftwerkskapazitäten (netto) für Westdeutschland.

4.2 Politik und Gesellschaft

Die Politik bestimmt in großem Umfang die Randbedingungen für wirtschaftliches Handeln und setzt somit auch den ordnungsrechtlichen Rahmen für die Energiewirtschaft.

Richtlinie für einen Binnenmarkt Elektrizität

Mit der Richtlinie für einen Binnenmarkt Elektrizität möchte die EU die Voraussetzungen für die Verwirklichung eines wettbewerbsorientierten Elektrizitätsmarkts auf dem Weg zu einem Energiebinnenmarkt schaffen. Die Verwirklichung des Binnenmarkts für Elektrizität soll schrittweise erfolgen, damit die Stromwirtschaft sich flexibel und in geordneter Art und Weise dem neuen Umfeld anpassen kann und weil zu berücksichtigen ist, daß die Systeme zur Stromversorgung in den einzelnen Ländern gegenwärtig unterschiedlich aufgebaut sind. Nach dem Prinzip der Subsidiarität wird auf Gemeinschaftsebene ein Rahmen allgemeiner Grundsätze festgelegt, wobei die Festlegung der Modalitäten im einzelnen den Mitgliedstaaten überlassen bleibt, die das System wählen können, das ihrer besonderen Situation am besten entspricht. Der Netzzugang muß jedoch unabhängig von der geltenden Marktorganisation entsprechend dieser Richtlinie offen sein und in den Mitgliedstaaten zu gleichwertigen wirtschaftlichen Ergebnissen und damit zu einer direkt vergleichbaren Marktöffnung sowie einem direkt vergleichbaren Zugang zu den Elektrizitätsmärkten führen. Es werden daher gemeinsame Vorschriften für die Elektrizitätserzeugung und den Betrieb der Übertragungs- und Verteilernetze erlassen.

Die Marktöffnung bei der Elektrizitätserzeugung kann auf der Grundlage zweier Systeme erfolgen, die ein Genehmigungs- bzw. ein Ausschreibungsverfahren vorsehen, wobei objektive, transparente und nicht diskriminierende Kriterien anzuwenden sind. In diesem Rahmen muß die Lage der Eigenerzeuger und der unabhängigen Erzeuger berücksichtigt werden. Jedes Übertragungsnetz muß einem zentralen Management und zentraler Überwachung unterliegen, damit Sicherheit, Zuverlässigkeit und Effizienz des Netzes im Interesse der Erzeuger und Verbraucher gewährleistet sind. Daher muß ein Betreiber des Übertragungsnetzes benannt werden, dem der Betrieb, die Wartung und gegebenenfalls

der Ausbau des Netzes obliegen. Der Betreiber des Netzes muß objektiv, transparent und nicht diskriminierend vorgehen. Die technischen Vorschriften für den Betrieb der Übertragungsnetze und Direktleitungen müssen transparent sein und die Interoperabilität der Netze gewährleisten. Für die Abrufung von Kraftwerkskapazitäten sind objektive und nicht diskriminierende Kriterien festzulegen. Aus Gründen des Umweltschutzes kann der Elektrizitätserzeugung auf der Grundlage erneuerbarer Energien Vorrang eingeräumt werden. Zur Gewährleistung von Transparenz und Nichtdiskriminierung muß die Übertragungsfunktion von vertikal integrierten Unternehmen unabhängig von den anderen Aktivitäten betrieben werden. Das Management der Alleinabnehmer muß von dem der Produktions- und Verteilungsaktivitäten der vertikal integrierten Unternehmen getrennt sein, und der Informationsfluß zwischen den Tätigkeiten des Alleinabnehmers und denen des Betreibers der genannten Produktions- und Verteilungsaktivitäten ist zu beschränken. Die Rechnungslegung aller integrierten Elektrizitätsunternehmen muß ein Höchstmaß an Transparenz aufweisen, insbesondere im Hinblick auf die Feststellung von möglichen mißbräuchlichen Ausnutzungen einer marktbeherrschenden Stellung, die zum Beispiel in anomal hohen oder niedrigen Tarifen oder in der Anwendung unterschiedlicher Bedingungen bei gleichwertigen Leistungen bestehen können. Hierfür muß die Rechnungslegung für jede Aktivität getrennt erfolgen. Die Richtlinie ist im Februar 1997 in Kraft getreten. Nun sind die Mitgliedsländer aufgefordert, die Richtlinie bis Februar 1999 umzusetzen /2/.

Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts

Der Deutsche Bundestag hat am 28.11.1997 ein Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts beschlossen. Dieses Gesetz wird vom Bundesrat abgelehnt. Vermittlungsbemühungen sind bisher erfolglos geblieben. Sollte der Bundestag sich über die Ablehnung durch den Bundesrat durch Beschluß hinwegsetzen, so droht eine Klage vor dem Verfassungsgericht.

Das neue Energiegesetz ändert als sog. "Artikelgesetz" gleich drei Gesetze: Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), das Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB) und das Stromeinspeisungsgesetz (StrEG). Das Energiegesetz will die Binnenmarkt-Richtlinie für Elektrizität der Europäischen Union vom 19.02.1997 in nationales Recht umsetzen. Es ist umstritten, ob die Binnenmarkt-Richtlinie mit den EU-Verträgen vereinbar ist, ob das deutsche Energiewirtschaftsgesetz mit der EU-Richtlinie vereinbar ist und ob das Gesetz der Zustimmung des Bundesrates bedarf.

Das Kartellrecht hat in §103, 103a für Strom, Gas und Wasser Ausnahmen vom Kartellverbot zugelassen. Diese Ausnahmeregelungen werden für Strom und Gas vom Energiegesetz aufgehoben und gelten dann nur noch für Wasser. Dadurch werden alle Demarkationsverträge (Gebietsabsprachen zwischen Versorgungunternehmen) sofort unwirksam, werden Ausschließlichkeitsabreden in Konzessionsverträgen unwirksam, entfällt die kartellrechtliche Preisaufsicht nach § 103. Konzessionsverträge ohne Demarkationsabreden bleiben im übrigen gültig.

Es wird zwei Arten des Netzzugangs geben: den verhandelten Netzzugang[4] („Durchleitung") als Regelfall und als Alternative für den Ausnahmefall das „Alleinabnehmersystem[5]".

Die Stromversorger sind künftig zur Durchleitung verpflichtet. Dritte dürfen bezüglich der Durchleitungskonditionen nicht anders behandelt werden als der Transport eigenen Stroms. Durchleitungen dürfen nur verweigert werden, wenn sie unmöglich bzw. unzumutbar sind, dadurch eine fernwärmeorientierte Kraft-Wärme-Kopplung oder eine regenerative Erzeugungsanlage beeinträchtigt wird, Strom aus dem Ausland durchgeleitet werden soll, ansonsten die Verstromung der ostdeutschen

[4] Negotiated Third Party Access (NTPA)

[5] Single Buyer

Braunkohle gefährdet würde (gültig bis maximal 2005). Die Bundesregierung kann Entgelte und Konditionen für die Durchleitung durch Rechtsverordnung regeln. Dies ist derzeit unter Hinweis auf eine freiwillige Vereinbarung zwischen dem Verband der Stromversorger und Wirschaftsverbänden („Verbändevereinbarung") nicht geplant. Eine kurze Zusammenfassung des Inhalts der zwischen BDI, VIK und VDEW geschlossenen Verbändevereinbarung Durchleitung (VVD) findet man in /24/.

Der Status als Alleinabnehmer kann von der Energieaufsichtsbehörde auf Antrag bis zum Jahr 2005 gewährt werden. Die Kunden können dann keine Stromlieferung mit Dritten vereinbaren, sie bleiben „gefangen". Kauft der Kunde fremden Strom, so wird dieser beim Alleinabnehmer abgeliefert und von diesem auch bezahlt. Kunde und Drittlieferant teilen sich dann den Erlös aus der Zahlung des Alleinabnehmers. Stromkäufe von Kunden können unter denselben Voraussetzungen verweigert werden, wie die Durchleitung.

Das Gesetz sieht eine Trennung von Stromerzeugung und Stromtransport („unbundling") vor. Dafür gibt es drei Vorschriften: Netzbetreiber von Stromnetzen müssen das Übertragungsnetz betrieblich trennen von Erzeugung, Verteilung und sonstigen Aktivitäten. Stromversorger, die Tarifkunden versorgen, müssen eine rechnungsmäßige Entflechtung einführen, d.h. getrennte Konten für Erzeugung, Übertragung und Verteilung führen und auch eine gesonderte Gewinn- und Verlustrechnung für diese Bereiche aufstellen. Alleinabnehmer müssen den Stromankauf getrennt von Erzeugungs- und Verteilungsaktivitäten verwalten.

Wenn Kommunen Unternehmen mit der Stromversorgung beauftragen und/oder ihnen die Nutzung öffentlicher Wege gestatten, dann darf die Versorgung durch andere Stromlieferanten nicht ausgeschlossen werden. Gemeinden dürfen die Vergabe von Wegerechten nur verweigern, soweit Gründe für eine Verweigerung der Durchleitung vorliegen und dies auch nur bis 2005 oder wenn keine Einigung über die Höhe der Konzessionsabgabe erzielt werden kann. Das Netz muß nach Ablauf eines Konzessionsvertrags an den Eigner zurückgegeben werden, unabhängig vom Konzessionsvertrag.

Nach wie vor sind die Stromversorger zur Versorgung von Tarifkunden zu Tarifpreisen verpflichtet, soweit dies wirtschaftlich zumutbar ist und der Kunde keinen eigenen Strom erzeugt (Ausnahme: kleine Kraft-Wärme-Kopplung oder regenerative Erzeugungsanlage) und kein Dritter den Kunden versorgt. Die Versorger müssen alle Gemeindegebiete zu gleichen Tarifen versorgen, es sei denn, die unterschiedlichen Tarife sind sachlich gerechtfertigt, führen zu keiner Preiserhöhung und sind für alle Kunden zumutbar.

Die Aufnahme der Energieversorgung Dritter bedarf in geringerem Maße einer Genehmigung als bisher. Keine energierechtliche Genehmigung zur Betriebsaufnahme brauchen Stromeinspeisungen, Versorger, die keine Tarifkunden versorgen und dies mit regenerativen Energien, Kraft-Wärme-Kopplung oder industrieller Eigenerzeugung leisten, Lieferungen an Konzernunternehmen.

Geändert wird die Abnahme- und Vergütungspflicht. Die Biomasse wird in vollem Umfang einbezogen. Abnahme- und vergütungspflichtig ist künftig der Netzbetreiber. Die Vergütungskosten dürfen den Verteilungs- und Übertragungskosten zugeschlagen werden und damit auf das Entgelt für die Durchleitung aufgeschlagen werden. Übersteigen die Einspeisungen eines Netzbetreibers 5 % seiner Abgabe, so muß der vorgelagerte Netzbetreiber ihm die übersteigenden Kosten vergüten. Gibt es keinen vorgelagerten Netzbetreiber, so entfällt die Abnahme- und Vergütungspflicht. Stellt die Abnahme eine unbillige Härte dar, so geht die Pflicht auf den vorgelagerten Netzbetreiber über[6] /20, 21, 23/.

---

[6] s.a.: http://www.oneworldweb.de/energiedepesche/

Binnenmarkt-Richtlinie Gas

Die EU setzt die Bestrebungen fort, ihre Energiemärkte zu liberalisieren. Nach der Richtlinie für Strom wurde im Dezember 1997 in Brüssel die Binnenmarkt-Richtlinie Gas zur Liberalisierung der europäischen Gasmärkte verabschiedet. Ziel der Richtlinie ist eine stufenweise Marktöffnung über einen Zeitraum von zehn Jahren. Zugelassene Kunden können künftig Erdgas von einem Anbieter ihrer Wahl im Wettbewerb beziehen. Wettbewerbsinstrumente sind Durchleitungen über das vorhandene Netz sowie freier Leitungsbau. Ein Alleinabnehmersystem ist - anders als bei Strom – nicht vorgesehen. Die Gefahr dirigistischer Eingriffe, die einige Mitgliedsstaaten der Europäischen Union (EU) wünschten, wurde abgewehrt. Wie in der Stromrichtlinie stellt eine Schutzklausel sicher, daß es nicht zu Verzerrungen beim Wettbewerb zwischen den Mitgliedsstaaten zu Lasten der deutschen Gasindustrie kommt. Danach können deutsche Gasversorgungsunternehmen bis 2008 Lieferungen über ihr Netz an solche Kunden ablehnen, die in dem anderen Mitgliedsstaat nicht ebenfalls zum Wettbewerb zugelassen wären. Nach Zustimmung des Europäischen Parlaments kann die Richtlinie Mitte 1998 in Kraft treten. Damit ergibt sich folgender Zeitplan:

a) Im Jahr 2000 haben die Mitgliedsstaaten ihre Gasmärkte für alle Stromerzeuger sowie Kunden mit einem Jahresverbrauch von mindestens 25 Mio. m^3 zu öffnen. Auf diese Kunden entfallen 30 % des Gasabsatzes der EU.

b) 2003 ist der Schwellenwert für die zum Wettbewerb zugelassenen Einzelkunden auf 15 Mio. m^3 abzusenken, wodurch die Mindestöffnung des Gasmarktes EU-weit auf 32 % steigt.

c) 2008 ist dieser Schwellenwert auf 5 Mio. m^3 abzusenken, was EU-weit zu einer Marktöffnung von mindestens 40 % führt.

d) Ebenfalls 2008 tritt eine weitere Marktöffnung in Kraft, soweit sich der Rat darauf in Verhandlungen einigt, die rechtzeitig vor diesem Termin beginnen müssen.

Der Kern der Binnenmarkt-Richtlinie Gas wird in der Bundesrepublik bereits mit der Reform des Energierechts umgesetzt, die der Deutsche Bundestag am 28. November 1997 beschlossen hat. Schwellenwerte für zugelassene Kunden sind darin nicht vorgesehen. Vielmehr sollen alle Kunden am Wettbewerb teilhaben können /22/.

Positionen der Parteien in Deutschland

Die politischen Parteien in Deutschland sehen in der Novellierung des Energierechts einen wichtigen Meilenstein. Auch die Anpassung des Stromeinspeisungsgesetzes wird als Fortschritt gewertet. Allerdings gibt es zwischen Regierungskoalition und Opposition auch unterschiedliche Auffassungen. Die Oppositionsparteien halten die Novellierung für nicht weitreichend genug. Insbesondere möchten Bündnis 90/Die Grünen unter dem Gesichtspunkt von Umwelt- und Klimaschutz den Anteil der regenerativen Energieträger deutlich ausbauen und gleichzeitig aus der Kernenergie aussteigen. Die Energiesteuer stellt ein weiteres Element in der Diskussion dar. Während Regierungsparteien und SPD sich eine Energiesteuer nur im europäischen Kontext vorstellen können, sehen Bündnis 90/Die Grünen darin ein Instrument, den Rahmen für eine ökologische Marktwirtschaft zu schaffen. Sie räumen ihm daher auch einen höheren Stellenwert ein. Eine Übersicht über die Positionen von CDU/CSU, FDP, SPD und Bündnis 90/Die Grünen findet man in Energiewirtschaftliche Tagesfragen Heft 7 (1998).

Veränderungen in der Energiewirtschaft werden zunehmend auch danach beurteilt, inwieweit neue Arbeitsplätze geschaffen werden und Arbeitslosigkeit insgesamt verringert werden kann /16/.

5 Perspektiven

An der Diskussion über die zukünftige Entwicklung des Energieversorgung in Deutschland beteiligen sich zahlreiche Institutionen mit unterschiedlichen Standpunkten. Die Analysen differieren auch hinsichtlich der eingesetzten Methoden und Ziele. Aus der Vielfalt der publizierten Szenarien und Prognosen erscheinen zwei besonders gut geeignet, den für Deutschland bestehenden Handlungsspielraum zu charakterisieren.

- Das *Prognos-Institut* geht in seiner 1995 im Auftrag des Wirtschaftsministeriums erstellten Studie davon aus, daß der Verbrauch an Primärenergieträgern in etwa konstant bleiben wird. Ändern wird sich dagegen die Zusammensetzung /3/.
- Das *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie* hat im Auftrag von BUND und MISEREOR Szenarien der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre" weiterentwickelt und möchte damit einen Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung leisten /5/.

Beide Szenarien markieren Eckpositionen. Abb. 9 zeigt den zukünftigen Verbrauch an Primärenergie wie ihn beide Institute erwarten.

Für derartige Analysen muß man eine Reihe von Annahmen über die zukünftige Entwicklung formulieren, die das Ergebnis entscheidend prägen. Wichtige Rahmendaten sind Bevölkerungsentwicklung und wirtschaftliche Entwicklung, aber auch die zu beheizende Wohnfläche und der Bedarf an Verkehrsleistung im betrachteten Zeitraum. So erwartet man, daß die zu beheizende Wohnfläche in Deutschland im Zeitraum 1989 bis 2005 von 2,617 Mrd. m^2 um 17 bis 27 % ansteigen wird. Gleichzeitig könnte der spezifische Wärmebedarf langfristig durch intelligente Wärmeanwendung auf bis zu 35 kWh pro m^2 und Jahr gesenkt werden /11/. Eine ähnliche Entwicklung zeichnet sich im Verkehrssektor ab. Beim Personenverkehr rechnet man ausgehend von 831 Mrd. Pkm mit einem Anstieg um 27 bis 41 %. Beim Güterverkehr erwartet man bezogen auf 356 Mrd. tkm ein Wachstum zwischen 40 und 72 %. Diesen Werten liegen unterschiedliche Erwartungen hinsichtlich der Entwicklung in Alten und Neuen Bundesländern zugrunde.

Auch politisch gesetzte Eckdaten wie die Mindestmenge der für die Stromerzeugung zu verwendenden deutschen Steinkohle oder ob und in welchem Umfang Kernenergie zur Verfügung steht, bestimmen das Ergebnis mit. Mit der Abschaffung des Steinkohlepfennigs im Jahr 1995 und dem Gesetz über Steinkohlebeihilfen von 1997 wurde die Steinkohlepolitik in Deutschland völlig neu geordnet. Die verschiedenen Kohlesubventionen wurden zusammengefaßt. Gleichzeitig wurde die Rückführung der Kohlehilfen des Bundes von heute 8,5 Mrd DM auf 3,8 Mrd. DM im Jahr 2005 einvernehmlich beschlossen. Diese politische Regelung wird voraussichtlich dazu führen, daß die Menge an deutscher Steinkohle, die zur Stromerzeugung eingesetzt wird, deutlich zurückgehen wird.

Schließlich sind die Perspektiven für erneuerbare Energiequellen abzuschätzen. Dies betrifft in Deutschland hauptsächlich den Einsatz von Windkraft sowie die Verwendung von Biomasse und Müll /8/. Das Stromeinspeisungsgesetz hat in den vergangenen Jahren dazu geführt, daß zahlreiche Windkraftanlagen neu gebaut wurden. Insgesamt stand 1997 eine Leistung von 2 GW zur Verfügung. Damit wurden 1997 3,9 TWh Strom ins Netz eingespeist, was einem Anteil von 0,8 % an der gesamten Stromerzeugung in Deutschland entspricht. Die durchschnittliche Leistung einer Anlage liegt gegenwärtig – bei steigender Tendenz - bei 600 kW. Man rechnet damit, daß sich die installierte Leistung bis zum Jahr 2005 höchstens verdoppeln wird.

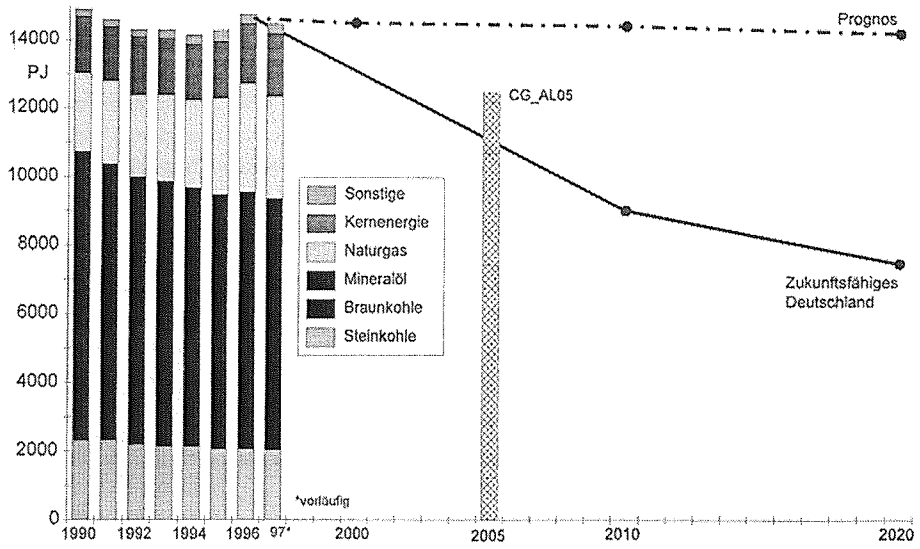


Abb. 9: Zukünftige Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland.

Für die beiden Szenarien von Prognos und vom Wuppertal Institut lassen sich die CO_2-Emissionen abschätzen. Die in der Prognos-Studie ausgewiesene Entwicklung führt dazu, daß Deutschland sein Klimaschutzziel nicht erreichen würde. Das Szenario „Zukunftsfähiges Deutschland" führt – weil als Randbedingung so gefordert - zu deutlich niedrigeren Emissionen; die Autoren sind der Ansicht, daß das Minderungsziel nicht ausreicht und man weitergehende Maßnahmen ergreifen sollte.

Untersuchungen zeigen aber, daß man das Klimaschutzziel im Jahr 2005 mit zusätzlichen Maßnahmen erreichen könnte. Es gibt zahlreiche Pfade, die zum Ziel führen, sich aber in ihren Strukturen und den aufzuwenden finanziellen Mitteln stark unterscheiden. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes IKARUS wurden computergestützte Werkzeuge geschaffen, mit denen dies genauer untersucht werden kann. Als Ergebnis liegt ein Bündel von Szenarien vor aus dem die Szenarien CG_AL05 und CS_AL05 ausgewählt wurden /7, 25/. Rahmendaten und Referenzentwicklung (Basisfall) für die IKARUS-Szenarien ähneln denen der Prognos-Studie. Beide Szenarien unterscheiden sich darin, wie das CO_2-Minderungsziel erreicht werden soll:

- Bei CS_AL05 haben alle Sektoren in gleichem prozentualem Umfang zum Minderungsziel beizutragen.
- Bei CG_AL05 kann ein Ausgleich zwischen Sektoren stattfinden, das Minderungsziel muß nur in seiner Gesamtheit erreicht werden. Sektorübergreifend werden die kostengünstigsten Optionen gewählt.

Für das Szenario CG_AL05 ist der sich ergebende Verbrauch an Primärenergie in Abb. 9 dargestellt. Die Mehrkosten pro Jahr, die bezogen auf den Basisfall für zusätzliche Maßnahmen aufzubringen sind, sind nach Sektoren in Abb. 11 aufgeschlüsselt. Während bei der Primärenergie die Unterschiede nicht so deutlich hervortreten, sind sie bei den Mehrkosten deutlich sichtbar. Die Gesamtkosten liegen beim Szenario CS_AL05 deutlich höher. Die Kosten für Primärenergieträger sinken zwar schon beim Szenario CS_AL05, liegen aber bei CG_AL05 noch einmal niedriger, da insgesamt weniger Primärenergie benötigt wird. Auffällig ist der Sektor Verkehr. Dort sind Maßnahmen kostenintensiv; die im Szenario CS_AL05 größere Menge an zu vermeidendem CO_2 führt zu mehr als doppelt so hohen Kosten.

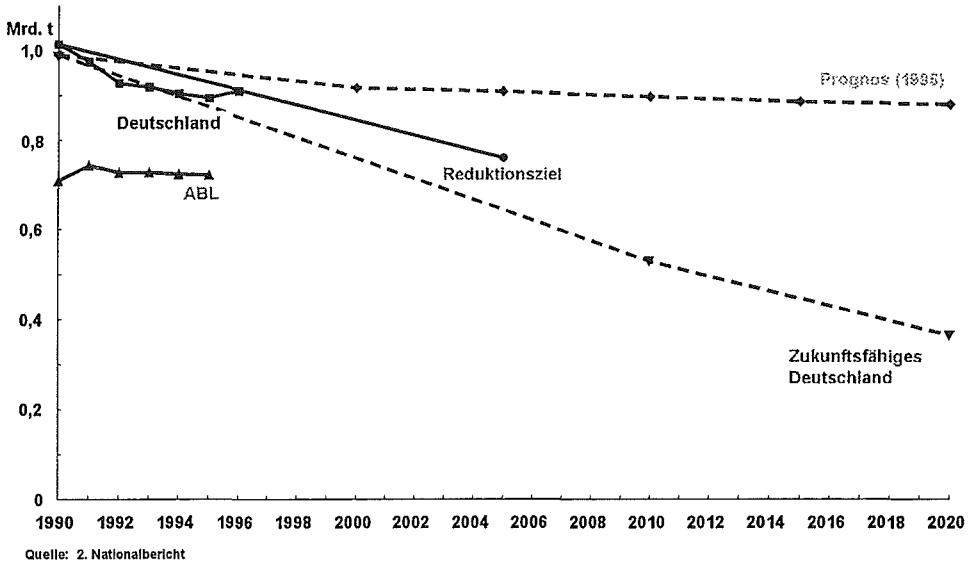


Abb. 10: Zukünftige Entwicklung der CO_2-Emissionen.

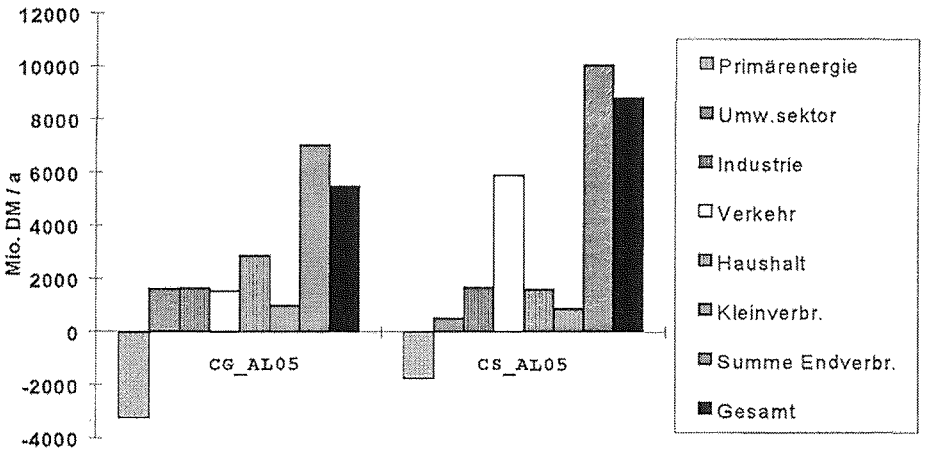


Abb. 11: Mehrkosten Reduktionsfälle 2005 ABL (Bezug REF_AL05).

Auf Basis dieser Ergebnisse kann man jetzt - ebenfalls mit den im IKARUS-Projekt entwickelten Werkzeugen – die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der beiden Szenarien analysieren und schließlich Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt abschätzen.

Die Diskussion hat sich inzwischen weiterentwickelt. In Zusammenhang mit dem Begriff *Nachhaltige Entwicklung* wird untersucht, wie ein Energiesystem aussehen sollte, das gleichgewichtig ökonomische, ökologische und soziale Aspekte berücksichtigt. Auch hier ist der Bedarf an fundierter Systemanalyse noch sehr groß.

6 Literatur

(1) L. Balling, Die Gasturbine gibt Schubkraft. Siemens Standpunkt, 9, 1 (1996) 16-19.

(2) J. F. Baur, Die Elektrizitätsbinnenmarkt-Richtlinie. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47, 1/2 (1997) 624-629.

(3) Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi), Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa – Perspektiven bis zum Jahr 2020. Bonn 1995.

(4) Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi), EnergieDaten 97/98. Bonn 1997.

(5) BUND – Misereor, Zukunftsfähiges Deutschland: Ein Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung. Birkhäuser, Basel 1997.

(6) B. Geiger – U. Wagner, Strom – eine umweltschonende Energieversorgung von der Erzeugung bis zur Anwendung. Siemens Power Journal 6, 4 (1997) 5-10.

(7) J.-Fr. Hake, The IKARUS Analysis Framework. In Druck.

(8) J.-Fr. Hake – K. Schultze (Hrsg.), Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft. Forschungszentrum Jülich, Jülich 1997.

(9) H.-D. Harig, Leistungsanforderungen an die Kraftwirtschaft Europas. VGB Kraftwerkstechnik 73, 1 (1993) 11-16.

(10) B. Höhlein, Vergleichende Gesamtbetrachtung von PKW-Antrieben und Kraftstoffketten. Beitrag zum 4. Ferienkurs „Energieforschung", Jülich 1998.

(11) E. Jochem, Geringerer Wärmebedarf – eine Chance für Nicht-Lemminge. Siemens Standpunkt, 5, 6 (1992) 8-13.

(12) M. Kleemann – M. Meliß, Regenerative Energiequellen. Springer Verlag, Berlin 1993.

(13) C.S. Maniatopoulos, European Energy Policy – The Key Issues. IAEE Newsletter, Spring 1995.

(14) P. Markewitz – A. Nollen – Th. Polklas, Die Altersstruktur des westdeutschen Kraftwerkparks. BWK 50, 5/6 (1998) 38-42.

(15) D. Oertel, Zum Entwicklungsstand der Brennstoffzellen-Technologie. TAB Arbeitsbericht Nr. 51. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Bonn 1997.

(16) W. Pfaffenberger, Energy and labour market. Beitrag zum 4. Ferienkurs „Energieforschung", Jülich 1998.

(17) R. Pruschek et al., Thermodynamische Analyse von Kombi-Prozessen mit integrierter Kohlevergasung und CO_2-Rückhaltung. VGB Kraftwerkstechnik 73, 1 (1993) 577-583.

(18) K. Riedle – R. Taud, Fossilbefeuerte Kraftwerke bleiben tragende Säule bei der Energieerzeugung. Siemens Power Journal 6, 2 (1997) 19-25.

(19) K.J. Schmatjko – E. Tenckhoff, Werkstoffkonzepte – eine Grundlage für den energietechnischen Fortschritt. Siemens Power Journal, 3, 4 (1997), 9-13.

(20) R. Scholz, Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46, 7 (1996) 458-459.

(21) R. Scholz, Aktueller Stand, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47, 9 (1997) 550-552.

(22) R. Scholz, Gasbinnenmarktrichtlinie – Einigung des Ministerrates vom 8.12.1997. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 48, 1/2 (1998) 113-114.

(23) R. Scholz, Energierechtsnovelle – wesentliche Neuerungen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 48, 6 (1998) 425-426.

(24) R. Scholz, Verbändevereinbarung Durchleitung endgültig unterzeichnet. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 48, 7 (1998) 475.

(25) G. Stein – B. Strobel, Politikszenarien für den Klimaschutz. Forschungszentrum Jülich, Jülich 1997.

(26) C. Tauber – R. Jablonski, Brennstoffzellen aus Sicht eines überregionalen EVU. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 48, 1/2 (1998) 68-74.

»Technik- und Umwelteinstellungen in Europa«[1]

Michael M. Zwick

Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg

Bereich: Technik, Gesellschaft, Umweltökonomie

1 Problemstellung

In Zeiten der Globalisierung von Märkten, der Verschärfung des internationalen Wettbewerbs, hoher Staatsverschuldung, Massenarbeitslosigkeit und drückender Soziallasten gewinnt die Debatte um den »Wirtschaftsstandort Deutschland« an Schärfe. Neben der Senkung von Produktionskosten erscheinen vielen Protagonisten aus Politik und Wirtschaft vor allem wissenschaftlich-technologische Innovationen und ihre schnelle industrielle Umsetzung für das rohstoffarme High-tech-Land Bundesrepublik als Mittel der Wahl.[2] In diesem Zusammenhang wird allerdings beklagt, daß sich in der Bundesrepublik die Rahmenbedingungen zur Erreichung dieser Ziele eher verschlechtert haben. In ihren Positionspapieren entfaltet die Industrie ein breites Spektrum an Kritik gegenüber den verschiedensten gesellschaftlichen Bereichen - so z.B. politisch-administrative Überregulierung bei Planung, Bau und Betrieb (groß-) technischer Anlagen, die unzureichende Bereitstellung von Risikokapital oder mangelhaften Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen in marktfähige Produkte.[3] Ganz oben an steht freilich der an die Öffentlichkeit adressierte Vorwurf der Risikoscheu und mangelnden Technikakzeptanz, eine Gemengelage, für die beispielsweise der Vorsitzende des Kuratoriums des »Fonds der Chemischen Industrie« einen »gesellschaftlichen Wertewandel«[4] und übertriebene Umweltängste verantwortlich macht: »In den wohlhabenden Industrieländern - ganz besonders in Deutschland - hat sich die Einstellung vieler Menschen zu Unternehmertum, Industrie, Technik, Forschung und Wissenschaft grundlegend geändert. In neuen Technologien werden heute bei uns vor allem Gefahren und Bedrohungen gesehen, weniger ihr Nutzen. Das Wort ›Angst‹ ist weltweit zu einem Synonym für die deutsche Einstellung geworden. Der Ruf ›zurück zur Natur‹ gibt einen Trend vor, der für eine rohstoffarme Nation wie Deutschland eine fundamentale Bedrohung darstellt.« (Büchel 1995: 4)

Die nachfolgenden Erörterungen sollen einen Beitrag zur Klärung dieser Vorwürfe leisten: Ist man in Deutschland besonders technikfeindlich? Sind hierzulande Umweltängste besonders ausgeprägt und wenn ja, bilden sie - wie unterstellt -, zusammen mit einem gesellschaftlichen Wertewandel die Grundlage für die behaupteten überdurchschnittlichen Ressentiments gegenüber Technik?

---

1 Ich danke Ortwin Renn für Anregungen, die bei der Erstellung dieses Beitrags eine wertvolle Hilfe waren und Ekaterina Kouli für die Diskussion des griechischen Sonderfalles. Für die wie stets gewissenhafte Lektorierung des Textes bin ich Sabine Mücke zu Dank verpflichtet. Für die Inhalte trägt der Verfasser die alleinige Verantwortung. Die vorgetragenen Argumente müssen nicht in jedem Fall mit der Meinung der Akademie für Technikfolgenabschätzung übereinstimmen.

2 Vgl. Henkel 1996.

3 Eine aktuelle Zusammenfassung bieten Renn/Zwick 1997: 2.3.2.

4 Büchel 1995: 4.

2 Methodische und konzeptionelle Vorbemerkungen zum Ländervergleich

Der Vorwurf fordert zu einem empirischen Vergleich Deutschlands mit anderen Staaten heraus. Hierzu bedarf es zum einen weitestgehend vergleichbaren Datenmaterials. Zum anderen gebietet es die Fairneß, solche Länder in die Analysen einzubeziehen, die gleichfalls zu den entwickelten westlichen Industriegesellschaften zählen und über vergleichbare sozioökonomische wie kulturelle Standards verfügen. Ein Vergleich der Bundesrepublik etwa mit Dritte-Welt-Ländern würde dem Gebot der Fairneß und Redlichkeit zuwiderlaufen, weil es Hinweise dafür gibt, daß beispielsweise »materielles Elend und Risikoblindheit zusammen (fallen)«. (Beck 1986: 55) Der Export von Risikoindustrien, die in den hochentwickelten Ländern keinen Umwelt- und Sicherheitsstandards standhielten und für die kaum Legitimation vorausgesetzt werden kann, dienen dort oftmals als Chance der wirtschaftlichen Entwicklung: In nicht wenigen Dritte-Welt-Ländern wird »der Teufel des Hungers mit dem Belzebub der Risikopotenzierung bekämpft«.[5]

Beide Bedingungen - die Verfügbarkeit vergleichbaren Datenmaterials und kompatible Standards - sprechen für einen Vergleich der Umwelt- und Technikeinstellungen auf europäischer Ebene.[6] Als Datenquellen wurden die Eurobarometer 1993 und 1995 herangezogen[7] und um ausgewählte ökonomische, soziale und ökologische Strukturdaten ergänzt.[8] Die einzelnen Datenbestände wurden zu einem aggregierten Datenfile verschmolzen, der vergleichende Analysen auf Länderebene ermöglicht, Auswertungen auf Individualebene hingegen ausschließt. Mit dem - durch die Datenstruktur erzwungenen - Verzicht auf die Interpretation von Technik- und Umwelteinstellungen aus gruppen- bzw. individual-differenzierender Perspektive, soll freilich keineswegs dessen Belanglosigkeit behauptet werden - im Gegenteil.[9]

Der aggregierte Datensatz umfaßt folgende Länder: Finnland, Schweden, Dänemark, Nordirland, Irland, Großbritannien, die Niederlande, Belgien, Luxemburg, Westdeutschland, Ostdeutschland, Österreich, Frankreich, Italien, Spanien, Portugal und Griechenland. In jedem dieser Länder wurden Zufallsstichproben gezogen und jeweils etwas mehr als 1.000, in Luxemburg 500 und in Nordirland 300 Interviews realisiert. Die auf 16 Fälle eingedampften Daten - pro Land ein Fall - stellen jeweils einen repräsentativen Querschnitt der Landesbevölkerung dar. Bei multivariaten Analysen kann es leicht vorkommen, daß ein oder mehrere Merkmale für ein Land nicht erhoben wurden; dies gilt vor allem für die zusätzlich erfaßten Strukturdaten. Das betreffende Land muß dann aus den jeweiligen Berechnungen ausgeschlossen werden.[10]

---

5 Beck 1986: 55. Der Autor spricht in diesem Zusammenhang auch von einer »Risikoverelendung der Dritten Welt« (58).

6 Der Vollständigkeit halber sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, daß sich das Klischee vom japanischen Technikfreak, empirisch betrachtet, als Märchen erweist. Genau besehen hinkt aber auch der Vergleich mit den oftmals als vorbildhaft unterstellten US-amerikanischen Verhältnissen, weil dabei kulturelle Besonderheiten, Widerstände gegen Technik auszudrücken, übersehen werden können, so etwa die ausgeprägte ›Schadenersatzkultur‹ in den USA. Vgl. exemplarisch Renn/Zwick 1997, Kistler 1991: 65f. und Hennen 1994: 12.

7 Ich danke dem Zentralarchiv für Empirische Sozialforschung (ZA) in Köln für die Bereitstellung der Datensätze.

8 The World Resources Institute 1997 und UNDP 1996.

9 Vgl. hierfür ausführlich Zwick 1997.

10 Für methodische Besonderheiten bei Analysen auf Aggregatdatenbasis vgl. Küchler 1979. Bei Vorliegen von Aggregatdaten erhält man im vergleich zu Individualdaten in aller Regel wesentlich höhere Zusammenhangsmaße und - wegen der künstlich reduzierten Fallzahl - geringe Signifikanzgrade. Das Signifikanzniveau wird daher für alle Analysen auf $\alpha < 0.1$ festgelegt.

Bei der Konzeption der Eurobarometer-Erhebungen wurde große Sorgfalt darauf verwendet, die Items so zu formulieren und zu übersetzen, daß die Fragen in den einzelnen Sprachen auf möglichst identische Sinngehalte und Sachverhalte verweisen und von den Befragten in ähnlicher Weise verstanden werden. Gleichwohl muß eingeräumt werden, daß der Idealfall einer vollständigen semantischen Entsprechung realiter kaum erreicht werden kann. Die Interpretation der Ergebnisse erfordert daher eine gewisse kritische Distanz.

3 Technikwahrnehmung und -beurteilung in Europa

3.1 Technikakzeptanz - die Akzeptanz welcher Technik?

Technik ist nicht gleich Technik. In Deutschland wie in den europäischen Nachbarländern weiß die Öffentlichkeit trefflich nach Technologien und Anwendungsfeldern zu differenzieren. Besonders unkritisch schneiden hier wie dort technische Artefakte aus der Gruppe der *Produkt-, Alltags- oder Freizeittechnik* ab. Waschmaschine, Kühlschrank, Telefon oder Fahrrad erfreuen sich nahezu flächendeckender Beliebtheit und auch gegen Bohrmaschine oder HiFi-Anlage gibt es bei den europäischen Nutzern praktisch keine Ressentiments. Der »Akzeptanztest« für ein technisches Gerät spielt sich am Markt ab. Wird ein Produkt nicht gekauft, dann kann das zumeist nicht auf Widerstände in der Bevölkerung zurückgeführt werden, vielfach ist einfach nur der Grenznutzen eines neuen Produktes gegenüber konventionellen Lösungen zu gering. Ein Beispiel dafür bietet das Btx, das sich als teures Informationsmedium nicht gegen Zeitungen, Zeitschriften, Rundfunk, Fernsehen und Videotext durchsetzen konnte.[11]

Annähernd ähnlich verhält es sich mit *Technik in der Arbeitswelt.* Hier entscheiden nicht der Markt und das Käuferverhalten über Erfolg oder Mißerfolg eines Produktes, vielmehr kommt es darauf an, ob und in welchem Zeitraum Technologien in der Arbeitswelt adaptiert und adäquat angewendet werden. Hierbei kann es zu Widerständen kommen, die beispielsweise mit schlechterer Ergonomie, mit höheren psychosozialen Belastungen durch monotonere Arbeit und größere Isolation der Beschäftigten, durch gesundheitliche Beeinträchtigungen, etwa durch notwendige Klimatisierung von Räumen, mit Befürchtungen bzgl. Überlastung oder Unterforderung, aber auch mit einer Dequalifizierung von Beschäftigten begründet werden können. Die Einführung von EDV-Arbeitsplätzen in Büros war in der ersten Hälfte der 80er Jahre in der Bundesrepublik ein Beispiel für eine umstrittene Technik im Arbeitsleben.[12] Daneben stehen all jene »Technologien der Arbeitswelt« im Kreuzfeuer, die verdächtigt werden, Arbeitsplätze zu vernichten. Von solchen, vereinzelten Ausnahmen abgesehen, kann in Deutschland auch in puncto Technik am Arbeitsplatz nicht von einer »Akzeptanzkrise« gesprochen werden - solche Techniken werden im europäischen Maßstab hierzulande allenfalls etwas verzögert eingeführt und angenommen.[13] Aktuelle inifes-Daten zeigen, daß in Deutschland Technik im Arbeits- wie im Freizeitbereich auf breite Zustimmung in der Bevölkerung stößt. Nicht einmal 10% der Deutschen äußerten 1994 eine ablehnende Haltung gegenüber Technik in diesen beiden erstgenannten Bereichen.[14]

---

[11] Vgl. Friedrichs 1991: 128.

[12] Vgl. Heidenreich (Hg.) 1993. Zur Karriere des PC von der Arbeits- zur Wohnzimmer- und Spieltechnologie vgl. Jaufmann 1991: 87ff., Hennen 1994: 9 und Renn 1995: 219.

[13] Vgl. Renn/Zwick 1997: 25.

[14] Quelle: inifes, zit. in Hennen 1994: 8.

Bleiben die *Groß- und Risikotechnologien*. Auf sie richtet sich am ehesten der Argwohn der Bevölkerung, wobei es auch hier weiterer Differenzierungen bedarf. Keineswegs alle (potentiellen) Großtechnologien stehen nämlich im Kreuzfeuer der Kritik: Regenerative Energien beispielsweise, oder Informations- und Kommunikationstechnologien, die ebenfalls im großen Maßstab und nahezu ›flächendeckend‹ eingesetzt werden (können), sind weitgehend akzeptiert - allenfalls auf lokaler Ebene regt sich gelegentlich der Widerstand von Betroffenheitsaktivisten, etwa gegen die »Verspargelung der Landschaft« durch Windenergieanlagen.[15] Vor allem dann, wenn Großtechnologien als externe *Risikotechnik* wahrgenommen wird, muß mit Akzeptanzproblemen und Widerständen in der Öffentlichkeit gerechnet werden.

Abb. 1: Technikbereiche und Parameter ihrer Akzeptanz

Technik	**Akzeptanz-bereich**	**Akzeptanztest**	**Konfliktthemen**
Produkt-, Alltags- und Freizeittechnik	Markt	Nachfrage, Kauf	Qualität, Haftung
Technik im Arbeitsbereich	Betrieb	Aktive Nutzung	Mitbestimmung, Anpassungs-geschwindigkeit, Qualifikation
Externe (Groß-)Technik	Politik	Politische Partizipation	Interessen, Rechte, Zuständigkeiten,
• »weiche Großtechnik«		a) konventionelle (Abstimmungen)	Akzeptabilität von Risiken und Gefahren
• »externe Risikotechnologien«		b) unkonventionelle (Protestverhalten)	Verzerrung von organisierten Interessen, Legitimität vs. Legalität

Quelle: Nach Renn, O. und Zwick, M.M. 1997: Risiko- und Technikakzeptanz: 24.

Aus den genannten Gründen kann die Diskussion um Technikakzeptanz sinnvollerweise nur in bezug auf Groß- oder Risikotechnologien geführt werden. Alle nachfolgenden Analysen haben ausschließlich diese Technik- und Anwendungsbereiche zum Gegenstand.

[15] Exemplarisch: Stock, U. 1994.

3.2 *Was halten die Europäer von Groß- und Risikotechnologien?*

Die empirische Ausgangslage

Betrachten wir in Bild 1 zunächst Techniken, die zwar im großen Maßstab eingesetzt werden können, die von seiten der Bevölkerung mehrheitlich aber nicht als Risikotechnologien, d.h. mit (globalen) Katastrophenpotentialen in Verbindung gebracht werden. Im Eurobarometer-Datensatz von 1993 fallen hierunter Solarenergie, Informations- und Telekommunikationstechnologien, die technische Herstellung neuer Materialien und Substanzen, sowie die Weltraumforschung.

