SITZUNGSBERICHTE
DER LEIBNIZ-SOZIETÄT

Band 82 • Jahrgang 2005

trafo Verlag Berlin

ISSN 0947-5850 ISBN 3-89626-521-0

Inhalt

01 Günter Flach, Heinz Kautzleben und Klaus Steinitz: *Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen. Zwischenbericht Teil I zur Tätigkeit des ad-hoc-Arbeitskreises Energieversorgung der Leibniz-Sozietät*

02 Karl Lanius: *Szenarien des Klimawandels*

03 Wolfgang Böhme: *Beitrag zu Thematik „Klima und Menschheit“*

04 Klaus-Dieter Jäger: *Klimawandel im Holozän – Problemanalyse am Beispiel Mitteleuropa*

05 Klaus Steinitz: *Nachhaltige Energiesicherung im 21. Jahrhundert – Veränderte Bedingungen, neue Probleme und Herausforderungen*

06 Karl F. Alexander: *Perspektiven der Kernenergie für eine nachhaltige Versorgung der Menschheit mit Energie (Zusammenfassung)*

07 Günter Flach: *Entwicklungstendenzen der Kernenergie*

08 Johann Lingertat: *Gesteuerte Kernfusion*

09 Helmut Abel: Strahlenrisiken der Kernenergie

010 Klaus Steinitz: *Überlegungen zu einer komplexen Bewertung der Atomenergie. Wie könnte der Diskurs zwischen Anhängern und Gegnern der Nutzung der Atomenergie weitergeführt werden?*

011 11 Klaus Thiessen: *Können Erneuerbare Energien die fossilen und Kernenergien ersetzen?*

012 Gerhard Brandl: *Meereswellenenergie (Zusammenfassung)*

013 Siegfried Nowak: *Fossile Kohlenstoffträger – ihre Rolle und Bedeutung für die Energie- erzeugung und die Stoffwirtschaft*

014 Lothar Kolditz: *Zur Komplexität der Thematik Versorgung mit Energie und Rohstoffen*

015 Günter Flach, Heinz Kautzleben und Klaus Steinitz: *Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen. Zwischenbericht Teil II zur Tätigkeit des ad-hoc-Arbeitskreises Energieversorgung der Leibniz-Sozietät*

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 5–9*

Günter Flach, Heinz Kautzleben und Klaus Steinitz

Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen. Zwischenbericht Teil I zur Tätigkeit des ad-hoc-Arbeitskreises Energieversorgung der Leibniz-Sozietät

Der ad-hoc-Arbeitskreis wurde im Oktober 2004 zur Bearbeitung der Projektaufgabe „Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen“ im Rahmen des Förderprojektes „Erkenntnisgewinn durch Interdisziplinarität“ gebildet. Dieses Projekt wurde in den Jahren 2004 und 2005 vom Wissenschaftssenator des Landes Berlin finanziell gefördert. Die Bildung des Arbeitskreises erfolgte auf Vorschlag der am 07.10.2004 durchgeführten Anlaufberatung. Die Aufgabe des Sprechers übernahm Heinz Kautzleben. Jedes Mitglied der Leibniz-Sozietät und darüber hinaus jeder Freund der Sozietät, der kompetente Beiträge zur Thematik leisten kann, war und ist eingeladen, im Arbeitskreis mitzuwirken.

Bisher wirken im Arbeitskreis aktiv rund 20 Mitglieder der Sozietät und 4 Freunde der Sozietät mit. Weitere rund 30 Mitglieder der Sozietät, die ihr Interesse an der Projektaufgabe bekundet hatten, wurden vom Sprecher des Arbeitskreises laufend durch Rundbriefe per e-mail über die Vorhaben und die erzielten Ergebnisse informiert. Der Arbeitskreis hat bisher drei ganztägige Workshops (am 10.12.2004, 04.03.2005 und 15.07.2005, organisiert und moderiert vom Sprecher) durchgeführt. Zur Anlaufberatung und zu allen Workshops existieren ausführliche Niederschriften, die von den jeweiligen Teilnehmern bestätigt wurden; sie können beim Sprecher eingesehen werden.

In den drei Workshops wurden insgesamt 16 wissenschaftliche Vorträge und ausführliche Diskussionsbeiträge mit folgenden Arbeitstiteln gehalten und ausgiebig diskutiert:

- Szenarien zur Klimaänderung (Karl Lanius)
- Beitrag zur Thematik Klima und Menschheit (Wolfgang Böhme)
- Klimaänderungen in Mitteleuropa im Holozän – Ergebnisse und Aufgaben (Klaus-Dieter Jäger)

- Energiesicherung im 21. Jahrhundert – Veränderte Bedingungen und Herausforderungen (Klaus Steinitz)
- Perspektiven der Kernenergie für eine nachhaltige Versorgung der Menschheit mit Energie (Karl Friedrich Alexander)
- Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der Kernenergetik für die nähere und fernere Zukunft (Günter Flach)
- Stand der Arbeiten zur Kernfusion für die zivile Energieversorgung (Johann Lingertat)
- Strahlenrisiken der Kernenergie (Helmut Abel)
- Gesellschaftliche und politische Aspekte der Bewertung der Rolle der Atomenergie – wie könnte der Diskurs zwischen Anhängern und Gegnern der Atomenergie weitergeführt werden? (Klaus Steinitz)
- Zur Energiewirtschaft in Deutschland (Klaus-Dieter Bilkenroth)
- Stand und Perspektiven der Wandlung von Sonnenenergie in Elektroenergie (Klaus Thiessen)
- Meereswellenenergie – eine neue Alternative (Gerhard Brandl)
- Bemerkungen zu den verschiedenen primären Energieträgern bzw. –quellen (Heinz Kautzleben)
- Rohstoff Erdöl (Siegfried Nowak)
- Zur Komplexität der Thematik Versorgung mit Energie und Rohstoffen (Lothar Kolditz)
- Zu aktuellen internationalen Fragen des Energie-Bereiches (Heinz Kautzleben).

Elmar Altvater beteiligte sich mit einem schriftlichen Beitrag zum Thema „Das Ende des Kapitalismus wie wir ihn kennen“.

Im vorliegenden Band der „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ werden von sieben dieser Vorträge ausführliche und überarbeitete Fassungen, von drei weiteren Vorträgen Kurzfassungen abgedruckt. Der Beitrag von Elmar Altvater wurde an anderer Stelle publiziert. Die Bemerkungen von Heinz Kautzleben wurden in den Zwischenbericht Teil II (der ebenfalls im vorliegenden Band zu finden ist) eingearbeitet. In diesem zweiten Berichtsteil wird der Versuch unternommen, die Problemstellungen und erste Aussagen aus den Diskussionen im Arbeitskreis zu beschreiben. Aufgenommen wurde auch eine ausführliche Sammlung von weiterführender Literatur. Damit dürfte der vorliegende Band der „Sitzungsberichte“ über die Dokumentation der bisherigen Arbeitsergebnisse hinaus eine Grundlage für die weiteren Arbeiten bilden.

Der Arbeitskreis hatte sich die Aufgabe gestellt, die wissenschaftlichen Positionen, die in der Leibniz-Sozietät zur Energie-Problematik vertreten werden, und deren Begründungen zu sammeln. Als ersten Themenkomplex hat er den Komplex „Energie und Klimawandel“ ausführlich behandelt und konnte dazu bereits im 1. Workshop eine übereinstimmende Einschätzung erreichen. Anschließend wurden (im 1., 2. und 3. Workshop) exemplarisch die verschiedenen Energietechnologien behandelt, dabei besonders ausführlich die Möglichkeiten und Probleme der Kernenergetik. Zur Einschätzung der Kernenergie und deren Perspektive konnten die Teilnehmer noch keine generelle Übereinstimmung erreichen, jedoch stimmten die meisten der von Klaus Steinitz vorgeschlagenen Herangehensweise zur gesellschaftlichen Bewertung zu. In den Workshops wurden zu allen Aspekten der Energie-Problematik Generaldebatten geführt.

Die Mitwirkenden im Arbeitskreis waren und sind bemüht, sich entsprechend dem Charakter der Leibniz-Sozietät als einer Wissenschaftsakademie auf die wissenschaftlichen Fragen der Energie-Problematik zu konzentrieren, selbstverständlich unter Einbeziehung aller relevanten naturwissenschaftlich-technischen und wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Aspekte. Sie waren sich aber stets bewußt, daß von ihren Diskussionen auch Antworten auf die Fragen erwartet werden, die für die Öffentlichkeit besonders wichtig sind: Energie muß der Menschheit jederzeit – in Gegenwart und Zukunft – bedarfsgerecht und möglichst preiswert zur Verfügung stehen. Die Energieversorgung muß jederzeit in technischer Hinsicht für den Menschen und für die Umwelt sicher erfolgen. Die weitere Entwicklung der Energieversorgung soll zukunftsfähig sein. Es besteht Übereinstimmung darin, daß die Antworten, die der Einzelne gibt, wesentlich von seinen Vorstellungen und Visionen über die gesellschaftliche Entwicklung beeinflußt werden.

In der Planung zur Bearbeitung der Projektaufgabe war vorgesehen, bis zum Jahresende 2005 ein öffentliches wissenschaftliches Kolloquium zur Thematik durchzuführen. Das Kolloquium fand (nach Redaktionsschluß dieses Bandes der Sitzungsberichte) am 25. November 2005 in Berlin statt. Im Kolloquium berichteten die Mitwirkenden des Arbeitskreises über die bisher erreichten Ergebnisses, und es wurde eine ausführliche Diskussion geführt.

Im Antrag an die Senatsverwaltung zur Freigabe der Fördermittel war folgende Kurzbeschreibung zur Projektaufgabe enthalten: „Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen (Forschungsprogramm, Konferenz 2005). Die Leibniz-Sozietät arbeitet seit Jahren an der wissenschaft-

lichen Begründung des Konzeptes zur nachhaltigen Entwicklung sowohl im regionalen wie auch im globalen Maßstab, was nur durch interdisziplinäre Analysen und Synthesen gelingen kann. Schwerpunkt ist die Suche nach unter den bestehenden politischen, ökonomischen und wissenschaftlich-technischen Bedingungen praktikablen Lösungswegen der gegenwärtig und auf lange Sicht sicheren Versorgung mit Energie und Rohstoffen. Besonders schwierig ist es dabei, den Platz der erneuerbaren Energien zu bestimmen."

Die in der Aufgabe formulierte Problematik wird bereits seit einigen Jahrzehnten in aller Welt intensiv diskutiert. In den letzten Jahren hat die Diskussion an Schärfe zugenommen. Die Leibniz-Sozietät hat sich in den neunziger Jahren mit der Problematik eingehend befaßt und darüber in den „Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät" berichtet. Der Arbeitskreis war von Beginn seiner Tätigkeit an der Auffassung, daß es an der Zeit ist, die dabei erarbeiteten Aussagen zu überprüfen und zu aktualisieren. Die in der Sozietät laufenden Diskussionen zu ausgewählten Fragen müssen erweitert werden, um einerseits der Komplexität der Problematik gerecht zu werden und andererseits die Kompetenz der Sozietät zu interdisziplinärer Betrachtung wirksam zu machen. Die Sozietät kann einen spezifischen Beitrag zur Diskussion der Energieproblematik dadurch leisten, daß sie die zahlreich vorhandenen Szenarien aus komplexer Sicht und möglichst unbelastet durch kommerzielle und/oder politische Interessen bewertet. Dabei sind die unterschiedlichen Auffassungen, die nicht ausgeräumt werden können, offen darzulegen.

Die Bearbeitung der Projektaufgabe erfordert, daß in der Sozietät der Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft auf dem Gesamtgebiet im ausreichenden Maße ergänzt wird. Mit dieser Zielstellung wurden umfangreiche Literaturrecherchen insbesondere im Internet durchgeführt. Der Anhang zum Teil II des Berichtes enthält eine Liste von Publikationen, die berücksichtigt wurden und die auch für die weitere Tätigkeit des Arbeitskreises nützlich sein werden.

Der Arbeitskreis hat sich nicht mit Rohstoffen generell befaßt, sondern nur mit denjenigen, die sowohl als Energieträger genutzt werden wie auch als Rohstoffe in der stoffwandelnden Industrie. Die Nutzungskonflikte sind bei der Einschätzung der Szenarien von großer Bedeutung. Der Begriff „sichere Versorgung" bezeichnet, daß sowohl die Fragen der Ressourcenverknappung als auch die Fragen der nachhaltigen Nutzung der Ressourcen diskutiert werden. Insbesondere bei den Betrachtungen zur Nachhaltigkeit der Nutzung spielen die zeitlichen und geographischen Dimensionen eine große Rolle. Der Arbeitskreis betrachtet bei seinen Aussagen sowohl die technogenen als auch

die geologischen Veränderungen und ebenso die globalen wie auch die regionalen Auswirkungen. Besondere Aufmerksamkeit wird der Situation in Deutschland und der Europäischen Union gewidmet.

Zu den Fragen der erneuerbaren Energien wird in der Sozietät gegenwärtig bereits intensiv, dabei auch kontrovers diskutiert. Diese Diskussion muß weitergeführt werden, um den Platz der erneuerbaren Energien in der Gesamtproblematik global und in Deutschland zuverlässiger bestimmen zu können. Da in den verschiedenen Ländern bezüglich des Platzes der Kernenergie in der langfristig sicheren Versorgung mit Energie und Rohstoffen, die zugleich Energieträger sind, sehr unterschiedliche Strategien verfolgt werden, muß die Sozietät sich mit allen relevanten Fragen intensiv befassen. Dazu gehört auch die doppelte Nutzung der Kernenergie für militärische und für zivile Zwecke.

Der Arbeitskreis schlägt vor, seine Tätigkeit über das Ende des Jahres 2005 hinaus fortzuführen.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 11–33*

Karl Lanius

Szenarien des Klimawandels

Der Zwischenstaatliche Ausschuß für Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) wurde 1988 durch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Seine Aufgaben umfassen:

- Die Bewertung der verfügbaren wissenschaftlichen und sozioökonomischen Informationen zur Klimaänderung sowie die Möglichkeiten zur Vermeidung der Klimaänderungen und zur Anpassung daran.
- Auf Anfrage die Erteilung von wissenschaftlichen/ technischen / sozioökonomischen Ratschlägen an die Vereinten Nationen.

Wesentliche Ergebnisse der Arbeit von vielen hundert Experten aus aller Welt fanden ihren Niederschlag in den bisher veröffentlichten drei Wissensstandsberichten des IPCC aus den Jahren 1990, 1995,und 2001.[1] Ein Synthesebericht speziell für politische Entscheidungsträger wurde auf der Grundlage des dritten Zustandsberichtes erarbeitet.[2]

Auf dem Erdgipfel, der 1992 in Rio de Janeiro stattfand, wurde ein „Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen“ (UNFCCC) verabschiedet. Es setzt das Ziel, die Konzentration der klimarelevanten Treibhausgase, die durch den menschlichen Stoffwechsel mit der Natur freigesetzt werden, auf einem *nachhaltigen* Niveau zu stabilisieren. Als Ziel des Übereinkommens heißt es in Artikel 2:

„Das Endziel dieses Übereinkommens und aller damit zusammenhängenden Rechtsinstrumente, welche die Konferenz der Vertragsparteien beschließt, ist es, in Übereinstimmung mit den einschlägigen Bestimmungen des Übereinkommens die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau

1 IPCC Climate Change, Cambridge 1991. IPCC (Hrsg.) Climate Change 1995, Cambridge 1996. IPCC (Hrsg.) Climate Change 2001, Cambridge 2002.

2 Klimaänderung 2001, Synthesebericht. Bonn 2001.

sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann."

Das Übereinkommen trat im März 1994 in Kraft. Auf der Kyoto Konferenz (1997) wurde ein Protokoll beschlossen, das die Staaten verpflichtet, innerhalb des Zeitraums 2008–2012 ihre Treibhausgasemissionen um 5,2 Prozent zu verringern gegenüber dem Stand von 1990.

Nach der Ratifizierung durch Rußland trat das Kyoto-Protokoll am 15.2.2005 in Kraft, mehr als sieben Jahre nach seiner Verabschiedung.

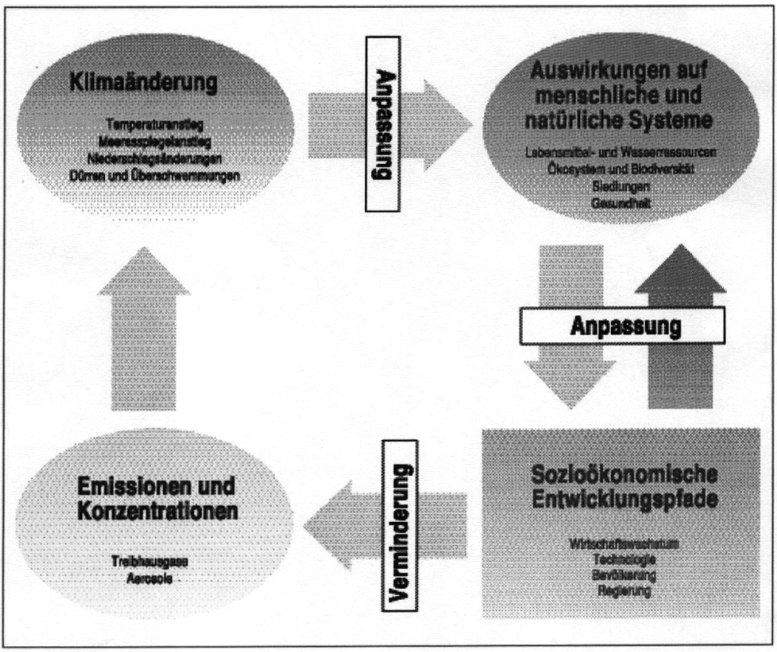


Abb.1: Schematische und vereinfachte Darstellung des Systems zur Betrachtung der anthropogenen Klimaänderung (Quelle IPCC 2001)[3]

Jede Diskussion der Probleme einer zukünftigen nachhaltigen Sicherung der Energie- und Rohstoffversorgung läßt sich nicht von den Folgen trennen, die

3 Die Abbildungen, die in den Quellen in Farbe zu finden sind, werden hier aus technischen Gründen in Schwarz-Weiß abgedruckt.

die bisherige Energieerzeugung und –nutzung auf das Klima hatten. Um sie bewerten zu können, sind einige Erläuterungen zu den Einschätzungen des IPCC erforderlich.

Die IPCC-Wissensstandsberichte unterscheiden zwischen einer Vorhersage (prediction) und einem Entwurf (projection). Den Entwurf kann man als eine bedingte Vorhersage betrachten, die sich erfüllt, wenn die in Szenarien zusammengefaßten Annahmen zutreffen.

Jede integrative Betrachtung der Klimaänderungen muß die Dynamik des Kreislaufs von verknüpfenden Ursachen und Wirkungen im System berücksichtigen. Abb.1 zeigt in einem vereinfachenden Schema diese Verknüpfungen. Die helleren Pfeile zeigen den Kreislauf von Ursache und Wirkung, der dunklere Pfeil deutet die gesellschaftliche Antwort an.

In meinem Beitrag beschränke ich mich auf die Wechselwirkung zwischen sozioökonomischen Entwicklungspfaden und ihren Wirkungen auf Emission und atmosphärischer Konzentration klimarelevanter Treibhausgase. Ich werde über die Szenarien berichten, die in den bisherigen Wissensstandsberichten betrachtet wurden und über weiterführende Ansätze.

Zunächst einige Bemerkungen zu den klimarelevanten Treibhausgasen:

Das wirksamste Treibhausgas ist Wasserdampf – die Luftfeuchte, deren Konzentration durch verschieden Maße ausgedrückt wird. Während trockene Luft bis in große Höhen eine einheitliche Zusammensetzung hat, unterliegt die Konzentration von Wasserdampf starken lokalen und regionalen Schwankungen. Sie hängt von der Lufttemperatur ab sowie von Kontakten der Luftmassen mit den Wasserreservoirs der Erdoberfläche. Die Wasserdampfkonzentration variiert zwischen Bruchteilen eines Prozents und mehr als drei Prozent.

Die wichtigsten anthropogenen Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid oder Lachgas(N_2O) und die voll- oder teilhalogenisierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFCs und PFCs) sowie Schwefelhexafluorid (SF_6).

Wie alle bisherigen Untersuchungen zweifelsfrei belegen, ist der Einfluß der Kohlendioxid-Emission aus der Verbrennung fossiler Energieträger dominierend für den Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration. Bis zu Beginn der industriellen Revolution lag sie bei 280ppm.[4]

Mit der Entstehung der industriellen Zentren, z.B. in Mittelengland und im Ruhrgebiet, wuchs der CO_2-Ausstoß weltweit jährlich um vier Prozent. Der weitere Anstieg wurde durch Weltkriege, Weltwirtschaftskrise, Ölkrise

4 Der Gehalt an Spurengasen in der Atmosphäre wird in parts per million – 1ppm=0,0001 Prozent Volumenanteil angegeben (1000ppb = 1ppm).

und den Zusammenbruch der Industrien in den Ländern des Realsozialismus vorübergehend gebremst – aufgehalten wurde er nie. Gegenwärtig steigt er wieder stärker an, wie die Messungen auf dem Mauna Loa (Hawaii) belegen (siehe Abb.2).

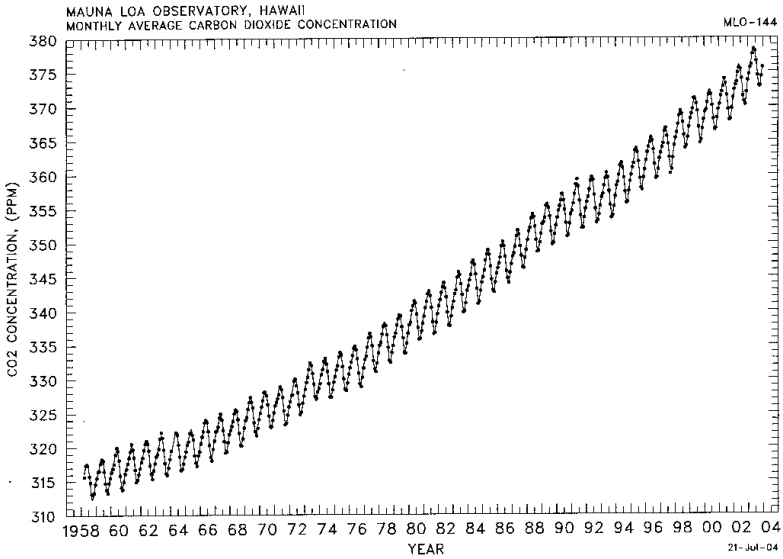


Abb.2: Messung der Kohlendioxid-Konzentration auf dem Mauna Loa (Hawaii).

Die sehr präzisen Messungen in einer ungestörten Hochlage begannen 1957/58 im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres. Die im Jahresrhythmus auftretenden Schwankungen sind deutlich erkennbar. Sie werden vom Verhalten der Biosphäre auf den ausgedehnten Festlandflächen der Nordhalbkugel bestimmt. Im Sommerhalbjahr nehmen die Pflanzen der Nordhalbkugel Kohlendioxid auf, im Winterhalbjahr gibt verwesende Biomasse CO_2 an die Atmosphäre ab.

Methan (CH_4) stammt überwiegend aus dem Stoffwechsel anaerober Bakterien beim Abbau organischen Materials. Insbesondere bei grasfressenden Wiederkäuern, beim Reisanbau und in Müllhalden, aber auch bei der Verbrennung von Biomasse wird Methan freigesetzt.

Lachgas (N_2O) setzen Bodenbakterien frei. Es entsteht auf überdüngten Feldern und beim Humusabbau in tropischen Regenwäldern. Es bildet sich auch bei Verbrennung unter hohen Temperaturen, z.B. in Düsentriebwerken.

Viele halogenierte Kohlenstoffe, die in der Industrie erzeugt und freigesetzt werden, wirken sowohl als Treibhausgase als auch bei der Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre. Durch die Festlegung des Protokolls von Montreal und dessen Anschlußvereinbarungen wurde eine Emissionsreduktion durchgesetzt. Ersatzstoffe und weitere synthetische Stoffe wie die HFCs, PFCs und SF_6 erweisen sich ebenfalls als sehr effektive Treibhausgase.

Bei allen Unsicherheiten, mit denen Vorhersagen über die Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert verbunden sind, mit Sicherheit wissen wir, daß die Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre seit dem Beginn der Industriellen Revolution wächst. Nachfolgende Tabelle 1 zeigt die Veränderungen bei den wichtigsten klimarelevanten Treibhausgasen zum Ende des 20. Jahrhunderts gegenüber der vorindustriellen Zeit.

Treibhausgase	**Anstieg der Konzentration**
CO_2	von 280 ppm auf 360 ppm
CH_4	von 700 ppb auf 1750 ppb
N_2O	von 270 ppb auf 316 ppb
HFCs, PFCs, SF_6	globaler Anstieg in den letzten 50 Jahren

Tab. 1: Anstieg der Konzentration der Treibhausgase (Quelle IPCC)

Die atmosphärische Konzentration von CO_2 und CH_4 erreichten damit die höchsten Werte der zurückliegenden 420 000 Jahre.

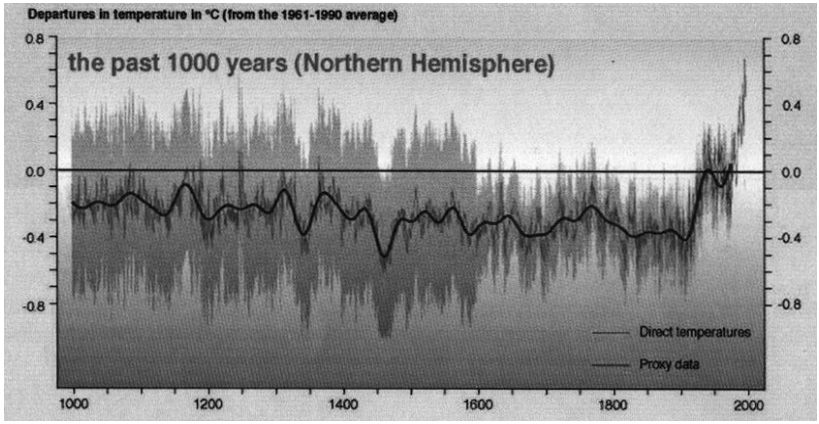


Abb.3: Variation der Oberflächentemperatur auf der Nordhalbkugel (Quelle IPCC).

Wir können mit gutem Grund annehmen, daß der Anstieg anthropogener Treibhausgase zu einer Erwärmung in der unteren und mittleren Troposphäre bei gleichzeitiger Abkühlung in höheren Schichten führte und weiter führen wird. Abb. 3 zeigt als Beispiel den Temperaturverlauf der zurückliegenden 1000 Jahre auf der Nordhalbkugel.

Bei der Bewertung der Wirksamkeit – des Treibhauspotentials, – der im Kyoto-Protokoll neben dem CO_2 genannten Treibhausgasen, ist zu berücksichtigen, daß diese zum Teil weit höhere Werte des Treibhauspotentials als CO_2 haben. Die Wirksamkeit eines Treibhausgases hängt von der Verweilzeit in der Atmosphäre und vom Absorptionsverhalten gegenüber der Wärmestrahlung ab. Ursache verschiedener Verweilzeiten sind überwiegend unterschiedliche Stoffzyklen. Abb. 4 demonstriert die Abnahme der Konzentration der Treibhausgase in Abhängigkeit von der Verweilzeit.

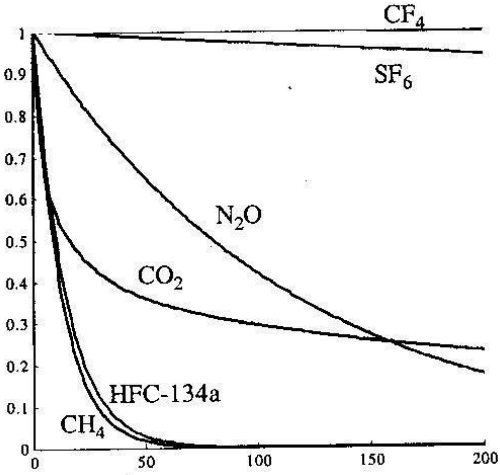


Abb.4: Zeitlicher Verlauf des Zerfalls der Treibhausgase. Aufgetragen ist der Konzentrationsabfall gegen die Verweilzeit in Jahren (Quelle UNFCC).

Die unterschiedlichen Treibhauspotentiale werden durch CO_2-Äquivalente ausgedrückt. CO_2-Äquivalente lassen sich wegen der variierenden Zerfallszeiten nur über einen vorgegebenen Zeithorizont angeben. Tabelle 2 zeigt die Treibhauspotentiale für Zeithorizonte von 20 und 100 Jahren.

Gas	**Treibhauspotentiale für Zeithorizonte**	
	von 20 Jahren	**von 100 Jahren**
CO_2	1	1
CH_4	62	23
N_2O	275	296
HFC – 134a	3300	1300
CF_4	3900	5700
SF_6	15 100	22 200

Tab. 2: Die Treibhauspotentiale für zwei Zeithorizonte (Quelle IPCC).

In Tabelle 3 sind als Beispiel die relativen Beiträge der Treibhausgase, die von den EU-Staaten emittiert wurden, für die Jahre 1990 und 2000 gegenüberstellt.

Gas	**relativer Beitrag in %**	
	1990	**2000**
CO_2	10,12	8,40
CH_4	9,51	8,31
N_2O	0,58	1,16
HFC – 134a	0,32	0,17
CF_4	0,20	0,22

Tab. 3: Die relativen Beiträge der verschiedenen Spurengase zum Treibhauspotential für die Länder der EU (Quelle UNFCCC).

Szenarien über mögliche Wege der Menschheitsentwicklung bestimmen die Modellrechnungen der Klimatologen. Darin werden in der Regel folgende Komplexe berücksichtigt:

- Bevölkerungswachstum
- Ökonomische Entwicklung
- Energieerzeugung und –verbrauch
- Landwirtschaft
- Umgang mit tropischen Regenwäldern.

Betrachten wir zunächst die vier Szenarien, die im Wissensstandsbericht des Jahres 1990 benutzt wurden.

Szenario A heißt: *Business as usual.* Es geht von folgenden Voraussetzungen aus:

- Der Energieverbrauch nimmt weltweit zu, und zwar in den Entwicklungsländern stärker als in den Industrienationen. Er vervierfacht sich bis zum Jahr 2100.
- Zu dieser Zeit werden auf der Erde mehr als 10 Milliarden Menschen leben.
- Die Energieversorgung erfolgt zu rund 90 Prozent durch fossile Brennstoffe. Nur wenige Prozent des Energiebedarfs werden über Kernenergie und aus regenerativen Quellen wie Wasser-, Sonnen- oder Windkraft gedeckt.
- Das Abholzen der tropischen Regenwälder geht unvermindert weiter – zumindest solange noch merkliche Bestände vorhanden sind.
- Die Emissionsrate von Methan verdoppelt sich bis zum Jahr 2100, denn mehr Menschen bedeuten mehr Landwirtschaft, mehr Rinder und mehr Reisfelder. Außerdem entweicht zusätzliches Methan beim Abbau und Transport von Kohle, Öl und Erdgas.
- Die Lachgasproduktion wird um 35 Prozent zunehmen. Dieser Zuwachs kommt nicht nur aus der Landwirtschaft, sondern auch aus zusätzlichen Kraftwerken und den Auspufftöpfen der Autos.
- Der Ausstoß der FCKW und Halone steigt – wenn das Montrealer Protokoll nicht verschärft wird – um 130 Prozent. Die von dem Abkommen betroffenen Substanzen F-11 und F-12 nehmen zwar nicht mehr weiter zu, dafür aber Ersatzstoffe, die bisher keinen Beschränkungen unterliegen.

Unter diesen, durchaus realistischen, Bedingungen verdoppelt sich der *reine* Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre bis zum Jahr 2060 (vorausgesetzt, die Ozeane nehmen nicht – aus bisher unbekannten Gründen – mehr/weniger CO_2 auf). Alle Treibhausgase zusammengenommen ergibt eine entsprechende Zunahme des Treibhauseffektes schon im Jahr 2030.

Szenario B, das der *mäßigen Eingriffe,* geht von folgender Entwicklung aus:

- Der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre verdoppelt sich bis zum Jahr 2100. Das liegt vor allem daran, daß statt Kohle verstärkt Erdgas verheizt wird, wobei, auf den Energiewert bezogen, weniger CO_2 entsteht.
- Die Lachgas-Emissionen wachsen um zehn Prozent.
- Der Methanausstoß steigt um nur 45 Prozent, weil Förderung und Transport von Erdgas besser kontrolliert werden und dabei weniger Methan in die Atmosphäre entweicht.
- Die FCKW- und Halonproduktion verdoppelt sich. Das Montrealer Protokoll wird verschärft, aber F-22 darf weiter unvermindert hergestellt werden.

- Der Raubbau am Regenwald verlangsamt sich geringfügig.
- Selbst unter diesen Bedingungen reichern sich Lachgas und die FCKW aufgrund ihrer besonders langen Lebenszeit stark in der Atmosphäre an. Eine Treibhauswirkung aller beteiligten Gase, die einer alleinigen CO_2-Verdopplung entspricht, ist im Jahr 2060 erreicht. Anschließend ist noch mit einem weiteren Anstieg der Kohlendioxid- und FCKW-Emissionen zu rechnen.

Bei Szenario C*,* das ein politisches *Crash-Programm* erfordert, ließe sich eine CO_2-Verdopplung bis in das Jahr 2090 hinauszögern.

Es beruht auf folgenden Annahmen:

- Der Kohlendioxid-Ausstoß steigt um weitere 30 Prozent bis zum Jahr 2050 und sinkt dann bis 2100 um 40 Prozent, also unter das heutige Niveau.
- Die Abholzrate im tropischen Regenwald und die Zerstörung anderer Wälder gehen schon in den nächsten zehn Jahren um die Hälfte zurück und erreichen danach ein konstantes Maß.
- Die Lachgas-Emissionen steigen nur wenig, weil weniger fossile Brennstoffe verheizt werden.
- Aus dem gleichen Grund steigt der Methan-Ausstoß nur bis zum Jahr 2050. Anschließend sinkt er sogar geringfügig.
- Die FCKW werden drastisch eingeschränkt. Die Herstellung von F-11 und F-12 verringert sich zwischen den Jahren 2000 und 2025 auf zehn Prozent der heutigen Menge. Dennoch verstärkt sich die Gesamttreibhauswirkung der FCKW bis zum Jahr 2100 um 40 Prozent, weil sich die F-22-Produktion verzehnfacht.

Szenario D, die *Vollbremsung* fordert eine sofort beginnende drastische Verminderung des Ausstoßes an Treibhausgasen Der Pro-Kopf-Einsatz an Energie müßte weltweit und stetig sinken. Die Produktion der FCKW und Halone müßte umgehend eingestellt werden.

Bei dieser wünschenswerten Entwicklung käme die Menschheit mit einem „blauen Auge“ davon. Zwar wird in diesem Szenario die Gesamtmenge der Treibhausgase in der Atmosphäre noch bis zum Jahr 2030 steigen und damit 170 Prozent des vorindustriellen Wertes erreichen, danach aber nicht mehr. Verschmutzung und natürlicher Abbau erreichen dann ein Gleichgewicht.[5]

---

5 Graßl, H.; Klingholz, R. Wir Klimamacher. Frankfurt a. M. 1990, S. 155ff.

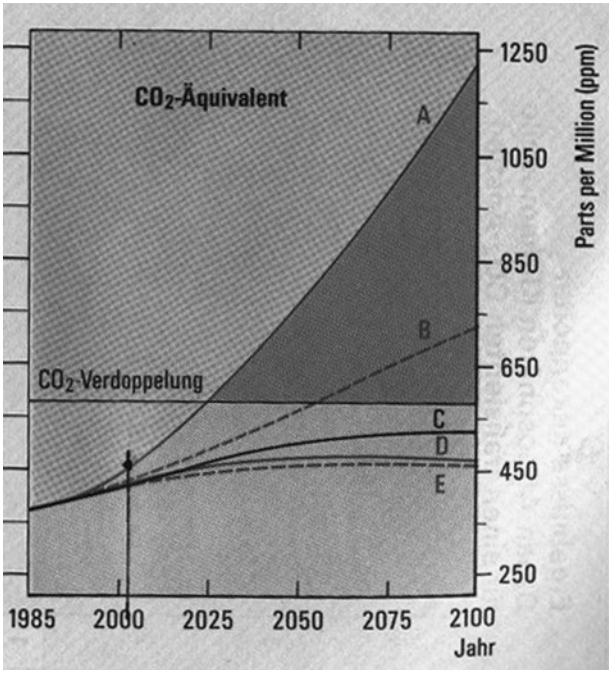


Abb.5: Der erwartete Anstieg des CO_2-Äquivalents für die Szenarien A-E (Quelle Enquete Kommission des Bundestages 1992).

Seitdem sind 15 Jahre vergangen. Zumindest in der Tendenz sollte erkennbar sein, welches der vier Szenarien dem bisherigen Anstieg der klimarelevanten Spurengase entspricht. Abb. 5 zeigt den erwarteten Anstieg des CO_2-Äquivalents für die Szenarien. Zum Ende 2004 wurde ein CO_2-Äquivalent von rund 460 ppm erreicht. Wie in der Abbildung angedeutet, entspricht dies dem Erwartungswert von Szenarium A (business as usual).

Im zweiten IPCC-Bericht wurden sechs Szenarien betrachtet IS92a bis IS92f:

Szenario IS92a geht von folgenden Annahmen aus:

- Bevölkerungswachstum bis 2100 auf 11,3 Milliarden
- Ökonomisches Wachstum um jährlich 2,9 % bis 2025, bis 2100 um 2,3 %
- Verwendung konventioneller und erneuerbarer Energiequellen, deren Anteil bis 2100 auf 43 % steigt
- Bis 2100 werden 73 % der noch vorhandenen Regenwälder vernichtet sein
- Es gibt kein wirksames Abkommen zur CO_2-Reduktion. Abkommen zur

Reduktion der FCKW werden weltweit voll wirksam.

Szenario IS92b geht von der gleichen Annahme wie IS92a aus. Hinzu kommt lediglich eine Vereinbarung zur CO_2-Stabilisierung.

Szenario IS92c:

- Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts dann Rückgang auf 6,4 Milliarden bis 2100
- Jährliches Wirtschaftswachstum um 2,0 % bis 2025, bis 2100 um 1,2 %
- Bis 2100 werden im großen Umfang alternative Energien, einschließlich der Kernenergie genutzt
- Emissionsbeschränkungen wie in IS92a

Szenario IS92d:

- Bevölkerungswachstum wie in IS92c.
- Wirtschaftswachstum bis 2025 um jährlich 2,7 %, bis 2100 um 2,0 %.
- Energieerzeugung wie in IS92c.
- Weltweite Kontrolle einiger Treibhausgase. Ausstieg aus der CFC-Erzeugung bis 1997 in den Industriestaaten.
- Stop des Abbaus der tropischen Regenwälder.

Szenario IS92e:

- Anstieg der Weltbevölkerung auf 11,3 Milliarden.
- Wachstum des Bruttosozialprodukts bis 2025 um jährlich 3,5 %, bis 2100 um 3,0 %.
- bis 2075 Ausstieg aus der Kernenergie.
- Emissionskontrollen bei Anstieg der Kosten für fossile Energieträger.

Szenario IS92f:

- Anstieg der Weltbevölkerung bis 2100 auf 17,6 Milliarden.
- Wirtschaftswachstum bis 2025 um 2,9 % jährlich, bis 2100 um 2,3 %.
- Energieerzeugung wie in IS92e.

Auch diese Szenarien, die mit wachsendem Zeithorizont mit großen Unsicherheiten behaftet sind, führen zu einem Anstieg CO_2-Konzentration in der Atmosphäre Abb. 6 zeigt den erwarteten Verlauf bis 2100. Je nach Szenarium wächst die CO_2-Konzentration zwischen 75 und 220 % gegenüber 1990. Den stärksten Anstieg zeigt IS92e mit seinen Annahmen über ein moderates Bevölkerungswachstum, einen starken Anstieg des Bruttosozialprodukts, eine starke Nutzung fossiler Brennstoffe und einen Ausstieg aus der Kernenergie. Den günstigsten Verlauf zeigt IS92c mit seinen Annahmen über ein geringes Bevölkerungswachstum, ein geringes Wirtschaftswachstum und Einschränkungen beim Verbrauch fossiler Brennstoffe. Szenarium IS92a, dessen Annahmen denen des vorher betrachteten Szenariums 90A „business

as usual“ ähneln, zeigt einen 90A entsprechenden Anstieg der CO_2-Konzentration. Nach 92a soll die CO_2-Konzentration von 450ppm um das Jahr 2030 erreicht werden.

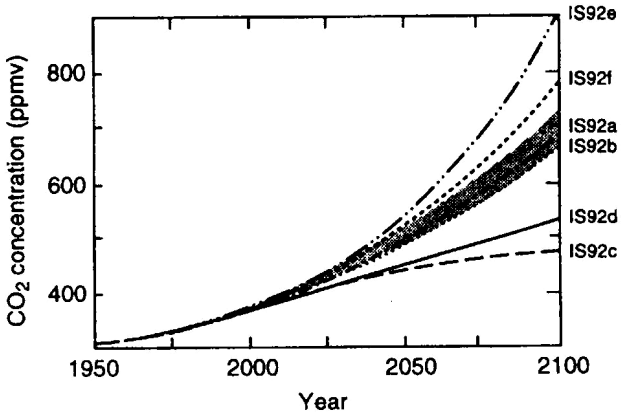


Abb.6: Anstieg der CO_2 Konzentration bis 2100 für die 6 Szenarien IS92a-IS92f. Der Fehlerbereich für IS92a ist geschwärzt angedeutet (Quelle IPCC).

Bemerkenswert erscheint, daß keines der sechs Szenarien zu einer Stabilisierung der CO_2-Konzentration bis 2100 führt.

Die neuen Szenarien, die dem dritten Wissensstandsbericht zugrunde liegen, wurden in einem IPCC-Spezialbericht zusammengefaßt. Es sind Szenarien ohne klimapolitische Maßnahmen, die die große Bandbreite zukünftiger Entwicklungen deutlich machen.

„Die insgesamt 40 Szenarien wurden in vier Familien gruppiert. Alle Szenarien einer Familie haben eine charakteristische „Geschichte“ (storyline) also eine Beschreibung der Beziehungen zwischen Einflußfaktoren und ihrer Entwicklung. Die vier Familien lassen sich vereinfacht in zwei Dimensionen unterscheiden: Die erste Dimension unterscheidet eine Welt mit starker Ausrichtung auf Wirtschaftswachstum (A) von einer Welt, die auf Nachhaltigkeit ausgerichtet ist (B). In der B-Welt werden umweltpolitische Maßnahmen etwa zur Luftreinhaltung berücksichtigt, nicht jedoch Maßnahmen, die spezifisch auf den Klimaschutz ausgerichtet sind (beispielsweise CO_2-Steuern). Die zweite Dimension erlaubt die Unterscheidung zwischen einer Welt zunehmender ökonomischer Konvergenz und sozialer und kultureller Interaktion zwischen den Regionen (Globalisierung 1) von einer Welt mit stärkerer Betonung regionaler Unterschiede und lokaler Lösungen (Regionalisierung 2).

Es ergeben sich vier Szenariofamilien: A1 (Hohes Wachstum), B1 (Globale Nachhaltigkeit), A2 (Regionalisierte Wirtschaftsentwicklung), B2 (Regionale Nachhaltigkeit).

AI-Welt: Hohes Wachstum

Die Al-Storyline weist folgende Charakteristika auf: starke Marktorientierung, anhaltendes Wirtschaftswachstum (weltweit etwa 3% jährlich, entsprechend dem Wachstum der letzten 100 Jahre), starke Betonung von Investition und Innovation in Bildung, Technologie und Institutionen, rasche Einführung neuer, effizienter Technologien, zunehmende Mobilität und zunehmende soziale und kulturelle Interaktionen sowie Konvergenz zwischen Regionen (etwa in Bezug auf das Pro-Kopf-Einkommen). Die heute in Industriestaaten beobachteten demographischen Entwicklungen (sehr niedrige Fertilitätsraten, hohe Alterung) werden wegen der in der A1-Welt angenommenen globalen Konvergenz langfristig auch auf die Entwicklungsländer übertragen. Dies führt nach einem Anstieg der Bevölkerung auf etwa 9 Mrd. Menschen ab 2050 zu einer Abnahme auf etwa 7 Mrd. 2100. Diese Bevölkerungsentwicklung liegt im unteren Bereich der existierenden Projektionen, aber noch über der niedrigsten UN-Projektion.

Die Energieproduktivität steigt jährlich um etwa 1,3% – schneller als im Mittel der letzten 100 Jahre. Allerdings gibt es wegen der niedrigen Energiepreise wenig Anreize für eine effiziente Endenergienutzung, so daß der Primärenergieeinsatz sehr hoch ist und Motorisierung und Zersiedelung weltweit stark ansteigen. Die Szenarien übertragen quasi die ökonomische Entwicklung Japans und Südkoreas nach dem 2. Weltkrieg bzw. Chinas in den letzten Jahren auf alle Entwicklungsländer. Insofern sind sie in Bezug auf das Wirtschaftswachstum und die globale Konvergenz der Pro-Kopf-Einkommen sehr optimistische Szenarien.

Innerhalb der A1-Szenariofamilie wurden je nach angenommener Technologieentwicklung vier verschiedene Pfade unterschieden: Der kohleintensive Pfad A1C, der öl- und gasintensive Pfad A1G, der Pfad A1T mit einem hohem Anteil nicht fossiler Energieträger und schließlich der mittlere Pfad A1B, für den ähnlich schnelle Fortschritte für alle Energieträger bzw. Technologien angenommen werden. Anhand dieser Unterscheidung wird der Einfluß der Technologieentwicklung bei sonst gleichen Antriebskräften (insbesondere gleicher wirtschaftlicher Entwicklung) sichtbar).

BI-Welt: Globale Nachhaltigkeit

Die B1-Szenarien gehen von der gleichen Bevölkerungsentwicklung und einem ähnlich starken Wirtschaftswachstum wie die Al-Szenarien aus. Auch hier wird eine Konvergenz der Entwicklungen in den verschiedenen Regionen angenommen („Globalisierung"). Einkommensdisparitäten schließen sich ebenso rasch wie in den A1-Szenarien.

Die B1-Welt unterscheidet sich jedoch von der A1-Welt durch ein starkes soziales und Umweltbewußtsein; sie wird als „wohlhabend, gerecht und grün" charakterisiert. Die Welt ist durch hohe Effizienzsteigerungen auch im Energiebereich gekennzeichnet. Produktions- und Einkommenszuwächse werden in hohem Maß für den Ausbau sozialer Institutionen, Umverteilungsmaßnahmen und Umweltschutz verwendet. Wirtschaftsstrukturen verändern sich zügig in Richtung auf eine Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft, in der Materialien sparsam eingesetzt werden. Saubere und effiziente Technologien werden rasch eingeführt. Auch vollzieht sich ein Wertewandel in Richtung auf nichtmaterielle Einstellungen.

Die Energienachfrage ist somit – trotz starken Wirtschaftswachstums – niedrig und beträgt im Jahr 2100 nur etwa ein Viertel derjenigen in den A1-Szenarien. Ein hoher Einkommenstransfer und hohe Steuern prägen diese Welt. Globalisierung und Liberalisierung sind mit einer starken internationalen Nachhaltigkeitspolitik verbunden. Forschung und Entwicklung werden intensiv gefördert. Städte entwickeln sich kompakt und mit hohem Anteil an nicht motorisiertem Verkehr. Zusätzlich wird der Urbanisierungstrend gebremst. Selbst ohne klimapolitische Maßnahmen führen diese Entwicklungen zu geringen Treibhausgasemissionen, weil sie bezüglich des Klimaschutzes bereits sehr effektiv sind.

A2-Welt: Regionalisierte Wirtschaftsentwicklung

Die A2-Welt ist heterogen, da die Regionen ihre nationalen, kulturellen und religiösen Identitäten bewahren wollen und unterschiedliche Entwicklungspfade einschlagen. Es bilden sich getrennte wirtschaftliche Regionen aus. Das Wirtschaftswachstum ist deshalb geringer als in anderen Szenariofamilien, ebenso die Geschwindigkeit technologischer Entwicklungen. Technologien verbreiten sich zögerlicher, Handelsströme sind niedriger als in Al-Szenarien. Auch das Pro-Kopf-Einkommen konvergiert nicht so stark wie in den Al- oder B1-Szenarien. Es wird ein sehr hohes Bevölkerungswachstum (15 Mrd. Menschen in 2100) zugrunde gelegt, da im Unterschied zu Al- und B1 Sze-

narien die Fertilitätsmuster nicht konvergieren. Die Energieproduktivität steigt nur um 0,5–0,7% jährlich, die Energienachfrage ist hoch, wenn auch nicht so hoch wie in den Al-Szenarien. Die Energiesysteme der A2-Welt sind sehr heterogen. Der Energieträgermix in den einzelnen Regionen hängt stark von der Ressourcenverfügbarkeit ab.

B2-Welt: Regionale Nachhaltigkeit

Die B2-Storyline beschreibt eine Zukunft, in der lokalen und regionalen Lösungen für eine nachhaltige Entwicklung eine große Rolle zukommt. Internationale Institutionen und Strukturen nehmen dagegen an Bedeutung ab. Umweltschutz wird betont, allerdings nur auf nationaler und regionaler Ebene. Das Bevölkerungswachstum ist geringer als in A2-Szenarien (etwa 10 Mrd. Menschen im Jahr 2100). Das Wirtschaftswachstum ist moderat, die Technologieentwicklung weniger ausgeprägt als in der B1- oder Al-Welt. Viele Projektionen entsprechen den heutigen Trends, etwa in Bezug auf das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum oder die Steigerung der Energieproduktivität. Die Energienachfrage ist niedriger als in den Al- und A2-Szenarien, aber höher als in der B1-Szenarien. Auch der derzeitige Trend abnehmender Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen setzt sich fort.“[6]

Die SRES- Szenarien sind von der internationalen Gemeinschaft der Wissenschaftler akzeptiert. Sie zeigen die große Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungspfade. In ihnen kommen die Unsicherheiten zum Ausdruck über die Ursachen, die zum Anstieg der Treibhausgase führen und über deren Wechselwirkungen.

In Abb.7 sind für einige ausgewählte Szenarien die Projektionen der CO_2-Konzentration gezeigt. Zum Vergleich ist auch die Entwicklung nach IS92a eingezeichnet. Wie zu erwarten, zeigt Szenarium B1 den günstigsten Verlauf, wie er in einer globalen Nachhaltigkeitswelt erwartet wird, die sich als „wohlhabend, gerecht und grün“ charakterisieren läßt. Auch Szenarium A1T zeigt einen günstigen Verlauf. Für beide Szenarien ist ein schneller Übergang zur nichtfossilen Energieerzeugung charakteristisch.

6 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) Energiewende zur Nachhaltigkeit, Berlin 2003. S. 106f.

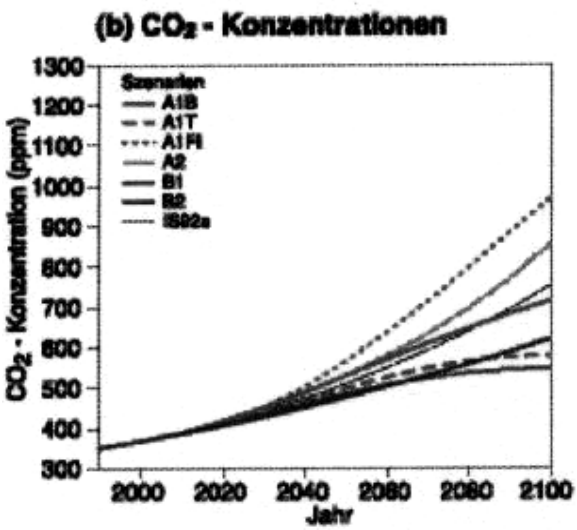


Abb.7: Projektionen der CO_2-Konzentration für einige illustrative SRES- Szenarien (Quelle IPCC).

„Die Emissionen von Treibhausgasen und Schadstoffen variiert stark zwischen und innerhalb der Szenariofamilien. Die höchsten CO_2-Emissionen weisen die fossilintensiven Wachstumsszenarien A1C und A1G auf. Aber auch A2-Szenarien haben sehr hohe Emissionen: Zwar ist das Wirtschaftswachstum weniger stark, aber die langsamere Technologieentwicklung führt zu einer geringeren Minderung der Kohlenstoff- und Energieintensität. A1B- und auch B1 -Szenarien weisen dagegen etwa ab 2050 eine Wende in Richtung Emissionsminderung auf. Dies ist zum einen auf die Trendwende in der Bevölkerungsentwicklung zurückzuführen, zum anderen auf die Verbesserung der Produktivität. Diese Trends gleichen das Wirtschaftswachstum mehr als aus. Die A2-und B2-Szenarien zeigen dagegen stetig wachsende CO_2-Emissionen. Die geringsten CO_2-Emissionen aller Szenarien weisen B1- sowie A1T-Szenarien auf. Beiden gemeinsam ist eine schnelle Entwicklung nicht fossiler Technologien, sie unterscheiden sich aber stark im Energieeinsatz.

Die Szenarien variieren auch in Bezug auf die Landnutzung und ihre Änderung: Der Trend zur Abnahme der globalen Waldflächen wird in den meisten Szenarien umgekehrt, besonders in B1- und B2-Szenarien. Methan- und Lachgasemissionen sind in Al- und B1-Szenarien wegen des angenommenen geringeren Bevölkerungswachstums und der Bevölkerungsabnahme nach 2050 sowie der gesteigerten Produktivität in der Landwirtschaft weit geringer

als in den A2- und B2-Szenarien. Schwefelemissionen sind generell niedriger als in früheren Projektionen, weil angenommen wird, daß die Belastung durch lokale und regionale Luftverschmutzung weit früher zu einer Emissionsminderung führen wird."[7]

Wie im dritten Wissenstandsbericht des IPCC ausgewiesen, erwarten alle Klimamodelle einen Anstieg der globalen mittleren Temperatur nahe der Erdoberfläche zwischen 1990 und 2100 um 1,4–5,8 Grad Celsius.

Selbst das vorstehend erwähnte Szenarium B1 führt zu einer Spannbreite zwischen 1,4 und 2,6 Grad. Für IS92a liegt die Spannbreite zwischen 1,9 und 3,5 Grad.

Zentrales Anliegen der Klimarahmenkonvention ist eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration. Artikel 2 fordert: Ökosysteme sollen in der Lage sein, sich dem Klimawandel natürlich anzupassen, die Nahrungsmittelproduktion soll nicht gefährdet werden und die ökonomische Entwicklung soll nachhaltig erfolgen (s. S.1).

Daraus ergibt sich die Frage nach einer Grenze oberhalb derer die Folgen des Klimawandels nicht mehr tolerierbar sind. Der „Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen" (WBGU) hat in der „Post-SRES"-Zeit diese Frage näher untersucht. Ausgehend von eigenen Expertisen, externen Gutachten und neuen Publikationen kommt der Beirat zu folgender qualitativen Einschätzung:

„Bei Ökosystemen sind die Effekte der Klimaänderungen schon heute erkennbar. Die Grenze, ab der die Schäden am globalen Naturerbe nicht mehr hinnehmbar sind, läßt sich nicht präzise bestimmen, wird aber vom WBGU im Bereich um 2°C globaler Erwärmung gegenüber vorindustriellen Werten eingeschätzt. Auch für die weltweite Ernährungssicherheit scheint die Grenze in diesem Bereich zu liegen, denn oberhalb dieses Wertes ist mit klimabedingten weltweiten Verlusten der Agrarproduktion sowie mit einem starken Anstieg der Anzahl der von Wassermangel bedrohten Menschen zu rechnen. Wegen der schwachen Datenlage und unausgereifter Methodik läßt sich für die Gesundheitsfolgen derzeit noch keine Toleranzschwelle einschätzen. Für einige Regionen können die Klimafolgen allerdings vermutlich bereits bei 2°C mittlerer globaler Erwärmung zu intolerablen Belastungen führen. Zudem könnte der Klimawandel singuläre, katastrophale Veränderungen im Erdsystem hervorrufen, wie z. B. die Umsteuerung der weltweiten Ozeanzirkulation, das Schmelzen großer Eisschilde (Westantarktis, Grönland) oder

7 ebenda, S. 107.

das plötzliche Freisetzen riesiger Methanreserven. Eine quantitative Abschätzung der Schwellenwerte für diese Effekte ist mit großen Unsicherheiten behaftet.

WBGU-Empfehlung: Maximal 2°C Erwärmung verantwortbar

Der WBGU bekräftigt seine Überzeugung, daß zur Abwehr gefährlicher Klimaveränderungen die Klimaleitplanke einer maximalen Erwärmung um 2°C gegenüber vorindustriellen Werten eingehalten werden muß. Da die globale Mitteltemperatur seit der Industrialisierung bereits um 0,6°C gestiegen ist, ist eine weitere Erwärmung von nur noch 1,4°C tolerabel. Dabei sollte die globale, langfristig gemittelte Erwärmungsrate 0,2°C pro Jahrzehnt nicht überschreiten.

Dieses Klimafenster sollte als globales Ziel im Rahmen der UNFCCC vereinbart werden. Die EU sollte hier die Meinungsführerschaft anstreben."[8]

Die Erfüllung des Kyoto-Protokolls, so sie überhaupt erreichbar ist, kann nicht mehr als ein erster kleiner Schritt sein. Selbst bei Erfüllung aller Verpflichtungen könnte eine Erwärmung der Erde nur um 0,04° bis 2100 gebremst werden.

In notwendigen folgenden Vereinbarungen sind daher weit einschneidendere Emissionsbeschränkungen erforderlich, um eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu erreichen, das dem vorstehend definierten Klimafenster Rechnung trägt. Die WBGU-Empfehlung lautet:

WBGU-Empfehlung: Ehrgeizige Minderungsziele vereinbaren

„Angesichts der großen Unsicherheiten über das Klimasystem empfiehlt der WBGU, im Sinn einer Absicherungsstrategie zunächst von einem CO_2-Konzentrationsziel unterhalb von 450 ppm auszugehen. Dies wird nur möglich sein, wenn bis 2050 eine Minderung der globalen energiebedingten CO_2-Emissionen um etwa 45–60% gegenüber 1990 erreicht wird. Zusätzlich müssen deutliche Minderungen der anderen Treibhausgase (insbesondere Methan und Lachgas, aber auch der fluorierten Verbindungen) und anderer indirekt klimawirksamer Stoffe (z. B. Ruß) erfolgen. Daher müssen die Industrieländer ihren Ausstoß von Treibhausgasen bis 2020 um mindestens 20% verringern."[9]

Der Beirat entwickelte in seinem Hauptgutachten „Energiewende zur Nachhaltigkeit" Leitplanken einer nachhaltigen Energiepolitik. Als Leitplan-

8 WBGU Über Kioto hinaus denken, Berlin 2004. S. 1f.
9 ebenda, S. 2.

ke definiert der Beirat quantitativ angebbare Schadensgrenzen, deren Verletzungen heute und in der Zukunft nicht zu tolerierende Folgen hätten.