Alle diese Technologien werden europaweit[16] allenfalls von Minderheiten abgelehnt. Am stärksten trifft die Akzeptanz für die Telekommunikation zu. Im europaweiten Durchschnitt wird sie von lediglich 2% der Befragten abgelehnt. Die häufigsten Ressentiments finden sich noch in Westdeutschland mit 5.2% der Befragten, die glauben, daß diese Technik das Leben in Zukunft schlechter machen wird. Doch die ablehnenden Urteile sind auch hier so selten, daß von einer »Akzeptanzkrise« schlechterdings nicht gesprochen werden kann.

Ähnliches gilt für die Nutzung der Sonnenenergie. Nur knapp 4% der Bevölkerung der Länder, die sich am Eurobarometer beteiligten, mochten ihr kein positives Urteil ausstellen. Mit besonderem Optimismus begegnet man dieser regenerativen Energie in Deutschland: Nur 0.7% der Ost- und 1.3% der Westdeutschen beurteilten sie hinsichtlich der Zukunft negativ - die niedrigsten Werte aller untersuchten Länder. Interessant ist in diesem Zusammenhang der ›Ausreißer‹ Griechenlands: 11.1% der Griechen äußerten Vorbehalte gegenüber der Sonnenenergie. Ob sich dahinter eine Art antizipierter Betroffenheitsmentalität oder eine generalisierte Abneigung gegenüber (Groß-)Technik verbirgt, kann zunächst noch nicht beantwortet werden.

Auch die Entwicklung »neuartiger Materialien und Substanzen« wird in den meisten westeuropäischen Ländern unkritisch gesehen. Nur etwa 6% aller Befragten äußerten Skepsis. Überproportionale Zurückhaltung findet man in Italien und wiederum mit deutlichem Abstand in Griechenland: 12% der Italiener und 18.3% der Griechen sehen darin keine positiven Vorzeichen für die Zukunft.

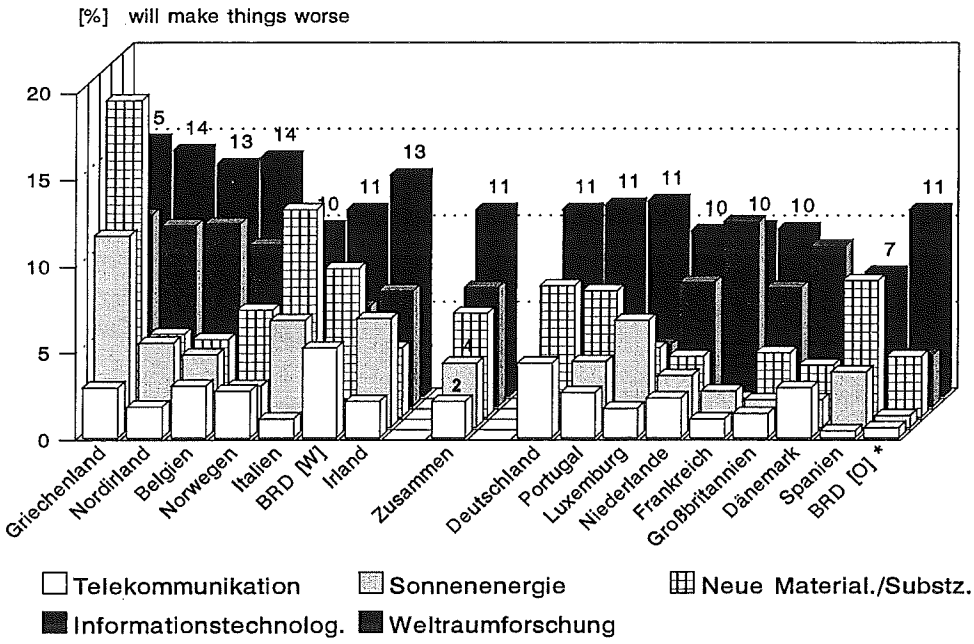
Auf einem vergleichbaren Akzeptanzlevel bewegen sich die Computer- und Informationstechnologien. Gleichfalls nur eine Minderheit von knapp 7% in den befragten Ländern stehen ihr mit Vorbehalten gegenüber. In Ostdeutschland liegt man mit 3% klar unter und in Westdeutschland mit 5.8% nahe am europäischen Mittel. Besonders kritisch ist man erneut in Griechenland mit 11.1% Ablehnung, knapp gefolgt von Frankreich, Nordirland, Belgien, Norwegen und Dänemark. Computer- und Informationstechnologien werden in besonderem Maße mit der Modernisierungsfähigkeit von Gesellschaften in Verbindung gebracht. Vor allem in modernen Dienstleistungsgesellschaften stellen sie ein wichtiges Hilfsmittel im Arbeitsleben dar. Insofern ist der Befund eines knapp überproportionalen Zuspruches von seiten der deutschen Bevölkerung ein Indiz für die Aufgeschlossenheit gegenüber neuen Technologien in der Arbeitswelt. Von einer besonderen Technikfeindlichkeit der Deutschen kann hier keine Rede sein.

Gut jeder zehnte Europäer äußert sich skeptisch wenn es um die »Erforschung des Weltraums« geht. Bei der Weltraumforschung liegen die Unterschiede in der Wahrnehmung und Beurteilung europaweit weniger weit auseinander als beispielsweise bei den Computer- und Informationstechnologien. Am kritischsten gibt man sich erneut in Griechenland, besonders aufgeschlossen in Dänemark und Norwegen. Die Deutschen aus den östlichen und westlichen Landesteilen liegen gleichauf im Mittel der europäischen Nachbarländer.

---

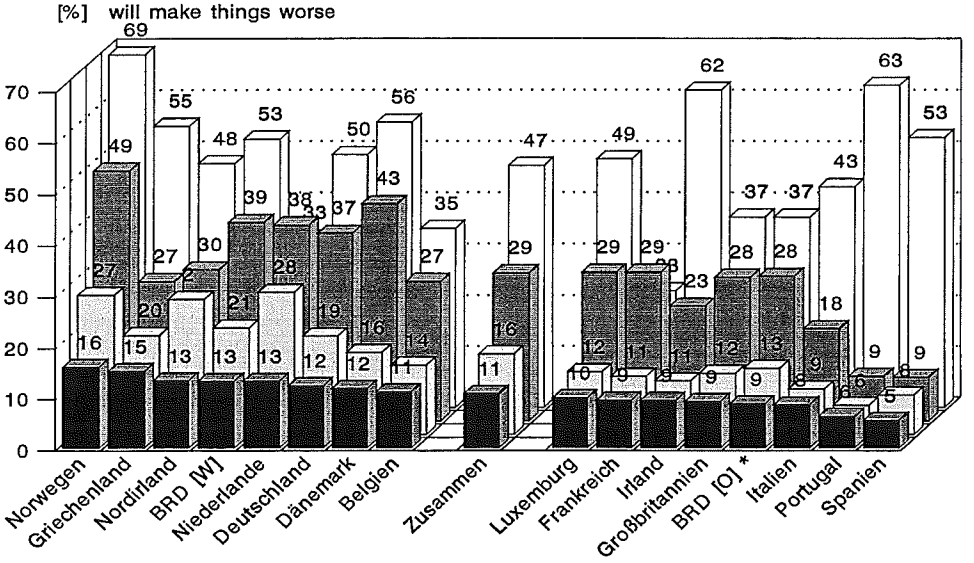
16 Hier wie im folgenden sind damit die in die Untersuchung einbezogenen Länder gemeint.

Bild 1: Die Ablehnung »weicher« Großtechnologien in ausgewählten europäischen Ländern



Quelle: Eurobarometer 1993, N = 14.032. *) Gewichtung. BRD [O] = 0.2 BRD [W].

Bild 2: Die Ablehnung von Bio- und Gentechnik in ausgewählten europäischen Ländern



Quelle: Eurobarometer 1993, N = 14.032. *) Gewichtung. BRD [O] = 0.2 BRD [W].
**) Telekommunik., Solarenergie, neue Substanzen, Informations-, Weltraum-, Bio- und Gentechnologie

Alle 5 ›weichen‹ Technologien zusammengenommen erhält man die in Bild 1 aufgelistete Reihenfolge: Bei allen 5 dargestellten Technologien erweisen sich die Griechen, Nordiren, Belgier und Norweger am kritischsten, die Briten, Dänen, Spanier, allen voran aber die Ostdeutschen am optimistischsten. Faßt man Ost- und Westdeutschland zusammen, dann wird erkennbar, daß Deutschland eine mittlere Position innerhalb der untersuchten europäischen Länder einnimmt, wobei das freundliche Bild vor allem dem Votum der ostdeutschen Befragten zu danken ist.[17]

Als ein Beispiel für eine moderne Großtechnologie, die in der Öffentlichkeit als Risikotechnik wahrgenommen wird[18], fungiert in Bild 2 die Gentechnik. Die Frage, ob die Gentechnik die Zukunft verbessern oder verschlechtern wird, wurde als Split abgefragt: Die eine zufällig ausgewählte Hälfte der Befragten eines jeden Landes hatte die »Gentechnik« einzuschätzen, bei der anderen, zufällig ausgewählten Hälfte der Befragten wurde die etwas euphemistische Formulierung »Biotechnologie« verwendet.

Obwohl beide Technologien in hohem Maße etwas Ähnliches bezeichnen - die Gentechnik kann als eine echte Teilmenge der Biotechnologie verstanden werden - unterscheidet sich das Antwortverhalten der Befragten - bei denen eine genaue sachbezogene Differenzierung nur teilweise unterstellt werden kann - je nachdem, welcher Stimulus zur Anwendung kam, in erheblichem Maße. Im europäischen Mittel lehnen knapp 16% die »Biotechnologie«, aber 29% die »Gentechnik« ab (Bild 2). Bei der Wahrnehmung und Bewertung von Technik darf also nicht ausschließlich Sachkenntnis und daran orientierter Realismus unterstellt werden. Technik wird auch über ihren symbolischen Wert wahrgenommen und hierbei kann die gewählte Nomenklatur durchaus eine gewisse Rolle spielen.

Der Gentechnik versagten 49% der Norweger, gefolgt von 43% der Dänen, 39% der Westdeutschen und 38% der Niederländer ihre Anerkennung. Als besonders gentechnikfreundlich präsentierten sich Portugiesen und Spanier mit nur jeweils 9% Bedenkenträgern, gefolgt von den Italienern mit einem doppelt so hohen Anteil skeptischer Äußerungen. Die Ostdeutschen liegen in ihrem Antwortverhalten etwa im Mittel aller Befragten, nimmt man Ost- und Westdeutschland zusammen, dann belaufen sich die Anteile deutscher Skeptiker auf 37%. Dieser Wert liegt zwar deutlich über dem europäischen Mittel, er rechtfertigt es aber andererseits auch nicht, von einer besonderen Technikfeindlichkeit der Deutschen zu sprechen. Dies wird insbesondere auch deutlich, wenn man einen Indikator über 7 in Bild 1 und Bild 2 enthaltene Technologien berechnet. Die vordere, schwarze Balkenreihe in Bild 2 enthält die mittlere landesspezifische Wahrscheinlichkeit für die Ablehnung einer der 7 aufgeführten Technologien. Insgesamt sind die Unterschiede eher moderat. Am technikkritischen Ende der Skala befinden sich Norwegen, Nordirland, die Niederlande, Deutschland und Dänemark sowie einmal mehr die Griechen. Als besonders technikaufgeschlossen präsentieren sich die südlichen Länder Spanien, Portugal, Italien, aber auch der Osten Deutschlands.

Der Vollständigkeit halber sei auch noch ein Blick auf eine ›alte‹ Risikotechnologie geworfen, die wegen einer andersartigen Frageformulierung in unseren Indikator aber keinen Eingang fand: Mit Blick auf die Kernenergie wurden drei Statements zur Einschätzung vorgelegt. »Es ist lohnend, die Kernenergie weiterzuentwikeln«, »die Entwicklung der Kernenergie bringt unakzeptable Risiken mit sich und sollte aufgegeben werden« und »man sollte die Kernenergie weder weiterentwickeln noch aufgeben«. In Bild 2 sind die Anteile derer wiedergegeben, die sich für das zweite Statement entschieden haben. Bild 2 zeigt starke Schwankungen im Antwortverhalten, die aber nur bedingt dem

---

[17] In den Bildern 1 und 2 wurde der Wert für die gesamte Bundesrepublik aus Ostdeutschland (20%) und Westdeutschland (80%) errechnet.

[18] Vgl. Zwick 1998.

Muster der Einschätzung der Gentechnik folgen. Am kritischsten sind die Norweger, gefolgt von den Iren und Portugiesen, am unteren Ende der Rangfolge findet man die Belgier (35.1%), die Niederländer (33.3%) sowie Franzosen (22.9%). In Deutschland unterscheidet man sich einmal mehr kaum vom europäischen Mittel, etwas kritischer ist man im Westen, wohingegen die Ostdeutschen der Kernenergienutzung sogar besonders freundlich gegenüberstehen. Von einer bemerkenswerten Risikoscheu oder Technikfeindlichkeit der Deutschen kann im europäischen Maßstab abermals nicht gesprochen werden.

Alle nachfolgenden Analysen erstrecken sich auf vor allem auf die Wahrnehmung und Bewertung der *Gentechnik*. Zum einen, weil sich die Akzeptanz der ›weichen‹ Großtechnologien auf relativ hohem Niveau bewegt, zum anderen wird mit dem Fokus auf die Gentechnik dem Umstand Rechnung getragen, daß die Bewertungsunterschiede bei den weichen Techniken eher bescheiden sind. Ein dritter Grund, sich besonders mit dieser Querschnittstechnologie zu beschäftigen, ist in dem innovativen Charakter der Gentechnik zu sehen. Mit der Kernenergie konnten hingegen in verschiedenen europäischen Ländern zum Teil jahrzehntelange Erfahrungen gesammelt werden. Sie durchlief teilweise starke Politisierungs- und Mobilisierungszyklen, wodurch ein unübersichtliches Geflecht von Einflußgrößen auf die Wahrnehmung und Bewertung dieser Technik und teilweise stark verhärtete Fronten entstanden sind. Bei ihrer Beurteilung geht es deshalb auch um die politische Kultur und Strukturmerkmale des politischen Systems eines Landes, Faktoren, die eine solch komplexe Gemengelage schaffen, die an dieser Stelle nicht aufgelöst werden kann. Bei der Gentechnik stößt man hingegen auf größere semantische Offenheit, mehr Differenzierungsbedarf ja nach Anwendungsfeld und wahrscheinlich auf weit weniger verhärtete Fronten, da eine mit der Kernkraft vergleichbare Politisierung und Mobilisierung (noch) nicht stattgefunden hat. Steht die Kernenergienutzung für eine Technik der modernen Industriegesellschaft, so haftet der innovativen Hochtechnologie Gentechnik ein futuristisches Stigma an: Wie steht die Öffentlichkeit der einzelnen Länder zur weiteren technologischen Modernisierung? Ob die Gentechnik eher hoffnungsfrohe oder skeptisch-zurückhaltende Reaktionen hervorruft, kann einen Anhaltspunkt dafür liefern, wie es die Öffentlichkeit mit der gesellschaftlichen - und das heißt auch technologischen - Modernisierung ihres Landes hält.

Zwei Muster und eine Ausnahme - zur Interpretation der Technikakzeptanz in Europa

Am Beispiel der Gentechnik werden zwei interessante Muster und eine Ausnahme erkennbar: Auf der einen Seite stehen die hoch entwickelten Länder Nordwesteuropas. Zwar wäre es vermessen hier von generalisierter Technikfeindlichkeit zu sprechen, aber gerade in Bezug auf die Gentechnik wird hier die größte Skepsis laut. Deutschland und seine Bürger befinden sich mit ihren Einstellungen in guter Gesellschaft zu anderen nordwesteuropäischen Nachbarländern - Norwegen, Dänemark, den Niederlanden -, die gleichfalls zurückhaltende Urteile fällen. Auf der anderen Seite die weniger industrialisierten und insgesamt etwas geringer entwickelten südlichen Länder Spanien, Portugal und Italien, wo die Gentechnik auf vergleichsweise große Vorliebe stößt. Sie könnte hier interpretiert werden als ein erfolgversprechendes Mittel der Modernisierung von Wirtschaft und Gesellschaft, um an die nordwesteuropäischen Standards Anschluß zu finden. Hier treffen mit anderen Worten zwei unterschiedliche »Logiken« aufeinander: Auf der einen, südeuropäischen Seite die Logik der ›materialistisch‹ orientierten ›hungrigen‹ Gipfelstürmer, die danach streben, was für andere bereits zur Selbstverständlichkeit geworden ist. Ihre Orientierungsmargen sind die ›postmaterialistischen‹ Wohlstands- um nicht zu sagen Überflußgesellschaften Nordwesteuropas, die nicht nur in puncto Lebens*standard* führend, sondern mit ihren Modernisierungskonzepten offenbar auch bei Produktions-, Sicherheits- und Umweltstandards zukunftsweisend sind, Errungenschaften, die wichtige Aspekte der Lebens*qualität* betreffen.

In den nordwesteuropäischen Ländern herrscht stattdessen eher die Strategie der Verteidigung des einmal Erreichten vor. »Modernisierung ja, aber nicht mit allen Mitteln und nicht um jeden Preis« könnte hier die Devise heißen. Sie fußt zum einen auf den realisierten Niveaus von Wohlstand und Lebensqualität, die postmaterialistische Einstellungen begünstigen. Einstellungen, die stärker auf ästhetisch-intellektuelle und die Selbstverwirklichung betreffende Orientierungen abzielen als auf Wirtschaftswachstum und Risikobereitschaft ›um jeden Preis‹. In Anlehnung an das aus der Ökonomie bekannte Grenznutzentheorem, scheint es nahezuliegen, daß der, der viel erreicht und daher nur noch wenig zu gewinnen, aber viel zu verlieren hat, besonders (wert-)konservativ reagieren wird: Risikohazardeure wird man hier vergleichsweise selten antreffen.

Zum anderen könnte man als einen komplementären Erklärungsansatz die Dimension Zeit ins Auge zu fassen: Der unterschiedliche ökonomische und technologische Entwicklungsstand verweist nämlich auf eine unterschiedlich lange Tradition der Entwicklung, Einführung und Anwendung von Technik, auch von Groß- und Risikotechnologien. Der dadurch bedingte Bekanntheits- und Vertrautheitsgrad mit Technik prägt in der Öffentlichkeit das Bild einer in ihren Folgen ambivalenten Technik. Auf der einen Seite erscheint Technik als ein Segen, beispielsweise hinsichtlich der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft, der Erleichterung von Beruf und Ausbildung, der Schaffung von mehr Freizeit und Lebensqualität, der Verbesserung des Umweltschutzes durch höhere Ökoeffizienz und umweltschonendere Produktionsweisen, der Erhöhung des Lebensstandards und der Verbesserung der medizinischen Versorgung.[19] Auf der Soll-Seite mag man sich zunächst einiger spektakulärer Technikkatastrophen erinnern, die mit einer Reihe schwerer Tankerhavarien Mitte der 60er Jahre verstärkt ins öffentliche Bewußtsein gerückt sind. Ihnen folgten bis Mitte der 80er Jahre weitere Unfälle und Katastrophen mit hoher symbolischer Schlagkraft: 1984 der kerntechnische Unfall von Sellafield und der Chemieunfall in Bhopal, 1986 neben dem GAU im Kernkraftwerk Tschernobyl, die Explosion der Challenger, sowie zwei Chemieunfälle bei Ciba-Geigy und Sandoz in Basel mit der Folge einer erheblichen Verschmutzung des Rheins. Seit der zweiten Hälfte der 80er Jahre geraten einerseits mobilitätsbedingte Unfälle - etwa Verkehrsunfälle, Zugunglücke, Schiffshavarien und Flugzeugabstürze - andererseits die anthropogene Umweltzerstörung - saurer Regen, Waldsterben, die CO_2-Problematik oder das Ozonloch - in die Schlagzeilen.[20] Technik wird darüber hinaus aber auch mit dem Verlust von Arbeitsplätzen, mehr Hektik in Beruf und Alltag, einer Tendenz der gesellschaftlichen Entmenschlichung und einer ernsthaften Belastung von Umwelt und Gesundheit in Verbindung gebracht[21]. Vor allem der Verweis auf Umwelt- und Gesundheitsbelastungen macht das Ausmaß an Paradoxie und Ambivalenz der Technikdebatte deutlich: Von Technik erwartet man sich zugleich eine Verbesserung der Umwelt- und gesundheitlichen Situation und befürchtet im selben Atemzug ihre Verschlechterung.

Je länger die Phase gesellschaftlicher, und das heißt industriell-technologischer Modernisierung bereits andauert und je intensiver ambivalente Technikfolgen ›hautnah‹ erlebt werden, desto weniger wahrscheinlich darf ›naiver‹ Technikoptimismus erwartet werden. Diesbezüglich dürften sich die hoch entwickelten, stark modernisierten Gesellschaften Nordwesteuropas in gewisser Weise von ihren südeuropäischen Nachbarn unterscheiden.

Bleibt der Spezialfall Griechenland, der sich diesem Deutungsmuster klar widersetzt. Die Handvoll verfügbarer Strukturdaten läßt freilich keine umfassenden Schlußfolgerungen zu, sie bieten allenfalls

---

19 Vgl. für Deutschland zusammenfassend Jaufmann/Kistler 1993, zit. in Renn/Zwick 1997: 22.

20 Eine knappe Zusammenstellung von Technikkatastrophen und anthropogenen Umweltschädigungen ist im Anhang aufgelistet.

21 Vgl. Jaufmann/Kistler 1993, zit. in Renn/Zwick 1993: 22.

Anlaß über eine mögliche Sonderrolle Griechenlands zu spekulieren.[22] Vergleicht man die Länder, die sich an den Eurobarometerstudien von 1993 und 1995 beteiligt haben, dann fallen mit Blick auf Griechenland drei Strukturmerkmale auf. Erstens das vergleichsweise geringe Wirtschaftswachstum, das im Zeitraum zwischen 1980 und 1993 nur noch von Finnland und Schweden unterboten wird und das in Griechenland zudem mit dem geringsten Pro-Kopf-Bruttosozialprodukt aller untersuchten Länder zusammenfällt.[23] Hierfür dürfte zweitens die geographisch randständige Lage am südöstlichen Rande Europas mitverantwortlich sein. Die geringere infrastrukturelle und ökonomische Vernetzung mit anderen EU-Ländern und das angespannte Verhältnis zu den Nachbarländern könnten dem Tempo von Modernisierungsgewinnen - auch solchen, die man von technischen Innovationen erhofft - abträglich sein. Drittens zeichnet sich Griechenland durch einen enormen Verstädterungsprozeß aus, der stärker ist als in jedem anderen der untersuchten Länder:[24] Der in Metropolen über 750.000 Einwohnern lebende Bevölkerungsanteil erreicht in Griechenland 43% der Gesamtbevölkerung - ein Wert, der in dem vorliegenden Datensatz nur noch von der Bundesrepublik Deutschland erreicht wird. Womöglich bietet der rasch gewachsene Großraum Athen-Piräus mit knapp 4 Mio. Einwohnern - knapp 40% aller Griechen leben dort - Lebensbedingungen, die zu einer negativen, pessimistischen Bilanzierung gesellschaftlicher Modernisierungsprozesse Anlaß bieten. Beispielsweise dann, wenn negative Modernisierungsfolgen - etwa Arbeitslosigkeit, schlechte Umwelt- und Lebensqualität - allgegenwärtig sind und positive Modernisierungsfolgen - steigender Wohlstand, geringe Arbeitslosigkeit, zunehmende Umwelt- und Lebensqualität - nur zögerlich wahrnehmbar werden oder gänzlich ausbleiben. Gewiß, solche spekulativen Erklärungsversuche kranken schon daran, daß möglicherweise wichtige kulturelle Einflußfaktoren unberücksichtigt bleiben müssen. Gleichwohl kann die Einschätzung der Umweltqualität in den verschiedenen europäischen Ländern einen Hinweis für die Plausibilität der entwickelten modernisierungstheoretischen Hypothese erbringen.

3.3 Umwelteinstellungen in Europa

Bei der Wahrnehmung und Beurteilung von Umwelt gilt es, drei Dimensionen gemeinsam zu berücksichtigen, um ein angemessenes Bild der Lage zu erhalten. Zunächst soll die Frage allgemeiner Umwelt- bzw. Naturbilder diskutiert werden, unter Berücksichtigung der generellen Beurteilung von Umweltqualität und Umweltbelastung. Eine andere Sache ist die persönliche Betroffenheit von Umweltbelastungen. Hier dürfte man einen noch stärkeren Indikator für die Zufriedenheit mit der Umweltqualität erhalten als im Falle von Globalbeurteilungen, weil diese in stärkerem Maße sozialen Stereotypen oder Wünschbarkeit folgen können. In einem dritten Schritt geht es darum, verbal geäußerte Handlungsbereitschaft bzw. politische Forderungen nach Maßnahmen zum Umweltschutz zu diskutieren. Die scheint deshalb wichtig, weil der Katalog befürworteter Maßnahmen des Umweltschutzes Folgen für die ökonomische Entwicklung eines Landes haben kann, und indirekte Auswirkungen darauf, welche Technologien eingeführt, in welchem Maßstab sie eingesetzt werden sollen und ob ihre Anwendung eher gefördert oder gedrosselt werden soll.[25]

---

22 Wie stets bei interkulturellen Befragungen könnten die Abweichungen mit semantischen Mängeln bei der Übertragung des Erhebungsinstrumentes ins Griechische begründet werden. Da für ein derartiges Methodenartefakt weder Gründe, die dafür, noch solche, die dagegensprechen vorliegen, soll diese Vermutung außer Acht gelassen werden.

23 Vgl. UNDP 1996: 238.

24 Vgl. UNDP 1996: 232.

25 Man denke beispielsweise an die aktuelle Diskussion um die Einführung einer Ökosteuer.

Generelle Natur- und Umweltorientierungen

Umwelt wird in allen untersuchten Ländern als anthropogen bedroht und hochgradig schutzbedürftig angesehen. Bild 3 zeigt europaweit geradezu verblüffende Gemeinsamkeiten, wenn es um die Wichtigkeit der Einschätzung des Umweltschutzes geht. Zwischen 95% und 100% aller befragten Europäer unterstreichen dies. Am dringlichsten wird wirksamer Umweltschutz in Griechenland gefordert, während die Bundesrepublik einen Mittelplatz einnimmt. Doch groß sind die europaweiten Unterschiede nicht: Umwelt und Umweltschutz sind hier wie dort wichtige Themen.

Daß es »überhaupt kein Problem mit der Umwelt« gäbe, diese Auffassung vertritt nur eine kleine Minderheit der befragten Europäer: Nur 0.8% wollten diesem Statement zustimmen. Wie Bild 4 zeigt, genießt aber auch die Vorstellung, daß »das gegenwärtige Ausmaß der menschlichen Aktivitäten nicht grundsätzlich in Konflikt mit der Umwelt stehe« nur Zustimmungsquoten zwischen 2% bis 13% mit einem Mittelwert von europaweit 7%. Die Mitte markieren hier etwa Dänemark oder Großbritannien. Auf der rechten Hälfte des Schaubildes mit jeweils etwas höheren Zustimmungsraten befinden sich eine auffallend große Zahl an nordwesteuropäischen Ländern, während allen südeuropäischen Ländern geringere Zustimmungsraten zu diesem Item gemeinsam sind.

Abermals sind es die Griechen, die am deutlichsten einen Kultur-Umwelt-Konflikt hervorheben. Dies tritt besonders markant hervor, wenn man die dritte Balkenreihe betrachtet: Das apokalyptische Umweltbild demzufolge »das gegenwärtige Ausmaß der menschlichen Aktivitäten Katastrophen (verursacht), die jede Form des Lebens auf der Erde gefährden«, wird von 25.9% aller Befragten, aber von 40% der griechischen Bevölkerung bejaht und findet hier stärkere Zustimmung als in jedem anderen untersuchten Land. Interessanterweise trifft man auf ähnlich kritische, pessimistische Umwelteinstellungen auch in den anderen südeuropäischen Ländern: in Portugal, Spanien und mit Abstrichen auch in Italien. Trotz der potentiell vitalen Bedrohung der Niederlande durch den im Zuge der behaupteten Klimaerwärmung ansteigenden Meeresspiegels, kann hier unter allen Vergleichsländern das geringste Zustimmungsniveau zu apokalyptischen Umwelteinstellungen registriert werden. Dieser erstaunliche Befund könnte damit zusammenhängen, daß man in den Niederlanden weniger auf Fatalismus setzt, sondern auf Gestaltbarkeit des Kultur-Umwelt-Verhältnisses: Schon vor Jahren hat man dort beispielsweise innovative Maßnahmen eingeführt, die gesellschaftsweite Legitimität und Motivation für eine spürbare Reduktion des Treibhausgases CO_2 schaffen.[26]

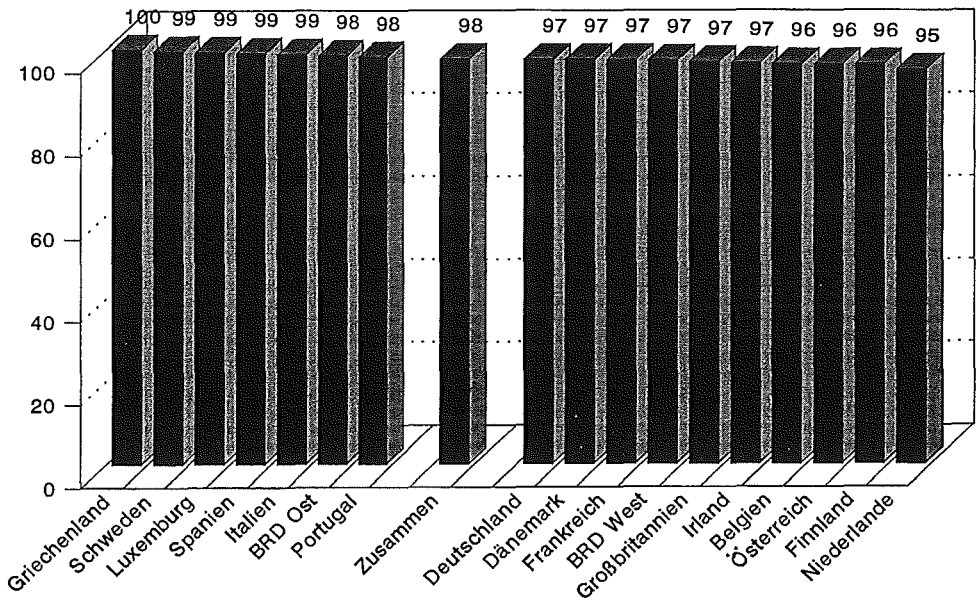
Das vierte Statement »das gegenwärtige Ausmaß der menschlichen Aktivitäten muß sehr deutlich geändert werden, wenn die allgemeine Verschlechterung der Umwelt gestoppt werden soll«, wird in allen untersuchten EU-Ländern von klaren Mehrheiten getragen: Zwischen 58% und 74% der Befragten stimmen dieser Auffassung zu. Da diese vier Statements konkurrierend zur Einschätzung vorgelegt wurden, ist es wenig erstaunlich, daß das Postulat nach Verhaltensänderung mit dem zweitwichtigsten, fatalistischen Naturbild negativ korreliert ist: in Griechenland erhält der Fatalismus ein relativ starkes Gewicht, so daß nurmehr 58% der Nennungen auf Verhaltensänderungen entfallen, wohingegen dieses Verhältnis beispielsweise in den Niederlanden 16% zu 72% beträgt.

In Bild 4 sind die Länder abermals in einer bestimmten Reihenfolge angeordnet. Es liegt auf der Hand, daß sich die vier Statements zum Kultur-Umwelt-Verhältnis in eine Reihenfolge wachsender »Dramatik« bringen lassen. Kein Umweltproblem < kein grundsätzlicher Kultur-Umweltkonflikt < die Forderung, die Umweltverschlechterung durch Verhaltensänderungen zu stoppen < das fatalistische Bild anthropogen erzeugter globaler Umweltkatastrophen. Je dramatischer die Umweltwahrnehmung ausfällt,

26 Vgl. zusammenfassend Renn/Zwick 1997: 3.3.

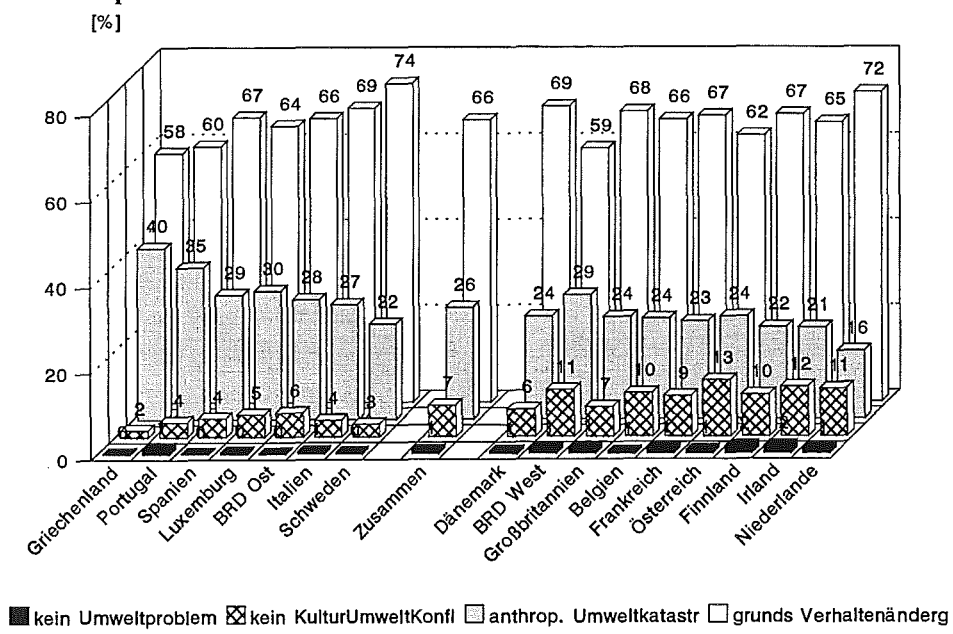
desto weiter links ist ein Land in Bild 4 angeordnet und vice versa.

Bild 3: Die Wichtigkeit des Umweltschutzes in ausgewählten europäischen Ländern



Quelle: Eurobarometer 1995; N = 16.300 (je Land > 1.000; BRD (Ost) > 1.000; LUX > 500)

Bild 4: Die Wahrnehmung des Verhältnisses zwischen Natur und Kultur in ausgewählten europäischen Ländern



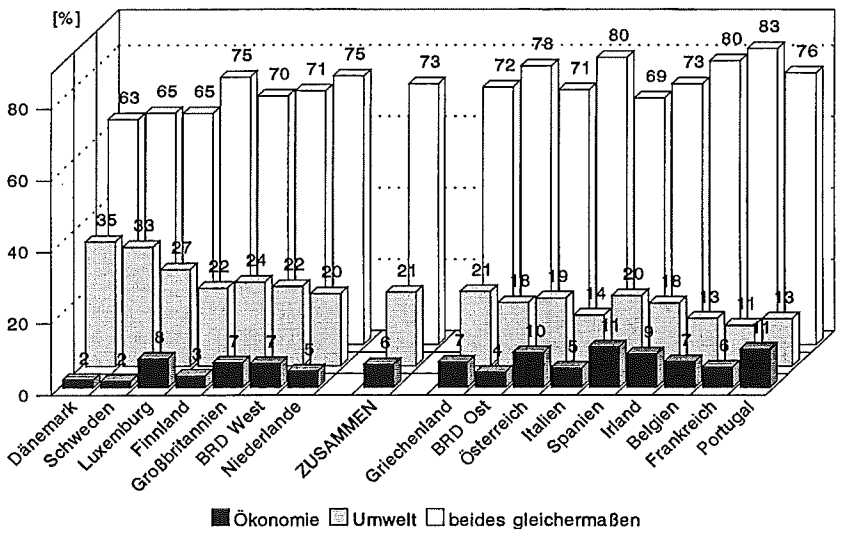
Quelle: Eurobarometer 1995; N = 16.300 (je Land > 1.000; BRD (Ost) > 1.000; LUX > 500)

Deutschland nimmt in beiden Schaubildern eine zentrale Position ein. Etwas kritischer ist man im Osten, etwas polarer fällt das Antwortverhalten in Westdeutschland aus. Immerhin 29% der Westdeutschen bekennen sich zu starkem Umweltpessimismus, ein mit 12% aber gleichfalls relativ hoher Anteil von Bundesbürgern glaubt, entweder gar kein Umweltproblem erkennen zu können, oder doch wenigstens nicht an einen grundsätzlichen Widerspruch zwischen Kultur und Natur. Entsprechend weniger häufig wird in Westdeutschland im Vergleich zu den anderen Ländern auf die notwendige Verhaltensänderung zur Befriedung des Umwelt-Kultur-Konfliktes optiert. Mit 59% liegen die Westdeutschen vor Griechenland an vorletzter Stelle.

Von einer besonderen Umwelthysterie der Deutschen kann aber nicht gesprochen werden, es zeichnet sich allenfalls eine schwache Tendenz dahingehend ab, daß die Wahrnehmung der Umwelt sowie des Verhältnisses zwischen Kultur und Umwelt in Westdeutschland etwas polarer zugespitzt ist als anderswo in Europa.

Umwelteinstellungen können weitreichende Folgen nach sich ziehen. Die Wahrnehmung der Umwelt ist beispielsweise nicht belanglos für die Haltung gegenüber der Wirtschaft oder dem Wirtschaftswachstum in einem Land. Wenn man danach fragt, welche Prioritäten im Falle eines Zielkonfliktes zwischen Umwelt- und wirtschaftlichen Zielen gesetzt werden sollen, votieren die meisten Europäer (73.4%) dafür, daß »die wirtschaftliche Entwicklung sichergestellt, aber gleichzeitig die Umwelt geschützt werden« muß. Daß eine derartige Kompromißformel, die Umwelt- und wirtschaftlichen Zielen gleichermaßen hohe Priorität einräumt, starken Zuspruch finden kann, deutete sich in gewisser Weise bereits in Bild 4 an, genossen doch polare Umwelteinstellungen eher geringen Zuspruch. Das in seiner Höhe überraschende Plädoyer für ein ausgewogenes Berücksichtigen von Umwelt- und ökonomischen Zielen mag aber auch mit der Frageformulierung zusammenhängen. Die Fragestellung tangiert Wunschvorstellungen und Projektionen und offeriert eine (hypothetische) nutzenmaximierende ›Schlaraffenland-alternative‹. Das Antwortverhalten kann aber dahin interpretiert werden, daß Fundamentalismen der einen wie der anderen Richtung eher geringe Konjunktur haben. Das Gros der Europäer wünscht sich eine Befriedung, einen Ausgleich beider Sphären.

Bild 5:Vorrang für wirtschaftliche oder Umweltziele in ausgewählten europäischen Ländern



Quelle: Eurobarometer 1995; N = 16.300 (je Land > 1.000; BRD (Ost) > 1.000; LUX > 500)

Ein gutes Fünftel der Befragten (20.6%) entscheidet sich für die Alternative »Belange der Umwelt sollten Vorrang vor wirtschaftlicher Entwicklung haben«. Diese Ansicht findet vor allem in den entwickelten Industriegesellschaften Nordwesteuropas Zuspruch - allen voran in Dänemark, Schweden, Luxemburg und Großbritannien -, wohingegen sich alle südeuropäischen Länder auf der rechten Hälfte des Schaubildes befinden. Die einzelnen Länder wurden nach der Differenz der Umweltpriorität minus der ökonomischen Priorität angeordnet. Sie beträgt für Dänemark 33%Punkte, unter den Portugiesen aber nur 2%Punkte. Offenbar scheint man in Südeuropa in Sachen Umwelt und Umweltschutz zwar insgesamt unzufriedener und besorgter zu sein, ist aber andererseits noch stärker materialistischen Zielsetzungen verpflichtet als in den »postmaterialistischen«, ökonomisch vergleichsweise stark saturierten Ländern Nordwesteuropas, die sich den »Luxus« stärkerer Umweltpräferenzen eher leisten können.

Einseitiger Materialismus ist freilich in allen untersuchten Ländern die Ausnahme. Gerade einmal 6% aller Befragten votierten für einen Vorrang wirtschaftlicher vor Umweltzielen, am wenigsten in den hoch modernisierten Staaten Dänemark, Schweden und Finnland. Nimmt man Deutschland ost und west zusammen, dann wird auch in diesem Punkt eine etwa mittlere Position innerhalb Europas erkenntlich.

Persönliche Betroffenheit von Umweltbelastungen und Umweltverschmutzung

Die Frage nach der persönlichen Betroffenheit von Umweltbelastungen, -verschmutzung oder -zerstörung, dürfte ein noch validerer Indikator für die Zufriedenheit oder Unzufriedenheit mit der natürlichen Umgebung sein als Globalindikatoren.

Bild 6 läßt erhebliche Unterschiede der Betroffenheit von Umweltbelastungen erkennen. Die hinterste, schwarze Balkenreihe gibt die durchschnittliche Anzahl geäußerter Klagen an. Gefragt wurde: »denken Sie einmal an den Ort, wo Sie jetzt leben. Haben Sie bei den folgenden Dingen ... Grund zur Klage?«. Zur Auswahl standen 7 mögliche Umweltbelastungen, von denen 6 in dem Schaubild dargestellt sind. Sehr großen oder ziemlich großen Grund zur Klage äußerten in Sachen Wasserverschmutzung und Mangel an Grünflächen jeweils 26% der befragten Europäer. Lärm rangiert mit 27.8% Nennungen auf Rang fünf. Rang 4 nimmt die Unzufriedenheit mit der Art und Weise der Müllentsorgung ein (31.9%). An dritter Stelle liegen Klagen über Landschaftszerstörung und den zweiten Platz belegt die Luftverschmutzung mit 36.5%. Spitzenreiter dieser Negativliste ist mit Abstand das hohe Verkehrsaufkommen, unter dem beinahe jeder zweite Europäer zu leiden hat (45.5%) - am stärksten übrigens die Ost- (67.8%) und Westdeutschen (55.5%). Noch stärker unterstrichen wird die Bedeutung des Verkehrs als Störfaktor Nummer eins, wenn man unterstellt, daß wenigstens ein Teil der geäußerten Klagen über Lärm und Luftverschmutzung aus ebendieser Quelle resultiert.

Sieht man von den Ausreißern in Sachen Verkehr einmal ab, dann demonstrieren die hellen Balken ein eher homogenes Bild: Grosso modo gilt, daß in den verschiedenen Ländern die unterschiedlichen persönlichen Belastungen alle in etwa derselben Tendenz folgen. Deshalb gewinnt der Indikator in der letzten Reihe eine besondere Aussagekraft. Er gibt die Anzahl an Gründen wieder, die Anlaß zu sehr großen oder ziemlich großen Klagen boten.

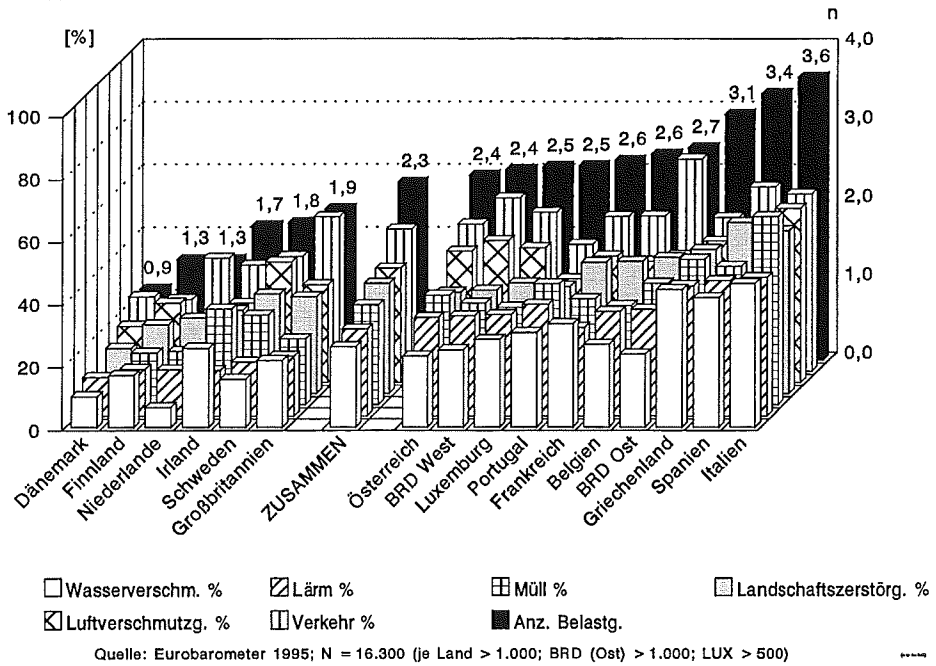
Abermals bietet sich dem Leser das bereits vertraute Bild: Auf der linken Seite des Schaubildes die nordwesteuropäischen Länder mit relativ hoher persönlicher Umweltzufriedenheit, auf der rechten Seite die südlichen Länder Griechenland, Spanien und Italien mit überproportional vielen Umweltklagen. Damit verdichtet sich bereits das als Hypothese angedachte Bild zweier markanter Muster und einer Ausnahme.

- Die nordwesteuropäischen, stark modernisierten Länder weisen skeptische Technikeinstellungen, aber vergleichsweise größere Umweltzufriedenheit auf. Der subjektiv als besser empfundenen Umwelt-

situation zum Trotz nehmen Umwelt und Umweltschutz einen noch höheren Stellenwert ein als im Süden Europas. Dafür dürfte der sozioökonomische Entwicklungsstand der nordwesteuropäischen Länder verantwortlich sein. Er verleiht postmaterialistischen Werten Auftrieb[27] und räumt dem Reproduktionsbereich, der für Lebensqualität und Selbstverwirklichung große Bedeutung besitzt, einen besonders hohen Stellenwert ein. Daß unter solchen Vorzeichen auch auf die Einhaltung von Umweltstandards besonderer Wert gelegt wird, versteht sich fast von selbst.

- Mit Ausnahme Griechenlands weisen die weniger entwickelten, ökonomisch nicht saturierten Länder Südeuropas - Italien, Spanien, Portugal - vergleichsweise große Technikeuphorie auf, gleichzeitig wird die Umweltsituation als sehr schlecht beschrieben. Zusammengenommen bedeutet dies aber, daß die eingangs geäußerte Vermutung, geringe Technikakzeptanz sei eine Folge übertriebener Umweltängste - grundsätzlich falsch sein dürfte.
- Allenfalls in Griechenland gehen Technik- und Umweltängste ein ›generalisiertes Pessimismussyndrom‹ ein, das sich u.a. mit der extremen Verstädterung im Ballungsraum Athen-Piräus erklären läßt. Bis in die jüngere Vergangenheit hinein trägt Griechenland - sieht man einmal vom modernen Großraum Athen ab - eher vormoderne, agrarische Strukturen. Es erscheint daher plausibel, daß der Bezugspunkt zur Beurteilung der Umweltsituation am Leben unter ländlichen (Umwelt-)Bedingungen orientiert ist und die Bewertung der wahrgenommenen Situation wenigstens für einen Teil der urbanisiert lebenden Griechen damit besonders negativ ausfällt.

Bild 6: Persönliche Betroffenheit von Umweltbelastungen in ausgewählten europäischen Ländern



Quelle: Eurobarometer 1995; N = 16.300 (je Land > 1.000; BRD (Ost) > 1.000; LUX > 500)

Ehe der Verknüpfung zwischen Umwelt- und Technikeinstellungen detaillierter nachgegangen wird, soll aber noch ein Blick auf die vorgeschlagenen Maßnahmen des Umweltschutzes geworfen werden. Dies

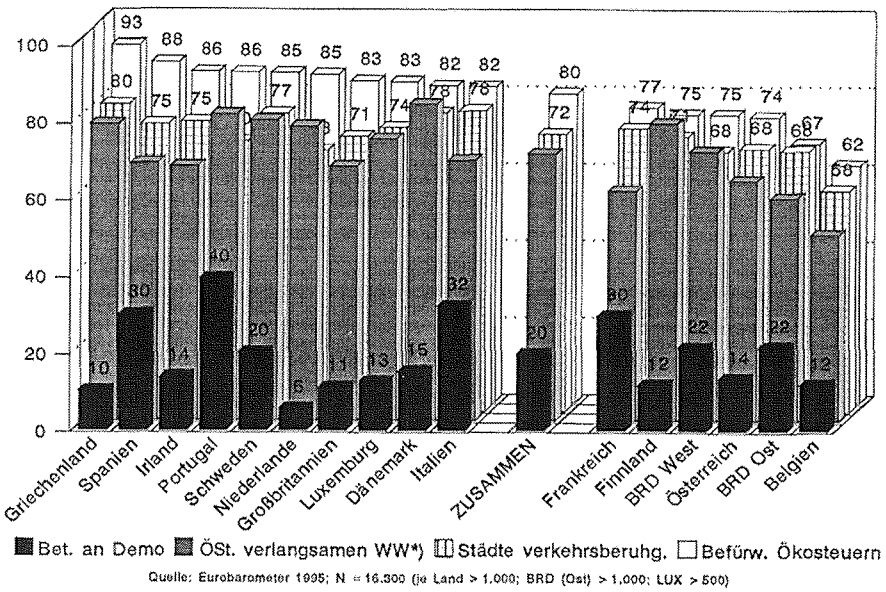
27 Der empirische Beleg hierfür ist weiter hinten dargestellt.

ist insofern von Bedeutung, als derartige Maßnahmen Auswirkungen auf Art, Richtung und Geschwindigkeit zukünftiger Modernisierungsprozesse haben können.

Befürwortete Maßnahmen des Umweltschutzes

7.9% aller Befragten haben in Sachen Umweltschutz - etwa wenn es um ein umweltschädigendes Produkt ging - bereits an einer Demonstration teilgenommen, 19.8% bekundeten, dies wenn nötig tun zu wollen. Die Länderunterschiede sind dabei nicht unbeträchtlich: An der Spitze der Demonstrationsbereitschaft liegen vor allem diejenigen Länder, in denen die Umweltproblematik als besonders drängend und die persönlichen Belastungen überproportional hoch eingestuft werden. An der Spitze der Protestbereitschaft liegen Portugal (39.5%), Luxemburg (34.5%), Italien (32.4%) und Spanien (30.3%), Griechenland fällt jedoch mit 10.4% deutlich aus der Rolle, ein Umstand, der es fast schon rechtfertigt, von griechischem Umweltfatalismus zu sprechen. In puncto politischem Protestpotential dürfen freilich so wichtige, die politische Kultur eines Landes betreffende Faktoren wie die Wahrnehmung der Staatsverantwortlichkeit, die Beurteilung der Staatsperformanz in Umweltbelangen und die Einschätzung der angemessenen Reaktionsbereitschaft des politischen Systems nicht außer Acht gelassen werden.[28] Aber auch Strukturmerkmale des politischen Systems - etwa der Grad des Zentralismus oder Föderalismus -, sowie die Frage, ob es sich um eher um eine konkordanz- oder konkurrenzdemokratische Verfassung von Politik handelt, können hier Einflüsse zeigen. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang das außerordentlich niedrige Protestpotential in den Niederlanden. Wie jüngere Analysen zeigen, hat man dort praktikable und wirksame Wege der Bürgerbeteiligung gefunden, die gleichermaßen motivierende und sozial integrative Wirkungen zeigen und Bürger wie Politik gleichermaßen auf die Erreichung gemeinsam beschlossener Umweltziele festlegen. Kostspielige Reibungsverluste durch politische Unzufriedenheit und politischen Protest können auf diese Weise weitestgehend umgangen werden.[29]

Bild 7: Maßnahmen des Umweltschutzes in ausgewählten europäischen Ländern



Quelle: Eurobarometer 1995; N = 16.300 (je Land > 1.000; BRD (Ost) > 1.000; LUX > 500)

---

28 Vgl. Kaase 1976.

29 Einen knappen Überblick über den niederländischen Back-casting-Ansatz geben Renn/Zwick 1997: 3.3.

In Europa nimmt man die Umweltproblematik ernst. Dies äußert sich nicht nur in den Klagen über den Zustand der Umwelt, sondern auch in weitreichenden Maßnahmen, die die Bürger bereit sind, mitzutragen: Ökosteuern werden von 80% aller Befragten befürwortet (letzte Balkenreihe in Bild 7), wobei zwei Drittel für ihre mittel- oder längerfristige, ein Drittel für ihre sofortige Einführung plädieren. Am stärksten werden die Ökosteuern wiederum in den südlichen Ländern Griechenland, Spanien und Portugal befürwortet, aber auch Italien liegt noch etwas über dem europäischen Durchschnitt. 69.4% der Befragten befürworten Ökosteuern übrigens auch dann, wenn sie das Wirtschaftswachstum verlangsamen. Hierbei sind die Länderprofile eher uneinheitlich (2. Balkenreihe).

Aber auch mit Detailkritik und -vorschlägen wird nicht gegeizt. Schärfere Umweltgesetze werden praktisch flächendeckend eingefordert (92.5%), ebenso wie die verstärkte Bereitstellung von Mitteln zu ihrer Durchsetzung (76.8%).

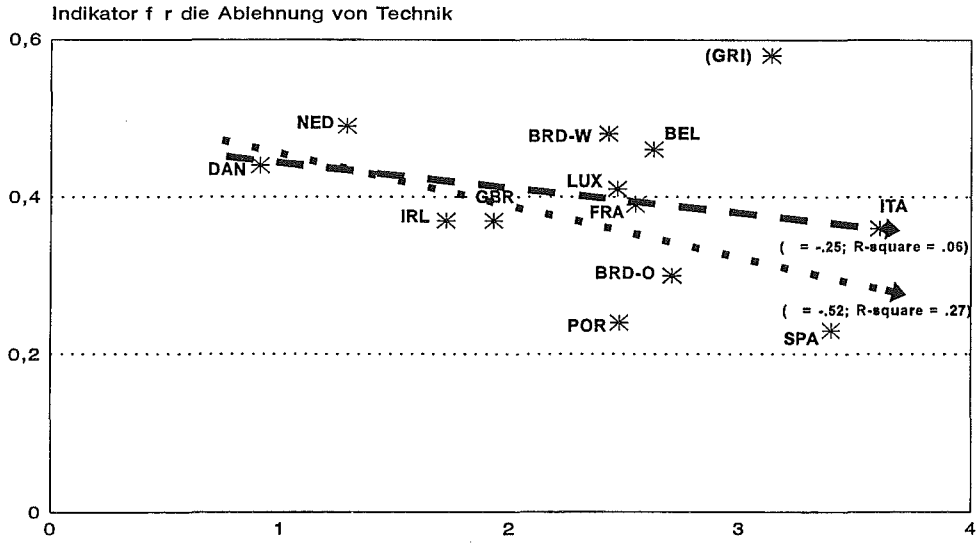
Dem Problemfeld Verkehr, unter dem man in Europa besonders leidet, hofft man mit einer ganzen Palette von Maßnahmen zu Leibe rücken zu können. Als wirksame Maßnahmen schätzen 54.1% der Befragten Einschränkungen der Parkflächen in den Städten ein. Knapp 3 von 4 Befragten (72%) halten eine »strikte Begrenzung des Autoverkehrs« für wirksam, eine Erhöhung des Benzinpreises allerdings nur 15.9%. Sieht man von Benzinpreiserhöhungen einmal ab - hier liegen die Westdeutschen bei der Einschätzung der Wirksamkeit zur Eindämmung der Verkehrsproblematik an der Spitze aller untersuchten Länder (26.7%) - dann zeichnet sich, wie auch in Bild 7 als grober Trend ab, daß um so eher Maßnahmen des Umweltschutzes befürwortet werden, je dringlicher die Umweltproblematik eingeschätzt wird. Deutschland nimmt hierbei abermals einen mittleren Platz ein.

3.4 Sind Umwelteinstellungen gute Prädiktoren für Technikakzeptanz?

Wenden wir uns nun der dritten Unterstellung des Eingangszitates zu: Allen voran in Deutschland seien Umweltängste eine Grundlage für mangelnde Technikakzeptanz. Die bisher vorgestellten Befunde legen allerdings - mit Ausnahme Griechenlands - das Gegenteil nahe.

Bild 8 bestätigt unsere Vermutung. Nimmt man alle 13 Länder, für die beide Indikatoren verfügbar sind, dann erhält man zwischen der Anzahl geäußerter persönlicher Umweltbelastungen - Bild 6, hintere, schwarze Balkenreihe - und der Akzeptanz von 7 Technologien - Bild 2 vordere, schwarze Balkenreihe - sogar einen leicht negativen Zusammenhang (heller, gestrichelter Pfeil), der allerdings nur 6% der Varianz der abhängigen Variable zu ›erklären‹ im Stande wäre und statistisch nicht signifikant ist. An diesem Umstand trägt - wie wir bereits wissen - der ›Ausreißer‹ Griechenland eine ›Teilschuld‹. Eliminiert man dieses südöstlichste der 13 Länder aus der Regressionsrechnung, dann wird ein bedeutend stärkerer, statistisch signifikanter negativer Zusammenhang erkennbar (gepunkteter Pfeil): Je höher die subjektive Betroffenheit von Umweltbelastungen, desto größer das Ausmaß der Technikakzeptanz. Läßt man Griechenland außen vor, dann wächst die ›Erklärungskraft‹ der Umweltbeurteilung auf die Technikakzeptanz auf 27% an.

Bild 8: Technikakzeptanz nach Betroffenheit von Umweltproblemen in ausgewählten europäischen Ländern

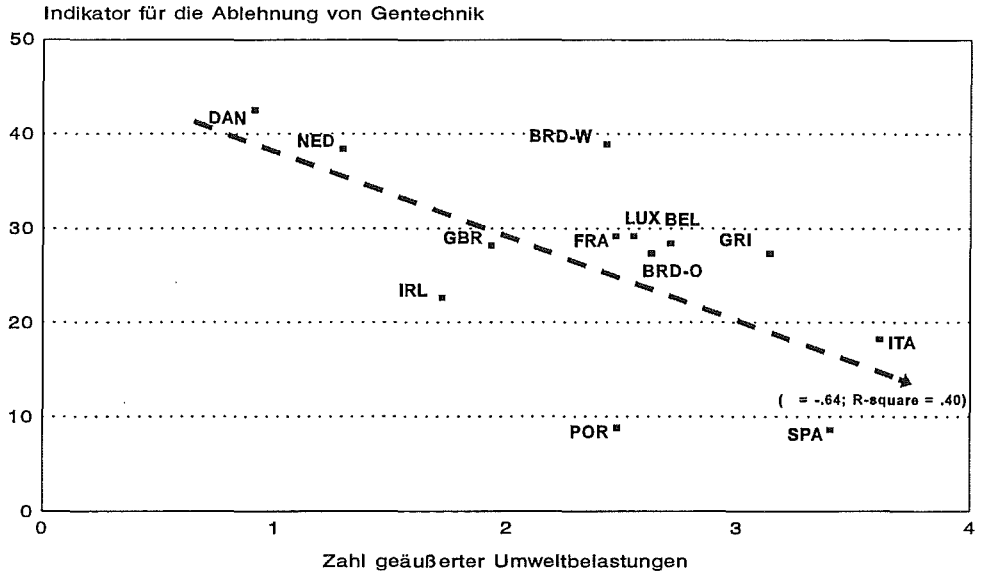


Quelle: Eurobarometer 1993/1995

Noch deutlich stärker ist der Zusammenhang, wenn man speziell die Gentechnik untersucht. In Bild 9 wird die Regressionsgerade durch nordwesteuropäische Länder wie Dänemark und die Niederlande nach oben, durch Italien, vor allem aber Spanien und Portugal nach unten gekippt. 40% der Varianz der Einstellung gegenüber der Gentechnik ließen sich hypothetisch durch erlebte und berichtete Umweltbelastungen ›erklären‹.[30] ›Hypothetisch‹ allerdings deshalb, weil der berichtete, starke Zusammenhang nicht mit Kausalität verwechselt werden darf. Eine Reihe von Versuchen, sich des Problems faktorenanalytisch anzunähern, brachte ein verblüffend einfaches, einfaktorielles Ergebnis.

30 Der Zusammenhang ist statistisch hochsignifikant. Im Vergleich zu Individualdaten erhält man allerdings bei Aggregatdaten regelmäßig relativ hohe Varianzaufklärungsanteile; so auch in diesem Fall. Vgl. hierzu Küchler 1979: 51.

Bild 9: Akzeptanz der Gentechnik nach Betroffenheit von Umweltproblemen in ausgewählten europäischen Ländern



Quelle: Eurobarometer 1993/1995

Zunächst wurden eine Reihe von Strukturdaten der UNDP und des World-Resources-Institutes in den aggregierten Datensatz eingelesen und die Faktorenanalyse aufgenommen. Da schon die bivariaten Zusammenhänge die besondere Bedeutung einiger modernisierungstheoretisch relevanter Variablen für Technik- und Umwelteinstellungen erkennen ließen, genügte es, ein Modell mit 4 Variablen rechnen zu lassen: Technik im allgemeinen und Gentechnik im besonderen werden umso kritischer wahrgenommen und beurteilt, je höher der Modernisierungsgrad einer Gesellschaft ist. Letzterer zerfällt in normative und strukturelle Komponenten. Aus normativer Sicht kann etwa der Postmaterialismus modernisierungstheoretisch interpretiert werden.[31] Je höher der Anteil von Postmaterialisten in einem Land ist, desto stärkere Vorbehalte werden tendenziell gegen die 7 in Bild 1 und 2 vorgestellten Techniken laut (ß = .27)[32] und desto wahrscheinlicher stößt insbesondere die Gentechnik auf Ablehnung (ß = .54). Allein in diesem Punkt erweisen sich die eingangs zitierten Vermutungen Büchels als stichhaltig.

Hochgradig modernisierte Gesellschaften haben in den Augen ihrer Bevölkerung die Probleme der industriellen Moderne ganz oder teilweise überwunden, sie bieten daher besonders hohe Lebens- und Selbstverwirklichungschancen, ausgedrückt in einem überdurchschnittlichen Human-Development-Index (HDI).[33] Sie erwirtschaften ein hohes Pro-Kopf-Bruttosozialprodukt, wobei der tertiäre Sektor eine besonders große Rolle spielt und haben offensichtlich hohe Umweltstandards eingeführt. Eine solchermaßen ›gelungene‹ Modernisierung führt nämlich einerseits dazu, daß die persönliche Bedrohung durch Umweltbelastungen weniger dramatisch eingeschätzt wird. Gleichzeitig nimmt aber

31 Exemplarisch: Zwick 1990.

32 Der Effekt ist statistisch allerdings nicht gesichert.

33 Vgl. UNDP 1996: 133ff.

andererseits die Einsicht in die Notwendigkeit weiterer Modernisierung grenznutzenbedingt ab. Je geringer beispielsweise die Arbeitslosigkeit (ß = .42; *.32*)[34], je geringer der CO_2-Ausstoß (ß = *.33*; *.33*), je höher das Bruttosozialprodukt (ß = *.08*; *.34*), je höher die Postmaterialistenanteile (ß = *.27*; .54) und der Human-Development-Index - ein Maß der UNDP zur Bewertung der Lebenschancen und -qualität in einem Land - sind (ß = *.22*; .40), umso besser wird die Umweltsituation eingeschätzt, umso wahrscheinlicher werden aber Vorbehalte und Skepsis gegenüber Technik, vor allem aber gegenüber der modernen Gentechnik laut.

Für die Faktorenanalyse wurden in ausgewogener Weise je zwei normative und zwei strukturelle Variablen ausgewählt. Zu den Merkmalen Postmaterialistenanteile, HDI und Pro-Kopf-BSP wurde noch die Variable Religiosität hinzugefügt - moderne Gesellschaften zeichnen sich nämlich durch vergleichsweise ausgeprägte Säkularisierung aus. Das einfache, vier Variablen umfassende Modell erbrachte eine einfaktorielle Lösung. Die höchsten Faktorenwerte erzielen auf dieser Modernisierungsdimension Dänemark (1.19) und die Niederlande (1.15), gefolgt von Frankreich (0.90), Großbritannien (0.18), Belgien (0.17) und Luxemburg (0.00). Unter dem Durchschnitt liegen Spanien (-0.07), Irland (-0.43), Westdeutschland (-0.43) sowie die drei südlichen Länder Griechenland (-0.70), Italien (-0.95) und Portugal (-1.88). Mit der geringfügigen Abweichung Spaniens ergibt sich erwartungsgemäß eine relativ klare Abstufung, die das Gros der nordwesteuropäischen Staaten über- und alle südlichen Staaten unterhalb des Durchschnitts plaziert. Der extrahierte Faktor ist einerseits stark negativ mit berichteten Umweltbelastungen (ß = -.57) und andererseits stark positiv mit Skepsis gegenüber der Gentechnik korreliert (ß = .69). Nimmt man die 7 aus Schaubild 1 und 2 bekannten Technologien zusammen, dann wird allenfalls ein schwacher (ß = .35) Zusammenhang mit der Modernisierungsdimension erkennbar, der statistisch nicht gesichert werden kann.

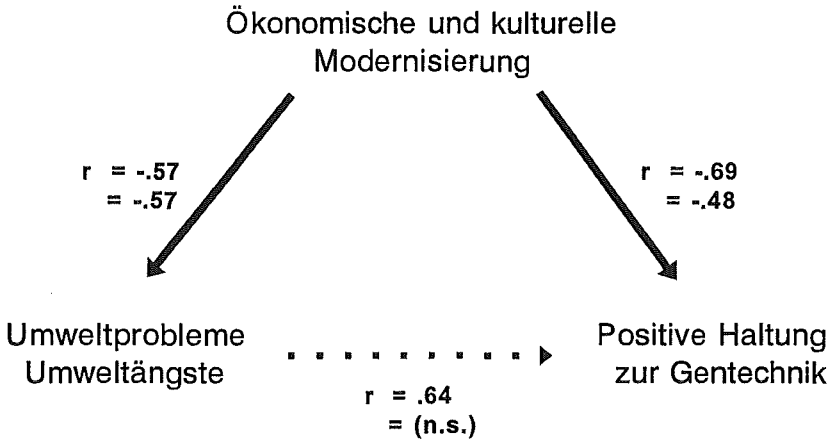
Das Spannende daran: Der ursprünglich starke und statistisch signifikante Zusammenhang zwischen erlebten Umweltbelastungen und kritischen Haltungen gegenüber der (Gen-)Technik verschwindet, wenn man das Merkmal »gesellschaftliche Modernisierung« kontrolliert. Nicht Umwelteinstellungen sind also für die Skepsis, die technologischer Modernisierung entgegengebracht wird, verantwortlich, sondern in allererster Linie der in einer Gesellschaft bereits erreichte strukturelle und normative Modernisierungsgrad. Die Modernisierung selbst ist es offenbar, die in den Augen der Öffentlichkeit eines Landes zu einer eher wertkonservativen Verteidigung des bereits Erreichten, der Selbstverwirklichungschancen und des Reproduktionsbereiches - zu dem auch die Natur zählt - führt und in gewisser Weise einen negativen Regelmechanismus hinsichtlich der Befürwortung weiterer (technologischer) Modernisierungsbestrebungen darstellt.

Hierfür zeichnet vor allem auch die Zunahme postmaterialistischen Gedankenguts verantwortlich. Eine seiner theoretischen Wurzeln ist im ökonomischen Grenznutzentheorem zu suchen: Wertvoll und erstrebenswert sind Dinge, die knapp sind. In der Situation ausgeprägter ökonomischer Saturiertheit wendet sich die Aufmerksamkeit verstärkt ästhetisch-intellektuellen, idealistischen Zielen zu, die auf Lebensqualität und Selbstverwirklichung hinauslaufen. Die Entwicklung und Einführung neuer Technik, zumal wenn es sich um externe Großtechnologien handelt, die im Verdacht stehen, der Öffentlichkeit unbillige Risiken aufzubürden, die Umwelt zu gefährden oder zu verschandeln, stoßen dementsprechend auf vergleichsweise geringe Gegenliebe.

---

[34] Der jeweils erste Wert bezieht sich auf die Ablehnung von 7 Technologien, der zweite auf die Ablehnung der Gentechnik. Nicht signifikante Effekte sind kursiv dargestellt.

Bild 10: Der Grad gesellschaftlicher Modernisierung als Erklärungsfaktor für Umweltwahrnehmung und Beurteilung der Gentechnik in Europa



4 Technik- und Umweltwahrnehmung in Europa: Kein deutscher Sonderweg!

Um Umwelt- und Technikeinstellungen ranken sich hierzulande noch immer Mythen: Die angebliche Technikfeindlichkeit der Deutschen, ihre Aversion, wenn es um die Akzeptanz von Groß- und Risikotechnologien geht und die oftmals beklagten übertriebenen Umweltschutzbedürfnisse, sind geradezu sprichwörtlich. Ihnen werden nicht selten japanische Technikeuphorie, aber auch der Pragmatismus und die Risikofreude in angelsächsischen Ländern entgegengehalten.

Bei Lichte betrachtet erweisen sich diese Mythen im Vergleich mit anderen europäischen Ländern als haltlos und der Vorwurf, mangelnde Technikakzeptanz sei in der Bundesrepublik ein besonderes Innovationshemmnis, als weit überzogen: In Deutschland ist man nicht technikfeindlich - schon gar nicht bei Haushalts-, Freizeit- und sonstiger Produkttechnik. Im Gegenteil: Die deutschen Haushalte sind im internationalen Maßstab außerordentlich stark mit technischen Produkten ausgestattet. Aber auch die Akzeptanz von Techniken im Arbeitsbereich kann sich international sehen lassen: Arbeitstechniken werden hierzulande eher verzögert eingeführt, dann aber mit besonderem Eifer und großer Sachkenntnis.[35]

Die Deutschen sind allenfalls skeptisch und ambivalent gegenüber Groß- und Risikotechnologien. Damit liegen sie aber, wie gezeigt werden konnte, voll im Rahmen dessen, was auch in den westlichen und nördlichen Nachbarstaaten beobachtet werden kann. Die Haltung der bundesdeutschen Öffentlichkeit zu externen Groß- und Risikotechnologien ist aus quantitativer Perspektive durchaus typisch für Länder Mittel- und Nordeuropas. Etwas freundlicher gestimmt zeigt man sich in den südeuropäischen Ländern, die mit technologischer Innovation offensichtlich den wirtschaftlichen Aufschwung fördern und die Modernisierung des Landes vorantreiben wollen. Aber auch an die Wahrnehmung ambivalenter Technikfolgen ist zu denken, mit denen in den nördlichen Ländern entwicklungsbedingt längere und intensivere Erfahrungen bestehen - Erfahrungen, die zwar gleichfalls nicht zu Technikfeindlichkeit, wohl aber zu angemessener Skepsis, Kritik und gedämpftem Erwartungsoptimismus Anlaß geben.

---

35 Einen zusammenfassenden Überblick bieten Renn/Zwick 1997.

Wie in anderen Industrienationen ist Technik, vor allem Groß- und Risikotechnik auch hierzulande in einem umfassenden Sinne begründungspflichtig geworden.[36] Ihre Akzeptanz hat, das zeigen jüngere Studien übereinstimmend,[37] viel mit Vertrauen in Unternehmer aber auch in Politik und Administration, nicht zuletzt aber mit erweiterten Bürgerbeteiligungsrechten zu tun. Hier verblüffen vor allem die niederländischen Daten, die viel Konsens, und wenig Polarisierung und Konflikte um Umwelt und Technik signalisieren.

Der voranschreitende europäische Einigungsprozeß ist ein Schritt in Richtung Globalisierung. Dabei darf allerdings nicht nur an Politik, Märkte oder Reisefreiheit gedacht werden. Globalisierungstendenzen erstrecken sich auf die Gebiete der Technik- und Umweltrisiken - die gestiegene Binnenmobilität in der Europäischen Union oder Bestrebungen der Angleichung von Umwelt- und Sicherheitsstandards mögen dafür Beispiele sein. Mit der Globalisierung von Risiken[38] stellt sich die Frage nach ihrer Legitimation neu. Es gibt Anzeichen dafür, daß der Zustand, daß wenige über Risiken entscheiden, deren Folgen viele oder alle zu tragen haben, zunehmend als unbefriedigend empfunden wird. Harte gesellschaftliche Auseinandersetzungen um Umwelt- und Technikthemen und ein hohes Maß an politischer Unzufriedenheit und politischem Protest können - wie die Beispiele Wackersdorf oder Gorleben in Erinnerung rufen - zu Innovationshemmnissen führen, Standortbedingungen verschlechtern und der Wettbewerbsfähigkeit schaden. Überdies sind sie der sozialen Integration abträglich und können kostspielige Reibungsverluste hervorbringen, bis hin zur drohenden Selbstblockade der Gesellschaft. Womöglich bietet sich mit dem erfolgversprechenden niederländischen Ansatz, zur Lösung von Umwelt- und Technikproblemen ergebnisoffene generalisierte Mediationsverfahren einzusetzen, ein richtungsweisender Weg aus einer Sackgasse an. Um der Zukunftsfähigkeit der Gesellschaft und einer fairen Berücksichtigung der Interessen nachfolgender Generationen willen hat man in den Niederlanden einen Zieldiskurs zur CO_2-Reduktion geführt, in dem unterschiedliche Szenarien ermittelt, diskutiert und zur Abstimmung gestellt wurden. Die Umsetzung der daran abgeleiteten Teilschritte wurde auf breiter Basis gesellschaftlich legitimiert; sie bildet eine legitimatorische und motivationale Grundlage für die Zukunftsfähigkeit der Gesellschaft.

Anhang

Ausgewählte Störfälle, Technik- und Umweltkatastrophen 1968 - 7/1998[39]

1968: Grönland: US-Bomber stürzt mit Kernwaffen bestückt ab.

1969: Japanischer Supertanker zerbricht und verliert 350.000 t Öl.

1971: Seit 1965 wurden im Vietnamkrieg durch die USA ca. 170 kg Dioxin freigesetzt, etwa 1.000 Tote.

1973: Umweltskandal in Hessen: Unkontrollierte Lagerung von 15.000 t Giftmüll.

1974: Zivilluftfahrt hat bislang verlustreichstes Jahr (20 Unfälle), 1.500 Tote.

1976: Seveso: Freisetzung von 2.5 kg Dioxin.

1977: Norwegen: Im Ölfeld »Ekofisk« tritt Öl aus und verursacht einen 500km² großen Ölteppich.

1978: Spanien: Tankwagen verunglückt. Die Ladung fließt in einen Campingplatz und explodiert, 200 Tote.

---

36 Vgl. Renn/Zwick 1997: 129.

37 Vgl. zusammenfassend Renn/Zwick 1997: 2.1.5 und 3.2.1.3.

38 Vgl. zur These der Globalisierung von Risiken ausführlich Beck/Giddens/Lash 1996.

39 Mit Schwerpunkt Europa; ohne Naturkatastrophen und ohne Transportunfälle mit weniger als 100 Todesopfern. Quelle: Zwick, M.M. 1998a: »Internationale Katastrophendatenbank des 20. Jahrhunderts«.

1978: Brest: »Amoco Cadiz« verliert 230.000 t Rohöl.

1978: Portugal: Der Tanker »Andros Patria« gerät in Brand und verliert 50.000 t Öl.

1979: Zwischen 1969 und 1979 werden 421 unterirdische Kernwaffentests durchgeführt.

1979: Venezuela: Kollision der »Atlantic Empress« und der »Aegean Captain«. 250.000 t Öl fließen ins Meer.

1979: Harrisburg: Kernteilschmelze; 4 Mio. Liter radioaktives Kühlmittel laufen aus.

1979: Golf von Mexico: Eine Ölplattform verliert 17.000 t Rohöl.

1980: Ekofisk, Norwegen: Ölbohrplattform kentert im Orkan, 124 Tote.

1980: Mexico: Seit der Explosion einer Bohrinsel flossen in 8 Monaten 800 Mio. l Öl ins Meer. Bislang weltweit größte Meeresverschmutzung.

1980: Ostsee (Baltikum): Tanker »Globe Asimi« strandet und zerbricht. 10.000 t Öl fließen ins Meer.

1980: Das Pentagon räumt ein, daß es zwischen 1950 und 1980 zu 32 Unfällen mit Kernwaffen gekommen sei.

1980: Östliches Mittelmeer: Tanker »Irenes Serenade« gerät in Brand, sinkt und verliert 100.000 t Öl.

1980: Rotterdam: Der Supertanker »Energy Concentration« zerbricht beim Löschen. 10 t Öl fließen ins Hafenbecken.

1981: Niederlande: Firma leitet 70.000 t giftige Abwässer in den Rhein.

1981: Spanien: Gepanschtes Olivenöl, 227 Tote.

1981: Klaipeda (UdSSR): Die »Globe Assami« verliert 16.500 l Öl.

1982: Österreich: Trinkwasser ist weithin mit Perchloräthylen verseucht.

1983: BRD: Bundesregierung erklärt 35% des Waldes für geschädigt.

1983: Südafrika: Ein Öltanker havariert und verliert 90.000 t Öl. Das Wrack sinkt mit weiteren 100.000 t Rohöl.

1983: Persischer Golf: Tanker »Pericles« gerät in Brand und verliert 47.000 t Öl.

1983: Südafrika: Der Öltanker »Castillo de Beliver« gerät in Brand, zerbricht und verliert 255.000 t Öl.

1984: BRD: Regierung gibt bekannt, daß 50% des Waldes geschädigt sind.

1984: Deutsche Nordsee: Etwa 320.000 Seevögel verenden wegen Verschmutzung des Wassers mit Öl.

1984: Sellafield (Großbritannien): Ablassen radioaktiv verseuchten Tankwassers.

1984: Bhopal (Indien): Chemieunfall: Methylisocyanat dringt aus der Pestizidfabrik Union Carbid aus, etwa 10.000 Tote.

1985: Westliches Mittelmeer: Tanker »Petragen One« explodiert beim Umladen und verliert 25.000 t Öl.

1985: Mittelmeer: Schiffskollision: Tanker »Patmos« verliert 20.000 t Öl.

1985: Persischer Golf: Schiffskollision: Tanker »Nova« verliert 70.000 t Öl.

1985: USA: Zwischen 1980 und 1985 kam es in der Chemieindustrie zu 7.000 nennenswerten Lecks, 135 Tote.

1985: Welt: CO_2-Gehalt der Luft beträgt 1800: 275 mg/kg, 1985: 345 mg/kg.

1986: Tschernobyl: GAU des Reaktorblocks 4; 33 Menschen sterben sofort, etwa 25.000 Liquidatoren kommen nach Schätzungen in der Folge ums Leben.

1986: USA: Explosion der Raumfähre Challenger, 7 Tote.

1986: Basel: Ciba-Geigy läßt 400 l des Pflanzenschutzmittels Atrazin in den Rhein ab.

1986: Basel: Großbrand bei Sandoz. Quecksilberfungizide laufen in den Rhein.

1986: Antarktis: Im Ozonschild sind deutliche Lücken nachweisbar.

1987: Frankreich: Schneller Brüter »Superhelix« verliert durch ein Leck Kühlmittel.

1987: Saar: Dillinger Stahlhütte leitet Zyankali in die Saar.

1987: Welt: CO_2-Gehalt der Luft steigt auf 350 ppm an.

1988: Welt: Flugzeugunfälle, 1.585 Tote.

1988: Ärmelkanal: Chemikalienfrachter »Anna Broere« sinkt. 248 hl explosives und karzinogenes Acrylnitrit laufen aus.

1988: Ost- und Nordsee: Wasserverschmutzung: Ca. 11.000 Robben (50% des Gesamtbestandes) verenden.

1989: Madeira: Tanker »Aragon« havariert und verliert 25.000 t Öl.

1989: Sibirien: Pipeline-Explosion an einer Bahnstrecke verursacht Zugunglück, etwa 600 Tote.

1989: Alaska: »Exxon Valdez« läuft auf ein Riff auf und verliert 40.000 t Rohöl.

1989: Kanarische Inseln: Tanker »Khark 5« explodiert und verliert 70.000 t leichtes Rohöl.

1990: Mexico: Tanker »Mega Borg« brennt im Golf von Mexico. Verlust von 11 Mio. l Rohöl.

1991: Irak: Irakische Armee sprengt beim Rückzug 500 Ölquellen. Rund 1 Mio. t Öl fließen in den persischen Golf.

1991: Biskaya: Tanker »Aegean Sea« strandet, explodiert und verliert 70.000 t Öl.

1991: Golf von Genua: Tanker »Haven« explodiert beim Entladen und verliert 50.000 t Öl.

1991: Süd-West Australien: Tanker »Kirki« gerät in Brand, zerbricht und verliert 20.000 t Öl.

1991: Marsberg: Dioxinhaltige Schlämme werden in einem Wohngebiet entdeckt.

1992: BRD: Umwelt-Skandal: Dioxin wird in Holzschutzmitteln entdeckt.

1993: Frankfurt a.M.: Beim Chemiekonzern Hoechst treten am Rosenmontag ca. 10 Tonnen hochgiftiger Chemikalien aus.

1993: Shetland-Inseln: Tanker »Brae« havariert mit 85.000 t Rohöl.

1993: Frankfurt a.M.: Weitere 5 Chemieunfälle bei Hoechst.

1994: Frankreich, Niederlande, Deutschland: Ein Frachtschiff verliert im Ärmelkanal Container. Etwa 200.000 Giftbeutel mit Pestiziden verseuchen die Küsten.

1994: Ostsee: Die Sowjetunion hat nach dem 2. Weltkrieg mehrere tausend Tonnen Giftgasgranaten in der Ostsee versenkt.

1994: Ostdeutschland: Die sowjetischen Streitkräfte haben zwischen 1992 und 1995 81.000 t Munition auf ostdeutschen Übungsplätzen vergraben.

1994: Baden-Württemberg: In Babynahrung eines spanischen Herstellers wird Lindan entdeckt.

1994: Laut Bundesforschungsministerium nimmt die Ozonschicht über Europa jährlich um 1.2% ab.

1994: Waldschadensbericht der Bundesregierung: 40% der Bäume weisen schwache, 24% deutliche Schäden auf.

1994: Hessen: Ozonalarm: 250µg/cbm Luft.

1994: Bundesumweltministerium: In Thüringen sind 78% des Waldes geschädigt, 45% stark geschädigt.

1996: Kourou (Franz. Guyana): Neu entwickelte ARIANE-V Rakete wird kurz nach dem Start gesprengt. Verlust von 160 Mio. $ und 4 Forschungssatelliten für insgesamt 500 Mio. $.

1996: Deutschland: Zahl der Verkehrsunfälle 1996: 2.268 Mio. Steigerung gg. 1995: 1.8%. Tödlich verunglückte Kinder: 358, 48.209 Verletzte.

1996: Dominikanische Republik: Ein Flugzeug der Birgenair stürzt kurz nach dem Start ab, 189 Tote.

1996: La Hague (Frankreich): Das Gebiet rund um die atomare Wiederaufbereitungsanlage ist stark mit Jod 129 verseucht (Halbwertszeit 15 Mio. Jahre).

1996: Oberrothenbach: 5 Mio. t Arsen- und Uranschlamm sind bis dato von einer Wismut-Firma in einen Stausee geflossen.

1996: Nigeria: Ein Passagierschiff sinkt, 200 Tote.

1996: Frankfurt a.M.: Bei der Fa. Hoechst wird eine Tonne des krebserregenden Pflanzenschutzmittels Arelon freigesetzt, Verseuchung der umliegenden Stadtteile.

1996: Shaoyang (China): 25 t unsachgemäß gelagerter Waffensprengstoff explodiert und zerstört 40 Wohnhäuser, 125 Tote, 400 Verletzte.

1996: Dimitrowgrad (Rußland): Aus einem Kernkraftwerk tritt radioaktiver Dampf aus und verseucht eine Fläche von 10 km².

1996: Wales: Tanker Sea Empress läuft mit 128.000 t Öl auf Grund. Bis zum Freischleppen verliert er 70.000 t Öl.

1996: Großbritannien: Seit Mitte der 80er Jahre 150.800 Fälle des Rinderwahnsinns BSE aufgetreten. Ist als »Kreuzfeld-Jakob-Krankheit« auf den Menschen übertragbar. In GBR bislang 10 Fälle aufgetreten.

1996: Peru: Absturz einer Boeing 737, 123 Tote.

1996: Galvestone, Texas: Ein havarierter Tanker verliert 670 t Öl und löst eine Ölpest aus.

1996: Haiti: Fährunglück, 104 Tote.

1996: Düsseldorf: Großbrand im Flughafen, 16 Tote, 62 Verletzte.

1996: Florida: Absturz einer DC-9, 109 Tote.

1996: Tansania: Überladene Fähre sinkt auf dem Victoriasee, 500 Tote, 120 Verletzte.

1996: Schönebeck: 4 mit Vinyl-Chlorid beladene Eisenbahn-Waggons brennen aus. Salzsäure, Dioxin und Phosgen werden freigesetzt.

1996: New York: Absturz eines TWA-Jumbojets kurz nach dem Start, 229 Tote.

1996: Spitzbergen: Absturz einer russischen TU-154 beim Landeanflug, 145 Tote.

1996: Lagos (Nigeria): Eine Boeing 727 stürzt kurz vor der Landung ab, 141 Tote.

1996: Neu Delhi: Eine saudische Boeing 747 kollidiert kurz nach dem Start mit einer landenden kasachischen IL 72, 531 Tote.

1996: Baikanur: 4-stufige russische Trägerrakete mit 2 Mrd. DM teuerem Marssatelliten kommt nicht aus der Erdumlaufbahn. Der mit einem Plutoniumgenerator betriebene Satellit stürzt auf die Erde.

1997: Fukui (Japan): Der russische Tanker »Nachodka« havariert vor der Küste, zerbricht und verliert rund 19.000 t Öl, 100 km Küste werden verseucht.

1997: Tokai (Japan): Brand und Explosion in einer atomaren Wiederaufarbeitungsanlage setzt Radioaktivität frei. 37 Beschäftigte werden verstrahlt.

1997: Yünnan: Zwei Züge kollidieren, 200 Tote, Viele Verletzte.

1997: Tokio: Der mit 257.000 t Öl beladene panamnesische Tanker »Diamond Grace« läuft vor der Küste auf Grund und schlägt leck, Der Verlust von ca. 1,5 Mio. l Öl verursacht einen 200 km² großen Ölteppich und eine Ölpest.

1997: Insel Guam (Südpazifik): Absturz eines KAL-Jumbos beim Landeanflug, 254 Tote.

1997: Lagos (Nigeria): In Hafennähe kollidieren zwei Passagierschiffe, 100 Tote.

1997: Europa: EU-Kommission stellt fest: 42% aller Böden in Europa sind übersäuert. Der Zustand der Wälder verschlechtert sich, In Deutschland sind nach wie vor mehr als 50% aller Bäume geschädigt.

1997: Port-Au-Prince (Haiti): Eine Personenfähre kentert beim Anlegen, 200 Tote.

1997: Medan: Wegen eines Lotsenfehlers stürzt ein Airbus der Garuda Indonesia bei der Landung ab, 234 Tote.

1997: Deutschland: Laut »Schutzgemeinschaft des Deutschen Waldes« ist das Waldschadensniveau unverändert. 57% aller Eichen sind geschädigt.

1997: Singapur: Kollision der Supertanker »Evoikos« und »Oraphin Global«. 25.000 t Öl laufen aus und verursachen eine Ölpest.

1997: Sumatra (Indonesien): Eine Boeing 737 der Silk Air explodiert auf dem Flug von Jakarta nach Singapur, 104 Tote.

1998: Jaunde (Kamerun): Zwei Kesselwagen eines Zuges explodieren, 220 Tote.

1998: Mindanao (Philippinen): Absturz einer DC-9 der Cebu Pacific, 104 Tote.

1998: Taipeh (Taiwan): Absturz eines A300 der China Airlines beim Landeanflug auf Taipeh, 203 Tote.

1998: Nigeria: Schiffshavarie, 280 Tote, 20 Verletzte.

1998: Sevilla: Ein Abraumbecken mit giftigem Schlamm bricht und verursacht eine Umweltkatastrophe

1998: Eschede: Radbruch eines ICE. Der Zug kollidiert mit einer Brücke, die zwei Waggons unter sich begräbt, 100 Tote, 57 Verletzte.

1998: Guinea-Bissau: Ein Schiff mit Flüchtlingen an Bord sinkt, 200 Tote.

Literatur

Beck, U. 1986: Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne. Frankfurt a.M.

Beck, U., Giddens, A. und Lash, S. 1996: Reflexive Modernisierung, Frankfurt a.M.

Büchel, K.H. 1995: Erfolgsgarant Nr. 1: Innovationsfähigkeit. In: Fonds der Chemischen Industrie (Hg.): Chemie Heute, Ausgabe 1994/1995: 4-5, Frankfurt a.M.

Friedrichs, J. 1991: Unter welchen Bedingungen werden neue Technologien angenommen? In: Jaufmann, D. und Kistler, E. (Hg.): Einstellungen zum technischen Fortschritt. Technikakzeptanz im nationalen und internationalen Vergleich: 117-134, Frankfurt a.M.

Heidenreich, M. (Hg.) 1993: Computers and Culture in Organizations. The Introduction and Use of Production Control Systems in French, Italian, and German Enterprises. Berlin.

Henkel, H.-O. 1996: Leerlauf zwischen Wissenschaft und Wirtschaft - Expertendilemma oder Strukturproblem? In: Spektrum der Wissenschaft - Forum: »Das Expertendilemma«, Heft 5: 41-45.

Hennen, L. 1994: Ist die (deutsche) Öffentlichkeit »technikfeindlich«? Ergebnisse der Meinungs- und der Medienforschung. Erster Sachstandsbericht im Rahmen des Monitoring-Projektes »Technikakzeptanz und Kontroversen über Technik« am TAB. TAB (Hg.), Arbeitsbericht Nr. 24, Bonn.

Jaufmann, D. 1991: Alltagstechnologien - Großtechnologien. Technikakzeptanz als facettenreiches Objekt mit vielfältigen empirischen Zugängen. In: Jaufmann, D. und Kistler, E. (Hg.): Einstellungen zum technischen Fortschritt. Technikakzeptanz im nationalen und internationalen Vergleich: 71-93, Frankfurt a.M.

Jaufmann, D. und Kistler, E. 1993: Sekundäranalytische Synopse von empirischen Untersuchungen zur Technikakzeptanz. Bericht an den Deutschen Bundestag, Büro für Technikfolgenabschätzung, inifes, Stadtbergen.

Kaase, M. 1976: Bedingungen unkonventionellen politischen Verhaltens in der Bundesrepublik Deutschland. In: PVS, Sonderheft 7, Opladen.

Kistler, E. 1991: Eurosklerose, Germanosklerose? - Einstellungen zur Technik im internationalen Vergleich. In: Jaufmann, D. und Kistler, E. (Hg.): Einstellungen zum technischen Fortschritt. Technikakzeptanz im nationalen und internationalen Vergleich, Frankfurt a.M.: 53-69.

Küchler, M. 1979: Multivariate Analyseverfahren. Stuttgart.

Renn, O. 1995: Forschung und Technik im Verständnis der Öffentlichkeit. In: Max-Planck-Gesellschaft (Hg.): Der schrumpfende Freiraum der Forschung. Berichte und Mitteilungen, Heft 1: 209-247, München.

Renn, O. und Zwick, M.M. 1997: Risiko- und Technikakzeptanz. Herausgegeben von der Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt«, Berlin.

Stock, U. 1994: Verspargelung? Nein danke! Ganz Deutschland begeistert sich für die Stromgewinnung aus der Luft. Doch wo die scheinbar sanfte Energie erzeugt wird, leisten entnervte Bürger jetzt Widerstand. In: Die ZEIT, Nr. 32; 5. Aug. '94: 60.

UNDP (Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen) 1996: Bericht über die menschliche Entwicklung 1996, Bonn.