Leitplanken nachhaltiger Energiepolitik

Ökologische Leitplanken

Klimaschutz

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

Nachhaltige Flächennutzung

10–20% der weltweiten *Landfläche* sollten dem Naturschutz vorbehalten bleiben. Nicht mehr als 3% sollten für den Anbau von Bioenergiepflanzen bzw. für terrestrische CO_2-Speicherung genutzt werden. Dabei ist eine Umwandlung natürlicher Ökosysteme zum Anbau von Bioenergieträgern grundsätzlich abzulehnen. Bei Nutzungskonflikten muß die Sicherung der Nahrungsmittelversorgung Vorrang haben.

Schutz von Flüssen und ihren Einzugsgebieten

Wie bei den Landflächen, so sollten auch etwa 10–20% der Flußökosysteme inklusive ihrer Einzugsgebiete dem Naturschutz vorbehalten sein. Dies ist ein Grund dafür, warum die Wasserkraft nach Erfüllung der notwendigen Rahmenbedingungen (Investitionen in Forschung, Institutionen, Kapazitätsaufbau usw.) nur in Grenzen ausgebaut werden kann.

Schutz der Meeresökosysteme

Der WBGU hält die Nutzung des Ozeans zur Kohlenstoffspeicherung nicht für tolerierbar, weil die ökologischen Schäden groß sein könnten und das Wissen über die biologischen Folgen zu lückenhaft ist.

Schutz der Atmosphäre vor Luftverschmutzung

Kritische Belastungen durch Luftschadstoffe sind nicht tolerierbar. Als erste Orientierung für eine quantitative Leitplanke kann festgelegt werden, daß die Belastungen nirgendwo höher sein dürfen, als sie heute in der EU sind, auch wenn dort die Situation noch nicht bei allen Schadstoffen zufrieden stellend ist. Eine endgültige Leitplanke muß durch nationale Umweltstandards und multilaterale Umweltabkommen definiert und *umgesetzt* werden.

Sozioökonomische Leitplanken

Zugang zu moderner Energie für alle Menschen

Der Zugang zu moderner Energie sollte für alle Menschen gewährleistet sein. Dazu muß der Zugang zu Elektrizität sichergestellt und die Nutzung gesundheitsschädigender Biomasse durch moderne Brennstoffe ersetzt werden.

Deckung des individuellen Mindestbedarfs an moderner Energie

Der WBGU erachtet folgende Endenergiemengen als Minimum für den elementaren individuellen Bedarf: Spätestens ab 2020 sollten alle Menschen wenigstens 500 kWh pro Kopf und Jahr an Endenergie und spätestens ab 2050 wenigstens 700 kWh zur Verfügung haben. Bis 2100 sollte der Wert auf 1000 kWh steigen.

Begrenzung des Anteils der Energieausgaben am Einkommen

Arme Haushalte sollten maximal ein Zehntel ihres Einkommens zur Deckung des elementaren individuellen Energiebedarfs ausgeben müssen.

Gesamtwirtschaftlicher Mindestentwicklungsbedarf

Zur Deckung des gesamtwirtschaftlichen Mindestenergiebedarfs pro Kopf (für indirekt genutzte Energiedienstleistungen) sollte allen Ländern mindestens ein Bruttoinlandsprodukt pro Kopf von etwa 3000 US-$ 1999 zur Verfügung stehen.

Risiken im Normalbereich halten

Ein nachhaltiges Energiesystem sollte auf Technologien beruhen, deren Betrieb im „Normalbereich" der Umweltrisiken liegt. Die Kernenergie kollidiert mit diesen Anforderungen insbesondere durch intolerable Unfallrisiken und ungeklärte Abfallentsorgung sowie wegen der Risiken durch Proliferation und Terrorismus.

Erkrankungen durch Energienutzung vermeiden

Die lokale Luftverschmutzung in Innenräumen durch Verbrennung von Biomasse und in Städten durch Nutzung fossiler Energieträgcr verursacht weltweit schwere Gesundheitsschäden. Die hierdurch verursachte Gesundheitsbelastung, sollte in allen WHO-Regionen jeweils 0,5% der gesamten Gesundheitsbelastung der Region (gemessen in DALYs, „disability adjusted life years") nicht überschreiten."[10]

Bei der Festlegung eines Stabilisierungsniveaus der CO_2-Konzentration ist zu beachten, daß die maximale Konzentration sowohl von der Emission

10 WGBU 2003, a.a.O. S. 115.

anderer Treibhausgase als auch von Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf abhängen.

„Energie- und industriebedingte CO_2-Emissionen tragen einen Großteil zur Klimaänderung bei, und es wird erwartet, daß ihr Beitrag ohne Klimapolitik weiter zunehmen wird (IPCC, 2000). Diese Emissionen können sehr viel genauer gemessen und hochgerechnet werden als diejenigen aus Landnutzungsänderungen und anderer Treibhausgase, die im Kioto-Protokoll (Methan, Lachgas, SF_6 perfluorierte Kohlenwasserstoffe) oder Montreal-Protokoll (FCKW und HFCKW) geregelt werden. Im Gegensatz zu den Auswirkungen dieser langlebigen Treibhausgase ist der Klimaeffekt von anthropogenen Aerosolteilchen (z. B. Sulfate mit Kühlung) und Ruß (Erwärmung) sowie der indirekte Effekt der Vorläufersubstanzen des troposphärischen Ozons (CO,NO_X, VOCs) nur regional. Vor allem über den Strahlungsantrieb der Aerosole herrscht große Unsicherheit.“[11]

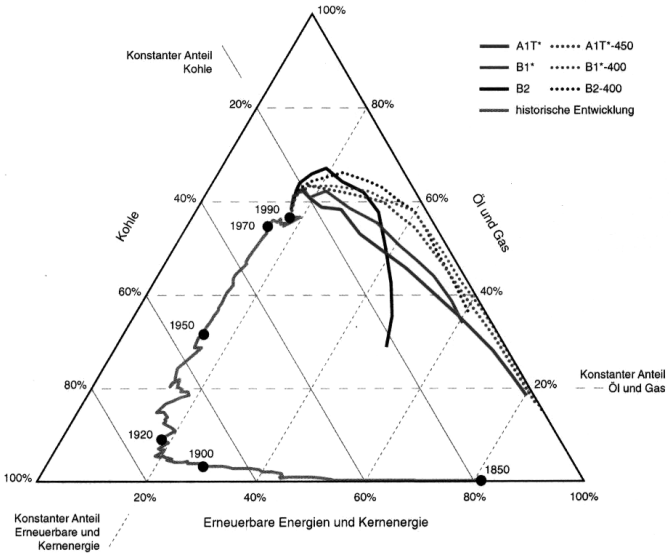


Abb.8: Anteile der Energieträger am globalen Primärenergieverbrauch. Bis 1990 ist die historische Entwicklung gezeigt. (Quelle WBGU).

Ausgehend von den SRES-Szenarien A1T, B1 und B2 untersucht der Beirat drei Referenzszenarien, im Folgenden als A1T*, B1* und B2 bezeichnet. In

11 WGBU 2004, a.a.O. S. 23.

diesen Szenarien wurden verschiedene Kalibrierungen aktualisiert und die Kohlenstoffspeicherung bei Biomasse-Verwertungsanlagen als Netto-CO_2-Senke aufgenommen. In A1T und B1 wurden die Nachhaltigkeitsforderungen der vorstehenden Leitplanken berücksichtigt. Aufbauend auf diesen modifizierten Referenzszenarien wurden anspruchsvolle CO_2-Stabilisierungsziele implementiert: B1* und B2 auf 400ppm und A1T* auf 450ppm.

Die im Resultat erhaltenen Anteile der Energieträger am Verbrauch für die Referenzszenarien A1T*, B1* und B2 sowie die CO_2-stabilisierenden Szenarien A1T*-450, B1*-400 und B2-400 zeigt die globale Entwicklungspfade in einem Dreieck zwischen den Eckpunkten Kohle, Öl/Gas und erneuerbare Energien/Kernenergie (Abb. 8).

Abb. 9 zeigt den Primärenergieeinsatz nach Energieträgern für die Szenarien (a) A1T*,(b) A1T*-450, (c) B1*, (d) B1*-400, (e) B2 und (f) B2-400. Es ist ersichtlich, daß die Verringerung, der Kohlenstoffintensität im fossilen Sektor durch eine verstärkte Nutzung von Gas auf Kosten von Öl und Kohle erfolgt. Insbesondere die Kohlennutzung läuft in den CO_2-stabilisierenden Szenarien A1T*-450 und B1*-400 in der Mitte des Jahrhunderts nahezu aus. Die Energieversorgung zum Ende des 21. Jahrhunderts ruht insbesondere für A1T* / A1T*-450 und B1* / B1*-400 wesentlich auf solarer Elektrizität und solar erzeugtem Wasserstoff. In diesen Szenarien endet die Kernenergienutzung in der Mitte des Jahrhunderts.

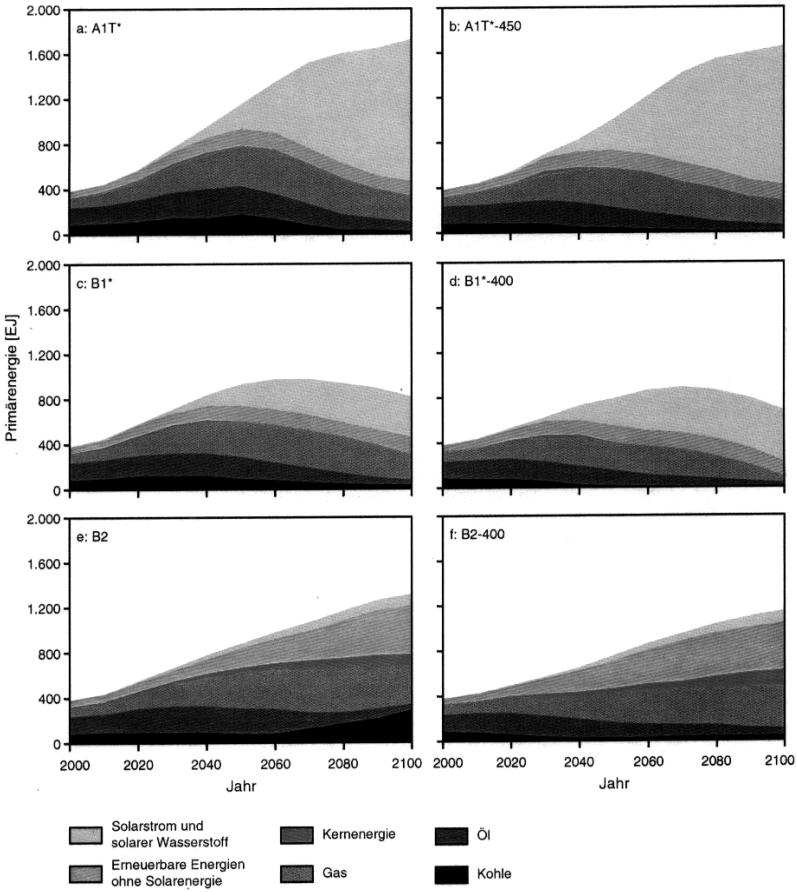


Abb.9: Zeitverlauf des globalen Primärenergie-Potfolios in den Referenzszenarien (Quelle WBGU).

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 35–44*

Wolfgang Böhme

Beitrag zu Thematik „Klima und Menschheit“

Im Workshop des Arbeitskreises am 10.12.2004 gab ich in meinem Beitrag einen kurzen Überblick über die bisherigen internationalen Aktivitäten zur Klimaproblematik und zum Klimaschutz und schätzte ein, dass die Haupterkenntnisse und Schlussfolgerungen in dem gemeinsamen, am 25.11.1993 vorgetragenen Beitrag von K.-H. Bernhardt und W.Böhme (veröffentlicht im Heft 1/2, 1994 der Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät) mit einigen Ergänzungen und Präzisierungen weiterhin gelten. Kopien der Thesen zu diesem Vortrag des Jahres 1993 wurden an alle Teilnehmer am Workshop verteilt und sind hier als Anhang 1 beigefügt.

Von mir wurde ausgeführt, dass, auch international gesehen, Fortschritte beim Verständnis der Klimaproblematik u. a. bestehen in der deutlicheren Unterscheidung innerhalb der Systemhierarchie Atmosphäre-Klimasystem-Erdsystem, in einer enormen Leistungssteigerung der Atmosphäre- und Klimamodelle, im Fortschritt bei der Aufklärung und der modellgestützten Beschreibung der Klimageschichte (mit Übergang zu quantitativen Aussagen seit den letzten Glazialperioden) und in der gewachsenen Einsicht in die (von Bernhardt und Böhme schon 1993 hervorgehobenen) Gefahr abrupter Klimaänderungen für die Möglichkeit irreversibler Übergänge des Klimasystems in bisher nicht (oder sehr lange nicht) aufgetretene Zustände.

Ich hob hervor, dass es bei der Bewältigung der Klimaproblematik grundsätzlich darum geht, die Wechselwirkung zwischen sehr komplexen Vorgängen in der Natur und nicht weniger komplexen Vorgängen in den menschlichen Gesellschaften umfassend zu verstehen, wobei viele Vorgänge sowohl in den einzelnen Bestandteilen des Klimasystems wie auch zwischen den beiden Hauptbestandteilen nichtlinearer Natur sein können, was eine Grundlage dafür ist, dass abrupte Änderungen im Systemverhalten auftreten. Die Unkenntnis oder Nichtbeachtung von solchen Wechselwirkungen nichtlinearer Art kann sich (wie auch in der Diskussion unterstrichen wurde) sehr

wohl in gravierenden Unterschieden des Verhaltens einer Modellwelt und der realen Welt auswirken.

Von mir wurden ausgehend von einigen eigenen konkreten Beiträgen, die zu Veröffentlichungen in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät geführt haben, Vorschläge für weitere Aktivitäten im Zusammenhang mit dem zur Diskussion stehenden Projekt gemacht:

1. Grundsätzlich Behandlung von Wechselwirkungen zwischen natürlichen und gesellschaftlichen komplexen Systemen (einschließlich der Behandlung der Wechselbeziehungen zwischen den Hauptunsicherheiten im Verständnis des Verhaltens dieser Systeme)
2. Studium spezieller Moden (insbesondere sprunghafte Zustandsänderungen) des Verhaltens komplexer dynamischer Systeme (z.B. plötzliches Auftreten und Änderungen von analogen Zuständen)
3. Erarbeitung und Teilnahme an der Bearbeitung eines Forschungsprojektes etwa unter einem Titel „Ausdehnung der Anwendung der in der Wetter- und Witterungsvorhersage gesammelten Erkenntnisse mit der Nutzung von Ensemblemethodiken bei einer statistischen Vielfalt von Zuständen komplexer dynamischer Systeme auf das Klima- bzw. Erdsystem (Basis: u.a. paläologische, auf die Klimaentwicklung bezogene Zeitreihen von Proxydaten, d. h. von indirekt erschlossenen Daten z. B. über Temperatur und Niederschlag aus Eisbohrkernen, Baumringaufschlüssen usw.).

   In der Zwischenzeit (bis September 2005) hierzu zum Teil in Abstimmung mit K.-D. Jäger entwickelte Gedanken für das praktische Vorgehen sind im Anhang 2 wiedergegeben.

   Weitere Ausführungen bezogen sich insbesondere

a. auf die Stellungnahmen des Zwischenstaatlichen Komitees für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change = IPCC), insbesondere seine Dritte Einschätzung aus dem Jahre 2001 in der Form des „Syntheseberichtes“[1], wobei zunächst Aussagen zum Nachweis anthropogener Einflüsse, zur Nutzung von Szenarios, zu Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen, zu sozioökonomischen Auswirkungen, zu Folgen der Trägheit des Klimasystems und zu den Hauptunsicherheiten der Aussagen aufgeführt wurden;
b. auf die Stellungnahmen des Deutschen Rates für Nachhaltige Entwick-

1 Erhältlich in deutsch kostenlos von Dr. Helmut Kühr, DLR-PT, Königswinter Str. 522, 53227 Bonn, Tel. 0228-4492-411, helmut.kuehr@dlr.de ; in Englisch etc. von www.ipcc.ch

lung[2], in denen als Leitlinien einer Nachhaltigkeitspolitik insbesondere Lebens- und Umweltpolitik, Generationengerechtigkeit, globale Verantwortung und sozialer Zusammenhalt aufgeführt werden, die überwiegend enge Beziehungen zur Klimaproblematik und zum Klimaschutz haben;

c. auf Forschungsarbeiten, insbesondere auf solche, die im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) bzw. durch das UBA gefördert durchgeführt werden; eine dieser Studien[3] wägt eine größere Zahl von konzeptionellen Varianten für die weitere unter dem Aspekt der Gerechtigkeit international zu regelnde Klimaschutzpolitik ab, die den Festlegungen im Artikel 2 der 1992 beschlossenen UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) genügen, und zwar hinsichtlich ihrer Potentiale, ihrer Machbarkeit und Effizienz. Ich regte an, die unter c) erwähnte Studie im Arbeitskreis von einem der Autoren oder einem Vertreter des UBA vorstellen zu lassen und zu diskutieren.

Ich dankte K.-H. Bernhardt für dessen Mitwirkung an wesentlichen Teilen dieses Beitrags.

Anhang 1

Thesen zum Vortrag „Klima und Menschheit“ von K. Bernhardt und W. Böhme 1993

1. Das Klima bezeichnet die statistische Gesamtheit der atmosphärischen Zustände und Prozesse in ihrer raum-zeitlichen Verteilung, Es schließt insbesondere seltene und extreme meteorologische Erscheinungen als integrierende Bestandteile ein und erfordert zur Beschreibung seines jeweiligen Zustandes langjährige Beobachtungen (z.B. über 30 oder 50 Jahre).
2. Das Klima eines gegebenen Naturraumes resultiert aus der Wechselwirkung zirkulations- und lagebedingter Faktoren, wobei erstere den Einfluss des gesamten klimatischen Systems, letztere die lokalen geographischen Bedingungen (geographische Breite, Meereshöhe, Beschaffenheit der Unterlage) zum Ausdruck bringen.
3. Die Einwirkung der atmosphärischen Umwelt auf den Menschen als bio-

2 www.nachhaltigkeitsrat.de

3 „Evolution of commitments under UNFCCC: involving newly industrial economies and developing countries” in UBA-Reihe „Climate Change” als Nr .01/03 ; www.umweltbundesamt.de

psychosoziale Einheit bezieht sich auf alle Komponenten dieser Einheit, wobei der Einfluss auf die Physis, bereits von Hippokrates beschrieben und von Humboldt zu einem Element seiner Klimadefinition erhoben, im Morbiditäts- und Mortalitätsgeschehen besonders evident ist.

4. Im sozialen Bereich beeinflusst die atmosphärische Umwelt alle Seiten des Produktionsprozesses, bringt Gratiseffekte und Störfaktoren (einschließlich meteorologischer Ereignisse mit Katastrophencharakter) hervor und konstituiert Naturbedingungen für den gesellschaftlichen Reproduktionsprozess.
5. Die Anthroposoziogenese vollzog sich in der – bezogen auf geologische Zeiträume – Ausnahmesituation eines Eiszeitalters mit aufeinanderfolgenden Kalt- und Warmzeiten (charakteristischer Zeitmaßstab: 10^5 bzw. 10^4 Jahre) und war innerhalb dieses Rahmens mehrfach von abrupten Klimaänderungen (Zeitmaßstab unter 10^2 bis zu 10^3 Jahren) in vorgeschichtlicher Zeit begleitet. Solche abrupten Klimaänderungen sind nach neuesten Untersuchungsergebnissen an Eisbohrkernen sowohl für die vorletzte Warmzeit Eem-Interglazial), als auch für die beiden letzten Kaltzeiten (Saale- und Weichselglazial) nachgewiesen, fehlen aber augenscheinlich in der holozänen Warmzeit und hängen vermutlich mit untereinander verkoppelten Prozessen im System polarer Eisschilde – thermohaline ozeanische Zirkulation – Atmosphäre höherer Breiten zusammen.
6. Das relativ gleichförmige Klimaregime des seit ca. 10^4 Jahren andauernden Interglazials durchlief im zu Ende gehenden Jahrtausend eine vergleichsweise bedeutende Schwankung zwischen „mittelalterlichem Optimum“, „kleiner Eiszeit“ und nachfolgender stufenweiser Erwärmung, die zumindest zeitweise und regional (Erwärmung der Arktis im Zeitraum 1920–1940) abrupt erscheint.
7. Die Einwirkungen des Menschen auf das Klima durch Veränderungen der Erdoberfläche (Landnutzung) sowie durch Energie- und Stoffeintrag in die Atmosphäre betrafen in der Vergangenheit hauptsächlich lagebedingte Klimafaktoren, beeinflussen aber mit der weltweiten Gas- und Partikelemission – besonders in Hinblick auf strahlungsaktive („Treibhaus“) und für die Spurenstoffchemie wirksame Gase (FCKW) – zunehmend auch die allgemeine Zirkulation und alle Komponenten des klimatischen Systems.
8. Das Stadtklima mit seinen charakteristischen Besonderheiten in bezug auf das Temperatur-, Strahlungs-, Wind-, Bewölkungs- und Niederschlagsfeld sowie auf luftchemische Parameter stellt einen Modellfall für ein anthropogen beeinflusstes Lokalklima, zugleich aber die Lebensumwelt für

einen wachsenden Anteil der Weltbevölkerung dar.

9. Die Sensitivität der Gesellschaft gegenüber Zuständen und Prozessen in der atmosphärischen Umwelt und damit auch gegenüber Klimaschwankungen hat im Laufe der Geschichte nicht durchweg abgenommen, sondern gewinnt im Zusammenhange z. B. mit Bevölkerungswachstum und -konzentration, erhöhtem Energie- und Ressourcenbedarf, vermehrtem Anfall an Abprodukten, veränderten Technologien und Spezialisierung der Wirtschaftsstruktur (bis hin zur Monokultur bzw. -ökonomie) eine neue Qualität, wobei infolge der globalen ökonomischen Verflechtung auch lokale Witterungs- bzw. regionale Klimaereignisse weltweite Auswirkungen haben können.
10. Die gegenwärtige und die zu erwartende künftige Klimaänderung resultieren aus der Überlagerung natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren; relevante Veränderungen werden sich voraussichtlich einstellen, noch bevor eine hinreichend zuverlässige Grundlage für ihre Vorhersage geschaffen sein wird. Infolge der Komplexität und Nichtlinearität des Klimasystems ist eine ausreichend zuverlässige Klimavorhersage, wenn nicht unmöglich, so doch zumindest außerordentlich schwierig. Andererseits ist das Klimasystem wegen des ständigen Durchflusses der von der Sonne zugestrahlten Energie zu interner Strukturbildung bzw. zur Aufrechterhaltung vorhandener Struktur fähig. Dies kann sich günstig auf die Vorhersagbarkeit auswirken.
11. Auf Grund der bereits anthropogen freigesetzten strahlungswirksamen bzw. chemisch wirksamen Spurenstoffe sind insbesondere globale Erwärmung und Abbau stratosphärischen Ozons zu erwarten, deren zeitlicher Ablauf und regionale Verteilung aber im einzelnen nicht vorhersagbar sind.
12. Ungeachtet der bestehenden Unsicherheiten im Detail sollte die weltweit zu verfolgende Strategie darin bestehen, den Ablauf der anthropogenen Klimaänderungen durch Reduktion der Emission zu verlangsamen und solche Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen, die auch dann nutzbringend sind, falls die erwarteten Klimaänderungen nicht oder verspätet eintreten.

Anhang 2

Gedanken und Möglichkeiten zur Einschätzung der Entwicklung des Klimas in Mitteleuropa in den ca. nächsten 50 Jahren

I. Generelle Grundlagen:

1. Als Grundlage für eine Einschätzung der globalen Klimaentwicklung kann zur Zeit der 3. Sachstandbericht des IPCC von 2001 hinsichtlich einer fortschreitenden, durch menschliche Aktivitäten (Emission von Treibhausgasen) bedingten globalen Erwärmung mit den entsprechenden Konsequenzen (u. a. Gletscherschmelzen, Meeresspiegelanstieg) gelten.
2. In den letzten 25 Jahren wurde eine enorme Leistungssteigerung der Atmosphären- und Klimamodelle erreicht.
3. Aber viele Vorgänge sowohl in und zwischen den einzelnen Bestandteilen des Klimasystems und zwischen dem Klimasystem und der menschlichen Gesellschaft sind nichtlinearer Natur. Sie können die Ursache für abrupte Änderungen im Verhalten des Klimasystems sein. Aus Proxydatenreihen wird immer deutlicher, dass solche rasche Zustandsänderungen des Klimasystems (z.B. hinsichtlich des Temperatur- und Niederschlagsverhaltens) in der Vergangenheit (auch innerhalb des Holozäns) mehrfach stattgefunden haben.
4. Die Unkenntnis oder Nichtbeachtung von solchen Wechselwirkungen nichtlinearer Art kann sich sehr wohl in einem Unterschied des Verhaltens der betrachteten Modellwelt und der realen Welt auswirken.
5. Die Menschheit kann auf die erwartete Entwicklung des Klimas durch Vermeidung von weiteren Störungen des Klimasystems (insbesondere durch Reduzierung der Treibhausgasemissionen) sowie durch rechtzeitige Anpassungsmaßnahmen auf mögliche Klimaentwicklungen reagieren.
6. Hinsichtlich der Notwendigkeit der globalen Verminderung der Treibhausgas-Emissionen besteht prinzipiell Übereinstimmung. Die regionalen Anpassungsmaßnahmen müssen jedoch die Vielzahl möglicher unterschiedlicher abrupter Klimamodifikationen (u.a. in thermischer und hygrischer Hinsicht sowie hinsichtlich der zeitlichen/jahreszeitlichen Strukturierung) berücksichtigen. – Da die konkreten Anpassungsmaßnahmen für die verschiedenen Klimavariationen oftmals sehr spezifisch sein müssen und zeit-, kosten- und materialaufwendig sein können, ist es sehr wünschenswert, möglichst frühzeitig in Erfahrung zu bringen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die infrage kommenden abrupten Klimaänderungen erwartet werden müssen.

II. Speziellere problembezogene Erkenntnisse über das Verhalten von Atmosphäre und 0zean als Teil des Klimasystems:

1. In den letzten 20 Jahren wurden bei der Einführung und zunehmenden Nutzung der Ensemblemethodik in der Wetter- und Witterungsvorhersage wesentliche Fortschritte gemacht und neue Erkenntnisse erschlossen. Dem Wesen nach besteht diese Methodik darin, dass die Vorhersage nicht nur für einen Fall von Anfangswerten und/oder Modellparametern, sondern für ein ganzes Ensemble unterschiedlicher Anfangswertverteilungen und/oder Modellparameter durchgeführt wird und dass dann die Aussagen der Vorhersage grundsätzlich probabilistischen, d.h. Wahrscheinlichkeitscharakter haben (z.B. Balzer und Emmerich 1992, Ehrendorfer 1997, Ziehmann 1998). Vom Autor wurde mit Erfolg eine Erweiterung auf Ensembles von statistischen Vorhersageverfahren vorgenommen (Böhme 1999, Böhme et al. 2001).
2. Diese Verfahren und Erkenntnisse lassen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf das Gebiet der Vorhersage des Zustandsablaufs von Klimasystemen ausdehnen. Folgendes wird hierbei benutzt bzw. erkannt:
3. Unbestritten ist: Die Wetter- und Witterungsprozesse in der Atmosphäre unterliegen den Grundsätzen des deterministischen Chaos (Lorenz 1963, Fraedrich 1996, z.B. auch Böhme 1999). Das bedeutet zumindest, dass die Vorhersagbarkeit des Wetterzustandes bzw. -ablaufes auf 5 bis 10 Tage begrenzt ist.
4. Andererseits gab es in zunehmenden Maße (Smith 1995, Böhme 1993, 1994, 1999 besonders Seiten 159-164, Bernhardt et al. 1994) Erkenntnisse, dass definitive kurzzeitige (d.h. im Extremfall impulshafte) Störungsvorgänge zu Abweichungsstrukturen führen, die das „Rauschen“ des deterministischen Chaos überstehen, obwohl die Amplituden der Komponenten des „Rauschens“ um den Faktor 10 größer sind als die Amplitude der durch die Störung generierten Abweichungsstrukturen. Zum Beispiel sind diese Abweichungsstrukturen nach hochreichenden Vulkaneruptionen über mehrere Jahre nachweisbar, obwohl die anfängliche Temperaturstörung nur wenige Zehntel °C beträgt.
5. Es ist dabei offensichtlich, dass es sehr bald nach solchen kurzzeitigen Störungen für den weiteren Ablauf der Abweichungsstrukturen nicht mehr von Belang ist, wie die Abweichungsstrukturen entstanden sind und ob sie eventuell von internen Prozessen des Klimasystems (und nicht von externen Anregungen) herrühren. Dies erleichtert es, das Auftreten analoger Zustände prognostisch zu verwerten.

6. Wenn man für einen bestimmten Witterungsablauf um einen Stichtag z. B. über 10 Tage in Mitteleuropa Analoga in der Vergangenheit mit gleichem Jahreszeitenbereich und mit einem Ähnlichkeitswert über einer bestimmten Grenze sucht, so findet man bei einer nicht zu hohen Grenze für den Ähnlichkeitswert leicht eine große Anzahl solcher Analoga, die aber mit ablaufender Vorhersagezeit recht schnell divergieren, also nur für einen relativ kurzen Zeitraum ein Vorhersagepotential haben. – Wenn man dann zum Witterungsverlauf zum gleichen Zeitpunkt (zum gleichen Stichtag) an anderer Stelle (zum Beispiel über Nordamerika) Analoga aus der Vergangenheit in ähnlicher Weise heraussucht, so sind darunter im Allgemeinen auch Analoga, die denselben „Analogieabstand" haben wie Analoga in Mitteleuropa. Das Ensemble von Analoga, die an beiden Stellen (z.B. Mitteleuropa und Nordamerika) den gleichen Analogieabstand haben, divergieren in der Regel wesentlich langsamer als das Ensemble des Gesamtkollektives, d. h. mit diesen Analoga gibt es ein höheres Vorhersagepotential (detailliertere Erläuterungen hierzu in Böhme 2004, S.104-106). Mit einem Ensemble solcher Witterungsanaloga in Mitteleuropa, die in ähnlicher Weise mit gleichen Analogieabständen zugleich in anderen Regionen auftreten, können Vorhersagen für einen Zeitraum gemacht werden, der in der Größenordnung um den Faktor 10 länger ist, als wenn man alle Analoga gleichzeitig benutzt, die sich in Mitteleuropa allein ergeben.
7. Generell hängt diese eigenartige Eigenschaft der atmosphärischen Vorgänge wahrscheinlich mit der Fähigkeit der Atmosphäre oder des Klimasystems (als komplexe nichtlineare Systeme) zur Selbstorganisation zusammen. Die in Selbstorganisation entstehenden atmosphärischen Strukturen haben die Eigenschaft, dass die Lebenszeit einer Struktur (und damit auch die oberer Grenze der Vorhersagbarkeit) umso größer ist (z. B. Fortak 1982 u.a. S.92 f., Böhme 2004), je größer die räumliche Struktur ist (zum Beispiel Windhose, Tornado, Tropischer Wirbelsturm, Zentraltief der gemäßigten Breiten).
8. Es gibt keine Anhaltspunkte dafür, dass diese Erkenntnisse nicht auch auf das Verhalten des Klimasystems anwendbar sind.

III. Wie könnte man zur Nutzung dieser Eigenschaft und bei der Verwendung paläoklimatischer Datenreihen (Proxydaten) vorgehen, und zwar für einen Zeitraum von t = 0 bis t = - T ?

1. Wir gehen davon aus, dass wir an N Stellen Proxydatenreihen X_i (i = 1 .....N) haben. Dabei kann es sich um beliebige, unterschiedliche klima-

tologische Elemente handeln (z. B. Temperatur, Niederschlag, Jahresmittelwert, bzw.0 –Summen, andere grob abgeschätzte Werte der Feuchteverhältnisse, Jahreszeitenverhältnisse, Häufigkeit von Extremverhältnissen etc., sie müssen nur objektiv definiert sein).

2. Aus der Reihe (1)X_1 (z.B. Reihe aus Mitteleuropa) werden j analoge Verhältnisse aus der Vergangenheit (das können auch Zustandabläufe sein) festgestellt. Sie haben die Analogieabstände zu „heute“ von ($A_j(X_1)$ mit j = 1 .....$D_{1,j}$).
3. Von anderen Orten werden die Zeitreihen X_i anderer klimatologischer Größen auf ihre Analoga (der jeweils eigenen Reihe) $A_j(X_i)$ mit j = 1.....D_{ij} untersucht, z.B. zunächst für eine Proxyreihe (2) X_2 aus Südamerika usw.
4. Dann werden die Analogieabstände A der Reihe (1) gesucht, die auch in der Reihe (2) auftreten. Das Ensemble dieser in (1) und (2) gleichzeitig auftretenden Analogieabstände steht dann für eventuelle prognostische Aussagen zur Verfügung. Man kann aber auch gleichzeitig noch weitere Reihen auf parallel auftretende Analogieabstände untersuchen und hieraus gegebenenfalls weitere strukturelle und inhaltliche Schlüsse abzuleiten versuchen.

Literatur

Balzer, K., Emmrich, P., 1995: Gratis two-model-ensemble versus EPS (Ensemble Prediction System). Proceedings Fifth Workshop on Meteorological Operational Systems, ECMWF Reading Nov.1995.

Bernhardt, K.-H., Böhme, W., 1994: Klima und Menschheit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 1994, Heft 1/2 , 51–90.

Böhme, W., 1993: Untersuchungen zur Reaktion des Klimasystems auf große vulkanische Eruptionen mittels Phasenebenen-Darstellungen. Meteorol. Zeitschrift N.F. 2, 76–80.

Böhme, W., 1994: Comparison study of the response of the climate system to major volcanic Eruptions and El Nilo events. In: Grasman, J., G. van Straten (Eds.): Predictability and nonlinear modelling in natural sciences and economics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 65–85.

Böhme, W., 1998: Atmosphärische Zirkulation und Chaos. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 24, Heft 5, 151–182.

Böhme, W., 1999: Anwendung der Methoden der Ensemblevorhersage bei komplexen dynamischen Systemen auf statistische Verfahren. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 30, Heft 3, 145–151.

Böhme, W., 2004: Nachweis von speziellen Zusammenhängen zwischen Teilsystemen von komplexen dynamischen Systemen – Beispiel: Southern Oscillation und Witterung in Mitteleuropa. – Sitzungsberichte der Leibnitz-Sozietät, Band 64, 91–109.

Böhme, W., Enke, W. und Witt, A., 2001:Ein Zugang zur Langfristvorhersage mittels Nutzung von Ensembles unterschiedlicher Projektionen des Phasenraumes? Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologentagung 18. bis 21. September 2001. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik, Heft Nr. 27/ Publ. Nr. 399 (2001).

Ehrendorfer,M., 1997: Predicting the uncertainty of numerical weather forecasts: a review. Meteorol. Zeitschrift. N.F. 6, 147–183.

Fortak, H., 1982: Meteorologie. Dietrich-Reimer-Verlag Berlin , 294 S.

Fraedrich, K., 1996: Das Lorenz-Modell: Ein Paradigma für Wetter und Vorhersagbarkeit. promet 25, 62–79.

Lorenz, E., 1963: Deterministic nonperiodic flow. J. Atm. Sci. 20, 130–141.

Smith, L.A., 1995: Ensemble predictions and chaotic systems. 6th International Meeting on Statistical Climatology, 19 – 23 June, Galway, Ireland, 599–602.

Ziehmann, Chr., 1998: Comparison of ECMWF ensemble forecasts with a multi-model ensemble consisting of a few operational models. Tellus.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 45–54*

Klaus-Dieter Jäger

Klimawandel im Holozän – Problemanalyse am Beispiel Mitteleuropa

Die Tatsache einer aktuell ablaufenden Klimaveränderung ist im Schrifttum unbestritten, da durch Beobachtungen und Messungen gut belegt, sowohl im regionalen Rahmen Mitteleuropas wie auch weltweit, in globalem Maßstab (zusammenfassend aktuell u. a. J. Rapp 2000; P. Hupfer & W. Kuttler 2005, S. 285–294).

Strittig ist jedoch der anthropogene Anteil, d. h. inwieweit überhaupt gesellschaftliche bzw. technische Maßnahmen beteiligt sind.

Eine solche Frage ist nahe liegend, weil Klimaänderungen und Klimaschwankungen den gesamten Gang der Erdgeschichte begleitet haben (M. Schwarzbach 1950). In den letzten zwei Jahrmillionen der jüngeren Erdgeschichte haben sie besonders extreme Ausmaße angenommen, die mit dem Begriff des Eiszeitalters angedeutet werden.

Vielfältige Zeugnisse dieser Klimaschwankungen wurden vor allem im letztvergangenen Jahrhundert durch geowissenschaftliche Disziplinen, wie Quartärgeologie, Geomorphologie, Quartärpaläontologie (Wirbeltierpaläontologie und Paläomalakologie; Pollenanalyse und Untersuchung pflanzlicher Großreste) nachgewiesen, detailliert erforscht und mit Publikationen dokumentiert (beispielhaft zusammenfassend im deutschsprachigen Schrifttum besonders P. Woldstedt 1955, 1958; B. Frenzel 1967; H.-D. Kahlke 1981 sowie U. Berner & H.-J. Streif 2000).

Belegt ist nach diesen Untersuchungen, dass jahrtausendelange Kaltphasen mehrfach zu Vergletscherungen gegenwärtig eisfreier Gebiete und entsprechender Flächenverlagerung und -vergrößerung eisnaher Bereiche führten, welche mit Warmphasen in vergleichbarer zeitlicher Größenordnung wechselten, in deren Ergebnis sich ausgedehnte Regionen im Vergleich zur Gegenwart langfristig höherer Mitteltemperaturen erfreuten.

Analoge langfristige Klimaschwankungen von vergleichbarer zeitlicher Größenordnung lassen sich aus paläobotanischen Untersuchungen für das

vorausgehende Erdzeitalter des Neogens (Jungtertiär), etwa am Beispiel des pflanzlichen Fossilinhaltes in den miozänen Schichtenfolgen der Lausitzer Braunkohlentagebaue ablesen (D. H. Mai 1967, bes. S. 61) und mit Hilfe der Pollenanalyse noch weiter in das Paläogen (Alttertiär) zurückverfolgen (W. Krutzsch 1967).

Belegbar ist, dass diese aus dem Verlauf der Erdgeschichte bekannten Klimaschwankungen und insbesondere die für Verlauf und Zeugnisse des Eiszeitalters insgesamt verantwortlichen auf natürliche Ursachen zurückgehen, deren Mechanismus vorrangig auf periodisch wechselnde astronomische Positionen des Planeten Erde zur Sonne zurückzuführen ist. Im Detail sind die dafür maßgeblichen Gestirnbewegungen sowie deren Folgewirkungen für Einstrahlungsgewinn und -verteilung auf der Oberfläche des Planeten Erde seit den grundlegenden Forschungen des serbischen Gelehrten M. Milanković (1920; 1930; 1941) im Wesentlichen bekannt.

Dies gilt auch für die zugrunde liegenden Periodizitäten, was deren Heranziehung für eine kalendarische (sog. „absolute“) Chronologie (zu deren Problematik H. Jaeger 1981, S. 311) erdgeschichtlicher Ereignisse in den letzten beiden Jahrmillionen ermöglicht hat (J. Kukla 1969).

Nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen ist die Nordhemisphäre des Erdplaneten vor ca. 10.000 Jahren in eine Warmphase des Eiszeitalters eingetreten, die gegenwärtig noch andauert und die vorausgehende Kaltphase mit ihren nachgeordneten kurzzeitigeren Schwankungen beendet hat.

Extreme Ausschläge von Mittelwerten für Temperatur und Niederschlag sind in diesen Jahrtausenden ausgeblieben. W. S. Broecker (1966, S. 66) spricht dabei von einer „Ausnahmeerscheinung in der jüngeren Klimageschichte unseres Planeten. Nie zuvor in den vergangenen 100.000 Jahren herrschten über so lange Zeiträume derart konstante und ausgeglichene Witterungsbedingungen ...“

Das bedeutet freilich nicht, dass die mittleren Beträge in dem gesamten Zeitraum absolut unveränderlich und stabil geblieben sind. Mit meteorologischen Messwerten sind indessen Veränderungen auch für kurze Beobachtungszeiträume nur in Bezug auf die letzten 3 bis 4 Jahrhunderte und überdies nur für den europäischen Kontinent erfassbar (H. v. Rudloff 1967; ferner F. Baur 1959; G. B. Wales-Smith 1971; G. MÁnley 1974; J. Rapp 2000; R. Brázdil, H. Valašek, Zb. Sviták & J. Macková 2002).

Dieser Beobachtungszeitraum ist weder ausreichend für eine Beurteilung der in den letzten 10.000 Jahren insgesamt erreichten Schwankungsbreite me-

teorologischer Erscheinungen noch für die Abschätzung etwa wirksam gewordener bzw. noch wirksamer Änderungstendenzen.

Nur für die den frühesten Messreihen vorangehenden ersten und mittleren Jahrhunderte im zweiten Jahrtausend christlicher Zeitrechnung ist zumindest für Europa und den Nordatlantikraum, besonders aber für Mitteleuropa, eine teilweise Kompensation der fehlenden Messwerte anhand schriftlicher bzw. bildlicher Quellen überhaupt möglich, die allerdings in jüngster Vergangenheit, d. h. besonders in den letzten beiden Jahrzehnten, auch verstärkt genutzt worden sind (u. a. Chr. Pfister 1999; Chr. Pfister, R. Brázdil & R. Glaser 1999; R. Glaser 2000; ferner A. E. J. Ogilvie 1991 und 1998; Chr. Pfister, G. Schwarz-Zanetti, F. Hochstrasser & M. Wegmann 1998).

Für weiter zurückliegende Jahrtausende stehen lediglich Proxydaten (Näherungswerte, vgl. zu Begriffsbestimmung und Vielfalt Chr. Pfister 1999, S. 16–18) zur Verfügung, die im Wesentlichen von den Naturwissenschaften sowie ergänzend teilweise von der Archäologie bereitgestellt werden. Letztere trägt darüber hinaus gemeinsam mit physikalischen und botanischen Verfahren der Altersbestimmung (neuerdings G. A. Wagner 1995, 1998) zur Ereignischronologie bei, soweit diese nicht den Befunden für klimageschichtliche Aussagen inhärent ist, wie im Falle der Auswertung von Baumringfolgen durch die Dendroklimatologie (regional beispielhaft für Mainfranken und Nachbarregionen bei R. Glaser 1991) auf der Grundlage der Dendrochronologie, die jetzt – wenigstens für Mitteleuropa wiederum – immerhin auch für den Gesamtzeitraum des letzten Jahrzehntausends zur Verfügung steht (Spurk et al. 1998).

Ermittelte Proxydaten ermöglichen nicht nur eine detaillierte Kennzeichnung klimatischer Gegebenheiten für zurückliegende Zeiträume unabhängig von instrumentell gewonnenen Messwerten sowie schriftlich oder bildlich überlieferten Angaben über Klimazustände der Vergangenheit. Bei ausreichend genauer Datierbarkeit ergibt der Vergleich von Proxydaten unterschiedlicher zeitlicher Zuordnung Einblicke in Charakter, Verlauf und Ausmaß von Klimaänderungen der Vergangenheit.

Schriftlich überlieferte Witterungs- und Klimazustände der Vergangenheit sind mit Hilfe von Proxydaten häufig überprüfbar und diesbezügliche Angaben gelegentlich sogar korrigierbar. Für Zeiträume ohne schriftliche oder bildliche Zeugnisse zu Wetter und Klima der Vergangenheit bilden sie die alleinigen Quellen klimageschichtlicher Aussagemöglichkeiten. Mit ihrer Hilfe wird jedoch andererseits der gesamte zeitliche Rahmen der letzten Jahrtausende für klimageschichtliche Aussagen zugänglich. Feststellungen wie

die vorstehend wiedergegebene Aussage von W. S. Broecker (1966, S. 66) über Ausmaß und Grenzen klimatischer Veränderungen in den letzten 10.000 Jahren sind nur dank verfügbarer Proxydaten überhaupt möglich.

Allerdings sind nicht alle Besonderheiten vergangener Klimazustände und -veränderungen mit gleicher Genauigkeit anhand von Proxydaten erfassbar, freilich auch nicht in gleicher Detailliertheit von praktischem und prognostischem Interesse. Mit unterschiedlicher Quellenlage und Differenziertheit sind vorrangig Angaben über Temperatur und Wasserdargebot, letzteres in integrierten Aussagen zum Landschaftswasserhaushalt, verfügbar, wobei in letztere sowohl Niederschlagsangebot als auch indirekt (über Verdunstung einerseits und Frost andererseits) nochmals die Temperaturen eingehen. Unabhängig von noch erörterungsbedürftigen Details bleibt allerdings zunächst festzuhalten, dass mit Temperatur und Niederschlag für die Vergangenheit gerade solche Kenngrößen klimatischer Zustände erfassbar werden, die im Hinblick auf mögliche aktuelle Änderungstendenzen für Gegenwart und Zukunft von besonderem praktischen, technischen, sozialen und politischen Interesse sind, wobei die Temperatur an erster Stelle steht. Geeignete Aussagemöglichkeiten bieten vorrangig fossilführende Ablagerungen aus den letzten Jahrtausenden der jüngsten Erdgeschichte.

Methodische Grundlage solcher Aussagen bildet vor allem der Umstand, dass Fossilnachweise in derartigen Ablagerungen in der Regel auf Tier- und Pflanzenarten bezogen sind, die – sofern nicht sogar noch im Fundgebiet vorhanden – noch immer über ein rezentes Areal verfügen, dessen Kenntnis und Analyse aktualistische Auskünfte über die arteigenen Umweltansprüche auch hinsichtlich der Klimaverhältnisse gestattet.

Derlei Auskünfte vermittelt zu Wandlungen der Vegetationsdecke während der letzten Jahrtausende vorrangig die Methode der Pollenanalyse, während für klimageschichtliche Interpretationen anhand des Faunenwandels vor allem Nachweise fossiler Landmollusken Beiträge erbracht haben. Sowohl deren Untersuchung durch die paläontologische Spezialdisziplin der Paläomalakologie wie auch die Pollenanalyse stützen sich auf quantitative Analysen von Vergesellschaftungen ökologisch unterschiedlich aussagefähiger Einzeltaxa (vgl. mit Bezug auf Mitteleuropa zur Pollenanalyse u. a. F. Firbas 1949 sowie J. Iversen 1944 und 1964, zur Paläomalakologie vorrangig V. Ložek 1964).

Nach den dank solcher Untersuchungen verfügbaren Angaben erreichten positive Abweichungen von der aktuellen Jahrestemperatur im mittleren Europa (Referenzzeitraum 1961–1990 – vgl. P. Hupfer & W. Kuttler 2005, S.

285) während der letzten 10.000 Jahre gemäß Aussage holozäner Molluskenfaunen Beträge von 1 ... 3 °C bzw. 1 ... 3 K (vgl. V. Ložek 1964, Beil. III, 5. Kolumne, für das südöstliche Mitteleuropa; D. Mania 1973, S. 128, für Mitteldeutschland – vgl. dazu Tab. 1).

	Gegenwärtiges Klima	Näherungswerte für das Atlantikum
Jahresmittel der Temperatur	+8 bis +9 °C	Etwa +9 bis +11 °C
Julimittel der Temperatur	+16 bis + 18 °C	Etwa +18 bis + 20 °C
Januarmittel der Temperatur	-3 bis –1 °C	Etwa -1 °C
Jahresmittel der Niederschläge	450 bis 650 mm	Etwa 550 bis 700 mm

Tab. 1: Näherungswerte für das Klima während des Atlantikums im Saale- und mittleren Elbegebiet außerhalb der Mittelgebirgslagen, rekonstruiert mit Hilfe von Molluskenanalysen, nach D. Mania 1973, S. 128

Analoge Werte ergeben sich auch dank pollenanalytischer Untersuchungen im mittleren Deutschland, etwa am Beispiel des Hohen Vogelsberges in Hessen (M. Schäfer 1996, S. 180) aufgrund palynologischer Nachweise von *Viscum, Hedera* und *Ilex* (zu deren Auswertbarkeit vgl. B. Frenzel 1967, S. 63). Nachweise von *Viscum* mit einem Anspruch an die mittlere Julitemperatur von mindestens +16 °C für ein Gebiet mit aktuellen Mittelwerten um +14 bis +15 °C ergeben für den Zeitraum zwischen 6.800 und 4.300 BP gegenüber heute eine positive Abweichung von 1–2 °C, und Nachweise von *Hedera* bezeugen für den Monat Januar Mittelwerte der Temperatur über -1,5 °C (J. Iversen 1944) für eine Region mit aktuellem Temperaturmittel für den Januar bei -2 bis -4 °C (M. Schäfer 1996, S. 16–17 und 180, sowie Walther & Lieth 1900), was ebenfalls für den Zeitraum vor 3.400 BP eine positive Abweichung von maximal 2,5 K ergibt.

Veränderungen im Niederschlagsangebot und insonderheit Oszillationen mit einem Auf und Ab der vieljährigen Mittelwerte sind anhand von Proxydaten methodisch schwerer erfassbar.

Geostratigraphische wie geomorphologische Beobachtungen mit gesicherter Datierung bieten Einblicke in das in einer gegebenen Landschaft verfügbare Wasserdargebot, das als Resultante das Zusammenspiel von Niederschlagsangebot und temperaturabhängiger Verdunstung integriert. Geostratigraphische Befunde reflektieren auch für die letzten 10.000 Jahre in Mitteleuropa und über diesen regionalen Rahmen hinaus einen mehrfachen Wechsel von Perioden mit erhöhtem sowie solchen mit defizitärem Wasser-

dargebot im Landschaftswasserhaushalt, so in feuchtebegünstigten Teilregionen etwa in Mooren mit einem Wechsel von Torfwachstum mit Rekurrenzflächen, in den eher benachteiligten und oft verkarsteten Kalksgebirgslandschaften der zentraleuropäischen Mittelgebirgszone mit einem Wechsel von Schichten subaquatisch sedimentierter Binnenwasserkalke (Dauche, Seekreide, Alm) mit subaerisch auf trocken gefallenen Absatzräumen entstandenen Humushorizonten (vgl. K.-D. Jäger 2006) begrabener Böden von Rendzina-Typ gemäß dessen Definition bei W. Kubiena (1953; vgl. auch AG Boden 1994, S. 182–183).

Solche Befunde widerspiegeln indessen zunächst zeitliche Veränderungen im Gesamtangebot der in der Landschaft verfügbaren Wassermenge (Jäger 2002 a, b) und werden in dieser Aussage auch durch andere Befunde, wie z. B. Wasserstandsschwankungen von Binnenseen, besonders in den Jungmoränenlandschaften im circumbaltischen wie im circumalpinen Bereich Mitteleuropas unterstützt (zuletzt Jäger 2001). Sie sind aber nicht linear übersetzbar in wechselnde Niederschlagsangebote für verschiedene Zeiträume, da die verfügbare Wassermenge im Rahmen der Hydraturverhältnisse von den temperaturabhängigen Verdunstungsbeträgen beeinflusst wird (dazu im Einzelnen H. Gaussen 1954 und 1955 sowie Walther & Lieth 1960 in der Einführung).

Der Einfluss von Temperaturveränderungen (Erhöhung oder auch Minderung der Jahresmitteltemperaturen) ist sogar ein doppelter, denn, worauf etwa P. Hupfer & W. Kuttler (2005, S. 288–289) aufmerksam machen:

„Globale Zusammenfassungen der langzeitlichen Verläufe von Niederschlag und Verdunstung weisen darauf hin, dass beide Größen im Fall der globalen Temperaturzunahme ebenfalls zunehmen."

In gewisser Weise zeigen deshalb Oszillationen im verfügbaren Wasserdargebot und die dafür aussagefähigen Befunde auch veränderliche langfristige Temperaturschwankungen in der Vergangenheit, im konkreten Fall während der letzten 10.000 Jahre an. Paläontologische Befunde über Mitteltemperaturen und deren Veränderlichkeit im gleichen Zeitraum werden so prinzipiell bestätigt und erhalten dabei sogar eine weitergehende zeitliche Auflösung.

Als Fazit ergibt sich, dass im Verlauf der erdgeschichtlich letzten Jahrtausende natürliche Veränderungen klimatischer Grunddaten und insbesondere der Temperaturverhältnisse nachweisbar sind. Dabei wurden im Vergleich zu gegenwärtigen Verhältnissen (Referenzperiode 1961–1990) Abweichungen um 1 ... 3 K (°C) erreicht, die sich in temporären Anhebungen der Jahresmit-

teltemperaturen ebenso deutlich manifestieren wie in deren zeitweiligen Absenkungen.

Die Anhebungen der Jahresmitteltemperaturen in dem instrumentell kontrollierbaren Zeitrahmen der letzten Jahrzehnte blieben bisher innerhalb dieser Größenordnung (J. Rapp 2000, S. 86), allerdings mit der Tendenz zu einer Beschleunigung, die allein für das letzte Jahrzehnt des 20. Jh. zu einem höheren Betrag führt als für das gesamte Jahrhundert von 1891 bis 1990 (J. Rapp 2000, S. 86). Der hierbei erkennbare gegenwärtige Trend bildet die Grundlage für die Befürchtung, dass dessen weitere Fortdauer kurzfristig über die Grenzen hinausführen könnte, die bisher im Verlauf der letzten 10.000 Jahre von positiven Abweichungen der Jahresmitteltemperatur in Mitteleuropa erreicht worden sind.

Literatur

AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl. (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sowie Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland). 392 S. (Stuttgart: Schweizerbarth)

Baur, Fr. (1959): Die Sommerniederschläge Mitteleuropas in den letzten 1 ½ Jahrhunderten und ihre Beziehungen zum Sonnenfleckenzyklus. 80 S. (Leipzig: Geest & Portig)

Berner, U. & Streif, H.-J. (Hrsg, 2000): Klimafakten. Der Rückblick – Ein Schlüssel für die Zukunft. 238 S. (Stuttgart: E. Schweizerbarth)

Brázdil, R.; Valašek, H.; Sviták, Zb. & Macková, J. (2002): History of Weather and Climate in the Czech Lands V: Instrumental Meteorological Measurements in Moravia up the End of the Eighteenth Century. 250 S. (Brno: Masaryk University)

Broecker, W. S. (1996): Plötzliche Klimawechsel. In: Spektrum der Wissenschaft. Dossier 5 (Klima und Energie). S. 66–72 (Heidelberg)

Firbas, F. (1949): Spät- und nacheiszeitliche Waldgeschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen, Bd. 1 (Allgemeine Waldgeschichte). VIII, 480 S. (Jena: Gustav Fischer)

Frenzel, B. (1967): Die Klimaschwankungen des Eiszeitalters (Die Wissenschaft, Bd. 129). XII, 296 S. (Braunschweig: Vieweg)

Gaussen, H. (1954): Théorie et classification des climats et microclimats. In: 8eme Congrès International de Botanique, sect. 7 et 8, pp. 125–130 (Paris)

Gaussen, H. (1955): Expression des milieux par des formules écologiques: leur representation cartographieque. In: Colloq. Internat. De Centre National de Recherche Scientifique 59, S. 257–269 (Paris)

Glaser, R. (1991): Klimarekonstruktion für Mainfranken, Bauland und Odenwald anhand direkter und indirekter Witterungsdaten seit 1500 (Paläoklimaforschung, Bd. 5). 175 S. (Stuttgart u. New York: Gustav Fischer)

Glaser, R. (2000): Klimageschichte Mitteleuropas. VIII, 227 S. (Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft)

Hupfer, P. & Kuttler, W., (eds., 2005): Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. XV, 554 S. (Stuttgart, Leipzig u. Wiesbaden: B. G. Teubner)

Iversen, J. (1944): *Viscum, Hedera* and *Ilex* as climate indicators. In: Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar 66, S. 463–483 (Stockholm)

Iversen, J. (1964): Plant indivators of climate, soil, and other factors during the Quaternary. In: J. Dylik (Hrsg.), Report on the VIth International Congress on Quaternary Warsaw 1961, vol. 2., S. 421–428 (£ódź: Panstwowe Wydawnictwo Naukowe)

Jaeger, H. (1981): Trends in stratigraphischer Methodik und Terminologie. In: Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 9(3), S. 309–332 (Berlin)

Jäger, K.-D. (2001): Zur zeitlichen Veränderlichkeit von Binnenseen mitteleuropäischer Jungmoränenlandschaften im Verlauf der letzten 10 Jahrtausende. In: S. Bussemer (Hrsg.), Das Erbe der Eiszeit (Festschrift zum 70. Geburtstag von Joachim Marcinek), S. 111–117 (Langenweißbach: Beier & Beran)

Jäger, K.-D (2002 a): Oscillations of the water balance during the Holocene in interior Central Europe – features, dating and consequences. In: Quaternary International 91, S. 33–37

Jäger, K.-D. (2002 b): On the Holocene water balance in Central Europe and several historical consequences. In: G. Wefer, W. H. Berger, K.-E. Behre & Ey. Jansen (eds.): Climate Development and History of the North Atlantic Realm, S. 369–375 (Berlin, Heidelberg etc.: Springer)

Jäger, K.-D. (2006): Klimawandel und Besiedlungsgeschichte in Mitteleuropa während der Nacheiszeit. In: Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät (im Druck)

Kahlke, H.-D. (1981): Das Eiszeitalter. 192 S. (Leipzig/Jena/Berlin: Urania)

Krutzsch, W. (1967): Der Florenwechsel im Alttertiär Mitteleuropas aufgrund von sporenpaläontologischen Untersuchungen. In: K. Schmidt, R. Daber & M. Barthel (Hrsg.), Klimaänderungen im Tertiär aus paläobotanischer Sicht (Abhandlungen des Zentralen Geologischen Instituts, 10), S. 17–37 (Berlin: ZGI)

Kubiena, W. (1953): Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas. 392 S. (Stuttgart: Ferdinand Enke)

Kukla, J. (ed., 1969): Exkursionsführer durch die Lösslokalitäten in der Tschechoslowakei), VIII, S. 172 (Brno: Geograph. Inst. d. Tschechoslow. Ak. d. Wiss.)