World-Resources Institute 1997: World Resources. A Guide to the Global Environment, New York.

Zwick, M.M. 1990: Neue soziale Bewegungen als politische Subkultur. Zielsetzung, Anhängerschaft, Mobilisierung - eine empirische Analyse. Frankfurt a.M.

Zwick, M.M. 1997: Technikeinstellungen - ein deutscher Sonderweg? In: Hake, J.-F. u.a. (Hg.): Energieforschung. Herausgegeben vom FZ Jülich in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen, Universität-GH Essen und Universität Oldenburg: 475-500, Jülich.

Zwick, M.M. 1998: Wahrnehmung und Bewertung von Technik in Baden-Württemberg. Tabellenband. Arbeitsbericht 117 der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart.

Zwick, M.M. 1998a: Internationale Katastrophendatenbank des 20. Jh., Stuttgart.

Nutzung und Sicherheitsaspekte von Wasserstoff als zukünftigem Energieträger

Karl Verfondern

Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR)

Forschungszentrum Jülich

1 Einleitung

Im Jahre 1996 belief sich der weltweite Verbrauch an Primärenergie auf 8380 Mio TOE[1]. Der überwiegende Teil hiervon, nämlich 90 %, wurde aus fossilen Brennstoffen - Erdöl, Kohle, Erdgas - gewonnen; der Rest stammt aus Nuklearanlagen (7.4 %) und Wasserkraft (2.6 %). Trotz starker Reduzierung der Energieintensität bei der Herstellung industrieller Güter wird aufgrund des Bevölkerungswachstums sowie der zunehmenden Entwicklung neuer Bedürfnisse, insbesondere in den Dritte-Welt Ländern, der Primärenergieverbrauch noch weiter ansteigen. Global gesehen wird mit einer Steigerungsrate von 1.6 % pro Jahr gerechnet. Etwa 30 % der Primärenergie wird für die Erzeugung von Elektrizität aufgewandt. Auch hier dominieren wiederum die Beiträge aus fossilen Brennstoffen; die wesentlichen nicht-fossilen Quellen sind Wasserkraft (20 %) und Nuklearenergie (17 %), während die erneuerbaren Energien nur eine untergeordnete Rolle spielen. Es wird erwartet, daß der Elektrizitätsbedarf noch weiter ansteigen wird.

Die entscheidenden Probleme, die mit dem enormen Energiebedarf verbunden sind, ergeben sich einerseits aus den begrenzten Vorräten fossiler Energiequellen, die noch kostengünstig zu fördern sind, andererseits aus der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, die naturgemäß mit einem Ausstoß von Schadstoffen in die Umwelt mit unerwünschten Nebeneffekten verbunden ist. Jährlich gelangt eine Menge von rund 20 Mrd. t CO_2 in die Atmosphäre. Die Belastung der Atmosphäre durch CO_2 und andere klimawirksame Gase wird gegenwärtig als eine der Hauptursachen für eine globale Erwärmung angeführt.

Die Weltklimakonferenzen in Toronto 1988, in Rio de Janeiro 1992 und in Kyoto 1997 zeigen auf der einen Seite die Erkenntnis der Notwendigkeit, dem gegenwärtigen Trend entgegenzuwirken mit der Forderung nach CO_2 Reduzierung in den Industrieländern und langfristig zumindest nach einer Stabili-sierung des atmosphärischen CO_2 Niveaus. Auf der anderen Seite erkennt man die enormen Schwierig-keiten, entgegen den Interessen bzw. Möglichkeiten mancher Teilnehmerstaaten solche Ziele mit der Realität in Einklang zu bringen. Immerhin hat der Gipfel in Kyoto im vergangenen Jahr trotz unübersehbarer Schwächen zu einem Abschluß geführt, der, falls er denn in Kraft tritt, zur - völker-rechtlich verbindlichen - Verpflichtung der Industrieländer führen würde, die Emission klimaschädlicher Gase bis zum Jahre 2008 im Mittel um 5.2 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken.

[1] 1 TOE (ton oil equivalent) = 1.428 SKE = 41.868 MJ

Das langfristige Ziel einer Verringerung der atmosphärischen Belastung kann, so die allgemeine Ansicht, nur durch verstärkte Anstrengungen bei der Entwicklung und Anwendung neuer bzw. verbesserter Technologien für eine umweltschonende Energieversorgung erreicht werden. Wasserstoff als Kandidat für einen ideal geeigneten künftigen Energieträger könnte im Zuge dieser Entwicklung eine zunehmend wichtigere Rolle spielen.

2 Energieträger Wasserstoff

Wasserstoff ist das am häufigsten vorkommende Element im Universum. Als Brennstoff stellt Wasserstoff eine saubere, umweltfreundliche Form eines Energieträgers dar. Er verbrennt zu Wasserdampf und setzt dabei seinen chemisch gebundenen Energieinhalt in Form von Wärme frei, die dann einer weiteren Nutzung zur Verfügung steht. Das Niveau an Schadstoffen, die bei dem Verbrennungsprozess entstehen, ist praktisch vernachlässigbar. Wasserstoff läßt sich ohne größere Probleme als Gas oder Flüssigkeit speichern und transportieren und zu einem späteren Zeitpunkt nutzen.

Wasserstoff tritt in der Regel jedoch als Teil einer chemischen Verbindung auf, z.B. in Form von Wasser oder Kohlenwasserstoffen. Um ihn zu gewinnen, muß er also unter Aufwendung von Primärenergie aus der Verbindung herausgelöst werden; Wasserstoff ist somit ein Sekundärenergieträger. Seine zukünftige Gewinnung mittels erneuerbarer Energiequellen macht ihn zu einem echten CO_2-freien Energieträger. Die Elektrolyse wäre dabei ein Schlüsselelement.

Seine Umweltfreundlichkeit und Vielseitigkeit macht den Wasserstoff zum Energieträger der Zukunft. Er dient als Energielieferant für den Antrieb von Fahrzeugen, als Brennstoff zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie als Energiespeicher- und Transportmedium.

Tabelle 1: Wichtige charakteristische Eigenschaften von Wasserstoff

Molekulargewicht	2.01594	g/mol
Siedepunkt	20.268	K
Freie Reaktionsenthalpie (unterer Heizwert)	241.8	kJ/kg
Verdampfungsenthalpie	445.59	kJ/kg
Dichte des Gases @ STP	0.083764	kg/m^3
Dichte des Gases @ Siedepunkt	1.338	kg/m^3
Dichte der Flüssigkeit @ Siedepunkt	70.78	kg/m^3
Stöchiometrischer Anteil in Luft	29.53	vol%
Zündgrenzen in Luft	4 - 75	vol%
Detonationsgrenzen in Luft	13 - 65	vol%
Minimale Zündenergie in Luft	0.019	mJ
Selbstentzündungstemperatur in Luft	858	K
Flammentemperatur (max.)	2403	K
Emissionskoeffizient	< 0.1	
Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit in Luft	3.46	m/s
Detonationsgeschwindigkeit (Chapman-Jouguet)	1968	m/s
TNT Äquivalent	2.22	kg TNT/Nm^3 Gas

Wasserstoff ist über einen weiten Temperaturbereich gasförmig. Sein Siedepunkt liegt bei 20.3 K, sein Gefrierpunkt bei 13.8 K. Oberhalb von 22 K ist Wasserstoff bereits leichter als Luft, erfährt also einen positiven Auftrieb in der freien Atmosphäre und vermischt sich rasch mit der Umgebungsluft. Ein Wasserstoff-Luft Gemisch ist über einen breiten Konzentrationsbereich, 4 - 75 vol% Wasserstoff, zündfähig, das bereits bei sehr geringen Zündquellen auch zündet. Die hohe Verbrennungswärme und die hohe spezifische Wärme ebenso wie das saubere Verbrennungsprodukt machen ihn zu einem idealen Brennstoff in Motoren oder Gasturbinen. Eine brennende Wasserstoffflamme ist vergleichsweise heiss (max. ca. 2400 K), praktisch unsichtbar, und sie strahlt kaum Wärme ab. Einige wichtige charakteristische Zahlen für Wasserstoff sind in der Tabelle 1 zusammengetragen.

Die o.g. Eigenschaften machen den Wasserstoff für verschiedenen Anwendungen äußerst attraktiv, allerdings sind die Konsequenzen bei unkontrollierter Verbrennung absolut nicht zu vernachlässigen.

Ein Antrieb zur Erforschung des Mediums Wasserstoff war schon immer der Wunsch, zusätzlich zur Elektrizität einen weiteren Sekundärenergieträger, insbesondere auch für den nicht-elektrischen Markt, zu entwickeln. Eine erfolgreiche Einführung hängt allerdings davon ab, ob sowohl wirtschaftliche als auch sichere Lösungskonzepte für Produktion, Speicherung, Transport, Verteilung und Anwendung von Wasserstoff gefunden werden können.

3 Anwendungspotential von Wasserstoff

Der jährliche Verbrauch an Wasserstoff beträgt weltweit rund 500 Mrd. Nm^3, entsprechend 1500 TWh/a (bezogen auf den unteren Heizwert). Bei einer breiten Palette von Anwendungsmöglichkeiten geschieht dies einerseits als Sekundärenergieträger und andererseits als Sekundärrohstoff. Mit 48 % des Gesamtverbrauchs spielt der Wasserstoff in nicht-energetischen Anwendungen sowohl als chemischer Rohstoff als auch für industrielle und petrochemische Prozesse als Zwischenprodukt eine erhebliche Rolle. Im Hinblick auf energetische Anwendungen sind die Bereiche der Produktion sauberer synthetischer Brennstoffe (20 %) sowie der Nutzung direkt als Brennstoff zur Prozesswärmeerzeugung in der chemischen Industrie (32 %) von Bedeutung. Eine nur untergeordnete Rolle spielt derzeit noch der Wasserstoff als Brennstoff zur direkten Erzeugung von mechanischer Energie, Heizwärme oder Elektrizität. Allerdings bieten sich im Hinblick auf künftige Anwendungen enorme Möglichkeiten für dessen Einsatz als direkter Brennstoff bzw. Treibstoff, über die im folgenden ausführlicher berichtet wird.

3.1 Nicht-energetische Anwendungen des Wasserstoffs als chemischer Rohstoff

3.1.1 Ammoniak Synthese

Die Ammoniaksynthese nach dem Haber-Bosch Verfahren konsumiert rund 200 Mrd. Nm^3 Wasserstoff, entsprechend 40 % der Weltjahresproduktion. Nach einem ersten Schritt der Dampfreformierung von Methan (oder Benzin) zur Erzeugung von Synthesegas wird in einem zweiten Schritt Luft beigemischt zur partiellen Oxidation des restlichen Methans und des CO. Nach Abtrennung des CO_2 erhält man bei geeigneten Systembedingungen ein Stickstoff / Wasserstoff Gemisch im gewünschten Verhältnis von 1:3. Die Synthese erfolgt bei 400 °C und einem Systemdruck von 5 MPa. Moderne industrielle Anlagen besitzen eine Kapazität von täglich 1000 - 2000 t flüssiges NH_3, entsprechend einem H_2-Verbrauch von 80,000 - 160,000 Nm^3/h. Ammoniak wird überwiegend bei der Düngemittelherstellung angewendet.

3.1.2 Methanol Synthese

Die weltweite Produktion von Methanol betrug 1995 ungefähr 27 Mio t, wobei rund 5 % der Wasserstoffproduktion verbraucht wurden. Methanol entsteht in Umkehrung des Dampfreformierungsprozesses in einem Kompressionsschritt eines Gemischs aus H_2, CO und CO_2 auf etwa 10 MPa bei Temperaturen um 250 °C. Die Produktionskapazität moderner Anlagen liegt bei 3000 t Methanol täglich. Seine Verwendung erfolgt überwiegend in der chemischen Industrie als Zwischenprodukt. Noch unbedeutend ist seine Nutzung in Automobilen zur Substitution stärker CO_2-erzeugender Treibstoffe. Bei Verwendung von nicht-fossiler Primärenergie und von CO_2, das zuvor der Atmosphäre entnommen wird, hätte man sogar eine CO_2-neutrale Lösung erreicht.

3.2 Energetische Anwendungen des Wasserstoffs als Brennstoff der Zukunft

Aus einer Vielzahl von energetischen Anwendungen des Wasserstoffs werden im folgenden einige kurz beschrieben.

3.2.1 Katalytische Verbrennung

Gegenüber der konventionellen Verbrennung in einer Flamme besitzt die katalytische oder flammenlose Verbrennung einige Vorteile. Sie ist sicher, geschieht bei niedrigen Temperaturen < 500 °C und nutzt das Brenngas zu einem sehr hohen Anteil (99.9 %) aus. Außerdem vermeidet sie die sonst bei den hohen Verbrennungstemperaturen auftretende NOX-Bildung. Die katalytische Verbrennung tritt bereits in Gegenwart geringer, feinverteilter Mengen an Platin oder Palladium als Katalysator auf. Derzeitige Nachteile sind noch die kleine Wärmeflussdichte und die ungleichförmige Temperaturverteilung auf der Katalysatoroberfläche. Anwendungsmöglichkeiten für katalytische Brenner finden sich in idealer Weise im Haushalt, z.B. als Kocher, Heißwassergeräte oder Raumheizung.

3.2.2 Brennstoffzellen

Die Brennstoffzelle ist - in Umkehrung zum Prinzip der Elektrolysezelle - eine Vorrichtung zur direkten Umwandlung der Energie eines Brennstoffs in Elektrizität mittels einer elektrochemischen Reaktion. Zwei Elektroden sind durch einen Elektrolyten voneinander getrennt, der zwar gasdicht, aber für bestimmte Ionen durchlässig ist. An der Anode werden H_2-Moleküle in H^+-Ionen und Elektronen aufgespalten, wobei der äußere Ladungsaustausch (Elektronen) über die Elektroden geschieht, während beim inneren Ladungsaustausch die H^+-Ionen durch den Elektrolyten wandern. An der Kathode rekombinieren dann je zwei Protonen, ein Sauerstoff-Atom und die abgegebenen Elektronen unter Bildung von Wasserdampf und Wärme, die dann abgegeben und ggf. weiter genutzt werden können, wobei über den Stromkreis Elektrizität abgegriffen werden kann. In der Praxis erzeugt eine einzelne Brennstoffzelle ca. 0.7 - 0.8 V Spannung bei einer Leistung von einigen 10 bis einigen 100 W. Der Wirkungsgrad liegt im Bereich von 60 %. Von allen Brennstoffen ist Wasserstoff wegen seiner höchsten Reaktivität am besten geeignet.

Je nach verwendetem Elektrolyten werden verschiedene Arten der Brennstoffzelle unterschieden. Brennstoffzellen, die bei niedrigen Temperaturen betrieben werden, benötigen einen Katalysator zur Steigerung der Reaktivität. Der wiederum ist sehr empfindlich gegen CO-Vergiftung, so daß reiner Wasserstoff Voraussetzung ist. Als Treibstoff kann auch reformiertes Methanol oder Methan mit minimalem CO-Gehalt (< 5 ppm) eingesetzt werden. Dagegen können die bei hohen Temperaturen

betriebenen Brennstoffzellen auf einen (teuren) Katalysator verzichten und auch mit anderen Brennstoffen, z.B. CO, CH_4, und ggf. Kohlegas, Öl, bespeist werden.

a) Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) bzw. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM-FC)
Die PEFC (siehe Abb. 1) ist eine effiziente, kompakte, robuste und lärmfreie Art der Stromerzeugung. Sie besitzt eine 0.1 mm dicke, protonen-leitende Folie als Feststoff-Elektrolyten. Von allen Brennstoffzellen hat sie die höchste Leistungsdichte und wegen der niedrigen Temperatur (50 - 140 °C) eine vergleichsweise hohe Lebensdauer. Von Nachteil ist gegenwärtig noch der hohe Verbrauch an Platin als Katalysator an den Elektroden bzw. deren Empfindlichkeit gegenüber CO.

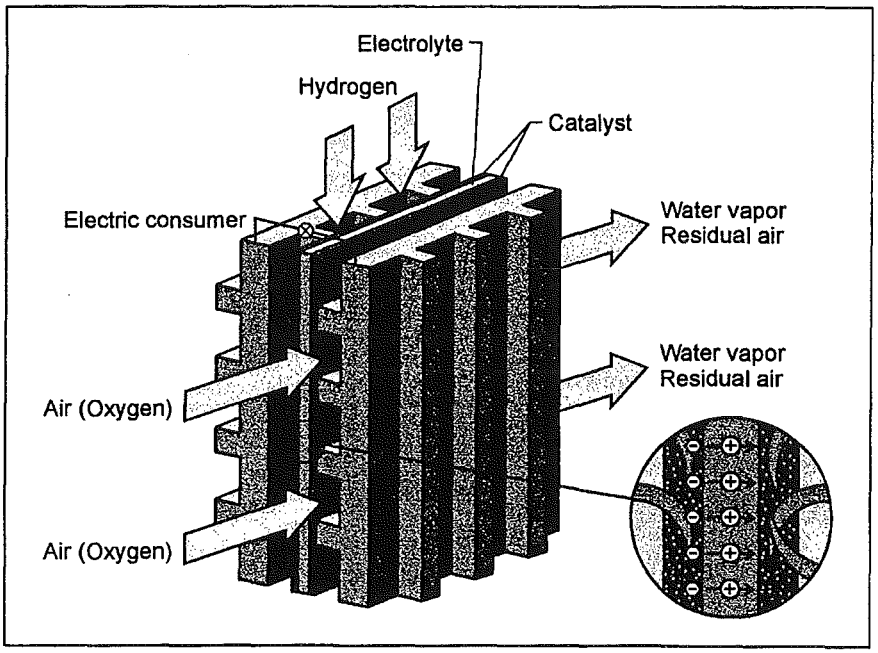


Abb. 1: Aufbau einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle (PEFC)

b) Alkaline Fuel Cell (AFC)
Die AFC ist eine Niedertemperatur-Brennstoffzelle mit sehr hohem Wirkungsgrad und hoher Leistungsdichte und ist damit ideal für mobile Anwendungen, insbesondere in der Raumfahrt. Sie hat allerdings einen komplizierteren Aufbau wegen des korrosiven flüssigen Elektrolyten und der Forderung nach hoher Reinheit des Brenngases, das z.B. kein CO_2 enthalten darf.

c) Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)
In der bei Temperaturen bis 220 °C betriebenen PAFC spielt das Vergiftungsproblem durch CO nur eine kleine Rolle. Sie kann mit Wasserstoff oder reformiertem Erdgas betrieben werden. Bei der PAFC läßt sich der Wirkungsgrad durch die weitere Ausnutzung der Abwärme noch bis zu 85 % steigern. PAFC sind die bislang in kommerzieller Hinsicht am weitesten entwickelten Systeme mit hoher Zuverlässigkeit und mit den meisten praktischen Erfahrungen, insbesondere aus dem Betrieb vieler 200 kW Einheiten für die dezentrale stationäre Elektrizitätserzeugung.

d) Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)
Die MCFC hat eine Betriebstemperatur oberhalb von 600 °C. Damit sind auch andere Brennstoffe wie Methanol, Methan oder sogar Kohlengas mit externer oder (partieller) interner Reformierung einsetzbar. Entscheidende Nachteile sind derzeit noch ihre geringe Leistungsdichte, der stark korrosive Elektrolyt (geringe Lebensdauer), Dichtungsprobleme sowie der insgesamt noch niedrige Wirkungsgrad von 40 %.

e) Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
Die SOFC Hochtemperatur-Brennstoffzelle ist noch im Entwicklungsstadium wegen ihrer hohen Anforderungen an Material und Konstruktion, ist aber attraktiv, da das hohe Temperaturniveau von ca. 1000 °C schnelle chemische Reaktionen erlaubt. Sie enthält keramische Elektroden und eine Sauerstoff-Ionen leitenden Elektrolyten aus Zirkon. Als Brennstoffe sind Kohlenwasserstoffe mit oder ohne vorausgehender Reformierung einsetzbar. Die austretenden Gasströme, bestehend aus CO_2, H_2O, CO, H_2, können ebenso wie die hohen Austrittstemperaturen noch weiter genutzt werden. Probleme bereitet noch die Langzeit-Stabilität infolge der Zersetzung der keramischen und metallischen Komponenten. Die SOFC kann auch in umgekehrter Richtung als Elektrolysezelle betrieben werden.

3.2.3 Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge

Bei den Raumfahrtprogrammen in den USA, der ehemaligen Sowjetunion, Europa, Japan und China wurde und wird (flüssiger) Wasserstoff in großem Maßstab angewandt, nachdem er als einer der energiereichsten Treibstoffe erkannt wurde. Die erste Rakete mit einem H_2 / O_2-Antriebssystem startete bereits 1963 in den USA. Im Space Shuttle, das von drei Hochdruckmotoren angetrieben wird, umfasst der Treibstoff 1575 m^3 LH_2 und 550 m^3 LOX, untergebracht in einem riesigen externen Tank. Japan startete 1994 erfolgreich die Zwei-Stufen Trägerrakete H-II (Abb. 2), ebenfalls mit einem LH_2 / LOX-Antriebssystem versehen. In den USA gab es 1988 das erste und bislang einzige Flugzeug, eine für H_2-Betrieb umgerüstete Vier-Sitzer Maschine, das allein auf der Basis von Wasserstoffenergie startete und wieder landete. In demselben Jahr konnte Russland mit einer modifizierten 3-motorigen TU-155, bei der ein Motor mit Wasserstoff und alternativ mit Erdgas betrieben wurde, insgesamt 10 Stunden Flugerfahrung mit Wasserstoffantrieb sammeln. Vorteile des Flugtreibstoffs Wasserstoff sind sein niedriges Gewicht und seine hohe massenbezogene Energiedichte; ein Hauptnachteil ist der deutlich höhere Platzbedarf.

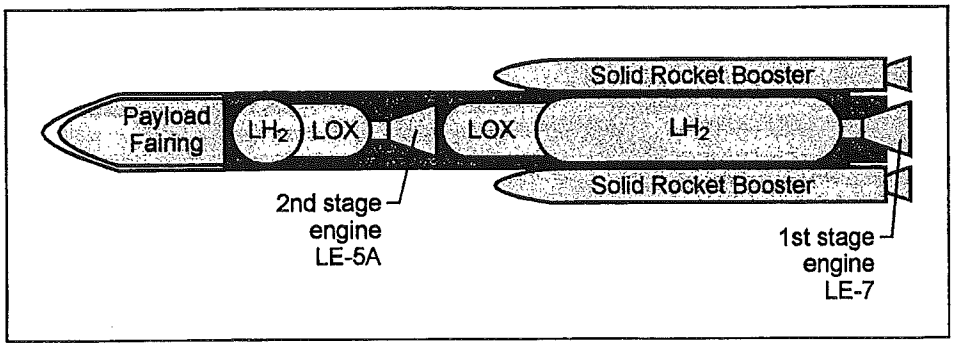


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau der japanischen H-II Trägerrakete

In Gemeinschaftsarbeit mit russischen Partnern entwickelt die „Deutsche Aerospace Airbus“ seit 1990 das Konzept eines mit LH_2 betriebenen Flugzeugs [1]. Das technologische Programm umfaßt die Entwicklung und Erprobung neuer Komponenten und Materialien, u.a. Verbrennungskammer, Kryopumpen, Sensoren für H_2-Leckagen. Des weiteren sind Studien zur neuen Infrastruktur und Umweltbeeinträchtigung durchgeführt worden. Von dem ursprünglichen Plan der Umrüstung eines Airbus A310-300 ist man aus Kostengründen zunächst auf einen preigünstigeren Zwischenschritt ausgewichen, nämlich der Modifizierung einer Fairchild-Dornier 328 mit Platz für 30 Passagiere. Die Planungen sehen den ersten Testflug für das Jahr 2002 vor.

Das erste Auto mit LH_2 / LOX-Antrieb fuhr 1971 in den USA. Ebenfalls in den USA nahm 20 Jahre später der erste PKW mit Brennstoffzellen-Antrieb seinen erfolgreichen Probebetrieb auf. Inzwischen haben fast alle namhaften Autofirmen auf der Welt Konzepte für PKW, LKW oder Busse entwickelt und überwiegend bereits in Testfahrzeugen umgesetzt, die sich im Wesentlichen im Antriebssystem (Brennstoffzelle / Verbrennungsmotor) und im Speicherkonzept (LH_2, Druckwasserstoff, Metallhydrid, Methanol) voneinander unterscheiden. Auf deutscher Seite seien als Beispiele genannt BMW, die auf der Basis des LH_2-Verbrennungsmotors seit 1995 ein Testfahrzeug der vierten Generation mit 80 kW Leistung erproben [2], und Daimler-Benz, die auf der Basis des Brennstoffzellen-Antriebs mit den NECAR (New Electric Car)-Fahrzeugen die kommerzielle Produktion anstreben [3].

Ein ausgezeichnetes und sinnvolles Objekt zur Demonstration eines schadstoffarmen Antriebs ist der öffentliche Nahverkehr, da hierdurch die hohe lokale Belastung der Umwelt in den Großstädten reduziert werden kann. So gibt es inzwischen eine ganze Reihe von Stadtbus-Projekten, die an verschiedenen Orten in der Welt entwickelt und getestet werden, von denen hier jedoch nur wenige aufgezählt werden können. Ein Schwerpunkt wird dabei von der kanadischen Brennstoffzellen-Firma Ballard Power Systems gesetzt, deren PEFC-Brennstoffzellen-Fertigung auf dem Sprung in den kommerziellen Markt steht. Seit 1991 testet sie Busse mit Brennstoffzellen-Antrieb; drei Fahrzeuge der mittlerweile vierten Generation befinden sich derzeit in Chicago im Testbetrieb. Auf der Basis von Ballard-Brennstoffzellen hat auch Daimler-Benz seinen NEBUS (New Electric Bus) mit 250 kW entwickelt und 1997 der Öffentlichkeit präsentiert. In Bayern wird ein MAN Bus von Diesel- auf Brennstoffzellen-Antrieb umgerüstet (Abb. 3). Die vier PEFC-Module mit insgesamt 120 kW Leistung werden mit Wasserstoff gespeist, der als Druckgas (25 MPa) auf dem Dach gespeichert wird.

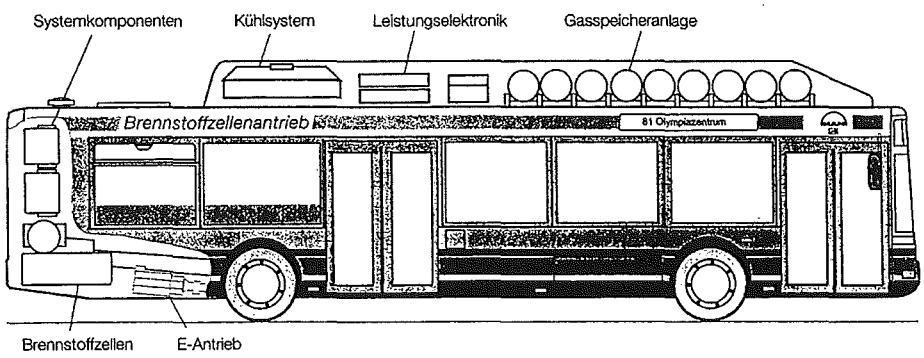


Abb. 3: MAN Bus

Weitere Busprototypen, die im Rahmen des Euro-Quebec Projekts gefördert werden, sind in Abschnitt 3.4.1 genannt. Das „Georgetown Fuel Cell Transit Bus Program" erforscht den Busantrieb auf der Basis von PAFC. Brennstoff ist Methanol, der an Bord zu Wasserstoff reformiert wird. Der erste PAFC-Bus der Welt nahm 1994 seinen Testbetrieb auf.

Auch im Bereich der Schiffahrt und bei Eisenbahnen gibt es bereits Konzepte mit PEFC Antriebssystemen. Da hier Gewichtsprobleme praktisch keine Bedeutung haben, beruht das Speicherkonzept auf den inhärent sicheren Metallhydriden. In Deutschland werden derzeit einige Unterseeboote mit Brennstoffzellen-Antrieb ausgerüstet; das erste soll 2003 in Betrieb genommen werden.

3.2.4 Dampferzeuger

Der von der DLR in Stuttgart entwickelte H_2 / O_2 Dampferzeuger als spin-off der Raketentechnologie repräsentiert eine neuartige zusätzliche Kraftwerkskomponente, die in der Lage ist, bei Bedarf auf Anhieb, d.h. innerhalb weniger Sekunden, zusätzliche elektrische Leistung bis zu 40 MW bereitzustellen [4]. Hierzu werden Wasserstoff und Sauerstoff im stöchiometrischen Verhältnis in eine Verbrennungskammer eingeführt und gezündet. Dabei bestimmen die Gasmassenströme die thermische Leistung des Systems. Die Verbrennungswärme wird direkt auf das Reaktionsprodukt Wasser sowie auf zusätzlich eingespritztes Speisewasser übertragen. Der entstehende Dampf mit einer gewünschten Temperatur von 500 - 1000 °C, die durch die Speisewasserzufuhr - auch zeitlich variabel - geregelt werden kann, wird anschließend auf die Mitteldruckturbine des Kraftwerks gegeben. Der Wirkungsgrad des Systems liegt mit mehr als 95 % überaus hoch. Leider mangelt es diesem Konzept der Reservevorhaltung derzeit an entsprechendem Marktpotential.

3.2.5 Moderne Kraftwerke

Es gibt auch moderne Kraftwerkskonzepte, die den Wasserstoff als Brenngas nutzen. Die derzeit sauberste Art der Kohleverstromung erfolgt in den sogenannten IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) - Kraftwerken [5]. Hier wird zunächst die Kohle bei 1400 °C vollständig vergast. Nach Abkühlung, Reinigung und Zufuhr von Stickstoff wird das resultierende H_2 / CO Brenngas bei Temperaturen von 1100 - 1200 °C in eine Gasturbinenbrennkammer eingespeist. Das austretende Gas von 540 °C gelangt anschließend in einen Abhitzedampferzeuger zum Betreiben einer Dampfturbine. Die entscheidenden Vorteile sind ein erhöhter Wirkungsgrad (mehr als 50 % werden erwartet) sowie deutlich reduzierte Emissionen an SO_2, CO_2 und. Prototyp-Anlagen gibt es z.Z. in Deutschland, Spanien und den USA.

Die thermische Vergasung von Biomasse führt je nach Brennstoffart und Betriebsbedingungen zu einem mit Wasserstoff angereicherten Produktgas, dessen Konzentration ausreichend hoch ist, um z.B. in einem Brennstoffzellen-Kraftwerk eingesetzt werden zu können. Eine erste Anlage dieser Art ist gegenwärtig in Bad Brückenau im Bau und soll 1999 ihren Betrieb aufnehmen. Sie ist für eine Konversion von 2000 - 3000 t Biomasse jährlich ausgelegt und erzeugt 600 kW Elektrizität über die Brennstoffzellen sowie weitere 800 kW aus der Verbrennung des Restgases in einer Turbine. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage wird auf 50 - 60 % geschätzt.

3.3 Autonome Energieversorgungssysteme auf der Basis von Wasserstoff

Im folgenden werden beispielhaft einige (Teil-) Systeme einer Energieversorgung auf der Basis von Wasserstoff beschrieben, die teils konzipiert, teils bereits verwirklicht sind.

3.3.1 Euro-Quebec Projekt

Ende der 80er Jahre gewann die Vorstellung eines sauberen Energiesystems auf der Basis von Wasserstoff an Konturen, das unter dem Titel „Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project" (EQHHPP) bekannt wurde [6]. Eine Machbarkeitsstudie, veranlaßt von der Commission of European Communities (CEC) hatte gezeigt, daß es möglich sein sollte, Wasserkraft in Kanada zur Elektrizitätserzeugung zu nutzen, mit ihrer Hilfe durch Elektrolyse Wasserstoff zu gewinnen und diesen dann in flüssiger Form in Spezialtankschiffen nach Europa, konkret Hamburg, zu transportieren. Dort werde er dann Endverbrauchern in verschiedenen Anwendungsbereichen zur Verfügung gestellt werden (Abb. 4). Als repräsentative Größe wurde eine Gesamtleistung von 100 MW(e) gewählt.

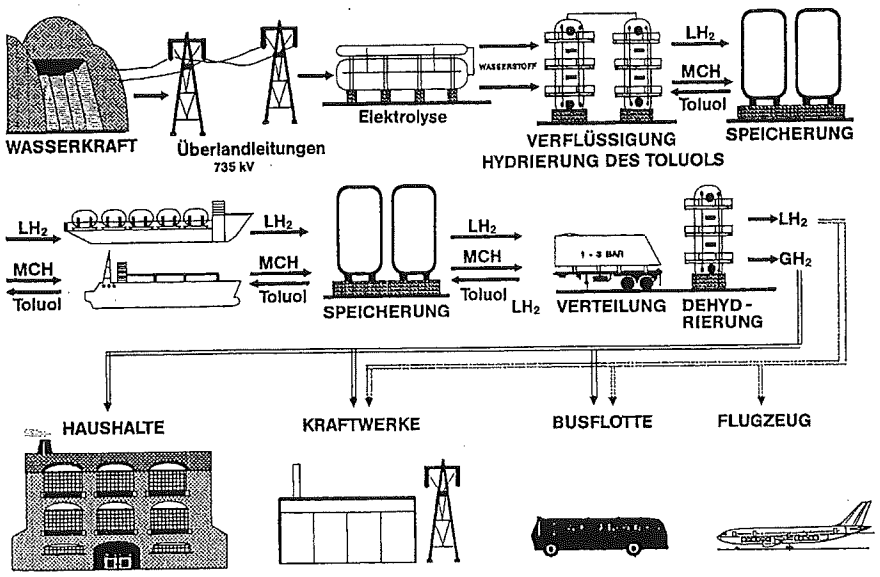


Abb. 4: Konzept des Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project

Für das Projekt, an dem zahlreiche internationale Partner beteiligt sind, hat 1992 die Phase III begonnen, eine Demonstrationsphase, in der diverse Einzelkomponenten des Gesamtsystems entwickelt, gefertigt und getestet werden. Von den vielen Aktivitäten seien beispielhaft genannt:

- Omnibus-Projekte
  In verschiedenen Vorhaben in Belgien, Deutschland, Irland, Italien und Kanada sind Konzepte für eine Umrüstung konventioneller Stadtbusse auf Wasserstoffantrieb entwickelt und umgesetzt worden. Als weltweit erster Bus mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor gilt der belgische Bus, der seit 1994 betrieben wird. Auch der deutsche Bus basiert auf dem Verbrennungsmotor, hier allerdings mit Wasserstoff / Benzin Hybridantrieb. Er wird seit Anfang 1996 im Stadtverkehr in Erlangen, jetzt in München

eingesetzt. Dagegen beruht der in Italien entwickelte Bus auf einem Brennstoffzellenantrieb. Der Bus in Irland verwendet einen Hybridantrieb in Form einer Kombination aus elektrischem Antrieb (Batterien) und einem Stirling-Motor (gasförmiger Wasserstoff). Im kanadischen Busprojekt ist als Treibstoff für den Verbrennungsmotor sogenanntes „Hythane" vorgesehen, eine Mischung aus typischerweise 20 % H_2 und 80 % CH_4.

- Brennstoffzellenkraftwerk
  Die Hamburgischen Elektricitäts-Werke (HEW) und die Hamburger Gaswerke (HGW) demonstrieren im Rahmen eines Pilotprojekts den Betrieb eines Brennstoffzellen-Heizkraftwerks zur Versorgung eines Wohnbezirks mit Heizwärme. Im ersten Schritt wurde eine mit Erdgas betriebene 200 kW PAFC Anlage in Betrieb genommen, die nach drei Jahren erfolgreichem Betrieb seit Mitte 1997 ergänzt wurde um - erstmals auf der Welt - eine mit Wasserstoff betriebene PAFC Anlage derselben Leistung. Die kontinuierliche Versorgung der letzteren erfolgt über einen 60 m^3 LH_2 Tank, der alle 2 bis 3 Wochen von Tankfahrzeugen wieder aufgefüllt wird.

- Maritimer Transport von LH_2
  Für den Seetransport von flüssigem Wasserstoff von Kanada nach Deutschland ist im ersten Schritt ein Tankschiff vorgesehen, mit dem insgesamt 15,000 m^3 LH_2 in fünf Bargen transportiert werden können [7]. Die Bargen sind schwimmfähig, können aus dem Schiff ausgeschwemmt und direkt an Land gehievt werden. Man vermeidet damit verlustreiche Umfüllprozesse. Die Tanks sind jeweils aus einem inneren und äußeren Behälter aufgebaut, zwischen denen eine Superisolierung angebracht ist. Die Abmessungen betragen außen (innen) 22.0 (18.7) m in der Länge und 14.7 (14.0) im Durchmesser. Die Tanks dürfen über mehr als 25 Tage keine Abdampfverluste zeigen. Für den Transport noch größerer Mengen liegen bereits Konzepte von Nachfolgeschiffen mit einer Ladekapazität von 5 x 25,000 m^3 LH_2 vor.

- Sicherheitsuntersuchungen für LH_2-Speichertanks
  In einem gemeinsamen Projekt zwischen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und Germanischer Lloyd ist ein Speichertank für LH_2 mit einem Volumen von 61 m^3 gefertigt worden [8]. Er dient als Modell eines künftigen maritimen Transportbehälters. Das wissenschaftliche Untersuchungsprogramm mit dem Ziel, dessen Sicherheit bei Speicherung und Transport zu demonstrieren, umfaßte u.a. Tests zum Wärmeeintrag von außen in den Behälter und zum (erzwungenen) Druckanstieg im geschlossenen Behälter. Die Autofirma BMW hat eine umfangreiche Serie von Sicherheitstests an LH_2-Tanks für PKW mit einer Kapazität bis 125 l durchgeführt [9]. Untersucht wurde das Verhalten der Tankstrukturen u.a. bei Beschleunigung, Deformation und Feuer. Die Tanks konnten das gutmütige Verhalten während der Druckentlastung über das Sicherheitsventil zeigen. In keinem Fall kam es zu einem Austritt von Flüssigkeit.

3.3.2 WE-NET Projekt

Das wohl ehrgeizigste umfassende Forschungsprojekt bzgl. Wasserstoff wird derzeit in Japan verfolgt. Das über eine Gesamtlaufzeit von 27 Jahren konzipierte sogenannte „World Energy Network" (WE-NET) hat zum Ziel, sämtliche Schlüsseltechnologien einer Wasserstoff-Energiewirtschaft zu entwickeln und zu demonstrieren [10]. Sein prinzipieller Aufbau entspricht dem des Euro-Quebec Projektes, nämlich die Nutzung erneuerbarer Primärenergiequellen zur Erzeugung von elektrolytischem Wasserstoff, dessen Transport in Tankschiffen und anschließende Verteilung (innerhalb Japans). Das in drei Phasen angelegte Projekt, das 1993 mit einer Phase elementarer Systemstudien startete, soll ab 1999 zunächst Prototyp-

systeme in einer Leistungsgrößenordnung von 50 MW entwickeln, um abschließend dann in der Endausbaustufe das Gesamtsystem zu testen.

Die wichtigsten WE-NET Ziele sind im einzelnen:

- Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse auf der Basis von Feststoffmembran-Elektrolyten mit Zellenwirkungsgraden größer 90 %,
- Verflüssigungsanlagen für Wasserstoff mit einer Kapazität bis zu 300 t/d (zum Vergleich: die derzeit größte Anlage in New Orleans hat eine Kapazität von 68 t/d; alle (16) Anlagen auf der Welt haben zusammen eine Gesamtkapazität von 265 t/d),
- Speichertanks für flüssigen Wasserstoff mit einem Fassungsvermögen von 50,000 m^3 für den Seetransport bzw. als stationärer Tank (zum Vergleich: der größte stationäre LH_2-Tank steht z.Z. im Kennedy Space Center, Florida, mit einem geometrischen Volumen von ca. 3400 m^3),
- Metallhydride als zusätzliches kompaktes Speichermedium im großen und kleinen Maßstab,
- Entwicklung einer Wasserstoff-Verbrennungsturbine in der Leistungsklasse 500 MW mit einem Wirkungsgrad von 60 %.

3.3.3 Solar-Wasserstoff-Bayern (SWB) Projekt

Das Solar-Wasserstoff-Bayern Projekt ist eine Demonstrationsanlage im industriellen Maßstab zum Testen wichtiger Komponenten einer Wasserstoffwirtschaft [11]. Die 1987 in Betrieb gegangene Anlage in Neunburg vorm Wald basiert auf solarer Primärenergie, die mittels photovoltaischer Zellen mit einer Gesamtfläche von 4200 m^2 und einer Spitzenleistung von 360 kW in Elektrizität umgewandelt wird, die wiederum anschließend in fortgeschrittenen Elektrolyseur-Anlagen zur Wasserstoffproduktion genutzt wird. Die Speicherung der entstehenden Gase erfolgt in Drucktanks für 5000 Nm^3 Wasserstoff bzw. 500 Nm^3 Sauerstoff. Anwendungen für den Wasserstoff als Brennstoff sind gegeben durch verschiedene Arten von Brennstoffzellen (AFC, PAFC, PEFC), einen katalytischen Brenner sowie als Treibstoff für einen Gabelstapler. Parallel zu diesen Aktivitäten wird eine LH_2-Tankstelle für PKW erprobt. Das SWB-Projekt wird voraussichtlich in 1999 beendet werden.

3.3.4 PHOEBUS Projekt

Die Demonstrationsanlage PHOEBUS, seit einigen Jahren im Forschungszentrum Jülich in Betrieb, dient dem Zweck, die dezentrale, autonome Versorgung der dortigen Zentralbibliothek mit Elektrizität über das ganze Jahr hin zu gewährleisten [12]. Die charakteristischen Komponenten sind photovoltaische Module zur Stromerzeugung, dessen Überschuss (in der Sommersaison) zur elektrolytischen Produktion von Wasserstoff, der hier als Energiespeichmedium dient, genutzt wird. Wasserstoff und Sauerstoff werden in Hochdruckbehältern gespeichert und bei Bedarf (in der Wintersaison) in einer Brennstoffzelle wieder zu Elektrizität konvertiert. Ziel des Projekts ist neben der Erprobung der Einzelkomponenten auch die Ertüchtigung eines Energie-Management-Systems.

Die Nachfolgeprojekte PHOEBUS-2 und -3 konzentrieren sich auf die Vereinfachung des Systems durch Verwendung von Druckelektrolyse, einer luftbetriebenen PEM-FC, Hydrid als alternatives Speicherkonzept, sowie auf eine Kraft-Wärme-Kopplung durch Erweiterung des Systems um eine Wärmepumpe und die Ausnutzung von Windkraft als zusätzliche Primärenergiequelle.

3.4 Szenarien einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft

3.4.1 Solare Wasserstoffwirtschaft nach Justi von 1964

Es sind bislang eine Reihe von Energieszenarien entwickelt worden, in denen der Wasserstoff der wesentliche Energielieferant ist. Bereits aus dem Jahre 1964 stammt die Idee einer solaren Wasserstoffwirtschaft [13]. Dessen Konzept (Abb. 5) beruht auf der Elektrolyse von Meerwasser durch Verwendung photovoltaischer Anlagen oder alternativ Nuklearanlagen. Die Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff werden in ein Hochdrucknetz eingespeist und verschiedenen Verbrauchern, u.a. Haushalten, Brennstoffzellenkraftwerken, chemischer Industrie, zugeführt.

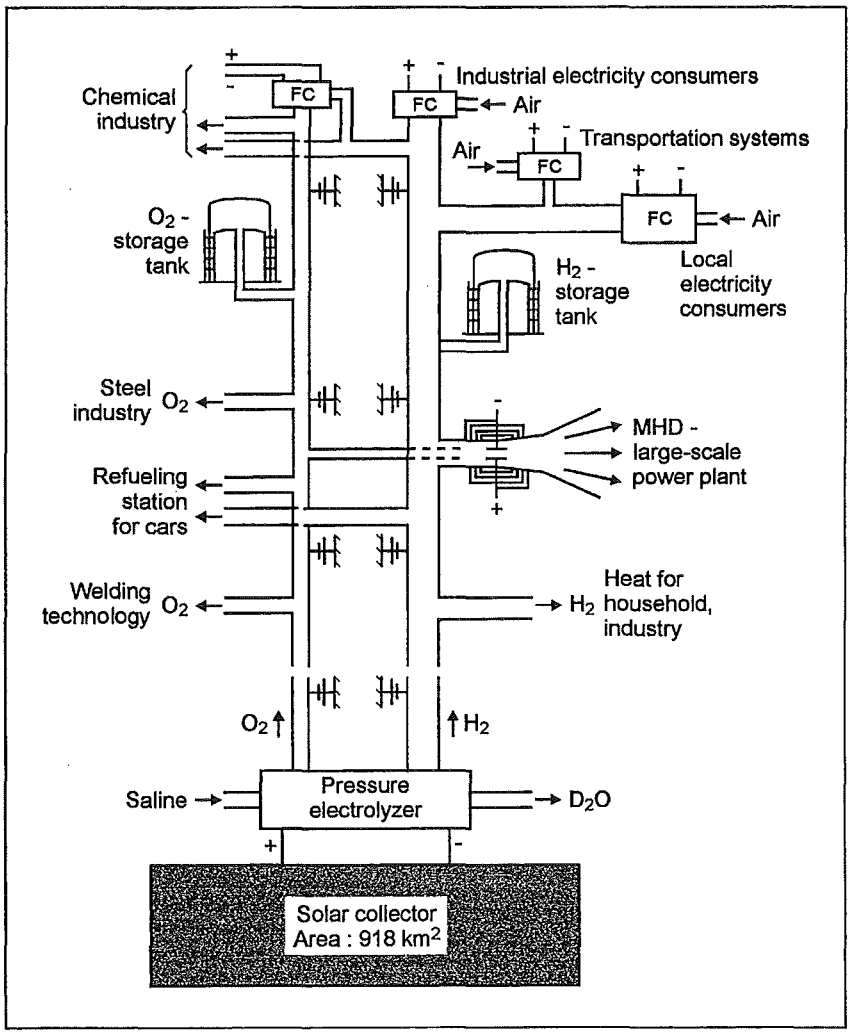


Abb. 5: Frühes Konzept einer künftigen solaren Wasserstoffwirtschaft

3.4.2 Null-Emissions-Energiesystem oder „Zweites Netz"

Am Forschungszentrum Jülich wurde Anfang der 80er Jahre das Design eines „neuartigen horizontal integrierten Energiesystems" (NHIES) entwickelt [14]. Ziel des auch unter dem Begriff „Zweites Netz" bekannt gewordenen Energiesystems ist die Sauberkeit während des Energieverbrauchs oder - anders ausgedrückt - die adäquate Behandlung der Korrosionsprodukte. Als Basis dienen die Schritte:

a) Zersetzung und Reinigung
mit den Prozessen Luftzerlegung zur Erzeugung von Sauerstoff, Elektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff, Konversion von Erdgas und Kohle zu Synthesegas (H_2 + CO) sowie nukleare Spaltung zur Erzeugung von Elektrizität, Prozesswärme und weiterem Spaltmaterial, wobei die Primärenergien (Öl, Gas, Kohle, Nuklearenergie) horizontal miteinander im Wettbewerb stehen,

b) Stöchiometrische Ergänzung
in der Form, daß je nach Verbraucher die entsprechenden Sekundärenergieformen (H_2, CO, O_2) in der notwendigen Menge dem Netz entnommen werden, und

c) Synthese und Konversion
mit dem Verbrauch der Gase zur Erzeugung der Endenergieprodukte Elektrizität, Wärme und/oder höherwertige Brennstoffe (z.B. Methanol).

Die spätere Entfernung des CO-Netzes entspräche dem vollständigen Übergang zu einer kohlenstofffreien Wasserstoffwirtschaft.

3.4.3 Nukleare Wasserstoffwirtschaft

Es wurden auch Konzepte einer Wasserstoffwirtschaft auf der Basis von nuklearer Primärenergie vorgeschlagen. Dabei bietet der Hochtemperaturreaktor das Potential, sowohl Elektrizität als auch Prozeßwärme auf dem erforderlichen Temperaturniveau bis zu 1000 °C bereitzustellen. Letzteres kann dazu genutzt, verschiedene thermochemische Prozesse auszuführen, die Wasserstoff oder durch Reformierung andere höherwertige Brennstoffprodukte erzeugen, wohingegen der Strom direkt für die Wasserspaltung einsetzbar wäre. Der 30 MW(th) HTTR (High-Temperature Engineering Test Reactor) in Japan, der im Herbst 1998 in Betrieb gehen wird, ist dafür vorgesehen, in einer späteren Phase die nukleare Dampfreformierung von Methan zur Herstellung von Wasserstoff und Methanol sowie anschließend die H_2-Produktion über einen thermochemischen Kreisprozess (z.B. IS (= Iodine / Sulfur), UT-3 (University of Tokyo)) zu demonstrieren [15]. Durch Nutzung von Über- bzw. Reservekapazitäten könnte die Nuklearenergie generell von Bedeutung sein bei dem Versuch, die Wasserstoffwirtschaft in Gang zu setzen. Langfristig wäre das aber nur zu bewerkstelligen, wenn sie zum einem in der Öffentlichkeit akzeptiert ist und zum anderen wirtschaftlich mit den fossilen Energien konkurrieren kann.

4 Sicherheitsaspekte beim Umgang mit Wasserstoff

Der Wasserstoff hat eine wesentliche unangenehme Eigenschaft, er besitzt nämlich ein hohes Gefährdungspotential für Mensch und Anlagen. Und mit zunehmender Bedeutung des Wasserstoffs als Energieträger steigt zwangsläufig auch das Risiko eines Unfalls. Auf welche Weise nun kann Wasserstoff schädigen?

4.1 Physiologische Gefahren

Die unbeabsichtigte Freisetzung von Wasserstoff hat eine veränderte Zusammensetzung der lokalen Atmosphäre zur Folge. Eine Verringerung des Sauerstoffanteils in der Atemluft auf weniger als 19.5 % führt zur Erstickungsgefahr, das Unterschreiten des 8 % Limits gilt als tödlich. Diese Gefahr ist ganz besonders groß bei der Freisetzung von flüssigem Wasserstoff aufgrund der Volumenzunahme um den Faktor 845 während seiner raschen Verdampfung.

Direkter Kontakt von flüssigem Wasserstoff bzw. entsprechend kalten Oberflächen mit der Haut führt zu kryogenen Verbrennungen (abgesehen von sehr kurzen Kontaktzeiten), d.h. Einfrieren von Gewebe. Die Verringerung der Körpertemperatur hat eine Lähmung der Atmungsorgane zur Folge.

In Fällen der Explosion eines zündfähigen Gemisches verursacht die dabei entstehende Druckwelle Schäden (siehe Tabelle 2). Bereits bei Überdrücken ab 7 kPa kann sie Personen außer Gefecht setzen, jenseits der Schwelle von 240 kPa muß mit Todesfolge gerechnet werden [16].

Tabelle 2: Physiologische Effekte von Überdruckwellen

Maximaler Überdruck [kPa]	Einfluss auf Personen
7	Umfallen
35	Platzen des Trommelfells
100	Lungenschäden
240	Grenze für Todesfälle
345	50 % tödlich
450	99 % tödlich

4.2 Versprödung von Materialien durch Wasserstoff

Vor vielen Jahrzehnten schon wurde das Phänomen der Versprödung von Metallen beobachtet, hervorgerufen durch die Anwesenheit bzw. Ansammlung von atomarem Wasserstoff in der Gitterstruktur. Bis zu welchem Grad die Zersetzung durch Wasserstoff stattfindet, ist von vielen Parametern abhängig: vom Metall selbst und seiner Geschichte (Herstellungsprozess, chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlung), vom Medium (Druckschwankungen, Temperatur, Verunreinigungen), von der Geometrie (Kerben, schlechte Schweissnähte, Inhomogenitäten) und von den Spannungskräften (Häufigkeit, Dehngeschwindigkeit). Verschiedene Klassen von Versprödung werden mittlerweile unterschieden, jedoch ist der prinzipielle Mechanismus überwiegend durch die Ausbildung neuer Phasen im Material infolge chemischer Reaktionen, z.B. Bildung von Hydriden oder Gasblasen (Methan, Wasserdampf), gegeben [16].

Andere Arten von Einflüssen treten bei flüssigem Wasserstoff infolge der tiefen Temperaturen in Erscheinung. Thermische Kontraktion bei der Abkühlung von Behältern oder Leitungen auf den Siedepunkt muss dabei ebenso berücksichtigt werden wie stationäre oder temporäre thermische Gradienten im Material, wichtig insbesondere bei Zwei-Phasen-Strömungen, und auch die reduzierte Bruchfestigkeit mit der Neigung zu Sprödbruch [16].

4.3 Ausbreitung und Explosion eines Wasserstoff-Luft Gemisches

Eine unkontrollierte Freisetzung von Wasserstoff in die Umgebung birgt ein erhebliches Gefährdungspotential. Aus diesem Grunde wurden in der Vergangenheit eine Reihe theoretischer und experimenteller Studien durchgeführt, die die physikalischen Phänomene während der einzelnen Schritte eines Unfallszenarios zum Inhalt hatten.

4.3.1 Freisetzungsmechanismen

Hinsichtlich der Freisetzungsart werden drei Kategorien unterschieden:

a) Verdampfung aus einer LH_2-Lache
   Aufgrund der raschen Vermischung und Erwärmung in der Umgebungsluft und ihrer geringen Dichte verflüchtigt sich verdampfender Wasserstoff sehr schnell nach oben. Im Vergleich zu anderen verflüssigten Gasen bildet LH_2 wegen der hohen Verdampfungsrate eine vergleichsweise kleine Lache bei kurzer Lebensdauer. Eine entsprechend geringere horizontale Ausdehnung hat die entstehende Gaswolke. (Zur Lachenausbreitung und -verdampfung siehe auch Abschnitt 4.4.3).

b) Flüssiger oder gasförmiger Freistrahl aus einer kleinen Öffnung
   Bei plötzlicher Freisetzung eines verflüssigten Gases durch eine kleine Öffnung in einem Druckbehälter entweicht ein Mehr-Phasen Gemisch, wobei ein gewisser Anteil spontan verdampft.

c) Katastrophales Behälterversagen
   Die explosionsartige Ausbreitung eines Gases unter Druck ist gekennzeichnet durch seine Schnelligkeit, der großen Energiefreisetzung sowie der hohen Wahrscheinlichkeit für eine Zündung.

4.3.2 Atmosphärische Dispersion der Wasserstoff-Gaswolke

Die Freisetzung von Wasserstoff in die Umgebung führt rasch zu einer Ausbildung einer aufsteigenden Gaswolke, deren Form von Art und Rate der Freisetzung abhängig ist. Kontinuierlicher Lufteintrag und Dispersion sorgen dafür, daß die H_2-Wolke den gesamten Zündbereich von hohen zu niedrigen Konzentrationen durchläuft. Die aus einer verdampfenden LH_2-Lache entstehende Wolke führt zunächst zu einer Kondensation der immer vorhandenen Luftfeuchtigkeit, welche die H_2-Wolke „sichtbar" macht.

Experimentelle Untersuchungen zur Dispersion von Wasserstoff in der Atmosphäre begannen Ende der 50er Jahre im Rahmen des beginnenden Raumfahrtprogramms. Die erste signifikante Testserie wurde 1980 von der NASA durchgeführt [17], bei der in sieben Versuchen jeweils 5700 l LH_2 in einem Zeitraum zwischen 35 und 120 s freigesetzt wurden. Hierbei konnte gezeigt werden, daß die Ausdehnung der entstehenden H_2-Wolke sich über mehrere 100 m erstreckte. Im Jahre 1994 wurden in einer Testreihe unter Federführung der BAM Mengen bis zu 1 m^3 LH_2 sowie bis zu 0.2 m^3 LPG freigesetzt, um einerseits den Einfluß benachbarter Bebauung auf das Dispersionsverhalten zu untersuchen und andererseits einen Vergleich zwischen einem leichten, aufsteigenden und einem schweren Gas, das in Bodennähe akkumuliert, untersuchen zu können [18]. Typische Wolkenformationen, wie sie während der Wasserstofftests durch den kondensierenden Wasserdampf in der Atmosphäre sichtbar wurden, zeigt die Abb. 6. Die Wetterbedingungen am Versuchstag war geprägt von hoher Luftfeuchtigkeit, d.h. H_2-Wolke innerhalb der sichtbaren Wolke, und schnell wechselnden Windverhältnissen. Im unteren Teil der Abb. 6 ist eine Simulationsrechnung eines H_2-Freisetzungstests mit dem am JRC Ispra, Italien, entwickelten 3D-Rechencode ADREA-HF dargestellt.

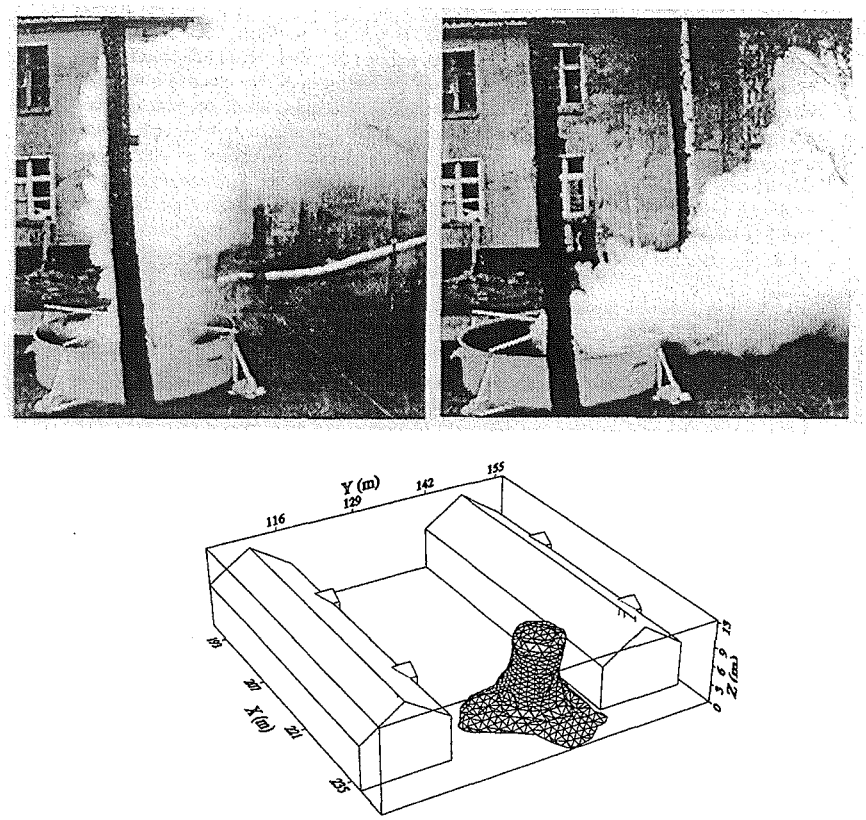


Abb. 6: Typische Formationen von Wasserstoffwolken während der BAM-Versuche 1994 (oben) Nachrechnung der Ausbreitung mit JRC Ispra Code ADREA-HF (unten)

4.3.3 Explosion einer Wasserstoff-Gaswolke

Trifft eine zündfähige Wasserstoffwolke auf eine Zündquelle, so kommt es einer Explosion, wobei in der freien Atmosphäre erfahrungsgemäß nur ein kleiner Teil des Energieinhalts des Wasserstoffs, 0.1 - 10 %, tatsächlich freigesetzt wird. Die Deflagration ist die Art der Verbrennung, bei der die Verbrennungsgeschwindigkeit unterhalb der Schallgeschwindigkeit liegt. Die Flammenfront breitet sich aufgrund von Wärmeleitung und Diffusion der freien Radikale aus. Die Verbrennungsgeschwindigkeit ist maximal in der Nähe des stöchiometrischen Gleichgewichts.

In einem (engeren) Konzentrationsbereich kann es aber auch zu einer Detonation der H_2-Wolke kommen. Eine Möglichkeit ist der Eintrag einer hinreichend starken Zündenergie (Sprengstoff, turbulenter Freistrahl), die, so wurde aus Experimenten abgeleitet, mindestens etwa 1 g TNT (4.7 kJ) betragen muß. Eine andere Möglichkeit ist der Übergang zur Detonation durch Flammenbeschleunigung ausgehend von einer Deflagration. Das entscheidende Kriterium für eine Flammenbeschleunigung ist der Turbulenzzustand in der Gaswolke, der von verschiedenen Faktoren beeinflußt wird, z.B. (partielle) Verdämmung, Turbulenzzustand vor der Zündung, Wolkengeometrie, lokale Explosion. Allerdings wurde noch niemals in einer freien Wasserstoffwolke der Übergang von einer Deflagration zu einer Detonation beobachtet.

Die eigentlichen Schäden resultieren jedoch weniger aus der Verbrennung der H_2-Wolke, sondern aus der dadurch verursachten Druckwelle. Die statische Drucklast nach einer Deflagration wird durch den „adiabatic isochoric complete combustion" (AICC) Druck als Obergrenze beschrieben, etwa das 8-fache des Ausgangsdrucks, der allerdings in der Regel nicht erreicht wird. Die weitaus gefährlichere Detonation erzeugt eine Kompressionswelle, die durch eine plötzliche Druckspitze, deutlich höher als der AICC-Drucks, mit nachfolgendem exponentiellen Absinken charakterisiert ist.

Zahlreiche kleine und große Versuchsaufbauten sind in der Vergangenheit errichtet worden, die verschiedenen Verbrennungsparameter bei der Explosion von Gasgemischen sowie die Randbedingungen für Flammenbeschleunigung und den Übergang zur Detonation zu untersuchen. Als Beispiel seien genannt die im Hinblick auf freie oder nur teilweise verdämmte H_2-Luft Gemische durchgeführten Testserien des Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) im Rahmen des LWR-Sicherheitsprogramms und des PNP (=Prototyp Nukleare Prozesswärme) Gaswolkenprogramms.

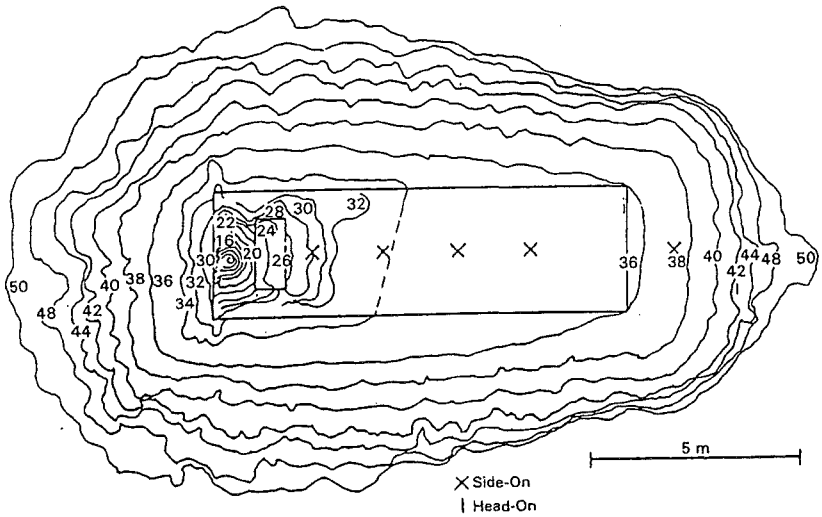


Abb. 7: Detonantionsexperiment des ICT mit Wasserstoff im Rahmen des PNP Gaswolkenprogramms

In kugel- oder halbkugelförmigen Wolkengeometrien mit Volumina zwischen 7.5 und 2100 m^3 wurde ein maximaler Überdruck von 6.3 kPa gemessen, entsprechend einer Flammengeschwindigkeit von 84 m/s. In allen Tests war die Flammenbeschleunigung weitaus geringer, als für den Übergang zur Detonation nötig gewesen wäre. Diese Bedingung wurde erst in einem 10 x 3 x 3 m^3 nach oben und an den Enden offenen Kanal mit einem 40 % H_2-Luft Gemisch erreicht, wobei zusätzlich noch Turbulenz durch ein Gebläse erzeugt wurde [19]. Die bei diesem Versuch gemessenen Flammenfrontprofile sind in Abb. 7 dargestellt. Der waagerechte rechteckige Kasten repräsentiert den Ballon mit dem Gasgemisch im Kanal bei Versuchsbeginn, der kleine vertikale rechteckige Kasten die Position des Gebläses. Nahe der linken Wand fand die Zündung statt. An den Kreuzen wurde jeweils der Druck gemessen. Die Konturlinien geben die Position der Flammenfront wieder, gekennzeichnet durch die Zeit in Millisekunden. Man erkennt aus der Abbildung, daß die Detonation etwa 2 m hinter dem Gebläse auftrat.

4.4 Probabilistische Sicherheits- und Risikoanalyse

4.4.1 Methodik

Jedes großtechnische System, das Stoffe mit einem gewissen Gefährdungspotential enthält, muss unter kontrollierten, sicheren Bedingungen betrieben werden. Ein entsprechendes Design der Anlage kann durch verschiedene Arten von Sicherheitsüberlegungen überprüft werden, aus denen dann entsprechende Sicherheitsmaßnahmen abgeleitet werden können.

Systematische Vorhersageprozeduren im Falle eines Unfalls und seiner Konsequenzen, wie sie seinerzeit typischerweise in der Nuklearindustrie eingeführt worden waren, stehen in Form von probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) zur Verfügung. Diese bestehen im Prinzip aus einer kombinierten Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse. Die für ein technisches System erkannten Zustände jeweils am Ende einer denkbaren Ereignissequenz sind entweder solche, die einem sicheren Zustand der Anlage entsprechen, oder solche, die unerwünscht sind und durch Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus der Anlage gekennzeichnet sind.

Die Sicherheitsanalyse setzt sich zusammen aus den Schritten der Identifizierung des Gefährdungspotentials einer Anlage und der Identifizierung unfallauslösender Ereignisse. Sie weitet sich zu einer probabilistischen Risikoanalyse aus, wenn darüber hinaus eine deterministische Analyse der Systemzustände erfolgt und mit den Häufigkeiten ihres Eintretens verknüpft wird.

4.4.2 Probabilistische Analyse am Beispiel PHOEBUS

Für die „Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage" PHOEBUS im FZJ, die in Abschnitt 3.3.4 kurz beschrieben ist, wurde eine probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse erstellt [20]. Hinsichtlich der Klassifizierung evtl. Störfallereignisse wurde zwischen einer Freisetzung von Wasserstoff innerhalb des Gebäudes, das die Anlagenkomponenten enthält, und außerhalb im Falle eines Versagens der Druckspeichertanks unterschieden sowie die Möglichkeit der Bildung von H_2 / O_2 Gemischen innerhalb einzelner Komponenten. Letzteres wurde als nicht bedeutend eingestuft, da sich z.B. nach einem Diaphragma-Bruch im Elektrolyseur nur geringe Gemischmengen bilden können.

Bei Freisetzung innerhalb des Gebäudes wird weiterhin zwischen kleinen (< 10 Nm^3/h), mittleren (< 120 Nm^3/h) und großen (< 600 Nm^3/h) Leckageraten unterschieden. Am Beispiel eines angenommenen mittleren Lecks ist in Abb. 8 der entsprechende Ereignisbaum dargestellt.

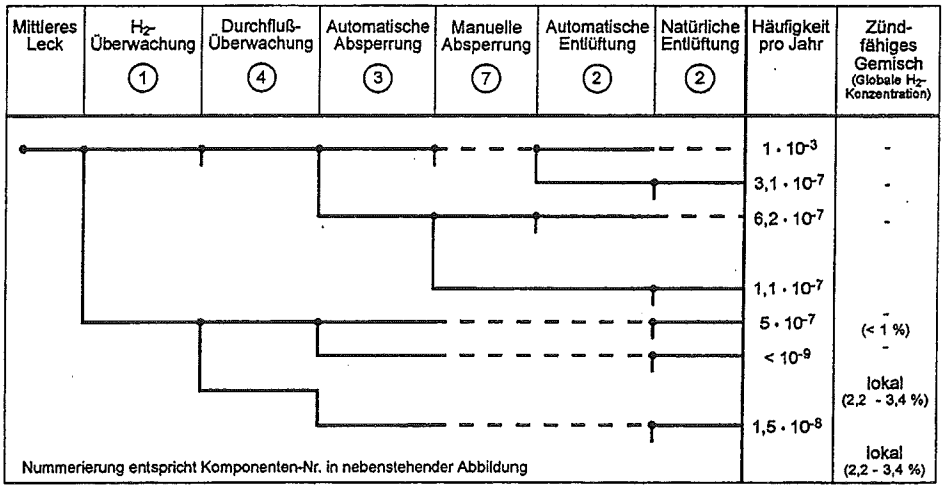


Abb. 8: Ereignisbaumanalyse für ein mittleres Leck in der PHOEBUS-Anlage

Er zeigt, daß in zwei der erreichten Endzustände lokal zündfähige Gasgemische nicht ausgeschlossen werden können. Die abgeschätzte Häufigkeit ihres Eintretens liegt allerdings weit im hypothetischen Bereich. Das größte Risiko für das Gebäude entstünde, falls im „Winter-Betrieb", d.h. H_2-Fluß vom Speicher außerhalb in Richtung Brennstoffzelle innerhalb, ein Leck aufträte und unentdeckt bliebe, so daß sich die Speichertanks in das Gebäude entleerten. Aber auch dieses Ereignis liegt mit einer Häufigkeit von $< 10^{-6}$ pro Jahr bereits im hypothetischen Bereich.

Für Unfälle außerhalb des Gebäudes werden keine aktiven Gegenmaßnahmen eingeleitet. Wasserstoffleckagen aus Leitungen oder Druckflaschen bergen keine größere Gefahr, da der Wasserstoff schnell in die Atmosphäre entweicht. Das noch größte, aber absolut gesehen immer noch hinreichend kleine Risiko rührt von dem katastrophalen Versagen eines oder mehrerer Behälter her.

4.4.3 Deterministische Analyse am Beispiel der LH_2-Lachenausbreitung

Unmittelbar nach einer Freisetzung von flüssigem Wasserstoff beginnt die Verdampfung; gleichzeitig bildet sich eine Lache auf dem Untergrund aus. Eine wachsende Lachenoberfläche verstärkt die Verdampfungsrate, bis nach einer Anfangsphase ein stationärer Zustand erreicht wird. Die Verdampfung des Kryogens ist vom Wärmeeintrag aus der Umgebung in die Flüssigkeit abhängig, wobei der Hauptanteil durch Wärmeleitung aus dem „heißen" Untergrund stammt. Andere Wärmeeinträge durch atmosphärische Konvektion oder Sonneneinstrahlung machen bei der Verdampfung von Wasserstoff nicht mehr als 10 - 20 % aus. Im Unterschied zu einem festen Untergrund kann die Lache auf einer Flüssigkeit zu einem gewissen Grad in die Oberfläche eindringen und damit die effektive Lachenhöhe reduzieren, welche die Ausbreitung der Lache antreibt. Die Höhenreduzierung bleibt relativ gering (7 %) bei LH_2 auf Wasser, kann allerdings bis zu 80 % bei flüssigem Stickstoff betragen. Die Abkühlung der Wasseroberfläche verursacht eine Konvektionsströmung im Wasser; eine weitere Abkühlung hat schließlich eine Eisbildung zur Folge. Die physikalischen Phänomene, die im Zusammenhang mit der Freisetzung einer kryogenen Flüssigkeit verbunden sind, sind in Abb. 9 zusammengefaßt [21].

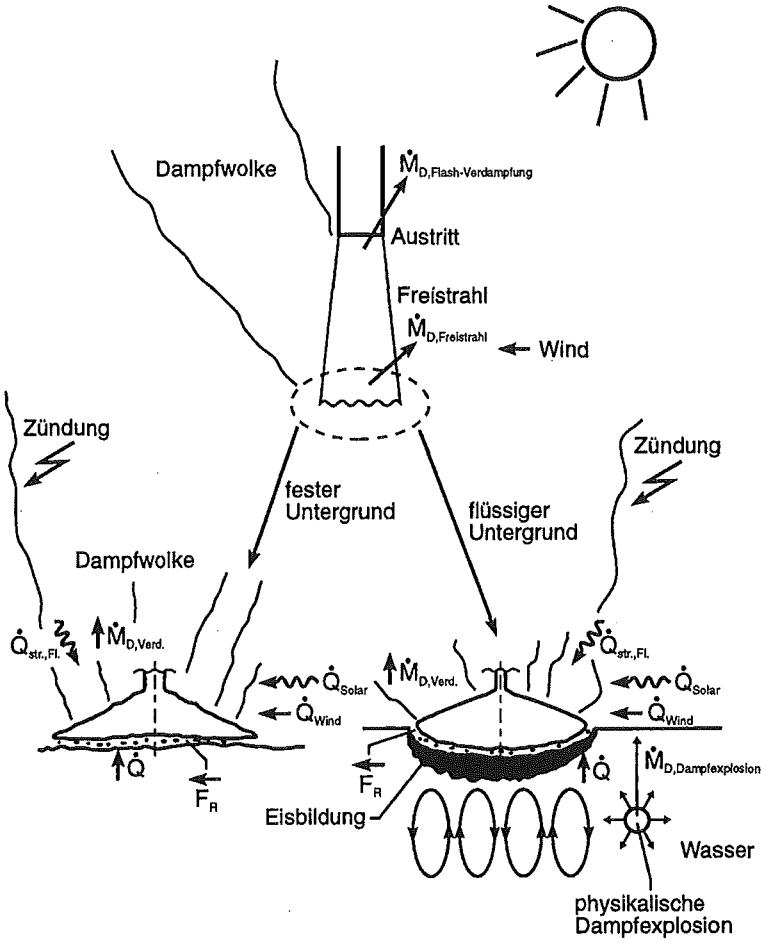


Abb. 9: Physikalische Phänomene bei der unfallbedingten Freisetzung von LH_2 auf einem festen oder flüssigen Untergrund

Mit dem in den 70er Jahren anwachsenden Seetransport riesiger Mengen verflüssigter Gase, insbesondere flüssiges Erdgas, wurden auch im Rahmen von Sicherheitsstudien entsprechende Experimente durchgeführt. Hinsichtlich der Ausbreitung und Verdampfung einer LH_2-Lache gibt es allerdings nur wenige experimentelle Befunde. Die bislang detaillierteste Untersuchung wurde 1994 durch das Forschungszentrum Jülich ausgeführt [21]. In vier Freisetzungsversuchen, davon zwei auf einer Wasseroberfläche und zwei auf einer Aluminiumplatte, wurden 5 bzw. 6 l/s LH_2 jeweils über etwa 1 min freigesetzt. Es wurde, wie schon in früheren Versuchen, ein pulsierendes Freisetzungsverhalten beobachtet, wobei sich die Lachenfront in einem Radiusbereich zwischen 0.4 und 0.6 m bei Wasser bzw. zwischen 0.3 und 0.5 m bei Aluminium bewegte. Bei den Tests auf Wasser bildete sich eine massive Eisschicht unter der Lache aus, des weiteren einige radiale „Ausreisser"-Eisspuren, ähnlich denjenigen, die auch in entsprechenden Versuchen im FZJ mit LN_2 entdeckt wurden.

Der state-of-the-art Ansatz für eine rechnerische Modellierung der Ausbreitung und Verdampfung einer kryogenen Flüssigkeit basiert auf den sogenannten Flachwasser (shallow-layer) Gleichungen, ein nichtlineares System von Differentialgleichungen, das es erlaubt, das dynamische Verhalten des Wachstums und Zurückweichens einer Lache zu modellieren. Unter Berücksichtigung von Massen- und Impulserhaltung werden Lachenradius und -höhe als Funktion von Ort und Zeit ermittelt. Das Rechenmodell, verifiziert im FZJ-Code LAUV [21], enthält zusätzlich noch ein Untermodell zur Eisformation auf einer Wasseroberfläche. Das Beispiel der Nachrechnung eines der o.g. Tests, der kontinuierlichen LH_2-Freisetzung mit einer Rate von 6 l/s auf der Aluminiumplatte, ist in Abb. 10 gezeigt.

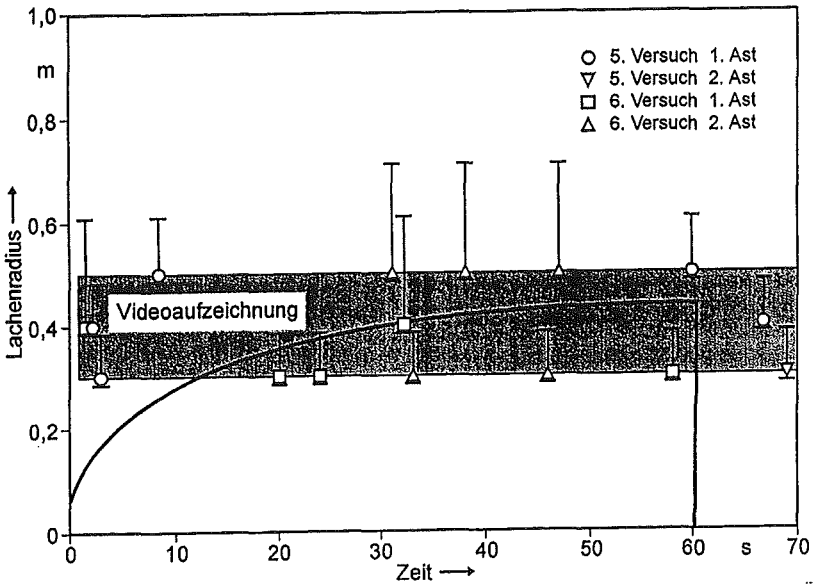


Abb. 10: Gemessener Lachenradius bei LH_2-Freisetzung auf einer festen Oberfläche und Vergleich mit einer Nachrechnung mit dem FZJ-Rechencode LAUV

4.5 Bisherige Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff

Das Sammeln von Erfahrungen im sicheren Umgang mit Wasserstoff begann verstärkt in den USA in den 50er Jahren, als die NASA den Wasserstoff als überaus effizienten Treibstoff für den Raketenantrieb in Betracht zog. Darüber hinaus wurde in zunehmendem Maße in chemischen und petrochemischen Betrieben der Umgang mit Wasserstoff im großindustriellen Maßstab betrieben. Hinzu kamen aber auch detaillierte Analysen von Unfallereignissen, bei denen Wasserstoff (oder vergleichbare Stoffe) beteiligt waren. Einige prägnante Beispiele seien hier aufgezählt:

a) Im Jahre 1937 hatte der Zeppelin LZ-129 „Hindenburg", das größte jemals gebaute Luftschiff, beim Andocken in Lakehurst, USA, Feuer gefangen. Der Rumpf, gefüllt mit 200,000 m^3 Wasserstoff in 16 Gaszellen, verbrannte in kürzester Zeit. Unglücksursache war höchstwahrscheinlich ein neuartiger Anstrich auf den Zellenoberflächen, der leicht brennbar war und aufgrund seiner schlechten elektrischen Leitfähigkeit eine Aufladung durch atmosphärische Elektrizität begünstigte.

b) Die tragische Katastrophe mit dem Challenger Space Shuttle 1986, das während der Startphase explodierte, ist nach offizieller Darstellung durch das Versagen einer Dichtung an einer der Feststoffraketen verursacht worden. Austretende Flammen trafen auf den „Externen Tank" (ET), der die LH_2 und LOX Vorräte enthielt, bis er nach einer gewissen Zeit versagte. Eine andere Theorie jedoch vermutet die Ursache in kleinen, unentdeckten LH_2-Leckagen aus dem ET und ihre frühe Zündung, die dann rasch zur Zerstörung von ET-Strukturelementen führte.

c) Der Unfall in Hanau 1991 zeigte in beeindruckender Weise die Folgen des katastrophalen Versagens eines Wasserstoff-Drucktanks. Der zylindrische Speichertank mit einem geometrischen Volumen von 100 m^3 explodierte nur kurze Zeit nach einer Wiederbefüllung bei einem Druck von 4.5 MPa. Als Ursache wurde ein Ermüdungsbruch an einer Schweissnaht erkannt. Die ca. 4000 Nm^3 Wasserstoffgas, die den Tank zerlegten, gelten als eine der größten, unfallbedingt freigesetzten Mengen.

d) Ein mysteriöser Unfall ereignete sich im Oktober 1997 mit einem Ballon, gefüllt mit 1000 m^3 Wasserstoff, der bei Berlin nach einem Brand abstürzte. Als Unfallursache wird die Tatsache vermutet, daß der Ballon in unmittelbarer Nähe von vier Kurzwellenantennen mit einer Sendeleistung von je 500 kW flog. Es wird angenommen, daß das Netz, mit dem die Ballonhülle gehalten wurde, Feuer fing und riß, so daß der Korb nach unten stürzte, der Ballon selbst brennend nach oben weiter flog und nach kurzer Zeit explodierte.

Eine Auswertung von Berichten und Statistiken von mehreren 100 Unfällen in industriellen Anlagen, bei denen Wasserstoff beteiligt war, ließ folgende Schlüsse zu [22]:

- Unfälle wurden überwiegen durch Leckage oder unzureichendes Spülen bzw. Abblasen verursacht.
- In einem großen Teil der Fälle blieb die Ausbildung eines zündfähigen Gasgemisches unentdeckt.
- Das Schadensausmaß war unabhängig vom Aggregatszustand des Wasserstoffs.
- In Bereichen mit teilweiser Verdämmung kam es in den meisten Fällen zu einer Explosion.
- Die Freisetzung in Form eines Freistrahls, z.B. durch eine gebrochene Berstscheibe oder ein Sicherheitsventil, kann unter Umständen zu einer spontanen Zündung führen.
- Leckagen wurden oft durch menschliche Fehlhandlungen verursacht.
- In mehr als der Hälfte aller Freisetzungen in die Umgebung kam es zu einer Zündung; es kam sogar immer zur Zündung, wenn die Freisetzung in einen abgeschlossenen Bereich erfolgte.
- In einigen Fällen trat Luft in Systeme, die flüssigen Wasserstoff führten.

Doch trotz aller bedauerlichen Zwischenfälle und des mit Wasserstoff verbundenen Rufs als „gefährlicher Brennstoff" wird insgesamt gesehen die Technologie des Umgangs mit Wasserstoff als erfolgreich und sicher angesehen. Gründe hierfür sind die Tatsachen von i.A. sehr konservativen Annahmen bei der Auslegung entsprechender Anlagen, wiederkehrenden Prüfungen, speziell ausgebildetem Personal sowie extremer Vorsorge hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Systeme. Zu beweisen allerdings bliebe noch, ob diese positive Bewertung auch auf eine Wasserstoffwirtschaft im großen Maßstab übertragbar ist.

5 Zusammenfassende Bemerkungen und Ausblick

Im Hinblick auf die mögliche Einführung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff im Rahmen einer künftigen Energiewirtschaft können folgende zusammenfassende Statements gemacht werden:

- Die begrenzten Vorräte fossiler Brennstoffe auf der Erde einerseits sowie die Notwendigkeit andererseits, den mit der Energieerzeugung verbundenen Ausstoß klimaschädlicher Gase langfristig zu vermindern, machen den Wasserstoff zu einem idealen Kandidaten als künftiger Energieträger. Weitere Pro-Argumente sind die Möglichkeiten der langfristigen Speicherung und des Transports in großen Mengen und über weite Entfernungen. Die Herstellung des Wasserstoffs muss dabei über nicht-fossile Primärenergiequellen - Wasserkraft, Solarenergie, evtl. Nuklearenergie - erfolgen. Allerdings wird der künftige Energiemix abhängig sein vom Nachfragewachstum, sich verändernden Zielsetzungen und sozialer Prioritäten sowie den zur Verfügung stehenden Technologien.
- In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden in zahlreichen Ländern nationale Wasserstoff-Verbände gegründet, so in Argentinien, China, Deutschland, Frankreich, Italien, Japan, Kanada, Norwegen, Russland, Schweden, Schweiz, Südkorea und den USA. Ihr Ziel ist es, den Wasserstoff als Energieträger einzuführen, den Informationsaustausch der verschiedenen Parteien untereinander zu stimu-lieren und das öffentliche Interesse zu wecken.
- Die Einführung von Wasserstoff als signifikantem Energieträger der Zukunft erfordert die Existenz einer Infrastruktur, Wirtschaftlichkeit und insbesondere Sicherheit im Umgang mit diesem Medium. Viele einzelne Komponenten der Wasserstoff-Technologie existieren bereits, so dass ein technischer Durchbruch nicht notwendig ist. Allerdings müssen sich weitere Forschungsaktivitäten auf die Entwicklung neuer und die Verbesserung bestehender Komponenten konzentrieren, um sie für eine verstärkte Wasserstoffnutzung und der Demonstration in Pilotanlagen verfügbar zu machen.
- Eine Umstrukturierung des bestehenden Energiesystems wird voraussichtlich mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen und enorme Kapitalinvestitionen in eine neue Infrastruktur erfordern. Von daher müssen schon wirklich wichtige Gründe vorhanden sein, den Übergang zum Energieträger Wasserstoff zu initiieren.
- Ziel der zahlreichen Wasserstoff-Aktivitäten ist es, die Möglichkeiten einer Wasserstoff-Technologie im Rahmen der heutigen und zukünftigen Energieversorgung zu erforschen und ihre Leistungs-fähigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit zu demonstrieren. Anlagen und Verfahren müssen in erster Linie sicher sein; ihre Sicherheit während des normalen Betriebs und in denkbaren Störfällen muß demonstriert werden. Bislang wird die Technologie des Umgangs mit Wasserstoff allgemein als erfolgreich und sicher angesehen.
- Geeignete Beispiele mit Demonstrationscharakter bieten Verkehrsanwendungen, da sie sich alltäglich in der Öffentlichkeit präsentieren und gleichzeitig direkt zur lokalen Verringerung der Schadstoffkonzentration in den Großstädten beitragen. Stationäre, netzunabhängige Wasserstoffsysteme, z.B. Brennstoffzellenkraftwerke, sind demonstrative Möglichkeiten einer dezentralen Energieversorgung.

6 Literatur

[1] DASA, CRYOPLANE - Deutsch-Russisches Gemeinschaftsprojekt zum Einsatz kryogener Treibstoffe in der zivilen Luftfahrt - Realisierbarkeitsstudie 1990/91/92, Deutsche Aerospace Airbus GmbH, Hamburg (1992).

[2] REGAR, K.-N., FICKEL, C., PEHR, K., Der neue BMW 735i mit Wasserstoffantrieb, VDI-Berichte 725, VDI-Verlag, Düsseldorf (1989) 187-196.

[3] DAIMLER-BENZ AG, NECAR 3 Wasserstoff-Erzeugung während der Fahrt, World Wide Web, http://www.daimler-benz.com/repl.cgi?pagesrc=/research/specials/necar/necar_g.html, Daimler-Benz AG, Stuttgart (1997).

[4] HAIDN, O.J., et al., Improved Combustion Efficiency of a H_2/O_2 Steam Generator for Spinning Reserve Application, Proc. 11th World Hydrogen Energy Conf., Stuttgart (1996) 1418-1427.

[5] PRUSCHEK, R., et al., Minimum CO_2 Emissions from IGCC Power Plants by Methanol Production with H_2, Proc. 11th World Hydrogen Energy Conf., Stuttgart (1996) 1439-1446.

[6] Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project - Phase II Feasibility Study, Final Report, Volumes I - III, Government of Quebec and Commission of the European Communities (1991).

[7] GIACOMAZZI, G., GRETZ, J., Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Project (EQHHPP): A Challenge to Cryogenic Technology, Cryogenics **33** (1993) 767-771.

[8] WÜRSIG, G., SCHMIDTCHEN, U., Flüssig-Wasserstoff sicher transportieren - Versuche zum Verhalten von tiefkaltem Flüssiggas an einem 61 m^3-Flüssig-Wasserstoff-Tank, TÜ **38** (1997) No. 4 26-30.

[9] PEHR, K., Experimental Examinations on the Worst Case Behavior of LH_2/LNG Tanks for Passenger Cars, Proc. 11th World Hydrogen Energy Conf., Stuttgart (1996) 2169-2186.

[10] FUKUDA, K., Japan's WE-NET Program, Proc. 7th Canadian Hydrogen Workshop, Quebec City (1995) 83-100.

[11] SZYSZKA, A., Realization and Operation of SWB's Demoplant Assembling Major Industrial-Scale Components of Solar Hydrogen Technology, Int. Symp. on Hydrogen and Clean Energy, Tokyo (1995) 31-37.

[12] BARTHELS, H., et al., PHOEBUS Jülich, An Autonomous Energy Supply System Comprising Photovoltaics, Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell, Proc. 11th World Hydrogen Energy Conf., Stuttgart (1996) 1005-1015.

[13] JUSTI, E., Leitungsmechanismus und Energieumwandlung in Festkörpern, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen (1965).

[14] HÄFELE, W., MARTINSEN, D., WALBECK, M., The Concept of a Novel Horizontally Integrated Energy System: Ways to reduce CO_2 Emissions, 10th World Congress on Automatic Control, Munich (1987), Preprints Vol. 5 155-161.

[15] HADA, K., et al., Design of a Steam Reforming System to be Connected to the HTTR, Proc. 3rd JAERI Symp., Oarai (1996), JAERI-Conf 96-010, 229-240.

[16] EDESKUTY, F.J., STEWART, W.F., Safety in the Handling of Cryogenic Fluids, The International Cryogenics Monograph Series, Plenum Press, New York (1996).

[17] CHIRIVELLA, J.E., WITCOFSKI, R.D., Experimental Results from Fast 1500 Gallon LH_2 Spills, Am. Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. **82** (1986) No. 251.

[18] SCHMIDTCHEN, U., et al., Simulation of Accidental Spills of Cryogenic Hydrogen in a Residential Area, 15th Int. Cryo. Eng. Conf., Genua (1994).

[19] BERMAN, M., A Critical Review of Recent Large-Scale Experiments on Hydrogen-Air Detonations, Nucl. Sci. Tech. **93** (1986) 321-347.

[20] BONGARTZ, R., JAHN, W., MARX, J., Probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich, FZJ-Report Jül-3176 (1996).

[21] DIENHART, B., Ausbreitung und Verdampfung von flüssigem Wasserstoff auf Wasser und festem Untergrund, FZJ-Report Jül-3155 (1995).

[22] ZALOSH, R.G., et al., Compilation and Analysis of Hydrogen Accident Reports, Final technical Report COO-4442-4, Factory Mutual Research Corporation, Norwood (1978).

Wahrnehmungsmuster von Sicherheit und technischen Risiken in der Gesellschaft

Peter M. Wiedemann

Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik (MUT)

Forschungszentrum Jülich

Einleitung: Sicherheit und Risiko

Die Sicherheit technischer Anlagen und Produkte ist ein von der Gesellschaft vorgegebenes und allseits akzeptiertes Ziel. Das war nicht immer so. Historisch betrachtet stand die Gründung des Technischen Überwachungsvereins im vorigen Jahrhundert am Anfang dieser Entwicklung. Unfälle beim Betrieb von Anlagen machten deutlich, daß es besonderer Management- und Vorsorgestrategien bedarf, um einen bestimmungsgemäßen Betrieb zu sichern.

Seitdem sind eine Vielzahl anderer Organisationen und Institutionen dazugekommen, deren Auftrag es ist die technische Sicherheit zu gewährleisten. Um nur einige davon aufzuführen: Es gibt die Strahlenschutzkommission, die Störfallkommission und die MAK-Kommission, die Zentralkommission für biologische Sicherheit und die Strahlenschutzkommission.