Ložek, V. (1964): Quartärmollusken der Tschechoslowakei (Rozpravy Ústředního ústavu geologického, 31). 375 S., 32 Taf., 4 Beil. (Praha: Tschechoslowakische Akademie der Wissenschaften)

Mania, D. (1973): Paläoökologie, Faunenentwicklung und Stratigraphie des Eiszeitalters im mittleren Elbe-Saalegebiet auf Grund von Molluskengesellschaften (Geologie, Beiheft 78/79). 175 S. (Berlin: Akademie-Verlag)

Mai, D. H. (1967): Die Florenzonen, der Florenwechsel und die Vorstellungen über den Klimaablauf im Jungtertiär der Deutschen Demokratischen Republik. In: K. Schmidt, R. Daber & M. Barthel (Hrsg.), Klimaänderungen im Tertiär aus paläobotanischer Sicht (Abhandlungen des Zentralen Geologischen Instituts, 10), S. 55–81 (Berlin: ZGI)

Manley, G. (1974): Central England temperatures: monthly means 1659 to 1973. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 100, S. 389–405

Milanković, M. (1920): Theorie mathematique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire (Paris)

Milanković, M. (1930): Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: W. Köppen & R. Geiger (eds.), Handbuch der Klimatologie I (A). S. 1–176 (Berlin: Gebr. Borntraeger)

Milanković, M. (1941): Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Königlich Serbische Akademie Belgrad, Special Publication N 133, 633 S. (Belgrad)

Ogilvie, A. E. J. (1991): Climatic changes in Iceland A. D. c. 865 to 1598. In: G. F. Bigelow (Hrsg.), The Norse of the North Atlantic (Acta Archaelogica 61/1990), S. 233–251 (København: Munksgaard)

Ogilvie, A. E. J. (1998): Historical accounts of weather events, sea ice and related matters in Iceland and Greenland, A. D. c. 1250 to 1430. In: Paläoklimaforschung 23, S. 23–43 (Stuttgart etc.: Gustav Fischer)

Pfister, Chr. (1999): Wetternachhersage – 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen. 304 S. (Bern, Stuttgart u. Wien: Paul Haupt)

Pfister, Chr.; Brázdil, R. & Glaser, R., (eds., 1999): Climatic Variability in Sixteenth-Century Europe and Its Social Dimension (= Climatic Change 43/1), 351 S. (Dordrecht, Boston u. London: Kluwer)

Pfister, Chr.; Schwarz-Zanetti, G.; Hochstrasser, F. & Wegmann, M. (1998): The most severe winters of the fourteenth century in Central Europe compared to some analogues in the more recent past. In: Paläoklimaforschung 23, S. 45–61 (Stuttgart etc.: Gustav Fischer)

Rapp, J. (2000): Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland (Berichte des Deutschen Wetterdienstes 212), 145 S. (Offenbach/Main: Deutscher Wetterdienst)

v. Rudloff, H. (1967): Die Schwankungen und Pendelungen des Klimas in Europa seit dem Beginn der regelmäßigen Instrumenten-Beobachtungen (1670) [Die Wissenschaft, Bd. 122]. (Braunschweig: Vieweg)

Schäfer; M. (1996): Pollenanalysen an Mooren des Hohen Vogelsberges (Hessen) – Beiträge zur Vegetationsgeschichte und anthropogenen Nutzung eines Mittelgebirges (Dissertationes Botanicae, Bd. 265). VIII, 280 S., 3 Faltbeil. (Berlin u. Stuttgart: J. Cramer)

Schwarzbach, M. (1950): Das Klima der Vorzeit. VIII, 211 S. (Stuttgart: Ferdinand Enke)

Spurk, M.; Friedrich, M. et al. (1998): Revision and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies: New evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal transition. In: Radiocarbon 40 (3), S. 1107–1116

Wagner, G. A. (1995): Altersbestimmung von jungen Gesteinen und Artefakten. X, 277 S. (Stuttgart: Ferdinand Enke)

Wagner, G. A. (1998): Age Determination of Young Rocks and Artifacts. VIII, 466 S. (Berlin, Heidelberg etc.: Springer)

Wales-Smith, G. B. (1971): Monthly and annual totals of rainfall representative of Kew,, Surrey, for 1697 to 1970. In: Meteorological Magazine 100, S. 345–362

Walther, H. & Lieth, H. (Hrsg. 1960 ff.): Klimadiagramm-Weltatlas (Jena: Gustav Fischer)

Woldstedt; P. (1955, 1958): Das Eiszeitalter – Grundlinien einer Geologie des Quartärs. 2 Bde., 2. Aufl. (Stuttgart: Ferdinand Enke)

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 55–80*

Klaus Steinitz

Nachhaltige Energiesicherung im 21. Jahrhundert – Veränderte Bedingungen, neue Probleme und Herausforderungen

Inhalt

1. Zur Problematik langfristiger Energiesicherung im 21. Jahrhundert
2. Bedeutung ökonomischer Strukturen und politischer Machtverhältnissen für eine nachhaltige Energiesicherung
3. Wechselseitige Verflechtungen langfristiger Energiesicherung mit anderen Bereichen von Natur und Gesellschaft
4. Internationale Erfordernisse und Verflechtungen der Energiesicherung
5. Konsequenzen für die nachhaltige Energiesicherung in Deutschland
6. Spielräume einer nationalen Energiestrategie für Deutschland

Literatur

1. Zur Problematik langfristiger Energiesicherung im 21. Jahrhundert

Die Bedingungen zur langfristigen Sicherung der Energiebasis haben sich im globalen, europäischen und nationalen Maßstab in den letzten Jahrzehnten entscheidend verändert. Dies setzt sich im 21. Jahrhundert verstärkt fort und führt zu neuen und weit größeren Herausforderungen für die langfristige Sicherung der energetischen Existenz- und Entwicklungsbedingungen der menschlichen Gesellschaft.

Die Energiesicherung gehört zu den zentralen Problemen, von deren langfristiger und nachhaltiger Lösung die Perspektive der Menschheit wesentlich beeinflusst wird. Ein langfristiges Konzept nachhaltiger Energiesicherung ist daher auch ein unverzichtbarer Bestandteil einer realistischen gesellschaftlichen – ökonomischen, sozialen und ökologischen – Zukunftsstrategie. Dies gilt infolge der vielfältigen regionalen, überregionalen und transnationalen gegenseitigen Abhängigkeiten und Verflechtungen bei der Energieversorgung für alle Ebenen, regional, nationalstaatlich, europäisch und global.

Eine *nachhaltige Energiesicherung erfordert im 21. Jahrhundert einen grundlegenden Paradigmenwechsel*. Dies gilt zumindest in vierfacher Beziehung: *Erstens* für die *Energieeffizienz*; sie muss gegenüber der bisherigen Entwicklung in neuen Dimensionen und Tempi erhöht werden. Die Senkungsraten des spezifischen Energieverbrauchs müssen in den Industrieländern die Wachstumsraten der gesamtwirtschaftlichen Leistung (gemessen – wenn auch unvollständig und verzerrt – im BIP) spürbar und dauerhaft übertreffen. *Zweitens* für die *Energieträgerstruktur*; das Zeitalter, in dem die fossilen Energieträger Grundlage des Energieversorgung waren geht in diesem Jahrhundert seinem Ende zu und wird durch das Zeitalter erneuerbarer Energien, durch das Solarzeitalter (Scheer), ersetzt. *Drittens* für die *Veränderung der Beziehungen zwischen Energiebereitstellung und ökologischer Zukunftsfähigkeit*. Die Fortsetzung des bisherigen Pfades der Energieentwicklung führt zwangsläufig zur Zuspitzung und Eskalation der Umweltgefährdung, sowohl hinsichtlich der Verfügbarkeit fossiler Energieressourcen, als auch und zunehmend der Übernutzung der „Senken", Umweltverschmutzung vor allem durch die Emission von CO_2 und anderen Klimagasen. *Viertens* für eine *neue Qualität in den Beziehungen der Energiesicherung zur Lösung der dringlichsten sozialen Probleme*. Ohne Bekämpfung von Armut, Hunger, Massen- und Langzeitarbeitslosigkeit, haben nachhaltige ökologische Entwicklung, und darin eingeschlossen nachhaltige, langfristige weltweite Energiesicherung, kaum eine Chance. Ebenso gilt aber auch, dass eine nachhaltige Energiesicherung eine notwendige Bedingung ist, um Armut und Hunger weltweit zu überwinden.

2. Bedeutung ökonomischer Strukturen und politischer Machtverhältnisse für eine nachhaltige Energiesicherung

Die Lösung der Probleme einer sozial und ökologisch nachhaltigen Energieversorgung wird entscheidend von den jeweilig dominierenden ökonomischen Strukturen und politischen Machtverhältnissen determiniert. Seit dem Untergang des Realsozialismus 1989/90 in Europa ist der Kapitalismus die weltweit fast uneingeschränkt herrschende Produktionsweise. Dabei unterliegt der Kapitalismus seit dem letzten Drittel des vorigen Jahrhunderts wesentlichen Änderungen. Er wird zu Beginn des 21. Jahrhunderts insbesondere durch folgende Prozesse und Tendenzen charakterisiert: beschleunigte Ausdehnung der Dominanz des Profitprinzips und der Marktsteuerung auf faktisch alle Lebenssphären, Zunahme der ökonomischen und politischen

Macht der transnationalen Konzerne und der globalisierten Finanzmärkte bei zugleich tief greifenden Veränderungen in der gesellschaftlichen Betriebsweise im Zusammenhang mit den Umwälzungen infolge der Informations- und Kommunikationstechnik, Aushöhlen des Sozialstaates und Zunahme der Polarisierung bei der Verteilung von Einkommen und Reichtum, Vergrößerung der Nord-Süd-Kluft, Ausdehnung der Marktsteuerung, Deregulierung und Zurückdrängung staatlicher Einflüsse auf die Wirtschaft. Insgesamt können diese Prozesse, die auch die Entwicklung der Energiewirtschaft stark beeinflussen, *als entfesselter Kapitalismus auf Grundlage einer Hegemonie neoliberaler Wirtschaftspolitik auf allen Ebenen*, gekennzeichnet werden.

All dies hemmt und blockiert die Durchsetzung der notwendigen Maßnahmen für eine nachhaltige Energiesicherung. Dies gilt insbesondere für die Umsetzung eines Energiekonzepts, das nicht nur von der Versorgung der Wirtschaft und der Bevölkerung Deutschlands und der Industrieländer ausgeht, sondern auf eine weltweite, zukunftsfähige Lösung der Probleme der Energiesicherung für alle Menschen auf der Erde gerichtet ist und den Erfordernissen der Umwelt, insbesondere der Verhinderung einer Klimakatastophe, gerecht wird.

Fortschritte bei der nachhaltigen Lösung der Energieprobleme sind, wie die UN Konferenzen zur Umwelt und zum Klimaschutz zeigen, von einer Veränderung der gesellschaftlichen Macht- und Kräfteverhältnisse im globalen, transnational-regionalen (EU und andere regionale Wirtschaftsblöcke) und nationalen Maßstab zu Gunsten sozialer, ökologischer und demokratischer, zivilgesellschaftlicher Bewegungen und Organisationen sowie einer stärkeren staatlichen Regulierung abhängig. Zwar gibt es beim Kyoto-Protokoll zum Klimaschutz (Gültigkeit bis 2012) durch die Entscheidung Russlands, das Protokoll zu ratifizieren, einen bestimmten Durchbruch. Die letzte UN-Klimakonferenz in Buenos Aires im Dezember 2004 ist aber ohne Verständigung über die Fortführung der Verhandlungen zur Festlegung von Reduktionszielen für Klimagase nach 2012 vor allem an der Blockade der USA faktisch gescheitert.

Im 21. Jahrhundert setzt die Lösung der Energieprobleme voraus, dass Schritte in Richtung einer solchen Wirtschaftsweise gegangen werden, die von den Lebensbedürfnissen der Menschen – aller Menschen auf der Erde – ausgeht, und die von sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit, darin eingeschlossen einer nachhaltigen Energiepolitik, geprägt wird. Dieser essentielle Zusammenhang zwischen langfristiger Energiesicherung und gesellschaftlichen – ökonomischen, sozial-kulturellen und ökologischen – Prozessen, vor

allem Veränderungen in den politischen Kräfteverhältnissen, wird oft bei Studien und Prognosen zur langfristigen Energieversorgung unterschätzt und vernachlässigt.

3. Wechselseitige Verflechtungen langfristiger Energiesicherung mit anderen Bereichen von Natur und Gesellschaft

Die neuen Herausforderungen zur Lösung der Energieprobleme werden vor allem dadurch charakterisiert, dass die langfristige Energiesicherung intensiver, enger und vielfältiger als in der Vergangenheit mit der Entwicklung in fast allen Bereichen von Natur und Gesellschaft wechselseitig verbunden ist. Es geht dabei um eine wirksame Verflechtung nachhaltiger Energieentwicklung vor allem mit den Feldern

- *Umwelt* – Erhaltung und Schutz der Umwelt im regionalen, nationalen, EU und globalen Maßstab – ökologischer Umbau, Lösung der weltweiten Umweltprobleme,
- *Wirtschaft* – Effizienz, Struktur, Wachstum,
- *Beschäftigung* – Überwindung der Massenarbeitslosigkeit, Schritte zu einer Vollbeschäftigung neuer Art, Veränderungen in den Beschäftigungsstrukturen zu Gunsten umweltorientierter Tätigkeiten,
- sozialer Zusammenhalt, soziale Gerechtigkeit und soziale Sicherheit,
- *Wissenschaft, Forschung, Innovationen*,
- *Einschränkung der Nord-Süd-Kluft, weltweite Bekämpfung von Armut und Hunger, Schaffung der Zugangsbedingungen zur Bildung und gesundheitlichen Grundversorgung für alle,*
- *Erhaltung des Friedens, Zurückdrängen und Verhindern militärischer Konflikte.*

Zwischen diesen Feldern existieren natürlich auch Widersprüche und Zielkonflikte, die es zu erkennen und zu analysieren gilt und auf deren möglichst verträgliche Lösung langfristige Strategien gerichtet sein sollten. Das ökonomische Hauptkonfliktfeld betrifft die Beziehungen zwischen Umwelt-/Klimaschutz und der bisherigen Art und Weise eines umweltschädlichen Wirtschaftswachstums einschließlich des fast ungebremsten Wachstums des Energieverbrauchs und der Erweiterung der fossilen Energiesysteme.

Die Verflechtungen der Energiesicherung mit anderen Bereichen und Problemfeldern soll, auf ausgewählte Komplexe und einige wesentliche Züge konzentriert, im folgenden knapp skizziert werden.

3.1 Natürliche Umwelt

Die Wechselbeziehung zwischen Energie und natürlicher Umwelt beruht einerseits auf der Inanspruchnahme von endlichen, nicht reproduzierbaren Naturschätzen, die voraussichtlich, unterschiedlich für die verschiedenen Energieträger – die größten Vorräte bestehen bei Kohle –, in den nächsten 50 bis 200/300 Jahren weitgehend erschöpft sein werden, und andererseits auf der Nutzung erneuerbarer auf der Solarenergie beruhender Energieressourcen. Die Reichweite der nicht reproduzierbaren Energieressourcen ist natürlich vom Ausmaß ihres Verbrauchs sowie von der Richtung (Zu- oder Abnahme) und dem Tempo in dem sich diese Ausbeutung der fossilen Energieressourcen verändert abhängig. Die aus heutiger Sicht technisch und wirtschaftlich abbaubaren Energieressourcen werden auf etwa das 100fache des derzeitigen jährlichen Weltenergieverbrauchs geschätzt. (Perspektiven für Deutschland, Bundesregierung 2002: 96)

Nach gegenwärtig vorliegenden Untersuchungen und Einschätzungen vollziehen sich von 1990 bis 2010 in Deutschland zwar beträchtliche Veränderungen in der Primärenergieträgerstruktur. Sie betreffen bisher aber vor allem Strukturveränderungen innerhalb der fossilen Energieträger. Der Anteil von Stein- und Braunkohle an den Primärenergieträgern in Deutschland geht zurück, von 1973: 41,5 %, 1993: 29 %, auf 2010: 24,3 %. Der Anteil von Erdgas erhöht sich, von 1973: 8,6 %, 1993: 17,8 %, auf 2010: 24,7 %. Der Anteil erneuerbarer Energieträger soll sich 2010 gegenüber 1993 etwa verdoppeln, aber dann doch nur bei rund 4 % liegen. (Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen)

Aufschlussreich ist ein kurzer Rückblick auf den Absturz des Anteils von Braunkohle insbesondere infolge der Deindustrialisierungspolitik in Ostdeutschland nach dem Beitritt der DDR zur Bundesrepublik: Die Braunkohleförderung in Deutschland ging in nur vier Jahren um fast 200 Mill. Tonnen, von 410 Mill. Tonnen 1989 auf 222 Mill. Tonnen 1993 zurück, darunter in Westdeutschland um 4 Mill. Tonnen (um 3,4 %) und in Ostdeutschland um 184 Mill. Tonnen (um 62 %).(Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.)

Die Wechselbeziehung ergibt sich andererseits aus der Belastung der natürlichen Umwelt insbesondere durch den CO_2-Ausstoß und andere Treibhausgase, den damit verbundenen Umweltschäden und vor allem aus den voraussichtlichen dadurch bewirkten Einflüssen auf das Klima. Die hiermit verbundenen Probleme gewinnen zunehmend an gesellschaftlicher und ökonomischer Relevanz. Sie enthalten beträchtliche Gefährdungspotenziale, die nur durch den Einsatz großer ökonomischer und wissenschaftlich-tech-

nischer Potenziale eingedämmt werden können. „In der Klimakrise verdichtet sich der Nord-Süd-Konflikt zu einem existenziellen Verteilungskampf über die Nutzung der globalen Umweltgüter und die vom Klimawandel erzwungenen Anpassungskosten." (Stiftung Entwicklung und Frieden 2003: 195). Die Folgen einer Klimaveränderung, insbesondere eines Anstiegs des Meeresspiegels, treffen die dicht besiedelten und ärmsten Entwicklungsländer weit überdurchschnittlich. (Vgl. zu dieser Problematik auch die Abschnitte 4 und 5)

3.2 Soziale Entwicklung

Nicht gelöste Energieprobleme, sowohl der weitere Anstieg der CO_2-Belastung der Erde als auch die Erschöpfung der nicht reproduzierbaren energetischen Ressourcen, ohne hierfür vorher einen Ersatz zu schaffen, schädigen und zerstören letzten Endes die natürlichen Lebensbedingungen der Menschen und die energetischen Voraussetzungen für die wirtschaftliche Entwicklung. Die unbefriedigende Lösung der Energieprobleme führt, u.a. über einen starken Anstieg der Energiepreise, wie sie gegenwärtig (2005) insbesondere in der Erdölverknappung und dem sprunghaften Anstieg der Erdölpreise sichtbar werden, zur Verschärfung sozialer Ungleichheit und sozialer Segmentierung in den Industrieländern, und vor allem zu einer weiteren Zuspitzung der Nord-Süd Polarisation. Sie spitzt in den ärmsten Ländern die katastrophale soziale Lage noch weiter zu.

Eine nachhaltige Energiesicherung ist auch mit größeren Herausforderungen für Veränderungen im Konsumverhalten und in der gesamten Lebensweise der Menschen verbunden (Suffizienz), durch die beträchtliche Beiträge zur Entkopplung von Wachstum und Wohlstandserhöhung auf der einen und Energieverbrauch auf der anderen Seite zu erbringen sind.

Dabei gilt es auch stets die negative Rückwirkung ungelöster, sich verschärfender sozialer Probleme auf die Bereitschaft der Menschen zu beachten, umwelt- und energiepolitischen Problemen die notwendige Beachtung zu schenken und sie in den eigenen Verhaltensweisen zu berücksichtigen. Die größten Probleme ergeben sich insbesondere aus der massenhaften Armut und dem Hunger von Hunderten Millionen Menschen in den Ländern der „Dritten Welt" sowie aus der hohen Massenarbeitslosigkeit und dem zunehmenden Sozialabbau in den Industrieländern. Soziale und ökologische – darin eingeschlossen energiepolitische – Fragen sollten nicht als zeitlich nachgelagerte Fragen, sondern als weitgehend gleichzeitig zu lösende Probleme angesehen werden.

Die Energieproblematik ist besonders eng mit den zeitlichen Aspekten der sozialen Gerechtigkeit, der *Generationengerechtigkeit*, verflochten, und enthält beträchtliche Konfliktpotenziale zwischen den Interessen der heute lebenden und den zukünftigen Generationen:

1. Die übermäßige Ausbeutung der vorhandenen über Millionen Jahre angehäuften Vorkommen an fossilen Brennstoffen, besonders an Erdöl, für die Energieversorgung heute und in der nahen Zukunft – von Hermann Scheer (1999: S.94) als "Pathologie der fossilen Ressourcenwirtschaft" charakterisiert –, führt bei Fortsetzung der gegenwärtigen Trends für die nach Mitte des 21. Jahrhunderts geborenen Generationen dazu, dass diese Energiequellen ihnen kaum noch zur Verfügung stehen werden, auch nicht für die stoffwirtschaftliche Nutzung;
2. Die zunehmenden Umweltschäden, besonders Klimawandel, durch den Ausstoß von CO_2 und anderen Treibhausgasen infolge der Energiebereitstellung auf der Grundlage fossiler Brennstoffe führen zu irreversiblen oder nur im Verlaufe vieler Generationen reduzierbaren Belastungen der Atmosphäre.
3. Die Endlagerung radioaktiver Abfälle, auf deren Entstehung die später Lebenden keinen Einfluss haben, kann für die kommenden Generationen größere Belastungen und Probleme hervorrufen.

3.3 Wirtschaftliche Entwicklung.

Eine stabile und dynamische wirtschaftliche Entwicklung ist in hohem Grade von einer sicheren Energieversorgung abhängig. Die Bereitstellung der notwendigen Energie ist mit tendenziell steigenden laufenden Aufwendungen (Kosten, Preise) und hohen, weiter zunehmenden Vorleistungen (Investitionen, Aufwendungen für Forschung und Entwicklung und insgesamt für Innovationen) verbunden. Hinzu kommt der rasche Anstieg der direkten und indirekten Umweltkosten – zur vorbeugenden Vermeidung und nachträglichen Beseitigung (soweit noch möglich) von Umweltschäden, die bisher größtenteils noch als externe Kosten betrachtet und behandelt werden. .

Eine ökologisch nachhaltige Versorgung mit Energie, von der Bereitstellung der Primärenergieträger bis zur Versorgung mit Endenergie (elektrische Energie, chemische Energie in Form von Heizöl, Heizgas, Kraftstoffen u.a.), erfordert den Einsatz großer ökonomischer Ressourcen sowie Forschungs- und Bildungspotentiale. Dies wird besonders deutlich an den hohen Investitionsaufwendungen – der Anteil der Energiewirtschaft an den Investitionen beträgt das Mehrfache ihres Anteils an der Wertschöpfung – und tendenziell

weiter steigenden Investitionsaufwendungen und laufenden Kosten je Einheit bereitgestellter Endenergie. Die Erhöhung der Energiekosten, in der letzten Zeit insbesondere des Erdöls und der darauf beruhenden Produkte, ist auch ein Hauptfaktor für Preissteigerungen in der individuellen Konsumtion.

Eine nachhaltige Energiesicherung beruht vor allem auf zwei wichtigen, tief greifenden wirtschaftlichen Veränderungen: *erstens in der Energieträgerstruktur* zu Lasten von Energieträgern die auf Kohlenstoff beruhen (Kohle, Erdgas, Erdöl) und zu Gunsten von erneuerbaren, auf der Solarenergie beruhenden Energiequellen, und *zweitens im Ausmaß und Tempo der Senkung des spezifischen, auf die Wirtschaftsleistung (BIP) bezogenen Verbrauchs und in den Industrieländern auch des absoluten Energieverbrauchs*.

Bisher ist zwar die Energieintensität (Energieverbrauch je Einheit BIP) gesunken. Die Energieeinsparung je Einheit des BIP vollzog sich jedoch in einem weit geringeren Tempo als die entsprechende Einsparung an lebendiger Arbeit. Von 1960 bis 1990 sank in der Bundesrepublik der spezifische Energieverbrauch um etwa 1 %/a, der spezifische Einsatz lebendiger Arbeit jedoch etwa dreimal so rasch, um ca. 3%/a. Bei einer Steigerung des BIP (in vergleichbaren Preisen) in diesem Zeitraum auf das 2,5 fache nahm der Primärenergieverbrauch auf das 1,8 fache zu, während der Einsatz lebendiger Arbeit (in Arbeitsstunden) um ca. 10 Mrd. Stunden, auf rund 80 % im Vergleich zu 1960, sank. (Zukunftskommission 1998: 137; Steinitz 1999: 13f). Die bisherigen Relationen in den Entwicklungstrends der Einsparung lebendiger Arbeit und an Energie können nicht mehr fortgesetzt werden. In Zukunft muss die beschleunigte Senkung des spezifischen Energieverbrauchs weit stärker in den Vordergrund der Forschung und Entwicklung und des gesamten Innovationsprozesses treten.

Hierbei muss beachtet werden, dass insbesondere die nicht erneuerbaren flüssigen und gasförmigen fossilen Energieträger eine doppelte Funktion im Reproduktionsprozess ausüben, als Energiequelle und als Rohstoff bei der stoffwirtschaftlichen Nutzung. Insbesondere bei Erdöl gilt es den Strukturanteil der stoffwirtschaftlichen Nutzung auf Kosten des Strukturanteils der energetischen Nutzung wesentlich zu erhöhen, um die Reichweite der Verfügbarkeit des Erdöls für stoffwirtschaftliche Zwecke zu verlängern.

Nach weitgehend übereinstimmenden Experteneinschätzungen, die auch von mehreren nationalen und internationalen Gremien übernommen wurden, muss der auf dem Primärenergieverbrauch an fossilen Energieträgern beruhende CO_2-Ausstoß bis 2050 weltweit auf 50 % gegenüber 2000 und in den Industrieländern, darunter auch in Deutschland, auf ca. 10 % bis 20 % redu-

ziert werden. Damit müssen auch Voraussetzungen geschaffen werden, damit die Länder der „Dritten Welt“ ihren Energieverbrauch insgesamt erhöhen können. In den vorliegenden Einschätzungen wird von einer mehr oder weniger starken Erhöhung ihres Anteils am Verbrauch fossiler Energien ausgegangen. Es bleibt aber offen, sowohl wie diese Erhöhung gegen Interessen der ökonomisch stärkeren Industrieländer und bei weiterem Anstieg der Weltmarktpreise für Energie durchgesetzt werden kann, als auch ob und inwieweit diese Erhöhung ausreichen wird, um die ökonomische Unterentwicklung aufzuholen. Im Umweltprogramm der UN heißt es: „Eine Reduzierung der Ressourcenverbrauchs in den Industrienationen um das 10-fache ist ein notwendiges langfristiges Ziel wenn angemessene Ressourcen für die Bedürfnisse der Entwicklungsländer bereitgestellt werden sollen.“ (UNEP 1999: 2, zitiert in: Schlussbericht der Enquete-Kommission Globalisierung 2002: 385)

Im Gegensatz zu diesen verbal allgemein anerkannten Anforderungen an eine nachhaltige Energiesicherung im Rahmen einer insgesamt nachhaltigen Wirtschaftsentwicklung, gehen die meisten Prognosen nach wie vor davon aus, dass der Primärenergiebedarf an fossilen Energieträgern weltweit und auch in den Industrieländern bis 2020 und 2050 weiterhin beträchtlich ansteigen wird.

Die Einschätzungen des Weltenergierates (WEC) zur Entwicklung des weltweiten Bedarfs an Primärenergie wurden in den neunziger Jahren auf der Grundlage von zunächst drei Szenarien, die später auf sechs Szenarien erweitert wurden, ausgearbeitet. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Annahmen in Bezug auf das Tempo des Wirtschaftswachstums, der Verbesserung der Energieintensität, der Veränderungen in der Energieträgerstruktur, der unterschiedlichen Entwicklung des Energieverbrauchs in den Industrieländern und in den Ländern der „Dritten Welt“. Ihnen wurden auch unterschiedliche Annahmen zur Stärke ökologischer Antriebe und der Intensität der technologischen Entwicklung zugrunde gelegt. In allen Szenarien erhöht sich der projektierte globale Primärenergiebedarf (gemessen in Gigatonnen Öl-Äquivalent) beträchtlich, von insgesamt 9,0 1990 auf 14,2 bis 24,8 Gigatonnen 2050. Dabei unterscheiden sich die Projektionen auch bei den einzelnen Primärenergieträgern stark voneinander.

Energieträger	1990	2050 maximale Variante des Gesamtbedarfs	2050 minimale Variante des Gesamtbedarfs
Kohle	2,2	3,8	1,5
Erdöl	3,1	7,9	2,6
Gas	1,7	4,7	3,3
Nuklear	0,5	2,9	1,8
Wasserkraft	0,4	1,0	1,0
Neue erneuerbare Energieträger	0,2	3,7	3,2
Traditionelle Biomasse	0,9	0,8	0,8
Gesamt	9,0	24,8	14,2
Gesamt ohne erneuerbare Energieträger	7,5	19,3	9,2
CO_2-Emission (Gigatonnen)	6,0	11,7	5,0

Quelle: Szenarien des World Energy Council (WEC) 2004

Tab. 1: Globaler Energiebedarf und CO_2-Ausstoß 1990 und 2050 – maximale und minimale Variante (Gigatonnen Öl-Äquivalent)

Hiernach würden zwar die Zuwachsraten des Primärenergiebedarfs 2050 zu 1990 gegenüber 1990 zu 1960 etwas geringer sein. Insgesamt würde der Weltenergiebedarf jedoch gegenüber der notwendigen Reduzierung beträchtlich zunehmen, in der Maximalvariante auf das 2,8fache und in der Minimalvariante auch noch auf das 1,6fache. Für fossile Energie plus Atomenergie, d.h. ohne die erneuerbaren Energien würde die Steigerung etwas geringer sein: auf das 2,6fache bzw. 1,2fache. In der Projektion des WEC erreichen die erneuerbaren Energien 2050 insgesamt einen Anteil von maximal einem Drittel. In anderen stärker auf Umwelterfordernisse und höhere Effizienz orientierten Projektionen wird bis 2050 von einem möglichen Anteil von über 50 % ausgegangen (2000 12,7 % und 2020 20 %). (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen – WBGU – 2003: 8) .

Die Projektionen des Primärenergiebedarfs nach drei Ländergruppen: OECD Länder, Transformationsländer und Entwicklungsländer zeigt folgendes Bild:

Ländergruppe	1990	2050 Maximalvariante	2050 Minimalvariante
OECD	4,2	6,7	3,0
Transformationsökonomien	1,7	3,7	1,7
Entwicklungsländer	3,1	14,4	9,5

Quelle: Szenarien des World Energy Council (WEC) 2004

Tab. 2: Gesamtbedarf an Primärenergie nach Ländergruppen (Gigatonnen Öl-Äquivalent)

Diese Projektion zeigt zwar eine deutliche Verschiebung der Anteile am Primärenergiebedarf zu Gunsten der Entwicklungsländer. Ihr Anteil am gesamten Primärenergiebedarf würde sich von 34 % 1990 auf 58 % 2050 (Maximalvariante) bzw. auf 67 % 2050 (Minimalvariante) erhöhen. Der Gesamt-bedarf der OECD Länder würde aber nach der Maximalvariante auf das 1,6fache steigen, nach der Minimalvariante um 30 % zurückgehen.

In den meisten Szenarien gibt es ein starkes Auseinanderklaffen zwischen der notwendigen Senkung des Primärenergieverbrauchs auf der einen und der prognostizierter Zunahme des Primärenergiebedarfs sowohl insgesamt als auch für die Industrieländer auf der anderen Seite. Dieser bisher weitgehend ungelöste Widerspruch steht der Ausarbeitung einer realistischen nachhaltigen Energiestrategie entgegen.

Wenn die Forderung nach Verringerung des absoluten Verbrauchs an fossilen Primärenergieträgern in den Industrieländern auf ca. ein Fünftel bis 2050 verringert werden muss, so erhöhen sich – in Abhängigkeit vom Tempo des Wirtschaftswachstums – die Anforderungen an die Steigerung der Energieeffizienz äußerst stark. Genauso gilt umgekehrt: Je mehr es gelingt, die Energieeffizienz zu erhöhen, *desto mehr können die Grenzen des unter ökologischen Aspekten zulässigen Wachstums hinausgeschoben werden*.

Jährliches Wirtschaftswachst. in %	BIP in % gegenüber dem Basisjahr	Erforderl. Senkung des spez. Verbr. in % gegenüber dem Basisjahr	Steigerung der Energieeffizienz. auf das ... fache
- 1	60	67	3
0	100	80	5
1	164	88	8
2	269	93	13
3	438	95	22

Vgl. hierzu: Joachim Spangenberg; Ein zukunftsfähiges Deutschland, Wuppertal papers, 1995

Tab. 3: Anforderungen zur Senkung des spez. Verbrauchs fossiler Energie bei Reduzierung ihres Gesamtverbrauchs in den Ind. Ländern auf 20 % in 50 Jahren (Basis = 100)

Die notwendige Energiewende setzt auch tief greifende Veränderungen in den Wirtschaftsstrukturen, im Umfang und in der Einsatzstruktur der Investitionen sowie im gesamten Innovationsprozess, insbesondere in Wissenschaft, Forschung und Entwicklung, voraus.

Die Schaffung der notwendigen wissenschaftlichen, Bildungs- und Qualifikations-, technologischen und materiellen Voraussetzungen für eine Energiewende gehört zu den größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts, gleicherweise an Kreativität und umweltbewusstes Handeln der Menschen, an wissenschaftlich-technische Leistungen, wie auch an den Umfang der hierfür einzusetzenden wissenschaftlich-technischen, materiellen und finanziellen Ressourcen.

Die Aufgaben zur Erhöhung der Energieeffizienz werden noch immer weltweit und auch in Deutschland vernachlässigt. Die Mittel für die Energieforschung, vor allem für eine höhere Effizienz der Umwandlung und des Einsatzes der Energie, für neue Technologien zur Nutzung der Solarenergie, zur Energiespeicherung sowie zur sparsamsten Verwendung der Energie müssten in Deutschland in den nächsten Jahren verdoppelt werden. (Vahrenholt, Energieexperte im Nachhaltigkeitsrat, 2004)

Die Energiewende wird nur dann erreicht werden können, wenn es gelingt, *schrittweise einen neuen Wachstumstyp* durchzusetzen, der auf ökologische und soziale Nachhaltigkeit, auf eine hohe, kontinuierliche Steigerung der Effizienz energetischer und anderer natürlicher Ressourcen sowie auf grundlegende Veränderungen in den Wirtschaftsstrukturen zu Gunsten wenig material- und energieintensiver, innovativer und hoch veredelter Produktionen sowie zu Gunsten hochwertiger Dienstleistungen gerichtet ist. (vgl. Leibiger 2003; Steinitz 2003)

Generell steht jedoch das Problem, inwieweit eine auf Wachstum fixierte Wirtschaftsweise langfristig fortgeführt werden kann. Wachstum frisst mehr oder weniger die Ergebnisse der Effizienzsteigerung des Energieverbrauchs auf. Der Widerspruch zwischen exponentiellem Wachstum und Endlichkeit der Natur kann nur zeitweilig aber nicht dauerhaft weggeschoben werden

Dabei zeigt sich ein Grundproblem: Die Prognose der voraussichtlichen Entwicklung des Energiebedarfs ist mit Unsicherheiten und Risiken verknüpft. Diese beziehen sich auf die zu einem bestimmten Zeitpunkt real nutzbaren neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse, auf die zur Erreichung dieser Ziele tatsächlich einsetzbaren ökonomischen Potenziale, auf die ökonomischen Interessen der Energiekonzerne und der ökonomischen Macht über die sie verfügen, ihre Interessen politisch durchzusetzen, auf die Wirksamkeit

und Konsequenz der Politik zur Erreichung der notwendigen Energiewende im nationalen und im transnational-globalen Maßstab sowie auf die Resultate bei der Verringerung der wirtschaftlichen Nord-Süd-Kluft. Ein besonderes Risiko aus Fehl- oder verspäteten Entscheidungen ergibt sich aus der Irreversibilität vieler Prozesse, insbesondere Klimaveränderungen infolge des CO_2-Ausstoßes sowie zu schneller Erschöpfung fossiler Energieressourcen durch ihre übermäßige Ausbeutung.

Die Risiken schließen auch, wie die jüngste Zeit gezeigt hat, wieder erhöhte Gefahren von Kriegen zur geostrategischen Sicherung von Energieressourcen ein, insbesondere durch die Politik der gegenwärtig einzigen Supermacht USA.

Für den *Übergang auf den neuen Pfad der nachhaltigen Energiesicherung* sollte weiter daran gearbeitet werden, die *verschiedenen energieökonomischen Szenarien untereinander und mit makroökonomischen Szenarien zu verflechten und vor allem, sie nach aussagefähigen Kriterien gesellschaftlich zu bewerten*. Damit können auch die Voraussetzungen verbessert werden, um die Spielräume einer langfristigen Strategie zur Energiesicherung und die Bedingungen ihrer Durchsetzung zu bestimmen. (siehe hierzu Abschnitt 6)

3.4 Politik für eine nachhaltige Energiesicherung.

Schon die bisherigen Erfahrungen machen deutlich: Für eine nachhaltige Energiesicherung reicht es keineswegs aus, sich auf die Marktkräfte und auf „Selbstverpflichtungen der Wirtschaft“ zu verlassen. Insgesamt ist eine Politik notwendig, die konsequent auf die Erhöhung der Energieeffizienz in allen Stufen der energiewirtschaftlichen Kette und auf Strukturveränderungen bei der Bereitstellung der Energieträger zu Gunsten der erneuerbaren Energien gerichtet ist. Dazu gehören einerseits sowohl verbindliche Auflagen zur Senkung des CO_2-Ausstoßes als auch wirksamere ökonomische Anreizstrukturen, u.a. Ökosteuern und die Internalisierung der realen gesellschaftlichen Kosten, darunter vor allem der Umweltkosten, um die Reduzierung des Energieverbrauchs und Änderungen der Energieträgerstruktur ökonomisch stärker zu stimulieren. Die bisherigen Anreizsysteme fördern vor allem ein maximales Energieangebot (je größer die Produktion und Bereitstellung von Energie, desto höher die Gewinne der Energieunternehmen). Sie müssten so verändert werden, dass die Verringerung des Energieverbrauchs für eine bestimmte Leistung ökonomisch mehr honoriert wird, sich stärker positiv auf den erwirtschafteten Gewinn auswirkt, d.h. eine Energievermeidungsstrategie – dieselbe Dienstleistung mit einem geringeren Energieangebot – ein größeres

Gewicht erhält. (Hennicke 2000) Dazu gehört zum anderen eine wirksame Förderpolitik für Innovationen – in der gesamten Kette von Forschung und Entwicklung bis zu Investitionen – zur beschleunigten Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger am gesamten Energieeinsatz und zur Steigerung der Energieeffizienz.

Forderungen nach einer stärkeren gesellschaftlichen Regulierung müssten auch die Frage nach öffentlichem Eigentum in der Energiewirtschaft, u.a. kommunales Eigentum an Stadtwerken, staatliches Eigentum an Hochspannungsnetzen, einschließen. Aufklärung über die Risiken und Herausforderungen einer perspektivischen Energiesicherung sind hierfür ebenso notwendig wie entsprechende Konsequenzen in der Wirtschafts- und Umweltpolitik.

Politischer Wille und öffentlicher Druck sind entscheidend, um die technisch möglichen und ökonomisch sowie ökologisch objektiv notwendige Erhöhung der Energieeffizienz und Veränderung in der Energieträgerstruktur durchzusetzen. Das wird auch an Einschätzungen des Weltenergierats (WEC) deutlich. Der WEC prognostiziert eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger am Weltenergiebedarf von gegenwärtig rund 2 % auf ca. 4 % 2020 falls sich energiepolitisch nichts ändert, während dieser Anteil in dieser Zeit auf 12 %[1] ansteigen könnte, wenn dies durch politische Vorgaben und Fördermittel massiv unterstützt wird. (Globale Trends 1998,1997: 300 f.)

Resümee: Die Potenziale für eine höhere Energieeffizienz und für höhere Strukturanteile der erneuerbaren Energien sind weit größer als sie den meisten Energieprognosen zugrunde liegen. Ihre Erschließung ist in hohem grade von der Politik abhängig.

4. Internationale Erfordernisse und Verflechtungen der Energiesicherung

Die Energiepolitik in Deutschland wird zunehmend von internationalen und globalen Erfordernissen und Verflechtungen determiniert. Das gilt insbesondere auch für ihre Entscheidungsspielräume. Die wichtigsten internationalen und globalen Prozesse und Faktoren die hierauf einwirken und berücksichtigt werden müssen sind:

- Die hohe Abhängigkeit der Wirtschaft von den importierten Energieträgern Erdöl und Erdgas. Der Anteil der Importenergien am gesamten Pri-

1 Hier sind offensichtlich nur die neuen erneuerbaren Energien gemeint, ohne Wasserkraft und traditionelle Biomasse

märenergieverbrauch Deutschlands betrug 2003 74%. Er erhöhte sich gegenüber 1991 (64%) um 10 Prozentpunkte. Der Anteil mineralischer Rohstoffe am Gesamtimport betrug 2002 8 %. Die beträchtlichen Preiserhöhungen für importiertes Erdöl und Erdgas sind ein Faktor für Kostensteigerungen in der Wirtschaft und für Preissteigerungen im individuellen Verbrauch. Die Auswirkungen dieser Preiserhöhungen für importierte Energieträger wurden bisher durch die Aufwertung des Euro zum Dollar abgeschwächt.

- Im Zusammenhang mit den stark ausgeprägten internationalen energiewirtschaftlichen Verflechtungen und Abhängigkeiten gewinnt die internationale Abstimmung der Energiepolitik im Rahmen der EU eine erhöhte Bedeutung.
- Die extreme Ungleichheit bei der Inanspruchnahme der begrenzten Energievorräte zwischen den Industrieländern und den Ländern der „Dritten Welt". Die Industrieländer mit ca. 20 % der Weltbevölkerung verbrauchen fast 70 % der nicht erneuerbaren Energieressourcen und sind für 55 % des CO_2-Ausstoßes verantwortlich. Vor 10 Jahren lag dieser Anteil noch um etwa 10 Prozentpunkte höher. Der Anteil der Entwicklungsländer ist im letzten Jahrzehnt vor allem durch das hohe Wachstum in China angestiegen.

  In den Entwicklungsländern werden durchschnittlich 35 % der Energie aus traditioneller Biomasse (vor allem Brennholz, Holzkohle, Dung) gewonnen; in Teilen Afrikas erreicht dieser Anteil bis zu 90 %. (WBGU, 2003: 3).

  Der Pro-Kopf-Energieverbrauch (kg Rohöleinheiten 1999, Weltdurchschnitt = 100) beträgt:

Durchschnittlich weltweit:	1.671 (100 %)
Nordamerika	8.043 (481 %)
Skandinavien	5.492 (329 %)
Japan	4.069 (244 %)
Europäische Union	3.785 (227 %)
Naher Osten und Nordafrika	1.287 (77 %)
Südsahara-Afrika	671 (40 %; entspricht 8,3 % von Nordamerika)
Am wenigst. entw. Länder	292 (17 %; entspricht 3,6 % von Nordamerika)

  (Atlas der Globalisierung 2003: 21)

  Diese Unterschiede zu Ungunsten der Länder der „Dritten Welt" würden auch bei einer starken Reduzierung des absoluten Verbrauchs fossiler Energien in den Industrieländern und einer beträchtlichen Erhöhung dieses

Verbrauchs in den Entwicklungsländern bis an das Ende des 21. Jahrhunderts bestehen bleiben.

- Die erfolgreichen Bemühungen einiger „Dritte Welt"-Länder, darunter insbesondere China und Indien, durch hohe Wachstumsraten der Wirtschaft, ihre ökonomische Rückständigkeit zu überwinden, hat neben den unzureichenden Resultaten der Industrieländer zur Senkung des Energieverbrauchs, zu einem Zeitverlust beim Übergang zu einer schonenden Nutzung der Ressourcen an fossilen Energieträgern, besonders bei Erdöl, und zur Erhöhung der Emission von Klimagasen (von 1990 bis 2003 ist deren Ausstoß insgesamt um 58 % gestiegen!) geführt.
- Länder mit den schwächsten ökonomischen Potenzialen haben auch die geringsten Chancen und Möglichkeiten, sich den veränderten Bedingungen der Energieversorgung, u.a. höheres Preisniveau für Energierohstoffe, verschärfte Konkurrenz bei der Sicherung von Erdöllieferungen bei zurückbleibendem Angebot, anzupassen. Die ökonomisch schwächsten Länder werden, wenn es der internationalen Gemeinschaft nicht gelingt, tragfähige Lösungen zu schaffen, vor unlösbaren Problemen stehen, mit einer sozial und ökologisch katastrophalen Situation konfrontiert sein.
- Die Industrieländer tragen die Hauptverantwortung für die Zuspitzung der Probleme bei der langfristigen Energieversorgung und für die Verschlechterung der Umweltbedingungen durch den Ausstoß von CO_2 und anderen Klimagasen. Sie müssen auch deshalb die Hauptverantwortung übernehmen, um die Welt vor einem Energiemangel und gefährlichen irreversiblen Klimaänderungen zu bewahren.

5. Konsequenzen für eine nachhaltige Energiesicherung

Ausgangspunkt der folgenden Überlegungen ist, dass nachhaltige Entwicklung, darunter eine nachhaltige Energiesicherung, im Weltmaßstab, vor allem folgende Dimensionen umfasst und zusammenbringen muss:

1. Schutz der natürlichen Umwelt im globalen Maßstab,
2. weltweite Überwindung der Armut und der gröbsten sozialen Ungerechtigkeiten. Die weltweite soziale Frage wird immer mehr zur zentralen Frage einer nachhaltigen Entwicklung (Klaus Töpfer, UN-Verantwortlicher für globale Umweltfragen);
3. Durchsetzung einer friedlichen Weltordnung,
4. gerechtere Verteilung der Nutzungsmöglichkeiten natürlicher Ressourcen zwischen dem „Norden" und dem „Süden".

Daraus können u.a. folgende Konsequenzen abgeleitet werden:

- Anstrengungen zur Verhinderung kriegerischer Auseinandersetzungen, zur Anwendung friedlicher Mittel bei der Lösung von Konflikten. Von besonderer Bedeutung ist der Kampf gegen die imperialistische Strategie der USA zur geostrategischen Sicherung und Beherrschung der wichtigsten Energieressourcen der Welt. Die Auswirkungen dieser Politik treffen vor allem die ärmeren Staaten und schränken die Chancen zur Lösung ihrer Probleme noch mehr ein
- Erhöhung der Anteile der Entwicklungshilfe zumindest auf die von der UN festgelegte Orientierungsgröße von 0,7 % des BIP (in Deutschland beträgt sie gegenwärtig weniger als die Hälfte hiervon). Dabei geht es nicht nur um mehr finanzielle Mittel, sondern ebenso um die Sicherung ihres effektiveren Einsatzes, um die stärkere Konzentration der verfügbaren Mittel auf die Verbesserung der Bedingungen für eine eigenständige, selbst tragende ökonomische Entwicklung in den Ländern der "Dritten Welt". Wichtig ist eine umfangreichere und raschere Entschuldung der ärmeren Länder, die seit Jahren in einer Schuldenfalle sitzen, die alle Anstrengungen zur Überwindung ökonomischer Rückständigkeit zunichte macht. Die Schulden der Entwicklungsländer sind von rund 100 Mrd. Dollar 1970, 600 Mrd. Dollar 1980 auf 2.400 Mrd. Dollar 2002 angewachsen. Allein für den Schuldendienst müssen häufig zwischen 30 % und 50 % der öffentlichen Haushalte und fast die gesamten Exporterlöse eingesetzt werden.

  Zwischen 1980 und 2001 wurden im Rahmen des Schuldendienstes der Entwicklungsländer 4.500 Mrd. Dollar zurückgezahlt. Sie haben zwischen 1983 und 2001 386 Mrd. Dollar mehr zurückgezahlt als sie an Neukrediten aufnahmen; d.h. es vollzog sich ein negativer Nettotransfer zu Gunsten der reichen Gläubiger (Atlas der Globalisierung 2003: 29; Stiftung 2003:147). Der Schuldendienst und die rücksichtslosen Auflagen des IWF zwingen diese Länder nicht nur, die sozialen Leistungen weiter abzubauen, sondern auch Filetstücke ihrer Wirtschaft, darunter der Infrastruktur und der Energieressourcen an transnationale Konzerne zu verkaufen.

  Eine Möglichkeit, zusätzliche finanzielle Ressourcen für die Entwicklungsländer bereit zu stellen und zugleich negative Umwelteinflüsse einzudämmen, besteht darin, ein Nutzungsentgelt für die Inanspruchnahme globaler Gemeinschaftsgüter – wie Weltmeere, internationaler Luftraum – die zunehmend übernutzt werden, zu erheben.

Von größter Bedeutung ist eine konsequentere Durchsetzung des Beschlusses des Millenium-Gipfels der UN im September 2000, bis 2015 den Anteil der Weltbevölkerung der in extremer Armut lebt (verfügbares Einkommen unter 1 Dollar täglich) zu halbieren. Das wäre ein wichtiger Schritt, um auch in den ökonomisch schwächeren Ländern Fortschritte in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung zu ermöglichen. In die gleiche Richtung müssten Veränderungen in der WTO gehen, um die im internationalen Handel entstehenden Verluste ökonomisch schwächerer und von Energieimporten stark abhängiger Länder zu verringern, gleichberechtigte internationale Handels- und Wirtschaftsbeziehungen durchzusetzen, und insgesamt für diese Länder ein günstigeres weltwirtschaftliches Umfeld zu schaffen. „Die Verbesserung des Zugangs zu moderner Energie in den Entwicklungsländern ist ein grundlegender Beitrag zur Armutsbekämpfung und entscheidend für das Erreichen der Entwicklungsziele der UN-Millenniumserklärung." (WBGU 2003: 3)

Die bisherigen Ergebnisse lassen daran zweifeln, dass die Millenniumsziele des UN-Gipfels 2000, bis 2015 u.a. den Anteil der Menschen in absoluter Armut und den Anteil der Hungernden weltweit zu halbieren, ebenso wie die Herausbildung fairer Handels- und Finanzbeziehungen, erfüllt werden. Das wird im jüngsten Bericht des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen (UNDP) „Bericht über die menschliche Entwicklung 2005" deutlich. Dabei werden sich die regionalen Unterschiede zwischen verschiedenen Ländergruppen innerhalb der „Dritten Welt" vertiefen. Besonders düster sind die Aussichten für die afrikanischen Länder südlich der Sahara und für den größeren Teil der lateinamerikanischen Volkswirtschaften.

- Einhaltung der für Deutschland notwendigen Reduktionsziele beim Einsatz fossiler Energieträger und erhöhte Bemühungen, um diese Ziele auch in den wirtschafts- und umweltpolitischen Leitlinien der EU sowie der OECD Länder zugrunde zu legen und umzusetzen. Hierdurch müssen die *notwendigen Freiräume für eine beträchtliche absolute Erhöhung des Energieeinsatzes in den Ländern der „Dritten Welt" geschaffen werden.* Die sich weiter in den Industrieländern, besonders den USA, vergrößernde Kluft zwischen den notwendigen Reduktionszielen und der tatsächlichen und für die nächste Zeit prognostizierten Entwicklung des Energieverbrauchs darf nicht einfach hingenommen werden.
- Wirksamere Unterstützung der Länder der „Dritten Welt" bei der Anwendung neuer Technologien, vor allem von Technologien die an ihre spezi-

fischen Bedingungen angepasst sind. Es müssen notwendige Bedingungen geschaffen werden, damit diese Länder nicht dieselben extensiven Phasen des Energieverbrauchs durchlaufen müssen wie die Industrieländer. Die globale Lösung der Energieprobleme ist entscheidend davon abhängig, dass auch in diesen Ländern die Effizienz bei der Gewinnung, Umwandlung und beim Einsatz von Energie erhöht wird sowie die verfügbaren Ressourcen zur verstärkten Erzeugung erneuerbarer Energien verstärkt genutzt werden.

Wegen der aktuellen Überalterung eines großen Teils der fossilen und atomaren Kraftwerke in Deutschland sowie der langen Vorlaufzeiten sind die nächsten 10 bis 15 Jahre das entscheidende Zeitfenster für den Umbau der Energiesysteme. Wird der notwendige Umbau erst später eingeleitet ist mit weit höheren Kosten zu rechnen. (WBGU, 2003: 5) dabei geht es nicht nur um höhere Kosten. Das Setzen auf bisherige fossile Kraftwerke würde für mehrere Jahrzehnte das konventionelle Energiesystem mit seinen politisch zentralen Strukturen zementieren und die notwendige verstärkte Investitionstätigkeit für Solarkraftwerke erschweren oder sogar blockieren.

Für Deutschland ergibt sich aus den internationalen Verflechtungen und Verantwortlichkeiten auch die Konsequenz, einen höheren Beitrag für eine global nachhaltige Energieversorgung zu leisten, insbesondere zur Lösung der Probleme der Energiesicherung in den Ländern der „Dritten Welt“.

6. Spielräume einer nationalen Energiestrategie für Deutschland

Die Bestimmung der Spielräume für die Ausarbeitung einer nachhaltigen, in sich konsistenten nationalen Energiestrategie ist recht problematisch, infolge sowohl der vielfältigen auf den Energiebedarf einwirkenden Faktoren als auch der zwischen diesen Faktoren bestehenden Interdependenzen. Dies wird auch deutlich in den weiter vorn charakterisierten sehr stark voneinander abweichenden Einschätzungen zum Weltenergiebedarf bzw. -verbrauch durch den WEC (Vgl. Tabellen 1 und 2) und durch wissenschaftliche und staatliche Organisationen. Die Unsicherheiten und Schwankungen bei der Einschätzung des Energiebedarfs sind in den verschiedenen Szenarien bei dem einzelnen Primärenergieträger noch weit größer. So gehen die Projektionen des WEC für das Jahr 2050 von folgenden Höchst- bzw. niedrigsten Werten bei den verschiedenen Energieträgern aus:

Primärenergieträger	1990	2050 Höchstwert	2050 niedrigster Wert
Kohle	2,2	7,8	1,5
Erdöl	3,1	7,9	2,6
Erdgas	1,7	7,9	3,3
Nuklear	0,5	2,9	0,5
Neue Erneuerbare	0,2	5,7	2,8

Quelle: Szenarien des World Energy Council (WEC) 2004

Tab. 4: Höchstwerte und niedrigste Werte des Bedarfs von Primärenergieträgern 2050 (Angaben jeweils in Giga-Tonnen-Erdöleinheiten)

Die Spielräume für die Energiestrategie ergeben sich vor allem aus den zugrunde gelegten Prämissen. Im Folgenden wird von der Zielstellung ausgegangen, den Verbrauch fossiler Energieträger, und die CO_2 Emission, weltweit bis 2050 gegenüber 2000 um 50 % zu reduzieren. Hiervon ausgehend müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Um wie viel muss der Primärenergiebedarf an fossilen Energieträgern in Deutschland und den anderen Industrieländern reduziert werden, damit die Entwicklungsländer die notwendigen energetischen Spielräume erhalten, um die wirtschaftliche Nord-Süd-Kluft bis 2050 spürbar zu verringern? Die Einschätzungen über die Verringerung der Unterschiede im Pro-Kopf-Verbrauch an Energie sollten von dem Grundsatz abgeleitet werden, dass jeder Erdbewohner grundsätzlich dasselbe Recht auf die Nutzung der natürlichen Energieressourcen hat.
- Wie hoch wird das voraussichtliche Tempo des Wirtschaftswachstums in Deutschland und in anderen Industrieländern sein? Dabei sollte davon ausgegangen werden, dass die Zuwachsraten des BIP langfristig zurückgehen, von z.B. jahresdurchschnittlich bis 2010 1,5–2,0 %, zwischen 2011 und 2020 auf 1,0 %–1,5 % und nach 2020 auf weniger als 1 %.[2]
- Um wie viel muss die Energieeffizienz erhöht werden, oder wie hoch müssen die Senkungsraten des spezifischen Energieverbrauchs sein, um bei den angenommenen Zuwachsraten des BIP die notwendige absolute Reduzierung des Primärenergieverbrauchs zu erreichen?

2 Auf die widersprüchliche Wachstumsproblematik, insbesondere auf die Beziehungen zwischen Zuwachsraten und absoluten Zuwächsen sowie zwischen kurz-, mittel- und langfristigem Wirtschaftswachstum und auf die Bedeutung des Wachstums für das Zurückdrängen der Arbeitslosigkeit und auch für die Verbesserung der Situation der öffentlichen Haushalte kann hier nicht näher eingegangen werden.

Als weiterer Einflussfaktor auf den absoluten Primärenergieverbrauch ist das Tempo, in dem erneuerbare Energieträger ihren Anteil am Energieverbrauch erhöhen, zu berücksichtigen. Wenn die oben bestimmte Größenordnung des Verbrauchs fossiler Energieträger zugrunde gelegt wird, kann der mögliche Gesamtumfang des Primärenergieverbrauchs mit steigenden Anteilen erneuerbarer Energie erhöht werden. Bei Rückgang des Verbrauchs fossiler Energien auf 50 % müsste bei Ausgleich von absoluter Senkung des Primärenergieverbrauchs in den Industrieländern und erhöhtem Primärenergieverbrauch in den Ländern der „Dritten Welt", der Anteil der erneuerbaren Energien auf etwa 50 % steigen. Dabei wurde von einem Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2050 ausgegangen.

In den verschiedenen Szenarien der Energieentwicklung gibt es hinsichtlich der Kernenergie besonders starke Unterschiede. Die Szenarien umfassen eine Streuung von einem möglichst frühen Ausstieg aus der Kernenergie, über einen etwa gleich bleibenden Anteil, bis zur Erhöhung des Anteils der Atomenergie. Diesen verschiedenen Szenarien liegen unterschiedliche Prämissen zugrunde, sowohl hinsichtlich der Bewertung der verschiedenen Risiken der Atomenergie und der Wirkungen auf nachfolgende Generationen, als auch hinsichtlich des Ausmaßes und Tempos der möglichen oder real wahrscheinlichen Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energieträger.

Die Kontroversen bei der Diskussion um eine zukunftsfähige Strategie zur Energieversorgung sind besonders auf die erneuerbaren Energien und die Atomenergie fokussiert, die mögliche Entwicklung des Umfangs und Anteils erneuerbarer Energien und die Perspektive der Kernenergie. Meine Auffassung zu Problemen der Kernenergie sind in dem Beitrag: „Überlegungen zu einer komplexen Bewertung der perspektivischen Rolle der Atomenergie für die Energiesicherung. – Wie könnte der Diskurs zwischen Anhängern und Gegnern der Nutzung der Atomenergie weitergeführt werden?" enthalten. Hier sollen nur knapp einige generelle Aspekte der erneuerbaren Energien skizziert werden.