Betrachtet man die Strategien, mit denen versucht wird, das Schutzziel "Sicherheit" zu gewährleisten, so fällt eine entscheidende Wende auf. Am Anfang stand das Lernen über Versuch und Irrtum: Aus der Analyse von Unfällen lernte man, wie Anlagen unter Sicherheitsaspekten optimiert werden können. Immer komplexere Techniken mit immer größeren Schadenspotentialen machten diese Herangehensweise unbrauchbar. An ihre Stelle traten **antizipative** Sicherheitsanalysen. Dabei handelt es sich um Risikoanalysen die gekoppelt mit Standards (Richt-, Grenz- und Vorsorgewerten) Sicherheit gewährleisten sollen.

Mittels quantitativ formulierten Belastungsschranken für die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft für Schadstoffe, Strahlung und Lärm, wird versucht, Gesundheitsgefährdungen sowie Schäden an Sachgütern und Ökosystemen zu vermeiden oder diese zumindest auf ein zumutbares Maß zu reduzieren.

In diesem Sinne sind Risikoanalysen und Standards Instrumente der Gesundheits- und Umweltpolitik, die der Umsetzung des Vorsorgeprinzips dienen. Vorsorge bedeutet dabei, Schadstoffemissionen und -immissionen soweit wie möglich zu beschränken.

Schon diese Definition zeigt, daß hierbei eine Reihe von unbestimmten Rechtsbegriffen einfließen. Denn, was ist ein Schaden?, was bedeutet "zumutbares Maß"? und was heißt "Schadstoffemissionen und -immissionen *so weit wie möglich* zu beschränken"?

Damit ist allerdings auch unmittelbar evident, daß Risikoanalysen im Spannungsfeld von Wissenschaft, Recht und Politik stehen. Es geht zum einen darum, Risiken für Mensch und Umwelt zu ermitteln. Und es geht zum anderen darum, diese zu bewerten und zu einer Entscheidung zu kommen, die Gefahren abwendet und Risiken begrenzt. Und das möglichst rational, d.h. nachvollziehbar, begründbar und faktenbasiert. Daß damit auch gesellschaftliche Konflikte, Streit und Protest hervorgerufen werden können, ist eine bekannte Tatsache. Denn, wie sicher ist sicher genug?

1. Ansätze zur Erfassung und Bewertung von technischen Risiken

Im Hinblick auf das Erkennen und Bewerten von technischen Risiken lassen sich zwei Ansätze unterscheiden: Zum einen der technisch-naturwissenschaftliche und zum anderen der sozialwissenschaftliche Ansatz. Der technisch-naturwissenschaftliche Ansatz versucht, auf eine möglichst objektive und methodische Weise die Risiken eines Produkts oder einer Technik zu ermitteln. Beispielsweise werden bei der technischen Risikoanalyse, ausgehend von der Analyse der Versagensmöglichkeiten technischer Systeme, die anlageüberschreitenden Störfälle ermittelt. Darüber hinaus geht es um die Erfassung der Ausbreitungspfade und Expositionsbedingungen. Auf diese Weise sollen Umfang und Ausmaß, aber auch die Wahrscheinlichkeit von Schadensfällen ermittelt werden. Darauf bezogen werden dann Sicherheitsstandards angeleitet.

Auf eine ganz andere Weise operieren die Sozialwissenschaften. Hier interessiert die Erfassung intuitiver Risikoeinschätzungen, d.h. es geht um die Identifikation und Analyse der Risiken, wie sie von der Bevölkerung gesehen werden. Dieser Ansatz soll im weiteren im Vordergrund stehen. Die wichtigen Fragen dabei sind: Warum ist es sinnvoll, die intuitive Risikowahrnehmung zu beachten? Welche Faktoren bestimmen die Risikowahrnehmung von Laien? Wie wirken diese Faktoren zusammen und wie kann mit Konflikten bei Risikobewertungen von Technologien in unserer Gesellschaft besser umgegangen werden?

2. Warum ist die intuitive Risikowahrnehmung wichtig?

Technik und damit deren Entwickler und Anwender werden heute - anders als in der Vergangenheit - kritisch betrachtet. Wurde Technik früher vor allem als Problemlöser gesehen, so werden heute in besonderer Weise die potentiellen negativen Folgen von Technik beachtet. Um nur einige Beispiele aufzuführen:

- Aufkommen der Risikodiskussion um Asbestgefahren in den 70er Jahren als Vorläufer des späteren Asbestverbots,
- Dioxinfall bei Boehringer Ingelheim in Hamburg (1984) mit nachfolgenden Kontroversen um Altlasten und um Müllverbrennungsanlagen als Dioxinquellen,
- Auseinandersetzungen um Mobilfunksendemasten seit Ende der 80er Jahre in Deutschland (Stichwort: Elektrosmog),
- Schwierigkeiten von Mercedes Benz bei der Suche nach einer Teststrecke für ihre Fahrzeuge (Boxberg 1989/1990, Papenburg 1991),
- Kampagnen gegen die Gentechnik, z.B. Forderungen nach der Kennzeichnung gentechnisch modifizierter Lebensmittel in den 90er Jahren,
- Auseinandersetzungen um die Chlorchemie - Greenpeace und Hoechst kommen überein, daß Hoechst aus der Produktion von Chlorparaffinen aussteigt (1995),
- Greenpeace Kampagne gegen die Versenkung der Brent Spar in der Nordsee (1995) - Konsumentenboykott gegen Shell.

Unternehmen spüren dieses veränderte gesellschaftliche Klima: Bei Forschungsvorhaben, beim Bau von Anlagen und am Markt. Eine Vielzahl von "Public Interest"- Gruppen und Bürgerinitiativen versuchen auf Forschung & Entwicklung, auf die Standortwahl von Anlagen, auf die Technologie- und auf die Produktgestaltung Einfluß zu nehmen. Ihnen geht es um saubere Umwelt, Sicherheit und Gesundheit, Fairness und Mitbestimmung. Oder anders ausgedrückt: Um die Vermeidung von

gesundheitlichen Risiken, von Umwelt- sowie von sozialen Risiken. Und die Ansprüche der Öffentlichkeit gegenüber Unternehmen und Staat wachsen.

Für den Umgang mit öffentlichen Sorgen und Ängsten sind deshalb technische Risikoabschätzungen zwar notwendig, aber nicht hinreichend. Denn im Regelfall fallen die Risikobewertungen von Experten und die der Öffentlichkeit auseinander (Allen 1988, GEO 1992). Doch wer am Markt operiert und Kundenwünsche zufriedenzustellen hat, der operiert in der Öffentlichkeit. Und er muß wissen, wie Bürger auf Technologien und Produkte reagieren und wo sie die Risiken von neuen Technologien sowie mögliche Produktrisiken sehen.

Da in der Öffentlichkeit das wirkt, was die Leute für wahr halten, bzw. was sie glauben, ist die subjektive Risikobewertung ein ernstzunehmender Faktor. Daniel Bell (zitiert nach Coates et al. 1986, 21) weist darauf mit dem Satz hin: "What is social today, is political tomorrow and economic in costs and consequences the day after.". Es scheint deshalb ratsam, die technischen Risikoabschätzungen durch Risikowahrnehmungs-Studien zu ergänzen. Vor allem ist auch auf Veränderungen der Risikowahrnehmung zu achten. Wurden anfangs Computer und andere Formen der elektronischen Datenverarbeitung stärker unter Risikoaspekten thematisiert (z.B. als Jobkiller), so ist diese Risikodiskussion heute eher randständig. In die andere Richtung veränderte sich die Risikowahrnehmung in bezug auf Asbest. Galt er einst als Wunderstoff - gerade wegen seiner besonderen Werkstoffeigenschaften - so gilt er heute als kanzerogener Schadstoff schlechthin. Solche Wandlungsprozesse, insbesondere hin zu einer stärkeren Risikosicht, sind immer zu bedenken. Gerade deswegen ist das Verständnis der Risikowahrnehmung und der sie beeinflussenden kognitiven und sozialen Faktoren von Bedeutung.

Aber Unternehmen und Staat nehmen aufgrund ihrer eigenen Interessen und ihrer "kuturellen Filter" diese intuitive Risikobewertung nur selektiv wahr (siehe Luhmann 1991). Sie ignorieren sie entweder, wehren sie ab oder gehen bestenfalls nur partiell auf sie ein. Das liegt vor allem daran, daß Unternehmen im Regelfall nur den Ansprüchen Beachtung schenken, die ihnen vom Gesetzgeber vorgeschrieben sind. Wie z.B. im Fall der Produkthaftpflicht oder im Hinblick auf die Informationspflichten nach dem § 11a der Störfallverordnung. Marktbezogene Anspruchsgruppen - siehe z.B. den Konsumentenboykott gegen Shell - werden ebenfalls stärker beachtet. Die Aufmerksamkeit für gesellschaftliche Anspruchsgruppen und Öffentlichkeit ist dagegen gering. Damit geraten Unternehmen aber in die Gefahr, mögliche Ausgangspunkte für krisenhafte Entwicklungen, auf deren Vorhandensein gerade gesellschaftliche Anspruchsgruppen aufmerksam machen, zu übersehen.

Ähnliches gilt auch für den Staat, wo er als Technikförderer, -genehmiger und -betreiber auftritt. Gerade der Umgang mit der Kernenergie, aber auch die Planungs- und Genehmigungspraxis von großen Infrastrukturprojekten (z.B. Autobahnen, entsorgungswirtschaftliche Einrichtungen) zeigen, daß sich der Staat ebenfalls viel stärker als bisher auf die Öffentlichkeit einzustellen hat, um Proteste und langwierige Genehmigungsverfahren zu vermeiden. Aus seiner Sicht gilt es zwar, den Standort "Deutschland" zu sichern. Gleichzeitig hat der Staat aber auch die Anliegen der Bürger und Bürgerinnen zu berücksichtigen, deren Mitwirkungsrechte - wie z.B. in Berlin und Bayern - durch das Instrument der direkten Volksentscheide verstärkt worden ist.

3. Was beeinflußt die subjektive Risikowahrnehmung?

Der derzeit wohl bekannteste Ansatz der Risikowahrnehmungsforschung ist das "psychometrische Paradigma" (zur Übersicht siehe Jungermann & Slovic 1993). Ziel des psychometrischen Ansatzes ist es zu erklären, welche Faktoren die Risikobewertung von Laien bestimmen. Der Ansatz arbeitet mit psychometrischen, d.h. quantitativen Methoden. Im Regelfall bekommen Laien dabei eine Liste von

Risikoquellen vorgelegt, die sie hinsichtlich der Riskantheit zu bewerten haben. Solche Risikoquellen sind u.a. Kernkraft, Gentechnik, Ozonloch, chemische Anlagen und Mülldeponien, aber auch Produkte wie Pflanzenschutzmittel, Haushaltsreiniger und Medikamente sowie lebensstilbezogene Risiken wie Rauchen und Fallschirmspringen. Weiterhin sind die Probanden solcher Studien aufgefordert, die Risikoquellen noch im Hinblick auf andere Aspekte zu bewerten, von denen angenommen wird, daß diese die Bewertung der Riskantheit beeinflussen. Solche Aspekte, auch qualitative Risikofaktoren genannt, sind u.a. die Vertrautheit mit der Risikoquelle, deren Schreckenspotential, Freiwilligkeit u.a.m. Als Ergebnis einer solchen psychometrischen Untersuchung liegt dann für jede Risikoquelle ein differenziertes Risikoprofil vor.

Die psychometrischen Untersuchungen kommen zu dem Schluß, daß in die Risikowahrnehmung von Laien eine Reihe von verschiedenen Aspekten eingehen. Im Gegensatz zu Experten, die allein Wahrscheinlichkeit und Schadensausmaß bewerten, orientieren sich Laien bei der Risikobeurteilung an Merkmalen der Risikoquelle (bekannt, unbekannt), der Exposition (freiwillig, unfreiwillig), der Schadensart/Betroffenheit (Schrecklichkeit, betrifft besonders vulnerable Personen, zukünftige Generationen betroffen) und des Risikomanagements (Kontrollierbarkeit). Tabelle 1 gibt hierzu einen Überblick.

Faktoren der Risikobewertung	**Wirkung: Risiko hoch, wenn**	**Beispiel**
Häufigkeit/ Wahrscheinlichkeit des Schadensfalls	hohe Unfallanfälligkeit	Pkw-Verkehr
Schwere des Schadensausmaßes	wenn großer Schaden vorliegen kann	Störfall im Kernkraftwerk
(Nicht)Kontrollierbarkeit	geringe Kontrollierbarkeit der Risikoquelle	Flugzeugabsturz
Schrecklichkeit	Zusammenhang mit Krebserkrankungen	Kernkraftwerk
(Un)Vertrautheit	geringe Vertrautheit mit der Risikoquelle	EMF-Sendemasten (Elektrosmog)
(Un)Bekanntheit	kein Wissen über Risiko vorhanden	gentechnisch hergestellte Lebensmittel
Substituierbarkeit	Riskantes Produkt ist ersetzbar durch sichere Alternative	Asbesthaltige Produkte
Vermeidbarkeit/Reduzierbarkeit	Technisches Potential zur Risikoreduktion nicht ausgeschöpft	Rückstoffe in Nahrungsmittel und Textilien
Risiko-Nutzen-Verhältnis	Geringer Nutzen	Sondermülldeponie
Zeitlicher Eintritt des Schadens	Unmittelbar bzw. ohne große Zeitverzögerung	Nebenwirkung von Medikamenten
Betroffene Personen	Besonders verwundbare Gruppen wie Kinder	Wohnen in der Nähe von Hochspannungsleitungen
Risiko-Nutzen-Verteilung	Risiko trifft (auch) andere Personen	FCKW-haltige Sprays

Tabelle 1: Auswahl wichtiger qualitativer Risikofaktoren

Viele dieser Faktoren sind eng miteinander korreliert, d.h. wird ein Risiko z.B. als unfreiwillig empfunden, so wird es auch sehr oft als nicht persönlich kontrollierbar eingeschätzt. Mittels faktorenanalytischer Verfahren haben deshalb Slovic und Mitarbeiter versucht, die komplexe Risikobewertung von Laien auf Grunddimensionen zu reduzieren (Slovic, Fischhoff, Lichtenstein 1980).

Zwei Dimensionen spielen dabei eine Rolle. Dabei erfolgt die Bewertung von Risiken danach, wie stark sie einerseits als "schreckenerregendes" bzw. als "nicht schreckenerregendes" Risiko empfunden werden (z.B. Kontrollierbarkeit, Katastrophenpotential, Freiwilligkeit und Betroffenheit) und wie stark sie andererseits als "bekanntes" bzw. "unbekanntes" Risiko eingeschätzt werden (z.B. neues Risiko, nicht direkt wahrnehmbare Gefahr, verzögerte nachteilige Folgen und der Wissenschaft nicht bekanntes Risiko).

Vor allem der Grad der Einstufung als schreckenerregendes Risiko beeinflußt, wie Laien ein Risiko einschätzen. Je stärker ein Risiko als schreckenerregend eingestuft wird, um so eher und um so mehr werden Maßnahmen zur Reduzierung dieses Risikos verlangt. Und je stärker ein Risiko als unbekannt oder schreckenerregend eingestuft wird, desto größer ist die Signalwirkung, die ein Unglücksfall, der von diesem Risiko herrühren kann, haben wird. D.h. desto mehr Besorgnis wird ein solcher potentieller Unglücksfall in der Bevölkerung auslösen und desto größer wird das Medienecho sein, daß er findet.

Eine Vielzahl von Untersuchungen (siehe dazu Rohrmann 1995) haben die Befunde von Slovic et al. (1979, 1985) repliziert.

In einer Reihe von Untersuchungen konnte aber gezeigt werden, daß die von Slovic und Mitarbeiter untersuchten Risikofaktoren für verschiedene Techniken von unterschiedlicher Bedeutung sind (siehe Gardner & Gould (1989), Hardling & Eiser (1984), Schütz, Wiedemann & Gray (1995)). So ist das Katastrophenpotential für die Kernenergie ein maßgeblicher Faktor, jedoch nicht für Hochspannungsleitungen und Biotechnologie (im Überblick dazu Wiedemann 1993). Die neuere Risikowahrnehmungsforschung versucht deshalb auch, die spezifisch relevanten Risikofaktoren für die jeweilig betrachtete Technologie zu ermitteln.

In der nachstehenden Tabelle sind beispielhaft einige Technologien und die zur Bewertung jeweils maßgeblichen qualitativen Risikofaktoren aufgeführt (vergl. Wiedemann 1993). Für die Kerntechnik ist vor allem der Katastrophenfaktor relevant (Renn 1984) und für Transporteinrichtungen Kontrollierbarkeit und Freiwilligkeit (Kraus & Slovic 1988). Bei Pharmazeutika spielen dagegen vor allem die Schadenswahrscheinlichkeit und zum Teil Wissen und Erfahrung eine Rolle (Slovic et al. 1989). Bei Umweltrisiken spielen insbesondere die Schadenswahrscheinlichkeit und die negativen Emotionen, die die Gefährdung auslöst, eine Rolle (Karger & Wiedemann 1998).

Risikoquelle	Katastro-phenpo-tential	Schrecken (dread)	Kontrol-lierbarkeit	Frei-willig-keit	Wissen/ Erfah-rung	Schadens-wahrschein-lichkeit
Kernkraft	xxx	xx				
Chemische Industrie	xx					
Pharmazeutika					x	xxx
Lebensstilbezogene Risikoquellen		x				xxx
Transport (Auto und Eisenbahn)			xxx	xxx		
Umweltrisiken		xxx				xxx

Tabelle 2: Relevante Beiträge von qualitativen Risikofaktoren auf die Bewertung des Risikos von verschiedenen Risikoquellen (x = schwach, xx = moderat, xxx = stark) (nach Wiedemann 1993)

Neben dem Risiko ist aber auch die Wahrnehmung des Nutzens für die Einschätzung einer Technologie von Bedeutung. Denn erst beide Aspekte - Risiko und Nutzen zusammen - ergeben eine rationale Basis für die Bewertung einer Technologie. Deshalb greifen Experten hier auf Risiko-Nutzen-Bewertungen zurück (siehe u.a. Bentkover, Covello, Mumpower 1986). Ein Beispiel dafür sind Medikamente. Hier ist der Nutzen den Risiken (mögliche Nebenwirkungen) gegenüberzustellen. Daß eine Risiko-Nutzen-Abwägung auch bei Laien eine wesentliche Rolle spielt, scheint aus der Alltagserfahrung heraus plausibel. Leiss (1990) weist darauf hin, daß die Risikowahrnehmung häufig durch intuitive "risk-benefits-tradeoffs" bestimmt wird. Zwei Arten des "Verrechnens" lassen sich dabei unterscheiden:

- Das Risiko wird heruntergespielt und die Nutzenkomponente wird betont. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Nutzen sofort eintritt. Klassische Beispiele sind hier Zigarettenkonsum, Autofahren, riskante Sportarten, aber auch unfreiwillig eingegangene Risiken am Arbeitsplatz. Hier wird der Nutzen höher eingeschätzt.
- Der Nutzen wird heruntergespielt bzw. ignoriert und das Risiko wird betont. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Nutzen andere betrifft, zeitlich verzögert auftritt oder individuell nicht nachvollziehbar ist. Beispiele sind Kraftwerke, Chemie und Passivrauchen.

Sicherlich macht es wenig Sinn, davon auszugehen, daß eine solche Kosten-Nutzen-Kalkulation immer erfolgt. Einiges weist aber darauf hin, daß zumindest für eine Klasse von Risikoquellen solche Nutzen-Risikoabwägungen vorgenommen werden. Lappe (1991) zeigt, daß sich Risikoquellen nach ihren Risikomerkmalen in drei verschiedene Cluster gruppieren lassen (Lappe 1991: 74ff): (1) ein Cluster, wo die Bekanntheit von Risiken (z.B. Zigaretten, Alkohol) dominiert - dieses Cluster umfaßt Produkte, die als "Risky Risks" bezeichnet werden können. (2) Ein weiteres Cluster spiegelt eine implizite Risiko-Nutzen-Abwägung wider (im positiven Bereich z.B. Auto, Flugzeug; im negativen Bereich, d.h. bei Überwiegen des Risikos, z.B. Lebensmittelzusätze). Dieses Cluster beinhaltet Produkte, die Lappe "Risk-Benefit-Items" nennt. (3) Schließlich findet sich ein Cluster, das Risikoquellen betrifft, die mit Zivilisationsängsten verbunden sind (z.B. Kernenergie, Aids, Biotechnologie). Diese lassen sich als "Mega-Threats" bezeichnen. Die Ergebnisse von Lappe sprechen dafür,

daß Risikoquellen jeweils anhand spezifischer Risikomerkmale charakterisiert werden, die für andere Risikoquellen ohne bzw. nur von geringer Bedeutung sind.

Eine noch offene Frage ist, von welchen Faktoren eine solche differenzierte Betrachtung abhängt. Möglicherweise spielt der kulturelle Kontext eine nicht zu unterschätzende Rolle. Verschiedene Kulturen können die Aufmerksamkeit entweder auf die Nutzen-, die Schadenskomponente oder auf beides lenken. Jedenfalls verweisen kultursoziologische Ansätze der Risikoforschung (Douglas & Wildavsky 1982; Rayner 1993) darauf, daß die Risikowahrnehmung von der "Kultur" abhängt, der der Wahrnehmende angehört. Nur so ist ihrer Auffassung nach erklärbar, warum bestimmte Personen für bestimmte Produkte Risiko-Nutzen-Vergleiche anstellen, während andere dies ablehnen bzw. warum von den einen die Nutzen-, von den anderen aber die Risikoseite wahrgenommen wird. Eine schlüssige empirische Überprüfung dieser Theorie steht aber noch aus.

Neben psychologischen, d.h. kognitiven, emotionalen und motivationalen Faktoren unterliegt die Risikowahrnehmung auch sozialen Einflüssen. In vielen Studien, die sich mit der Risikoperzeption von Produkten beschäftigen, werden auch immer wieder die Faktoren "Vertrauen in den Risikokontrolleur" oder "Vertrauen in die Angemessenheit der bestehenden Sicherheitsstandards" an zentraler Stelle genannt (u.a. in Bord, O'Connor 1990; Stolwijk, DeLuca, Gould 1985; MacGregor & Slovic 1989; Slovic, Kraus, Lappe et al. 1989; U.S. Congress - OTA 1992). Insbesondere der Nahrungsmittel- und der Medikamentenbereich sind hierfür Beispiele[1]. Ein Zusammenhang dieses Ver- bzw. Mißtrauens mit der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Risikokultur scheint plausibel und würde darauf hindeuten, daß neben der Perzeption von Produktmerkmalen auch soziale Wahrnehmungen, z.B. Mißtrauen in den Risikokontrolleur aufgrund entsprechender (persönlicher) Erfahrungen in der Vergangenheit (vgl. Renn & Levine 1988), die Risikowahrnehmung beeinflussen. Diese Überlegungen verweisen auf den Institutionenansatz von Wynne (1982). Wynne betont, daß in die Wahrnehmung und Bewertung der Risiken immer auch die Bewertung der für die Risikokontrolle zuständigen Institutionen einfließt.

Empirische Unterstützung findet diese Sichtweise durch Kasperson (1992). Diese Autoren haben mit ihrem "Social Amplification" Ansatz (siehe auch Burns et al. 1993) gezeigt, wie individuelle, soziale und kulturelle Faktoren zu einer Verstärkung/Abschwächung der gesellschaftlichen Risikowahrnehmung führen. Einfluß auf die Risikowahrnehmung haben vor allem die Signalwirkungen des Risikoereignisses, d.h. die Wahrnehmung von "future risks" und die wahrgenommene Inkompetenz des Managements (Burns et al. 1993). Die Risikowahrnehmung und die Medienberichterstattung über Risiken sind für den gesellschaftlichen Umgang mit einer Risikoquelle bedeutsam. Sie beeinflussen direkt das Ausmaß und den Umfang gesellschaftlicher Reaktionen. Technische Risikoaspekte, wie die Anzahl der Exponierten sowie die Größe der durch das Schadensereignis betroffenen Region, beeinflussen dagegen die gesellschaftliche Reaktion nur indirekt, eben via Medien und öffentliche Wahrnehmung.

Die Social Amplification Theorie und die eben ausgewiesenen Bedingungen der Entwicklung eines Risikos zu einem gesellschaftlichen Thema weisen damit auch darauf hin, daß bei der Risiko-

---

[1] So wurden in den USA für die Besorgnisse der Konsumenten im Nahrungsmittelbereich im wesentlichen folgende Gründe ermittelt (vgl. U.S. Congress - OTA 1992: 321): (1) wahrgenommene Mängel des bestehenden Systems der Nahrungsmittelregulierung; (2) die Besorgnis darüber, daß die bestehenden Sicherheitsstandards zu niedrig oder überholt seien bzw. es wegen der wissenschaftlichen Unsicherheit über Gesundheitsauswirkungen unmöglich sei, Sicherheitsstandards zu etablieren; und (3) die Konsumenten zeigten sich zwar zufrieden mit den bestehenden Sicherheitsstandards, waren aber besorgt, daß diese nicht ausreichend umgesetzt werden.

bewertung die Einschätzung der Akteure eine Rolle spielt. Es ist anzunehmen, daß Laien (siehe dazu auch Heath 1994, Palmlund 1993) die Dimensionen, nach denen sie akteursbezogen Risiken beurteilen, miteinander verbinden. Zur Kennzeichnung dieses Sachverhalts läßt sich der Begriff der Risiko-Story verwenden.

Zur Definition: Risiko-Stories sind Erzählschemata, die eine kohärente Darstellung eines Risikos - ermöglichen. Sie sind außerdem als alltagsweltliche Schemata zur Verarbeitung und Weitergabe von Neuigkeiten weit verbreitet. Ihre innere Struktur weist folgende Gliederung auf

- Personen, die am Geschehen beteiligt sind: Dazu gehören Risikoerzeuger, Risikobetroffene, Helfer der Betroffenen, Risiko-Kommunikatoren, breite Publikum.
- eine Orientierung, die die Ausgangssituation und falls nötig die Geschichte der Akteure mit bezug auf die Geschichte ausweist.
- Ein Plot, der das erzählenswerte Ereignis charakterisiert, in das die Akteure eingebunden sind
- Die Moral der Geschichte

Wesentlich für die rhetorische Kraft solcher Erzählungen sind die gewählten Stilmittel. Die von Snow und Kollegen entwickelten Konzepte für die Analyse von Medienstrategien zur Mobilisierung der öffentlichen Meinung bieten hierfür Anhaltspunkte (Snow und Benford 1988, Snow et al. 1986, Snow und Benford 1992). Im Mittelpunkt steht dabei die sogenannte Frame-Analyse, mit der sich die "Verpackung" von Argumenten beschreiben läßt.

Packaging umfaßt (1) die Wahl von Frames, in denen Positionen zu Themen dargestellt und persuasiv positioniert werden sowie (2) eine Reihe von Cues wie Bilder, "Catchphrases", Metaphern und konkrete Beispiele. Frames setzen auf diese Weise Ursachen, Folgen, Verursacher und Betroffene in ein bestimmtes Licht und motivieren für oder gegen ein bestimmtes Engagement. Diese persuasive Bewertung kann auf verschiedene Weise erfolgen:

- Frame Amplification (Anknüpfen an vorhandene Werte und Anknüpfen an vorhandene Beliefs - "Sie wissen ja wie das mit den Grenzwerten nach Tschernobyl war...");
- Frame Extension (Erweiterung des Deutungsrahmens - "Lassen Sie uns immer auch an die Leidtragenden denken... ");
- Frame Transformation (Umdefinition des Deutungsrahmens "Dabei geht es doch nur um Profite ...")
- Frame Bridging (Verbinden von verschiedenen Themen zu einem Thema - "Bei allen diesen Verfahren und Konzepten, ob Toxikologie, Risikoanalyse oder Grenzwerte, immer sollte bedacht werden, daß die Unsicherheiten groß sind und Gefahren nie mit Sicherheit auszuschließen sind".)

Auch die wenigen empirische Untersuchungen zum Framing bei der Risikokommunikation zeigen diese Effekte. Sandman et al. (1993) variierten hypothetische Medienberichte über das Vorliegen eines chemischen Gefahrenstoffs in einer Gemeinde. In der "Outrage"- Version wurden die verantwortlichen Akteure als überheblich charakterisiert, die bestrebt sind die Gefahrenlage zu vertuschen. In der neutral/positiven Version wurden dagegen die Akteure als fair und responsiv dargestellt. Dabei zeigte sich, daß das an sich identisch beschriebene Risiko in der Outrage-Version von den Teilnehmern an diesem Experiment höher eingeschätzt wurden. Darüber hinaus konnten Sandman et al. (1993) demonstrieren, daß weitere technische Informationen über Expositionspfade und toxikologische Befunde und selbst eine höhere (technische) Risikobewertung auf die Risikowahrnehmung keinen Einfluß hatten.

Zusammenfassend kann für die Bewertung technischer Risiken demnach folgendes gesagt werden:

- Die Risikobewertung von Laien unterscheidet sich von der Bewertung durch Experten. Bei Laien spielen nicht nur Schadensausmaß und –wahrscheinlichkeit eine Rolle, sondern auch andere Faktoren. Und wenn Schadensausmaß und -wahrscheinlichkeit eingeschätzt werden, so ist anzunehmen, daß Laien hier auf eine andere (weniger elaborierte) Wissensbasis zurückgreifen und so auch im Hinblick auf Schaden und Wahrscheinlichkeit zu anderen Bewertungen kommen können.
- Abhängig von Motivation und Wissen verarbeiten Laien Risikoinformationen jeweils anders und kommen so auf verschiedene Weise zu Risikourteilen. Wenn Wissen und Motivation niedrig sind, beschränken sich Laien auf eine wenig elaborierte Informationsverarbeitung: Sie gehen von aggregierten Referenzfällen aus - dann werden z.B. Gentechnik oder Kerntechnik als Ganzes bewertet, zwischen einzelnen Varianten wird nicht unterschieden. Laien konzentrieren sich dabei nur auf wenige risikoquellenbezogene Schlüsselreize. So könnten Laien beispielsweise überlegen, ob die Risikoquelle *stigmatisiert* (z.B. Wohnen in der Nähe eines Endlagers für radioaktiven Abfall) oder ob sie den Sicherheitsvorkehrungen der Betreiber und den Kontrollinstanzen vertrauen können. Eine Abwägung Risiken gegen Nutzen wird hier kaum vorgenommen.
- Wenn Wissen und Motivation vorhanden sind, ist eine differenziertere Bewertung zu erwarten. Laien unterscheiden dann offenbar zwischen einzelnen Anwendungen der Technik (z.B. nicht nur Gentechnik, sondern Gentechnik im medizinischen Bereich, in der Landwirtschaft und bei der Nahrungsmittelproduktion) und sie nehmen Risiko-Nutzenabwägungen vor. Anzunehmen ist, daß sie in ihre Bewertung auch eine größere Anzahl von Risiko- bzw. Nutzenfaktoren einbeziehen.
- Risikourteile können sich weitgehend änderungsresistent erweisen. Insbesondere gilt das, wenn die Beurteiler nur wenig wissen und ein Meinungsklima vorherrscht, daß eine Sichtweise als gültig bzw. als politisch korrekt ansieht.

4. Handlungsstrategien: Was tun?

Aus dem gesagten folgt, daß bei der Risikokommunikation eine Vielzahl von Argumenten aufeinander treffen. Mindestens sechs Ebenen lassen sich unterscheiden (Wiedemann & Kresser 1997):

- Wissenschaftliche Argumente zur Bewertung des Risikos (Grenz,- Vorsorge- und Richtwerte)
- Laienargumente zur Bewertung des Risikos (Ängste, Mißtrauen und Vorbehalte)
- Weltanschauungen als Argumente zur Bewertung des Risikos (Mit wieviel Risiken wollen wir leben?
- Aussagen über Wege und Ziele (Was erforderlich ist: z.B. Umkehr der Beweislast)
- Aussagen über Selbst- und Fremdbilder der beteiligten Akteure (Bewertung der Vorgeschichte, Vertrauen in Akteure)
- Aussagen zu Fairneß und Gerechtigkeit bei Entscheidungen und Vorgehensweisen.

Für alle Risiken gilt es, folgende Punkte aufzugreifen und die damit verbundenen Fragen klar zu beantworten: (1) Moral des Risikos (Warum ist es gerechtfertigt, das Risiko einzugehen?), (2) Einbeziehung der betroffenen Öffentlichkeit (Welche Möglichkeiten werden geboten, die Öffentlichkeit in die Expositions-Kontrolle bzw. in das Risikomanagement zu integrieren?), (3) Risiko-Nutzen-Verteilung unter geographischen und zeitlichen Aspekten (Wer trägt das Risiko, wer hat den Nutzen

und inwieweit ist diese Verteilung gerecht?), (4) Volkswirtschaftlicher Nutzen (Schaffung neuer Arbeitsplätze, Sicherung des Industriestandortes Deutschland, Beitrag zur Energieeffizienz und zur Minimierung von Stoffströmen, ökonomisches Wachstum).

Risikoanalysen haben - wenn es um diese Fragen geht - nur eine begrenzte Bedeutung. Dies macht deutlich, daß eine Sicherheitspolitik neuer Konzepte, Verfahren und Instrumente bedarf.

Solche Verfahren müssen den richtigen Gebrauch der richtigen Wissenschaft machen und diese dann in Partizipations- und Konfliktmanagementverfahren einbinden, die angemessen eingesetzt werden. Kernfrage ist hier die Zumutbarkeit, die - eben weil darunter viele jeweils verschiedenes verstehen - ausgehandelt werden muß. Solche Verhandlungen sind in bezug auf drei Aspekte zu optimieren, wobei immer eine Anpassung an die konkreten Umstände erforderlich ist:

- Faktfindung und -bewertung
- Entscheidungsunterstützung
- Prozeßunterstützung

Das **Faktfindung** betrifft die Sichtung und Bewertung wissenschaftlicher Informationen zum anstehenden Problem. Zum Beispiel kann es darum gehen, die derzeit verfügbaren Informationen über die endokrinen Wirkungen von Chemikalien zusammenzustellen und zu bewerten. Das Beispiel zeigt, daß hier die wissenschaftliche Unsicherheit eines der entscheidenden Probleme ist. Weiterhin geht es darum, Unsicherheit transparent zu bewerten, so daß Nichtexperten sich auch ein Urteil bilden können.

Eine Möglichkeit zur qualitativen Verdeutlichung von Unsicherheit bietet die von Gray und Wiedemann (1997) erweiterte "Pedigree"-Matrix von Funtowicz und Ravetz (1987). Die Qualität wissenschaftlicher Aussagen wird in diesem Modell mit Hilfe von fünf Kriterien bewerten: (1) Güte der Theorie, (2) Güte der Daten, (3) Ausmaß der Wertbezogenheit , (4) Ausmaß des Konsenses in der (erweiterten) wissenschaftlichen "Community" und (5) Ausmaß des Konsenses unter Experten.

Die Qualität der Fakten reicht aber noch nicht aus, um eine gute Entscheidung zu ermöglichen. Deshalb ist eine bestmögliche Strukturierung der Entscheidung - die **Entscheidungsunterstützung** - wichtig. Hier bieten sich entscheidungsanalytische Verfahren an (z.B. Keeney 1992), die - grosso modo - folgenden Aufbau haben:

- Problembestimmung und Erarbeitung eines gemeinsamen Problemlösungsverständnis,
- Ermittlung der Werte, der die Entscheidung zu folgen hat (Wertbaumanalysen, siehe Keeney et al. 1985),
- Umsetzung der Werte in Entscheidungskriterien/Dimensionen,
- Optionsgenerierung (Welche Entscheidungsalternativen sind möglich?),
- Beurteilung der Auswirkungen der Entscheidungsalternativen auf den Entscheidungsdimensionen auf der Basis bestmöglichen Wissens,
- Entscheidung über das Entscheidungsmodell,
- Sensitivitätsanalysen.

Allerdings reicht auch eine Entscheidungsunterstützung noch nicht aus. Der dritte und oft der wichtigste Aspekt ist die **Optimierung des Entscheidungsprozesses**. Dabei sind zwei z.T. konfligierende Kriterien zu erfüllen: (1) die Opportunitätskosten des Entscheidungsprozesses und (2) die Akzeptanz des Prozesses. Zum einen soll der Prozeß rasch ablaufen und sich nicht zu einer

bürokratischen Innovationsblockade entwickeln. Zum anderen sollte die getroffene Entscheidung breite Unterstützung finden und sich damit auch besser umsetzen lassen. Um diese Ziele zu erreichen, ist die Fähigkeit entscheidend, Konflikte konstruktiv zu lösen. Aufgaben der Prozeßunterstützung sind so vor allem den besseren Umgang mit (1) Beziehungskonflikten (starke Emotionen, Vorurteile, stereotypes Verhalten, schlechte Kommunikation), (2) Wertkonflikten (unterschiedliche übergeordnete Sichtweisen), (3) strukturellen Konflikten (bezogen auf administrative Abläufe, Kontrolle, Machtverteilung, logistische Faktoren, Zeitressourcen) und (4) Interessenkonflikten (verfahrensbezogene, psychologische und inhaltliche).

Raiffa (1982: 11ff.) weist anhand eines entsprechenden Fragekatalogs auf weitere Problemen hin, die für die Gestaltung des Prozesses essentiell sind (1) Wieviele Parteien sind an dem Konflikt beteiligt? (2) Sind die Interessen einer Partei homogen? (3) Stehen sich die Parteien nur einmal oder wiederholt gegenüber? (4) Existieren ähnliche Konfliktfälle, für die der jetzige Konflikt ein Referenzfall ist? (5) Geht es um ein oder mehrere "Issues" (Konfliktthemen) im Konfliktfall? (6) Ist eine Konfliktlösung für alle Beteiligten unumgänglich oder ist der Status quo für eine Seite annehmbar? (7) Ist eine formelle Ratifikation der Konfliktlösung seitens der Parteien erforderlich? (8) Sind Konfliktlösungen über Machteinsatz und Drohungen möglich? (9) Ist Zeit eine kritische Variable? (10) Wie dauerhaft kann die Konfliktlösung sein? (11) Findet die Konfliktlösung in der Öffentlichkeit statt oder nicht? (12) Welcher Verhandlungsstil ist zu erwarten? (13) Ist eine Konfliktmittlung durch eine neutrale Partei möglich?

Literatur

Allen, F.W. (1988): Differing Views of Risk: The Challenge for Decisionmakers in a Democracy. Paper presented at the Only Earth Forum on Managing Hazardous Materials. New York, May 25-26, 1988.

Bentkover, J.D.; Covello, V.T. & Mumpower, J.(1986): Benefits Assessment, The State of the Art, Dordrecht.

Bord, R.J. & O'Connor, R.E. (1990): Risk communication, knowledge, and attituds Explaining reactions to a technology perceived as risky, in: Risk Analysis, 10, 4, 499-506.

Burns, W.J.; Slovic, P.; Kasperson, R.E.; Kasperson, J.X.; Renn, O.; Emani, S. (1993): Incorporating Structural Models into Research on the Social Amplification of Risk: Implications for Theory Construction and Decision Making. Risk Analysis, Vol. 13, No. 6, 611-624.

Coates, J.F; Coates, V.T.; Jarratt, J.; Heinz, L. (1986): Issue Management: How you can plan, organize and manage for the future. Mt. Airy, MD.

Douglas, M. & Wildavsky, A. (1982): Risk and Culture, An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers. Berkeley.

Funtowicz, S. & Ravetz, J. (1987): The Arithmetic of Scientific Uncertainty. Physics Bulletin, 38, 412-414. IOP Publishing, UK.

Gardner, G.T. & Gould, L.C. (1989): Public Perceptions of the Risks and Benefits of Technology, in: Risk Analysis, Vol. 9, No. 2, 225-242.

GEO – Wissen. Hamburg, 1992, Nr. 1.

Gray, P.C.R. & Wiedemann, P.M. (1997): Tools for Clarifying Conflicts Over Sustainability Concepts. (Working paper for HGF).

Hardling, C.M. & Eiser, R.J. (1984): Characterising the Perceived Risks and Benefits of Some Health Issues, in: Risk Analysis, Vol. 4, No. 2, 131-141.

Heath, R.L. (1994): Management of Corporate Communication. From Interpersonal Contacts to External Affairs. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.

Jungermann, H. & Slovic, P. (1993): Charakteristika individueller Risikowahrnehmung. In: Bayerische Rück (Hg.), Risiko ist ein Konstrukt. Wahrnehmungen zur Risikowahrnehmung. München, 89-107.

Karger, C.R. & Wiedemann, P.M. (1998): Kognitive und affektive Komponenten der Bewertung von Umweltrisiken. Erscheint in: G. Böhm, J. Rost und H. Spada (Hg.): Umweltrisiken: Wahrnehmung, Bewertung und Verhaltensmotivierung. Zeitschrift für Experimentelle Psychologie 4. Jg. Band 45.

Kasperson, R.E. (1992): The Social Amplification of Risk: Progress in Developing an Integrative Framework. In: D. Golding (Ed.), Social Theories of Risk, Westport, Praeger.

Keeney, R.L. (1992): Value-Focused Thinking. A Path to Creative Decisionmaking. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Keeney, R.L.; Renn, O.; von Winterfeldt, D. & Kotte, U. (1985): Die Wertbaumanalyse. Entscheidungshilfe für die Politik. München: High Tech Verlag.

Kraus, N. & Slovic, P. (1988): Taxonomic analysis of perceived risk: Modeling individual and group perceptions within homogenous hazard domains, in: Risk Analysis, 8, 3, 435-455.

Lappe, H. (1991): Perceptions of drug risks: individual and public response to risk. Berlin: Dissertation, Technical University Berlin.

Leiss, W. (1990): A typology of risk management issues, in: Risk Abstracts, 7, 3, 1-8.

Luhmann, N. (1991): Soziologie des Risikos. Berlin.

MacGregor, D.G. & Slovic, P. (1989): Perception of risk in automotive systems, in: Human Factors, 31, 4, 377-389.

Palmlund, I. (1993): Social Drama and Risk Evaluation. In: Sh. Krimsky and D. Golding (Eds.), Social Theories of Risk. Westport: Praeger.

Raiffa, H. (1982): The Art and Science of Negotiation. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Rayner, St. (1993): Risk Perception, Technology Acceptance, and Institutional Culture: Case Studies of Some New Definitions. In: Bayerische Rück (Ed.) Risk is a Construct. Munich.

Renn, O. & Levine, D. (1988): Trust and credibility in risk communication, in: Helmut Jungermann, Roger E. Kasperson, Peter M. Wiedemann (Eds.), Risk communication, Jülich, 51-81.

Renn, O. (1984): Risikowahrnehmung der Kernenergie, Frankfurt.

Rohrmann, B. (1995): Risk Perception Research: Review and Documentation. Arbeiten zur Risiko-Kommunikation, Heft 48, Jülich. Forschungszentrum.

Sandman, P.; Miller, P.M.; Johnson, B.B. & Weinstein, N.D. (1993): Agency Communication. Community Outrage, and Perception of Risk: Three Simulation Experiments. Risk Analysis, 13, 585-598.

Schütz, H.; Wiedemann, P.M. & Gray, P.C.R. (1995): Risk Perception of Consumer Products in Germany, Annual Meeting of the SRA-Europe, 21-24 May 1995, Stuttgart.

Slovic, P.; Fischhoff, B. & Lichtenstein, S. (1979): Rating the Risks. Environment, 10, 281-285.

Slovic, P.; Fischhoff, B. & Lichtenstein, S. (1980): Facts and fears: Understanding perceived risk. In: R. Schwing & W.A. Albers Jr. (eds.), Societal Risk assessment: How safe is safe enough? New York.

Slovic, P.; Fischhoff, B. & Lichtenstein, S. (1985): Characterizing perceived risk. In: R.W. Kates, C. Hohenemser and J.X. Kasperson (eds.), Perilous Progress: Managing the Hazards of Technology. Boulder, Colorado.

Slovic, P.; Kraus, N.; Lappe, H.; Letzel, H.; Malmfors, T. (1989): Risk perception of prescription drugs: Report on a survey in Sweden, in: B. Horrisberger, R. Dinkel (Eds.), The perception and management of drug safety risks, Berlin, 91-111.

Snow, D.A. & Benford, R.D. (1988): Ideology, Frame Resonance and Participant Mobilization. In: B. Klandermans, Hanspeter Kriesi und Sidney Tarrow (Eds.), International Social Movement Research 1. Greenwich, London, pp. 197-218.

Snow, D.A. & Benford, R.D. (1992): Master Frames and Cycles of Protest. In: Aldon Morris and Carol Mueller (Eds.), Frontiers in Social Movement Theory. New Haven.

Snow, D.A.; Rochford, E.B.; Worden, S.K. & Benford, R.D. (1986): Frame Alignment Processes, Micromobilization, and Movement Participation. American Sociological Review, Vol. 51, 464-481.

Stolwijk, J.A.J.; DeLuca, D.R. & Gould, L.C. (1985): Public perception of technological risk, in: F. Homburger (Ed.), Safety evaluation and regulation of chemicals 2, Basel, 166-185.

U.S. Congress - OTA, Public perception of food safety, in: U.S. Congress -OTA, A new technological era for American agriculture. Washington, 1992, 319-336.

Wiedemann, P.M. (1993): Introduction Risk Perception and Risk Communication, Arbeiten zur Risiko-Kommunikation, Heft 38, Jülich.

Wiedemann, P.M. & Kresser, R.M. (1997): Intuitive Risikobewertung – Strategien der Bewertung von Umweltrisiken. Arbeiten zur Risiko-Kommunikation, Heft 62. Forschungszentrum Jülich.

Wynne, B. (1982): Institutional mythologies and dual societies in the management of risk, in: Howarth C. Kunreuther, E.V. Ley (Eds.), The risk analysis controversy. An institutional perspective, Berlin, 127-143.

Beschäftigungseffekte eines europäischen Programms zur Förderung des Exports kohlebasierter Verstromungstechnologien

Wilhelm Kuckshinrichs, Hans-Günter Schwarz, Joachim Müller-Kirchenbauer

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)

Forschungszentrum Jülich

1. Einleitung

Der nachfolgende Beitrag basiert auf Arbeiten, die im Auftrag der Europäischen Kommission, DG XVII, die Voraussetzungen und Erfolgschancen eines ‚Integrated European Clean Coal Technology Programme' analysierten[1]. Das Programm hat zum Ziel, den globalen kommerziellen Einsatz von europäischen Clean Coal Technologies für die Stromerzeugung zu stimulieren. Grundidee des Programms ist zum einen, durch die Bündelung von nationalen und EU-Förderprogrammen im Bereich Energie- bzw. Kohleforschung Synergieeffekte auszulösen und Effizienzpotentiale zu nutzen. Bei einer besser abgestimmten Forschungsförderung können bei gegebenem Finanzvolumen Forschung & Entwicklung, Demonstration und Kommerzialisierung von Anlagen zur Kohleverstromung erfolgreicher unterstützt werden. Zum anderen soll das Programm zum Abbau von Hemmnissen beitragen, die den globalen Einsatz dieser Technologien behindern. Als signifikanteste Hemmnisse gelten die hohen Kapitalkosten fortschrittlicher Kohletechnologien sowie die Vorbehalte von finanzierenden Institutionen und potentiellen Betreibern, die auf der ungünstigen Einschätzung der Betriebssicherheit und Verfügbarkeit bisher kommerziell nicht oder nicht ausreichend getesteter Stromerzeugungsanlagen basieren. Daher soll die Forschungsförderung verstärkt auf die Reduktion von Investitionskosten ausgerichtet werden. Zudem gilt es, die Errichtung von Clean Coal-Demonstrationsanlagen kommerzieller Größenordnung in der Europäischen Union vorantreiben, um damit eine günstigere Einschätzung der Betriebssicherheit zu erreichen.

Neben der Reduktion von Umweltschäden durch den Einsatz von Clean Coal Technologies gilt als wesentliches Kriterium für die Bereitstellung von Finanzmitteln durch die Kommission der Nachweis, daß ein Programm in nennenswertem Umfang positive Beschäftigungseffekte in den EU-Mitgliedsländern induziert. Positive Beschäftigungseffekte stellen sich ein, wenn das Programm zu zusätzlicher Exportnachfrage nach europäischen Clean Coal Technologies führt.

Der nachfolgende Beitrag beschränkt sich auf die Analyse dieser Beschäftigungseffekte[2]. Die Arbeit ist in drei Teile aufgeteilt. Kapitel 2 analysiert die Marktentwicklung für Clean Coal Technologies und gibt im wesentlichen Ergebnisse vorhandener Marktanalysen wieder. Es wird gezeigt, inwieweit ein integriertes europäisches Programm den Export europäischer Kraftwerkstechnologie stimulieren kann.

---

1 Die Arbeiten wurden von einem Konsortium bestehend aus ETSU (UK), NOVEM (NL), CIEMAT (SP) und Forschungszentrum Jülich in enger Abstimmung mit der Industrie durchgeführt und von ETSU koordiniert.

2 Die Arbeiten wurden von der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) des Forschungszentrums Jülich in Abstimmung mit dem Projektträger BEO erstellt. Herrn Dr. V. Breme sei für konstruktive Kritik gedankt. Die hier dargestellten Ergebnisse repräsentieren die Analysen der Verfasser, sind hingegen nicht notwendigerweise als Position der Europäischen Kommission zu interpretieren.

Danach wird im Kapitel 3 die für die Quantifizierung von Beschäftigungswirkungen zugrunde gelegte Methodik erläutert. Die Arbeit basiert auf der Entwicklung und Anwendung eines um den Keynes'schen Einkommensmultiplikator erweiterten Input-Output-Modells. Dabei findet auch die Entwicklung der Arbeitsproduktivität Berücksichtigung. Das Kapitel 4 gibt einen Überblick über die Größenordnung der zu erwartenden Beschäftigungseffekte. Es wird gezeigt, daß signifikante Beschäftigungseffekte durch den Export von Anlagen insbesondere in der ersten Hälfte des nächsten Jahrzehnts erzielt werden können. Darüber hinaus wird in drei Szenarien dargelegt, daß die absolute Höhe der programminduzierten Beschäftigung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Annahmen zur Zuordnung der zusätzlichen Nachfrage zu europäischen Produktionsregionen variiert. Für die unterschiedliche regionale Zuordnung werden neben dem Basisfall der Europäischen Union (EU12) die Volkswirtschaften des Vereinigten Königreichs sowie Deutschlands zugrunde gelegt. Diese Länder zeichnen sich dadurch aus, daß sie beide wichtige europäische Lieferanten von Kraftwerkstechnologie sind, aber im Vergleich unterschiedlich hohe Arbeitsproduktivitäten aufweisen.

2. Marktentwicklung und programminduzierte Exportnachfrage

Für die weltweite Energie- und Elektrizitätsnachfrage wird vielfach ein Anstieg erwartet[3]. Die Dekkung der steigenden Nachfrage erfordert unter anderem einen erheblichen Ausbau der Stromerzeugungskapazitäten, zudem muß Ersatz geschaffen werden für außer Betrieb gehende Altanlagen. Von 1990 bis 2010 wird ein Anstieg der weltweiten Kraftwerksleistung von 2830 GW auf 4450 GW veranschlagt.

Der weit überwiegende Teil der künftigen Kapazitäten wie auch der Zuwächse wird fossil befeuert sein. Die stärksten Zuwächse sind zu etwa gleichen Teilen bei den Energieträgern Kohle und Gas zu verzeichnen, der regionale Schwerpunkt ist Asien.[4]

Angesichts der hohen Zuwächse bei der Kohleverstromung rücken fortschrittliche Kohleverstromungstechnologien (Clean Coal Technologies) verstärkt in den Mittelpunkt des Interesses, zumal europäische Hersteller hier neben US-amerikanischen und japanischen Anbietern eine starke Stellung innehaben. Neben den Neuanlagen zählen für diesen Beitrag auch Nachrüstungen bestehender Anlagen (Retrofit[5]) zu den Clean Coal Technologies.

Bis zum Jahr 2010 wird hauptsächlich der Einsatz konventioneller Dampfkraftwerke mit atmosphärischer Kohlenstaubfeuerung (SF) erwartet. Integrierte Kohlevergasungskraftwerke (IKV), atmosphärische (AWSF) und druckaufgeladene Wirbelschichtfeuerungen (DWSF) werden ebenfalls zum Einsatz kommen.

Tabelle 1 zeigt erwartete Leistungswerte der neu zu installierenden Kohlekraftwerke und Investitionsvolumina für die genannten Konzepte in den verschiedenen Regionen der Welt. Für Nachrüstungen bestehender Anlagen wird zusätzlich ein weltweites Marktpotential von etwa 40 Mrd. ECU_{1990} erwartet[6].

---

3 vgl. z.B. IEA 1996, WEC 1995a, WEC 1995b, Cura 1998, Niehörster 1998, ETSU 1996, Riedle / Taud 1997, Böhm 1997.

4 vgl. Böhm 1997

5 Umweltschutzinvestitionen, die keine neue Kraftwerksleistung schaffen.

6 vgl. ETSU 1996.

	Nord-amerika	West-europa	Osteuro-pa und GUS	Südasien	China	Ostasien	Japan, Au-stralien, Neuseeland	Afrika	Süd- und Mittel-amerika	Gesamt
Neu zu installierende Kapazitäten bis 2010 [GW]										
SF	8...16	5...10	3...14	69...83	153...171	68...77	14...32	33...42	4.....8	359...452
AWSF	2.....4	2.....4	1.....4	4.....6	8.....10	4.....5		9...11	1.....2	32.....45
DWSF	2.....4	1.....2			1.....2	4.....5	3.....7			11.....20
IKV	8...16	2.....4	0.....2	1.....2	6.....8	4.....5	3.....7	2.....3		28.....46
Gesamt	20...40	10...20	5...20	75...90	170...190	80...90	20...45	45...55	6...10	431...560
Investitionsvolumen bis 2010 [10^9 ECU_{1990}]										
SF	7...15	5...10	3...14	65...79	145...163	64...73	13...30	32...40	4.....8	340...428
AWSF	2.....5	2.....5	1.....5	4.....5	9.....10	4.....5		9...12	1.....2	32.....45
DWSF	2.....5	1.....2			1.....2	4.....5	2.....7			12.....19
IKV	10...22	2.....5	0.....3	2.....3	9.....10	5.....6	4.....9	3.....4		36.....60
Gesamt	22...45	10...21	5...20	71...87	164...184	77..88	20...46	43...54	5...10	421...552

Quelle: ETSU 1996

Tabelle 1: Bandbreiten der erwarteten Entwicklung des weltweiten Kohlekraftwerksmarktes

Im Rahmen der Arbeiten für die Europäische Kommission wurde eine Marktanalyse und Unternehmensbefragung durchgeführt[7], deren Ergebnisse Grundlage der Beschäftigungsanalyse sind. Zum einen wurde der Anteil der weltweiten Nachfrage nach Kraftwerken ermittelt, der in der Europäischen Union produktionswirksam wird. Zum anderen wurden die Auswirkungen des Förderprogramms auf die Höhe des Anteils quantifiziert. Eine Aufteilung der Nachfrage auf einzelne Länder innerhalb der EU konnte mit der Befragung nicht erreicht werden.

Die Analyse wurde vor dem Hintergrund zweier grundlegender Entwicklungstrends der Kraftwerksindustrie durchgeführt. Einerseits ist eine zunehmende Verlagerung von Elementen der Wertschöpfungskette in die Einsatzländer bzw. in Niedriglohnländer zu konstatieren. Damit werden der Europäischen Union Wertschöpfungsanteile entzogen. Andererseits wird mit einem mittelfristig sinkenden Marktanteil europäischer Hersteller gerechnet. Die Marktanalyse und Unternehmensbefragung ergab, daß ein integriertes Programm die Stabilisierung der Marktanteile europäischer Anbieter unterstützt und die Verlagerung von Elementen der Wertschöpfungskette ins Ausland verzögert, aber keinen Einfluß auf das globale Marktvolumen ausübt. Der Erfolg eines europäischen Programms geht somit zu Lasten US-amerikanischer und japanischer Anbieter. Die wesentlichen Wirkmechanismen des Programms sind eine Reduktion der spezifischen Investitionskosten der Clean Coal Technologies durch eine Orientierung der Forschungsförderung auf Kostenaspekte, der Nachweis hoher Verfügbarkeiten

7 Durchführende Institutionen: ETSU, NOVEM, Hügli Pollock Read und ECN.

der innovativen Kraftwerkskonzepte sowie Verbesserungen der Informations- und Kommunikationsstrategien u.a. durch Schaffung einer einheitlichen Anlaufstelle der Europäischen Union für Anbieter und Nachfrager von Clean Coal Technologies. Die Ausweitung des insgesamt auf europäische Hersteller entfallenden Marktvolumens zum einen und die Erhaltung der Produktion von Komponenten oder Zulieferteilen in der EU zum anderen führen in der nächsten Dekade zu erhöhter Exportnachfrage nach europäischen Clean Coal Technologies. Für die Zeit nach 2005 erwartet die Marktanalyse einen Rückgang des Programmeffekts aufgrund einer wieder stärkeren Tendenz zur Verlagerung von Produktionsanteilen ins Ausland[8]. Aufgrund der Anlaufzeit des Programms sind vor dem Jahr 2000 keine Auswirkungen zu erwarten. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Analyse des programminduzierten Exportnachfragezuwachses. Dieser ist ein entscheidender Einflußparameter für die nachfolgende Berechnung von Produktions- und Beschäftigungseffekten, deren Ausmaß sich c. p. proportional zur zusätzlichen Exportnachfrage verhält.

10^6 ECU_{1990}	2001-2005	2006-2010
Neubaukraftwerke	974	480
Retrofit	266	5
Summe	1.240	485

Datenbasis: ECN 1998

Tabelle 2: Durchschnittlicher jährlicher programminduzierter Exportnachfragezuwachs

Die Errichtung von Kraftwerken beinhaltet Lieferungen und Dienstleistungen von Unternehmen verschiedener Sektoren einer Volkswirtschaft. In der Unternehmensbefragung wurden die wesentlichen Komponenten einer durchschnittlichen Clean Coal Technology erhoben[9]. Tabelle 3 gibt Aufschluß über ihre Struktur und die Zuordnung zu den Sektoren der verwendeten Input-Output-Tabellen. "Civil works" schließt alle bautechnischen Arbeiten zur Geländeerschließung und Errichtung von Gebäuden ein, "Construction activity on site" umfaßt Montage und Installationsarbeiten vor Ort. Die Herstellung der angelieferten Elemente wird unter "Component construction" (z.B. Turbine, Generator, Brenner, Filter etc.) und "Electrical equipment" (z.B. Leittechnik, Transformatoren etc.) erfaßt. Ferner werden "Project development and engineering" und "Commercial services" (hierunter Finanzierung und Versicherungen) unterschieden.

Die Disaggregation der zusätzlichen Exportnachfrage und ihre Zuordnung zu den Produktionsbereichen ist Voraussetzung für die nachfolgende Input-Output-Analyse[10]. Der Spaltenvektor der zusätzlichen sektoralen Exportnachfrage ist die wichtigste exogene Variable für die weiteren Berechnungen.

---

8 vgl. ECN 1998.

9 vgl. ETSU 1997.

10 Das DIW löste den Kraftwerksbau aus den anderen Produktionsbereichen heraus und führte damit einen eigenen Sektor Kraftwerksbau in die Input-Output-Analyse ein (vgl. Wessels 1976). Damit kann die Wertschöpfung in diesem Sektor separat ausgewiesen werden. Allerdings wird der geschlossene methodische Rahmen der veröffentlichten Input-Output-Tabellen verlassen.

Inputstruktur einer durchschnittlichen Clean Coal Technology	Anteil bei Neuanlagen	Anteil bei Retrofit	Sektorzuordnung	
			EUROSTAT IO-Tabellen[1]	OECD IO-Tabellen[2]
'Civil works'	9,4 %	4,4 %	16: 'Building and civil engineering works'	26: 'Construction'
'Construction activity on site'	15,7 %	15,0 %	16: 'Building and civil engineering works'	26: 'Construction'
'Component construction'	42,9 %	41,4 %	6: 'Metal products'	14: 'Metal products'
			7: 'Agricultural and industrial machinery'	15: 'Non-electrical machinery'
			9: 'Electrical goods'	17: 'Electrical apparatus'
'Electrical equipment'	15,3 %	19,1 %	9: 'Electrical goods'	17: 'Electrical apparatus'
'Project development and engineering'	9,5 %	10,7 %	24: 'Other market services'	35: 'Other producers'
'Commercial services'	4,4 %	3,6 %	23: 'Credit and insurance'	31: 'Finance and insurance'
'Others'	2,8 %	5,8 %	15: 'Other manufacturing products'	24: 'Other manufacturing'

1 25 Sektoren, basierend auf der Nomenclature générale des Activités économiques dans les Communautés Européennes – CLassification Input-Output (NACE-CLIO), vgl. EUROSTAT 1996b.

2 36 Sektoren, basierend auf der International Standard Industrial Classification (ISIC Rev. 2), vgl. United Nations 1990, vgl. OECD 1995.

Tabelle 3: Inputstruktur und sektorale Zuordnung

3. Input-Output-Analyse

Die aus der zusätzlichen Exportnachfrage resultierenden Produktions- und Beschäftigungseffekte werden mit Hilfe der Input-Output-Methodik abgeschätzt[11]. Da sich der Nachfragezuwachs für europäische Produzenten zu Lasten ausländischer Konkurrenten vollzieht und keine andere in Europa wirksame Nachfrage verdrängt, ist es nicht notwendig, eine Kompensationsrechnung durchzuführen. Die Brutto- entsprechen den Nettoeffekten.

11 Die Input-Output-Analyse erlaubt die Vorausschätzung der Produktions- und Beschäftigungswirkungen vorgegebener Nachfrageänderungen. Die Datengrundlage zur Input-Output-Analyse liefert im wesentlichen die Input-Output-Tabelle. Die Input-Output-Tabelle erfaßt systematisch die Bezugs- und Lieferströme, die als Input- und Output-Ströme zwischen den Sektoren einer Volkswirtschaft fließen. Die Input-Output-Analyse geht über die rein deskriptive Beschreibung der strukturellen Verflechtungen hinaus, indem Hypothesen über produktionstheoretische Zusammenhänge und, wie im erweiterten Modell, auch Verhaltensannahmen eingebaut werden (vgl. Holub/Schnabl 1994). An der Input-Output-Analyse wird vielfach Kritik geübt (siehe z. B. Storchmann 1997). Diese bezieht sich insbesondere auf die unterstellten Produktionsbedingungen (Leontief-Produktionsfunktion). Für die Input-Output-Analyse sprechen allerdings nicht zuletzt zwei Dinge: Die transparente Struktur wie die einfache Handhabung. Bei zuverlässiger Eingangsgröße, nicht allzu langem Projektionszeitraum und Berücksichtigung der Zunahme der Arbeitsproduktivität bildet sie die Größenordnung der Produktions- und Beschäftigungseffekte richtig ab (vgl. hierzu auch Pfaffenberger 1995).

Die Modellierung weist drei Besonderheiten auf:

- Mittels der Szenario-Technik wird zwischen einem Basisfall, einem Hoch- und einem Niedrigproduktivitätsfall unterschieden. Damit werden unterschiedliche Annahmen für die rechnerische Zuordnung der Nachfrage zu europäischen Produktionsregionen getroffen sowie regional unterschiedliche Arbeitsproduktivitäten berücksichtigt.
- Es wird neben dem einfachen auch das um den Keynes-Multiplikator erweiterte statische Mengenmodell genutzt.
- Die Berechnung der Produktionseffekte basiert zwar auf der Inputkoeffizientenmatrix des Ausgangsjahres (naive Fortschreibung), der Fortschritt der Arbeitsproduktivität wird aber mit Blick auf die Beschäftigungseffekte berücksichtigt.

Die zusätzliche Exportnachfrage, der sich die Europäische Union gegenüber sieht, liegt zwar in sektoral, nicht aber in regional disaggregierter Form vor. Der Beschäftigungseffekt hängt sehr stark davon ab, ob die Regionen, in denen Produktion ausgelöst wird, eine hohe oder niedrige Arbeitsproduktivität aufweisen. Durch Abbildung unterschiedlicher Wirtschaftsstrukturen in der Input-Output-Analyse wird eine realistische Bandbreite der möglichen regionalen Streuung der Nachfrage abgebildet. Den Basisfall definiert das für die Europäische Union für das Jahr 1991 gegebene Zahlenmaterial, das aus einer Input-Output-Tabelle für die 12 damaligen Mitgliedsländer[12] und Zahlen zur sektoralen Beschäftigung besteht[13]. Damit wird unterstellt, daß alle Regionen bzw. die dort beheimateten Branchen ihrem Anteil am BIP entsprechend von der zusätzlichen Exportnachfrage profitieren. Der Hochproduktivitätsfall wird durch das für Westdeutschland für 1990 gegebene Zahlenmaterial[14] bestimmt. Er gibt mit Blick auf die Beschäftigung eine für die europäische Union zu erwartende untere Grenze vor. Der Niedrigproduktivitätsfall, der durch das für das Vereinigte Königreich für 1990 gegebene Zahlenmaterial[15] definiert ist, markiert hingegen die obere Grenze. Die Wahl von Deutschland und Vereinigtem Königreich als repräsentative Regionen bzw. Wirtschaftsstrukturen ist neben dem Produktivitätsgefälle auch vor dem Hintergrund zu sehen, daß beide innerhalb der EU die wichtigsten Produzenten von Kohlekraftwerken und ihren Komponenten beheimaten.

Das einfache Modell berücksichtigt sowohl direkte wie indirekte Produktionseffekte. Einmal wird Produktion in den Wirtschaftsbereichen geschaffen, die unmittelbar durch die zusätzliche Exportnachfrage betroffen sind. Dies sind die in Tab. 3 aufgeführten Sektoren. Zum zweiten entsteht Produktion überall dort, wo die notwendigen Vorleistungsgüter produziert werden. Der Bruttoproduktionseffekt ΔX läßt sich durch Multiplikation von einfacher Leontief-Inversen und Spaltenvektor der zusätzlichen sektoralen Exportnachfrage ΔEXP berechnen:

$$\Delta X = (I - A)^{-1} \cdot \Delta EXP.$$

12 EUROSTAT 1995.

13 EUROSTAT 1996d.

14 OECD 1995, 1996, 1997.

15 OECD 1995, 1996, 1997.

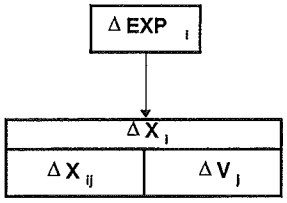
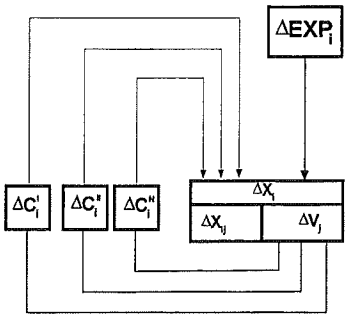
	Einfaches Modell (ohne Keynes-Multiplikator)	**Erweitertes Modell** (mit Keynes-Multiplikator)
Modell Output	Veränderung von Bruttoproduktion (ΔX) und Beschäftigung (ΔB)	
Modell Input	Zusätzliche Exportnachfrage (ΔEXP)	
Struktur		
Mathematischer Algorithmus	$\Delta X = (I-A)^{-1} \cdot \Delta EXP$ $\Delta B = <b> \cdot \Delta V = <b> \cdot <v> \cdot \Delta X$	$\Delta X = (I-Z)^{-1} \cdot \Delta EXP$ $\Delta B = <b> \cdot \Delta V = <b> \cdot <v> \cdot \Delta X$
Parameter	- (inländische) sektorale Input-koeffizienten (a^d_{ij}) - sektorale Wertschöpfungs-koeffizienten (v_j) - sektorale Beschäftigungs-koeffizienten für das Ausgangsjahr ($b_j(0)$) - sektorales Produktivitätswachstum je Jahr (r_j)	Zusätzlich: - sektorale Grenzkonsumrate für im Inland produzierte Güter (c^d_i)

Bild 1: Einfaches und erweitertes Input-Output-Modell

A ist die nxn-Matrix der (inländischen) Produktionskoeffizienten (a^d_{ij}). Diese Koeffizienten spiegeln wider, welches im Inland produzierte Volumen an Vorleistungsgütern des Sektors i direkt notwendig ist, um eine Einheit Output des Sektors j zu produzieren. Die Produktionskoeffizienten fußen auf der Annahme, daß sich die Inputs eines Sektors stets proportional zu seinem Output verhalten (Leontief-Technologie). Ein Element der Zeile i und Spalte j der einfachen Leontief-Inversen $(I - A)^{-1}$ gibt die Produktion des Sektors i an, die direkt und indirekt erforderlich ist, um eine Einheit exogener Endnachfrage nach Produkten des Sektors j zu decken.

Erweitert man das Modell um den Keynes-Multiplikator, so werden über die direkten und indirekten Effekte hinaus die über das Einkommen induzierten berücksichtigt: Die zusätzliche Endnachfrage nach Kohleverstromungstechnologie schafft über die Produktion Einkommen. Diese Einkommen werden zum Teil konsumiert. Die Konsumnachfrage nach im Inland produzierten Gütern schafft Produktion und Einkommen, von dem wiederum ein Teil konsumiert wird, usw. Der Bruttoproduktionseffekt ergibt sich in diesem Fall aus Multiplikation von erweiterter Leontief-Inversen und Spaltenvektor der zusätzlichen Exportnachfrage:

$$\Delta X = (I - Z)^{-1} \cdot \Delta EXP.$$

An die Stelle der Matrix A tritt hier die Matrix $Z = (A + c^d v')$, die außer der Koeffizientenmatrix A auch den Spaltenvektor der sektoralen Grenzneigungen nach Konsum aus inländischer Produktion c^d und den Zeilenvektor der sektoralen Wertschöpfungskoeffizienten[16] v' enthält. Aufgrund der Berücksichtigung der induzierten Konsumnachfrage ist der Produktionseffekt im erweiterten Modell größer als im einfachen.

Die Produktions- und Wertschöpfungskoeffizienten werden aus den IO-Tabellen direkt ermittelt. Das erweiterte Modell macht darüber hinaus die Bestimmung der sektoralen Grenzneigungen nach Konsum aus inländischer Produktion notwendig. Zu diesem Zweck wird zunächst auf Basis entsprechender Zeitreihen eine einfache lineare Regression zwischen gesamtem Konsum und gesamter Wertschöpfung durchgeführt. Die Grenzrate des Konsums im Inland produzierter Güter wird ermittelt, indem die Grenzrate des Gesamtkonsums mit dem sich für das Basisjahr ergebende Verhältnis von Konsum an im Inland produzierten Gütern zu Gesamtkonsum multipliziert wird. Die sektoralen Grenzraten des Konsums aus inländischer Produktion werden schließlich durch Multiplikation der Grenzrate des Konsums im Inland produzierter Güter mit den sektoralen Anteilen am gesamten Konsum im Inland produzierter Güter vorgenommen. Diese Vorgehensweise stellt sicher, daß die Konsumstruktur sektoral wie auch mit Blick auf inländische Produktion und Importe gleich der der Basisperiode bleibt[17].

Der Beschäftigungseffekt ΔB ergibt sich aus der Multiplikation der Hauptdiagonalmatrix der sektoralen Beschäftigungskoeffizienten $<b>$ und des Spaltenvektors der zusätzlichen sektoralen Bruttowertschöpfung (Nettoproduktion) ΔV. Letzterer entspricht der Hauptdiagonalmatrix der sektoralen Wertschöpfungskoeffizienten multipliziert mit dem Spaltenvektor der zusätzlichen Bruttoproduktion.

$$\Delta B = <b> \cdot \Delta V = <b> \cdot <v> \cdot \Delta X.$$

Die Matrix $<b>$ ist in der Hauptdiagonalen mit den sektoralen Beschäftigungskoeffizienten besetzt, die um die wachsende Produktivität ($b_j(t)$) berichtigt werden. Dazu werden die sektoralen Beschäftigungskoeffizienten für das Basisjahr ($b_j(0)$)[18] und die jährlichen Zuwachsraten der Produktivität (r_j) benötigt.

$$b_j(t) = b_j(0) \cdot (1 - r_j)^t \qquad j = 1, ..., n$$

Die sektoralen Zuwachsraten der Arbeitsproduktivität sind auf Basis einer Berechnung für den Zeitraum 1980 bis 1991 geschätzt. Für diesen Zeitraum ergibt sich für die europäische Union gesamtwirtschaftlich ein durchschnittlicher jährlicher Produktivitätsfortschritt von 1,5 Prozent. Am niedrigsten ist er im Produktionsbereich Maritime and Air Transport Services mit 0,2 Prozent, am höchsten im Bereich Office Machines mit 4,2 Prozent.

---

16 Die sektoralen Wertschöpfungkoeffizienten werden aus der Ausgangstabelle errechnet, indem die sektorale Bruttowertschöpfung durch die sektorale Bruttoproduktion dividiert wird.

17 Im Detail ist die hier angewandte Methode zur Berechnung der (sektoralen) Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter dargestellt in Kuckshinrichs et al 1998.

18 Die sektoralen Beschäftigungskoeffizienten für das Basisjahr werden errechnet, indem die sektorale Beschäftigung durch die sektorale Bruttowertschöpfung geteilt wird.

4. Produktions- und Beschäftigungseffekte

4.1 Vergleich unterschiedlicher regionaler Zuordnungen der zusätzlichen Nachfrage

Tabelle 4 faßt die Ergebnisse der Beschäftigungsanalyse für den Basisfall und den Hoch- bzw. Niedrigproduktivitätsfall zusammen. Die Beschäftigungseffekte sind auf der Basis unterschiedlicher regionaler Zuordnungen der zusätzlichen Nachfrage verschieden hoch. Der gesamte Beschäftigungseffekt für die Phase von 2001-2005 ist im einfachen Modell ohne Einkommensmultiplikator (bzw. im erweiterten Modell mit Einkommensmultiplikator) mit jährlich 28.300 (bzw. 45.100) am höchsten im Fall der niedrigen Arbeitsproduktivität (Vereinigtes Königreich), am zweithöchsten für den Basisfall (EU12) mit 23.600 (bzw. 40.200) und am niedrigsten mit 21.800 (bzw. 32.500) für den Fall hoher Arbeitsproduktivität (Westdeutschland). Im Zeitraum 2006-2010 liegt die Spanne zwischen 9.800 (bzw. 15.600) für den Fall der niedrigen Arbeitsproduktivität und 7.600 (bzw. 11.400) für den Fall hoher Arbeitsproduktivität.

Input-Output-Tabelle Jahr (Quelle)	**EU12 1991 (EUROSTAT 1995)**		**Westdeutschland 1990 (OECD 1995)**		**Vereinigtes Königreich 1990 (OECD 1995)**	
ΔEXP (Mio. ECU_{1992})	**2001-2005: 1.240 2006-2010: 485**					
	2001-2005	**2006-2010**	**2001-2005**	**2006-2010**	**2001-2005**	**2006-2010**
Bruttowertschöpfung ohne Einkommensmultiplikator (Mio. ECU_{1992})	1.097	429	1.066	417	938	369
Bruttowertschöpfung mit Einkommensmultiplikator (Mio. ECU_{1992})	2.053	803	1.647	645	1.562	613
Direkte Beschäftigung	11.960	4.195	11.696	4.087	15.578	5.387
Indirekte Beschäftigung	11.644	4.128	10.055	3.754	12.688	4.366
Einkommensinduzierte Beschäftigung	16.597	5.840	10.746	3.516	16.859	5.815
Gesamtbeschäftigung	40.201	14.163	32.497	11.357	45.125	15.569

Tabelle 4: Modellergebnisse im Überblick

Im einfachen Modell ohne Einkommensmultiplikator sind letztlich zwei Faktoren für die Höhe der zusätzlichen Beschäftigung verantwortlich: Der Anteil der importierten Vorleistungen am Primäraufwand und die Arbeitsproduktivität. Ein höherer Anteil importierter Vorleistungen führt zu einem geringeren Nachfrageimpuls auf die inländischen Vorleistungsproduzenten und damit zu einem geringeren Nettoproduktionseffekt und c. p. Beschäftigungseffekt[19]. Gleichzeitig führt c. p. eine höhere Arbeitsproduktivität zu einem geringeren Beschäftigungseffekt und umgekehrt.

Die Länder der EU sind untereinander stark verflochten, so daß jeweils ein relativ hoher innereuropäischer Außenhandelsanteil zu verzeichnen ist. Bei einer Aggregation auf eine Region EU12 ist der Warenaustausch zwischen Mitgliedsländern als Binnenhandel und nicht als Außenhandel zu betrachten. Der Anteil importierter Vorleistungen am Primäraufwand ist daher für die Region EU12 und damit für

19 Aus makroökonomischer Sicht entspricht der zusätzliche Primäraufwand der zusätzlichen Exportnachfrage. Gleichzeitig ist der Primäraufwand die Summe aus importierten Vorleistungen und Bruttowertschöpfung (Nettoproduktion). Ein geringerer Anteil importierter Vorleistungen am Primäraufwand bedeutet daher stets eine höhere Bruttowertschöpfung (Nettoproduktion).

den Basisfall geringer als bei disaggregierter regionaler Betrachtung. Tabelle 5 zeigt die Anteile importierter Vorleistungen für die betrachteten Regionen. Für das Vereinigte Königreich ist dieser Anteil beinah doppelt so hoch wie für die EU. Der Nettoproduktionseffekt ist für die EU entsprechend größer (Tab. 4). Allerdings wird der höhere Nettoproduktionseffekt mit Blick auf die Beschäftigungswirkung durch die höhere Arbeitsproduktivität überkompensiert, so daß weniger Beschäftigung induziert wird. Wie Tabelle 4 zeigt, weist die Arbeitsproduktivität im Vergleich der Regionen eine Bandbreite von 26.000 ECU/B für das Vereinigte Königreich bis 41.000 ECU/B für Westdeutschland auf. Für den Niedrigproduktivitätsfall ergibt sich trotz deutlich geringerem Nettoproduktionseffekt als im Basisfall der größte Beschäftigungseffekt. Für den Hochproduktivitätsfall errechnet sich der geringste Beschäftigungseffekt (siehe Tabelle 4).

Input-Output-Tabelle Jahr (Quelle)	**EU12 1991 (EUROSTAT 1995)**	**Westdeutschland 1990 (OECD 1995)**	**Vereinigtes Königreich 1990 (OECD 1995)**
Anteil importierter Vorleistungen am Primäraufwand 1990/91	0,087	0,125	0,155
Arbeitsproduktivität 1991 (ECU WS/B)	35.000	41.000	26.000
Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter	0,55	0,46	0,48

Tabelle 5: Gesamtwirtschaftliche Parameter im Überblick

Im erweiterten Modell mit Einkommensmultiplikator ist als weitere Größe die Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter von Bedeutung. Je größer dieser Parameter desto höher ist c. p. der Produktions- und Beschäftigungseffekt. Für den Basisfall (EU12) liegt die höchste Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter vor. Dies liegt einerseits in der vergleichsweise hohen Grenzrate des Gesamtkonsums begründet und andererseits in einem vergleichsweise geringen Anteil importierter Konsumgüter am Gesamtkonsum. Letzteres ist wiederum Folge der großen Bedeutung des innereuropäischen Handels. Der Einfluß der Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter zeigt sich am Verhältnis der einkommensinduzierten Beschäftigung zur Zunahme der Gesamtbeschäftigung. In 1991 ist diese Verhältniszahl mit 0,41 für die EU am höchsten, während Westdeutschland entsprechend der im Vergleich niedrigsten Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter auch hier mit einem Anteil von 0,33 den niedrigsten Wert aufweist. Auch unter Einbezug des Einkommensmultiplikators ist die Arbeitsproduktivität ausschlaggebend. Der Niedrigproduktivitätsfall weist trotz geringster zusätzlicher Nettoproduktion die größte Beschäftigungswirkung aus. Durch die in den Szenarien angenommene Zuordnung der Nachfrage zu verschiedenen Produktionsregionen und die damit verbundene Berücksichtigung unterschiedlicher Niveaus an Arbeitsproduktivität stecken die Ergebnisse eine plausible Bandbreite für die Beschäftigungswirkung eines europäischen Förderprogramms für Clean Coal Technologies ab.

4.2 Sektorale Effekte am Beispiel des Hochproduktivitätsfalls

Die sektoralen Wirkungen der zusätzlichen Exportnachfrage nach Clean Coal Technologies werden im folgenden am Beispiel des Hochproduktivitätsfalls dargestellt. Große Beschäftigungszuwächse ergeben sich demnach zunächst in den Sektoren, die direkt die gewünschten Kraftwerkstechnologien produzieren (Tab. 6). Dazu zählen die Sektoren 14 (Metal products), 17 (Electrical apparatus), 26 (Construction), 32 (Real estate & business services) sowie 31 (Finance and insurance). Über die Vorleistungslieferungen kommen fast alle anderen Sektoren hinzu, wobei insbesondere der Sektor 12 (Iron

and steel) herausragt. Durch die Berücksichtigung des Einkommensmultiplikator werden schließlich Sektoren betroffen, die insbesondere Konsumgüter herstellen. Dazu zählen im wesentlichen die Sektoren 32 (Real estate & business services), 27 (Wholesale and retail trade), 3 (Food, beverage and tobacco) sowie 21 (Motor vehicles).

			ohne Einkommensmultiplikator				zusätzlich durch Einkommensmultiplikator			
	Zusätzliche Nachfrage		Bruttoproduktion		Beschäftigung		Bruttoproduktion		Beschäftigung	
	2005	2010	2005	2010	2005	2010	2005	2010	2005	2010
Produktionssektoren	Mio ECU	Mio ECU	Mio ECU	Mio ECU			Mio ECU	Mio ECU		
1 Agriculture, forestry & fishing	0.0	0.0	5.0	2.0	43	15	10.1	4.0	101	35
2 Mining & quarrying	0.0	0.0	13.9	5.6	158	56	0.6	0.2	6	2
3 Food, beverages & tobacco	0.0	0.0	7.6	3.0	69	24	133.7	52.6	1347	470
4 Textiles, apparel & leather	0.0	0.0	3.0	1.2	29	10	25.5	10.0	257	90
5 Wood products & furniture	0.0	0.0	11.5	4.3	128	43	20.5	8.1	207	72
6 Paper, paper products & printing	0.0	0.0	17.5	6.9	162	56	4.0	1.6	41	14
7 Industrial chemicals	0.0	0.0	32.4	12.6	335	116	14.6	5.7	147	51
8 Drugs & medicines	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0
9 Petroleum & coal products	0.0	0.0	8.3	3.2	87	30	29.5	11.6	298	104
10 Rubber & plastic products	0.0	0.0	24.0	9.2	231	79	7.1	2.8	72	25
11 Non-metallic mineral products	0.0	0.0	32.9	11.9	368	121	4.3	1.7	44	15
12 Iron & steel	0.0	0.0	109.3	44.2	1310	468	0.0	0.0	0	0
13 Non-ferrous metals	0.0	0.0	27.5	11.0	302	107	0.0	0.0	0	0
14 Metal products	499.9	203.6	588.2	238.9	7233	2591	0.1	0.0	1	0
15 Non-electrical machinery	49.3	20.1	86.4	34.8	726	258	0.7	0.3	7	2
16 Office & computing machinery	0.0	0.0	2.4	0.9	21	7	0.2	0.1	2	1
17 Electrical apparatus, nec	274.1	106.7	325.3	126.6	2764	949	13.2	5.2	133	47
18 Radio, TV & communic. equipm.	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0
19 Shipbuilding & repairing	0.0	0.0	0.1	0.1	1	0	0.3	0.1	3	1
20 Other transport	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0
21 Motor vehicles	0.0	0.0	5.9	2.3	59	21	54.8	21.5	552	193
22 Aircraft	0.0	0.0	0.5	0.2	5	2	0.1	0.0	1	0
23 Professional goods	0.0	0.0	1.6	0.6	15	5	4.5	1.8	46	16
24 Other manufacturing	0.0	0.0	17.5	6.8	187	64	12.4	4.9	124	43
25 Electricity, gas & water	0.0	0.0	36.8	14.6	397	140	33.2	13.1	335	117
26 Construction	170.6	58.8	191.2	66.8	2167	698	3.6	1.4	36	13
27 Wholesale & retail trade	0.0	0.0	71.6	28.2	768	269	189.2	74.4	1905	665
28 Restaurants & hotels	0.0	0.0	14.0	5.6	136	48	42.6	16.8	429	150
29 Transport & storage	0.0	0.0	31.8	12.5	341	119	34.7	13.6	349	122
30 Communication	0.0	0.0	12.3	4.8	125	44	29.1	11.5	293	102
31 Finance & insurance	59.5	25.0	122.9	49.8	1008	356	46.2	18.2	465	162
32 Real estate & business services	135.8	53.5	329.1	129.4	2346	826	251.4	98.8	2532	884
33 Community, soc. & pers. services	0.0	0.0	11.4	4.5	102	36	43.2	17.0	435	152
34 Producers of government services	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	18.8	7.4	189	66
35 Other producers	50.3	17.2	50.7	17.4	3	1	38.9	15.3	392	137
36 Statistical discrepancy	0.0	0.0	13.3	5.2	125	44	0.0	0.0	0	0
Summe	1239.6	484.9	2206.1	865.2	21752	7603	1067.2	419.4	10746	3753

Tabelle 6: Gesamte sektorale Produktions- und Beschäftigungseffekte für den Hochproduktivitätsfall (Westdeutschland)

5. Zusammenfassung

Die Europäische Kommission prüft derzeit die Einrichtung eines „Integrated European Clean Coal Technology Programme". Das Programm zielt darauf ab, den globalen kommerziellen Einsatz von europäischen Clean Coal Technologies für die Stromerzeugung zu stimulieren. Ein wesentliches Kriterium für die Bereitstellung von Finanzmitteln durch die Kommission ist der Nachweis eines programminduzierten positiven Beschäftigungseffekts für die EU-Mitgliedsländer.

Zahlreiche Analysen weisen auf einen weltweiten Anstieg der Elektrizitätsnachfrage und entsprechend nach Kraftwerkskapazitäten hin. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung wird bei Einführung eines europäischen integrierten Clean Coal Technology-Programms eine nennenswerte zusätzliche Exportnachfrage nach europäischen Technologien zur Verstromung von Kohle erwartet.

Die daraus resultierenden Beschäftigungseffekte werden mittels eines um den Keynes'schen Einkommensmultiplikatoren erweiterten Input-Output-Modells abgeleitet. Dabei findet die Entwicklung der Arbeitsproduktivität Berücksichtigung.

Für die Höhe der zusätzlichen Beschäftigung sind neben dem eigentlichen Nachfrageimpuls drei gesamtwirtschaftliche Parameter entscheidend: der Anteil der importierten Vorleistungen am Primäraufwand, die Arbeitsproduktivität und die Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter.

In Unkenntnis der tatsächlich zu erwartenden regionalen Zuordnung des programminduzierten Nachfragezuwachses innerhalb der Europäischen Union erfolgen die Berechnungen anhand der Wirtschaftsstrukturen der gesamten EU (zwölf Mitgliedsländer), des Vereinigten Königreiches und Westdeutschlands. Die beiden Länder sind die wichtigsten europäischen Produzenten von Kohlekraftwerkstechnik. Sie bilden neben dem Basisfall einen Fall niedriger bzw. hoher Arbeitsproduktivität ab.

Ein signifikanter Beschäftigungseffekt ergibt sich in allen drei Fällen, allerdings variiert die absolute Höhe vor dem Hintergrund unterschiedlicher Ausprägungen der gesamtwirtschaftlichen Parameter: Für den Fall niedriger Produktivität (Vereinigtes Königreich) errechnen sich die höchsten Beschäftigungseffekte. Der hohe Anteil importierter Vorleistungen am Primäraufwand wird überkompensiert durch die niedrigere Arbeitsproduktivität. Der Fall hoher Produktivität (Westdeutschland) verzeichnet erwartungsgemäß die geringsten Beschäftigungseffekte. Ausschlaggebend ist das Zusammentreffen von hoher Arbeitsproduktivität und geringer Grenzrate des Konsums inländisch produzierter Güter. Die Ergebnisse des Basisfalls (EU12) liegen dazwischen: Im Vergleich zu Deutschland weisen in diesem Fall alle drei genannten gesamtwirtschaftlichen Parameter auf einen höheren Beschäftigungseffekt hin; im Vergleich zum Vereinigten Königreich ist die deutlich höhere Arbeitsproduktivität trotz des geringeren Anteils importierter Vorleistungen am Primäraufwand ausschlaggebend für den geringeren Beschäftigungseffekt.

Literaturverzeichnis

Böhm, H. (1997): Struktur und Technik der künftigen Stromversorgung, in: Siemens Power Journal 2/97, S. 14-18.

Commission of the European Communities (1994): Study on Activities generated by the Implementation of the Puertollano Project, 1994.

Cura, H. (1998): Die Entwicklung der Stromerzeugung durch Energieversorgungsunternehmen und Industrie in Westeuropa, in: VGB Kraftwerkstechnik 1/98,S. 33-40.

ECN (1998): Clean Coal Technology Sales Prospects – Assessing the Impacts of a EU CCT Support Programme, Petten (NL) 1998.

ETSU (1996): Clean Coal Technology – Markets and Opportunities to 2010, Paris: OECD/IEA 1996.

ETSU (1997): Carnot Discussion Document: Barriers and Markets for EU Clean Coal Technologies, Harwell (UK) 1997.

EUROSTAT (1995): Input-Output-Tabelle für die Europäische Gemeinschaft (EUR12) 1991, Luxembourg 1995.

EUROSTAT (1996a): Europäisches System Volkswirtschaftlicher Gesamtrechnungen, ESVG 1995, Luxemburg 1996.

EUROSTAT (1996b): Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft, NACE Rev. 1, Luxemburg 1996.

EUROSTAT (1996c): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen ESVG, Aggregate, 1970-1995, Luxembourg 1996.

EUROSTAT (1996d): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen ESVG, Detaillierte Tabellen nach Produktionsbereichen, 1970-1994, Luxembourg 1996.

EUROSTAT (1996e): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen ESVG, Detaillierte Tabellen nach Sektoren, 1983-1994, Luxembourg 1996.

Helmstädter, E. / *Meyer*, B. / *Kleine*, E. / *Richtering*, J. (1983): Die Input-Output-Analyse als Instrument der Strukturforschung, Tübingen 1983.

Holub, H.-W./ *Schnabl*, H. (1994): Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse, München/Wien 1994.

IEA (1996): World Energy Outlook, 1996.

Kuckshinrichs, W. / *Schwarz*, H.-G. / *Müller-Kirchenbauer*, J. (1998): A European Action Plan for the Implementation of a Clean Coal Technology Programme, Task 6: Socioeconomic Benefits, Interner Bericht FZJ – STE – IB 10/98.

Leontief, W. (1986): Input-Output-Economics, New York/Oxford 1986.

Niehörster, K. (1998): Tendenzen bei fossilen Kraftwerken, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 3/98, S. 164-166.

OECD (1995): The OECD Input-Output Database, Paris 1995.

OECD (1996): Labour force statistics, Paris 1996.

OECD (1997): The OECD Stan Database for Industrial Analysis, 1976-1995, Paris 1997.

Pfaffenberger, W. (1995): Arbeitsplatzeffekte von Energiesystemen. Gutachten im Auftrag der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke –VDEW– e.V. Frankfurt: VWEW.

Pfaffenberger, W. (1997): Beschäftigungseffekte des Ausbaus erneuerbarer Energie, in: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96, Heft 24, S. 1400-1404.

Riedle, K., / *Taud*, R. (1997): Fossilbefeuerte Kraftwerke bleiben tragende Säule der Energieerzeugung, in: Siemens Power Journal 2/97, S. 19-25.

Schumann, J. (1968): Input-Output-Analyse, Berlin/Heidelberg/New York 1968.