Die Vorzüge und Möglichkeiten der erneuerbaren Energien zur Lösung der zukünftigen Energieprobleme der Menschheit sind so groß, dass es berechtigt erscheint, die Wandlungen der Energiebasis im 21. Jahrhundert als Ablösung des Zeitalters fossiler Energien durch das energetische Solarzeitalter zu kennzeichnen. Es ist aber zugleich notwendig, die hier bestehenden (noch) ungelösten Probleme zu berücksichtigen. Die erneuerbaren Energien sind zwar grundsätzlich unerschöpflich. Ihre Verfügbarkeit und Gewinnung

ist aber natürlich auch nicht problemlos. (Zu den Problemen vgl. Pelte 2002: Abschnitt Erneuerbare Energien)

1. Ihre Gewinnung nimmt beträchtliche Flächen in Anspruch (Windenergie, Solarkollektoren, Bioenergie),
2. Der Hauptbeitrag wird zukünftig von solchen erneuerbaren Energien geleistet werden müssen, deren Verfügbarkeit starken zeitlichen Schwankungen unterliegt (Solarenergie, Windenergie). Die Solarenergie, die die größten zeitlichen Schwankungen aufweist, wird perspektivisch den Hauptbeitrag zu bringen haben,
3. Es müssen qualitativ neue, komplizierte Probleme des Transports über größere Entfernungen und vor allem der Speicherung von Energie gelöst werden,
4. Ihre umfassende Nutzung wird auch Auswirkungen auf die natürlichen Kreisläufe haben, deren Konsequenzen heute zwar noch nicht voll abschätzbar sind, deren negative Wirkungen auf die natürliche Umwelt jedoch weit geringer sein werden als bei den fossilen Energien und bei der Kernenergie.

Eine beschleunigte Steigerung der Effizienz bei der Gewinnung, Umwandlung, Übertragung von Energie und bei der Nutzung der Endenergie, insbesondere durch eine forcierte Anwendung von Innovationen auf allen Stufen von der Gewinnung bis zur Nutzung, erweitert den Spielraum für Wirtschaftswachstum. Ebenso wie das Nichterreichen der erforderlichen Effizienzziele das ökologisch verantwortbare Wachstumstempo reduziert.

Die Analyse und modellmäßige Berechnung dieser Beziehungen kann Voraussetzungen schaffen, um die zulässige oder wünschenswerte Entwicklung des Energiebedarfs und seiner Struktur (in verschiedenen Varianten) als Elemente einer in sich konsistenten und nachhaltigen Energiestrategie zu ermitteln. Auf dieser Grundlage gilt es, die stark politisch determinierten Bedingungen zur Umsetzung dieser Strategie herauszuarbeiten. Sie reichen von der Bereitstellung der hierfür erforderlichen ökonomisch-finanziellen und wissenschaftlich-technischen Ressourcen, über die Gestaltung der Instrumente und der Regulierungsmechanismen zur Stimulierung der Energieeinsparung in der Wirtschaft und der forcierten Entwicklung der erneuerbaren Energien, bis zur Förderung energiesparender und die Umwelt schonender Verhaltensweisen der Menschen sowie Veränderungen in ihrer Lebensweise.

Zusammenfassend ergibt sich, dass der Bedarf an fossilen Energieträgern und der Ausstoß an CO_2 sowie damit auch die energiepolitische Entschei-

dungsspielräume vor allem von vier großen auch untereinander verflochtenen Komplexen direkt beeinflusst werden:

- Vom Tempo des Wirtschaftswachstums
- Von gesamtwirtschaftlichen Strukturveränderungen zu Gunsten wenig Energie verbrauchender hochwertiger Dienstleistungen und Produktionskomplexe sowie von der Herausbildung umweltfreundlicher und zugleich gesamtwirtschaftlich effizienter Beziehungen zwischen regionaler, überregionaler und internationaler Arbeitsteilung und Kooperation.
- Vom Ausmaß und Tempo der Steigerung der Energieeffizienz in den verschiedenen Wirtschaftsbereichen und Branchen sowie in der Konsumtion.
- Vom Ausmaß und Tempo der Veränderungen in der Energieträgerstruktur zu Gunsten erneuerbarer Energien.

Je günstiger die Ergebnisse bei den Komplexen 2 bis 4 sind, desto größer sind die Entscheidungsspielräume zur Dynamik und Struktur der nationalen bzw. EU-Wirtschaftsentwicklung und insbesondere für das Aufholen ökonomischer Rückstände in den Ländern der „Dritten Welt".

Das ökonomische Wachstum der Industrieländer übt widersprüchliche Wirkungen auf die Bedingungen und Spielräume der langfristigen Energiesicherung aus. Einerseits nehmen die negativen Auswirkungen auf Umwelt (Umweltbelastungen, insbesondere langfristige Konsequenzen für das Klima, Erschöpfen der natürlichen Ressourcen u.a.) zu, steigen langfristig die Anspannungen und Probleme bei der Energieversorgung, erhöht sich das Konfliktpotenzial zur Sicherung von Energieressourcen und damit auch die Gefahr von Kriegen und verschlechtern sich die Chancen für die meisten Entwicklungsländer, ihre Anteile an der Nutzung der Energieressourcen zu vergrößern. Andererseits verbessern sich mit dem Wachstum der Wirtschaftsleistung auch die *objektiven* Möglichkeiten zur Lösung sozialer Probleme, zum Einsatz größerer ökonomischer Potenziale für die Verbesserung der natürlichen Umwelt sowie zur Erhöhung der Energieeffizienz und des Anteils erneuerbarer Energien. Auch die objektiven Voraussetzungen für eine spürbare Erhöhung der Entwicklungshilfe und für das Streichen der Schulden der Entwicklungsländer werden günstiger. Ob und inwieweit diese Möglichkeiten auch tatsächlich für solche Aufgaben genutzt werden, ist eine andere Frage. Das geschieht auf keinem Fall im Selbstlauf, sondern ist vom politischen Kräfteverhältnis sowie von Initiativen und Anstrengungen zur Durchsetzung dieser Möglichkeiten abhängig. Hegemonie neoliberaler Politik verhindert oder hemmt die Nutzung der größeren ökonomischen Potenziale im Interesse sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit sowie der Verringerung der Nord-Süd-Kluft

Die Entwicklung dieser Komplexe, die einen direkten Einfluss auf die energiepolitischen Entscheidungsspielräume ausüben, ist wiederum von einer Vielzahl von indirekten Einflussfaktoren abhängig. Diese umfassen ein breites Feld und sind in hohem Grade von der herrschenden Politik im nationalen, EU- und globalen Maßstab abhängig. (Vgl. u.a. Helmholtz-Gemeinschaft und Fraunhofer Gesellschaft 2003) Sie reichen von der Stärkung der für die Energieeinsparung und die höhere Nutzung regenerativer Energieträger eingesetzten wissenschaftlich-technischen und investiven Potenziale, über die Stärkung staatlicher Einfluss- und Regulierungsmöglichkeiten, bis zu Fortschritten bei der Lösung sozialer Probleme wie Langzeitarbeitslosigkeit und Armut. Sie schließen Bildung und Aufklärung über Umwelterfordernisse im Zusammenhang mit der Bereitstellung und dem Verbrauch von Energie, darunter über eine die Umwelt und Energieressourcen schonenden Lebensweise, ein. Sie erstrecken sich auch auf internationale und globale Probleme, wie Verringerung der weltwirtschaftlichen Polarisierung zwischen Nord und Süd, Fortschritte bei der Herausbildung einer gerechten, zukunftsorientierten und nachhaltigen Weltwirtschaftsordnung sowie auf das Zurückdrängen von Kriegsgefahren und die Verhinderung gewalttätiger Konflikte.

Die *Bestimmung der nationalen Entscheidungsspielräume für eine langfristige Energiesicherung* könnte nach einem groben Muster etwa in folgender Weise erfolgen: Als erstes gilt es, ausgehend von den Erfordernissen des weltweit notwendigen Übergang zu einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung, die sich bei der Energie insbesondere aus der Reduzierung des CO_2-Ausstoßes (Klimaschutz) und der Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe ergibt, und dem voraussichtlichen Wirtschaftswachstum, die objektiven Anforderungen an die Steigerung der Energieeffizienz im umfassenden Sinne und an die Erhöhung des Strukturanteils erneuerbarer Energien abzuleiten. Auf dieser Grundlage ist es dann vor allem Aufgabe der Politik, die konkreten Ziele und die Prämissen zu bestimmen sowie die Regelungen, Anreizsysteme und institutionellen Bedingungen im nationalen, EU- und im globalen Maßstab zu schaffen, um diesen Erfordernissen gerecht werden zu können. Hierzu gehören u.a.: die Vorgabe von Mindestzielen für die Reduzierung des CO_2-Ausstoßes für verschiedene Zeithorizonte (für Deutschland und differenziert nach Ländergruppen – Klimaschutzkonvention), Regelungen um den Entwicklungsländern die notwendige Erhöhung ihres Anteils an den verfügbaren Energieressourcen zu sichern, Zielvorstellungen für die Vergrößerung des Anteils erneuerbarer Energien in den verschiedenen Zeitetappen einschließlich der dafür zu schaffenden Bedingungen.

Eine wichtige politische Entscheidung mit weitgehenden Konsequenzen für alle anderen Maßnahmen zur langfristigen Energiesicherung betrifft die Atomenergie – Ausstieg, und wenn ja in welchem Zeitraum (in Deutschland wurde diese Entscheidung bereits getroffen) und mit welchen Konsequenzen, oder Weiterführung und wenn ja mit welchem Umfang und mit welchen Anteilen sowie mit welchen Konsequenzen und Risiken.

Hieraus folgt, dass es einen relativ großen Entscheidungsspielraum mit vielen Alternativen und Varianten gibt, die zu bewerten sind (Technologiefolgenabschätzung) und die auch, vor allem soweit sie Probleme und Risiken des gesellschaftlichen Zusammenlebens betreffen oder weitgehende Auswirkungen auf kommende Generationen haben, der öffentlichen, demokratischen Diskussion und Meinungsbildung unterbreitet werden müssen.

Literatur (Auswahl)

Atlas der Globalisierung, le Monde diplomatique, Berlin 2003

Bellmann, Reinart/Laitko, Hubert/Meier, Klaus, Generationengerechtigkeit: Die Verknüpfung ökologischer und sozialer Zielsetzungen im Nachhaltigkeitskonzept, Utopie kreativ, Juli/August 2003 (153/154)

Blumenthal, Gert/Spänkuch, Dietrich, Stellungnahme zur ökologischen Transformation, 2004

Bundesregierung, Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, Berlin 2002

Enquete-Kommission, Schlussbericht, Globalisierung der Weltwirtschaft – Herausforderungen und Antworten, Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode, Drucksache 14/9200, Berlin 2002

EurEnDel, Technology and Social Visions for Europe's Energy Futer – A Europe-wide Delphi Study, November 2004 (www.eurendel.de)

Helmholtz-Gemeinschaft und der Fraunhofer Gesellschaft, Verbundprojekt von Forschungseinrichtungen „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland", Präsentation wesentlicher Ergebnisse des Abschlussberichts, Berlin 2003

Hennicke, Peter, Energieeffizienz & Faktor 4, Beitrag zur Forderung nach der konkreten Utopie auf einer Konferenz, Juni 2000, online Fassung

Leibiger, Jürgen, Die Linke und das Wirtschaftswachstum. Versuch einer Positionsbestimmung, Supplement der Zeitschrift Sozialismus, 4/2003

Pelte, Dietrich, Die Zukunft unserer Energieversorgung. Physikalische Grundlagen und Folgerungen, Vorlesung, 2002, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (online Fassung)

Radermacher, Franz, Ökoeffizienz – Ein „Balanced Way" als Zukunftsentwurf, Utopie kreativ, Februar 2003 (148)

Rat für Nachhaltige Entwicklung. Effizienz und Energieforschung als Bausteine einer effizienten Energiepolitik. Oktober 2004 (www.nachhaltigkeitsrat.de)

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

Scheer, Hermann, Die existenzielle Jahrhundertaufgabe: die Ablösung atomarer und fossiler Energien durch erneuerbare Energien, Vortrag in der Plenarsitzung der Leibniz-Sozietät, Berlin 2005, Sitzungsberichte

Spangenberg; Joachim, Ein zukunftsfähiges Deutschland, Wuppertal papers, Wuppertal 1995

Spangenberg; Joachim, Soziale Nachhaltigkeit. Eine integrierte Perspektive für Deutschland, Utopie kreativ, Juli/August 2003 (153/154)

Steinitz, Klaus, Grenzen des Wachstums heute, in: Beiträge zur Wirtschaftspolitik, Arbeitsgemeinschaft Wirtschaftspolitik der PDS, Nr. 1/99, Berlin

Steinitz, Klaus, Wirtschaftswachstum ist unverzichtbar? Utopie kreativ, Februar 2003 (148)

Stiftung Entwicklung und Frieden, Globale Trends –1998, Fakten Analysen Prognosen , Frankfurt a. M. 1997

Stiftung Entwicklung und Frieden, Globale Trends –2004/2005, Fakten Analysen Prognosen , Frankfurt a. M. 2003

von Weizsäcker, Ernst Ulrich/Lovins, Amora/Lovins, Hunter: Faktor vier, doppelter Wohlstand, halbierter Verbrauch. Der neue Bericht des Club of Rome, 1997, Droemer Knaur

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit, Zusammenfassung für Entscheidungsträger, Berlin 2003 (der Gesamtbericht ist zu finden unter: www.wbgu.de)

World Energy Center, Information – Energy info centre news & events – London 1999 - 2004

Zukunftskommission der Friedrich-Ebert-Stiftung, Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit, sozialer Zusammenhalt, ökologische Nachhaltigkeit, Drei Ziele – ein Weg, Bonn 1998

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 81–83*

Karl F. Alexander

Perspektiven der Kernenergie für eine nachhaltige Versorgung der Menschheit mit Energie (Zusammenfassung)

Der Autor hat bereits mehrmals zu diesem Thema in der Akademie der Wissenschaften der DDR und der Leibniz-Sozietät Stellung genommen (Liste am Ende). In dem Vortrag am 10.12.04 wurde die weltweite kontinuierlich quantitative und qualitative Weiterentwicklung der Stromerzeugung aus Kernenergie und ihr stetig wachsender Anteil an Hand von Overhead-Folien in freier Rede dargestellt. Es wurden folgende Fragen behandelt:

Problemfelder zukünftiger Energieperspektiven: (Vorräte und Reichdauern von Energierohstoffen, Rationelle Energieanwendung, Struktur des Endenergiebedarfs, Technologien für Umwandlung und Transport, Umweltverträglichkeit und Risiken, Erschließung regenerativer Energiequellen, Voraussetzungen für eine nachhaltige Entwicklung). *Beurteilungskriterien:*: Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Anlagensicherheit, Versorgungssicherheit, langfristig starke Reduzierung des fossilen Anteils).

Energieressourcen: Reichdauer in Jahren bei gegenwärtigem Verbrauch: Kohle 233, Erdöl 43, Erdgas 64, Uran (1 %) 35, Uran (60%) 2100.

Perspektiven für die Befriedigung des wachsenden Energiebedarfs der Erdbewohner: [atw 47 (2002) 746] Grafik.

Gegenwärtige Situation und Schlussfolgerung: Der Primärenergieverbrauch der Welt liegt bei 12 Mrd. t Steinkohleeinheiten pro Jahr. Nur Kohle und Kernbrennstoff (bei Einsatz von Brütertechnologie) werden im Laufe der nächsten 50 Jahre noch nicht knapp. Die Verteilung des Energieverbrauchs über die Weltbevölkerung ist extrem ungleichmäßig. Von den bisher genutzten fossilen Energieträgern hat nur die Kohle eine langfristige Perspektive. *Schlussfolgerung:* Die rechtzeitige Erschließung neuer Energieträger mit langfristig ausreichendem Ressourcenpotential ist unabdingbar. Regenerative Energiequellen müssen forciert entwickelt und unter Beachtung ökonomischer Kriterien nutzbar gemacht werden.

Umweltverträglichkeit und Risiken von Energietechnologien: Bei fossilen Energieträgern globales Risiko durch Treibhauseffekt, lokale Risiken durch Schadstoffe, Berufsrisiko durch Unfälle und Berufskrankheiten (Bergbau). Bei Kernenergie kein Umweltrisiko im Normalbetrieb der Anlagen. Lokale und regionale Risiken durch Radioaktivität bei Unfällen. Berufsrisiko durch mögliche Strahlenbelastung. Bei Wasserkraft Risiken durch Störungen des ökologischen Gleichgewichts (Stauseen). Lokale und regionale Risiken bei Dammbruch. Berufsrisiko bei Bau und Betrieb der Anlagen.

Problem Atommüll: Ein 1000 MWe Druckwasser-Reaktor verbraucht pro Jahr ca. 23 Tonnen angereichertes Uran. Davon bleiben nach Abtrennung von Uran und Plutonium als zu entsorgender radioaktiver „Müll" 3,1 Kubikmeter hochaktiver (170 MCi) und einige hundert cbm mittel- und niedrigaktive Abfälle (2 MCi) übrig. Das geringe Volumen erlaubt aufwendige Maßnahmen für sicheren Einschluss und gefahrlose Endlagerung.

Kernenergie vorn: 2003 betrug der Anteil der Kernenergie an der allgemeinen Stromversorgung in Deutschland 31,7 Prozent. Im Grundlastbereich liegt der Anteil bei 50 Prozent. Die deutsche Stromversorgung stützt sich zu rund 80 Prozent auf die drei Säulen Kernenergie, Braunkohle und Steinkohle.

Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung aus Kernenergie bis Ende 2002: 441 Kernkraftwerke in 33 Ländern in Betrieb, installierte Leistung 377 359 MW, 32 Reaktoren in 12 Ländern im Bau, 17 % (EU 35 %) der Welt-Stromerzeugung, kumulierte Betriebserfahrung 10 625 Reaktorjahre. Seit Tschernobyl (1986) hat sich die Stromerzeugung aus Kernkraft verdoppelt.

Zukunft der Kernenergie: Kernkraftwerke mit *Leichtwasserreaktor* (LWR), *Hochtemperaturreaktor* (HTR), *Schneller Brüter* (SBR) (Grafiken). Der LWR baut seine Dominanz als Stromerzeuger aus. Plutonium-Rückführung und Verbrennung freigewordener Kernsprengstoffe strecken die Uranreserven. Der Europäische Druckwasserreaktor (EPR) ist für Finnland wettbewerbsfähig. In Zukunft wird Einsatz von SBR erforderlich. *Fusionsreaktoren*: Ohne Demonstrationsanlage (ITER) ist noch keine seriöse Prognose über Einsatzstrategien möglich.

Projected Nuclear Capacity Growth [IAEA Bull. 46/1, June 2004] mit und ohne SBR. (Grafik). Ohne SBR würde sich ab 2060 die nukleare Stromerzeugungskapazität wieder verringern.

Vergleich der Stromerzeugungskosten (in €/MWh): Kernenergie 23,7 – Gas:32,3 – Kohle: 28,1 – Wind: 50,1 [atw 49(2004)594]

Nachbemerkung

Das im Vortrag von mir behandelte Thema wurde im nächsten Workshop am 04.03.2005 von Günter Flach sehr viel detaillierter dargestellt. Dieser Aufsatz mit dem Titel „Entwicklungstendenzen der Kernenergie und ihre Rolle im Rahmen des globalen Energiesystems“ ist im vorliegenden Band der Sitzungsberichte veröffentlicht.

Frühere Vorträge des Autors:

K. F. Alexander, Energiequellen der Zukunft, Sitzungsberichte AdW der DDR 21N, 1978 (Plenarvortrag 15.12.1977)

K. F. Alexander, Stand und Perspektiven einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Weltenergiewirtschaft. Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät 5 (1995) 29–54 (Plenarvortrag am 22.9.1994)

K. F. Alexander, H. Friedrich, Probleme der rationellen Energieanwendung, AdW der DDR, Aus Plenum und Klassen 12(1987)14, S.7–29

K. F. Alexander, Die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl – Bilanz nach 10 Jahren, Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät 17(1997) 2, S. 5–21

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82 (2005), 85–103*

Günter Flach

Entwicklungstendenzen der Kernenergie

1 Einige Aspekte des globalen Energieproblems

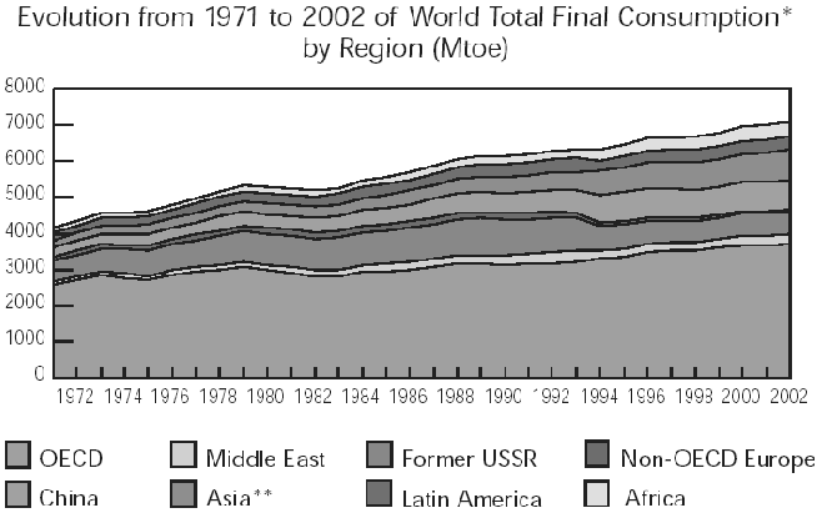
Am Anfang dieser Ausführungen zu den Perspektiven der Kernenergetik mögen einige thesenartige Bemerkungen zum Problem Energie und Gesellschaft stehen. Die Abhängigkeiten zwischen der weiteren Entwicklung der menschlichen Zivilisation und der dafür notwendigen Nutz- und Endenergie nehmen unter den Anforderungen der Nachhaltigkeit zu. Der Aussageschwerpunkt liegt hier auf Nutz- und End- (oder Gebrauchs-) Energie, weil nur diese die unmittelbare Wechselwirkung des Menschen mit seinem natürlichen und sozialen Umfeld bewirkt und nur durch die Verfügbarkeit spezieller Endenergieformen eine hochentwickelte Zivilisation existieren kann.

Nachhaltigkeit wird hier als Entwicklungsweg verstanden, der *dauerhaft* den Ansprüchen einer an dem Lebensniveau entwickelter Länder orientierten Lebensweise aller Menschen dieser Erde genügt, weltweite soziale Gerechtigkeit garantiert und eine adäquate Umwelt reproduziert, d.h., die Stabilität biologischer und physikalischer Systeme garantiert. Dies verlangt neben der Bereitstellung von dem Lebensniveau äquivalenten Mengen an Endenergie, gleichrangig deren Verfügbarkeit (also den Zugriff entsprechend den aktuellen Bedürfnissen) und die Gewährleistung der entsprechenden Qualitätsparameter unter Berücksichtigung von Klimaschutz und Umweltverträglichkeit.

2003 erreichte der Endenergieverbrauch weltweit die in der Tabelle auf der nächsten Seite dargestellten Werte. Das anschließende Bild zeigt den Endenergieverbrauch von 1971 bis 2002 aufgeteilt nach Regionen dieser Welt[1]. Man erkennt, daß ein bedeutendes Missverhältnis im Endenergieverbrauch zwischen den entwickelten Ländern und den Entwicklungsländern besteht, wenn man die jeweiligen Bevölkerungszahlen dazu in Relation setzt.

1 Quelle IEA, Key World Energy Statistics 2004

Gebrauchsenergie	Verbrauch in TWh/a	Bemerkungen
Elektroenergie	14 000	installierte Leistung 3 000 GWe (2/3 fossil erzeugt)
Treibstoffe	16 000 (Brennwert)	fast zu 100% aus Erdöl
Wärme	44 000	$> 50\%$ Prozesswärme (über 100°), der Rest Heizwärme und Warmwasser ($< 70^\circ$), zu 3/4 erzeugt aus fossilen Brennstoffen)



Umgerechnet auf Primärenergie verbraucht eine Person in den entwickelten Industrieländern im Mittel etwa 200 kWh pro Tag, in den Schwellen- und Entwicklungsländern etwa 20 kWh. Etwa 2 Milliarden Menschen haben heute immer noch keinen Zugriff auf Elektroenergie.
Global gesehen ist mit folgenden Tendenzen zu rechnen:

- Die energetischen Aufwendungen für die Bereitstellung von Rohstoffen, Lebensmitteln, Wasser, der Sicherung einer umweltverträglichen Entwicklung[2] und die Anhebung des Lebensniveaus in den Entwicklungsländern werden wohl trotz erheblicher Potentiale zur Energieeffizienzsteigerung

2 wozu neben dem direkten Klimaschutz auch die Realisierung von geschlossenen Stoffkreisläufen und die sichere Entsorgung schädlicher Reststoffe gehört.

zunehmen.

- Selbst bei der Annahme von moderatem Wachstum des weltweiten Energieverbrauchs in den nächsten 30 – 50 Jahren werden beträchtliche wirtschaftliche, politische, soziale und ökologische Probleme zu bewältigen sein, um globalen und regionalen Katastrophen zu entgehen.
- Die langfristige Umwandlung der heutigen (und in Schwellen- und Entwicklungsländern in den nächsten 10 – 30 Jahren entstehenden) Basis für die Bereitstellung von End- und Nutzenergie in eine nachhaltige, verlangt eine emotionsfreie und sachliche Analyse der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten (einschließlich ihres Entwicklungspotentials) sowohl im Bereich des Strukturwandels bei den Endenergiearten als auch beim Einsatz der möglichen Primärenergieträger für die Erzeugung von Endenergie.
- Auch die Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie (also etwa in Licht, Raumwärme, Bewegungsenergie, Prozessenergie usw.) ist mit Umwandlungsverlusten behaftet und kann die Umwelt belasten. Als Beispiel hierfür möge die Raumheizung mit Kohle oder Holz dienen.
- Der Elektroenergie kommt eine besondere Rolle zu. Ihre Verfügbarkeit bestimmt in erheblichem Maße sowohl die Produktivitätsentwicklung, den Fortschritt beim Übergang zur Informationsgesellschaft und die Lebensqualität der Menschen. Elektroenergie kann mit hohem Wirkungsgrad in beliebige Arten von Nutzenergie umgewandelt werden. Die Wandlungsprozesse belasten die Umwelt unwesentlich. Nicht umsonst ist die Elektroenergie die einzige Endenergieform, deren Bedarf auch in hochentwickelten Länder weiter anstieg und wohl auch ansteigen wird.

Ein relativer Zuwachs des Anteils von Elektroenergie im Spektrum der Endenergien kann das Gesamtproblem entspannen. Dies betrifft insbesondere die Möglichkeiten der Substitution von Treibstoffen durch Elektroenergie (als Beispiel kann die Elektrifizierung der Eisenbahn dienen), das Elektroauto ist zweifelsfrei eine echte Alternative. Allerdings erfordert dies energische Anstrengungen auf dem Gebiet der Elektroenergiespeicherung. Eine zweite bedeutende Strukturänderung kann in der Substitution von heutigen Treibstoffen durch Wasserstoff (einschließlich solcher Vorstufen wie die Kohleverflüssigung und die Methanolherstellung aus Erdgas usw.) gesehen werden. Beide Substitutionslinien sind jedoch mit beträchtlichen Aufwendungen im technologischen und im Infrastrukturbereich verbunden (Elektroenergie-

speicher, Erzeugungstechnologien von Wasserstoff, Übertragungsnetze bzw. -leitungen, Lastverteilungen usw.)

Der entscheidende Strukturwandel muß im Bereich der Primärenergieträger und den mit ihnen verbundenen Energiewandlungsprozessen erfolgen. Hier spielen die Resourcen- und die Umweltproblematik eine herausragende Rolle. So hat die heutige Elektroenergieerzeugung beträchtlichen Einfluß auf das CO_2-Problem. Nachfolgend ist die CO_2-Belastung für europäische Länder dargestellt[3]:

GR	DK	IRL	D	NL	P	I	UK	SF	E	EU	B	L	A	S	F	CH	NOR
908	789	712	**667**	615	592	575	559	512	486	**429**	291	291	278	140	101	39	15

Gramm CO_2-Äquiv. je kWh; Berechnung des UBA für 2003 mit GEMIS *[2]*

Man erkennt deutlich den Einfluß der Erzeugungsstruktur auf die Werte. Andererseits sei auf die Tatsache verwiesen, daß die Kohlevorkommen weit über den Erdöl- und Erdgasvorkommen liegen und deshalb durchaus noch mit modernen Technologien bei deutlicher Verringerung der CO_2-Emission in den nächsten 30 – 50 Jahren eine bedeutende Rolle spielen könnten.

Auf längerfristige Sicht wird es notwendig, eine CO_2-freie Energetik zu schaffen. Dies kann aus heutiger Sicht unter dem Blickwinkel physikalisch-technischer Möglichkeiten nur auf der Basis der Kernenergie (Spaltung und Fusion?) und der regenerativen Energieträger, insbesondere der Solarenergie erfolgen.

2 Entwicklungsstand und Zielstellungen für die weitere friedliche Nutzung der Kernenergie

Im folgenden sollen einige Aspekte der Frage behandelt werden, ob und unter welchen Bedingungen die Kernenergie einen substantiellen Beitrag zur Bewältigung der anstehenden Wandlungsprozesse im Bereich der Energiebereitstellung leisten kann.

2.1 Heutiger Stand der Kernenergieentwicklung

Es liegen beträchtliche Erfahrungen beim Betrieb von Kernenergieanlagen vor. 2004 wurden weltweit ca. 16% der Elektroenergie mit Kernenergie erzeugt (450 KKW).

3 entnommen der Analyse des Umweltbundesamtes: Anforderungen an die zukünftige Energieversorgung, August 2003

Die Last-Verfügbarkeit lag dabei bei 84% (1991 74%).
Etwa 93% der installierten Leistung entfallen auf Druck-und Siedewasserreaktoren. Kernkraftwerke werden hauptsächlich für die Elektroenergieerzeugung im Grundlastbereich eingesetzt[4]. Nur wenige Kernkraftwerke dienten bisher der Meerwasserentsalzung und/oder der Wärmeversorgung. Folgende Aussagen lassen sich zusammenfassend treffen:

- Es liegen mittlerweile mehr als 12 000 Jahre Betriebserfahrungen mit Kernkraftwerken vor.
- Die Umweltbelastung durch Kernenergieanlagen im Normalbetrieb (einschließlich der vor- und nachgelagerten Prozesse) ist minimal, d.h., sie verschwindet in der Schwankungsbreite der natürlichen und sonstigen zivilisatorischen Strahlenbelastung.
- Es hat einen katastrophalen Unfall[5] und einen Druckwasserreaktorunfall mit partieller Kernschmelze[6] gegeben, daraus sind sowohl bezüglich der Reaktortypenstrategie als auch bezüglich der sicheren Betriebsführung vielfältige Konsequenzen gezogen und umgesetzt worden.
- Heute kann man von einer globalen Sicherheitskultur sprechen. Diese ist von der IAEA ausgearbeitet worden, sie wird durch die WANO (World Nuclear Association, weltweite Organisation der Betreiberpersonals von KKW) umgesetzt.
- Die Stromerzeugungskosten liegen im Vergleich mit anderen Primärenergieträgern im niedrigen Bereich und sind vergleichbar mit denen bei der Erzeugung aus Braun- oder Steinkohle.
- Das internationale Regime zur Kontrolle der Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen hat sich bewährt. Allerdings greift es nur, wenn die jeweiligen Länder sich diesem Regime unterwerfen, ist also ein zutiefst politisches Werkzeug.
  Probleme mit Nordkorea und weiteren Staaten im Zusammenhang mit dem Streben nach Kernwaffen sind geopolitischer Natur und hängen nicht von der Zahl der Kraftwerke und dem weiteren Ausbau der Kernenergie ab. Diese Probleme lassen sich nur politisch lösen.

4 Da in der BRD die Kernkraftwerke im wesentlichen bis 2030 ausser Betrieb gehen, müssen bis dahin insgesamt etwa 50% der Grundlastkraftwerke ersetzt werden, eine Zielstellung für die es gegenwärtig kein gängiges Konzept gibt.

5 Tschernobyl, ein RBMK-Reaktortyp, dessen Sicherheitseigenschaften erheblich von den des Druckwasserreaktors mit Containment abweichen.

6 Three Miles Island, USA, mit Rückhaltung der Schmelze im Containment, ohne essentielle radiologische Auswirkungen auf die Umgebung.

Aus den bisherigen Erfahrungen und den Anforderungen, die sich aus den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit ergeben, sind einige Schlußfolgerungen für die zukünftige Entwicklung von besonderer Bedeutung:

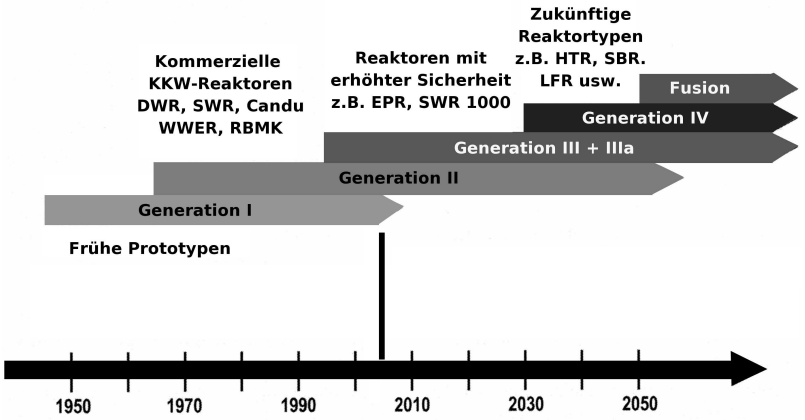
- Die nukleare Sicherheit (im Sinne der Wirkung auf die Umwelt) sollte auch in Situationen, die den Auslegungsstörfall überschreiten[7], gewährleistet sein. Dies bedeutet in der ersten Phase den weiteren Ausbau der passiven Sicherheitsbarrieren, in der zweiten die Entwicklung von Anlagen mit inhärenter Sicherheit.
- Die Kernkraftwerke (auch die schon existierenden) müssen mit moderner Automasierungstechnik und weiteren technologischen Neuerungen so ausgerüstet werden, so daß auch Havariesituationen sicher in ungefährliche Zustände überführt werden können.
  Hier spielt die Qualifizierung und die Verantwortung des Personals eine bedeutende Rolle.
- Obwohl die Grundprinzipien und die wissenschaftlich-technischen Voraussetzungen für die sichere Isolierung der radioaktiven Rückstände von der Umwelt (auch auf lange Sicht) weitgehend ausgearbeitet sind, sollten weitere Maßnahmen zur Verringerung der Toxizität dieser Abfälle und der Verkürzung ihrer Einschlußzeit ergriffen werden.
- Wenn die Kernenergie auch längerfristig eine bedeutende Rolle bei der Energiebereitstellung spielen soll, muß die Einbeziehung der ^{238}U- und ^{232}Th-Resourcen in die Spaltstoffbereitstellung betrieben werden. Dies heißt weitere Erhöhung des Abbrandes, Brütereinsatz und Schließung des Kernbrennstoffkreislaufes.
- Die Entwicklungen für die zukünftige Nutzung der Kernfusion müssen zielstrebig fortgesetzt werden.
- Die weitere Entwicklung der Kernenergie muß so erfolgen, daß auch bei Schließung des Kernbrennstoffzyklus die Möglichkeit zur Abzweigung von Spaltmaterial für nichtfriedliche Zwecke ausgeschlossen wird.
  Ein generelles, weltweites Verbot von Kernwaffen und die Zuführung des für Kernwaffen vorhandenen Spaltmaterials in die friedliche Nutzung muß auf politischer Ebene durchgesetzt werden.
- Angesichts der globalen Bedeutung und Tragweite des vor der Menschheit stehenden Energie-Umweltproblems sollte es gelingen, in die Debatte

7 in den meisten heutigen Druckwasserreaktoren der Abriss einer Hauptumwälzleitung mit nachfolgendem Versagen der (redundant ausgelegten) Notkühlung und nachfolgender Kernschmelze.

über die Kernenergie, die in der Öffentlichkeit oft mit wissenschaftlich unhaltbaren Argumenten geführt und nicht selten politisch instrumentalisiert wird, wieder ein gewisses Maß von Rationalität zu tragen.

2.2 Die Entwicklungtendenzen der Kernernergetik

Im folgenden Bild wird ein Überblick über die Etappen der Kernenergieentwicklung mit Ausblick auf die Zukunft gegeben[8]. Die hier benutzte Periodisierung entspricht dem heute erreichten Kenntnisstand und basiert bezüglich der zukünftigen Etappen auf den international eingeleiteten technologischen Entwicklungen und Entwicklungsvorhaben.



Die heute betriebenen Anlagen (Generation II) dienen (mit wenigen Ausnahmen) der Elektroenergieerzeugung im Grundlastbereich. Durch Nachrüstungen im Sicherheitsbereich (moderne Blockleittechnik, vereinfachte Betriebsführung, zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der passiven Sicherheit und verbessertes Unfallmanagment usw.) kann für eine Reihe neuerer Anlagen die Lebensdauer bis auf 60 Jahre erhöht werden, so daß Laufzeiten bis etwa 2050 möglich werden.

Die Unterschiede der Anlagen von Generation II zu Generation III liegen hauptsächlich im Bereich der weiteren Erhöhung der Anlagensicherheit in Bezug auf mögliche Störfälle. Auch sie sind für die Elektroenergieerzeugung

8 siehe R. Güldner, Potential of Light Water Reactor for Future Nuclear Power Plants, atw 11, November 2003.

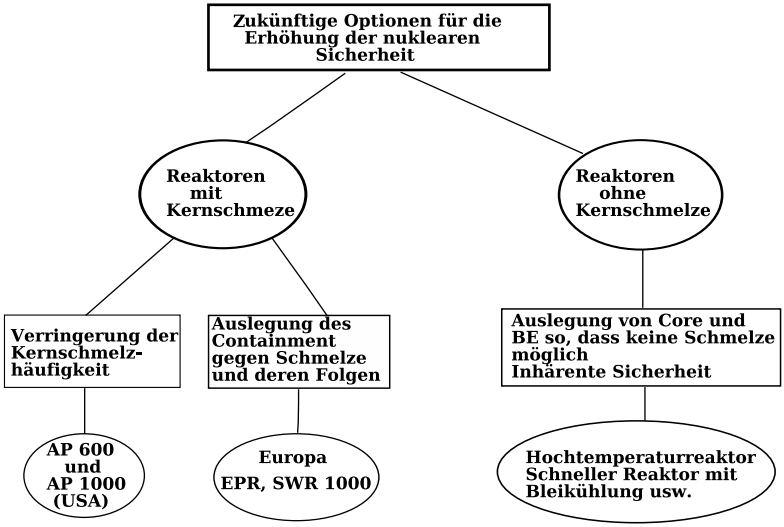
im Grundlastbereich vorgesehen.
Anlagen der Generation III sind im wesentlichen Weiterentwicklungen der bewährten Typen, über die jahrelange Erfahrungen und gesicherte Erkenntnisse ihres Verhaltens in Situationen, die vom Normalfall abweichen, vorliegen. Die Veränderungen beruhen auf den vorhandenen Erkenntnissen und dienen der Verringerung des technologischen Risikos. Dabei werden neue Technologien (z.B. moderne Verfahren der Automatisierungstechnik) eingesetzt und vorallem Ergänzungen der passiven Sicherheit zur Beherrschung von Störfällen vorgenommen, die die Auslegungsstörfälle überschreiten.
Typisch für alle Entwicklungen sind die nachfolgenden Merkmale:

- Standardisierung der jeweiligen Typen, um die Investitionskosten und die Errichtungszeiten zu senken.
- Einfachere und robustere Auslegung, um die Betriebsführung noch übersichtlicher zu gestalten.
- Höhere Verfügbarkeit und Verlängerung der Lebensdauer auf 60 Jahre.
- Reduzierung von Kernschmelzereignissen und Gewährleistung minimaler Auswirkungen auf die Umwelt.
- Höhere Abbrände, um den Spaltstoffbedarf zu reduzieren.

Fast alle Reaktorentwickler und Anlagenbauer warten mit weiterentwickelten Systemem ihrer bewährten Baureihe auf (Westinghouse und General Electric in den USA und die daraus hergeleiteteten Typen in Ostasien, Misubishi in Japan, Framatom und Siemens in Europa, um einige Beispiele zu nennen).
Als typisches Beispiel für diese evolutionäre Entwicklungsrichtung kann der EPR (in Zusammenarbeit zwischen Framatom, Frankreich und Siemens, BRD entstanden) dienen. In dieses Projekt sind die Betriebserfahrungen der französischen und deutschen Druckwasserentwicklungslinie nebst vielen Ergebnissen von Forschungen zur Reaktorsicherheit in deutschen und französischen Kernforschungseinrichtungen eingeflossen.

Aus der Sicht sogenannter auslegungsüberschreitender Störfälle (Kernschmelze tritt auf), läßt sich die weitere Entwicklung auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit wie in der nachfolgenden Graphik dargestellt, einteilen[9]:

9 Einteilung fortgeschrittener Reaktoren nach Kugeler, siehe L. Weil in Globale Reaktorsicherheit, Herbstsitzung 2004 des Arbeitskreises Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.



Grob gesprochen wird den drei Sicherheitsebenen für die Auslegung von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren eine vierte hinzugefügt[10], die den sicheren Einschluß von Kernschmelzen zur Vermeidung von Auswirkungen auf die Umgebung beinhaltet.
Der EPR gehört in die Kategorie der Reaktoren mit dieser 4. Sicherheitsebene. Die europäischen Anforderungen an diese 4. Stufe beinhalten den praktischen Ausschluß von großen frühen Freisetzungen.
Das Grundprinzip besteht in der Überführung von extremen Zuständen, die zu potentiell unbeherschbaren Unfallsequenzen führen könnten, in beherrschbare Zustände. Ein besonders kritisches Phänomen bei Überschreitung des Auslegungsstörfalles eines Druckwasserreaktors ist das Versagen des Reaktordruckbehälters bei hohem Primärkreisdruck infoge des Kernschmelzens (Frühphase). Dies kann zu großem Druck auf das Containment und zum Aufheizen desselben führen. Zur Abwendung solch eines Ereignisses wird der Reaktor mit spezifischen Druckentlastungsventilen versehen. Im gleichen Sinne werden solche Ereignisse wie Dampf- und Wasserstoffexplosionen behandelt.

Gleichzeitig müssen die Auswirkungen von Kernschmelzszenarien bei niedrigem Druck (Spätphase) so begrenzt werden, daß Evakuierungen außer-

10 siehe M. Nie und D. Bitterman, Implementierung von Maßnahmen zur Beherrschung schwerer Störfälle in Anlagen der 3. Generation am Beispiel EPR, atw 5, Mai 2004.

halb der unmittelbaren Betriebsumgebung nicht nötig sind. Diese Zielstellung wird durch die Hinzufügung eines sogenannten Core Catcher zum Containment erreicht[11]. Das Ziel dieser Erweiterung des Containments besteht in der Rückhaltung der Kernschmelze in einer speziellen Grube, in der durch entsprechende Kühlmaßnahmen die Schmelze in eine erstarrte, poröse Masse überführt und so ein sicherer Einschluß des radioaktiven Inventars gewährleistet wird. Die Analysen solcher Unfallszenarien wurden durch Großexperimente in verschiedenen deutschen und französischen Forschungseinrichtungen begleitet. Die entsprechenden Schlußfolgerungen wurden in der Anlagenauslegung berücksichtigt.
Darüberhinaus wird mit diesem Typ die Erhöhung der Leistung pro Block auf bis zu 1750 MWe, einen Abbrand von 65 GWd/t, einem Wirkungsgrad von 36% und die Verlängerung der Lebensdauer auf 60 Jahre angestrebt.
So oder ähnlich werden alle Reaktortypen der Generation III ausgelegt, wobei in den USA mit Hilfe der probabilistischen Sicherheitsanalyse die Zielstellung angestrebt wird, die Häufigkeit für große frühe Freisetzungen radioaktiven Materials unter $10^{-6}/\mathrm{a}$ zu halten[12].
Es sei hier angemerkt, daß auch an der Entwicklung kleinerer Druck- und Siedewasserreaktoren gearbeitet wird, die vorallem für die Wärme-Kraftkopplung, den Einsatz als Mittel- und Spitzenlastkraftwerke sowie die Bereitstellung von Fern- und Prozesswärme gedacht sind.

2.3 Innovative Reaktortypen

Wenn von innovativen Reaktorkonzepten gesprochen wird, dann sind zumeist Systeme gemeint, deren Grundprinzipien schon in der Frühphase der Kernenergetik entstanden sind, jedoch zunächst nur als mögliche Konzepte bzw. als Versuchsanlagen, die in der Generation II realisiert wurden. Die Grundzielstellungen für die Entwicklung solcher Systeme kann man grob gliedern in:

- Anlagen mit inhärenten Sicherheitsmerkmalen, überkritische Zustände sind physikalisch nicht möglich, Kernschmelzsituationen können nicht auftre-

11 siehe M. Nie und D. Bitterman, Implementierung von Maßnahmen zur Beherrschung schwerer Störfälle in Anlagen der 3. Generation am Beispiel EPR, atw 5, Mai 2004.

12 Die PSA wird häufig (vordergründig) fehlinterpretiert, indem ihre Aussagen über die Häufigkeit bestimmter Ereignisse in Wahrscheinlichkeiten für ein sogenanntes Restrisko uminterpretiert werden.

ten[13], bzw. radiologische Auswirkungen auf die KKW-Umgebung sind ausgeschlossen.

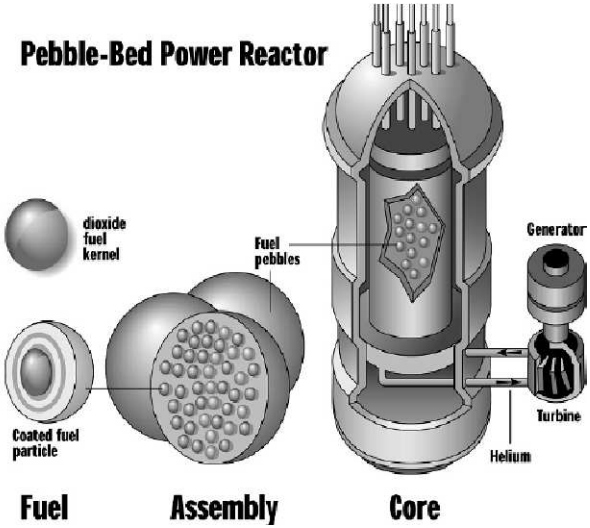
- Bessere Nutzung der Uran- und Thoriumreserven (Erhöhung des Abbrandes, Brüter)
- Anwendungen über den Bereich der Elektroenergieerzeugung hinaus (Meerwasserentsalzung, Bereitstellung von Wärme im Hochtemperaturbereich (800 – 1000 Grad) für technologische Prozesse.
- Die Wiederaufarbeitung wird insite vorgenommen, wobei die minoren Aktiniden mit dem Plutonium vermischt bleiben und zusammen in den Reaktor zurückgeführt werden. Das vermindert die Möglichkeit der illegalen Abzweigung von Plutonium beträchtlich.
- Systeme, die in der Lage sind, langlebige Transurane, die bei der Energieerzeugung auftreten, in kürzerlebige Elemente umzuwandeln (Transmutation).

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über einige wichtige Entwicklungslinien gegeben.

Hochtemperaturreaktor: Schon in den 1960-ziger Jahren begann die Entwicklung dieses Typs, der mit Gaskühlung arbeitet und z.B. mit Helium-Kühlung Gastemperaturen bis zu 950° erreichen kann (Nutzung der Hochtemperaturwärme für stoffwandelnde Prozesse oder Antrieb von Gasturbinen). Diese Technologie ist in den letzten Jahren weiterentwickelt worden, sie erfordert wegen des direkten Zyklus eine hohe Stabilität und Integrität von Brennstoff und Reaktorkomponenten.
Der Kernbrennstoff ist in kleinen Partikeln (Kügelchen) mit Durchmessern unterhalb 1 mm eingeschlossen. Es handelt sich um auf etwa 9% angereichertes ^{235}U in der Form von Urancarbid (-oxycarbid) ummantelt mit Schichten aus pyrolytischem Graphit und außen einer Siliziumcarbidschicht (coated particles). Dies gestattet einen bis zu 2000° stabilen, dichten Einschluß der Spaltprodukte. Diese Brennstoffpartikel können entweder in hexagonalen Graphitprismen angeordnet oder in billardgroßen Graphitkugeln, ummantelt wiederum mit Silikoncarbid (ca 15000 Partikel pro Kugel, Kugelhaufenreaktor), eingeschlossen werden. Im folgenden Bild ist dieser Reaktortyp dargestellt[14]:

13 Die Häufigkeit für Corezerstörung liegt unterhalb von 10^{-7}/a.

14 entnommen aus: M. Streit, Aktuelle Brennstoffforschung am Paul Scherrer Institut, Villingen, Schweiz. Vortrag YG-Herbsttreffen 2003, KKW Gundremmingen BRD.



In beiden Fällen besitzt das Reaktorsystem einen hohen inhärenten Sicherheitsgrad, jede Erhöhung der Temperatur im System führt zu einem Rückgang der Reaktivität.

Ein Versuchsreaktor dieses Typs ist seit 1998 in Japan in Betrieb (Prismentyp). Das Ziel ist die Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser. In China ist seit 2000 ein Kugelhaufenreaktor mit einem breiteren Versuchsspektrum in Betrieb (10 MW).

Südafrika entwickelt ein System auf der Basis der deutschen Versuchsstudien (Kugelhaufen). Es soll ein Durchbruch bezüglich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Angestrebt wird ein Modul mit direktem Gasturbinenzyklus (110 MWe, Wirkungsgrad 45%). 450 000 Brennstoffkugeln wandern kontinuierlich durch den Reaktor (jede etwa 10 mal) bis eine Restanreicherung von 5-6% und ein Abbrand von 80 GWd/t erreicht wurde. Eine Prototypanlage soll 2006 in Betrieb gehen.

Weitere Entwicklungen sind in Zusammenarbeit zwischen den USA und Russland auf dem Wege (Zylindertyp). Ein Nebenziel ist dabei die Verbrennung von Waffenplutonium in Seversk, Russland (2006 – 2009).

Hochtemperaturreaktoren sind in der Lage, die Kombination von Uran und Thorium, ^{233}U und Thorium sowie Plutonium und Thorium als Brennstoff zu verwerten.

Schulenberg et al.[15] informieren über 6 Projekte des Rahmenforschungsprogramms "Generation IV International Forum (GIF)".
Eines dieser Projekte ist der Höchsttemperaturreaktor VHTR. Dieser ist ein graphitmoderierter, heliumgekühlter thermischer Reaktor mit der Leistung von 600 MWe und der Heliumaustrittstemperatur von $1000°$. Als Brennstoff dienen mit ZiC beschichtete Partikel. Die Elektroenergieerzeugung soll im direkten Zyklus, die Erzeugung von Wärme im Hochtemperaturbereich soll über Wärmetauscher im indirekten Kreislauf (etwa zur Wasserstoffproduktion) erfolgen.

Reaktoren mit schnellen Neutronen: Schnelle Reaktoren (wie man verkürzt sagt) werden hauptsächlich aus der Sicht der Erschließung von Brennstoffreserven als Brutreaktoren ausgelegt. In Betrieb waren und sind etwa 20 Anlagen, die alle mit flüssigem Natrium gekühlt werden. Diese spezielle Technologie erfordert beträchtliche Aufwendungen, muß doch wegen der Eigenschaften des Natriums ein zusätzlicher Zwischenkreislauf (ebenfalls flüssiges Natrium) zwischengeschaltet werden, um bei eventuellen Wasser-Natrium-Reaktionen keine Aktivität freizusetzen.

Das spezielle Neutronenregime dieses Reaktortyps gestattet, während des Betriebes ^{238}U in ^{239}Pu umzuwandeln und dieses so der Verwendung zuzuführen. Bei entsprechender Auslegung läßt sich mit diesem Reaktortyp eine erweiterte Spaltstoffreproduktion erzielen, d.h., neben der Energieproduktion erzeugt der Reaktor Spaltstoff für die Versorgung weiterer Reaktoren. Allerdings verlangt dies den geschlossenen Kernbrennstoffzyklus, also die chemische Wiederaufarbeitung der dem Reaktor entnommenen Brennstoff- und Brutelemente und die Herstellung neuer Brennelemente aus dem gewonnenen neuen Spaltstoffen unter gleichzeitiger Abtrennung der Spaltprodukte und der zudem entstandenen Transurane. Die dazu notwendigen Prozesse sind bisher nur in Versuchs- und Prototypanlagen entwickelt und getestet worden (Frankreich, England, Russland).
Relativ große Erfahrungen besitzt Russland, das mehrere große Anlagen betrieb und betreibt. Der BN-350 (jetzt in Kasachstan) hat während seiner 27-jährigen Betriebszeit zur Hälfte der Elektroenergieerzeugung und zur Hälfte der Meerwasserentsalzung gedient. Der BN-600 (Beloyarsk) speist seit 1981 Elektroenergie ins Netz ein und soll in den kommenden Jahren nach Umbau der Plutoniumentsorgung aus den militärischen Resourcen dienen.

15 Wissenschaftliche Berichte des FZKA 6967

Gegenwärtig ist der BN-800 in der Projektphase. Dieser soll die Schlußfolgerungen aus den Betriebserfahrungen des BN-600 berücksichtigen und als Brennstoff U+Pu-Nitride verwenden.

Erfahrungen aus dem U-Bootbereich mit Blei-Wismut-Kühlmitteln (^{208}Pb ist transparent für Neutronen) werden für die Entwicklung eines bleigekühlten schnellen Reaktors mit U+Pu-Nitriden als Brennstoff genutzt. Dieser Reaktor ist inhärent sicher, enthält kein Uran-Blanket und erzeugt daher nur nicht waffenfähiges Plutonium. Die Refabrikation von Brennelementen aus dem erbrüteten Spaltstoff kann innerhalb der Reaktoranlage erfolgen. Reaktoren mit einer Leistung von 1200 MW sind geplant, eine Pilotanlage wird in Beloyarsk gebaut. Im Rahmen des schon erwähnten Programms GIF wird die Entwicklung eines bleigekühlten schnellen Reaktors vorgeschlagen (LFR). Dieser Reaktor soll über einen geschlossenen Brennstoffzyklus mit Verbrennung der Aktiniden und einer guten Verwertung von brutfähigem Uran verfügen. Er kann in unterschiedlichen Auslegungen angewendet werden:

- Batteriekraftwerk mit etwa 150 MWe Leistung (Batterie bedeutet hier vorgefertigtes Core mit sehr langen Abbrandzyklen).
- Modulares Kraftwerk mit einer Leistung von 400 MWe
- Monolythische Lösung mit 1200 MWe

Der Brennstoff besteht aus brutfähigen Uran und Transuranen, gebunden in einer Metall- oder Nitridmatrix. Die Batterievariante ist schon weit entwickelt (Beladezyklus zwischen 10 und 30 Jahren). Das Core wird komplett bein Hersteller gefertigt und zum Kraftwerk transpotiert. Die Kühlung erfolgt im Naturumlauf. Das System hat deshalb und wegen seines geschlossenen Brennstoffzyklus hohe Sicherheitseigenschaften.

Weitere fortgeschrittene Typen: Im Rahmen des Programms GIF werden über die schon erwähnten Anlagen *LFR* (Lead Cooled Fast Reactor), bleigekühlter schneller Reaktor und *VHTR* (Very-High-Temperature Reactor), hinaus noch folgende Systeme untersucht:
SFR (Sodium Cooled Fast Reactor), natriumgekühlter schneller Reaktor,
GFR (Gas Cooled Fast Reactor), gasgekühlter schneller Reaktor,
MSR (MoltenSalt Reactor), Salzschmelzenreaktor
SCWR (Supercritical-Water-Cooled Reactor), mit Wasser im überkritischen Zustand gekühlter Reaktor.

Am Programm GIF beteiligten sich ursprünglich die USA, Großbritanien, Frankreich, Kanada, Südafrika, Brasilien, Argentinien, Südkorea, Schweiz.

Unter der Leitung des Department of Energy der USA entstand ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm, welches später in einer ”technology roadmap” zusammengefaßt wurde. In der Zwischenzeit sind zur Realisierung des Programms Regierungsabkommen geschlossen worden. Man rechnet mit einsatzfähigen Systemen, die auch den Wirtschaftlichkeitskriterien genügen etwa um 2030. Aus Gründen der Verhinderung von Weiterverbreitung waffenfähigen Plutoniums bevorzugt das Programm GIF die Wiederaufarbeitung des abgebrannten Brennstoffes mit Vermischung der Minoren Actiniden mit dem erzeugten Plutonium und eventueller Transmutation. Es ist nicht zu übersehen, daß die USA-Administration mit der Führungsposition in diesem Programm gleichzeitig auch langfristig wieder eine führende Rolle in der zukünftigen Kernenergetik anstrebt.

Die russische Strategie der Kernenergienutzung beinhaltet einen massiven Ausbau des Kraftwerksparks (mindestens Verdopplung bis 2020), dabei stehen Anlagen der Generation III im Zentrum der Aufmerksamkeit. Dazu gehört neben weiterentwickelten WWR-Typen auch der schnelle Reaktor BN-1600. Die längerfristige Strategie sieht vorallem thermische Reaktoren mit Uran-Thoriumzyklus, Schnelle Brüter und modularisierte, gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren im Zentrum der Entwicklungen.

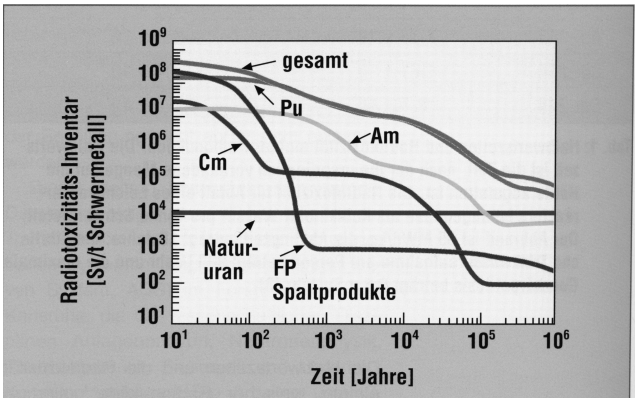
2.4 Transmutation

Bekanntlich spielt das Abfallproblem im Zusammenhang mit den Akzeptanzfragen eine besondere Rolle[16]. Zunächst einige Bemerkungen zum Abfall selbst. Dieser ensteht in den Brennelementen während der Verweilzeit im Core. Neben den Spaltprodukten entstehen durch Neutroneneinfang Transurane wie Pu, Np, Am, Cm, letztere als Minore Aktiniden bezeichnet. Diese werden zwar teilweise wieder gespalten, reichern sich aber insgesamt an.

Ein Maß für die Schädlichkeit des radioaktiven Abfalls ist die sogenannte Radiotoxizität. Diese ergibt sich für das entsprechende Radionuklid aus der Strahlenart, der Strahlenenergie, der Resorption im Organismus und seiner Verweildauer in diesem. Grob gesprochen wird die Radiotoxizität durch die effektive Dosis pro Bq bestimmt. Hiermit ist eine Rangordnung der verschiedenen Gruppen von Spaltprodukten und Transuranen möglich. Ohne auf Details einzugehen, kann man folgendes Bild für die Entwicklung des Radio-

16 Dies, obwohl seit vielen Jahren die prinzipiellen technologischen Probleme gelöst sind.

toxizitätspotentials der radioaktiven Abfälle entwerfen[17]:



Diese Angabe bezieht sich auf das Spaltproduktinventar eines typischen Druckwasserreaktors der Generation II mit einer Anreicherung von 4% und einem Abbrand von 40 MWd/kg (Schwermetall). In Deutschland werden jährlich ca 170 TWh Elektroenergie erzeugt, dies führt bei den genannten Bedingungen zur Produktion von ca. 4500 kg Pu, 250 kg Np, 100 kg Am und 17 kg Cm sowie etwa 19 t Spaltprodukte.
Zum Umgang mit diesem Abfall gibt es unterschiedliche Wege:

1. Entladung der abgebrannten Brennelemente, Zwischenlagerung am Entstehungsort bis zur sicheren Transporteignung und Endlagerung in einer dafür geeigneten Endlagerstätte. Dies verlangt einen sicheren Einschluß über 10^6 Jahre.
2. Wiederaufarbeitung der entladenen Brennelemente und Abtrennung von spaltbarem Uran und Plutonium zwecks Wiederverwendung (Mischoxidbrennelemente und Brutstoff für Schnelle Reaktoren). Dies entschärft zwar das Radiotoxizitätspotential des Restabfalls, verlangt jedoch ebenfalls sehr lange Depositionszeiträume, wenn auch auf etwas niedrigerem Niveau.
3. Wiederaufarbeitung mit Extraktion von Uran, Plutonium **und** den Minoren Aktiniden mit teilweiser Rückführung der spaltbaren Anteile und des Urans sowie den Einsatz des Plutoniumrestes und der Actiniden in eine Transmutationsmaschine. Wenn es gelingt auf diese Weise 99.9% des Plutoniums und der Minoren Aktiniden aus dem Restabfall zu entfernen, dann

17 siehe Knebel und Heusener, Untersuchungen zur Transmutation ..., in Radioaktivität und Kernenergie, Forschungszentrum Karlsruhe, Mai 2001.

braucht man etwa noch 300 bis 500 Jahre Karenzzeit bei der Endlagerung. Alternativ wird auch an geschlossene Kernbrennstoffzyklen in Kernkraftwerken mit Reaktoren der Generation IV einschließlich der vollständigen "Verbrennung" aller Aktiniden gedacht.

Das Szenarium nach Punkt 3. würde zu einem Radiotoxizitätsinventar führen[18], welches die Probleme eines Langzeiteinschlusses der Abfälle entscheidend entspannt. Damit ist die Transmutation eine Option, die ernsthaft verfolgt wird und vorallen für Länder mit hohem Kernenergieanteil wichtig ist. Wie weiter oben erwähnt, sollen einige Anlagen der Generation IV von der Auslegung her so gestaltet werden, daß bei geschlossenem Kernbrennstoffzyklus am Kraftwerk Transmutation mit eingeschlossen wird. Allerdings wird noch viel Zeit vergehen bis diese Anlagen industrielle Bedeutung erlangen. Unter anderem auch deshalb gibt es eine Reihe von Projekten und Untersuchungen zu isolierten Transmutationsanlagen.
Transmutation kann in Reaktortypen erfolgen, in denen die Neutronenbilanz besser als in den heute betriebenen Leichtwasserreaktoren ist (z.B. in schnellen Reaktoren mit Bleikühlung), jedoch müssen dafür spezielle Auslegungen gewählt werden. In Frankreich werden mit dem wieder in Betrieb genommenen schnellen Reaktor Phenix dazu Versuche durchgeführt.

Eine andere (übrigens schon vor über 30 Jahren erstmals diskutierte) Variante ist die Anwendung sogenannter hybrider Systeme, etwa die Kopplung eines leicht unterkritischen Systems mit Core ähnlich dem im Leichtwasserreaktor mit einer externen (abschaltbaren) Neutronenquelle, so daß Kritikalität nur bei Einschaltung dieser externen Quelle auftritt. Als externe Quelle dient in den meisten Fällen eine Spallationsquelle, d.h., ein Schwermetalltarget, welches mit hochenergetischen Protonen beschossen wird (Beschleunigergetriebene Systeme). Als Beispiel möge das CERN-Projekt von Rubbia dienen:
Unterkritischer schneller Reaktor,
Kühlung: Blei-Wismut-Gemisch mit Naturumlauf,
Brennstoff: Thorium-Matrix, (über ^{233}U), Plutonium,
Spallationsquelle Protonenbeschleuniger Protonen mit Energien ≥ 1 GeV,
Zufuhr von radioaktiven Abfällen aus anderen Reaktoren ist möglich, jedoch sind zwischenzeitliche Wiederaufarbeitungsschritte mit nochmaliger Zufuhr in das System notwendig. Weitere Projekte werden in den USA (Los Ala-

18 siehe K. Gomper, Zur Abtrennung langlebiger Radionuklide, in Radioaktivität und Kernenergie, Forschungszentrum Karlsruhe, Mai 2001.

mos), in Russland und in Südkorea (HYPER-Projekt) verfolgt.

2.5 Schlußfolgerungen

Der Schwerpunkt des Zubaus von Kernkraftwerken hat sich von (West-) Europa und den USA nach Ost- und Südostasien (Japan, China, Taiwan, Korea, Indien) verlagert. Alle neuen Projekte von kommerziellen Anlagen orientieren sich an den Maßstäben der oben dargestellten Prinzipien von Generation III.

In Europa steht der Ersatz einiges riesigen Arsenals von Kraftwerken (konventionelle und Kernkraftwerke) an, die ihre Lebensdauergrenze erreicht haben oder in den nächsten 10 – 15 Jahren erreichen. Allein in Deutschland betrifft dies einen Kraftwerkspark von über 40 000 MWe (eingeschlossen den Rückgang der KKW-Leistung laut Ausstiegsbeschluß). Damit steht der Neubau von 40 000 MWe neuer Kraftwerksleistung auf der Tagesordnung (wenn nicht die gegenwärtig ausgeglichene Bilanz von Elektroenergieimport und -export zugunsten des Imports verändert werden soll). Wie diese Aufgabe gelöst werden kann ist nach wie vor unklar. In Finnland und Frankreich lautet die Antwort: Zubau weiterer KKW, speziell in Form des EPR. In den USA wird daran gearbeitet, die bewährten Reaktortypen zu ertüchtigen, so daß ihre Laufzeit auf 60 Jahre erhöht werden kann. Gleichzeitig versuchen die USA mit ihrer Führung im GIF-Projekt die technologische Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Kernenergie zu dominieren und so alle Optionen für eine zukünftige Energiewirtschaft offenzuhalten.

Die bisherige Praxis der Kernenergienutzung hat trotz der Katastrophe von Tschernobyl und bei Orientierung auf die moderne Linie von Druck- und Siedewasserreaktoren gezeigt, daß die Kernenergie umweltfreundlich ist und schon einen beachtlichen Beitrag zur CO_2-freien Elektroenergieerzeugung geleistet hat und erst recht in Zukunft leisten kann. Das Entwicklungspotential der Kernenergetik ist beträchtlich auch im Hinblick auf sicherheitstechnische Neuerungen und die Uranresourcen, ein Verzicht auf diese Option würde in Europa (wenn sich alle dem deutschen Vorbild anschlössen) wohl, wenn nicht zu einem energetischen Kollaps, so doch zu erheblichen Turbulenzen und Abstrichen am Lebensniveau führen.

Das Akzeptanzproblem ist ein gesellschaftliches Phänomen, das einer näheren Betrachtung bedarf. Neben Sachproblemen über die hier berichtet wurde, beinhaltet es Komponenten, die subjektive Faktoren gegenüber objektiven

in den Vordergrund treten lassen. Als Beispiel sei erwähnt, daß entgegen aller wissenschaftlicher Erfahrung im Zusammenhang mit radioaktiven Emissionen von Kernkraftwerken in breiten Bevölkerungskreisen unterschwellige Ängste vor diesen Emissionen überwiegen[19]. Mit anderen Worten, der Begriff **(radioaktive) Strahlung** löst unabhängig von realen Gefährdungen unterschwellig Ängste aus, die oft noch durch Misstrauen gegenüber moderner Wissenschaft und Technik gefördert werden. Daß es sich dabei um Radiophobie (also ein krankheitsartiges Phänomen) handelt, möchte ich nicht behaupten, daß manche aus verschiedenen Gründen mit diesen Ängsten Politik machen ist jedoch Faktum.

Es war nicht meine Aufgabe dieses Phänomen zu analysieren. Jedoch denke ich, daß es einer tiefer gehenden wissenschaftlichen Analyse bedarf, weil es auf dem Wege in eine nachhaltige energetische Zukunft zu einem ernsthaften Problem werden könnte (in Deutschland wohl schon wurde), welches sich im Nachhinein nur mit großen Verlusten korrigieren ließe.

19 Auch hat eine EU-weite repräsentative Umfrage ergeben, daß breite Kreise der Bevölkerung meinen, Kernkraftwerke seien bedeutende Produzenten von CO_2.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 105–110*

Johann Lingertat

Gesteuerte Kernfusion

Kurzfassung eines Vortrages, der im Arbeitskreis Energie-Rohstoff-Versorgung der Leibniz-Sozietät am 4. März 2005 gehalten wurde.

Vorbemerkungen

Das Zeitalter der Verbrennung fossiler Rohstoffe zum Zweck der Energieerzeugung geht in absehbarer Zeit zu Ende. Zum einen sind die erschließbaren Vorräte begrenzt, zum anderen erfordert der durch die CO_2 – Emission verursachte Klimawandel bereits jetzt, die Energieerzeugung mittels Verbrennung zu reduzieren.

Das materielle und kulturelle Lebensniveau der Bevölkerung jedes Staates ist eng mit der verfügbaren Energie pro Kopf korreliert. Das hat zur Folge, daß hoch industrialisierte Länder das Niveau ihrer Energiekonsumption mit allen Mitteln verteidigen und Übergangsländer ihre Energieproduktion mit allen Mitteln erweitern. Die Energiepolitik jedes Landes ist integraler Bestandteil seiner Machtpolitik und wird zusätzlich von international agierenden ökonomischen Machtstrukturen bestimmt. Tatsächliche oder auch schon vermeintliche Engpässe in der Bereitstellung von Energieträgern haben das Potential, zu massiven sozialen Verwerfungen zu führen. Heute sehen wir schon die Vorboten in Form von völkerrechtswidrigen Agressionskriegen.

Aus dem Gesagten folgt, daß alle Industriestaaten, denn nur sie sind dazu uneingeschränkt in der Lage, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten Energieerzeugung, effektiver Energieeinsatz und Reduktion von Schadstoffemissionen mit höchster Priorität durchführen müssten. Dazu wäre es unter anderem notwendig, *alle* Möglichkeiten der Energieerzeugung gleichermaßen zu untersuchen bzw. zu entwickeln. Das heute unter Fachleuten wie auch unter Politikern zu beobachtende Vertreten partikulärer Interessen, zum Beispiel hier die „regenerativen Energien“, dort die „Kernenergie“, ist in höchstem Maße verantwortungslos und schädlich für das Finden von Lös-

ungen, die ein „energetisches“ Überleben der Menschheit gewährleisten sollen.

Kernfusionsforschung

Die Umwandlung von Masse in kinetische Energie bei der Fusion leichter Kerne ist ein natürlicher Prozeß, der den Energiehaushalt von Fixsternen und damit auch der Sonne dominiert. Mit der Entdeckung des Mechanismus der Kernfusion in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts begannen Überlegungen zur Nutzung dieser Reaktion für die Energiegewinnung. Erst in den letzten 20 Jahren ist die Verwirklichung dieser Idee in greifbare Nähe gerückt.

Unter den möglichen Fusionsreaktionen zeichnet sich die Reaktion zwischen Deuterium und Tritium dadurch aus, daß ihr Wirkungsquerschnitt am größten ist und das Maximum des Wirkungsquerschnittes bei der niedrigsten Teilchenenergie erreicht wird. Damit verspricht die Wahl dieser Reaktion die einfachste technische Lösung für ein Fusionskraftwerk.

Bei der D-T Reaktion entsteht ein Neutron mit einer Energie von 14,1 MeV und ein vollionisierter Heliumkern (α-Teilchen) mit 3,5 MeV, so daß die Nettoausbeute 17,6 MeV pro Reaktion beträgt:

$$D + T \rightarrow n\ (14{,}1\ \text{MeV}) + He^4\ (3{,}5\ \text{MeV}).$$

Die zur Erzielung eines großen Wirkungsquerschnittes erforderliche Teilchenenergie wird durch Erhitzen eines D-T Gasgemisches auf Temperaturen von 10 – 20 keV (entspricht etwa 100 – 200 Millionen °C) erreicht. Bei derartigen Temperaturen sind alle Atome des Gasgemisches ionisiert. Dieser Zustand des Gases, es besteht dann vorwiegend aus Ionen und Elektronen, wird als vollionisiertes Plasma bezeichnet.

Das Aufheizen des Gasgemisches geschieht in der Regel mittels Stromdurchgang (Ohmsche Heizung), mittels Injektion hochenergetischer Deuterium- oder Tritiumatome (Neutralteilcheninjektion) oder mittels Injektion von Hoch- bzw. Höchstfrequenzenergie (Ionen- bzw. Elektronenzyklotronheizung). Es kann auch eine beliebige Kombination der genannten Verfahren zum Einsatz kommen.

Ohne weitere Vorkehrungen würden die hochenergetischen Ionen und Elektronen das Volumen, in dem sie erzeugt werden, schnell verlassen, und es würde nur selten zu Fusionsreaktionen kommen. Auf der Sonne behindert die starke Gravitationskraft ein „Auseinanderfliegen“ des Plasmas. Die Gravitationskraft der Sonne ist um den Faktor 3×10^5 größer als die der Erde.

In Fusionsexperimenten besteht eines der üblichen Verfahren darin, die Gravitationskraft durch eine elektromagnetische Kraft zu ersetzen. Die Ionen

und Elektronen werden durch geeignet geformte starke Magnetfelder zusammen gehalten.

In den vergangen Jahrzehnten wurden verschiedene Magnetfeldkonfigurationen untersucht, die sich durch ihre topologische Struktur und die Art ihrer Erzeugung unterscheiden. Das beste Verhalten zeigten dabei Experimentieranlagen vom Typ Tokamak und Stellarator. Das erfolgreichste Fusionsexperiment ist zweifellos der Tokamak Joint European Torus (JET) in Culham/Großbritannien [1]. Der Wendelstein 7-AS in Garching gehörte zu den erfolgreichsten Stellaratorexperimenten. Das Folgeexperiment Wendelstein W-7X befindet sich gegenwärtig in Greifswald im Bau [2].

Eine hohe Energieausbeute im Fusionsexperiment, d.h. das Auftreten möglichst vieler Fusionsreaktionen pro Volumeneinheit, setzt das gleichzeitige und stationäre Erreichen bestimmter Werte von drei Plasmaparametern voraus: Temperatur T = 10 – 20 keV, Dichte ca. $n = 1\text{-}5\times10^{20}$ m^{-3} und Energieeinschlußzeit τ = 1-2 s. τ ist im stationären Fall als Quotient von innerer Energie des eingeschlossenen Plasmas und dem Plasma zugeführte Heizleistung definiert, und damit ist es ein Maß für die Qualität des Plasmaeinschlusses. Vereinfacht wird die Qualität eines Fusionsexperimentes mittels des Wertes des sogenannten Tripelproduktes α aus Temperatur, Dichte und Einschlußzeit beschrieben. Beginnend mit den ersten Fusionsexperimenten in den fünfziger Jahren mit $\alpha \approx 10^{14}$ keV m^{-3} s ist man heute bei $\alpha > 10^{21}$ keV m^{-3} s angelangt. Für den Betrieb eines Fusionsreaktors ist ein Wert von $\alpha \approx 5\times10^{21}$ keV m^{-3} s erforderlich [3].

Der Fusionsreaktor

In einem zukünftigen Fusionsreaktor wird ein D – T Gemisch in eine Vakuumkammer, die sich ihrerseits in einem geeignet konfigurierten Magnetfeld befindet, eingelassen und durch externe Energiezufuhr aufgeheizt. Die in Fusionsreaktionen entstehenden hochenergetischen Neutronen verlassen nahezu ungeschwächt die Vakuumkammer, unbeeinflußt durch das einschließende Magnetfeld. Ihre Energie wird im sogenannten Blanket, das die Vakuumkammer umgibt, absorbiert und zum größten Teil in Wärme umgewandelt. Diese Wärme wird zum Antrieb konventioneller Dampfturbinen genutzt. Die α-Teilchen können wegen ihrer elektrischen Ladung den Bereich des einschließenden Magnetfelds nicht verlassen und geben ihre Energie durch Stöße an das Plasma ab. Ist die dem Plasma extern zugeführte Heizleistung gleich der im Plasma erzeugten Fusionsleistung, spricht man vom Erreichen des „break

even“. Am JET wurde dieser Zustand 1997 nahezu erreicht. Dabei wurde bei einer Heizleistung von etwa 26 MW eine Fusionsleistung von 16 MW erzeugt.

Kompensiert die von den energiereichen α-Teilchen an das Plasma übertragene Heizleistung gerade die Energieverluste des Plasmas, kann die äußere Energiezufuhr abgeschaltet werden. Das Plasma befindet sich dann im Bereich der „Zündung“.

Von den beiden zum Betrieb eines Fusionsreaktors notwendigen Brennstoffen D und T kommt letzterer in der Natur nur selten vor. Tritium ist ein kurzlebiges instabiles Isotop des Wasserstoffs und zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 12,3 Jahren. Deswegen ist es notwendig, das Tritium im Blanket des Reaktors zu erbrüten. Dazu dient Lithium, dessen natürliche Isotope über die Reaktionen

$$^{6}\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He}(2.05\ \mathrm{MeV}) + \mathrm{T}(2.73\ \mathrm{MeV})$$

$$^{7}\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + \mathrm{T} + \mathrm{n} - 2.47\ \mathrm{MeV}$$

in einer insgesamt exothermen Reaktion in T und He umgewandelt werden.

Damit sind D und Li die zum Betrieb eines Fusionsreaktors notwendigen primären Brennstoffe. Beide Elemente lassen sich aus Seewasser relativ einfach extrahieren. Lithium kommt auch ausreichend in der Erdrinde vor. Die bekannten Reserven für eine Weltenergieproduktion auf dem Niveau der 90iger Jahre reichen für einen Zeitraum von größer als 10^7 Jahren und können somit als unerschöpflich betrachtet werden. Beide Brennstoffe sind einfach zu handhaben und nicht umweltschädlich. Die notwendigen Mengen sind wegen der hohen Energieausbeute sehr gering. Aus ungefähr 100 kg D und 150 kg Li lassen sich 1 GW elektrischer Leistung ein Jahr lang erzeugen.

Die „Asche“ eines Fusionskraftwerkes, He, ist weder toxisch, noch stellt es in irgendeiner Form eine Belastung der Umwelt dar. CO_2 wird von einem Fusionskraftwerk nicht emittiert.

Das in einem internen Kreislauf erzeugte und wieder verbrauchte T ist radioaktiv und kann bei extremen Störfällen zu einer radioaktiven Verseuchung der Umgebung eines Fusionsreaktors führen. Jedoch ist die vom T ausgehende potentielle Gesundheitsgefährdung um Größenordnungen geringer als die des Brennstoffes und der Zerfallsprodukte eines konventionellen Kernkraftwerkes. Das liegt vor allen Dingen an der kurzen biologischen Halbwertszeit des T von etwa 10 Tagen.

Der Beschuß der inneren Konstruktionsmaterialien eines Fusionsreaktors mit Neutronen führt zu einer unerwünschten Bildung verschiedener radioaktiver Isotope, die bei der Stillegung eines Fusionskraftwerkes eine „Abkühlphase“ von ca. 100 Jahren erfordern. Auch hier sind die Entsorgungs-probleme

um Größenordnungen geringer als bei einem konventionellen Kernkraftwerk. Außerdem ist es möglich, durch Entwicklung spezieller Konstruktionswerkstoffe die Bildung problematischer radioaktiver Isotope weitgehend zu vermeiden.

Das „Durchgehen“ eines Fusionsreaktors, das heißt Unfälle vom Tschernobyl-Typ, sind aus inhärenten physikalischen Gründen nicht möglich. Der momentane Brennstoffvorrat im Fusionsreaktor ist sehr gering. Er reicht, im Unterschied zu einem konventionellen Kernreaktor, nur für eine Brenndauer von einigen zehntel Sekunden. Externe oder interne Störungen des Betriebsablaufes eines Fusionsreaktors führen in jedem Fall zu einem unmittelbaren Abbruch der Fusionsreaktion. Selbst der in konventionellen Kernkraftwerken problematische Störfall des kompletten Verlusts der Kühlung hätte keine Zerstörung des Fusionsreaktors zur Folge.

Als Nachteil eines künftigen Fusionsreaktors wird vielfach dessen minimale Baugröße von einigen GW elektrischer Leistung angesehen. Die Ursache für diesen hohen Wert der Ausgangsleistung liegt in der Skalierung der Energieeinschlußzeit mit den geometrischen Abmessungen des Plasmas begründet. Die Plasmaverluste sind etwa der Plasmaoberfläche proportional, während die Energieerzeugung dem Plasmavolumen proportional ist, so daß die Energieeinschlußzeit mit zunehmenden geometrischen Abmessungen des Plasmas zunimmt. Tatsächlich sind heutzutage Kraftwerksleistungen im Bereich von GW für die Grundlastversorgung durchaus üblich.

Eine kritische Frage betrifft den Zeithorizont für die Entwicklung eines Fusionskraftwerkes. In der Vergangenheit gab es wiederholt diesbezügliche Prognosen, die sich als grobe Fehleinschätzungen herausstellten. Festzuhalten ist, daß es sich bei den Arbeiten zur gesteuerten Kernfusion bis heute weitgehend um Grundlagenforschung handelt. Grundlagenforschung kann aber per definitionem nur sehr ungenaue Vorhersagen über das zeitliche Eintreffen bestimmter Ergebnisse machen. Zu Beginn der Fusionsforschung spielte sicher eine gewisse Euphorie, beruhend auf der schnellen industriellen Umsetzung der Ergebnisse der Kernspaltungsforschung, eine Rolle. Später mag der ständige Konflikt zwischen notwendigen langfristigen Zielstellungen und dem relativ kurzen Zeithorizont politischer Zuwendungsgeber Forscher zu optimistischen Prognosen verleitet haben.

Gegenwärtig sind zwei wichtige Schritte in Richtung Fusionskraftwerk zeitlich ziemlich zuverlässig eingegrenzt: Der Bau des ITER Tokamaks (International Tokamak Experimental Reactor) [4] und des Stellarators Wendelstein 7-X.

Der ITER wird von der EU, von Rußland, Japan, Südkorea und den USA in Cadarache/Frankreich errichtet. Ein wichtiger Meilenstein für den Fortgang der Arbeiten war die Standortentscheidung vom Juni dieses Jahres. Mit dem Beginn der Bauarbeiten ist 2006 zu rechnen, mit der Inbetriebnahme 2016. Die Laufzeit des Projektes wird mit ca. 21 Jahren geschätzt. Parallel zum Bau und Betrieb des ITER sollen die Entwicklungsarbeiten für einen Demonstrationsreaktor fortgeführt werden, dessen Baubeginn sicher wesentlich von den mit ITER erzielten Ergebnissen abhängen wird. Erst nach erfolgreichem Betrieb des Demonstrationsreaktors in etwa 50 Jahren ist mit dem Bau und der Inbetriebnahme der ersten Fusionskraftwerke zu rechnen.

Das Ziel von ITER ist, die wissenschaftliche und technologische Machbarkeit eines Fusionskraftwerkes zu demonstrieren. Es ist geplant, mit ITER eine Fusionsleistung von etwa 500 MW mit einem Energieverstärkungsfaktor (Verhältnis von erzeugter Fusionsleistung zur Heizleistung) von > 10 unter quasistationären Bedingungen zu generieren. Mehr Details des umfangreichen Forschungsprogramms sind unter [4] zu finden.

Eine zum Tokamak alternative Linie, die Vorteile bei einer erfolgreichen Realisierung eines Kraftwerkskonzeptes verspricht, ist der Stellarator. Der im Bau befindliche W 7-X, der entscheidende Beiträge zur Physik und Technologie eines künftigen Kraftwerkes auf Stellaratorbasis liefern soll, wird ca. 2011 in Betrieb gehen. Er ist für eine Betriebszeit von 20 Jahren ausgelegt. Eine Entscheidung über die Fortführung der Stellaratorarbeiten wird sicher erst nach Vorliegen aller wichtigen Ergebnisse des W 7-X gefällt werden.

Kostenabschätzungen der mit einem Fusionskraftwerk erzeugten Elektroenergie sind wegen des fernen Zeithorizontes im Detail fragwürdig. Jedoch weisen alle bekannten Untersuchungen darauf hin, daß zum heutigen Stand vergleichbare Größenordnungen zu erwarten sind. Der Anteil der Brennstoffkosten an den Gesamtkosten wird sicher vernachlässigbar sein. Dominieren werden die Investitions- und Entsorgungskosten des Kraftwerkes.

Die weltweiten Forschungen zur gesteuerten Kernfusion sind eines der komplexesten und schwierigsten wissenschaftlichen und technischen Unternehmen, das die Menschheit für ausschließlich friedliche Zwecke in Angriff genommen hat. Der Ausgang ist noch ungewiß. Bis zu einem Erfolg dieses Unternehmens sind noch viele Jahre zäher Arbeit notwendig, um viele komplizierte wissenschaftliche und ingenieurtechnische Detailprobleme zu lösen.

Genauere Informationen zu den meisten hier nur angerissenen Problemen sind in der angegebenen Literatur zu finden.

Literatur

[1] www.jet.efda.org
[2] www.ipp.mpg.de
[3] J.Wesson, „Tokamaks“, Second Edition, Oxford Science Series No. 48, Clarendon press, Oxford 1997.
[4] www.iter.org

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 111–120*

Helmut Abel

Strahlenrisiken der Kernenergie

Vorbemerkungen

Die Furcht vor Strahlenrisiken, insbesondere Krebsrisiken, ist ein wesentlicher Grund für die öffentliche Ablehnung der Kernenergie. In Tageszeitungen wird der Öffentlichkeit vermittelt, dass *jede noch so kleine Strahlendosis das Krebsrisiko erhöht und Anwohner von Kernenergieanlagen schon beim sicheren Normalbetrieb gehäuft an Krebs erkranken*. Die Schriftstellerin Christa Wolf schreibt /1/, bezogen auf die Risiken der Kernenergie, „Mangel an Angst ist lebensgefährlich“ und „als Außenstehende scheint es mir, dass sich einem Naturwissenschaftler, der den Januskopf der Wissenschaft wirklich wahrgenommen hat, schwere Gewissensfragen stellen müssen“. Das lässt die Fragen zu, ob Ängste fördernde Aussagen von Wissenschaftlern verläßliche Kriterien für ‘wirklich wahrgenommen’ sind und Einwände gegen obige Aussagen schon Gewissenlosigkeit signalisieren. Ich möchte mich zur Verhältnismäßigkeit der Ängste (Strahlungsklima, Kernenergie) und zu Hintergründen ihrer Entstehung (politische Aspekte, Dosis-Grenzwerte, Hiroshima/Nagasaki, Tschernobyl) äußern, auch Einwände erheben.

Zur Verhältnismäßigkeit

Strahlungsklima

Das natürliche Strahlungsklima, dem alle Menschen ausgesetzt sind, setzt sich zusammen aus *kosmischer* und *terrestrischer* Strahlung sowie aus der *Inhalation* und *Ingestion radioaktiver Substanzen***.** Die kosmische Strahlung variiert mit der Höhenlage, die terrestrische Strahlung mit geologischen Gegebenheiten. Nach gegenwärtig geltenden Maßeinheiten liegen die mittleren Expositionswerte ortsabhängig zwischen etwa 2 mSv/Jahr und einigen 10 mSv/Jahr (mSv = Milli-Sievert). Die kosmische und terrestrische Strahlung tragen zusammen mit etwa *36%* zur naturbedingten Gesamtexposition bei; die

Ingestionen mit Tritium, Kohlenstoff 14, Kalium 40 und anderen radioaktiven Substanzen zu etwa *17%* und die Inhalationen über das radioaktive Edelgas Radon zu etwa *47%*. Letzteres bewirkt mithin den größten Anteil der naturbedingten Expositionen, der zudem noch der biologisch wirksamste Anteil ist. Überdies sind seine geologisch bedingten Schwankungen am auffälligsten, Faktoren bis über 100 umfassend. Dies lenkte die Aufmerksamkeit der Epidemiologie auf die Frage, ob sich die ortsabhängigen Schwankungen der Radon-Konzentrationen in den Lungenkrebssterblichkeiten widerspiegeln.

Bei Uran-Bergarbeitern war der Zusammenhang zwischen Lungenkrebs und Radon-Inhalationen bereits vor langer Zeit widerspruchsfrei belegt. Bei den übrigen Anwohnern der Bergbauregionen war jedoch keine erhöhte Lungenkrebshäufigkeit auffällig geworden. Die resultierenden Dosen und Dosisleistungen über und unter Tage unterscheiden sich um viele Zehnerpotenzen und man schlußfolgerte, wie schon Paracelsus, ‚die Dosis macht das Gift'.

Jährlich und seit vielen Jahrzehnten absolvieren viele tausend Menschen Kuren in Radium-Bädern. Eine vierwöchige Kur führt zu Expositionswerten, die bis zu Jahreswerten aus den naturbedingten Expositionen reichen. Auch bei der anwohnenden Bevölkerung von Radium-Bädern liegt eine drei- bis viermal höhere Strahlenexposition gegenüber der übrigen Bevölkerung vor. Bisher konnten epidemiologische Studien keine widerspruchsfreien Hinweise auf erhöhte Krebserkrankungsraten erbringen, die eine Schließung der Radium-Bäder als zwingend erscheinen ließen.

Erinnert sei in diesem Zusammenhang daran, dass die Pharma-Industrie in den dreißiger Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine Kampagne gegen die Strahlenmedizin, einschließend die Röntgen- und Radium-Medizin (Radium-Heilbäder) durchgeführt hat, in der sie vor den Gefahren ihrer Nutzung warnte. In einer Publikation von Walter Friedrich (1933) mit dem Titel „Radioaktivität und Pharmazie" /2/ schreibt er, „dass die Pharmaindustrie und die Apotheken an der Entwicklung der Strahlenmedizin keinen Anteil hatten. Am ‚Medikament' Strahlung verdiente die Pharma-Industrie nicht mit". Gesundheitspolitisches Bewußtsein war zumindest nicht das einzige Motiv der Pharma-Industrie.

Auffällig bei epidemiologischen Studien mit sich widersprechenden Hinweisen auf erhöhte Krebsraten ist, dass selektiv zitiert wird und Hinweise mit Beweisen gleichgestellt werden. So heißt es in der Zusammenfassung eines Artikels von Mitarbeitern des Bundesamtes für Strahlenschutz /3/: „Epidemiologische Studien haben auch für Personen der allgemeinen Bevölkerung einen Zusammenhang zwischen dem Lungenkrebsrisiko und der

Radonexposition bewiesen“. Der Epidemiologie obliegt jedoch Beweisführung grundsätzlich nicht. Sie kann stets nur mehr oder weniger wahrscheinliche Hinweise liefern, die der Erkundungsforschung Orientierungen ermöglichen. Diese wurde aber in den vergangenen zwei Jahrzehnten in der BRD drastisch in ihren Mitteln beschränkt. Der Streit unter Epidemiologen um wahrscheinlich oder nicht wahrscheinlich läuft seit Jahrzehnten. Das Bundesministerium für Umweltschutz will ihn offensichtlich jetzt auf dem Amtsweg entscheiden. Seit September 2004 liegt ein Gesetzentwurf /4/ zum Schutz vor Radon bei Aufenthalten in Gebäuden vor. Je nach Höhe der Radon-Konzentration schreibt es in 3, 5 oder 10 Jahren Sanierungen von Wohngebäuden vor. Betroffen davon sind etwa 1,5 Millionen Häuser in Deutschland. Die Kosten werden auf Milliardenbeträge geschätzt.

Zu immer wieder erneut beantragten und genehmigten Mitteln für epidemiologische Studien bemerkte Albrecht Kellerer, Direktor eines Instituts für Strahlenforschung in München und langjähriges Mitglied der Internationalen Strahlenschutzkommission /5/: „wo die Epidemiologie zum ideologischen Spiel mit der Gesellschaft wird, werden ihre Regeln zu denen eines Gesellschaftsspiels. Die Würfel werden so lange geworfen, bis sie geeignet fallen“.

Aus dem Erkenntnisbereich der Molekularbiologie sind im Zusammenhang mit dem Würfelspiel der Epidemiologen zwei Einblicke in elementare molekulare Mechanismen von besonderem Interesse. Der eine betrifft das Verhältnis von spontanen zu strahleninduzierten genetischen Störungen im Expositionsbereich der naturbedingten Werte. Der andere betrifft die Mechanismen der malignen Zelltransformation.

Während spontan in den genetischen Strukturen einer betrachteten menschlichen Zelle stündlich etwa 10000 Störungen entstehen, sind es naturbedingt strahleninduziert nur eine Störung in einigen 1000 Stunden /6/. Dass die betrachtete menschliche Zelle ihre genetische Intaktheit bei einer so hohen Rate spontaner Störungen weitgehend erhalten kann, liegt an dem geradezu sophistischen intrazellulären Kontroll- und Reparatursystem der Zelle, das in Minuten etwa 1000 Störungen erkennen und reparieren kann, neben den häufig spontanen auch die extrem selteneren naturbedingt strahleninduzierten Störungen. Nur fehlerhaft reparierte Störungen /7/ (spontane wie strahleninduzierte) können sich in Mutationen realisieren, die dann auch maligne Zelltransformationen bewirken können. Doch dies erfordert Mutationen in mehreren Genen und in bestimmten zeitlichen Abfolgen /8/.

Seitens der Molekularbiologie erscheint es also nicht verwunderlich, dass auf der Grundlage epidemiologischer Studien Krebsrisiken der naturbe-

dingten Strahlenexpositionen nicht erkennbar sind. Außerdem leiten sich aus den molekularbiologischen Erkenntnissen Zweifel daran ab, dass *‚jede noch so kleine Strahlenexposition das Krebsrisiko erhöht'*.

Kernenergie

Eine Einmischung in den Streit von Epidemiologen ist jedoch hinsichtlich der Bewertung des Strahlenrisikos einer Kernenergieanlage im Normalbetrieb nicht erforderlich. Kernenergieanlagen sind als Strahlungsquellen im Gegensatz zu den naturbedingten Strahlungsquellen abschirmbar. Die direkte Abstrahlung aus dem Reaktorkern kann durch Wahl der Ummantelung auf nahezu beliebig geringe Expositionswerte reduziert werden. Radioaktive Substanzen in Luft- und Wasserkreisläufen lassen sich effektiv herausfiltern. Dadurch, dass die Strahlenmesstechnik die empfindlichste Spurenmesstechnik überhaupt ist, sind strenge gesetzliche Vorgaben erfüllbar, registrierbar und somit kontrollierbar. Im Normalbetrieb einer Kernenergieanlage erfährt die Bevölkerung durch die Anlage eine Exposition von 0,01 mSv/Jahr.

Kann die Epidemiologie Krebsrisiken schon bei Jahresexpositionswerten von einigen mSv bis zu einigen 10 mSv nicht widerspruchsfrei belegen, so kann sie dies für noch weit darunter liegende Jahreswerte natürlich auch nicht. Von einem Strahlenrisiko der Kernenergie *‚schon im Normalbetrieb'* kann mithin keine Rede sein.

Zu Hintergründen

Politische Aspekte

Die Atombombenabwürfe über Hiroshima und Nagasaki hatten zu weltweitem Erschrecken und weltweiten Forderungen nach *Ächtung* der Atombomben geführt. Diesen Reaktionen stellten die Atommächte ihre Abschreckungsthese entgegen, wonach *ein Atomkrieg alles Leben auf der Erde auslöschen würde und die Existenz von Atombomben mithin friedenssichernd sei.* Robert Oppenheimer formulierte in einem Vortrag 1946 /9/: „Ließe sich mit der Atomenergie nichts weiter anfangen als Bomben herzustellen, so wäre noch immer zwischen den Staaten eine Abmachung denkbar, dergleichen zu unterlassen". Er fügte jedoch diesem Satz hinzu, dass Verzichtserklärungen über den Einsatz neu entwickelter Waffen noch niemals in der Vergangenheit zum Verzicht geführt haben und dies auch nicht in Zukunft bei einer Waffe von so überwältigender Wirksamkeit zu erwarten sei. Oppenheimer bezweifelte also schon kurz nach den ersten Einsätzen der Atombomben die Glaubwürdigkeit der Abschreckungsthese.

Nun ließ sich aber mit der Atomenergie Friedliches herstellen, die Kernenergie. Mit dem Schrecken vor Atombomben musste sich daher auch Furcht vor Kernenergie entwickeln. Einerseits gebührte dieser friedlichen Nutzung der Atomenergie der Vorrang und der Furcht war entgegen zu wirken. Andererseits bot diese öffentliche Furcht Möglichkeiten, von weltweiten Forderungen nach Ächtung der Atombomben abzulenken, zumindest zeitweilig oder immer wieder. Dieses Ablenkungsmanöver gelang so vollkommen, dass über die Jahrzehnte hinweg die öffentliche Ablehnung der Kernenergie immer dominierender wurde und Forderungen nach internationaler Ächtung der Atombomben gleichzeitig immer mehr verblassten.

Hinzuzufügen ist, dass breite öffentliche Ablehnung der Kernenergie auch den Profitinteressen der Erdöl-, Erdgas- und Kohleindustrie dient.

Dosis-Grenzwerte

Ihre Geschichte beginnt mit dem 2. Internationalen Röntgenkongress 1928 in Stockholm. Auf diesem Kongress musste bereits ein großer Teil des Programms dem Strahlenrisiko und dem Strahlenschutz gewidmet werden; überdies wurde eine Internationale Kommission für Strahlenschutz ins Leben gerufen. Der Grund dafür lag darin, dass in den ersten zwei Jahrzehnten nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung (1895) zahlreiche Berichte über strahleninduzierte Erkrankungen bei Ärzten und Röntgentechnikern an Krebs und Leukämie erschienen waren. Die Faszination, mittels Röntgenstrahlen in den Menschen hineinsehen zu können, hatte Bedenken zunächst verdrängt.

Auf dem Stockholmer Kongress wurden Schutzmaßnahmen und eine aus Umfragen abgeleitete so genannte *‚Toleranzdosis'* empfohlen. Mangels einheitlicher physikalischer Messtechnik wurde die Toleranzdosis an den biologischen Effekt Hautrötung gebunden. Der Wahl des Begriffs Toleranzdosis lag die Vorstellung einer Verträglichkeit von Röntgenstrahlung unterhalb eines Schwellenwertes zugrunde. Diese Vorstellung schien deshalb nicht abwegig, weil durch die Entdeckung der natürlichen Radioaktivität und der kosmischen Strahlung belegt war, dass jeder Mensch natürlicherweise und unvermeidlich einer dauernden Exposition ionisierender Strahlung ausgesetzt ist, und dies ohne erkennbar Schaden zu nehmen.

Zweifel an dieser Vorstellung entstanden durch die Ende der zwanziger Jahre gemachte Entdeckung, dass ionisierende Strahlung Genmutationen verursachen kann. Das regte zugleich auch die Frage an, ob die bekannten so genannten spontanen Genmutationen durch die natürliche Strahlung verursacht sein könnten. In strahlengenetischen Studien konnte jedoch eindeutig und widerspruchsfrei geklärt werden, dass für die Häufigkeit der spontanen Genmu-

tationen die natürliche Strahlung mindestens tausendmal zu schwach ist, also zumindest nur von sehr geringer Bedeutung sein kann.

Die dringenden Empfehlungen von Schutzmaßnahmen und ihre Orientierung auf die Toleranzdosis hatten einen durchschlagenden Erfolg. In den dreißiger und vierziger Jahren wurde nur noch sehr vereinzelt über berufsbedingte Strahlenerkrankungen berichtet. Wissenschaftlich eindeutig belegbare Beziehungen zwischen berufsbedingten Strahlenexpositionen und gesundheitlichen Folgeschäden konnten aber nicht gefunden werden. Dieser Mangel an Erkenntnissen veranlasste die Internationale Kommission für Strahlenschutz 1934 dazu, den Begriff *‚Toleranzdosis'* durch *‚maximal zulässige Dosis'* zu ersetzen mit einem Wert (in heute geltender Maßeinheit) von 2 mSv/Tag. Zum Vergleich sei erinnert, dass die naturbedingte Strahlenexposition je nach geologischen Gegebenheiten und Höhenlagen Expositionswerte zwischen 2 mSv/Jahr und einigen 10 mSv/Jahr bewirkt.

Im beruflichen Umgang mit Strahlungsquellen erwies es sich als problemlos, die *‚maximal zulässige Dosis'* immer deutlich zu unterschreiten. Dies führte 1950 dazu, den Begriff *‚maximal zulässige Dosis'* durch *‚so niedrig wie mögliche Dosis'* zu ersetzen bei gleichzeitiger Neufestlegung eines kleineren Grenzwertes für berufsbedingt strahlenexponierte Personen auf 6 mSv/Woche anstelle von 2 mSv/Tag. Wiederum zeigte sich, dass die Einhaltung auch dieses Grenzwertes problemlos befolgt werden konnte.

In den folgenden Jahrzehnten wurde der Grenzwert noch mehrmals herabgesetzt, letztmalig 1990 auf (umgerechnet) 0,4 mSv/Woche. Noch immer fehlte es jedoch an belegbaren Beziehungen zwischen Expositionswerten in den Dosis-Grenzwertbereichen und Krebsrisiken. Stets lag deshalb der Grund für Herabsetzungen der Grenzwerte in der Problemlosigkeit ihrer Einhaltung. Mit 0,4 mSv/Woche lag der Grenzwert nun jedoch nahe dem Maximalwert der naturbedingten Strahlenexposition. Dies führte dazu, die Formulierung *‚so niedrig wie mögliche Dosis'* durch *‘so niedrig wie vernünftigerweise erreichbare Dosis’* zu ersetzen.

Aus der zunehmend breiteren Anwendung von Strahlungsquellen, in der Medizin, der Forschung und der Industrie, einschließlich der Kernenergieindustrie, folgte die Notwendigkeit der Festlegung eines Grenzwerts für die Strahlenexposition der Gesamtbevölkerung. Er wurde um einen Faktor 10 niedriger als für berufsbedingt mit Strahlung umgehende Personen festgelegt und liegt nun mit 1 mSv/Jahr an der unteren Grenze der naturbedingten Jahres-Expositionswerte.

Dieser Wandel in den Begriffen und die mehrmaligen Herabsetzungen der Dosis-Grenzwerte mussten Gefahrenvorstellungen suggerieren, die, einmal entstanden, schwerlich wieder abzubauen sind. Betont sei nochmals, dass die Wahl der Grenzwerte nicht auf der Grundlage wissenschaftlich zweifelsfreier epidemiologischer Hinweise auf erhöhte Krebsrisiken in Bereichen der jeweils festgelegten Grenzwerte erfolgte. Sie leiteten sich stets ausschließlich ab aus ihrer problemlosen Einhaltung und ihrer immer perfekteren Kontrollierbarkeit durch die Weiterentwicklungen von Messtechniken sowie durch Vervollkommnungen von Schutzmaßnahmen.

Hiroshima/Nagasaki

Im August 1945 kam es durch die Atombombenabwürfe über Hiroshima und Nagasaki zu dem in der Geschichte der Menschheit bisher einmaligen Ereignis, dass alle Bewohner zweier dicht besiedelter großer Städte (je einige hunderttausend Einwohner) erhöhten Strahlenexpositionen ausgesetzt wurden. Explosionsbedingt erfolgten die Strahlenexpositionen in Sekunden mit anschließenden weiteren Expositionen infolge der radioaktiven Kontaminationen des gesamten Lebensraumes der dortigen Bevölkerung. Durch Feuer, einstürzende Häuser, Druckwellen und extreme Strahlenexpositionen überlebten zigtausend Menschen die Atombombenexplosionen nicht. Das war voraussehbar und gewollt, so unvorstellbar es klingt.

Von den Überlebenden konnten etwa 80000 Menschen in epidemiologischen Studien erfasst werden, deren Krankheitsentwicklungen sowie Sterbeursachen über nunmehr sechs Jahrzehnte registriert werden.

Große Schwierigkeiten bereiteten die retrospektiven Abschätzungen der erlittenen Bestrahlungen, d.h. der effektiven Dosen. Auch der Einfluss psychosomatisch bedingter Reaktionen ließ sich bei der Wahl von Vergleichsgruppen aus der japanischen Bevölkerung außerhalb Hiroshimas und Nagasakis nicht berücksichtigen. Die in beiden Städten entstandene Luftvergiftung durch zerstörte Chemiefabriken erschwerte zusätzlich Vergleiche mit japanischen Bevölkerungsgruppen anderer Städte. Hinzu kam, dass die Vergleichsgruppen einer zeitlich annähernd konstanten naturbedingten Bestrahlung und die Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki zusätzlich einer überwiegend sehr kurzzeitig erhöhten Strahlenexposition ausgesetzt waren. Mit größter Sorgfalt wurden die epidemiologischen Daten über Jahrzehnte hinweg analysiert und versucht, eine Beziehung zwischen den erlittenen Strahlenexpositionen und den dadurch bedingten erhöhten Krebssterblichkeiten zu erkennen.

Die Studien ergaben bei Gruppen von Überlebenden mit Expositionen über 100 mSv zweifelsfreie Hinweise auf erhöhte Krebserkrankungsraten, zunehmend mit den Expositionswerten. Bei der größten Gruppe der Überlebenden (über 20.000 Personen umfassend), die Expositionen unter 100 mSv erfahren hatten, ergaben sich keine sicheren Hinweise auf erhöhte Krebserkrankungsraten. Mit den Resultaten epidemiologischer Studien im Bereich naturbedingter Expositionen sowie mit den Erfahrungen aus fast einem Jahrhundert berufsbedingten Umgangs mit Strahlung erscheint dies vereinbar.

Die Streuungen der erhöhten Krebsraten im Expositionsbereich über 100 mSv schlossen eine mathematisch formale und lineare Beziehung nicht aus. Sie wurde mit *5% pro 1000 mSv* formuliert und besagt, dass bei 100 mit 1000 mSv bestrahlten Personen (in Hiroshima/Nagasaki) 5 strahlenbedingt an Krebs gestorben sein könnten. Bedingt durch die benannten Schwierigkeiten ihrer Bestimmung kam ihr nur ein Aussagewert mit hypothetischem Charakter in dem Sinne zu, dass sie mögliche Höchstwerte angibt und keine allgemeingültige Berechnungsgrundlage für strahleninduzierte Krebssterblichkeiten darstellt /10/.

Weltweit sterben heute noch 20% bis 25% aller Menschen an Krebs. Insgesamt wurden bisher bei den in der Hiroshima/Nagasaki-Studie erfassten 80.000 Überlebenden etwa 400 Krebssterbefälle registriert, die über den normal zu erwartenden Werten (16.000 bis 20.000) liegen. Diese Zahl 400 betont einerseits nochmals die Schwierigkeiten ihrer sicheren Bestimmung und widerlegt andererseits die bis in die Gegenwart von Medien verbreiteten Angaben, dass noch immer jährlich Tausende infolge der Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki an Krebs sterben.

Trotz wiederholter warnender Hinweise /11/ wurde und wird die Beziehung 5% pro 1000 mSv zum verantwortungslos spielerischen Werkzeug für Berechnungen strahleninduzierter Krebssterblichkeiten.

Tschernobyl

Dramatische Folgen hatte das Spiel mit Vorausberechnungen von Krebserkrankungen bei der Katastrophe von Tschernobyl. Das Ausmaß der Katastrophe potenzierte sich. Zu den akut strahleninduzierten Sterbefällen unter den ersten Einsatzkräften (28), den an hohen Strahlendosen schwer erkrankten weiteren Einsatzkräften (ca. 150), den an Schilddrüsenkrebs erkrankten Kindern (ca.1.000) und den Evakuierungen mit den damit verbundenen Belastungen kamen weitere schwere und vermeidbare Folgeschäden hinzu. Prognostiziert wurden auf der Basis zweifelhafter ‚Berechnungsgrundlagen' insbesondere hohe Krebsraten auch unter den Evakuierten. Bei Hunderttau-

senden wurden Ängste vor Krebserkrankungen provoziert, die zu lang andauernden schweren psychosomatischen Belastungen führen mussten. Suizide, Herzinfarkte, Nervenerkrankungen und Abtreibungen häuften sich.

Die Krebs-Prognosen haben sich nicht bestätigt, wie aus Analysen zum Thema ‚Zehn Jahre nach Tschernobyl – eine Bilanz' hervorgeht /12/, doch die Ängste sind geblieben und werden auch heute noch geschürt. Erst jüngst wurde in der Tagespresse (Neues Deutschland) berichtet, dass in Ost und Südost von Belarus alle Kinder krank sind und sich bei jungen Frauen die Zahl von Brustkrebserkrankungen verdoppeln wird. Die vorliegenden Messungen der individuellen Expositionswerte Hunderttausender in den am schwersten betroffenen Gebieten haben für derartige Behauptungen keinerlei Grundlagen geliefert.

Das gesamte Bemühen um Hilfe und Schadensbegrenzungen wurde und wird auf irrationalste Weise behindert. Gezeigt hat die Katastrophe von Tschernobyl, dass Prognostiziererei auf wissenschaftlich widerspruchsvollen Grundlagen die tatsächlich gegebenen Gefährdungen und gesundheitlichen Schäden noch extrem vermehrt hat.

Solange Kernenergieanlagen in Betrieb sein werden, sind Störfälle aus den verschiedensten Gründen nicht total auszuschließen. Das Schüren irrationalen Empfindens bei Strahlenrisiken schließt das Potenzieren von Folgen aus Störfällen ein. Tschernobyl ist ein warnendes Beispiel für Versagen von Gesellschaft und Wissenschaft.

Literatur

/1/ Christa Wolf, in „Verblendung", Aufbau-Verlag Berlin/Weimar, 1991.
/2/ W, Friedrich, W. Noethling, „Radioaktivität und Pharmazie", Pharmaz. Zeitung, Springer-Verlag 1933.
/3/ E. Ettenhuber u.a., „Begrenzung der Strahlenexposition durch Radon in Aufenthaltsräumen", Strahlenschutzpraxis-Heft 1,2005.
/4/ K. Becker, „Das Radonschutzgesetz", wie /3/.
/5/ A. Kellerer, „Stellungnahme zur politischen Auseinandersetzung um Leukämie und Strahlung", Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Berichte und Publikationen 1995.
/6/ D. Billen, „Spontaneous DNA-damage and...negligible dose", Radiat.Research 124, 1990.
/7/ G. Erzgräber u.a., „DNA-structures and radiation injury", Proceedings of the COSPAR-Meeting Den-Haag 1990, Pergamon Press.
/8/ K.R. Trott u.a., „Molecular mechanisms of radiation carcinogenesis...", Radiat. Environ. Biophys. 39, 2000.

/9/ J.R. Oppenheimer, „Atomkraft und menschliche Freiheit“, Rowohlt-Taschenbuch-Verlag 1957.
/10/ NCRP-Report No. 43, Washington D.C. 1975.
/11/ W. Jacobi, in: ‚Strahlenschutz in Forschung und Praxis’, G. Fischer-Verlag-1992.
/12/ Tagungsband „Zehn Jahre nach Tschernobyl- eine Bilanz“, G. Fischer-Verlag-1996.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 121–136*

Klaus Steinitz

Überlegungen zu einer komplexen Bewertung der Atomenergie Wie könnte der Diskurs zwischen Anhängern und Gegnern der Nutzung der Atomenergie weitergeführt werden?

In meinem Beitrag sollen vor allem Fragen und Probleme behandelt werden, die mit der Perspektive der friedlichen Nutzung der Atomenergie in ihren Verflechtungen mit anderen Komplexen der Energiewirtschaft und mit der gesamtgesellschaftlichen Entwicklung zusammenhängen. Damit wird natürlich auch die Kontroverse zwischen Anhängern und Befürwortern dieser Nutzung berührt. Ich stütze mich dabei auf die bisherigen Diskussionen um diese Problematik in der Öffentlichkeit sowie speziell in der Leibniz-Sozietät und in unserem Arbeitskreis Energiesicherung. Wichtige Aspekte dieser Diskussionen und ihrer Ergebnisse sollen kritisch bewertet und zugleich Überlegungen zu einer möglichst produktiven Fortsetzung des Diskurses dargelegt werden. Dafür ist die Bereitschaft, sich die Argumente der jeweils anderen Seite unvoreingenommen anzuhören, sie ernst zu nehmen, sachlich und aufgeschlossen zu prüfen sowie darauf auch argumentativ einzugehen, eine notwendige Bedingung. Sie ist bisher in den Auseinandersetzungen um diese Problematik leider noch zu wenig ausgeprägt.

Diese Problematik nahm im Bericht des Präsidenten der Leibniz-Sozietät, Herbert Hörz, zum Leibniz-Tag 2005: „Erkenntnissuche und Pluralismus“ einen wichtigen Platz ein. Seine Ausführungen zur „Energieversorgung als globales Problem“ sowie „Wahrheitssuche und Meinungspluralität“ charakterisieren sowohl Probleme und Schwächen in unserer bisherigen Tätigkeit als auch Herausforderungen vor denen wir in der weiteren Arbeit stehen. (Hörz 2005)

Ich möchte meine Auffassung zur Problematik des Themas in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. *Bei der sicheren Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen kommt der gesellschaftlichen Bewertung der perspektivischen Nutzung der Atomenergie eine Schlüsselstellung zu.*

Soll eine solche Bewertung Grundlage für strategische Entscheidungen sein, muss sie soweit möglich nach objektiven Kriterien erfolgen und einen komplexen, umfassenden Charakter aufweisen. Es müssen die Vor- und Nachteile der verschiedenen Optionen charakterisiert sowie Einseitigkeiten und stark subjektiv gefärbte Einschätzungen vermieden werden. Dies setzt einen hohen Grad an Interdisziplinarität voraus, wofür die Leibniz-Sozietät über gute Voraussetzungen verfügt, die aber m.E. bei unserer Problematik noch besser genutzt werden müssten.

In diesem Zusammenhang stellen sich verschiedene Fragen, von denen ich eine Grundproblematik hervorheben möchte: Sind die vorgetragenen Begründungen für die notwendige perspektivische Nutzung der Kernenergie nicht zu stark von technisch-technologischen und betriebswirtschaftlichen Effizienzaspekten bestimmt? Werden dabei nicht wichtige gesamtgesellschaftliche Zusammenhänge, Demokratieprobleme, strategische Sicherheits- und Gesundheitsfragen und das zu berücksichtigende Interesse zukünftiger Generationen, selbst auf die Bedingungen ihrer Lebensumwelt Einfluss zu nehmen, vernachlässigt?

2. *Die vorliegenden Prognosen zur Energiewirtschaft Deutschlands, der Industrieländer, der Länder der „Dritten Welt" und der Welt insgesamt können nicht als sichere, zuverlässige Voraussagen über die zukünftige Entwicklung angesehen werden.* Das gilt für die Einschätzungen zur Bedarfs- und Aufkommensentwicklung an Primär- und Endenergie insgesamt, für die Energieeffizienz, – das Verhältnis zwischen Energiebedarf und Wirtschaftsleistung, meist gemessen im BIP –, für die Umweltbelastung vor allem durch den CO_2 Ausstoß, und schließlich auch für Veränderungen in der Energieträgerstruktur.

Die Ergebnisse der verschiedenen Prognosen zur Entwicklung der Energiewirtschaft und darunter speziell der Kernenergie sind äußerst unterschiedlich. Die Abweichungen der tatsächlichen Entwicklung von der prognostizierten sind bis in die jüngste Zeit beträchtlich. Die tatsächliche Bedarfsentwicklung an Primärenergie war und ist wesentlich niedriger als die vorausgesagte. Das wurde schon in dem Plenarvortrag von Karl Friedrich Alexander „Stand und Perspektiven einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Weltenergieversorgung" vor 10 Jahren deutlich gezeigt. (Alexander 1995: 30ff.) Daran hat sich auch in der Zwischenzeit nichts geändert.

Der Platz ist nicht vorhanden, um einen Gesamtüberblick zu geben. Ich kann hier nur hervorheben, dass der Vergleich verschiedener Prognosen zur Energiewirtschaft deutlich macht, dass ihnen sehr unterschiedliche Vorstel-

lungen zu den voraussichtlichen bzw. notwendigen Veränderungen in der Energiewirtschaft, zur Bedarfs- und Aufkommensentwicklung, zur Erhöhung der Energieeffizienz, zum CO_2-Ausstoß, zu den für die Beurteilung der Perspektive der Kernenergie wichtigen Veränderungen in der Energieträgerstruktur sowie auch unterschiedliche methodologische Herangehensweisen zugrunde liegen.

3. *Zur Nutzung der Kernenergie für die perspektivische Energiesicherung stehen sich, ähnlich wie in der gesamten Gesellschaft, auch in der Leibniz-Sozietät zwei Standpunkte, natürlich in verschiedenen Schattierungen, recht unversöhnlich gegenüber.*

Einmal die Meinung, die Nutzung der Atomenergie, einschließlich ihrer Weiterentwicklung – vor allem schnelle Brüter und Kernfusion – ist ein entscheidendes, unverzichtbares Element perspektivischer Energiesicherung. „Auf das große Potenzial der Kernenergetik einschließlich Brüter- und Fusionstechnologien kann nicht verzichtet werden." (Alexander 2005: 3) „Auf längere Sicht wird es notwendig, eine CO_2-freie Energetik zu schaffen. Dies geht nur auf Basis der Kernenergie (Spaltung und Fusion) und der regenerativen Energieträger, insbesondere der Solarenergie." (Flach 2005: 5) „Das Entwicklungspotenzial der Kernenergetik ist beträchtlich auch im Hinblick auf sicherheitstechnische Neuerungen und Uranressourcen, ein Verzicht auf diese Option würde in Europa (wenn sich alle dem deutschen Vorbild anschlössen) wohl, wenn nicht zu einem energetischen Kollaps, so doch zu erheblichen Turbulenzen und Abstrichen am Lebensniveau führen." (Ebendort: 18). Diese Auffassungen gehen in ihrer Unbedingtheit und Konsequenz über das im Bericht des Präsidenten auf dem letzten Leibniz-Tag angeführte „nicht ausschließen wollen" der Kernenergie hinaus.