Schumann, J. (1975): Möglichkeiten und Bedeutung einer teilweise endogenen Erklärung des privaten Konsums und der privaten Investitionen im statisch offenen Input-Output-Modell, in: Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik, Vol. 189 (1975), S.378-410.

Storchmann, K.-H. (1997): Beschäftigungseffekte des Steinkohlebergbaus – Eine kritische Betrachtung, in: ZfE 4/97, S.307-316.

United Nations (1990): International Standard Industrial Classification of All Economic Activities, Third Revision, New York 1990.

United Nations (1991): Provisional Central Product Classification, New York 1991.

United Nations (1993): System of National Accounts, Brussels/Luxembourg et al. 1993.

Wessels, H. (1976): Auswirkungen des Baus eines Kernkraftwerks auf Produktion und Beschäftigung, in: DIW-Wochenblatt, Nr. 26-27/76, S. 256-259.

Wessels, H. (1976): Auswirkungen des Baus und des Betriebs eines Steinkohlekraftwerks auf Produktion und Erwerbstätigenzahl, in: DIW-Wochenblatt, Nr. 48/76, S. 443-448.

WEC (1995a): Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond, London 1995.

WEC (1995b): Financing Energy Development: The Challenges and Requirements of Developing Countries, London 1995.

Aktionsprogramm zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen an der Stromversorgung in Deutschland

Helmuth-M. Groscurth, Wolfgang Bräuer

Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim

Zusammenfassung:

Es wird ein Aktionsprogramm skizziert, mit dessen Hilfe der Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Deckung des Stromverbrauchs in Deutschland innerhalb von 10 Jahren auf 10 Prozent erhöht werden soll. Die erforderlichen Stromlieferungen sollen öffentlich ausgeschrieben und an den günstigsten Anbieter vergeben werden. Die Differenz zwischen den Stromgestehungskosten aus konventionellen und erneuerbaren Quellen soll durch Abgaben, allgemeine Haushaltsmittel und / oder freiwillige Beiträge ausgeglichen werden.

Vorbemerkung: Dieser Vorschlag konzentriert sich auf die Stromversorgung, weil dort im Rahmen der Deregulierung erhebliche Umwälzung bevorstehen, bei denen Umweltschutzgesichtspunkte unbedingt berücksichtigt werden sollten. Es handelt sich um einen überschaubaren, gut abgrenzbaren Bereich mit einer begrenzten Anzahl von Akteuren. Er erscheint uns daher gut geeignet, eine Vorreiterrolle zu übernehmen, zumal es hier bereits eine Reihe aufgeschlossener Akteure gibt. Um die unten beschriebenen Klimaschutzziele zu erreichen, müssen ähnliche Anstrengungen jedoch auch bei der Wärmebereitstellung und im Verkehr unternommen werden. Außerdem müssen neben der Energieversorgung auch die rationelle Energienutzung und die Energieeinsparung berücksichtigt werden.

1 Handlungsbedarf

Die Gefährdung des Klimas durch den unkontrollierten Ausstoß von Treibhausgasen, insbesondere Kohlendioxid (CO_2), und mögliche Gegenmaßnahmen sind in zahlreichen Stellungnahmen wissenschaftlicher und politischer Organisationen dargestellt worden. An dieser Stelle seien beispielhaft genannt die Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages (1990 und 1995), das Europaparlament (1996), die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG, 1995) und das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1991 und 1996). Seitens der Wissenschaft wird eine Reduzierung der CO_2-Emissionen in den Industrieländern um 80% bis zum Jahr 2050 für erforderlich gehalten. Die Bundesregierung hat darauf reagiert und eine Reduzierung um 25% bis 2005 zum Ziel erklärt. Da dieses Ziel nicht allein durch die ohnehin stattfindende Erhöhung der Energieproduktivität erreicht werden wird, ist baldiges entschlossenes Handeln zur Veränderung des Energieträgereinsatzes dringend geboten. Um das langfristige Reduktionsziel erreichen zu können, müssen bereits heute Optionen geschaffen werden, die es erlauben, über das Zwischenziel für das Jahr 2005 hinauszugehen.

Eine solche Vorsorgemaßnahme würde gleichzeitig wichtige Beiträge zur Schonung knapper Ressourcen und zur Sicherung des lebensnotwendigen Wissensvorsprunges der exportorientierten deutschen Wirtschaft leisten.

2 Zielsetzung

Mit dem hier skizzierten Aktionsprogramm sollen

- Impulse für die Entwicklung hin zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft gegeben werden
- sowie nachhaltige, ausbaufähige und in Zukunft möglichst selbsttragende Optionen für die Stromerzeugung eröffnet werden, die mit den Regeln einer deregulierten Energiewirtschaft vereinbar sind.

Schwerpunkte sind dabei die Reduzierung der CO_2-Emissionen und die Förderung von Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen, die für eine langfristige Lösung des Umweltproblems benötigt werden.

Deshalb zielt das Aktionsprogramm darauf, den Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Stromversorgung in Deutschland innerhalb von 10 Jahren auf 10% zu erhöhen.

Diese Zielsetzung bezieht sich auf die Summe aller in Frage kommenden erneuerbaren Energiequellen, d.h. Windenergie, Biomassenutzung, Wasserkraft, Photovoltaik und solarthermische Stromerzeugung.

In einem wissenschaftlichen Begleitprogramm

- sollen verläßliche Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der geförderten Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien gewonnen werden,
- soll untersucht werden, welche Auswirkungen die Umstellung auf eine nachhaltige Energiewirtschaft auf den Arbeitsmarkt und andere gesamtwirtschaftliche Parameter hat,
- und es soll nachgewiesen werden, wie hoch die gesichert zur Verfügung stehende Kapazität aus erneuerbaren Energiequellen ist und wieviel Reserveleistung aus anderen Quellen bei einem weiteren Ausbau vorgehalten werden muß.

	Installierte Leistung [GW]	Stromerzeugung [GWh]	Anteil
Wasserkraft	8,2 [1]	18.000	4,3 %
Windenergie	0,8 [2]	900 [2]	0,2 %
Biomasse	0,3	500	0,1 %
Photovoltaik	0,012	5	0,001 %
Solar-thermische Stromerzeugung	0	0	0 %
Kernkraft	22,5	142.000	33,6 %
Fossile Energie	68,4	260.000	61,7 %
Summe		≈ 421.000	

[1] Einschließlich Pumpspeicherwerke. [2] Werte für 1995: 1,3 GW – 2500 GWh (DEWI, 1996).

Tabelle 1: Anteile der Energiequellen an der Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahre 1994 [Schiffer, 1995].

3 Gegenwärtige Situation in der Stromwirtschaft

Mit Ausnahme der Wasserkraft tragen die Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien heute weniger als 1% zur Deckung der Stromnachfrage bei (Tabelle 1). Derzeit nimmt bei den Planungen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) die Vorbereitung auf die nationale und EU-weite Deregulierung der Energiemärkte den meisten Raum ein. Strom aus erneuerbaren Energiequellen wird im Rahmen von Pilotprojekten erforscht und interessierten Kunden auch kommerziell angeboten. Konkrete Planungen, seine Nutzung in dem hier diskutierten Maße auszubauen, gibt es nicht. Begründet wird dies mit den hohen Kosten der einschlägigen Techniken. Gleichzeitig wird betont, daß die EVUs grundsätzlich bereit sind, Strom aus allen denkbaren Energiequellen anzubieten, wenn dies für sie betriebswirtschaftlich rentabel ist und eine ausreichende Nachfrage besteht.

Fragen des Umweltschutzes stehen bei den EVUs als Wirtschaftsunternehmen nicht im Vordergrund. Der aus betriebswirtschaftlichen Gründen erforderliche technische Fortschritt wird jedoch auch in Zukunft zu einer Entlastung der Umwelt beitragen. Dies wird aber nicht ausreichen, um die CO_2-Emissionen im erforderlichen Umfang zu reduzieren.

4 Technische Optionen und ihre Kosten

Zahlreiche Studien haben gezeigt, daß erneuerbare Energiequellen einen erheblichen Beitrag zur Energieversorgung leisten können, auch wenn die Zahlen im einzelnen weit auseinander gehen (vgl. dazu z.B. Kaltschmitt und Wiese, 1995; Reetz und Lehmann 1996; Matthies et al., 1995; G. Altner et al., 1995). Trotz der großen Potentiale stellen die im Rahmen des Aktionsprogramms angestrebten Zubauraten wegen der geringen Anfangsniveaus eine Herausforderung dar.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist Strom aus erneuerbaren Energiequellen – trotz deutlicher Fortschritte bei der Reduzierung der Gestehungskosten – heute im Mittel noch teurer als derjenige aus fossilen und nuklearen Energieträgern. Die jüngsten Erfolge der Windenergie zeigen jedoch, daß es auch in Deutschland bereits Bereiche gibt, in denen sich neue Energietechniken durchsetzen können, wenn geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden.

		Programmstart [Pf/kWh]	Programmende [Pf/kWh]
Wasserkraft	in Deutschland	20	*20*
	Import	6	*6*
Windenergie	on-shore	17	*13*
	off-shore	22	*18*
Biomasse		20	*15*
Photovoltaik	in Deutschland	150	*80*
	in Südeuropa	80	*45*
Solar-thermische Stromerzeugung *		20	*15*
Zum Vergleich: Konventionelle Stromerzeugung aus neuen Kraftwerken		≥ 11	≥ 20

* in Hybridkraftwerken (solarer Anteil: 50%) in Südeuropa.

Basis: Mohr 1996; Stromthemen 9/1996; Kaltschmitt und Wiese, 1995; Schiffer, 1995; Altner et al., 1995.

Tabelle 2: Maximal zulässige Gestehungskosten für Strom aus erneuerbaren Energiequellen im Aktionsprogramm.

Da die Kostenschätzungen ebenfalls stark divergieren, werden in Tabelle 2 lediglich Obergrenzen angegeben, bis zu denen die jeweiligen Techniken im hier diskutierten Aktionsprogramm berücksichtigt werden. Die reduzierten Werte für das Programmende sind dabei als Abschätzungen zu verstehen, die im Programmablauf nach den jeweiligen Erfordernissen angepaßt werden sollten.

5 Ordnungspolitische Handlungsmöglichkeiten

Umweltschutz gehört, genau wie die soziale Sicherung oder die äußere Sicherheit, zu den Vorsorgeaufgaben des Staates. Diese Aufgaben werden von Märkten allein nicht wahrgenommen, weil die Bildung von Preisen für die entsprechenden Güter wegen fehlender Eigentumsrechte nicht möglich ist. In einer demokratischen Gesellschaft haben daher die gewählten Vertreter des Volkes das Recht und die Pflicht, Regeln zu definieren, die die Wahrnehmung der genannten Aufgaben sicherstellen. Sie haben dies bisher getan, indem sie beispielsweise Steuern erhoben haben, um eine Armee zu finanzieren, oder indem sie Gesetze zur Einführung von Kranken- und Rentenversicherungen erlassen haben. Diese Eingriffe in das „freie" Funktionieren des Marktes sind heute selbstverständlich und ihre Berechtigung wird – abgesehen von Auseinandersetzungen um ihren Umfang – allgemein akzeptiert. In diesem Sinne sind auch Regeln zur Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit dem Funktionieren der Märkte übergeordnet und bedürfen keiner grundsätzlichen Legitimation. Strittig können allenfalls konkrete Zielsetzung, Umfang und Art von derartigen Maßnahmen sein.

Im Rahmen der *Ordnungspolitik* stehen dem Gesetzgeber verschiedene Kategorien von Maßnahmen zur Verfügung. Im wesentlichen ist dabei zu unterscheiden zwischen den Ver- und Geboten des *Ordnungsrechts* und *marktwirtschaftlichen Instrumenten*. Der Einsatz des Ordnungsrechts zur direkten Verhaltenssteuerung hat vor allem dann seine Berechtigung, wenn es um die Abwehr schwerwiegender akuter Gefahren geht, wie dies etwa bei der Bedrohung der Ozonschicht durch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) der Fall war. Wenn jedoch die Ziele in Form von Bandbreiten formuliert sind und sich ihre Umsetzung über einen längeren Zeitraum verteilt, können marktwirtschaftliche Anreize von Vorteil sein, die das Verhalten der Akteure indirekt beeinflussen. Diese Anreize können negativer Art sein, etwa durch die Verteuerung von umweltschädigendem Verhalten, oder positiver Art durch finanzielle Belohnung von umweltfreundlichem Verhalten.

Die Umweltpolitik hat sich bisher vor allem darauf gestützt, Ver- und Gebote zu erlassen, etwa im Rahmen der Großfeuerungsanlagenverordnung oder der Wärmeschutzverordnung. Zusätzlich wurden einzelne Umweltschutztechniken subventioniert. Dabei besteht jedoch die Gefahr ineffizient zu handeln, wenn lediglich die Investition, nicht aber das Funktionieren der erstellten Anlage, die Grundlage dafür bildet, finanzielle Unterstützung zu erhalten. Die entsprechende Umstellung der Förderung im Rahmen des 250 MW Windenergieprogramms war ein Grundpfeiler für den gegenwärtigen Erfolg dieser Technologie. Außerdem kann die direkte Unterstützung einer bestimmten Technik die Entwicklung alternativer und vielleicht besserer Ansätze behindern.

Die Kosten einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen können im Rahmen des Vorsorgeprinzips als eine Art Versicherungsbeitrag gegen schädliche Umweltwirkungen aufgefaßt werden. Aufzubringen sind sie entweder von allen Schutzsuchenden oder – im Sinne einer Haftpflichtversicherung – von den Verursachern, also den Nutzern konventioneller Energiequellen.

Bestimmte Nutzungsraten vorzuschreiben und entsprechende Strompreiserhöhungen zuzulassen würde diesem Prinzip entsprechen. Ein solches Vorgehen hat aber den Nachteil, daß kein Wettbewerb um die

kostengünstigste Lösung stattfindet und daß sich Verzerrungen im internationalen Wettbewerb ergeben. Weiter ist es möglich, den jeweiligen Produzenten Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu Preisen abzunehmen, die die Erzeugung betriebswirtschaftlich interessant machen. Diesen Weg geht das Stromeinspeisungsgesetz. Es bewirkt jedoch in seiner jetzigen Konstruktion sehr unterschiedliche Belastungen der EVUs in den einzelnen Regionen Deutschlands, die nicht gerechtfertigt sind. Weiter kann es zu Wettbewerbsverzerrungen gegenüber ausländischen Anbietern führen.

Vor diesem Hintergrund verbindet der im folgenden beschriebene Umsetzungsvorschlag für das Aktionsprogramm ordnungsrechntliche und wettbewerbliche Elemente. Er lehnt sich an die britische „Non-Fossil Fuel Obligation (NFFO)" an. Diese sieht vor, daß die gewünschten Mengen an Strom aus erneuerbaren Quellen öffentlich ausgeschrieben und an die günstigsten Anbieter zu garantierten Abnahmepreisen vergeben werden. Diese sind so bemessen, daß der Anbieter einen Gewinn macht, wenn er sein Angebot einhalten kann. Er kann diesen vergrößern, wenn er bessere Leistungen erbringt. Zu große Gewinnmargen werden durch den Wettbewerb verhindert. Dieses Vorgehen hat zudem den Vorteil, daß der Zubau in kontrollierten Bahnen abläuft und Planungssicherheit für Anbieter und EVUs geschaffen wird.

6 Aktionsprogramm „Strom aus erneuerbaren Energiequellen"

6.1 Ziele

1. Der Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Deckung des Stromverbrauchs in Deutschland soll innerhalb von 10 Jahren auf 10 Prozent erhöht werden. Als Basis wird der Stromverbrauch am Ende der Laufzeit herangezogen. Wenn der Stromverbrauch insgesamt steigt, muß somit auch mehr Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt werden. Dadurch gibt das Programm indirekt auch einen Anreiz zur Einsparung von Strom.
2. Zugelassen sind folgende Energiequellen: Wasserkraft, Windenergie, Biomasse (einschließlich rein organischer Abfälle, jedoch ohne unsortierten Hausmüll), Photovoltaik, solar-thermische Stromerzeugung. Der Import von Strom, der aus diesen Quellen gewonnen wird, sowie „Joint Implementation" Projekte sind in begrenztem Umfang gestattet (s.u.).
3. Die Auswahl der jeweiligen Techniken soll soweit wie möglich dem Markt überlassen werden. Jedoch werden obere und untere Grenzen für die einzelnen Techniken festgelegt, um dem Ziel, mehrere Optionen zu schaffen, gerecht zu werden (vgl. Tabelle 3).

6.1.1 Anmerkungen

Die Einführung von *Bandbreiten* soll sicherstellen, daß keine der geförderten Techniken den Löwenanteil der Förderung an sich bindet und daß keine Technik leer ausgeht. Da die Bandbreiten relativ weit gefaßt sind, sollte es möglich sein, einen Konsens unter den Befürwortern der einzelnen Techniken herzustellen.

		Geforderter Mindestbeitrag	Zulässige Obergrenze
Wasserkraft	in Deutschland	0,6 %	2,5 %
	Import	0 %	
Windenergie		1,2 %	2,5 %
Biomasse *		1,2 %	2,5 %
Photovoltaik	in Deutschland	0,03 %	2,5 %
	Südeuropa	0,03 %	
Solar-thermische Stromerzeugung *		0,6 %	2,5 %

* Bei Hybridanlagen wird nur der Stromanteil aus erneuerbaren Quellen angerechnet.

Tabelle 3: Bandbreiten für den zusätzlichen Beitrag erneuerbarer Energiequellen an der Deckung des Stromverbrauchs in Deutschland im Rahmen des Aktionsprogramms

Für die *Windenergie* ergibt sich bei konstanter Stromnachfrage ein Beitrag von 3% in 10 Jahren, wenn pro Jahr Anlagen mit einer Gesamtleistung von 500 MW installiert werden, wie dies bereits 1995 geschah. Allerdings dürften die Küsten- und Binnenlandstandorte für einen derartigen Ausbau nicht ausreichen. Deshalb muß auch auf sogenannte „Off-shore" Anlagen zurückgegriffen werden. Dafür fehlen allerdings noch einige Rahmenbedingungen wie effiziente Genehmigungsrichtlinien und geeignete Netzanbindungsstrategien.

Große *Wasserkraftanlagen* lassen sich in Deutschland wegen ökologischer Bedenken nicht mehr in nennenswertem Umfang installieren. Denkbar ist jedoch der Zubau kleiner Anlagen mit einer Leistung unter 10 MW, die Steigerung des Nutzungsgrades alter Anlagen sowie der Stromimport beispielsweise aus Skandinavien.

Solar-thermische Kraftwerke können sinnvollerweise nur in Südeuropa oder Nordafrika installiert werden. Der dort erzeugte Strom kann über bestehende Leitungen nach Deutschland transportiert werden. Aus technischen und politischen Überlegungen heraus könnte die Einbindung dieser Anlagen in das Aktionsprogramm jedoch auch im Rahmen von sog. „Joint Implementation" Projekten erfolgen. Dabei werden die mit Hilfe deutscher Investitionen im Ausland erzeugten Strommengen aus erneuerbaren Energiequellen analog zur inländischen Produktion gefördert. Stand der Technik sind Hybridanlagen, bei denen fossile Feuerung und solare Komponenten zusammenwirken um die Verfügbarkeit des Kraftwerks zu erhöhen und somit die Kosten zu senken. Derartige Anlagen werden zugelassen, jedoch ist ein solarer Mindestanteil vorzuschreiben, der während der Programmlaufzeit angepaßt werden kann. Darüber hinaus ist darauf zu achten, daß tatsächlich Emissionsminderungen gegenüber einem definierten fossil betriebenen Referenzkraftwerk erzielt werden.

Photovoltaische Anlagen können sowohl dezentral in Deutschland als auch zentral in Südeuropa installiert werden. Wegen der hohen Kosten dürfte aber von dieser Option unter den unten beschriebenen Bedingungen des Aktionsprogramms über den Mindestbeitrag hinaus wenig Gebrauch gemacht werden. Zu überlegen ist auch die Einbeziehung von Inselnetzen in Entwicklungsländern im Rahmen von Joint-Implementation Projekten.

Stromerzeugung aus *Biomasse* wird meist im Rahmen von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen stattfinden. Die Zufeuerung von Biomasse in konventionellen Kraftwerken ist zugelassen und wird

anteilig zugerechnet. Dies ist sinnvoll, weil hier wertvolle Erfahrungen für die anspruchsvolle Prozeßführung von Biomasseanlagen gewonnen werden können. Der Anteil der Anlagen mit Zufeuerung wird auf 50% der gesamten Kapazität an Biomasseanlagen beschränkt.

Qualität, Wirtschaftlichkeit und kumulierte Kapazitätseffekte der im Rahmen des Aktionsprogramms installierten Techniken sowie die Auswirkungen des Aktionsprogramms auf den Arbeitsmarkt sollen durch ein wissenschaftliches Begleitprogramm untersucht werden.

6.2 Umsetzung

1. Die Lieferung der erforderlichen Strommengen aus erneuerbaren Energiequellen wird anhand eines noch zu erstellenden Zeitplans jährlich ausgeschrieben. Dieser ist so zu gestalten, daß die Erfahrungen der vorhergehenden Runden genutzt werden können. Ausschreibung und Auswahl werden von einer oder mehreren unabhängigen Institutionen durchgeführt. Dies könnten beispielsweise die Betreiber der Stromnetze, staatliche Stellen wie die Wirtschaftsministerien der Länder oder Energieagenturen sein.

2. Die Ausschreibung ist offen für alle Anbieter. *Die Netzbetreiber werden verpflichtet, den erzeugten Strom zu jeder Zeit abzunehmen.* Diese Vorrangregelung ist in der Europäischen Richtlinie vorgesehen, bislang aber nicht in den Entwurf des deutschen Energiewirtschaftsgesetzes übernommen worden. Abweichungen können allerdings im gegenseitigen Einvernehmen vertraglich vereinbart werden. Eine Regelung für die Kosten der Netzanbindung ist unbedingt erforderlich, wie das Beispiel der Windenergie in Dänemark zeigt.

3. Den Zuschlag erhalten die Anbieter mit den günstigsten Angeboten unter Berücksichtigung der in Tabelle 3 definierten Bandbreiten. Die Anbieter erhalten einen Liefervertrag über 10 bis 15 Jahre mit garantierten Abnahmepreisen vorbehaltlich der Genehmigung der Anlage durch die zuständigen Behörden. Als Begleitmaßnahme sollten diese Genehmigungsverfahren vereinfacht werden. Die Inbetriebnahme der Anlage muß innerhalb einer Frist von 18 Monaten nach Vertragsabschluß erfolgen. Nach Ablauf der Garantiefrist kann die Anlage zu Marktbedingungen weiterbetrieben werden.

4. Die Differenz zwischen den mittleren Stromgestehungskosten des konventionellen Kraftwerksparks und den Abnahmepreisen dieser Lieferverträge ist durch ein geeignetes Verfahren auszugleichen (s.u.). Das Verfahren zur Ermittlung der vermiedenen konventionellen Stromgestehungskosten ist noch festzulegen. Denkbare wäre, auf der Grundlage der Verbändevereinbarung zu beginnen, für jede Technologie die mittleren Kapazitätseffekte jeder Ausschreibungsrunde zu ermitteln und in späteren Runden entsprechend zu berücksichtigen. Zusätzlich sollte die Einführung zeitvariabler Abnahmepreise überdacht werden. Um die Programmkosten zu begrenzen, werden für jede Technik maximale Gestehungskosten je Kilowattstunde festgelegt. Die in Tabelle 2 genannten Werte wurden in Gesprächen, die die Autoren mit Experten für die einzelnen Techniken geführt haben, gewonnen.

5. *Die Versorgungsgebiete der Netzbetreiber bilden die regionale Abgrenzung für die Ausschreibung.* Für jedes Gebiet gelten zunächst die bundesweiten Vorgaben. Diese können jedoch durch Absprachen der Netzbetreiber oder einen Handel mit geeigneten Zertifikaten verändert werden, solange die bundesweiten Vorgaben eingehalten werden.

6.3 Kosten

Da sich das Wirken der Marktkräfte nicht vorhersagen läßt, kann für die Kosten des Aktionsprogramms nur eine Obergrenze angegeben werden. Bei einem Erfolg des Programms sollte diese jedoch weit unterschritten werden.

Tabelle 4 zeigt eine *Beispielrechnung* auf der Basis der höchstens zugelassenen Stromgestehungskosten (Tabelle 2) und der in Tabelle 3 definierten Bandbreiten. Diese Rechnung stellt keine Vorhersage des Programmverlaufs dar, sondern versucht anhand plausibler Annahmen die Größenordnung der Programmkosten zu ermitteln.

Die Anteile der Techniken am Aktionsprogramm wurden so gewählt, daß Windenergie und Biomasse als die billigsten Techniken die größten Anteile erhalten. Es folgen Wasserkraft und solar-thermische Stromerzeugung. Die Photovoltaik schöpft lediglich ihre Mindestmenge aus. Weiter wurde angenommen, daß die Kostenobergrenzen im Programmverlauf tatsächlich auf die in Tabelle 2 genannten Werte sinken. Da die Zahl der vergebenen Verträge eher exponentiell als linear anwachsen wird, wurde ein Mittelwert der maximalen Kosten gebildet, der den Startwert mit 25% und den Endwert mit 75% gewichtet.

Über den Programmverlauf und alle Techniken gemittelt ergibt sich für die Kostenobergrenze ein Wert von 16 Pf/kWh. Im Endausbau ergeben sich bei einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen von 27 TWh/a Gestehungskosten von 4,3 Mrd. DM pro Jahr. Davon sind die bei der konventionellen Stromerzeugung vermiedenen Kosten abzuziehen. Kosten in dieser Höhe fallen aber erst im zehnten Jahr an. In den Jahren davor erhöhen sie sich kontinuierlich, im einfachsten Fall um ein Zehntel der Endsumme pro Jahr.

Tabelle 4: Beispielrechnung zum Aktionsprogramm

Angenommener Stromverbrauch in Deutschland: 450 TWh/a

Zusätzlich aus erneuerbaren Energiequellen gewonnener Strom (Zielwert): 6% = 27 TWh/a

Energiequelle		Anteil am Aktions-programm *	Anteil an der Strom-erzeugung	Erzeugte elektrische Energie TWh/a	Vollast-stunden h/a	Benötigte installierte Leistung GW	Stromgestehungskosten START Pf/kWh	START+10 Pf/kWh	Mittel** Pf/kWh	Kosten*** START+10 Mio. DM/a	Anteile
Wasserkraft	in Deutschland	10%	*0,60%*	*2,7*	*4000*	*0,68*	*20*	*20*	*20*	*540*	*13%*
	Import	10%	*0,60%*	*2,7*	*5000*	*0,54*	*6*	*6*	*6*	*162*	*4%*
Windenergie	on-shore	20%	*1,20%*	*5,4*	*2500*	*2,16*	*16*	*13*	*14*	*743*	*17%*
	off-shore	10%	*0,60%*	*2,7*	*3200*	*0,84*	*22*	*18*	*19*	*513*	*12%*
Biomasse		29%	*1,74%*	*7,83*	*5000*	*1,57*	*20*	*15*	*16*	*1272*	*30%*
Photovoltaik	in Deutschland	0,50%	*0,03%*	*0,14*	*900*	*0,15*	*150*	*80*	*98*	*132*	*3%*
	Süd-EU	0,50%	*0,03%*	*0,14*	*1500*	*0,09*	*90*	*45*	*54*	*73*	*2%*
Solar-thermische Stromerzeugung	Süd-EU, hybrid	20%	*1,20%*	*5,4*	*2500*	*2,16*	*20*	*15*	*16*	*878*	*20%*
SUMME		*100%*	*6,00%*	*27*		*8,18*				*4312*	*100%*

* : plausible gewählte Anteile, keine Vorhersagen!

** : gewichteter Mittelwert: 25% START, 75% START+10

*** : Kosten nach 10 Jahren, auf der Basis der gemittelten spezifischen Kosten

Finanzierung bei vollem Ausbau nach 10 Jahren

Maximale mittlere spezifische Kosten für Strom aus erneuerbaren Energiequellen	Pf/kWh	*16*			
Vermiedene spezifische Kosten für Strom aus konventionellen Quellen	Pf/kWh		10	8	6	4
Verbleibender maximaler gesamter Finanzierungsbedarf	Mio. DM/a		*1600*	*2150*	*2700*	*3200*
Verbleibender maximaler spezifischer Finanzierungsbedarf	Pf/kWh		*6*	*8*	*10*	*12*
Maximal benötigter Aufschlag auf den gesamten Stromverbrauch	Pf/kWh		*0,36*	*0,48*	*0,6*	*0,72*
Anteil der Letztverbraucher		35%				
Maximal benötigter Aufschlag auf den Stromverbrauch der Letztverbraucher	Pf/kWh		*1*	*1,4*	*1,7*	*2,1*

Schräg gestellte Zahlenwerte sind berechnet, solche im Normaldruck exogen vorgegeben.

6.4 Finanzierung

Zu fördern ist die Differenz zwischen den Gestehungskosten von Strom aus erneuerbaren Energiequellen und konventionell erzeugtem Strom. Ihre Höhe richtet sich nach den vermieden Kosten bei den EVUs. Die maximal erforderliche Förderung beträgt

- 3,2 Mrd. DM pro Jahr oder 12 Pf/kWh bei vermiedenen Kosten von 4 Pf/kWh bzw.
- 1,6 Mrd. DM pro Jahr oder 6 Pf/kWh bei vermiedenen Kosten von 10 Pf/kWh.

Die Finanzierung des Aktionsprogramms kann sich aus einer oder mehrerer der folgenden Quellen speisen:

- Allgemeine Haushaltsmittel des Bundes. Eine solche Lösung ist bei der derzeitigen Lage der öffentlichen Haushalte kaum denkbar.
- Aufschlag auf den Stromverbrauch aller Verbraucher. Im Endausbau nach 10 Jahren liegen die notwendigen Abgaben in der Größenordnung von
  - *0,36 Pf/kWh bei vermiedenen Kosten von 4 Pf/kWh und bei*
  - *0,72 Pf/kWh bei vermiedenen Kosten von 10 Pf/kWh.*
- Aufschlag auf den Stromverbrauch der privater Haushalte und öffentlicher Einrichtungen. Im Endausbau nach 10 Jahren liegen die notwendigen Abgaben in der Größenordnung von
  - *1 Pf/kWh bei vermiedenen Kosten von 10 Pf/kWh und bei*
  - *2 Pf/kWh bei vermiedenen Kosten von 4 Pf/kWh.*
- Erhöhung der Mehrwertsteuer auf Strom auf 19-23%.
- Zusätzliche, freiwillige Zahlungen von Nutzern, die gleichzeitig zur proportionalen Erhöhung des Zielwertes führen („Grüner Strom"). Dies sollte auch Industrieunternehmen angeboten werden, die im Gegenzug ein Umweltsiegel erhalten, das sie für Werbezwecke einsetzen dürfen.

6.5 Schlußbemerkungen

Um den Verwaltungsaufwand und den staatlichen Regulierungsaufwand möglichst gering zu halten, ist folgende Regelung denkbar. Die Pflicht zur Erfüllung der im Aktionsprogramm vorgegebenen Quote für erneuerbare Energiequellen wird dem oder den Netzbetreibern auferlegt. Gleichzeitig wird ihnen gestattet zur Deckung der Mehrkosten einen Aufschlag auf das Durchleitungsentgelt zu erheben. Dazu wäre es allerdings erforderlich, die Trennung von Netzbetreibern und Stromerzeugern weiter zu treiben als dies im Entwurf des Energiewirtschaftsgesetzes bislang vorgesehen ist. Der staatliche Regulierungsbedarf beschränkt sich dann auf die Vorrangregelung für die Einspeisung, die Festlegung der Bandbreiten für die Techniken und eventuelle eine Aufsichtsfunktion.

Der Aufwand für die Durchführung des Ausschreibungsverfahrens ist sicher nicht vernachlässigbar. Andererseits erscheint uns dieses Verfahren als das effizienteste Mittel, die Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energie zu senken. Dies gibt selbst dann, wenn die Kosten der Ausschreibung auf die schließlich geförderten Verträge umgelegt werden.

Der Vorteile des Ausschreibungsverfahren gegenüber eine festen Einspeisevergütung liegt darin, daß die Preisbildung dem Wettbewerb überlassen bleibt und nicht in Expertengremien ausgehandelt werden muß.

Quellen

Altner, G., H.-P. Dürr, G. Michelsen und J. Nitsch, 1995. Zukünftige Energiepolitik. Economica Verlag, Bonn.

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft, 1996. Energiedaten 1995 (EDV-Version), Bonn.

DEWI-Magazin, Nr. 9/1996, S. 15ff.

DPG – Deutsche Physikalische Gesellschaft, 1995. Energiememorandum 1995, Bad Honnef.

Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre", 1991 und 1995. Abschlußberichte, Bonn.

Europaparlament, 1996. Bericht über einen Aktionsplan der Gemeinschaft für erneuerbare Energiequellen, Berichterstatter: MdEP P.M. Mombauer.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 1991 und 1996. Letzte Veröffentlichung: Climate Change 1995. 3 Bände, Cambridge University Press.

IZE – Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft, 1994. Energiewirtschaft kurz und bündig, Ausgabe 1994, Frankfurt.

Kaltschmitt, M., und A. Wiese (Hrsg.), 1995. Erneuerbare Energien, Springer, Heidelberg.

Matthies, H.G., C. Nath, T.E. Schellin, A.D. Garrad, M.A. Wastling, D.C. Quarton, J. Wei, M. Scherweit, T. Siebers, 1995. Study of Offshore Wind Energy in the EC. Verlag Natürliche Energie, Brekendorf.

Mohr, H., private Kommunikation, 1996.

Reetz, T., und H. Lehmann, 1996. Abschätzung der EU-weiten Potentiale erneuerbarer Energien. In: The LTI Research Team, Abschlußbericht des EU-APAS Forschungsprojektes „Long-Term Integration of Renewable Energies into the European Energy System" (DG XII, RENA-CT94-0041), Mannheim.

Schiffer, H.-W., 1995. Energiemarkt Bundesrepublik Deutschland. TÜV Rheinland, Köln.

Stromthemen, Ausgabe 9/1996, S. 4-5.

WINKRA-RECOM (Hrsg.), 1995. Tagungsband: Deutscher Kongreß erneuerbare Energien '95. 3.-7.4.95, Hannover.

Referentinnen und Referenten

Bitterlich, Walter **Prof. Dr.**	Universität GH Essen FB Kraftwerkstechnik	Universität GH Essen Universitätsstr. 15 45117 Essen Tel. (0201) 183-2650 Fax: (0201) 183-2593
Born, Peter **Dr.**	AKZO Nobel Faser AG	AKZO Nobel Faser AG Kasinostr. 19 – 21 42097 Wuppertal Tel. (0202) 324421 Fax: (0202) 324406 peter.born@akzo.nl
Eidens, Jochem **Dr.**	Stellvertretender Leiter des Projekts Kern- Fusion (KFS)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3074 Fax (02461) 61-5452
Fischer, Wolfgang **MA**	Programmgruppe Technik- folgenforschung (TFF)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-5204 Fax: (02461) 61-2496 wo.fischer@fz-juelich.de
Gautier, Fritz **Dr.**	Vorstandssprecher der GEW Köln AG	GEW Köln Parkgürtel 24 50823 Köln Tel. (0221) 178-3013 Fax: (0221) 178-2311
Geiss, H. **Dipl.-Phys.**	Institut für Chemie der Belasteten Atmo- sphäre (ICG)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-6037 Fax: (02461) 61-5346
Grawe, Joachim **Prof. Dr.**	Universität Stuttgart	Hans-Brümmer-Platz 70771 Leinfelden Tel. (0711) 7542963 Fax: (0711) 7542904
Groscurth, Helmuth-M. **Dr.**	Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung	Zentrum für Europäische Wirt- schaftsforschung GmbH Kaiserring 14-16 68034 Mannheim Tel. (0621) 1235-219 Fax: (0621) 1235-226 hmg@zew.de
Hake, Jürgen-Friedrich **Dipl.-Math.**	Leiter der Programm- Gruppe Systemforschung und Technologische - Entwicklung (STE), Geschäftsführer der gste	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3161 Fax: (02461) 61-2540 jfh@fz-juelich.de

Heckler, Rainer **Dipl.-Phys.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3583 Fax: (02461) 61-2540 r.heckler@fz-juelich.de
Höhlein, Bernd **Prof. Dr.**	Institut für Energieverfahrenstechnik (IEV)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3235 Fax: (02461) 61-8109 b.hoehlein@fz-juelich.de
Jäger, Benvenuto **Prof. Dr.**	Lehrbeauftragter an der Technischen Universität Berlin	Schopenhauerstr. 12 14129 Berlin-Schlachtensee Tel. (030) 8012276
Keiner, Martin **Dipl.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing.**	Referent für Energiekonzepte	GEW Köln AG Parkgürtel 24 50823 Köln Tel. (0221) 178-3049 Fax: (0221) 178-2338
Kleemann, Manfred **Dr.-Ing.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3397 Fax: (02461) 61-2540 m.kleemann@fz-juelich.de
Kraft, Armin **Dipl.-Ing.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3588 Fax: (02461) 61-2540 a.kraft@fz-juelich.de
Kuckshinrichs, Wilhelm **Dr.**	Stellv. Leiter der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3590 Fax: (02461) 61-2540 w.kuckshinrichs@fz-juelich.de
Linden, Werner **Dr.**	Leiter Umweltschutz/ Arbeitssicherheit	GEW Köln AG Parkgürtel 24 50823 Köln Tel. (0221) 178-3020 Fax: (0221) 178-2234
Littke, Ralf **Prof. Dr.**	Lehrstuhl für Erdöl und Kohle	RWTH Aachen 52058 Aachen Tel. (0241) 80-5748 Fax: (0241) 8888-152 lck.@lck.rwth-aachen.de
Markewitz, Peter **Dr.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-6119 Fax: (02461) 61-2540 p.markewitz@fz-juelich.de

Müller-Kirchenbauer, Joachim **Dipl.-Ing.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3164 Fax: (02461) 61-2540 j.mueller-kirchenbauer@fz-juelich.de
Noreikat, Karl E. **Dipl.-Ing.**	Wissenschaftlicher Leiter „Alternative Antriebe“	Daimler Benz AG G 250 70546 Stuttgart Tel. (0711) 17-20735 Fax: (0711) 17-52006
Odoj, Reinhard **Prof. Dr.**	Institut für Sicherheitsforschungs und Reaktortechnik (ISR)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-5299 Fax (02461) 61-2450 r.odoj@fz-juelich.de
Pfaffenberger, Wolfgang **Prof. Dr.**	Bremer Energieinstitut und Institut für Volkswirtschaftslehre Universität Oldenburg, Vorsitzender der Gesellschaft für Energiewissenschaften und Energiepolitik (GEE)	Bremer Energie-Institut Fahrenheitstr. 8 28359 Bremen Tel. (0421) 201430 Fax: (0421) 219986 pfaffen@uni-oldenburg.de
Salge, Karin **Dipl.-Volkswirtin**	Bremer Energie-Institut	Bremer Energie-Institut Fahrenheitstr. 8 28359 Bremen Tel. (0421) 20143-15 Fax: (0421) 219986
Schiffer, Hans- Wilhelm **Dr.**	Leiter der Abteilung Übergeordnetes Berichtswesen und Energiewirtschaft	Rheinbraun AG Abt. S 21 Stüttgenweg 2 50935 Köln Tel. (0221) 480-23218 Fax: (0221) 480-22055
Schuppe, Thomas **Dipl.-Oec.**	Energiewirtschaftliches Institut	Universität zu Köln Albertus-Magnus-Platz 50931 Köln Tel. (0221) 412023 Fax (0221) 446537 schuppe@wiso.uni-koeln.de
Schwarz, Hans-Günter **Dr.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-4540 Fax: (02461) 61-2540 gu.schwarz@fz-juelich.de
Skiba, Hubert **Dipl.-Ing.**	Leiter des Heizkraftwerkes Merkenich	GEW Köln Parkgürtel 24 50823 Köln Tel. (0221) 178-4401 Fax: (0221) 178-2219

Sonnenschein, Dieter **Dipl.-Inf.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3393 Fax: (02461) 61-2540 d.sonnenschein@fz-juelich.de
Stahl, Wolfgang **Prof. Dr.**	Bundesanstalt Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	BGR 30655 Hannover Tel. (0511) 643-2579 Fax: (0511) 643-3664 wolfgang.stahl@bgr.de
Ströbele, Wolfgang **Prof. Dr.**	Lehrstuhl für Volkswirtschaftstheorie	Universität Münster Universitätsstr. 14 – 16 48143 Münster Tel. (0251) 83228411 Fax: (0251) 83228317
Tögel, Christian **Dipl.-Ing.**	Energieagentur NRW	Energieagentur NRW Morianstr. 32 42103 Wuppertal Tel. (0202) 24552-34 Fax: (0202) 24552-30
Verfondern, Karl **Dr.**	Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3438 Fax: (02461) 61-3133 k.verfondern@fz-juelich.de
Wagner, Heribert **Prof. Dr.**	Institut für Schicht- und Ionenforschung (ISI)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3791 Fax (02461) 61-3735
Wagner, Hermann-Josef **Prof. Dr.-Ing.**	Fachbereich Ökologisch verträgliche Energiewirtschaft	Universität GH Essen Schützenbahn 70 45117 Essen Tel. (0201) 183-3741 Fax: (0201) 183-3742
Walbeck, Manfred **Dr.**	Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-3167 Fax: (02461) 61-2540 m.walbeck@fz-juelich.de
Wiedemann, Peter **Dr.**	Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik (MUT)	Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Tel. (02461) 61-5890 Fax: (02461) 61-8176 p.wiedemann@fz-juelich.de
Zwick, Michael **Dr.**	Bereich Technik, Gesellschaft, Umweltökonomie	Akademie für Technikfolgenabschätzung Industriestr. 5 Tel. (07 11)-9063-163 Fax: (07 11) 9063-175 Zwick@afta-bw.de

Schriften des Forschungszentrums Jülich.
Reihe Energietechnik/Energy Technology:

1. **Fusion Theory**
   Proceedings of the Seventh European Fusion Theory Conference
   edited by A. Rogister (1998); x, 306 pages
   ISBN 3-89336-219-3

2. **Radioactive Waste Products 1997**
   Proceedings of the 3rd International Seminar on Radioactive Waste Products
   held in Würzburg (Germany) from 23 to 26 June 1997
   edited by R. Odoj, J. Baier, P. Brennecke et al. (1998), xxiv, 506 pages
   ISBN 3-89336-225-8

3. **Energieforschung 1998**
   Vorlesungsmanuskripte des 4. Ferienkurs „Energieforschung"
   vom 20. bis 26. September 1998 im Congrescentrum Rolduc und
   im Forschungszentrum Jülich
   herausgegeben von J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, K. Kugeler u. a. (1998),
   ca. 550 Seiten
   ISBN 3-89336-226-6

4. **Materials for Advances Power Engineering 1998**
   Abstracts of the 6th Liège Conference
   edited by J. Lecomte-Beckers, F. Schubert, P. J. Ennis (1998), appr. 180 pages
   ISBN 3-89336-227-4

5. **Materials for Advances Power Engineering 1998**
   Proceedings of the 6th Liège Conference
   edited by J. Lecomte-Beckers, F. Schubert, P. J. Ennis (1998),
   Part I appr. 700 pages, Part II appr. 620 pages, Part III appr. 630 pages
   ISBN 3-89336-228-2

7. **Energieforschung**
   Vorlesungsmanuskripte des 3. Ferienkurses „Energieforschung"
   vom 22. bis 30. September 1997 im Forschungszentrum Jülich
   herausgegeben von J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, K. Kugeler u. a. (1997),
   505 Seiten
   ISBN 3-89336-211-8

Schriften des Forschungszentrums Jülich.
Reihe Energietechnik/Energy Technology:

1. **Fusion Theory**
   Proceedings of the Seventh European Fusion Theory Conference
   edited by A. Rogister (1998); x, 306 pages
   ISBN 3-89336-219-3

2. **Radioactive Waste Products 1997**
   Proceedings of the 3rd International Seminar on Radioactive Waste Products
   held in Würzburg (Germany) from 23 to 26 June 1997
   edited by R. Odoj, J. Baier, P. Brennecke et al. (1998), xxiv, 506 pages
   ISBN 3-89336-225-8

3. **Energieforschung 1998**
   Vorlesungsmanuskripte des 4. Ferienkurs „Energieforschung"
   vom 20. bis 26. September 1998 im Congrescentrum Rolduc und
   im Forschungszentrum Jülich
   herausgegeben von J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, K. Kugeler u. a. (1998),
   508 Seiten
   ISBN 3-89336-226-6

4. **Materials for Advances Power Engineering 1998**
   Abstracts of the 6th Liège Conference
   edited by J. Lecomte-Beckers, F. Schubert, P. J. Ennis (1998), appr. 180 pages
   ISBN 3-89336-227-4

5. **Materials for Advances Power Engineering 1998**
   Proceedings of the 6th Liège Conference
   edited by J. Lecomte-Beckers, F. Schubert, P. J. Ennis (1998),
   Part I appr. 700 pages, Part II appr. 620 pages, Part III appr. 630 pages
   ISBN 3-89336-228-2

7. **Energieforschung**
   Vorlesungsmanuskripte des 3. Ferienkurses „Energieforschung"
   vom 22. bis 30. September 1997 im Forschungszentrum Jülich
   herausgegeben von J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, K. Kugeler u. a. (1997),
   505 Seiten
   ISBN 3-89336-211-8

Dieser Band enthält die
Vorlesungsmanuskripte des
4. Ferienkurses
„Energieforschung"
vom 20. – 26. September 1998
im Congrescentrum Rolduc und
im Forschungszentrum Jülich.

Titelbild:
Kernkraftwerk Montelimar
im Rhonetal (Frankreich).

Forschungszentrum Jülich

Band 3
ISBN 3-89336-226-6

Energietechnik
Energy Technology