Zum anderen die Meinung, die sich auf den Beschluss der Bundesregierung stützt, bis 2020 aus der Nutzung der Atomenergie auszusteigen, und keine neuen Atomkraftwerke zu bauen. Diese Option geht davon aus, die perspektivische Energieversorgung ohne Kernenergie zu sichern. Dabei gibt es auch viele Gegner der Nutzung der Kernenergie, die einen radikaleren Ansatz vertreten: sofortiger bzw. weit schnellerer Ausstieg aus dieser Energiequelle, durch sofortige Stillegung der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke. Der bekannteste Protagonist einer perspektivischen Option der Energiesicherung ohne Kernenergie, Hermann Scheer, hat in vielen Publikationen den Übergang vom atomar-fossilen zum Solarzeitalter der Energiesicherung begründet und gefordert. In einer Rede auf dem Kongress der IPPNW 2004 stellte er u.a. fest: „... das Denken verlassen müssen, dass die sogenannte friedliche

Nutzung der Atomenergie irgend eine verantwortliche Perspektive für die Menschheit darstellen könnte." (Scheer 2004: 3) „Wir können uns drehen und wenden wie wir wollen, wir stehen in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts vor der größten zivilisatorischen Herausforderung seit Menschengedenken. Nämlich die vollständige Ablösung des atomaren und fossilen Energieversorgungssystems durch erneuerbare Energien." (Ebendort: 5) Es ist „der psychologische Dreh- und Angelpunkt, zu beschreiben, und immer wieder zu betonen, dass es selbstverständlich möglich ist, vollständig sowohl auf Atomenergie wie auf fossile Energie zu verzichten und das Solarzeitalter herbeizuführen." (Ebendort: 6)

Im Unterschied zur Auffassung in der Bevölkerung Deutschlands, hier wird mehrheitlich die Ausstiegsoption unterstützt, überwiegt in unserem Arbeitskreis, dem vorwiegend Naturwissenschaftler angehören, die Meinung, dass auf die Atomenergieoption nicht verzichtet werden darf. Dieses Meinungsbild kann jedoch nicht auf ganze Leibniz-Sozietät übertragen werden. So stimmten von den 50 Teilnehmern aus der Leibniz-Sozietät, die an der Diskussion der „Thesen zur ökologischen Transformation" teilnahmen, 27 für und 21 gegen diese Thesen.

Wir stehen m.E. vor dem *Problem, dass die Bewertung der Atomenergie nicht allein nach objektiven, sachlich eindeutig interpretierbaren Kriterien erfolgen kann*. Mehrere Feststellungen beider Seiten lassen sich nicht durch praktische Versuche und objektivierte Erfahrungen nachweisen. Die Bewertung wird stark durch subjektive Erfahrungen und Meinungen, differenzierte Einschätzungen vorliegender Forschungsergebnisse, politische Überzeugungen und Standpunkte sowie nicht zuletzt durch Interessen, vor allem ökonomischer aber auch wissenschaftlicher Art, wesentlich beeinflusst. Dies wird, zwar im unterschiedlichen Maße, aber in der Tendenz doch fast immer, in den verschiedenen Meinungsäußerungen und in Diskussionen sichtbar. Das zeigt sich z.B. im ersten Bericht der Enquete-Kommission des Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung" in der Feststellung: „... dass trotz vieler Gemeinsamkeiten zwischen Koalition und Opposition ein Kernkonflikt nicht auszuräumen ist: Ist Nuklearenergie nachhaltig oder nicht? Nach Ansicht der Koalition ist Nuklearenergie – z.B. wegen der Abfallproblematik, die eine Erblast für viele künftige Generationen darstellt und des (zwar geringen) Risikos bei gleichzeitig aber gigantischem Schadensausmaß – nicht nachhaltig. Die Opposition ist anderer Auffassung." (Uh 2005: 1) Weiter wird vom Berichterstatter auf der Grundlage der Untersuchung mehrerer Szenarien festge-

stellt: „Eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland auf Basis von Energieeinsparung, Effizienz und erneuerbaren Energien ist bis zum Jahre 2050 realisierbar." (Ebendort: 3)

Es sind vor allem *zwei komplexe Probleme bei denen die grundsätzlich unterschiedliche Bewertung deutlich wird*, und zu denen es auch bei Verbesserung und Vertiefung der Argumentation wahrscheinlich in absehbarer Zeit nicht zu einem Konsens zwischen den beiden konträren Auffassungen kommen wird:

Erstens: Wird es im Verlaufe der nächsten 50 Jahre, etwa bis 2050, möglich sein, den Weltenergiebedarf ohne Kernenergie und bei Reduzierung des weltweiten CO_2 Ausstoßes auf 70% bis 50% zu decken, durch eine Kombination von entschieden höherer gesamtwirtschaftlicher Energieeffizienz bzw. Energieproduktivität und bedeutender Erweiterung des Anteils erneuerbarer Energien?

Zweitens: Wie hoch ist das mit der Entwicklung und Nutzung der Kernenergie, einschließlich schneller Brüter und Kernfusionsreaktoren, verbundene Gesamtrisiko und inwieweit ist dieses Risiko im Verhältnis zu den Risiken anderer Technologien, insbesondere zu den klimaschädlichen Wirkungen der Nutzung fossiler Energie, gesellschaftlich verantwortbar, sowohl gegenüber den heute Lebenden als auch und vor allem gegenüber den zukünftigen Generationen?

Eine übergreifende Problematik, die sich aus beiden Komplexen ergibt, könnte wie folgt skizziert werden: Vorausgesetzt, es gelingt die gesamtwirtschaftliche Energieeffektivität entscheidend zu erhöhen, und dadurch den Energieverbrauch weitgehend vom Wirtschaftswachstum abzukoppeln, und zugleich die anspruchsvolle Zielstellung bis 2050 zu realisieren, den Anteil erneuerbarer Energien weltweit auf 50% des gesamten Energieverbrauchs zu erweitern, so würden sich daraus zwei grundsätzliche Alternativen ergeben:

- Bei einem Verzicht auf die Kernenergie müssten noch 50% des Weltenergieverbrauchs durch fossile Energien gedeckt werden, der gesamte Energieverbrauch würde aber wesentlich langsamer wachsen als in den meisten Prognosen vorausgesagt; der Einsatz fossiler Energien könnte weltweit reduziert werden, es würden aber weiterhin problematische Konsequenzen für Klimaveränderungen entstehen.
- Bei einer Weiterführung der Energiegewinnung aus Kernkraftwerken wären die Möglichkeiten zur Reduzierung der CO_2-Emission und damit auch die Chancen zur Verhinderung negativer Klimaveränderung größer. Zugleich würde sich aber das mit der Nutzung von Kernenergie verbundene

Risikopotenzial erhöhen.

Aus dem Vergleich der beiden Alternativen ergibt sich die Frage: Wo sind die gesellschaftlichen Gefahren und Risiken größer, bei einer Kombination von erneuerbaren mit fossilen Energien unter Ausstieg aus der Atomenergie oder bei einer Kombination der erneuerbaren Energien mit der Atomenergie, die eine entsprechend weitere Reduzierung des Einsatzes fossiler Energien mit entsprechend positiven Klimaeffekten ermöglichen? Diese Frage kann noch variiert werden: Wenn es in diesem Zeitraum nicht gelingt, die notwenige Erweiterung des Anteils der Erneuerbaren zu erreichen, der Ausstieg aus der Atomenergie jedoch schon vollzogen ist, wie sind dann die Konsequenzen für den Einsatz fossiler Energien und für Klimaveränderungen zu bewerten?

4. *Die bisherigen Auseinandersetzungen in der Gesellschaft und auch in unserem Arbeitskreis weisen auf einige Defizite der Diskussionen hin, die ich hier etwas zuspitzen möchte, um auf Probleme hinzuweisen, die bei der Fortführung des Diskurses besser gelöst werden müssten:*

Die Auseinandersetzungen mit den Argumenten der jeweils anderen Seite sind häufig nicht überzeugend und tiefgreifend genug. Zum großen Teil sind sie vorrangig darauf gerichtet, den eigenen, meist schon bekannten Standpunkt zu bekräftigen, ohne ihn ausreichend zu problematisieren, zu relativieren oder auf noch offene Fragen hinzuweisen. Reale Veränderungen bei der Bereitstellung und Nutzung verschiedener Energieträger, sowohl bei der Kernenergie als auch bei den erneuerbaren Energien, werden zu wenig beachtet, so dass es seit langem wenig Bewegung und kaum Fortschritte in der Diskussion gibt. Dies betrifft auf der einen Seite z.B. neue Technologien und weiterentwickelte Sicherheitskonzepte der Kernkraftwerke zur Verringerung der Risiken bei Störfällen, wie auf der anderen Seite die nachgewiesenen größeren Erweiterungs- und Effizienzpotenziale erneuerbarer Energie sowie insgesamt die großen bisher nicht genutzten realen Möglichkeiten der Energieeinsparung bei der Energieumwandlung und Energienutzung.

Bei der Begründung eines Standpunkts bleiben oft Zusammenhänge außer Betracht, die für die Beurteilung und Entscheidung wichtig sind. Dies gilt z.B. für den Vergleich der laufenden Kosten und spezifischen Investitionen für die Stromerzeugung zwischen Kernkraftwerken und anderen Kraftwerken. Dies gilt generell für Effektivitätsvergleiche, die auf betriebswirtschaftliche Rechnungen begrenzt bleiben und die die komplexen gesellschaftlichen Aufwendungen zur Vorbereitung der Produktion (z.B. die sehr hohen bisherigen Vorlaufaufwendungen in Forschung und Technik für die Nutzung der Kernenergie und die weit größeren zukünftig notwendigen Aufwendungen für SBR

oder die Kernfusion sowie die spezifischen Anforderungen an die Infrastruktur) und die gesellschaftlichen Folgeaufwendungen, die mehrere Generationen betreffen können, nicht oder nur unzureichend berücksichtigen. Wenn diese bisher noch meist externen Kosten und Aufwendungen nicht einbezogen, d.h. internalisiert werden, ist die Aussagekraft von Effektivitätsvergleichen zwischen Kraftwerken, die auf unterschiedlichen Primärenergieträgern beruhen, stark eingeschränkt. Sie bilden für sich genommen daher auch keine ausreichende Grundlage weder für strategische Entscheidungen noch für perspektivische Bewertungen. Dies zu berücksichtigen ist für Effektivitätsvergleiche zwischen Kernenergie und anderen Energien besonders wichtig, da das Verhältnis der Gesamtheit der Vorlauf- bzw. Vorbereitungskosten und der Folgekosten zu den direkten Investitions- und laufenden Kosten bei der Nutzung der Atomenergie im Vergleich zu anderen Energien außerordentlich hoch ist.[1] Mit anderen Worten: Die in Effektivitätsvergleichen zwischen KKW und konventionellen Kraftwerken relativ günstigen Resultate für die KKW sind in beträchtlichen Maße eine Folge davon, dass in den Aufwandsrechnungen die externen Kosten und Vorlaufaufwendungen nicht oder nur unvollständig berücksichtigt werden. (Vgl. hierzu u.a. Krause 1994)

Auch bei der CO_2-Belastung und anderen Umweltschäden sowie bei den laufenden Kosten gilt es, nicht nur die direkten Auswirkungen der Stromerzeugung in den Kraftwerken zu beachten, sondern den gesamten Zyklus von der Rohstoffgewinnung bis zur Abfallentsorgung bzw. zum Recycling zu berücksichtigen. Bei der Kernenergie z.B. die Aufwendungen vom Uranerzbergbau über alle Transportketten bis zur Lagerung des Atommülls, der Herrichtung und dem Betreiben der Zwischen- und Endlager.

„Das Ökoinstitut Darmstadt hat versucht, eine Gesamtbilanz für den Kohlendioxidausstoß bei der atomaren Energieerzeugung zu errechnen und kommt dabei auf 25-50g Kohlendioxidausstoß je Kilowattstunde. Bei einem modernen Gas-Blockheizkraftwerk entstünden dagegen nur 23g.“[2] (zitiert nach Ferst 2004: 96f.)

In den weiteren Diskussionen ist es wichtig, den hinter den beiden grundlegenden Alternativen – Ausstieg aus der Atomenergie oder Ausbau der Atomenergie als wichtiges Standbein zukünftiger Energiesicherung – stehen-

1 Ausgehend von vorliegenden Untersuchungen stellt Marko Ferst in einer Studie fest, dass die Gesamtheit der staatlichen Mittel für die Atomwirtschaft in Deutschland im Zeitraum von 1955 bis 2000 eine Größe von etwa 50 Milliarden Euro erreicht hat. (Ferst 2004: 5)

2 Iris von Knorre; Klimaschutz: Falsche Rechtfertigung für eine Renaissance der Atomkraft, anti atom aktuell, Nr.151, 4/2004, S.22

den ökonomischen Interessen und wirtschaftlichen und politischen Kräfte größere Beachtung zu schenken. Sie dürfen nicht, wie es bisher noch oft geschieht, ignoriert werden. Die Entwicklung der Kernenergie ist eng mit der Zentralisation des Kapitals, der Dominanz der großen Energiekonzerne, der weiteren Stärkung ihrer ökonomischen Macht und ihres politischen Einflusses auf die Politik verbunden. Soweit die Elektroenergieerzeugung auf der Basis erneuerbarer Energien profitabel ist, werden natürlich auch hier die Energiekonzerne bestrebt sein, sie ihren Verwertungsinteressen unterzuordnen. Windkraftanlagen, Bioenergie u.ä. beruhen im Gegensatz zu KKW und zu konventionellen, fossile Energieträger nutzenden Kraftwerken, stärker auf kleineren, dezentralen Kapazitäten, die weit weniger ortsgebunden sind. Sie können dadurch eher zur Regionalisierung der Wirtschaft beitragen und schaffen auch günstigere Bedingungen für eine demokratische Mitbestimmung der Bürgerinnen und Bürger. Sie stellen auch geringere Anforderungen an die Infrastruktur. In diesem Sinne *eröffnet die Solarenergie vielfältige Chancen für eine soziale, ökologische und demokratische Perspektive der Wirtschaftsentwicklung*. Allerdings dürfen die bei einer Entwicklung der Solartechnologien im großen Umfang entstehenden Probleme und Aufwendungen für die Infrastruktur (Transport von Elektroenergie über große Entfernungen, Speicherung von Elektroenergie) nicht unterschätzt werden.

Unterschiedliche Antworten auf die Fragen nach der Größe des in nächster Zukunft real nutzbaren Potenzials der erneuerbaren Energieträger, nach den Möglichkeiten zur Senkung der Kosten und spezifischen Investitionsaufwendungen ihres Einsatzes sowie nach den realisierbaren Möglichkeiten zur Erhöhung der volkswirtschaftlichen Energieproduktivität, haben natürlich Auswirkungen auf die Beurteilung der Perspektive der Kernenergie. So ergeben sich aus der Feststellung, das Potenzial der Erneuerbaren reicht in Verbindung mit der möglichen Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität aus, um den perspektivischen Energiebedarf in Deutschland und auch weltweit zu decken, natürlich andere Konsequenzen für die Beurteilung der Rolle der Kernenergie, als aus einer gegenteiligen Einschätzung, dass der Energiebedarf nur bei Einsatz der Kernenergie gedeckt werden kann, oder dass ohne die Nutzung der Kernenergie die Welt vor unlösbaren energetischen oder Klimaproblemen stehen wird. Dabei sind offensichtlich Ausmaß und Tempo der Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien in hohem Maße von der Politik, insbesondere von der Art und Intensität ihrer Förderung – Forschungsausgaben, ökonomische Anreize, staatliche Orientierungen – abhängig.

Ohne ausführlich hierauf einzugehen, soll hier nur darauf hingewiesen werden, dass in verschiedenen Studien nachgewiesen wird, dass es im Zusammenhang mit entschieden größeren politischen Kraftanstrengungen, ökonomisch-finanziellen Aufwendungen und Forschungsleistungen zur Erhöhung der Energieproduktivität möglich sein wird, den Weltbedarf an Energie bei beträchtlicher Reduzierung des Einsatzes fossiler Energien, ohne Kernenergie zu decken.

Die Schwankungsbreite der Prognosen zur Entwicklung des Weltenergiebedarfs in Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Prämissen zeigt eine Prognose des Weltenergierats (WEC) mit drei verschiedenen Szenarien: Gegenüber einem Weltbedarf an Primärenergie 1990 von 9,0 GigaTonnen (Erdöläquivalent) soll dieser bis 2050 auf:

24,8 GigaTonnen – 275% – (Projektion A, hohes Wachstum des BIP),

19,8 GigaTonnen – 220% – (Projektion B, mittlerer Verlauf) bzw.

14,2 GigaTonnen – 160% – (Projektion C, ökologische Orientierung) steigen. (WEC 1999)

Hieraus könnten m.E. für unseren Arbeitskreis vor allem zwei Konsequenzen abgeleitet werden: (1) Diesen Fragen und Zusammenhängen, insbesondere den weltweit und auch in Deutschland vernachlässigten Aufgaben zur Erhöhung der Energieeffizienz größere Beachtung zu schenken. Dazu gibt es eine umfangreiche Literatur. (2) Bei der Ausarbeitung unseres Standpunkts die Abhängigkeit von den jeweils zugrunde gelegten Prämissen deutlicher zu machen.

Ich unterstütze die Forderung von Günter Flach: „ Es sollte gelingen, von der Wissenschaft ausgehend wieder Rationalität in die Behandlung dieser Fragen zu tragen." (Flach 2005: 8) Sie sollte jedoch um die Aufgabe erweitert werden, *sie enger mit den Lebensfragen der Menschen und mit den Erfordernissen der Nachhaltigkeit zu verflechten.*

5. *Eine komplexe gesellschaftliche Bewertung der Perspektive der Atomenergie kann nur auf einer sehr umfassenden Grundlage erfolgen, die verschiedene Bereiche und spezifische Einflussfaktoren berücksichtigt.*

Ich kann hier nur die wichtigsten kurz nennen, ohne näher auf sie eingehen zu können.

- *naturwissenschaftlich-technische Entwicklung, technologische Fortschritte* – Beherrschung der Sicherheitsrisiken, Atommüllentsorgung, Nutzungs- und Effizienzpotenziale durch neue wissenschaftlich-technische Erkenntnisse, deren Erschließung große gesellschaftliche Kraftanstrengungen erfordert;

- *ökonomische Bedingungen und Wirkungen*: Schaffung der notwendigen Voraussetzungen – Vorlaufaufwendungen für die Anwendung neuer Technologien und die Erschließung von Effektivitätspotenzialen; Internalisierung externer Kosten, u.a. der Zwischen- und Endlagerung der Atomabfälle, Aufwendungen zur Erhöhung der Sicherheit in Kernkraftwerken, Aufwendungen und Probleme der Demontage von Kernkraftwerken; dabei ist auch zu berücksichtigen, dass für Forschungen auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien bisher nur ein Bruchteil der Aufwendungen für die Nutzung der Kernenergie bereitgestellt wurden.
  Eine wichtige Herausforderung besteht darin, die Einschätzungen zu den realen Einsparungs- bzw. Effektivitätspotenziale zur Senkung des Energiebedarfs zu qualifizieren und zugleich die für ihre Erschließung entscheidenden Voraussetzungen und Maßnahmen zu bestimmen.
- *Auswirkungen auf die natürliche Umwelt, Umweltverträglichkeit;* auch hier gilt es sowohl die direkten Auswirkungen – Inanspruchnahme endlicher natürlicher Ressourcen, Umweltschäden durch CO_2-Emissionen und Abfälle, speziell Atommüll – als auch die komplexen Auswirkungen der gesamten Produktionskette, zu berücksichtigen
- *Soziale Zusammenhänge und Wirkungen*; hier geht es vor allem um die Beziehungen der Energiebereitstellung und ihrer Struktur zum Lebensniveau und zur Energiesicherung für alle als einer Grundforderung im Kampf gegen Armut und Unterentwicklung, um die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien auf die Schaffung von Arbeitsplätzen, z.B. entstehen durch die forcierte Entwicklung erneuerbarer Energien auch zusätzliche Arbeitsplätze. Zu den sozialen Wirkungen gehören auch Fragen der Regionalisierung und Dezentralisierung der Energiewirtschaft, der Konzentration ökonomischer Macht bei den Energiekonzernen oder größerer Einfluss der Regionen, speziell der Kommunen auf die Art der Energieversorgung.
- *Auswirkungen auf die Bedingungen und Möglichkeiten der Wahrnehmung demokratischer Rechte bei der Entscheidung von Lebens- und Zukunftsfragen.* Hier spielen insbesondere Probleme der gesellschaftlichen Akzeptanz der verschiedenen Energien, der Art ihrer Umwandlung und Nutzung sowie die Möglichkeiten, die Voraussichtlichen Interessen zukünftiger Generationen zu berücksichtigen, eine wichtige Rolle. Inwieweit müssen und dürfen heute Entscheidungen getroffen werden, die für eine längere Zeit irreversibel sind und die Lebensbedingungen zukünftiger Generationen wesentlich beeinträchtigen können? Diese Problematik

ist für die Bewertung nicht nur der Kernenergie zentral, trifft diese aber auf Grund ihres Risikopotentials in besonderem Maße.

- *Risiken bei der Gewinnung der Primärenergie, der Energieumwandlung und bei der Beseitigung von Abfällen*
- *Beziehungen zu militärischen Bedrohungen und Gefahren*. Die hier bestehenden Probleme sind natürlich bei der Kernenergie besonders groß. Sie reichen von dem zukünftig möglichen Einsatz anfallender Spaltprodukte für Terroranschläge, über die Gefahren, die sich aus der schwierigeren Kontrolle des Atomsperrvertrages und aus seiner Aushöhlung ergeben, bis zu den unkalkulierbaren Risiken militärischer Angriffe auf Atomanlagen. Der Schutz vor militärischen Angriffen oder Terroranschlägen (z.B. die unterirdische Errichtung von KKW) erhöht natürlich die spezifischen Investitionsaufwendungen und Kosten der Stromerzeugung auf Basis der Kernenergie.
- *Zusammenhänge der Energiebereitstellung zur Entwicklungsperspektive der Länder der „Dritten Welt", zu den Bedingungen, die Nord-Süd Kluft zu verringern.* Entscheidungen über verschiedene Optionen der Energiesicherung müssen stets die Auswirkungen auf die Entwicklungsbedingungen und -chancen dieser Länder mit beachten. Die Bedeutung dieser Probleme zeigt sich u.a. darin, dass ein großer Teil der Bevölkerung der Erde nicht mit Energie versorgt werden kann, und dass mehrere Länder der „Dritten Welt" für den Import von Erdöl mehr Geld ausgeben müssen als sie insgesamt durch Importe einnehmen. (Scheer 2005: 4). Die Eignung der verschiedenen Energiesysteme für die Lösung der Entwicklungsprobleme der „Dritten Welt", speziell für die Verbesserung der Lebenslage der Bevölkerung und für eine ökologisch nachhaltige Entwicklung, unterscheidet sich wesentlich von ihrer Eignung für die Industrieländer.
- *Die enge Verflechtung zwischen nationalen Strategien der Energiesicherung und der europäischen Integration und der weiteren Ausprägung globaler Zusammenhänge und Abhängigkeiten*, von der Energiesicherung (insbesondere Importabhängigkeit bei Erdöl/Erdgas und Uran) bis zu grenzüberschreitenden und globalen Umweltschäden, und europaweiten oder sogar globalen Lösungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Bei all diesen Beziehungen und Einflussfaktoren gewinnen solche Probleme, wie die *Langfristigkeit* (Vorbereitung und Wirksamkeit) von Entscheidungen zur Entwicklung der Energiestruktur und von Technologien zur Energieumwandlung sowie die *Unsicherheiten* und *Unwägbarkeiten* der

technisch-ökonomisch praktikablen Umsetzung wissenschaftlicher Vorstellungen an Gewicht. Dies gilt in besonders hohem Grade für die Kernenergie und die Vorbereitung des Einsatzes grundsätzlich neuer Technologien – SBR, Fusionsreaktoren. Dies verlangt Entscheidungen zu solchen Problemen besonders sorgfältig vorzubereiten und, soweit notwendig, auch darauf aufmerksam zu machen, wenn sie noch nicht entscheidungsreif sind. Wir sollten auch deutlich sagen, dass bestimmte Hypothesen zur zukünftigen Energieversorgung heute weder definitiv bestätigt noch widerlegt werden können, dass wir es heute und auch in Zukunft mit Entscheidungssituationen zu tun haben, die durch ein hohes Maß an Unwägbarkeiten und Unsicherheiten gekennzeichnet sind.

Wir müssten berücksichtigen, dass infolge der voraussichtlichen Zuspitzung der Klimaprobleme, auch wegen der bisher im Weltmaßstab völlig unzureichenden Maßnahmen zur Einschränkung des Ausstoßes von CO_2 und anderen Klimagasen, wahrscheinlich der Druck zur Anwendung der Atomenergie auch in Deutschland größer werden wird. Umso wichtiger ist es, alle Argumente für und gegen eine stärkere Kernkraftentwicklung, dabei speziell die ökonomischen Berechnungen, gründlich zu prüfen.

6. *Wie könnte oder sollte es mit der Diskussion zur Atomenergie und zur perspektivischen Entwicklung der Energiesicherung in unserem Arbeitskreis weitergehen?*

Wir sollten m.E. in unserer Stellungnahme nicht ein bestimmtes Szenarium der Entwicklung der Primärenergiestruktur befürworten, weder die Entwicklung und Stärkung des Kernenergiepotenzials einschließlich der Entwicklung der SBR und der Kernfusion, aber auch nicht das gegenteilige Szenarium des definitiven Ausstiegs aus der Kernenergie. Das ist auf Grund der sehr vehement vertretenen entgegengesetzten Auffassungen zu dieser Problematik auch in unserem Arbeitskreis zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Vielmehr sollte der vom Präsidenten auf dem Leibniz-Tag geforderte Pluralismus von Meinungen auch in unserem Standpunkt widergespiegelt werden. Es müsste zum Ausdruck kommen, dass es zu dieser Problematik in der Leibniz-Sozietät verschiedene Standpunkte gibt.

Die noch vorhandnen Unsicherheiten, Unwägbarkeiten sowie offenen Fragen müssen sachlich und möglichst abgewogen dargestellt werden. Damit sollte eine komplexe und zugleich differenzierte Sicht auf die Probleme zugrunde gelegt werden, in der die relevanten Zusammenhänge so weit wie möglich berücksichtigt werden, um eine gesellschaftliche, wissenschaftlich-

technisch, ökonomisch, sozial und ökologisch begründete Wertung der grundlegenden Szenarien vornehmen zu können.

Es reicht dabei m.E. nicht aus, nur die wahrscheinliche Entwicklung *vorauszusagen*. Diese wahrscheinliche Entwicklung bildet als Referenzprognose einen wichtigen Ausgangspunkt. Dazu sollten in weiteren Schritten Vorstellungen und Ziele für notwendige bzw. wünschenswerte Veränderungen von Entwicklungstrends, vor allem in der Energieeffizienz und in der Energiestruktur, abgeleitet werden und einige grundlegende Maßnahmen und Regelungen gefordert werden, die unerlässlich sind, um diese Zielstellungen zu erreichen.

Im *Vordergrund steht, eine solche Effizienz- und Strukturentwicklung in der Primär- und Endenergie zu erreichen, die die Nachhaltigkeit in ihrer ökologischen, sozialen und ökonomischen Dimension unterstützt.*

Wissenschaftler verschiedener Forschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft kamen in einem Verbundprojekt „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland" zum Ergebnis, dass „Maßnahmebündel von erheblicher Eingriffstiefe notwendig sind, um wichtige Nachhaltigkeitsziele zu erreichen." In der Studie werden mehrere Einschätzungen vorgenommen, die sicherlich von den Mitgliedern der Leibniz-Sozietät unterstützt werden, so z.B.: „ ...dass gegenwärtige Nachhaltigkeitsprobleme sich unter bestimmten gesellschaftlichen Randbedingungen nicht lösen lassen oder sich noch verschärfen könnten. Dies gilt insbesondere für ein Szenario, das für die Zukunft einen weiteren Rückzug des Staates unterstellt und auf den Marktmechanismus bei der Lösung der verschiedenen Nachhaltigkeitsprobleme vertraut. ... Eine wesentliche Erkenntnis des Projekts ist es, dass eine erfolgversprechende Nachhaltigkeitsstrategie die Lösung der wesentlichen ökonomischen, ökologischen und sozialen Probleme simultan und integriert angehen muss." (Helmholtz-Gemeinschaft/ Fraunhofer-Gesellschaft 2003).

Abschließend ein *Vorschlag für eine komplexe, differenzierte Bewertung verschiedener Szenarien, Technologien der Energieumwandlung auf Basis der wichtigsten Primärenergien.* Dabei sollte eine Konzentration auf vorwiegend qualitative Kriterien und Einschätzungen erfolgen. Folgende Schritte sollten dabei gegangen werden:

1. Auswahl repräsentativer Technologien der Energiegewinnung bzw. -umwandlung für die wichtigsten Primärenergien;
2. Verständigung über die zugrunde zu legenden Bewertungskriterien und die Art und Weise dieser Bewertung. Bei der Festlegung der Kriterien

müsste gewährleistet werden, dass damit die wichtigsten Aspekte einer objektiven, komplexen gesellschaftlichen Bewertung berücksichtigt werden. Das wird nur in einer gewissen Annäherung und auch bei den verschiedenen Kriterien recht unterschiedlich möglich sein. Besonders problematisch ist natürlich eine einigermaßen zuverlässige Bewertung künftiger Technologien.

Zumindest folgende Kriterien sollten berücksichtigt werden.

– *Ökonomische Effizienz*, differenziert nach betriebswirtschaftlichen und gesamtwirtschaftlichen (Einbeziehung der „externen" Aufwendungen) Kriterien;
– *Umweltverträglichkeit,* Auswirkungen auf die *natürliche Umwelt, Nachhaltigkeit, Übereinstimmung mit den Grundsätzen der Ökologie;* auch hier gilt es sowohl die direkten Auswirkungen – Inanspruchnahme endlicher natürlicher Ressourcen, Umweltschäden vor allem durch CO_2 und Abfälle, speziell Atommüll – als auch die komplexen Auswirkungen der gesamten Produktionskette, zu berücksichtigen
– *Versorgungssicherheit*
– *Soziale und gesellschaftliche Auswirkungen* – Beziehungen der Energiebereitstellung und ihrer Struktur zum Lebensniveau, zur Schaffung von Arbeitsplätzen, zur Regionalisierung und Dezentralisierung der Energiewirtschaft, zur Konzentration ökonomischer Macht bei den Energiekonzernen, zum größeren Einfluss der Regionen, speziell der Kommunen auf die Art der Energieversorgung
– D*emokratischer Rechte* bei der Entscheidung von Lebens- und Zukunftsfragen, gesellschaftlichen Akzeptanz, Berücksichtigung der Interessen zukünftiger Generationen
– *Risiken bei der Energiegewinnung, -umwandlung und bei der Beseitigung/Lagerung von Abfällen*
– *Gefährdungsgrad gegenüber militärischen und terroristischen Bedrohungen*
– *Potentiale für die Entwicklungsperspektive der Länder der „Dritten Welt" und für Bedingungen, die Nord-Süd Kluft zu verringern, zur Überwindung von Hunger und Armut*

Die Bewertung dieser Kriterien könnte sowohl in positiver als auch in negativer Richtung nach einer Skala: sehr stark, stark, gering, erfolgen

Der Meinungsaustausch zu diesen Fragen im Arbeitskreis hat gezeigt, dass ein solches Herangehen zwar für richtig und notwendig angesehen wird, dass aber die Probleme, die mit einer solchen komplexen und zukunftsorien-

tierten gesellschaftlichen Bewertung verschiedener Technologien und Optionen zur nachhaltigen Energieversorgung zu lösen sind, die Möglichkeiten unseres Arbeitskreises und der Leibniz-Sozietät übersteigen. Der obige Vorschlag ist daher mehr als Anregung für weitere Diskussionen, Untersuchungen und auch Forschungen zu dieser Problematik anzusehen, wofür unser Arbeitskreis auch einen Beitrag leisten kann.

Die zu den Erneuerbaren und insgesamt zum Solarzeitalter im Arbeitskreis vorhandene Wissensbasis reicht nicht aus. Sie wäre nachholend nur mit einem außerordentlich hohen Arbeitsaufwand zu schaffen. Das eigentliche Problem liegt dabei in der kaum noch überschaubaren Komplexität des Konzepts der solaren Wende und in dem hohen Tempo der wissenschaftlich-technischen Entwicklung auf den hierfür relevanten Gebieten. Besondere Probleme betreffen in diesem Zusammenhang die zukünftige Gestaltung der Beziehungen zwischen dezentraler Versorgung und der Energieübertragung über große Entfernungen sowie die Energiespeicherung für Elektroenergie, die von wesentlicher Bedeutung für die Bewertung verschiedener Energietechnologien sind.

Ökonomischen Vergleichen zwischen dem konventionell fossilen, dem auf Kernenergie und dem solaren System der Energiewirtschaft sind auch Grenzen gesetzt. Es stehen sich verschiedene Systeme gegenüber mit ihren eigenen Gesetzen. Die meisten der heute verwendeten technischen Parameter und Termini entstammen dem fossilen Energiezeitalter und sind nicht ohne weiteres auf Solarsysteme anwendbar und können zu falschen Aussagen führen.

Verwendete Literatur (Auswahl):

Alexander, Karl-Friedrich (1995), Stand und Perspektiven einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Energiewirtschaft, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Band 5, Berlin

Alexander, Karl-Friedrich (2004), Perspektiven der Kernenergie für eine nachhaltige Versorgung der Menschheit mit Energie, Manuskript, Berlin

Coenen, Reinhard; Grunwald, Armin (Hrsg.): (2003), Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland. Analysen und Perspektiven, Berlin

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln/Prognos (2005), Energiereport IV, Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahre 2030, Energiewirtschaftliche Referenzprognose, Kurzfassung, Berlin

Ferst, Marko (2004), Der Atomausstieg in Deutschland – ein nach wie vor ungelöstes Problem, Diplomarbeit, (Manuskript), Berlin

Flach, Günter (2005), Entwicklungstendenzen der Kernenergie und ihre Rolle im Rahmen des globalen Energieproblems, Manuskript, Berlin

Hörz, Herbert, (2004), Wissensverwalter oder Erkenntnisgestalter? Bericht des Präsidenten zum Leibniz-Tag 2004, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Band 74, Berlin

Hörz, Herbert, (2005), Erkenntnissuche und Pluralismus – Bericht des Präsidenten zum Leibniz-Tag 2005, Manuskript, Berlin

Krause, Florentin unter Mitarbeit von Koomey, Jonathan/Rudanne, Pierre/Olivier, David (1995): Die Kosten der Atomenergie in Westeuropa, International Project for Sustainable Energy paths (IPSEP), Öko-Institut e.V. Freiburg

Scheer, Hermann (1998): Sonnen-Strategie - Politik ohne Alternative, München

Scheer, Hermann (2004), Kernenergie gehört ins Technikmuseum, Die Zeit, 29.7.04

Scheer, Hermann (2004), Vom atomaren und fossilen zum Solarzeitalter, Rede auf dem Kongress der IPPNW, 7. Mai in Berlin

Uh, Dieter, Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung (2002), Was ist eine nachhaltige Energieversorgung? Internetfassung

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2003), Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit, Zusammenfassung für Entscheidungsträger, Berlin

Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2003), Über Kyoto hinaus denken - Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert, Berlin.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 137–139*

Klaus Thiessen

Können Erneuerbare Energien die fossilen und Kernenergien ersetzen?

Die *Kernspaltungsenergie* stellt derzeit weltweit in 440 Kernkraftwerken nur 3,3 % der Elektroenergie, in Deutschland 27 %. Sie ist auf den ersten Blick zwar klimafreundlich, die Lagerung der radioaktiven Abfälle ist aber alles andere als umweltfreundlich und bekanntlich nicht gelöst. Kernspaltungskraftwerke sind Zeitbomben (Tschernobyl).

Die Energiegewinnung aus *terrestrischer Kernfusion* steht in den Sternen. Die gegenwärtig im Bau befindliche Anlage ITER soll mindestens 4,6 Milliarden € kosten, dabei wird der Zeitpunkt eines erwarteten positiven Ergebnisses bezüglich der Aufrechterhaltung der Reaktion und des Übersteigens der gewonnenen Energie gegenüber der verbrauchten Energie seit Jahrzehnten immer wieder um Jahrzehnte verschoben. Dagegen ist die Sonne eine riesige, unerschöpfliche Kernfusionsanlage.

Die *fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas, Kohle* führen zur Klimakatastrophe, ihre Vorkommen sind endlich und dürften im Laufe dieses Jahrhunderts weitgehend erschöpft sein. Der Preis wird daher dramatisch steigen. Kriege um die Vorkommen sind bereits voll im Gange und werden weiter eskalieren. Es ist widersinnig, diese kostbaren Rohstoffe zu verbrennen, statt sie für die Chemische Industrie zu verwenden.

Die Erneuerbaren Energien, wie *Biogas, Windenergie* und *Solarstrom* sind dezentral und daher sicher vor terroristischen oder kriegerischen Handlungen. Durch die dezentrale Erzeugung sind sie den großen Energieversorgungsunternehmen natürlich ein Dorn im Auge.

Ein Nachteil der Wind- und Solarenergie ist deren diskontinuierliche Bereitstellung, die jedoch durch geeignete Speichermedien, beispielsweise. Wasserstoff, erzeugt durch Elektrolyse von Wasser, gelöst werden kann. Den Strom kann man dann durch Wasserstoff-Brennstoffzellen erzeugen.

Derzeit beträgt der Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamterzeugung weltweit 20 %, in Deutschland 12 %.

Es wird immer wieder behauptet, dass die Energie, welche für die Herstellungsprozesse der Solarstrom-Anlagen, beginnend mit der Halbleitermetallurgie, über die Scheiben, Zellen, Module und Wechselrichter aufgewendet werden muss, zu hoch sei. Es ist inzwischen erwiesen, dass die Zeitdauer, in der diese Energie zurück gewonnen wird, nicht mehr als höchstens drei Jahre beträgt.

In Deutschland sind gegenwärtig Solarstrom-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 1 GW_p im Einsatz, bis 2020 sollen es 30 GW_p sein.

In Berlin erzeugt eine starr montierte Solarstrom-Anlage im Jahr pro kW installierter Leistung ca. 850 kWh, in Bayern ca. 1000 kWh. Zweiachsig der Sonne nachgeführte Anlagen erzeugen in Bayern ca. 1400 kWh pro Jahr.

Während Planung und Bau eines Kernkraftwerkes sechs Jahre dauern, kann man ein Solarstromkraftwerk gleicher Leistung in wenigen Monaten errichten. Dieses liefert also bereits mehr als fünf Jahre Elektroenergie, bevor das Kernkraftwerk ans Netz geht.

Weltweit existieren bereits mehr als 50 Solarkraftwerke mit einer Leistung von jeweils mehr als 1 MW_p. In der Nähe von Nürnberg wurde durch den Bayerischen Umweltminister im Juni 2005 die bisher weltgrößte Solarstromanlage mit einer Leistung von 10 MW_p in Betrieb genommen. Sie ist einachsig der Sonne nachgeführt und dürfte pro Jahr mehr als 12 GWh Elektroenergie ins Netz einspeisen und zwar weitgehend wartungsfrei über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren.

In der Nähe von Würzburg wird derzeit ein Feld mit 1500 zweiachsig der Sonne nachgeführten Anlagen errichtet, die jeweils über eine Leistung von 6,5 kW_p verfügen, die Gesamtleistung dürfte ebenfalls bei 10 MW_p liegen. Ein Versuchsfeld mit 10 derartigen „Solarmovern“ wurde im Juni 2004 in Berlin-Adlershof in Betrieb genommen. In allen Freilandanlagen können die Flächen unter bzw. neben den Anlagen als Weideflächen genutzt werden.

Es gibt jedoch riesige noch unerschlossene Dachflächen, die für die Montage von Solarstrom-Anlagen genutzt werden können. Zunehmend werden mit Bitumenpappe eingedeckte Dächer durch verschweißte Folien, die mit amorphen Dünnschicht-Modulen kaschiert sind, ersetzt. Die Haltbarkeit solcher Dächer wird für 20 Jahre garantiert, doppelt soviel wie bei Bitumendächern.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es keine Wahl gibt zur Vermeidung riesiger Klimakatastrophen und für das Überleben der Menschheit, als alle Kräfte in die Entwicklung Erneuerbarer Energien zu stecken. Dazu muss allerdings der Widerstand der auf kurzfristigen Profit gerichteten Energieversorgungsunternehmen gebrochen werden. Ein Weg müsste sein, durch geeig-

nete Fördermaßnahmen, wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz, nicht nur in großem Maßstab Arbeitsplätze zu schaffen, sondern den Unternehmern die Forcierung dieser Energien schmackhaft zu machen. Diese Erkenntnis führt derzeit in zahlreichen Ländern zu diesbezüglichen gesetzlichen Regelungen.

Man kann also nicht nur, sondern man muss die fossilen und Kernenergien durch Erneuerbare Energien ersetzen.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 141–142*

Gerhard Brandl

Meereswellenenergie (Zusammenfassung)

Der Autor wies in seinem Vortrag auf das riesige Energiepotential hin, das in den Meereswellen steckt. Schon eine Meeresfläche von der Größe Spaniens kann den gesamten Weltenergiebedarf decken. Die bisher bekannten Energiewandler waren nur für die Küsten geeignet, daher wurde das Energiepotential der Meereswellen zu gering bewertet.

In letzter Zeit sind mehrere Konstruktionen bekannt geworden, die auch in tiefen Meeresgebieten eingesetzt werden können. So die „Seeschlange Pelamis“ aus England, die sich mit den Meereswellen windet und mit einer Hydraulik aus dieser Bewegung Strom erzeugt und auch schon in das englische Stromnetz liefert. Das System „Wave Dragon“ aus Holland nutzt den Umstand, dass auslaufende Wellen Wasser in ein erhöhtes Becken drücken. Es rinnt über eine Wasserturbine zurück und erzeugt dabei Strom. Der Wellengenerator von Brandl Motor hat die Form einer schwimmenden runden Scheibe, die sich mit den Meereswellen hebt und senkt. Er bewegt dabei einen sogenannten Lineargenerator und erzeugt auf diese Weise elektrische Energie. Diese sehr kompakte und robuste Konstruktion bewirkt eine lange Lebensdauer des Energieparks mit besonders niedrigen Wartungskosten.

Bisher ist nur die allerdings schon fast vollkommen ausgebaute erneuerbare Energieform Wasserkraft mit der konventionellen fossilen oder atomaren Energie konkurrenzfähig. Das liegt an der hohen Energiedichte bei der Wasserkraft, verglichen mit den Energiedichten des Windes oder der Solarstrahlung, die nur 3 kWm^{-2} beziehungsweise 1,35 kWm^{-2} betragen. Meereswellenenergie liegt mit einer Energiedichte von 100 kWm^{-2} etwa in der Mitte zwischen der Solarstrahlung oder der Windenergie und den fossilen Kraftwerken mit 500 kWm^{-2} oder Atomkraftwerken mit 650 kW/m^{-2} Energiedichte.

Meereswellenenergie ist eine weitere Form erneuerbarer Energie, die wie die Wasserkraft konkurrenzfähig ist, im Gegensatz zu dieser aber praktisch unbegrenzt vorhanden. Mit der modernen Hochspannungs-Gleichstromübertragung kann der Strom mit vertretbaren Kosten über einige tausend Kilome-

ter geleitet werden. In entsprechend weit auseinander liegenden Meeresgebieten gleichen sich die wetterbedingten Schwankungen der Wellenhöhen so weit aus, dass immer genug Strom zur Verfügung steht. Die saubere Wellenenergie ist daher technisch und wirtschaftlich dazu geeignet, den Weltenergiebedarf mit preiswerter und CO_2-freier Energie zu decken.

In Deutschland wurde zur Förderung der erneuerbaren Energien das Energieeinspeisegesetz EEG geschaffen. Es garantiert die Abnahme des aus erneuerbaren Quellen erzeugten Stromes durch die Elektrizitätswirtschaft so wie er anfällt zu einem fixen und staatlich festgelegten Preis, dies bei der Meereswellenenergie für 30 Jahre. Das EEG garantiert für die gesamte Lebensdauer der Wellengeneratoren von 20 Jahren zum Beispiel bei einer Investition von 1.000 Euro die Rückzahlung von jährlich 150 Euro; folglich ist nach diesen 20 Jahren auch das investierte Kapital zurückgezahlt. Durch das EEG ist die Stromabnahme während der gesamten Lebensdauer der Wellengeneratoren zum staatlich garantierten Fixpreis gesichert. Meereswellenenergie ist nach der entsprechenden Entwicklungszeit, wozu dieses Gesetz ja gedacht ist, am freien Markt konkurrenzfähig.

In der Diskussion wurden Bedenken geäußert, dass man die Wellengeneratoren im einige tausend Meter tiefen Weltmeer nicht verankern könne. Der Vortragende wies darauf hin, dass eine dynamische Verankerung der schwimmenden Generatoren mit dem amerikanischen Satellitenortungssystem „GPS“ oder mit dem zukünftigen europäischen System „Galileo“ vorgesehen ist. Die dynamische Verankerung mit Hilfe der Satelliten ist beispielsweise bei Ölbohrinseln bereits Stand der Technik.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 143–150*

Siegfried Nowak

Fossile Kohlenstoffträger – ihre Rolle und Bedeutung für die Energieerzeugung und die Stoffwirtschaft

Fossile Kohlenstoffträger, darunter versteht man Erdöl, Erdgas und Kohle, sind von ausschlaggebender Bedeutung für die Versorgung der Volkswirtschaften und der Gesellschaft mit Energie und Rohstoffen. Sie haben eine Doppelfunktion und sind Ausgangsprodukte für die Gewinnung von Gebrauchs- insbesondere Elektroenergie, Wärme, Ferngas und bilden gleichzeitig die Basis für die Erzeugung von Vergaser, Diesel- und Flugturbinenkraftstoffen und von Chemieprodukten. Der Anteil von Erdöl, Kohle und Gas für die Energieerzeugung und die chemische oder stoffwandelnde Industrie ist von Land zu Land unterschiedlich.
Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass etwa 90% des geförderten Erdöls verbrannt werden, davon etwa 50% in Form von Heizöl und 40% als Vergaser-, Diesel- oder Flugturbinenkraftstoff. Nur etwa 8–10% des geförderten Erdöls werden für die Erzeugung von chemischen Produkten wie organische Grundstoffe – Olefine, Aromaten – von Zwischenprodukten, Plasten, Elasten, Fasern, Farbstoffen, Waschmitteln, Pharmaka u.a. eingesetzt. Erdöl nimmt also unter den fossilen Kohlenstoffträgern eine dominierende Rolle für die Herstellung von Gebrauchs- und Edelenergie und die Stoffwandlung ein. Erwähnung verdient, dass die Herstellung von Chemieprodukten und Vergaserkraftstoffen noch weitgehend auf Basis der im Erdöl erhaltenen Benzinfraktionen erfolgt, die aber nur zu etwa 10–15% im Erdöl enthalten sind.

Die zunehmende Motorisierung und der steigende Energiebedarf in den Industrie- wie Entwicklungsländern, insbesondere in China und Indien, kann nicht mehr durch eine Ausweitung der Erdölförderung gedeckt werden. Wie aus den Schätzungen der Weltreserven für Öl, Kohle und Gas hervorgeht, trifft die extensive Ausweitung der Erdölförderung auf natürliche Grenzen der Verfügbarkeit. Schätzungen der Weltreserven an Kohlenstoffträgern zeigen, dass wir, trotz z.T. sehr differierender Angaben, die größten Reserven bei der Kohle besitzen. (s. Tab.1)

	Reserven	Produktion (Jahre)	R/P (Jahre)
Kohle	486	2,2	218
Öl	143	3,5	41
Gas	132	2,0	63
Uran	33	0,6	

Zit.: BP Amoco Statistical Review of World Energy (1999) and WEC (1998)

Tab. 1: Weltenergiereserven in 10^9 t bezogen auf Öläquivalent

Erwähnung verdient aber besonders der Fakt, dass wir international dort den größten Verbrauch haben, wo wir die geringsten Reserven haben, und das ist das Erdöl. Die begrenzte Verfügbarkeit von Öl und die Abhängigkeit von Öl haben in den letzten Jahren zu einem enormen Preisanstieg für Erdöl und Erdölprodukten geführt, der durch solche Umweltkatastrophen wie den Wirbelsturm Katrina von den Ölkonzernen zu Extraprofiten genutzt wird. Der aktuelle Preisanstieg für Erdöl wird uns sicher langfristig erhalten bleiben, da bedeutende Erdölvorkommen in klimatisch komplizierten Gebieten liegen (z.B. Permafrostboden), das Erdöl aus größeren Tiefen gefördert und über weite Strecken zu den eigentlichen Nutzern transportiert werden muss, was das Erdöl objektiv verteuern wird.

Erschwert wird die Situation aber auch dadurch, dass die Ölreserven in sogenannten Risikoregionen liegen. 60% der erkundeten Vorkommen liegen in Nahost, der größte Teil davon im Irak und bedeutende Mengen auch im Iran. Die Außenpolitik der USA ist daher darauf gerichtet, den Energiebedarf der US-Wirtschaft mit allen, auch militärischen Mitteln zu sichern. Unter diesem Gesichtspunkt ist auch das hohe Engagement der USA in Afrika zu sehen, insbesondere in Westafrika, wo die USA 20–25% des Erdölimportes aus dieser Region erwarten. Auch China ist an der Ausbeutung der afrikanischen Ölreserven im Golf von Guinea, Tschad, Kamerun, Sao Thome und anderen Regionen interessiert. Probebohrungen der internationalen Ölkonzerne haben gezeigt, dass große Erdölreserven (etwa 4–10 Mrd. Barrel) in dieser Region lagern, sodass die USA diese Region als eine wichtige Einflusssphäre ihrer Außenpolitik betrachten. Die Sicherung der Ölreserven für die USA bestimmt daher zunehmend die Außenpolitik der USA in vielen Ländern der Welt, neben dem Nahen Osten aber auch z.B. in Lateinamerika, Kasachstan, Baku. Diese Politik wird begleitet vom Aufbau sogenannter Beraterteams für die Regierungen, aber auch von Militärbasen und anderen Aktivitäten in die-

sen Ländern. Öl ist heute mehr denn je zu einem strategischen Rohstoff geworden, der international das Konfliktpotential und die Gefahr von kriegerischen Auseinandersetzungen dramatisch erhöht.

Die dargestellte Rohstoffsituation und die gegenwärtige Verbrauchstruktur für fossile Kohlenstoffträger, insbesondere in Ländern wie der BRD, die von einem hohen Import an fossilen Kohlenstoffträgern abhängig sind, erfordern einen generellen Strukturwandel hinsichtlich des Einsatzes der verfügbaren fossilen Kohlenstoffquellen Erdöl, Gas, Kohle und nachwachsende Rohstoffe. Ausgehend von der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen fossilen Kohlenstoffträger ist das Erdöl durch seine vorgebildeten Kohlenwasserstoffstrukturen, das günstige Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis und seinen Aggregatzustand bevorzugt für die Herstellung von Chemieprodukten wie Olefinen, Aromaten, Zwischenprodukten, Plaste, Elaste, Fasern, Waschmitteln, Pharmazeutika und Kraftstoffen geeignet und besitzt daher bedeutende energetische, technische und ökonomische Vorteile gegenüber dem Einsatz von Kohle für die Erzeugung dieser Produkte.

Untersuchungen und Berechnungen in den 80-iger Jahren in der Akademie der Wissenschaften der DDR (s. S. Nowak, „Entwicklungstendenzen und Probleme der Carbochemie in der DDR“, publiziert im Journal „Arbeit Plenum und Klassen, Berlin 9(1984) 10. S.1–29)“, haben gezeigt, dass die Gewinnung von Flüssigprodukten aus Braunkohle hinsichtlich Rohstoffbedarf etwa 10–14 mal, der relative Investitionsaufwand 16 mal und der Produktionsaufwand etwa 6 mal so groß ist, wie die Erzeugung der gleichen Flüssigproduktmenge aus Erdöl. Auch Steinkohle besitzt im Vergleich mit Erdöl bedeutende Nachteile für die Gewinnung von Flüssigprodukten und Kraftstoffen. Die Gewinnung von Kraftstoffen durch Hydrierung der Kohle, eine Entwicklung, die in Deutschland vor dem Zweiten Weltkrieg intensiv betrieben wurde, ist erst dann gerechtfertigt, wenn die Gewinnung von Kraftstoffen und Chemieprodukten aus Erdöl voll ausgeschöpft ist und die zur Verfügung stehende Erdölmenge den Bedarf an diesen Produkten nicht mehr decken kann. Unter Beachtung des existierenden Effektivitätsgefälles für die Gewinnung von Kraftstoffen und Chemieprodukten aus Kohle, kann die Forderung nur darin bestehen, das defizitäre Erdöl für die Erzeugung chemischer Produkte und Kraftstoffe zu reservieren und eine effektivere Nutzung des Erdöls durchzusetzen, um die begrenzten Erdölvorräte solange wie möglich für die Chemie zu erhalten. Die Aufgabe besteht darin, insbesondere den gegenwärtigen chemischen Nutzungsgrad des Erdöls deutlich zu erhöhen, d.h. hochsiedende Erdölfraktionen die bisher als Heizöl verbrannt werden, in leichtsiedende

Kohlenwasserstofffraktionen umzusetzen, um so den steigenden Bedarf an Vergaser- und Dieselkraftstoffen und Chemieprodukten zu gewährleisten.

Das katalytische Spalten bzw. Hydrospaltprozesse sind heute die bedeutendsten Verfahren, um hochsiedende Erdölfraktionen und Erdölrückstände in leichtsiedende Kohlenwasserstofffraktionen, die wiederum Ausgangsprodukte für die Herstellung unterschiedlicher chemischer Produkte sind, zu wandeln. Eine vereinfachte Darstellung einer klassischen oder einfachen destillativen Erdölverarbeitung mit der vertieften Erdölverarbeitung zeigt die folgende Tabelle:

	einfache Erdölverarbeitung	vertiefte Erdölverarbeitung
Ausbeuten		
Benzinfraktionen	15–18%	30–40%
Dieselölfraktionen	35%	40%
Heizölfraktion	50%	20–25%

Tab. 2

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die katalytische Umsetzung des Erdöls zu einer grundsätzlich anderen Ausbeutestruktur führt, und damit den gegenwärtigen und künftigen Bedürfnissen der Stoffwirtschaft und der Motorisierung weitaus besser gerecht wird. Die gegenwärtigen Technologien und neu entwickelte Katalysatoren verleihen diesen Prozessen darüber hinaus eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Verarbeitung verschiedener Rohstoffe, wie der Erzeugung von Zielprodukten, die der spezifischen Fahrweise und Verarbeitungsstruktur von Raffinerien und den regionalen Bedürfnissen gut angepasst werden können.

Wesentliche Voraussetzung für die Realisierung einer vertieften Erdölverarbeitung, ist die Substitution der für die Energieerzeugung eingesetzten Heizölfraktionen und Erdölrückstände durch andere Energieträger wie Kohle, Gas, Biomaterial, organische Abfälle, eine Entwicklung, die auch in Zukunft ihre Bedeutung für die Energieerzeugung kurzfristig nicht verlieren wird. Aus umweltrechtlichen wie klimatologischen Gründen ist aber eine sinnvolle Substitution der konventionellen Energieträger auf Basis von Kohlenwasserstoffen, durch kohlenstofffreie alternative Energiequellen wie Solar- und Windenergie, Erdwärme, Wasserkraft oder Kernenergie erforderlich. Regenerative Energiequellen wie die Sonne, Wind, Wasser und die Kernenergie werden und müssen in Zukunft eine größere Rolle spielen und führen

objektiv nicht nur zu einer neuen Energiestruktur, sondern erfordern auch eine engere Verzahnung der Energieerzeugung mit der Energienutzung. Große Bedeutung hat diese Entwicklung vor allem im regionalen Bereich, wo die Energieerzeugung mit der unmittelbaren Nutzung der Energie ohne große Transportprobleme besondere Vorteile bietet (z.B. Biogasanlagen und die bereits genannten regenerativen Energiequellen).

Große Bedeutung für die Substitution von Erdöl als Energieträger haben neben den diskutierten Möglichkeiten daher auch Fragen der rationellen Energieanwendung in der Industrie und im Haushalt, die Entwicklung kraftstoffsparender Motoren, eine effektive Wärmedämmung und andere Maßnahmen.

Neben der Ausweitung der vertieften Erdölverarbeitung als einem Haupttrend zur Sicherung der steigenden Motorisierung mit Kraftstoffen und der Gewinnung von Chemieprodukten sind, ungeachtet des existierenden Effektivitätsgefälles für die Gewinnung dieser Produkte aus Kohle, neue wissenschaftlich-technische Grundlagen für die Erzeugung der genannten Produkte zu erarbeiten, da die Verfügbarkeit für Erdöl wesentlich schneller abnimmt als für Kohle, sodass rechtzeitig gesicherte technologische Lösungen vorliegen, wenn sie gebraucht werden. Eine seit vielen Jahren bekannte und attraktive Möglichkeit zur Herstellung von Chemieprodukten, die nicht auf Erdöl basieren, ist die Vergasung der Kohle und die Umsetzung von Erdgas/Methan zu Synthesegas (CO/H_2) und dessen nachfolgende Umsetzung zu chemischen Produkten und die Gewinnung von Wasserstoff für vielfältige Anwendungen.

Beispiele für großtechnische Synthesen auf Basis von Synthesegas sind Methanol, Wasserstoff. Ammoniak, Formaldehyd, Harnstoff und Amine. Auch die Fischer-Tropsch-Synthese, die während des Zweiten Weltkrieges eine wesentliche Basis für die Gewinnung von Kraftstoffen in Deutschland war, aber heute aus ökonomischen Gründen nur in wenigen ausgewählten Ländern wie z.B. in Südafrika noch betrieben wird, zeigt die potenzielle Möglichkeit der Herstellung von Chemieprodukten auf carbostämmiger Grundlage.

Vor allem Methanol, das weltweit zu den größten Produktionsvolumina zählt, ist Ausgangsprodukt und potenzieller Rohstoff für eine Vielzahl von chemischen Verbindungen. Ohne hier auf Details und die Besonderheiten der Umsetzung von Synthesegas und Methanol zu chemischen Produkten eingehen zu können, ist die Gewinnung von höheren Alkoholen, Essigsäure, Essigsäureanhydrid und auch von hochoktanigen Vergaserkraftstoffen und niederen Olefinen und aromatischen Kohlenwasserstoffen auf Kohlebasis möglich.

Während die Herstellung der genannten sauerstoffhaltigen Produkte zu den etablierten Verfahren gehört, scheitert die potenzielle Möglichkeit der Gewinnung von Kraftstoffen aus Methanol an der Ökonomie. Methanol, das ja eine hohe Oktanzahl besitzt, kann durch Zumischung zu Vergaserkraftstoffen Beiträge zur Sicherung des Kraftstoffbedarfs leisten. Am bekanntesten und gut untersucht, ist die sogenannte M-5 und M-15 Technologie, d.h. Mischkraftstoffe, die neben Benzinfraktionen 5 bzw. 15% Methanol enthalten. Diese Variante hat gegenüber der katalytischen Wandlung von Methanol in Vergaserkraftstoffe zweifelsohne energetische und ökonomische Vorteile. Während die Zumischung von 5% Methanol bei Vorhandensein aromatenreicher Vergaserkraftstoffe weitgehend als problemlos eingeschätzt wird, dafür aber nur geringe Mengen an Benzinfraktionen substituieren kann, erfordert die Einführung der M-15 Variante infolge von Korrosionen an Dichtungen und Schlauchverbindungen Veränderungen und Umrüstungen der gegenwärtigen Fahrzeugmotoren. Die Entwicklung geeigneter Materialien und ihr Einsatz in bestehenden und neuen Fahrzeugen sind daher eine Grundvoraussetzung für die Einführung von sogenannten Mischkraftstoffen. Analoges gilt auch in verstärktem Maße für den Einsatz von Reinmethanol als Kraftstoff, eine Variante, die während der bekannten Erdölkrise durch die Entwicklung von Methanolmotoren besonders in Japan intensiv betrieben wurde. Obwohl hier die im Zusammenhang mit der Einführung von Methanol-Vergaserkraftstoffen auftretenden Probleme nicht umfassend behandelt werden können, stellt Methanol eine weitere interessante Möglichkeit der Substitution von erdölstämmigen Rohstoffen für die Herstellung von Kraftstoffen dar.

Auch Äthanol, das aus Pflanzen mit einem hohen Zucker- und Kohlenhydratanteil hergestellt werden kann, eine Entwicklung, die vor allem in den 70-iger Jahren in Brasilien (Äthanolgewinnung aus Zuckerrohr) favorisiert, aber aus ökonomischen Gründen später eingestellt wurde, könnte unter den gegenwärtig veränderten Rohstoffbedingungen wieder attraktiv werden.

Auch die Herstellung von Biodiesel aus Raps und Sonnenblumen ist gegenwärtig hochaktuell und gewinnt zunehmend an Bedeutung. So will z.B. eine Brandenburger Firma, die EOP Biodiesel AG, eine zweite Biodieselanlage in Betrieb nehmen und jährlich 65000 t produzieren. Damit wird der Anteil an Biodiesel, der zurzeit mit etwa 800000 Tonnen etwa 1,5% des Kraftstoffbedarfs in Deutschland deckt, schrittweise weiter erhöht.

Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen für die Erzeugung von Energie und die Stoffwirtschaft wird, da diese Entwicklung durch die Politik auch stark gefördert wird, weiter zunehmen, obwohl einer spürbaren Ausweitung

der Produktion durch die vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzflächen natürliche Grenzen gesetzt sind. Ungeachtet dessen, kann diese Entwicklung z.B. in tropischen Ländern einen spürbaren Beitrag zur Rohstoffversorgung leisten. Die euphorische Reaktion einiger Politiker für eine forcierte Entwicklung der Gewinnung von Kraftstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten sollte jedoch nicht über die Tatsache hinwegtäuschen, dass hochwertige landwirtschaftliche Produkte verbrannt und große Landflächen für ihre Herstellung dafür gebunden werden, wo andererseits große Teile der Weltbevölkerung durch Nahrungsmangel und Armut bedroht sind.

Ausgehend von der gegenwärtigen und künftigen Situation der Versorgung der Industrie und Gesellschaft mit Rohstoffen für die Energieerzeugung und Stoffwirtschaft, sind Strukturveränderungen in allen Bereichen der Produktion und Konsumtion unvermeidlich. Aus dem Dargelegten ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Optimierung und effizienterer Einsatz der vorhandenen Kohlenstoffträger für die Energie und Stoffwirtschaft, d.h. vor allem das begrenzt zur Verfügung stehende, defizitäre Erdöl aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung und Eigenschaften für die Stoffwirtschaft langfristig zu erhalten und dessen stofflichen Nutzungsgrad wesentlich zu erhöhen. Voraussetzung dafür ist die Weiterführung der vertieften Erdölverarbeitung in Richtung einer maximalen Erzeugung von Kraftstoffen und Chemieprodukten aus hochsiedenden Erdölfraktionen- und -rückständen und die Substitution dieser bisher für die Energieerzeugung eingesetzten Fraktionen durch andere Quellen.
- Die großen Vorräte an Gas und Kohlen sprechen dafür, dass beide Rohstoffe in Zukunft einen größeren Beitrag für die Gewinnung von Primärenergie und Chemieprodukten leisten müssen. Aussichtsreiche Entwicklungen sind die Vergasung der Kohle und die Umsetzung von Erdgas zu Synthesegas und Methanol und deren nachfolgende Wandlung in Chemieprodukte.
- Der unmittelbare Einsatz des auf carbochemischer Grundlage erzeugten Methanols kann durch unmittelbare Zumischungen zum klassischen Kraftstoff oder als reiner Methanolkraftstoff die Erdölbilanz deutlich entlasten.
- Wesentliche Beiträge zur Einsparung an Erdöl und Erdölprodukten werden durch die Entwicklung kraftstoffsparender Autos und neue Motorkonstruktionen (Hybridtechnologie) und energiesparende Technologien wie Wärme-Kraftkopplung, Wärmedämmung u.a. erwartet.

- die Substitution von fossilen Kohlenstoffträgern durch erneuerbare Energieträger in den Bereichen, die schon gegenwärtig zu einer ökonomischen, wenn auch noch nicht großflächigen Freisetzung von klassischen Rohstoffen geführt haben, die aber aus Gründen des Schutzes unserer Umwelt schon heute eine verstärkte Entwicklung erfahren sollten, muss bedeutend erweitert werden.
- Verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe wie z.B. Holz, Gülle u.a. Produkte, die insbesondere für die regionale bzw. lokale Gewinnung von Energie von Bedeutung ist,
- Gewinnung von Energie und Ausgangsprodukten für die Stoffwirtschaft durch die Wiederverwendung der in großen Tonnagen anfallenden Plast-, Elast- und Papierabfälle

Weitere potenzielle Rohstoffe, die immer wieder einmal im Interesse einer langfristigen Rohstoffsicherung stehen, für die aber eine gegenwärtige ökonomische Ausbeutung und Nutzung nicht gegeben ist, sind Gashydrate, die in großen Mengen in den Ozeanen lagern, sowie Schieferöle und Ölsande.

Die dargestellte Situation auf dem Rohstoff- und Energiesektor erfordert für die langfristige Sicherung des Energie- und Rohstoffbedarfs nicht nur neue Technologien und Konzepte, sondern auch eine neue Herangehensweise, die vor allem dem bisherigen Trend, den Bedarf an Gütern und den steigenden Wohlstand weitgehend durch eine extensive Nutzung der endlichen Ressourcen zu decken, entgegenwirkt. Ich bin überzeugt, dass die Weltgemeinschaft in der Lage ist, durch den wissenschaftlich-technischen Fortschritt und die politische Einsicht von Entscheidungsträgern die Bedürfnisentwicklung mit der Rohstoffproblematik in Einklang zu bringen.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 151–160*

Lothar Kolditz

Zur Komplexität der Thematik Versorgung mit Energie und Rohstoffen

Die Ressourcenfrage, mit der sich die Leibniz-Sozietät innerhalb der Projektaufgabe *Erkenntnisgewinn durch Interdisziplinarität* beschäftigt, hat viele Detailgebiete, wie dies in unterschiedlichen Beiträgen zum Ausdruck kommt. Es handelt sich um eine Thematik, die alle gegenwärtigen und zukünftigen Lebensprozesse der Erde umfasst und darüber hinaus von erdgeschichtlicher Dimension ist. Zu Vergleichen muss auch die Entwicklung in der Vergangenheit mit herangezogen werden. Die Thematik eignet sich als Projekt mit Langzeitaufgabe für eine Akademie wie die Leibniz-Sozietät.

Die uns interessierenden Ressourcen haben mit ihrer Bildung eine lange, vielstufige Evolution durchlaufen. Bei der Verdichtung von Materie im Entstehungsprozess unseres Planeten setzten verstärkt chemische Reaktionen zwischen den durch Supernova-Explosionen verstreuten Elementen und daraus entwickelten Verbindungen ein, deren Reaktionsrichtung immanent in den Eigenschaften der Elemente begründet ist und durch die Thermodynamik beschrieben wird [1].

Vor allem Sauerstoff wurde in den Reaktionen umgesetzt, weil er mit fast allen Elementen Verbindungen bildet. Mit der Entstehung der festen Erdkruste setzte eine gehäufte Abscheidung verwandter Verbindungsgruppen ein, die Atmosphäre formierte sich mit anderer Zusammensetzung als heute. Sauerstoffmoleküle waren nur wenig vorhanden, der Sauerstoff war gebunden in Silikaten und anderen Oxoverbindungen der festen Erdkruste und in der Atmosphäre als Wasser und Kohlendioxid.

Die chemische Evolution der Verbindungen kam damit nicht zum Stillstand, sondern verlief weiter im flüssigen Magma, in der Reaktion zwischen Magma und festem Gestein, in Festkörperreaktionen innerhalb der Gesteine, in Verwitterungsreaktionen an der Oberfläche mit der Atmosphäre, mit der entstehenden Hydrosphäre und in Umsetzungen der atmosphärischen Verbindungen.

Die Evolution der kohlenstoffhaltigen Verbindungen mit Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff unter Einbeziehung von Phosphor, Schwefel, Eisen, Calcium, Natrium, Kalium, Magnesium und geringen Mengen an weiteren Metallen lieferte die Grundlage zur Entstehung des Lebens auf der Erde [2]. Die atmosphärische Zusammensetzung veränderte sich, Kohlendioxid nahm ab, molekularer Sauerstoff wurde durch biologische Prozesse freigesetzt.

Aus der Geochemie kennen wir die statistische Häufigkeit der Elemente im Erdmantel mit Sauerstoff an der Spitze, gefolgt von Silicium, Eisen usw., die aber im Zusammenhang mit unserem Thema nicht relevant ist, weil sie kein Kennzeichen für die Verfügbarkeit der Rohstoffe darstellt. Interessant für uns sind die durch geochemische Evolutionsprozesse entstandenen Anreichungen in Lagerstätten, die wir nutzen.

Der Rohstoffbedarf

Mit Ressourcen werden die Rohstoffvorräte ohne Bezugnahme auf den jeweiligen Erkundungsstand bezeichnet. Der Bedarf an Rohstoffen wächst mit der Weltbevölkerung und mit ihren Ansprüchen, wobei der Begriff Rohstoff in erweitertem Sinne aufzufassen ist und auch Nahrung und Bekleidung einschließt. Der Weltbevölkerungsbericht der UNO 2004 gibt für 2002 einen Weltbevölkerungsstand von 6,2 Milliarden an und prognostiziert für 2025 7,8 Milliarden, für 2050 8,9 Milliarden [3]. Von diesen Bevölkerungszahlen ist nur die erste zuverlässig, alle anderen enthalten eine unbekannte Fehlerbreite. Voraussagen sind immer fehlerbehaftet, was in wissenschaftlichen Untersuchungen als Selbstverständlichkeit gilt, vielfach aber bei Prognosen ignoriert wird. Der Wert einer Prognose lässt sich aus der Sorgfalt ableiten, mit der Fehlerabschätzungen der Aussagen vorgenommen werden. Charakteristisch für die prognostizierten Zahlen der Weltbevölkerung ist, dass eine exakte Fehlereingrenzung in ein Intervall nicht möglich ist. Allenfalls könnten Wahrscheinlichkeiten für Schwankungsbreiten angegeben werden. Da es sich bei den Bevölkerungszahlen um einen Basiswert für den Rohstoffbedarf handelt, bleibt als Methode der Ergebnissicherung nur die Aktualisierung der Prognose in regelmäßigen Zeitabständen.

Der Rohstoffbedarf ist außerdem nicht proportional der Weltbevölkerung, sondern hängt auch von ihren jeweiligen Ansprüchen ab, der als ansteigend zu bewerten ist. Die Ansprüche sind rohstoffabhängig. In der Betrachtung von 1994 [4] zeigte sich für die zurückliegenden Jahre ein exponentieller Bedarfsanstieg mit der Weltbevölkerung an Hand der Erdölförderung[1], der Erd-

1 Allerdings stagnierte die Erdölförderung zwischen 1980 und 1990.

gasförderung[2], der Erzeugung von Elektroenergie, der Produktion an Papier und Zement, der Produktion an LKW und PKW. Die Eisenerzförderung stieg von 1950 bis 1970 exponentiell an, um dann bis 1990 zu stagnieren. Gerade für diesen Wert ist heute eine drastische Änderung wegen des Stahlbedarfs vor allem in China zu erwarten. Die Produktion von Naturkautschuk, von Wolle und Baumwolle, von Eiern und Milch entwickelte sich im betrachteten Zeitraum nach den Angaben der Statistischen Jahrbücher konform mit der Weltbevölkerung, auch vom Bestand an Rindern und Schafen ist dies für den Zeitraum 1950 bis 1990 zu vermelden, exponentiell angestiegen ist dagegen der Bestand an Schweinen und der Fischfang. Die Produktion von Phosphat-, Kali- und Stickstoffdüngemitteln hat sich deutlich exponentiell erhöht, während die Welternteerträge an Weizen, Zucker, Mais und Reis nur einen geringen exponentiellen Zuwachs verzeichnen. Diese Tendenzen können aber nicht in jedem Fall fortgeschrieben werden, wie dies bereits in bezug auf die Eisenerzproduktion angedeutet wurde, sondern sind in Abständen erneut zu überprüfen und zu bewerten, wobei das überproportionale Wirtschaftswachstum des asiatischen Raumes zu beachten ist, das sich schon 1994 bemerkbar machte [4].

Die Rohstoffverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen ist zweckmäßig in verschiedene Aspekte zu unterteilen, in die geologische, die technologische, die ökonomische, die ökologische und die politische Verfügbarkeit, die eine mehr oder weniger gegenseitige Wechselwirkung aufweisen.

Geologische Verfügbarkeit

Die geologische Verfügbarkeit ergibt sich aus den allgemeinen geologischen Erkundungen, die in mehr oder weniger detaillierten Kartierungen über geologische Strukturen und Formatierungen niedergelegt sind, aus deren Kenntnis Erwartungen für das Auffinden bestimmter Rohstoffe in Lagerstätten abgeleitet werden können. Wesentlich für die Vorratswirtschaft ist die Erkundung der Ergiebigkeit von Lagerstätten. Die bereits 1902 in London empfohlene Unterteilung nach sicheren, wahrscheinlichen und möglichen Lagerstätten wurde im Laufe der Jahre wesentlich verfeinert und führte zu zahlreichen Untergruppen.

2 Die Steinkohleförderung blieb im proportionalen Bereich, die Braunkohleförderung zeigte eine schwache exponentielle Erhöhung.

Die Vorhaltedauer von Vorräten gibt den Zeitraum in Jahren an, für den der jetzt bekannte und verarbeitbare Vorrat bei einer angenommenen Verbrauchsentwicklung ausreicht. Diese Werte sind von mehreren Faktoren beeinflusst und können streng genommen nur als gegenwärtige Momentaufnahme betrachtet werden. Ihre Fehlerbreite ist bei Vorliegen nur einer Prognose in der Regel unbestimmt, bei Vorliegen mehrerer Prognosen ist sie mindestens so groß wie die Streubreite der Prognosen.

Geologische Erkundungen sind kostenintensiv, ihr Einsatz wird also stark vom Interesse am jeweiligen Rohstoff bestimmt werden.

Das auf den Mitteleinsatz normierte Ergebnis ist außerdem vom Charakter der Lagerstätte abhängig. So sind Salzlagerstätten wegen ihrer großen Ausdehnung und ihrer gut messbaren Dichtestruktur in ihrer Ergiebigkeit leicht extrapolierbar. Es ist daher nicht verwunderlich, dass in diesem Falle eine Vorhaltedauer, die auch als statistische Lebensdauer bezeichnet wird, von mehr als 300 Jahren angegeben wird. Eine ähnlich hohe Vorhaltedauer (300 Jahre) ist für Chromitlagerstätten und für das Vorkommen der Platingruppenmetalle bekannt, weil auch in diesen Fällen leicht einschätzbare große Lagerstätten entstanden sind, die sich durch Eintritt von flüssigheißem Magma in höhere Erdmantelschichten gebildet haben. Beim Erkalten der so entstandenen großräumigen flüssigen Blase traten sehr günstige Separationserscheinungen ein.

Auf der anderen Seite gilt für Zink, Blei, Silber, Gold nur eine Vorhaltedauer von etwa 20 Jahren, weil die entsprechenden Lagerstätten sehr verstreut und nicht in großen Ausdehnungen bekannt sind, was die Erkundungskosten stark ansteigen lässt [5].

Diese kurzen Vorhaltedauern liefern aber keinen Anlass zu Befürchtungen der drohenden Materialknappheit. Die relativ teuren Erkundungsvorhaben werden mit vertretbarem Vorlauf angesetzt, so dass in diesen Fällen das Vorgehen der Devise *just in time* entspricht.

Eine Abschätzung des Fehlerintervalls der jeweiligen Ermittlungen ist weder für die langfristigen noch für die erwähnten kurzen Vorhaltedauern sinnvoll. Für Erdöl liegen die Interessen verständlicherweise ganz anders. Für diesen Rohstoff gibt es sehr intensive Erkundungsarbeiten. Das Ergebnis lässt sich am besten an Hand der Hubbertkurve für Mineralöl darstellen [6]. In der Kurve sind von 1950 bis etwa 2000 die Weltfördermengen dargestellt, für die Zukunft werden vier verschiedene Prognosen gegeben (Hiller 1999, Odell 2000, Edwards 2001, Campbell 2002). Sie nehmen den Höhepunkt der Förderung um 2020 an und legen das Ende des Ölzeitalters in einen Zeitraum zwi-

schen 2050 und 2100. Das Wiedereinstellen auf die heutige Fördermenge nach den verschieden liegenden Maxima wird zwischen 2020 und 2060 vorausgesagt. Es gibt aber auch von diesen Werten völlig abweichende Prognosen, obwohl bei der hohen Erkundungsintensität und der weltweiten Untersuchung des für Erdöl geologisch erwarteten Tiefenbereiches zwischen 1500 und 3500 Metern [7] angenommen werden kann, dass kaum eine Prognose für einen anderen Rohstoff über derart gesicherte Basiswerte verfügt. Die Entwicklung ist ungewiss, weil bei Verknappung zum Beispiel die politische Verfügbarkeit von empfindlichem Einfluss sein könnte.

Schließlich ist für den veröffentlichten Stand der geologischen Erkundungen als Unsicherheit die Geheimhaltung von Ergebnissen in Betracht zu ziehen, die für strategische Rohstoffe zutreffen, wobei die Einteilung in strategische Rohstoffe durchaus schwanken wird. In dieser Hinsicht können auch gezielte Fehlinformationen vorkommen, die den Interessen industrieller Komplexe dienen oder militärischen Interessen entsprechen.

Bei der Suche nach Ersatz von Rohstoffen wird immer der Stand der Technik eine Rolle spielen. Die Eigenschaften eines Rohstoffproduktes, die im Grunde genommen interessiert, können oft auch durch andere Substanzen realisiert werden, so für die Zukunft etwa im Austausch von Erdöl gegen Wasserstoff in der Energieerzeugung oder in der Gegenwart in der Informationsübermittlung sowohl durch Kupfer- als auch durch Glasfaserkabel. Jeder Ersatz wirft gewöhnlich aber Folgeprobleme auf.

Beim Austausch von Erdöl gegen Wasserstoff in der Energieerzeugung gibt es in neuerer Zeit sehr optimistische Prognosen von den USA, die heute für die Entspannung in der CO_2-Produktion keine Mitwirkungsmöglichkeit sehen und die Substitution von Erdöl gegen Wasserstoff als die zukünftige Lösung der Problematik ansehen, wobei keinerlei Schwierigkeiten in den dafür entwickelten Szenarien für die Erzeugung und Verwendung des Wasserstoffs gesehen werden. Auf der anderen Seite gibt es aber warnende Stimmen, die nicht zu vermeidende Verluste von Wasserstoff anführen und dadurch beim Übergang in die Atmosphäre eine Veränderung der Atmosphärenchemie besonders in der Stratosphäre befürchten. Eine wissenschaftlich einigermaßen gesicherte Lagebeurteilung ist nicht vorhanden. Die Beeinflussung der Einschätzungen durch Interessengruppen wird schon am Anfang der Diskussion deutlich.

Der Ersatz von Diesel durch Biodiesel erfordert verstärkten Rapsanbau. Rapsfelder entwickeln aber, wie neuerdings festgestellt wurde, erhebliche Mengen an Methylbromid. Beim jetzigen Rapsanbau werden schon etwa

15% der anthropogenen Emission erreicht. Kohl, Brokkolie und weiße Rüben, die wie Raps zur Brassicaceae-Familie gehören, stellen ebenfalls Methylbromid her. Methylbromid wirkt stark Ozon zerstörend und sollte in den Industrieländern laut Montreal-Protokoll von 1987 zum Schutze der Ozonschicht Anfang 2005 mit einem generellen Verwendungsverbot belegt werden [8]. Dies zeigt eindringlich, wie notwendig eine durchgehend seriöse wissenschaftliche Betrachtung aller Seiten bei Änderungen und Substitutionsprozessen größeren Ausmaßes erforderlich ist.

Die Verwendung von Kupfer- bzw. Glasfaserkabel für die Informationsübertragung hat zu der Situation geführt, dass die heutige schnelle DSL-Technik aus ökonomischen Gründen der alten Technologie, der Verwendung von Kupferkabel angepasst wurde. Die Kupferverkabelung ist vor allem bei den Endleitungen zum Verbraucher häufiger vorhanden als die Glasfaserausrüstung.

Im Zusammenhang mit der Rohstoffgewinnung sollten auch die zunehmend ins Gewicht fallenden Bemühungen zur Wiederverwendung gebrauchter Rohstoffprodukte gesehen werden. Der Anteil an Sekundärmaterial im Gesamtverbrauch der Bundesrepublik Deutschland wird für das Ende des 20. Jahrhunderts für Blei und Platin zu mehr als 50%, für Aluminium, Kupfer, Stahl, Wolfram, Gold, Silber, Palladium zu 30 bis 50% angegeben [9].

Technologische und ökonomische Verfügbarkeit

Die technologische Verfügbarkeit berücksichtigt den Stand der Technik zur Gewinnung und Verarbeitung der betreffenden Rohstoffe. Mit der Entwicklung des Standes der Technik verschiebt sich gewöhnlich auch die aus der geologischen Erkundung abgeleitete Abbauwürdigkeit einer Lagerstätte. Bisher nicht in die Bilanz einbezogene Vorkommen werden berücksichtigt, die Vorhaltedauer ändert sich. Im Falle eines auch als Energiequelle verwendeten Rohstoffes wie Erdöl oder Erdgas spielt dabei ebenso die zur Gewinnung aufzuwendende Energie im Vergleich zu der aus dem Produkt erzeugten Energie eine Rolle, was zum Beispiel für den kanadischen Ölschiefer oder die Methanhydrate in der Tiefsee gilt. Gesteuert wird das Ganze allgemein durch ökonomische Betrachtungen, die für alle Rohstoffe gelten und wiederum vom Stand der jeweils gegenwärtigen Technologie abhängen. Die Kosten der geologischen Erkundung müssen in der Berechnung ebenfalls Berücksichtigung finden. Eine Preisveränderung kann im Grenzfall ohne Änderung des Technologiestandes die Abbauwürdigkeit bedingen oder in Frage stellen.

Manganknollen in der Tiefsee enthalten große bisher nur unvollkommen abschätzbare Mengen an Mangan, Kupfer, Nickel, Kobalt und anderen Me-

tallen, die aber gegenwärtig aus ökonomischen Gründen noch nicht für Gewinnung interessant sind, obwohl verschiedene Vorschläge dazu bereits existieren. Die heißen Quellen in der Tiefsee, auf die in diesem Zusammenhang auch hinzuweisen ist, interessieren nicht nur wegen der Archaebakterien, sondern auch in bezug auf Gehalte an Titan und Molybdän.

Diese Vorkommen verursachen aber sofort den Reibungspunkt der Schürfrechte, dem durch die UN-Seerechtskonvention, die 1994 in Kraft getreten ist, entgegen gewirkt werden soll. Sie erklärt diese Vorkommen zum gemeinschaftlichen Menschenerbe und bindet die Schürfrechte an ein Genehmigungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfung. Ob die Konvention aber in Zeiten sich abzeichnender Verknappung in der Zukunft immer eingehalten wird, darf zumindest nach den bisherigen Erfahrungen bezweifelt werden. Afghanistan und Irak sind dafür wohl gegenwärtig wirksame Beispiele.

Ökologische Verfügbarkeit

Eine neue Abbauart wie die Gewinnung der Manganknollen wird in bezug auf Umweltverträglichkeit besonders aufmerksam betrachtet. Dafür gibt es sehr alte Beispiele. *Agricola* widerlegt in seinem Werk *De Re Metallica Libri XII* [10] im ersten Buch die Ansicht derer, die den Bergbau als von Gott ungewollt und schädlich für die Menschen ansehen. Er weist auf den Nutzen hin, der den Menschen durch den Bergbau entsteht und auf seine kulturelle Bedeutung.

Eine Gewinnung der Manganknollen würde die Lebensgemeinschaften in den betroffenen Tiefseeflächen stören. Untersuchungen werden bereits durchgeführt, in welchem Maße das geschieht, ob und wie schnell bei eingestellten Störungen die alten Lebensgemeinschaften wieder aufgebaut werden [11]. Wie beim Fischfang müssen sinnvolle Kompromisse geschlossen und eingehalten werden. Dies wird realisierbar sein, so lange keine Verknappung eintritt.

Die Umweltverträglichkeit hängt mit der ökologischen Verfügbarkeit der Rohstoffe zusammen. Dies ist ein Punkt, der besonders schwer in wissenschaftlich objektiver Form fassbar ist, weil sich die bei den Individuen vorhandenen Emotionen verstärken und durch die Medien in besonders effektiver Form massenwirksam gemacht werden. Horrorszenarien sind sehr effektvoll und natürlich geeignet, den rationalen Überblick zu trüben.

Eine kritische Betrachtung der Ermittlungsergebnisse ist gerade auf diesem Gebiet besonders wichtig. Es muss darauf hingewiesen werden, dass vermeintlich exakt anmutende, mit dem Computer erstellte Prognosen in

empfindlicher Weise von den notwendig angenommenen Randbedingungen abhängen und keinesfalls absolut sicher sind.

Ein Beispiel für die Trübung der rationalen Einschätzung ist die Diskussion der Energiefrage. Natürlich muss die Beachtung der erneuerbaren Energien im Vordergrund stehen, aber nicht unter Ausschluss aller anderen Möglichkeiten. Bei der Bewertung von Einschätzungen oder Gutachten ist zu berücksichtigen, dass gezielte Verfälschungen oder über Medien gesteuerte Beeinflussung durch Interessenverbände möglich sind. Nicht immer ist ohne weiteres feststellbar, wer im Hintergrund wirkt.

Selbst bei einer Stagnation der Weltbevölkerung muss bereits eine Zunahme des Energiebedarfs angenommen werden, da für viele Länder gegenüber den fortgeschrittenen Industrienationen ein Nachholbedarf besteht. Dass sich die Industrieländer zu einer wesentlichen Reduzierung ihrer Ansprüche bereit finden, kann als Utopie gelten. Neben der anwachsenden Weltbevölkerung, die den Energiebedarf weiterhin ansteigen lässt, wird der erhöhte Rohstoffbedarf den Abbau weniger vorteilhafter Lagerstätten erfordern, wodurch auf jeden Fall ein ansteigender spezifischer Energiebedarf in Rechnung zu stellen ist. Unter dieser sich ständig weiter anspannenden Energiesituation die Kernspaltung als Überbrückung und schließlich die Kernfusion gänzlich außer Acht zu lassen, muss für wissenschaftlich abwegig eingestuft werden, zumal es sich dabei um Energieformen handelt, die das Geschehen im gesamten Universum in Gang halten.

Bei der Betrachtung ist damit der Teil des Rohstoff- und Energieproblems erreicht, der am stärksten kontrovers diskutiert wird und dessen objektive Beurteilung am meisten gefährdet ist.

Politische Verfügbarkeit

Die Versorgung der Menschheit mit Rohstoffen und Energie abzuschätzen wird zudem noch durch die bereits oben angesprochene politische Verfügbarkeit erschwert. Eine sichere Prognose ist nicht möglich. Die Auffassung kann ein breites Gebiet zwischen Optimismus und Pessimismus überstreichen. Kleine Ursachen können sich exponentiell verstärken und wie in der Chaos-theorie schließlich zu erheblichen Auswirkungen führen. Vorhersagbarkeit für einen nahen Zeitraum ist noch zu vertreten, für längere Zeiträume im Voraus jedoch mit großer Unsicherheit versehen. Deshalb kann sich eine Analyse nur auf den momentanen Kenntnisstand beziehen und bedarf einer Erneuerung in angemessenen Abständen.

Schlussfolgerung

Das zu überstreichende Gebiet ist so groß, dass von vornherein eine Beschränkung angebracht ist, um das Arbeitspotential nicht zu hoch ansteigen zu lassen. Aus den wichtigsten Rohstoffkategorien

- Wasser
- Steine und Erden
- Baustoffe
- Industriemineralien
- Salze und Düngemittel
- Schwermetalle
- Leichtmetalle
- elektronische Werkstoffe
- Edelmetalle und Edelsteine
- Energie- und Syntheserohstoffe

wurde zunächst die letzte Kategorie ausgesucht und diese auch nur in einem Teilaspekt betrachtet. Eine Erweiterung im Rahmen eines fortzuführenden Projektes muss sorgfältig auf Durchführbarkeit überprüft werden. In geeigneten Zeitabständen müssen Wiederholungen der Analysen vorgesehen werden. Die Zusammenstellung der wichtigen Rohstoffe wird sich dabei natürlich ändern. Der Einfluss eines Klimawandels auf die Rohstoffsituation ist in die Betrachtung einzubeziehen. So könnte eine wissenschaftliche Analyse der Problematik ermöglicht werden, die die Grenzen der Einschätzung berücksichtigt, keine utopische Wunschvorstellung beinhaltet, sondern eine für die jeweils nähere Zukunft überschaubare Entwicklung darstellt.

Quellenangaben

[1] L. Kolditz, Evolution der chemischen Verbindungen. http://www.leibniz-sozietaet.de/autoren/kolditz_l.htm
[2] L. Kolditz, Entwicklung von Toleranz. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 65 [2004] S.19–26. ISSN 0947-5850, ISBN 3-89626-491-5.
[3] http://www.weltbevoelkerung.de
[4] L. Kolditz, Rohstoffe und Energie. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Heft 1/2 [1994] S.105–115. ISBN 3-930640-39-2.
[5] F.-W. Wellmer und M. Dalheimer, Rohstoffe und Energie – Auswirkung der Globalisierung auf die Versorgungssicherung Deutschlands. Erzmetall 53 , 6 [2000] S.384–397.
[6] Rohstoffe aus der festen Erdkruste in der Zukunft: Deutschland und die Welt. www.adwmainz/geosymposium/Kosimowski u.Wellmer.doc

[7] Dr. Johannes Peter Gerling, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Erdölreserven und ihre Verfügbarkeit. www.espritsg.ch/sbr/archiv/2004d_schwarzesgold_gerling.pdf
[8] Gordon W. Gribble, Umweltgifte vom Gabentisch der Natur, Spektrum der Wissenschaft, Juni 2005, S. 38/45. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg.
[9] F.-W. Wellmer u. J.D. Becker-Platen (Hrsgb.) Mit der Erde leben. Springer Verlag Heidelberg 1999, 273 S. ISBN 3-540-64947-6.
[10] Georgius Agricola, De Re Metallica Libri XII, Basel 1556, deutsche Ausgabe Basel 1557.
[11] Hjalmar Thiel, Ahmed Ahnert, Hartmut Bluhm, Christian Borowski und Kay Vopel, Reaktionen benthischer Tiefsee-Lebensgemeinschaften auf mechanische Störungen der Sedimente. www.awi-bremerhaven.de/AWI/Presse/Docs28-31.pdf

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *82(2005), 161–210*

Günter Flach, Heinz Kautzleben und Klaus Steinitz

Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen. Zwischenbericht Teil II zur Tätigkeit des ad-hoc-Arbeitskreises Energieversorgung der Leibniz-Sozietät

Wie bereits im ersten Teil des Zwischenberichtes angekündigt wurde, wird im vorliegenden zweiten Teil der Versuch unternommen, die Problemstellungen der Projektaufgabe und erste Aussagen aus den Diskussionen im Arbeitskreis zu beschreiben. Im Anhang 1 werden einige Eckdaten zu den volkswirtschaftlichen Dimensionen der Energie-Problematik beigefügt, die im Arbeitskreis vorrangig behandelt werden. Der Anhang 2 enthält eine umfangreiche Literatursammlung, die gemeinsam mit den in allen Bänden der „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ abgedruckten Beiträgen und den dortigen Literaturangaben die Kenntnisbasis für die Diskussionen im Arbeitskreis und für dessen weitere Tätigkeit veranschaulicht. Die Sammlung ist angesichts der komplexen Problematik nur grob geordnet nach den drei Aspekten: technologische Fragen, zeitliche Entwicklung (d.h. Nachhaltigkeitsstrategie) und räumliche Probleme (d. h. Geopolitik).

Es gibt mehrere Anlässe, daß sich die Mitglieder der Leibniz-Sozietät erneut mit dem Thema „Sichere Energieversorgung“ beschäftigen:

1. Seit einiger Zeit steigen die Verkaufspreise für Energie, insbesondere für Erdöl, Erdgas und deren Folgeprodukte, deutlich an. Die Energieunternehmen und die sie unterstützenden Kreise der Wissenschaft begründen dies einerseits mit der weltweiten akuten und tendenziellen Verknappung der Energierohstoffe und zum anderen mit der ebenfalls akut und tendenziell weltweit stark wachsenden Nachfrage nach ihnen.
2. Es gibt Anzeichen dafür, daß sich das globale Klima auf der Erde verändert. Viele Wissenschaftler vermuten auf Grund von Modellrechnungen, daß dazu merklich der beobachtete Anstieg von CO_2 in der Atmosphäre beiträgt und daß dieser Anstieg mit dem ständig steigenden Energieverbrauch, vor allem an fossilen Energien, verbunden ist. Die Medien haben großen Anteil daran, daß diese Deutung in der Öffentlichkeit weit bekannt ist.

3. In Deutschland, aber nicht nur in Deutschland, werden von staatlichen Stellen große Anstrengungen, einschließlich umfangreicher finanzieller Fördermaßnahmen, unternommen, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung beträchtlich zu vergrößern. Als Begründung wird angegeben, daß der Ausstoß von CO_2 durch die Energiewirtschaft nur durch eine Kombination von höherer Energieeffizienz und Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien nachhaltig verringert werden könne.
4. Es gibt in vielen Ländern und zwischen ihnen heftige Auseinandersetzungen um die zivile Nutzung der Kernenergie, allerdings mit extrem unterschiedlichen Schlußfolgerungen: In einigen Ländern wurde ein Ausstieg – der sog. Atomausstieg – festgelegt. Andere Länder halten an der zivilen Nutzung der Kernenergie fest, bauen sie sogar aus. Als Begründung für den Ausstieg werden die mit der Kernenergie-Nutzung verbundenen Risiken angeführt, als Begründung für den Ausbau, daß der wachsende Energiebedarf nur bei Nutzung der Kernenergie ausreichend gedeckt werden könne.
5. Unübersehbar häufen sich die internationalen Konflikte, auch solche, die mit militärischen Mitteln ausgetragen werden, um die Regionen, in denen große Erdöl- und Erdgas-Ressourcen bekannt sind, aber auch um die Regionen, durch die die Transportwege der Energie von den Förderländern zu den Verbraucherländern führen bzw. führen sollen.
6. In mehreren Ländern müssen große Anstrengungen unternommen werden, um aktuelle Engpässe in der nationalen Energieversorgung zu überwinden und zugleich um den absehbar wachsenden innerstaatlichen Energiebedarf mit Hilfe neuer leistungsfähiger Technologien ökonomisch rentabel und umweltverträglich jederzeit abdecken zu können.
7. Die Überwindung der extremen Ungleichheit bei der Nutzung der begrenzten natürlichen Energieressourcen zwischen den Industrie- und den Entwicklungsländern und die spürbare Erhöhung des Anteils einiger Entwicklungsländer am Primärenergieverbrauch gewinnen zunehmende Bedeutung für die Verringerung der „Nord-Süd-Kluft“ und für die Erfüllung der Milleniumsziele der UN zur Bekämpfung von Armut und Hunger.
8. Es vergeht kein Tag, an dem nicht in den Medien über relevante Fragen seriös oder auch weniger seriös berichtet wird. Vielfach werden dabei Argumente angeführt, die aus wissenschaftlichen Studien stammen sollen. Unverkennbar ist bei vielen Diskussionen die politische Zielstellung.

Es kann nicht die Aufgabe der Leibniz-Sozietät sein, in dieser heftig und vielfach konträr geführten Diskussion einen Lösungsvorschlag zu unterbreiten oder eine Stellungnahme abzugeben. Als Wissenschaftsakademie kann

die Sozietät dazu beitragen, die Problematik transparenter zu machen und diejenigen Fakten herauszuarbeiten, die beim gegenwärtigen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse objektiv beweisbar sind. Dabei müssen sowohl die naturwissenschaftlich-technischen Aspekte behandelt werden wie auch die wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen. Getreu der bewährten wissenschaftlichen Praxis hat der Arbeitskreis es als erstes unternommen, die Energieproblematik klar zu definieren, festzustellen, was bekannt ist und als gesicherte Erkenntnis gilt.

Energie ist in erster Linie eine physikalische Größe. Wir müssen also die physikalischen Eigenschaften der Energie und die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen sie unterliegt, kennen und sie einhalten. Die Erde ist in physikalischer Hinsicht ein geschlossenes System, das Energiequellen im Erdinneren besitzt und mit seiner Umgebung Energie austauscht. Die Energie aus dem Erdinneren treibt die endogenen geologischen Prozesse an und beeinflußt die exogenen. Der Stoffaustausch mit der Umgebung der Erde kann vernachlässigt werden. Das Klimasystem als (in geologischen Zeiträumen betrachtet) relativ schnell variabler Teil des Gesamtsystems Erde nimmt höherwertige Energie in Form der Sonneneinstrahlung (Maximum der Leistungsdichte bei etwa 5800 K auf) und gibt Energie in Form von Wärmestrahlung (Maximum der Leistungsdichte bei etwa 260 K) zurück in die Umgebung. Die Temperaturdifferenz ist ein Maß für die nutzbare Energie, die solche natürlichen Prozesse auf unserem Planeten wie die atmosphärischen, hydrologischen, ozeanologischen, biologischen, ökologischen usw. antreibt. Die menschliche Gesellschaft greift in zunehmendem Maße in diesen natürlichen Kreislauf ein, indem sie einerseits immer mehr höherwertige Energie für ihre Weiterentwicklung entnimmt und andererseits neben Entropie auch Stoffabfälle entnimmt. Sollen diese Abfälle einer neuen Verwertung zugeführt werden (geschlossene Stoffkreisläufe), so ist wiederum höherwertige Energie notwendig. Hieraus ergibt sich die grundsätzliche Bedeutung der Energie.

Energie tritt auf der Erde in verschiedensten Formen auf, und nicht jede Form ist gleichwertig zu einer anderen Form. Es gibt hochwertige und minderwertige Formen der Energie. Mit ersteren läßt sich der Entropiewert verringern, mit letzteren nicht. Die primären Energieträger (manchmal auch als „Energierohstoffe“ bezeichnet) sind wie die meisten Rohstoffe als Folge der geologischen Entwicklung auf der Erde ungleichmäßig verteilt. Wenn wir sagen, daß ein bestimmter Rohstoff auf der Erde knapp wird, so meinen wir eigentlich, daß die durch die natürlichen Prozessen lokal konzentrierten Vor-

kommen dieses Rohstoffes fast verschwunden sind und dieser Stoff mehr oder minder gleichmäßig über die Erde verteilt wurde. Die Entropie dieser Stoffmenge hat sich durch die Gleichverteilung vergrößert. Um die Entropie wieder auf ihren ursprünglichen Wert zu verringern, ist Energie notwendig. Energie ist folglich die wichtigste natürliche Ressource, die die Menschheit besitzt.

Wir befassen uns mit der Aufgabe, die in jeder Hinsicht sichere Versorgung der Gesellschaft mit Energie zu gewährleisten. Bei diesem Herangehen an die Energie-Problematik sind die naturwissenschaftlich-technischen Aspekte und die sozialwissenschaftlichen Aspekte untrennbar miteinander verknüpft. Im Anhang 1 sind dazu einige Eckdaten zusammengestellt, die bei allen Betrachtungen als fundamental beachtet werden müssen. Sie zeigen insbesondere die Größenordnungen, die in den Volkswirtschaften und bei globalen Vorgängen auftreten.

Wir beginnen mit einigen historischen Betrachtungen. Eine grundlegende Wende in der Haltung zu den Energiefragen erfolgte in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Man könnte als konkreten Zeitpunkt die Jahre 1972/73 nennen, in denen die OPEC, die Organisation der Erdöl exportierenden Länder, die Abhängigkeit der Industrieländer von ihren Erdöllieferungen nutzte und den Preis für das Erdöl schlagartig auf ein Mehrfaches steigerte. Diese Maßnahme machte der Öffentlichkeit in den Industrieländern (Westeuropa, USA, Japan) bewußt, daß ihre Wirtschaft und Gesellschaft in hohem Maße vom Erdöl abhängig ist und die globalen Ressourcen an diesem Energierohstoff zum überwiegenden Teil von anderen Ländern kontrolliert werden. Den führenden Kreisen in den Industrieländern dämmerte es, daß das „Erdölzeitalter“ unabwendbar dem Ende zugehen könnte.

Nicht zufällig ist, daß 1972 der Bericht an den Club of Rome „Die Grenzen des Wachstums“ erschien. Der Bericht war ein Versuch mit großer Wirkung, bei der zum ersten Mal die Systemtheorie und die neuen elektronischen Computer zur Simulation von globalen Problemen in den Wirtschaftswissenschaften eingesetzt wurden.

Die Versorgungssicherheit mit Erdöl und anderen Energierohstoffen hat schon immer eine große Rolle in der internationalen Politik, einschließlich der Sicherheitspolitik, der führenden Industriestaaten gespielt. Zur Sicherung ihrer ökonomischen Interessen wurden auch militärische Mittel eingesetzt. Die Existenz der militärisch hochgerüsteten Sowjetunion und ihrer Verbündeten hinderte jedoch bis zum Zusammenbruch des sozialistischen Lagers die USA und deren Verbündete weitgehend daran, sich durch Kriege den Zugriff zu den Erdölressourcen zu sichern. Das sollte sich in den neunziger Jahren wieder ändern. Seitdem gehören Kriege wieder zum Instrumentarium zur

Durchsetzung von Forderungen gegenüber Kontrahenten, einschließlich der Forderungen zur sicheren Energieversorgung.

Bis zum „Ölpreisschock" ging die Mehrheit der Natur- und Technikwissenschaftler bei ihren Forschungen zu Energiefragen davon aus, daß die benötigten Energierohstoffe für die Industrieländer unbeschränkt zur Verfügung stehen würden und sie sich – abgesehen von den betriebswirtschaftlichen Belangen – um sozialwissenschaftliche Fragen nicht zu kümmern bräuchten. Das wurde jetzt schlagartig anders.

Allerdings gab es in der Energieproblematik bereits eine Ausnahme, bei der sozialwissenschaftliche Aspekte in Form der Akzeptanzprobleme schon wichtig waren: die zivile Nutzung der Kernenergie. Im Unterschied zu den anderen primären Energiequellen begann bei der Kernenergie die zivile Nutzung zeitlich (in den fünfziger Jahren) nach der militärischen Nutzung und mußte die zivile Nutzung die freigesetzten Energiemengen, d.h. die damit verbundenen Risiken reduzieren. Eine wesentliche Begründung dafür, die zivile Nutzung der Kernenergie zu beginnen, war, die auf individueller bis zur staatlichen Ebene weit verbreiteten Widerstände gegen die Kernwaffen zu entschärfen. Befürchtungen, daß die Rohstoffe ausgehen würden, und wegen irgendwelcher Auswirkungen auf die Umwelt gab es nicht. Eine besondere Rolle spielte die Möglichkeit, mit der Kernenergie praktisch unbegrenzte Energiemengen bereitzustellen.

Die erste „Ölkrise" wurde in den Industrieländern schnell überwunden: durch die Erschließung der Erdölvorkommen in Alaska (für Nordamerika) und der Nordsee (für Westeuropa), durch die Inbetriebnahme von zahlreichen Kernkraftwerken und durch vielfältige Maßnahmen zum effizienteren Einsatz von Energie vor allem in der Industrie.

Die Energiekrise in den siebziger Jahren hatte große Auswirkungen auf das Verhalten aller gesellschaftlichen Bereiche der Industrieländer zu den Entwicklungsländern. Die Entwicklungspolitik gewann ein weit größeres Interesse. Sie war bereits politisch wichtig geworden durch die Entlassung der bisherigen Kolonien in die staatliche Selbständigkeit und ihre Aufnahme in die UNO, womit die Entwicklungsländer ein wirksames Forum für die Artikulierung ihrer Probleme erhielten. Im Kontext der „Ölkrise" wurden Forderungen nach einer „Neuen Weltwirtschaftsordnung" erhoben. Die in den fünfziger und sechziger Jahren gültige Parole „Entwicklung heißt Wachstum" wurde aufgegeben bzw. stark relativiert.

Für die Veränderung der Entwicklungspolitik gab es reale Gründe: zum einen die Erfahrung, daß mit Beginn der siebziger Jahre in den Industrieländern die „Goldenen Jahrzehnte" der wirtschaftlichen Entwicklung in der Nach-

kriegszeit zu Ende gingen, und zum andern, daß der Öffentlichkeit die stürmische Zunahme der Weltbevölkerung – und zwar ausschließlich der Bevölkerung in den Entwicklungsländern bei Abnahme oder Gleichbleiben der Bevölkerung in den Industrieländern – bewußt wurde. Zur Jahrhundertwende war klar geworden, daß allein schon das Bevölkerungswachstum in den Entwicklungsländern zu einem gewaltigen Anwachsen des weltweiten Energiebedarfs führen wird.

In den siebziger Jahren entstand in allen Industrieländern eine breite Umweltbewegung. Der Bevölkerung wurde bewußt, daß durch die umfassende Technisierung in der modernen Gesellschaft die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschen gefährdet werden. Diese Fragen wurden in kürzester Zeit von der Wissenschaft in allen ihren Zweigen aufgegriffen. Die neuen „Umweltwissenschaften“ wurden in atemberaubendem Tempo institutionalisiert, und zwar bei Finanzierung durch den Staat und die sog. Zivilgesellschaft. In den letzten beiden Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts war die Umweltverträglichkeit zu einem wichtigen Argument bei den Entscheidungen zu gesellschaftlichen Problemen geworden.

Eine herausragende Bedeutung sollten ab den achtziger und neunziger Jahren die wissenschaftlichen Untersuchungen zum globalen Klima erhalten. Und zwar dadurch, daß es gelang, durch den Einsatz der Systemtheorie und von Höchstleistungsrechnern in Modellen die beobachteten Änderungen der Temperatur und des Gehaltes an CO_2 in der Erdatmosphäre miteinander zu verbinden und Szenarien zur künftigen Entwicklung des globalen Klimas abzuleiten. Die Szenarien wurden von den Medien aller Art in die breite Öffentlichkeit getragen, wo sie von der Umweltbewegung zu politischen Aktionen genutzt wurden. Da der wachsende CO_2-Gehalt der Atmosphäre zu einem beachtlichen Teil durch den Verbrauch von Kohle und Erdöl zur Energiegewinnung erzeugt wird, wurde die vermutete Änderung des globalen Klimas zu einem höchst gewichtigen Argument in den nationalen und internationalen Debatten um die weitere Entwicklung der Energiewirtschaft als einem der wichtigsten Teile der technischen Infrastruktur der Gesellschaft in allen Ländern. Dieses Argument verstärkte und kanalisierte in den Industrieländern den Druck auf die Energiewirtschaft und die relevanten Wissenschaftsbereiche, nicht nur quantitativ die bedarfsgerechte Energieversorgung zu sichern, sondern auch nach Lösungen zu suchen, die bisher bzw. zeitweilig wenig genutzten natürlichen Energiequellen in die Energieversorgung einzubeziehen und die Potentiale zur Erhöhung der Energieeffizienz stärker zu erschließen. Für die Naturwissenschaft und Technik ergaben sich daraus qualitativ neue Aufgaben.

Die offensichtlichen gewaltigen Unterschiede im Pro-Kopf-Energieverbrauch zwischen den Industrieländern und den Entwicklungsländern wurden fortan zu wesentlichen Argumenten für die Gestaltung der Entwicklungspolitik. Diese hatte Ende der achtziger, Beginn der neunziger Jahre einen neuen Akzent dadurch erhalten, daß durch die Brundlandt-Kommission der UNO der Begriff „sustainable development" („nachhaltige Entwicklung") kreiert worden war. Der Begriff wird heute in allen Bereichen der Gesellschaft verwendet, wobei allerdings bisher weder eine ausreichende allgemein akzeptierte Verständigung über den konkreten Inhalt des Begriffes erreicht werden konnte, noch die politischen Instrumentarien zur Durchsetzung der nachhaltigen Entwicklung geschaffen werden konnten. In den Massenmedien und von den politischen Parteien wird „Nachhaltigkeit" vielfach nur als politisches Schlagwort eingesetzt.

Die Forderung zur nachhaltigen Entwicklung betrifft alle Länder dieser Erde, sowohl die Entwicklungsländer wie auch die Industrieländer. Unklar ist bisher, wie in der Praxis ein weiteres Wachstum der Weltwirtschaft mit der Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung erreicht werden kann, ohne daß ein beträchtlicher Teil der Weltbevölkerung – sicher der schwächste – zurückstehen muß.

Damit schließt sich der Kreis: Die Entwicklungspolitik ist eng mit der Politik der internationalen Beziehungen und der Sicherheitspolitik verknüpft. Das gilt im höchsten Maße für alle die Industrieländer, deren Energiebedarf ausschließlich oder zum großen Teil durch den Import von Energieträgern gedeckt wird. Die Umweltforderungen sind seit einiger Zeit wesentlicher Bestandteil der internationalen und der nationalen Energiepolitik. Die Medien spielen bei der Interessenvertretung aller nur denkbaren gesellschaftlichen Bereiche – einschließlich der Wissenschaft – eine wirksame Rolle. Die Infrastruktur der Energieversorgung kann nur weiter entwickelt werden, wenn alle diese Randbedingungen berücksichtigt werden. Die naturwissenschaftlich-technischen Aspekte gehören zu den einschränkenden Bedingungen, sind jedoch nicht mehr vorrangig.

Erster Ausgangspunkt der Betrachtungen zur sicheren Versorgung mit Energie ist die Annahme, daß der Energiebedarf der Menschheit insgesamt in absehbarer Zeit (zumindest über einige Generationen) nicht sinken, wahrscheinlich steigen wird. Die Begründung dafür ist:

1. Die größten Verbraucher von Energie sind die Industrieländer. Ihre Leistungskraft, ihr Wohlstand und ihre Macht beruhen auf der umfangreichen, bezogen auf den Kopf der Bevölkerung weit überproportionalen Nutzung von Energie.

2. Obwohl der größte Teil der Menschheit in den Entwicklungsländern lebt, ist sein Anteil am Weltverbrauch der Energie absolut und relativ gering. Die Entwicklungsländer haben nicht nur einen moralischen Anspruch darauf, daß ihr Pro-Kopf-Verbrauch in den nächsten Jahrzehnten steigt, was angesichts der demographischen Entwicklung eine absolute Steigerung des Weltenergieverbrauches zur Folge haben wird.
3. Inzwischen gehören die bevölkerungsreichsten Entwicklungsländer zu den Schwellenländern, in denen die Wirtschaft boomt, also der Energiebedarf überproportional steigt.
4. Die Industrieländer sind im eigenen wirtschaftlichen Interesse darauf angewiesen, mit den Schwellenländern zusammenzuarbeiten, werden also deren wirtschaftliches Wachstum nicht bremsen.

Zweiter Ausgangspunkt ist die Erkenntnis, die durch zahlreiche Anzeichen gefördert wird, daß die natürlichen Vorräte an den fossilen und nuklearen Energieträgern, die bisher vor allem in den Industrieländern umfangreich und intensiv genutzt werden, in absehbarer Zeit erschöpft sein werden. In erster Linie betrifft das das universell einsetzbare Erdöl. Die Situation wird erheblich erschwert dadurch, daß die Vorräte zum großen Teil in politisch instabilen Regionen liegen.

Dritter Ausgangspunkt ist die Befürchtung, die durch wissenschaftliche Untersuchungen ausgelöst wird, daß der übermäßige Verbrauch der fossilen Energieträger in absehbarer Zeit das globale Klima in irreversibler Weise verändern wird.

Alle drei Ausgangspunkte sind grundsätzlich unbestritten. Dieser Konsens reicht jedoch als Grundlage für die Energiepolitik nicht aus. Es gibt deshalb eine nahezu unübersehbare Flut von Versuchen, die qualitativen Aussagen durch quantitative Betrachtungen zu untersetzen. Da diese Betrachtungen mit vielen Unbekannten und Annahmen arbeiten müssen, ist die Schwankungsbreite der Ergebnisse so groß, daß sie als wissenschaftliche Grundlage für die notwendigen politischen und konkreten wirtschaftlichen Entscheidungen wenig tragfähig sind. Die Problematik ist äußerst komplex und kann deshalb schon vom Ansatz her mit den heute üblichen wissenschaftlichen Methoden, die sämtlich nur für exakt definierbare Problemausschnitte geeignet sind, nicht umfassend bearbeitet werden, zumindest nicht mit der für quantitative Betrachtungen erforderlichen Tiefe.

Die sichere Versorgung der Menschheit kann nur dadurch gewährleistet werden, daß die einzelnen Länder entsprechend den jeweiligen Gegebenheiten und Möglichkeiten alle verfügbaren natürlichen Energiequellen und -

träger in optimaler Weise gebündelt nutzen. Dabei müssen sie international zusammenarbeiten, mehr oder weniger intensiv, am wirksamsten zum gegenseitigen Vorteil. Für die Industrieländern gibt es zudem langfristig die Möglichkeit, ihre weitere Entwicklung bei absoluter Reduzierung des Energieeinsatzes zu erreichen: Faktor 4, doppelter Wohlstand, halbierter Verbrauch (von Weizsäcker u. a., 1997).

Zu den naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen der Energie-Problematik

(Die Literatursammlung enthält dazu zahlreiche Arbeiten, die als relevant sofort erkennbar sind, so daß hier auf spezielle Zitierung verzichtet werden kann.)

Um die Problematik wissenschaftlich bearbeiten zu können, muß sie in entsprechend bearbeitbare Teilaufgaben gegliedert werden. Diese Gliederung wird sich an die heute übliche Gliederung in Wissenschaftsgebiete anlehnen. Die Bearbeitung der Problematik als Ganzes muß iterativ erfolgen, in den einzelnen Sachgebieten und bei ständiger Kopplung zwischen ihnen. Offensichtlich ist die Gliederung in die naturwissenschaftlich-technischen und die wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Aspekte. In der wissenschaftlichen Diskussion der Energie-Problematik sind die folgenden Aspekte zu betrachten:

- physikalische und chemische
- technologische
- ökonomische
- ökologische
- geographische
- ideologische.

Am Beginn muß die Bearbeitung der naturwissenschaftlich-technischen Aspekte stehen. Ohne deren ausreichende Kenntnis kann die Bearbeitung der wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Aspekte zu unwissenschaftlichen Spekulationen entarten.

Die Wissenschaft befaßt sich mit den wissenschaftlichen Voraussetzungen für die politischen Entscheidungen, ebenso mit Hilfe von Modellrechnungen mit den möglichen Folgen solcher Entscheidungen. Am Beginn dieser Arbeiten steht die Auflösung bzw. Präzisierung der in der heutigen energiepolitischen Diskussion gebrauchten Begriffe in solche Begriffe, mit denen die Naturwissenschaft und die Technik arbeiten. Selbstverständlich wird dabei der Begriff „Energieverbrauch“ durch den Begriff „Energieumwandlung“ ersetzt.

Besonders diskussionswürdig ist der Begriff „Erneuerbare Energien“. Diese Sammlung muß für die naturwissenschaftlich-technische Betrachtung in mehrere eigenständige Klassen des natürlichen Energieangebotes aufgelöst werden, zumindest in vier: a) direkte Umwandlung der Strahlungsenergie der Sonne in Wärme- und in elektrische Energie; b) Umwandlung der Strömungsenergie von Wind und Wasser in mechanische Antriebsenergie und in Elektroenergie; c) Umwandlung der in der Biomasse gespeicherten Sonnenenergie in Wärmeenergie, Licht und Elektroenergie, Nutzung der Biomasse zur Erzeugung von Treibstoffen; d) Erdwärme – direkte Nutzung für Heizungszwecke und Umwandlung in Elektroenergie. Zu unterscheiden ist unbedingt auch zwischen den traditionellen und den neuen Nutzungsformen der erneuerbaren Energien. Die traditionellen Formen spielen heute noch eine herausragende Rolle in den Entwicklungsländern. Neu, aber nicht ausschließlich neu, ist die Nutzung der natürlichen Angebote zur Erzeugung von Elektroenergie (man denke an die Wasserkraftwerke und die Pumpspeicherwerke).

Am Beispiel der erneuerbaren Energien zeigt sich, daß es bei den naturwissenschaftlich-technischen Betrachtungen zur Energieproblematik in erster Linie darum gehen muß, die Wirkungsgrade der Technologien zur Umwandlung des natürlichen Angebotes zu steigern und deren technische und ökologische Risiken zu minimieren. Zu klären sind gleichzeitig die materiellen Randbedingungen für eine Vergrößerung des Energieausstoßes, besonders bei den Energieformen, die bisher nur in sehr geringem Maße genutzt werden, auf die aber große Hoffnungen gesetzt werden. Dazu gehören die meisten erneuerbaren Energien; sie tragen bisher nur wenige Prozente zur Deckung des Energiebedarfs bei.

Die Aufgabe der Energiewirtschaft besteht bekanntlich darin, das natürliche Angebot von Energie in diejenigen Energieformen umzuwandeln, deren Nutzung in den nachfolgenden gesellschaftlichen Bereichen sich als besonders zweckmäßig erwiesen hat. Die naturwissenschaftlich-technische Bearbeitung befaßt sich folglich intensiv mit den verschiedenen Technologien zur entsprechenden Umwandlung des natürlichen Energieangebotes.

Aus der Sicht der Energiewirtschaft sind die Endverbraucher von Energie:

- private Haushalte
- Landwirtschaft
- Industrie
- Dienstleistungen
- Verkehr.

Die Gesellschaft benötigt die Energie in direkt nutzbaren Formen (Gebrauchsenergie). Die Hauptklassen sind:

- nutzbare Wärme für Heizung und als Prozeßwärme
- mechanische Energie für den Antrieb von stationären Maschinen und im Transport
- elektrische Energie (Strom) – sie ist universell einsetzbar.

Die nutzbare Energie muß aus primären Energieformen erzeugt werden. Für die Nutzbarkeit mit entscheidend sind die Möglichkeiten für Speicherung und Transport.

In der allgemeinen Energiediskussion, an der sich auch viele Nichtexperten beteiligen, werden gewöhnlich drei Klassen von primären Energieträgern bzw. Energiequellen unterschieden:

- fossile Energieträger
- erneuerbare Energien
- Kernenergie.

Bei den fossilen Energieträgern werden folgende Typen unterschieden:

- Kohle
- Erdöl
- Erdgas.

Ihr gemeinsames Merkmal ist, daß sie in geologischen Zeiten durch die Umwandlung von Strahlungsenergie der Sonne durch biologische und geologische (besonders endogene) Prozesse entstanden sind und akkumuliert wurden. Die Energiedichte der fossilen Energieträger ist sehr hoch. Die Gebrauchseigenschaften sind außerordentlich günstig. Die natürlichen Vorgänge bei der Bildung der fossilen Energieträger lassen sich bisher technisch nicht nachbilden. Offensichtlich werden die fossilen Energieträger durch die industrialisierte Gesellschaft viel schneller verbraucht als sie entstehen konnten. Die fossilen Energieressourcen sind begrenzt. Ihre Vorkommen sind an spezifische geologische Bedingungen gebunden und folglich geographisch sehr ungleichmäßig verteilt.

Unter dem Begriff „erneuerbare Energien“ werden unterschiedliche Typen von Energieträgern bzw. -quellen zusammengefasst, deren gemeinsames Merkmal ist, daß sie als Energiequellen nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich erscheinen oder als Biomasse nachwachsen bzw. laufend anfallen. Man kann folgende Typen unterscheiden:

- Strahlungsenergie der Sonne
- Strömungsenergie des Windes
- Strömungsenergie der Flüsse

- Bewegungsenergie des Meeres
- Biomasse in traditioneller wie auch in industriell gewonnener und verarbeiteter Form
- Erdwärme im Ergebnis von Prozessen im Erdinneren.

Die Energiedichten des natürlichen Angebots sind sehr gering. Die bisher bekannten Technologien zur Umwandlung der natürlichen Angebote in Gebrauchsenergie sind – außer bei der Nutzung der Wasserkraft – wenig leistungsfähig. Die traditionelle Nutzung der Biomasse ist sehr umweltschädlich.

Die Kernenergie ergibt sich aus der Bindungsenergie von Atomkernen entweder durch Kernspaltung oder Kernfusion. Für die technische Nutzung wird die Kernenergie in elektrische und thermische Energie umgewandelt. Die Erzeugung und Nutzung von Kernenergie setzt ein beträchtliches industrielles Entwicklungsniveau voraus.

Der Umfang, in dem die verschiedenen primären Energieträger bzw. -quellen durch den Menschen genutzt werden, hängt entscheidend davon ab, welche Technologien zur Umwandlung und Nutzung der Primärenergien zur Verfügung stehen. Die Umstellung auf andere Klassen und Typen von primären Energieträgern bzw. -quellen ist in jeder Volkswirtschaft außerordentlich schwierig, tief greifend, investitions- und zeitaufwendig. Der Investitionsbedarf erfordert gesamtstaatliche Entscheidungen, wozu aber in den meisten Staaten die notwendigen Mechanismen fehlen. Der Zeitaufwand wird gegenwärtig in Jahrzehnten gemessen. Prognosen über die erreichbaren Vor- und Nachteile solcher Umstellungen sind unsicher.

Art und Menge der genutzten primären Energieträger sind ein (pauschales) Maß für das Entwicklungsniveau eines Volkes. Biomasse in traditioneller Form wird vom Menschen seit Urzeiten zum Kochen, Heizen und Beleuchten genutzt. Sie ist auch heute noch in den Entwicklungsländern die überwiegend genutzte Primärenergie. Die industrielle Entwicklung begann mit der Nutzung der fossilen Energieträger. Das gegenwärtig erreichte Entwicklungsniveau beruht quantitativ vor allem auf der Nutzung des Erdöls, qualitativ auf der effizienten Nutzung der Energie.

Alle Klassen und Typen von Primärenergien haben Vor- und Nachteile. Maßgebend sind vor allem die Eigenschaften:

- technologische Nutzbarkeit
- Verfügbarkeit, Transport und Speicherung
- technische Risiken für Mensch und Umwelt.

Erdöl bietet bei weitem die größten Vorteile. Im Verkehr kann Erdöl bisher sowohl quantitativ wie auch qualitativ nicht ersetzt werden. Gemessen am aktuellen Verbrauch werden die Erdölressourcen zuerst erschöpft sein. Die Risiken der Erdölnutzung für Mensch und Umwelt werden in der Gesellschaft weitestgehend akzeptiert. Wegen der geographischen Diskrepanzen zwischen den Zentren des Vorkommens und des Verbrauchs von Erdöl sind die internationalen Konflikte bei diesem Energieträger am größten und gefährlichsten.

Kohle wird heute vor allem für die Erzeugung von elektrischem Strom und von Wärme eingesetzt. Die Reichweite als Energieträger ist bei Kohle am größten. Die Gefährdung der Umwelt, darunter die des globalen Klimas, durch die Nutzung der Kohle ist beträchtlich. Sie kann aber durch technologische Maßnahmen reduziert werden.

Die Gefährdung des Klimas durch die Nutzung von Erdgas ist relativ gering. Die Reichweite der Erdgasressourcen ist noch wenig bedenklich. Gewinnung, Transport, Speicherung und Einsatz von Erdgas sind mit beachtlichen technischen Risiken verbunden.

Die Technologien zur Gewinnung und Nutzung der erneuerbaren Energien sind – bis auf die zur Nutzung der Strömungsenergie der Flüsse – zurzeit noch ungenügend entwickelt. Das Potential der erneuerbaren Energien zur ausreichenden Deckung des Energiebedarfs der modernen Industriegesellschaft kann deshalb noch nicht sicher eingeschätzt werden.

Die Kernenergie wird gegenwärtig in den verschiedenen Ländern ganz unterschiedlich betrachtet. Streitpunkt sind vor allem die mit der Gewinnung und Nutzung der Kernenergie verbundenen Risiken. Die Auseinandersetzung zwischen Befürwortern und Gegnern der zivilen Nutzung der Kernenergie spielte auch im Arbeitskreis eine Rolle. Es scheint notwendig, zunächst auf folgende Fragen Antworten zu finden, die aus wissenschaftlich-technischer Sicht belegbar sind: Wie groß ist das Potential der Kernenergie aus der Sicht der Kernbrennstoffe? Wie weit werden die technischen Risiken der Kernenergieanlagen beherrscht? Wie weit und wo können die radioaktiven Rückstände sicher zwischen- und endgelagert werden? Welche Verbindungen gibt es zwischen der zivilen und der militärischen Nutzung der Kernenergie und der Kerntechnik generell? Können solche Verbindungen von Regierungen genutzt werden und könnten das auch Terroristen tun? Ist die Forderung logisch und zwingend „Wer gegen die militärische Nutzung der Kernenergie ist, muß auch gegen die zivile Nutzung der Kernenergie sein, und wer gegen

die zivile Nutzung der Kernenergie ist, muß in viel höherem Maße gegen die militärische Nutzung der Kernenergie sein“?

Die sofort einleuchtende Forderung, Energie rationell und effizienter zu nutzen und mit ihr sparsam umzugehen, muß in allen Bereichen konkret umgesetzt werden. Welche Möglichkeiten hat dabei die staatlich betriebene Energieforschung? Gibt es durchgreifende naturwissenschaftlich-technische Entwicklungen (Innovationen) zu deren Erfüllung? Das wirksamste Mittel dürfte die Gestaltung der Energiepreise sein.

Energieerzeugung und –nutzung können grundsätzlich nicht ohne Risiko für Mensch und Umwelt erfolgen. Über die Risiken für Mensch und Umwelt bei der Verwendung der primären Energiequellen Kohle, Erdöl, Erdgas, Wasserkraft und traditionelle Biomasse liegen jahrzehntelange praktische Erfahrungen, gekoppelt mit eingehenden und allseitigen wissenschaftlichen Untersuchungen, vor. Das gleiche gilt für die Gebrauchsenergie Elektroenergie. Intensiv untersucht wurden die Risiken bei der zivilen Nutzung der Kernenergie. Wenig untersucht wurden bisher die Risiken für Mensch und Umwelt bei der Nutzung der Windkraft, der Meeresenergie, der Erdwärme, der neuartigen Nutzung der Biomasse. Praktisch keine Erfahrungen gibt es über die Risiken bei der direkten Nutzung der Strahlungsenergie der Sonne.

Die Bereitschaft, mit einer Handlung ein Risiko einzugehen, wächst mit der Höhe des absehbaren Gewinns. In unserer Thematik müssen die Risiken mit den Energiemengen verglichen werden, die aus den verschiedenen primären Energieträgern bzw. -quellen gewonnen werden können. Die erreichbaren Energiemengen sind durch langjährige praktische Erfahrungen und durch wissenschaftliche Untersuchungen sehr genau bekannt für die Nutzung von Kohle, Erdöl, Erdgas, Wasserkraft, traditionelle Biomasse und auch Kernenergie. Über die erreichbaren Erträge bei den oben genannten weiteren Energiequellen gibt es noch keine praktischen Erfahrungen, nur theoretische Abschätzungen.

Zu wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Problemen

Die Energieversorgung der Menschheit ist eine der wichtigsten Herausforderungen in der Gegenwart und Zukunft. Sie ist eine Aufgabe, die (1) gesamtgesellschaftlichen Charakter trägt, nur in engem Zusammenhang und Wechselwirkung mit der gesamtgesellschaftlichen Entwicklung, insbesondere den ökonomischen, sozialen und ökologischen Entwicklungsprozessen, gelöst werden kann; die (2) einen besonders langfristigen Charakter aufweist, da die hierfür erforderlichen tief greifenden Umwälzungen eine sehr lange

Vorbereitungs- und Realisierungszeit erfordern; die (3) durch ihren globalen Charakter gekennzeichnet wird, die letzten Endes nur als gemeinsame Aufgabe aller Regionen und Länder der Welt, vor allem durch gemeinsame Anstrengungen der Industrieländer und der Entwicklungsländer, gelöst werden kann. Mit der Langfristigkeit – Zeiträume von mehreren Jahrzehnten, zunächst bis Mitte des 21. Jahrhunderts – sind vielfältige Unsicherheiten, Unwägbarkeiten und Risiken der Voraussage verbunden, die sich sowohl auf die gesellschaftlichen, vor allem die politischen, ökonomischen, sozialen und ökologischen Rahmenbedingungen, also auch unmittelbar auf die Energien selbst, von der Verfügbarkeit und Gewinnung der Primärenergieträger, über ihre Umwandlung und ihren Transport, bis zum Einsatz der Gebrauchs-/Endenergie, beziehen. Es geht dabei um eine wirksame Verflechtung nachhaltiger Energieentwicklung vor allem mit den Feldern

- Erhaltung und Schutz der natürlichen Umwelt im regionalen, nationalen, EU und globalen Maßstab
- Wirtschaft – Effizienz, Wachstum, Struktur
- Beschäftigung – Überwindung der Massenarbeitslosigkeit, Schritte zu einer Vollbeschäftigung neuer Art
- sozialer Zusammenhalt, soziale Gerechtigkeit und soziale Sicherheit
- Einschränkung der Nord-Süd-Kluft
- Erhaltung des Friedens, Verhinderung militärischer Konflikte.

Die langfristige Energiesicherung ist ein konstitutives Element des Nachhaltigkeitsproblems. Das bedeutet, daß die Wege zur Energiesicherung den Nachhaltigkeitskriterien entsprechen müssen, und zugleich, daß die Art und Weise, wie die Energiesicherung erfolgt, maßgeblich über Erfolg und Misserfolg einer nachhaltigen Entwicklungsstrategie entscheidet. Die spezifische Stellung der Energie in einer umfassenden Nachhaltigkeitsstrategie wird u.a. darin sichtbar, daß mehrere der zentralen Nachhaltigkeitsdefizite in Deutschland und der sie abbildenden Indikatoren direkt auf die Energie gerichtet sind: Abbau nicht erneuerbarer Ressourcen/Verbrauch nicht erneuerbarer Energieressourcen, Klimawandel/CO_2-Emissionen, ungleiche globale Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten/CO_2-Emissionen pro Kopf im internationalen Vergleich.(Coenen, Grunwald, 2003). Ohne eine nachhaltige Energiesicherung wird es auch keine ökonomische, soziale und ökologische Nachhaltigkeit geben. „Nur durch einen grundlegenden Umbau der Energiesysteme lässt sich eine nicht-nachhaltige Entwicklung wieder in nachhaltige Bahnen lenken“ (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, 2003).

Insgesamt gewinnt die Umweltproblematik im nationalen und globalen/internationalem Maßstab an Bedeutung, in der gesellschaftlichen Realität, im öffentlichen Bewusstsein und in der Politik. Dies ist jedoch ein sehr widersprüchlicher Prozess: insgesamt bleiben umweltpolitische Maßnahmen hinter den Erfordernissen zurück; in der Politik und im öffentlichen Bewusstsein waren nach einem Aufschwung in den siebziger und achtziger Jahren die neunziger Jahre durch einen Abschwung gekennzeichnet. Vor allem die Zuspitzung der sozialen Probleme (Eskalation der Massenarbeits- und Langzeitarbeitslosigkeit, Abbau sozialer Sicherungssysteme, Rückgang der realen Nettoarbeitseinkommen, Ausbreitung von Armut) und die prekäre Situation der öffentlichen Haushalte wirken sich zunehmend hemmend auf das Umweltbewusstsein und den Einsatz ökonomischer Ressourcen (Investitionen, Mittel für F/E) zur Lösung von Umweltproblemen aus. Die Energieproblematik spielt in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle sowohl im Hinblick auf die weiter hohe Inanspruchnahme nicht erneuerbarer Energieressourcen als auch der insgesamt hohen Umweltbelastungen durch den CO_2-Ausstoß.

Seit den sechziger/siebziger Jahren vollziehen sich wesentliche Veränderungen im Reproduktionsprozess in Richtung eines höheren Drucks auf eine höhere Effizienz der eingesetzten Ressourcen und tief greifender Veränderungen der Produktionsstrukturen – Schrumpfen traditioneller Produktionen zu Gunsten von Hightech sowie moderner und auf den Menschen bezogenen Dienstleistungen, die für die langfristige Energiesicherung von großer, zunehmender Bedeutung sind. Einerseits sind die Anforderungen an die Verbesserung der Ressourceneffektivität bei den Energieträgern auf Grund der teilweise sprunghaften steigenden Kosten der Energiebereitstellung, besonders bei Erdöl und Erdgas, und der notwendigen Senkung der Umweltbelastungen außerordentlich hoch; andererseits eröffnen die neuen Technologien und Strukturveränderungen qualitativ neue Möglichkeiten für die Erhöhung der Energieeffizienz und -produktivität.

Zwischen der Bereitstellung von Energie, vor allem den Preisen für die verschiedenen Gebrauchsenergien und der regionalen Verteilung der Energie über die verschiedenen Regionen der Welt einerseits und der sozialen Gerechtigkeit andererseits bestehen vielfältige Abhängigkeiten und Widersprüche. In Deutschland und den anderen EU-Ländern sind vor allem die unteren Einkommensgruppen von den überproportional ansteigenden Energiepreisen betroffen, wodurch die soziale Schieflage und Ungerechtigkeit noch verstärkt wird. Diejenigen Entwicklungsländer, die über keine oder nur unzureichende

eigene Energievorkommen verfügen, werden bei der Energiebereitstellung in mehrfacher Beziehung negativ betroffen und stark benachteiligt: die ungerechte Verteilung des Energieverbrauchs zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern hat sich nicht entschärft, die Entwicklungsländer mit einem Anteil an der Bevölkerung von über 75% haben einen Anteil am Primärenergieverbrauch von nur 35%; die rasant angestiegenen Preise für Erdölimporte treffen sie weit stärker als die Industrieländer, verschlingen die Einnahmen aus den Exporten, die unzureichende Energieversorgung von Hunderten Millionen Menschen wird reproduziert, rund zwei Milliarden Menschen haben keinen Zugang zu Elektrizität.

Die Sicherung der langfristigen Energieversorgung von Industriestaaten, insbesondere der USA, zunehmend aber auch bevölkerungsreicher Entwicklungsländer mit einem hohen Wachstumstempo, ist heute ein Feld zwischenstaatlicher und internationaler Konfrontationen, die bis zu bewaffneten Konflikten gehen können. Besonders gefährlich ist die imperialistische Strategie der USA zur geostrategischen Sicherung und Beherrschung der wichtigsten Energieressourcen der Welt. Die Auswirkungen dieser Politik treffen vor allem die ärmeren Staaten und schränken deren Chancen zur Lösung ihrer Probleme noch mehr ein. Die USA- Aggression gegen den Irak und die anhaltende Besetzung des Irak sind ein entscheidender Faktor für die Erhöhung der Erdölpreise.

Aus diesen objektiven Tendenzen und Zusammenhängen der langfristigen Energiesicherung ergeben sich tief greifende und komplexe Auswirkungen auf die ökonomische und soziale Entwicklung sowie neue größere Herausforderungen zur Lösung der Umweltprobleme. Sie sind mit tiefen Einschnitten in die Produktions- und Lebensweise verbunden und betreffen alle Ebenen des Wirtschaftens und des Lebens, die lokal-regionale Ebene, die nationalstaatliche, die überstaatlichen regionalen Zusammenschlüsse wie EU u.a. sowie die globale Ebene.

Eine nachhaltige Energiesicherung erfordert im 21. Jahrhundert einen grundlegenden Paradigmenwechsel. Dies gilt zumindest in dreifacher Beziehung. Erstens für die Energieeffizienz: Sie muß gegenüber der bisherigen Entwicklung in neuen Dimensionen und Tempi erhöht werden; die Senkungsraten des spezifischen Energieverbrauchs müssen die Wachstumsraten der gesamtwirtschaftlichen Leistung (gemessen – wenn auch unvollständig und verzerrt – im Bruttoinlandsprodukt) spürbar und dauerhaft übertreffen. Zweitens für die Energieträgerstruktur: Das Zeitalter, in dem die fossilen Energieträger Grundlage der Energieversorgung waren, geht in diesem Jahrhundert

ihrem Ende zu; die erneuerbaren Energien müssen zunehmend an deren Stelle treten. Drittens für eine neue Qualität in den Beziehungen der Energiesicherung zur Lösung der dringlichsten sozialen Probleme, vor allem weltweiter Armut, Hunger, und Massen- und Langzeitarbeitslosigkeit: Ohne spürbare Fortschritte bei der Lösung der sozialen Probleme, national, EU-weit und global, haben nachhaltige ökologische Entwicklung, und darin eingeschlossen nachhaltige, langfristige weltweite Energiesicherung, kaum eine Chance.

Die vorliegenden Prognosen zur Energiewirtschaft Deutschlands und insbesondere zur Weltenergiewirtschaft können nicht als sichere, zuverlässige Voraussagen über die zukünftige Entwicklung angesehen werden. In den verschiedenen Prognosen kommen einige Probleme und Widersprüche bisheriger Einschätzungen zur Entwicklung des Energieverbrauchs zum Ausdruck. Weitgehende Übereinstimmung gibt es über die Richtungen der notwendigen Veränderungen, starke Differenzen jedoch über das Ausmaß und das Tempo dieser Veränderungen in den verschiedenen Etappen, z.B. bis 2020 oder bis 2050. Das gilt für die Entwicklung des Gesamtbedarfs an Energie, die Reduzierung des CO_2-Ausstoßes, das Tempo der Erhöhung der Energieeffizienz, die Strukturveränderungen, besonders innerhalb des Primärenergieaufkommens, und die Veränderung der regionalen Struktur des Energieverbrauchs zu Gunsten der Entwicklungsländer.

Entsprechend der Prognose des World Energy Councils wird sich der Gesamtbedarf 2050 gegenüber 1990 z.B. nach der berechneten Maximalvariante auf das 2,75fache und nach der Minimalvariante auf das 1,6fache erhöhen. Der Strukturanteil der fossilen Energien soll gegenüber 78% in 1990 bis 2050 in der Maximalvariante auf 60% und in der Minimalvariante auf 52% reduziert werden. Nach anderen prognostischen Einschätzungen, die stärker von den Nachhaltigkeitserfordernissen abgeleitet sind, wird von einem auch gegenüber der Minimalvariante wesentlich geringeren Ausmaß der Zunahme des Primärenergieverbrauchs, einer stärkeren Reduzierung des Einsatzes fossiler Energien, einem stärkerem Zuwachs bei den erneuerbaren und einem geringeren Anteil der Kernenergie ausgegangen.

Ein Grundproblem der langfristigen Energiesicherung ist die Einschränkung und schließlich die Überwindung der Nord-Süd-Disparitäten bei der Nutzung der weltweiten Energieressourcen. Zunächst müßte eingeschätzt werden, um wie viel der Primärenergiebedarf an fossilen Energieträgern in Deutschland und den anderen Industrieländern reduziert werden müßte, damit die Entwicklungsländer die notwendigen energetischen Spielräume erhalten, um die wirtschaftliche Nord-Süd-Kluft bis 2050 spürbar zu

verringern. Die Einschätzungen über die Verringerung der Unterschiede im Pro-Kopf-Verbrauch an Energie und zur Reduzierung der CO_2-Emission sollten von dem Grundsatz abgeleitet werden, daß jeder Erdbewohner dasselbe Recht auf die Nutzung der natürlichen Energieressourcen hat.

Den Industrieländern kommt eine hohe Verantwortung und Verpflichtung bei der Unterstützung der Länder der „Dritten Welt" für die Energiesicherung – eine unverzichtbare Grundlage für die Verringerung der Unterschiede im ökonomischen Entwicklungsniveau – zu. Dabei geht es um zwei Grundforderungen: Einmal um die Einhaltung der für die Industrieländer notwendigen Reduktionsziele für den Energieverbrauch, vor allem beim Einsatz fossiler Energieträger. Dabei sind erhöhte Bemühungen Deutschlands erforderlich, damit diese Ziele auch in den wirtschafts- und umweltpolitischen Leitlinien der EU sowie bei den OECD-Ländern zugrunde gelegt und umgesetzt werden. Hierdurch müssen die notwendigen Freiräume für eine absolute Erhöhung des Energieeinsatzes in den Entwicklungsländer geschaffen werden. Zum anderen gilt es, diese Länder wirksamer zu unterstützen bei der Anwendung neuer Technologien, vor allem von Technologien die an ihre spezifischen Bedingungen angepasst sind, zur Erhöhung der Effizienz bei der Gewinnung und beim Einsatz von Energie sowie bei der Nutzung der in diesen Ländern verfügbaren Ressourcen zur Nutzung erneuerbarer Energien. Es gilt dabei die unnötigen Umwege der schrankenlosen extensiven Entwicklungsphase des Energiebedarfs in den Industrieländern bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts so weit wie möglich zu vermeiden. Dies liegt im Interesse vor allem der Entwicklungsländer selbst aber auch der Industrieländer.

Die Bestimmung der Entscheidungsspielräume für eine langfristige Energiesicherung könnte nach einem groben Muster etwa in folgender Weise erfolgen: Als erstes gilt es, ausgehend von den Erfordernissen des weltweit notwendigen Übergangs zu einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung, die sich bei der Energie insbesondere aus der Reduzierung des CO_2-Ausstoßes und der Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe ergibt, und dem voraussichtlichen Wirtschaftswachstum, die objektiven Anforderungen an die Steigerung der Energieeffizienz im umfassenden Sinne und an die Erhöhung des Strukturanteils erneuerbarer Energien abzuleiten. Auf dieser Grundlage ist es dann vor allem Aufgabe der Politik, die konkreten Ziele und die Prämissen zu bestimmen sowie die Regelungen, Anreizsysteme und institutionellen Bedingungen im nationalen, EU und im globalen Maßstab zu schaffen, um diesen Erfordernissen gerecht werden zu können.

Es gibt einen relativ großen Entscheidungsspielraum mit sehr vielen Alternativen und Varianten, die zu bewerten sind (Technologiefolgenabschätzung) und die auch, vor allem soweit sie Probleme und Risiken des gesellschaftlichen Zusammenlebens betreffen oder weitgehende Auswirkungen auf kommende Generationen haben, der öffentlichen, demokratischen Diskussion und Meinungsbildung unterbreitet werden müssen. Alle ernsthaften Untersuchungen zur nachhaltigen Energiesicherung kommen zu der Schlußfolgerung, daß diese mit einer Fortsetzung der gegenwärtig dominierenden neoliberalen Orientierung auf „mehr Markt" und bessere Verwertungsbedingungen des Kapitals nicht lösbar ist. Sie setzt vielmehr eine weitaus stärkere staatliche und zivilgesellschaftliche Einflußnahme in Verbindung mit einer wirksameren Förderung von Wissenschaft/Forschung und darauf beruhenden Innovationen voraus. Die Umsetzung einer Strategie entschiedener Steigerung der Energieeffizienz, beschleunigter Erhöhung der Anteile erneuerbarer Energien und Senkung der Anteile fossiler Energien sowie, damit verbunden, der Begrenzung der CO_2-Emissionen, ist in hohem Grade politisch determiniert. Die politischen Einflüsse im nationalen Maßstab reichen von der Bereitstellung der erforderlichen ökonomischen und wissenschaftlich-technischen Ressourcen, über die Gestaltung solcher Instrumente und Regulierungsmechanismen, die Energieeinsparungen sowie eine grundlegende Erhöhung der Anteile regenerativer Energieträger stimulieren, bis zur Förderung eines die Umwelt schonenden und Energie sparenden Verhaltens der Menschen, die auch Veränderungen in der Lebensweise einschließen. Die globale Dimension nachhaltiger Energiesicherung und Reduzierung des CO_2-Ausstoßes erfordert auch und besonders im internationalen Maßstab ein koordiniertes, gemeinsames Vorgehen, dem sich bisher vor allem die USA aber auch andere Länder widersetzen.

Die bisherigen Beratungen des Arbeitskreises zur Energiesicherung haben, ähnlich wie im bisherigen gesellschaftlichen Diskurs, in einer Reihe wichtiger Fragen nicht zu einem Konsens geführt. Meinungsdifferenzen bestehen insbesondere zu folgenden Problemen:

- Welche Perspektive hat die Atomenergie, darin eingeschlossen die technische Realisierung von Hochtemperaturreaktoren sowie Fusionsreaktoren, wie sind die damit verbundenen Risiken im Verhältnis zu anderen Technologien der Energieerzeugung zu bewerten?
- In welchem Tempo können sich die erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung ökonomischer Kriterien entwickeln, kann die Begrenzung der CO_2 Emission in dem notwendigen Umfang allein durch die erneuerbaren ohne Kernenergie erreicht werden?

- Von welchen realistischen Zielsetzungen in der Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland, in den OECD-Ländern und in den Entwicklungsländern sowie weltweit sollte ausgegangen werden?
- Wie kann eine gerechtere Nutzung der Energieressourcen und der Verteilung der CO_2-Emission im globalen Maßstab, insbesondere zwischen „Nord" und „Süd", erreicht werden? Gibt es realistische Chancen, die bisherige Dominanz der wirtschaftlichen Interessen der USA gegenüber einer zukunftsorientierten Verringerung der CO_2-Emission durchzusetzen?

Zu aktuellen internationalen Fragen des Energie-Bereiches

Im Arbeitskreis wird versucht, in der aktuellen Energiediskussion, in der die verschiedensten Gruppeninteressen artikuliert werden, die wissenschaftlichen Schlüsselfragen herauszufinden und sie interdisziplinär und komplex zu diskutieren. Die Geo-/Erdwissenschaftler sind offensichtlich bei der Lösung folgender Probleme gefragt: Welche primären Energiequellen gibt es, wie stark sind sie, wie sind sie geographisch verteilt? Wie stark und in welchen Zeiträumen reagiert die natürliche Umwelt auf die Ausbeutung und den Verbrauch der primären Energiequellen? Das sind beides Fragen an die physische (naturwissenschaftlich-technische) Abteilung der Erdwissenschaften. Darüber hinaus und ebenso stark ist jedoch auch die sozial- (oder gesellschafts-) wissenschaftliche Abteilung der Erdwissenschaften gefragt; diese wird vor allem durch die ökonomische und politische Geographie vertreten.

Jede menschliche Gruppierung setzt in mehr oder weniger großem Maße Energie ein. Jedoch sind die Territorien, über die die einzelnen Gruppierungen verfügen, ganz verschieden mit natürlichen Energiequellen ausgestattet. Im Energie-Bereich sind Handel, Zusammenarbeit und auch Konflikte zwischen den Gruppierungen folglich unvermeidlich. Eine grundsätzliche These ist, daß in der modernen Gesellschaft die Energiefragen nicht individuell gelöst werden können. Dezentrale Lösungen zur Befriedigung des Energiebedarfs bleiben Insel- bzw. Nischenlösungen. Sie funktionieren nur unter bestimmten geographischen Gegebenheiten. Für die Lösung der Energieprobleme kommt deshalb die entscheidende Rolle den Staaten zu und sie wird von ihnen de facto auch so wahrgenommen.

Es wird seit wenigen Jahrzehnten allgemein anerkannt, daß 1. der Energieverbrauch der Menschheit als Ganzes ständig – anscheinend unaufhaltsam – wächst, 2. die Gefahr wächst, daß die bisher genutzten primären Energiequellen in absehbarer Zeit erschöpft sein werden und 3. der gewaltige Energieverbrauch sich in absehbarer Zeit für die Menschen negativ auf die

natürliche Umwelt auswirken kann. Es muß etwas getan werden! Wer muß womit beginnen? Die Antwort darauf kann nur durch detaillierte Analyse der Fakten gefunden werden. Es genügt nicht zu sagen, daß der Energieverbrauch der Menschheit als Ganzes wächst. Wichtig ist die Differenzierung: Der Energieverbrauch der Industrieländer wächst, weil der Verbrauch pro Kopf der Bevölkerung bei etwa gleich bleibender Bevölkerungsstärke wächst. Dagegen wächst der Energieverbrauch der Entwicklungsländer schon bei etwa gleich bleibendem Pro-Kopf-Verbrauch, weil die Bevölkerungszahl zunimmt. Hinzu kommt, daß der Energieverbrauch der sog. Schwellenländer, insbesondere der beiden bevölkerungsreichsten Länder VR China und Indien, noch zusätzlich deshalb wächst, weil ihre Wirtschaft in jüngster Zeit rasant wächst. Die Ansprüche der Entwicklungsländer an die Energieressourcen der Welt wachsen relativ und absolut. Konflikte mit den Industrieländern sind absehbar. Es genügt nicht zu sagen, daß die bisher genutzten primären Energiequellen in absehbarer Zeit erschöpft sein werden und für die Menschheit neue primäre Energiequellen erschlossen werden müssen. Wichtig ist die Differenzierung: Vor allem in den Industrieländern sind die bisher genutzten Ressourcen bereits heute weitgehend erschöpft. Diese Länder sind schon seit längerem auf Energieimporte angewiesen, und diese kommen aus Entwicklungsländern. Verschärft wird die Situation dadurch, daß nur einige wenige Entwicklungsländer über so große Ressourcen verfügen, daß sie exportieren können. Und in den meisten dieser Exportländer sind die politischen Verhältnisse alles andere als stabil. Ebenso wichtig ist, daß innerhalb der Gruppe der Industrieländer die USA auch bezüglich der Energieproblematik eine absolut herausragende Position besitzen. Ihr Energieverbrauch ist seit mehreren Jahrzehnten sowohl absolut wie auch im Pro-Kopf-Verbrauch weit größer, als es die Energieressourcen innerhalb des eigenen Territoriums ermöglichen. Ihren Zugriff auf die Energieressourcen in anderen Ländern der Welt sichern sie aggressiv mit ökonomischen, finanziellen und militärischen Mitteln. Die USA besitzen das weltweit größte Potential zur Erkundung, Erschließung und Gewinnung der primären Energiequellen. Neue Akzente hat die Energieproblematik durch den Zerfall der Sowjetunion erhalten. Die ehemalige Sowjetunion hatte innerhalb ihres Territoriums einen bedeutenden Anteil an den bekannten primären Energieressourcen der Welt erkundet. Alle ihre Nachfolgestaaten, soweit sie etwas davon abbekommen haben, sind eifrig bemüht, sie auf dem Weltmarkt gewinnbringend zu veräußern, was bei den Industriestaaten, aber auch bei VR China und Indien, auf großes Interesse stößt und großes Engagement ausgelöst hat. Allerdings: die Energie muß erst einmal auf

den Weltmarkt gebracht werden. Bei Erdöl und Erdgas heißt das: Es müssen Rohrleitungen von den Fördergebieten zu den Verbraucherländern, zumindest zu den Häfen mit Zugang zu den Weltmeeren, gebaut werden.

Wichtig ist die Differenzierung zwischen den verschiedenen Klassen von primären Energiequellen nach ihrem Gebrauchswert. Die Kernenergie muß gesondert betrachtet werden. Den höchsten Gebrauchswert in der modernen Welt hat das Erdöl. Alle Länder sind deshalb am stärksten am Energieträger Erdöl interessiert. Die Auseinandersetzungen dazu sind am größten und werden weltweit geführt. Erdgas besitzt bisher vor allem regionale Bedeutung, da der Transport hauptsächlich über Rohrleitungen erfolgen muß. Eine Alternative mit wachsender Bedeutung ist die Verflüssigung, die auch den Transport in Tankern und Tankfahrzeugen ermöglicht. Kohle ist weltweit reichlich verfügbar, ihr Transport und ihr Einsatz sind bequem. Hinderlich ist ihr Image als Verursacher von Klimaänderungen. Kohle ist in vielen Entwicklungsländern, insbesondere in VR China und Indien, am besten verfügbar. Die kommerziellen erneuerbaren Energien spielen in den internationalen Auseinandersetzungen im Energiebereich bisher keine aktive Rolle, höchstens als Argument in den Diskussionen zum anthropogenen Klimawandel. Wasserkraft wird in einigen Ländern, auch Entwicklungsländern, in denen die notwendigen geographischen Voraussetzungen bestehen, zur Deckung des Strombedarfs intensiv genutzt.

Die gegenwärtige Energiediskussion wird wesentlich durch den Interessengegensatz zwischen den Industrieländern und den Entwicklungsländern, in denen der weitaus größte Teil der Menschheit lebt, bestimmt. Macht, Leistungskraft und Wohlstand der Industrieländer beruhen letztlich auf dem vielfach höheren Einsatz von Primärenergie, wobei der von ihnen betriebene Raubbau auf Kosten der Entwicklungsländer unbestreitbar ist. Zu dem Entwicklungsweg, den die Industrieländer gegangen sind und dem sie de facto auch heute noch folgen, gibt es bisher noch keine im volkswirtschaftlichen Maßstab praktisch erprobte Alternative. Die Entwicklungsländer, unter ihnen besonders die Schwellenländer, folgen deshalb auf ihrem Weg zur höheren Entwicklung dem historischen Weg der Industrieländer. Dabei ist zu erwarten, daß die Gefährdung der globalen Umwelt, die von den Industrieländern durch die von ihnen praktizierte Nutzung der Primärenergie eingeleitet wurde, durch die beschleunigte Entwicklung der Entwicklungsländer vergrößert wird. Ob die jetzt propagierte Strategie der nachhaltigen Entwicklung von allen Ländern akzeptiert und umgesetzt werden wird, muß abgewartet werden. Viel wird davon abhängen, daß die Industrieländer mit gutem Beispiel voran-

gehen und den praktischen Nachweis für eine sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung der ganzen Gesellschaft auf diesem Wege erbringen.

Energiepolitik ist letztlich auch Machtpolitik. Das wird für jedermann durch das Verhalten der USA erkennbar. Als einziger verbliebener Supermacht sind deren Interessen weltweit. In das Verhalten der USA werden alle anderen Industriestaaten einbezogen, ob sie wollen oder nicht. Allerdings muß jeder einzelne dieser Staaten auch seine eigenen Interessen verfolgen, die nicht zuletzt durch seine geographischen Gegebenheiten bestimmt werden. Die Bundesrepublik Deutschland muß im Rahmen der Europäischen Union handeln, entsprechend ihrer geographischen Lage – am Westrand von Eurasien, in der Nähe der Krisenregion von Nordafrika bis Zentralasien, in der sich der weitaus größte Teil der weltweiten Erdöl- und Ergasressourcen der Welt befindet. Die sich jedoch unter der militärischen Aufsicht durch die USA befindet. Zumindest arbeiten die USA intensiv daran, eine solche Aufsicht zu erringen. Es lohnt sich, die geopolitische Strategie der USA, insbesondere in Eurasien, und deren Verflechtung mit ihrer weltweit angelegten Energiepolitik eingehender zu betrachten.

Während die Nutzung der fossilen primären Energiequellen – und damit auch die relevanten internationalen Beziehungen – in hohem Maße von den geographischen Gegebenheiten des Landes bestimmt wird, ist eine solche Abhängigkeit bei der Nutzung der Kernenergie nicht sofort erkennbar. Die geringe Abhängigkeit machte es den Industriestaaten möglich, die von den OPEC-Staaten in den siebziger Jahren ausgelöste Energiekrise u.a. durch forcierte Nutzung der Kernenergie zu überwinden. Heute ist jeder Staat, der die wissenschaftlichen und technologischen Voraussetzungen besitzt bzw. sie sich beschaffen kann, in der Lage, im politisch gewollten Umfang Kernenergie für die zivile Nutzung zu erzeugen. Der internationale Vertrag über die Nichtweitergabe von Massenvernichtungswaffen, bei denen an erster Stelle die Kernwaffen stehen, ist dafür kein Hindernis. Die Behandlung des Irans zeigt jedoch, daß dieser Vertrag von den USA als ein solches Hindernis eingesetzt wird.

Die Thematik „Sichere Versorgung ... mit Energie und Energie-Rohstoffen“ erfordert wissenschaftliche Betrachtungen, die auch bei der Beschränkung des Themas auf Deutschland eine globale, zumindest überregionale Dimension haben. Dazu eine erste, mehr umwelt- und wirtschaftspolitische Begründung: Die Forderung nach einer Umstellung der Energiewirtschaft wird aus der Befürchtung abgeleitet, daß die heutige Art der Energiegewin-

nung und des Energieeinsatzes das globale Klima in irreversibler Weise verändert. Der Anteil Deutschlands an der Einwirkung auf das globale Klima dürfte nicht bedeutend sein, da Deutschland flächenmäßig relativ klein ist und anscheinend auch nicht an einer bezüglich des Einflusses auf das Klima kritischen Stelle der Erdoberfläche liegt. Forderungen aus Deutschland zur Umstellung der Energiewirtschaft weltweit, um das globale Klima nicht zu gefährden, sind folglich nur dann glaubhaft und wirksam, wenn Deutschland sich auch in diesen Fragen als untrennbarer Teil der internationalen Staatengemeinschaft versteht und engagiert. Es darf international keinesfalls der Eindruck entstehen, daß Deutschland dabei irgendwelche nationalen Interessen verfolgt. Ansonsten würde international die in Deutschland dazu geführte Diskussion als rein akademisch und ohne praktische Bedeutung betrachtet werden.

Wichtiger ist die praktische Begründung: Deutschland ist beim heutigen Stand des Energieeinsatzes in Wirtschaft und Gesellschaft lebensnotwendig auf den Import von primären Energieträgern angewiesen. Der Energiebedarf in Deutschland ist quantitativ und qualitativ wesentlich größer als er aus einheimischen Quellen gedeckt werden kann. Deshalb muß jede Diskussion zur Energieversorgung für Deutschland die Wahl von entsprechenden Lieferländern und deren wirtschaftliche und politische Interessen einbeziehen. Offensichtlich sind die Zahl und die geographische Verteilung der Lieferländer umso schwieriger zu bestimmen, je anspruchsvoller in quantitativer und qualitativer Hinsicht der Energiebedarf in Deutschland ist. Als Lieferländer kommen in erster Linie die Länder mit großen Energieressourcen in Frage, die unmittelbar benachbart sind, zumindest sollen sie nicht allzu weit entfernt sein. Von großer Bedeutung sind auch die Transitländer für die Anlieferung der Energierohstoffe. Die deutschen Interessen kollidieren mit den Interessen vieler anderer Länder, darunter mit denen der Weltmacht USA.

Nun auch die geopolitische Begründung: Wie bei allen Ländern hängen Leistungskraft, Wohlstand und Macht Deutschlands vom quantitativen und qualitativen Energieeinsatz ab. Deutschland ist eine Mittelmacht mit manchen globalen Ambitionen, deren Handlungsfreiheit jedoch in vielfacher Hinsicht, nicht zuletzt auch geopolitisch beschränkt ist. Um die Energiewirtschaft in Deutschland bei tendenzieller Reduzierung des Einsatzes von Kohle, Erdöl und Erdgas auf den Einsatz der erneuerbaren Energien unter Verzicht auf die Kernenergie umstellen zu können, müssen auch diese Fragen befriedigend beantwortet werden.

Zur Verbindung naturwissenschaftlich-technischer und sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse als Grundlage für wissenschaftlich und nicht primär politisch begründete Entscheidungen

Entscheidungen, die perspektivische Lebensfragen der Menschheit betreffen, und um solche handelt es sich bei den Fragen perspektivischer Energiesicherung, sind immer politische Entscheidungen. Das Problem ist nicht, daß eine politische Entscheidung getroffen wird, sondern daß diese sich oft nicht bzw. zu wenig auf sichere wissenschaftliche Erkenntnisse stützt (häufig: stützen kann). Unser Anliegen besteht darin, politische Entscheidungen durch wissenschaftliche Erkenntnisse, Analysen und Argumente zu untermauern, so weit wie möglich zu objektivieren. Dabei sollten wir uns vor absoluten Urteilen hüten, wie: Auf das große Potenzial der Kernenergetik einschließlich Brüter- und Fusionstechnologien kann nicht verzichtet werden. Oder umgekehrt: In der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts muß die vollständige Ablösung des atomaren und fossilen Energieverbundsystems durch erneuerbare Energien erfolgen.

Um die Art und Weise und die bisherigen Ergebnisse der engeren Verbindung von sozialwissenschaftlichen mit naturwissenschaftlichen Argumenten zu charakterisieren, ist es notwendig, die in diesem Zusammenhang relevanten Beziehungen zwischen beiden Wissenschaftsgebieten etwas näher zu betrachten. Die beiden Gebiete haben im Zusammenhang mit der perspektivischen Versorgung der Menschheit mit Energie einen unterschiedlichen, spezifischen Gegenstand und argumentieren auch auf verschiedenen Ebenen. Die naturwissenschaftlich-technischen Disziplinen zeigen technisch mögliche Richtungen des Einsatzes von Primärenergie zur Energiegewinnung und der Bereitstellung verschiedener Formen von Gebrauchsenergie, deren Entwicklungs- und Effizienzpotenziale auf, während die sozialwissenschaftlichen (einschließlich der ökonomischen) Wissenschaften die verschiedenen Optionen bewerten und die ökonomischen, ökologischen und sozialen Konsequenzen – Technikfolgebewertung – aufzeigen sowie Aufgaben und Anforderungen an die weitere naturwissenschaftlich-technische Entwicklung begründen. Die Verbindung zwischen beiden erfolgt im Innovationsprozess, der Umsetzung technischer Prinzipien und ihrer breiten Anwendung. Die beiden Gebiete haben jedoch nicht nur unterschiedliche, spezifische Aufgaben und zu untersuchende Fragen zum Gegenstand, sondern müssen bei solchen Problemstellungen, die nur gemeinsam bearbeitet und gelöst werden können, zusammen wirken. Hierzu gehören insbesondere Einschätzungen zu ihren Ri-

siken, zu ihren Beiträgen für die Versorgungssicherheit und zu den Potenzialen der Erhöhung der Effizienz beim Einsatz und der Umwandlung bestimmter Energien sowie zur Erweiterung ihrer Nutzung. Die Unsicherheiten, Schwankungen in den prognostizierten Ergebnissen und Irrtumswahrscheinlichkeiten im Hinblick auf die zeitliche Realisierung grundsätzlich neuer technologischer Entwicklungen sowie des hierfür notwendigen Ressourceneinsatzes (z.B. zeitliche Realisierung des Hochtemperaturreaktors und des Fusionsreaktors, Entwicklung des Energiebedarfs insgesamt und nach größeren Weltregionen, Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz) erschweren eine komplexe gesellschaftliche und ökonomische Bewertung verschiedener technisch-technologischer Optionen. Die langfristige Energieentwicklung muß auf fundierten naturwissenschaftlich-technisch Erkenntnissen und darauf aufbauenden gesellschaftlichen, ökonomischen, sozialen und ökologischen Bewertungen beruhen. Diese setzen sich jedoch nicht spontan in eine optimale Energieentwicklung um. Hierzu bedarf es politischer Entscheidungen, insbesondere für eine langfristige Energiestrategie. Diese sind aus einem doppelten Grund notwendig: erstens weil aus den verschiedenen möglichst umfassend bewerteten Optionen die zu realisierenden Ziele und Aufgaben einer zukunftsorientierten, nachhaltigen und sicheren Energieversorgung – Ereichen der Klimaschutzziele, Veränderung der Energieträgerstruktur, Perspektive der Kernenergie, Erhöhung der Energieeffizienz, Stärkung der staatlichen Ressourcen für die Energieforschung, darunter für die erneuerbaren Energien – festgelegt werden müssen. Zweitens weil eine allein marktwirtschaftliche Regulierung das Erreichen der Ziele und Aufgaben der Energiestrategie verhindern wird. Hierfür ist eine stärkere gesellschaftliche Regulierung, der Einsatz staatlicher Instrumente, die ökonomische Förderung gewünschter und Benachteiligung unerwünschter Tendenzen einschließlich der Anwendung staatlicher Sanktionen notwendig.

Zur Ausarbeitung einer langfristigen Energiestrategie – Was können wir dazu sagen?

Bei den Studien zur Ausarbeitung einer langfristigen Energiestrategie gehen alle Bearbeiter selbstverständlich von der bestehenden Situation aus und von der Einschätzung, was im betrachteten Zeitraum möglich sein könnte. Und jeder hat eine Vision, was erstrebenswert ist. Es dürfte hilfreich sein, diese Umstände und ihre Konsequenzen für den praktischen Wert der entwickelten Strategien zu beschreiben.

In einer hoch entwickelten Gesellschaft gehört die Energiewirtschaft zu den grundlegenden Bereichen der Volkswirtschaft, die Vorleistungen für alle weiteren gesellschaftlichen Bereiche erbringt. Veränderungen ziehen Folgeänderungen in allen weiteren Bereichen nach sich. Änderungen in der Energiewirtschaft sind aufwendig, teuer und brauchen Zeit. Für grundlegende Veränderungen muß man Zeiträume von mindestens einem Jahrzehnt ansetzen, zumeist noch längere. Entscheidungen zu tief greifenden Veränderungen erfordern zudem die Zustimmung von großen gesellschaftlichen Bereichen, in denen viele Menschen tätig sind, die selbstverständlich ausgeprägte allgemeine und spezielle Interessen haben.

Am Anfang einer jeden langfristigen Energiestrategie muß ganz sicher die Forderung stehen, daß generell und überall mit dem natürlichen Energieangebot so rationell und effizient wie möglich umgegangen werden muß. Am effektivsten läßt sich in der modernen Gesellschaft diese Forderung mit ökonomischen Anreizsystemen durchsetzen. Gefragt sind hier vor allem die technischen und ökonomischen Wissenschaften aller Art. In unserem Arbeitskreis werden wir dazu wohl kaum mehr sagen können.

In der Gegenwart kann man wegen der vielfältigen überregionalen, sogar globalen Verflechtungen nicht mehr hoffen, eine Energiestrategie, die für einen längeren Zeitraum gelten soll, für ein Land isoliert von allen anderen Ländern ausarbeiten zu können. Jedes Land bildet für sich ein offenes System. Allein die Erde kann als geschlossenes System betrachtet werden. Die energetischen Einflüsse durch die Sonne sind ausreichend gut bekannt. Die entsprechenden Modelle sind allerdings nur sehr allgemein (pauschal, global). Entsprechend kann man auch keine detaillierten Aussagen erwarten. Die Trends sollten wir aber erkennen können. Die Trends können und müssen wir dann als Randbedingungen für strategische Betrachtungen für die einzelnen Länder und Regionen beachten. Je weiter die Strategie in die Zukunft reichen soll, umso notwendiger ist es, die weltweiten Verflechtungen und die globalen Gesetzmäßigkeiten zu beachten. Im Arbeitskreis könnten wir dazu beitragen, diese Problematik herauszuarbeiten.

Weltweit zu behandeln ist offensichtlich die vermutete Einwirkung des CO_2-Ausstoßes beim Umgang mit den fossilen Energieträgern auf die Entwicklung des globalen Klimas. Bisher unklar geblieben ist zum Beispiel aus allen diesen Modelluntersuchungen, wie sich die vermutete Einwirkung des CO_2-Ausstoßes in den verschiedenen Regionen auswirken wird (als Anstieg des Meeresspiegels, Häufung von extremen Wettererscheinungen oder ähnliches). Dennoch steht außer Frage, daß es Risiken gibt, die gefährlich sein können, und der CO_2-Ausstoß deshalb generell reduziert werden muß. Damit

muß sofort begonnen werden, und es muß soviel wie möglich getan werden. Im Arbeitskreis haben wir diesen Komplex ausgiebig behandelt.

Niemand kann mehr bestreiten, daß die Weltressourcen an fossilen Energieträgern, besonders an denen mit den günstigsten Gebrauchseigenschaften: Erdöl, in absehbarer Zeit erschöpft sein werden. Wann das endgültig der Fall sein wird, kann niemand exakt sagen. Ein Jahrhundert werden die Ressourcen aber kaum noch ausreichen. Der Ersatz muß vorbereitet werden, je früher und effektiver umso besser. In erster Linie sind dabei die hoch entwickelten Länder gefordert, die ihren Wohlstand diesen Ressourcen verdanken und sie bisher am ausgiebigsten genutzt haben und nutzen. Sie werden es nicht verhindern können, daß die Entwicklungsländer diese „schönen Dinge" ebenfalls ausgiebig nutzen wollen, wodurch die Forderung nach dem Ersatz noch verstärkt wird.

Die praktische Vernunft sagt, daß jedes Land wahrscheinlich nur noch eine Generation lang Zeit hat, einen unter seinen spezifischen Bedingungen quantitativ und qualitativ ausreichenden Ersatz zu finden, d.h. die entsprechenden, möglichst zukunftsfähigen Energietechnologien zu finden und zu erproben. In allen Diskussionen darüber, welche anderen Energietechnologien die Technologien auf der Basis der fossilen Energieträger eventuell ergänzen oder ersetzen könnten, werden heute drei Kategorien genannt:

a. die nichtkonventionellen fossilen Energieträger,
b. die modernen erneuerbaren Energien,
c. die Kernenergie.

Von den relevanten Untersuchungen müssen drei grundsätzliche Fragen beantwortet werden:

a. Ist das Potential der Technologie quantitativ ausreichend, um den Energiebedarf der Menschheit, eventuell auch nur des betreffenden Landes, zu decken?
b. Können die Risiken der Technologie ausreichend beherrscht werden?
c. Ist die Technologie zukunftsfähig?

Anscheinend können die erforderlichen Untersuchungen nicht im wünschenswertem Maße wissenschaftlich objektiv geführt werden. Unübersehbar ist, daß die Auftraggeber nur Ausarbeitungen bezahlen und bekannt machen, die ihren Interessen entsprechen. Dabei können auch die Interessenlagen in der Wissenschaft nicht ausgeschlossen werden. Am schwierigsten dürfte die Untersuchung der Frage sein, ob eine Technologie als zukunftsfähig angesehen werden kann. Dabei werden die eingangs erwähnten Visionen eine große Rolle spielen, und das müßten wir so wohl auch explizit sagen.

Anhang 1

Energieversorgung – einige aussagekräftige Eckdaten

Beziehung zwischen Wirtschaftskraft (Entwicklungsstand) und Primärenergieverbrauch

Am Anfang des 21. Jahrhunderts gilt für die hoch- und höher entwickelten Länder (USA, Kanada, Europäische Union, ehemalige Sowjetunion, Türkei, Israel, Japan, Australien, Neuseeland, Südafrika):

Einwohnerzahl	$1{,}5 \cdot 10^9$
PEB pro Kopf	$50 \cdot 10^3$ kWh a^{-1}
BSP pro Kopf	$15 \cdot 10^3$ US$ a^{-1}

und für die wenig entwickelten Länder (Mittel- und Südamerika, Afrika (ohne Südafrika), Asien (ohne Japan und Westasien), Ozeanien (ohne Australien und Neuseeland)):

Einwohnerzahl	$4{,}5 \cdot 10^9$
PEB pro Kopf	$7 \cdot 10^3$ kWh a^{-1}
BSP pro Kopf	$1 \cdot 10^3$ US$ a^{-1}.

Es besteht für die ganze Welt in den letzten Jahrzehnten eine ausgeprägte lineare Korrelation zwischen dem Bruttosozialprodukt pro Kopf (BSP, US$ a^{-1}) und dem Primärenergiebedarf pro Kopf (PEB, 10^3 kWh a^{-1})

$$BSP = c^{(W)} \cdot PEB$$

mit der Energiekennziffer $c^{(W)} = 0{,}14$ US$ kWh^{-1}. Die Energiekennziffer $c^{(W)}$ der wenig entwickelten Länder hat heute immer noch den gleichen Wert, wie er für die ganze Welt im Jahr 1970 (vor der globalen Energiekrise) galt, in den hoch- und höher entwickelten Ländern ist die Energiekennziffer dagegen etwa um einen Faktor 2 gestiegen.

Primärenergieverbrauch zu Beginn des 21. Jahrhunderts

Weltweit hat der Primärenergieverbrauch in den letzten drei Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts um ca. 70 % zugenommen.

Anteil der Energieträger an der Primärenergieversorgung weltweit:

Erdöl			34,8 %	
Kohle			23,5 %	
Erdgas			21,1 %	
Kernenergie			6,8 %	
Erneuerbare Energie			13,8%	
davon:	brennbare EE und Abfälle		11,0 %	
	Wasserkraft		2,3 %	
	andere		0,5 %	
	davon:	geothermische Energie		0,442 %
		Sonnenenergie		0,039 %
		Windenergie		0,026 %
		Gezeitenenergie		0,004 %

Anteil der Weltregionen am Primärenergieverbrauch:

Nordamerika	29 %
Austral-Asien	28 %
Europa	21 %
GUS	10 %
Süd- und Mittelamerika	5 %
Naher Osten	4 %
Afrika	3 %

Verbrauch von Endenergie

Der Primärenergiebedarf ist im Mittel um etwa einen Faktor 1,4 größer als der Bedarf an Endenergie. Etwa 20 % der Endenergie werden im globalen Mittel in Form von elektrischer Energie geliefert, der Rest besteht zum größten Teil aus chemischer Energie.

Energie wird als Endenergie in verschiedenen Sektoren für verschiedene Aufgaben benötigt. Den größten Bedarf an Endenergie haben die Sektoren

Industrie, Verkehr, private Haushalte, Kleinverbraucher.

(Unter Kleinverbrauchern versteht man i. A. die Einrichtungen, die eine ähnliche Form des Energiebedarfs haben wie die privaten Haushalte. Dazu gehören Gebäude der öffentlichen Verwaltung, Krankenhäuser, Gastronomiebetriebe, Krankenhäuser usw.)

Der relative Anteil dieser vier Sektoren beträgt

in den hoch- und höherentwickelten Ländern

30 % 30 % 30 % 10 %,

in den wenig entwickelten Ländern (bedingt durch den geringeren Lebensstandard)

40 % 20 % 20 % 20 %.

Mit der Endenergie werden in den hoch- und höher entwickelten Ländern in jedem dieser Sektoren anteilig die folgenden Aufgaben bewältigt:

	Bewegung	Raumwärme	Prozesswärme	Beleuchtung und Information
(Anteil der Elektroenergie)	(36%)	(33%)	(31%)	(0,5%)
Industrie	30%	6% (1%)	3 % (1 %)	21 % (5 %)
Verkehr	30%	30 % (7 %)		
Priv. Haushalte	30%	25 % (5 %)		
Kleinverbraucher	10%			

Bei der Raumwärme sind die Temperaturen kleiner als die Körpertemperatur, bei der Prozesswärme höher. Der Anteil der Endenergie, die für Beleuchtung und Information benötigt wird, ist so gering, daß er bei Diskussionen über die Entwicklung der Weltenergieversorgung nicht berücksichtigt werden muß.

Anteil der Energieträger an Erzeugung von Elektroenergie im Jahre 2000 weltweit:

Kohle	39 %	
Kernenergie	17 %	
Erdgas	17 %	
Erdöl	8 %	
Erneuerbare Energien	19 %	
Davon: Wasserkraft		17 %
Brennbare EE und Abfälle		1 %
Andere		1 %

Förderung, Reserven und Ressourcen der nicht-erneuerbaren Energierohstoffe im Jahre 2001
(Quelle: BGR 2002)

Förderung – insgesamt 334 EJ		
davon:	Erdöl	44,0 %
	Hartkohle	24,5 %
	Erdgas	24,0 %
	Uran	4,6 %
	Weichbraunkohle	2,8 %
Reserven – insgesamt 35.477 EJ		
davon:	Hartkohle	49,8 %
	konventionelles Erdöl	17,9 %
	konventionelles Erdgas	14,4 %
	nicht-konvent. Erdöl	7,8 %
	Thorium	2,6 %
	Uran	1,8 %
	nicht-konvent. Erdgas	0,2 %
Ressourcen – insgesamt 194.051 EJ		
davon:	Hartkohle	53,5 %
	nicht-konvent. Erdgas	25,1 %
	Weichbraunkohle	6,3 %
	nicht-konvent. Erdöl	5,4 %
	Uran	3,7 %
	konventionelles Erdgas	3,5 %
	Thorium	0,6 %

Regionale Betrachtung der nicht-erneuerbaren Energierohstoffe im Jahre 2001
(Quelle: BGR 2002)

Verbrauch nicht-erneuerbarer Energierohstoffe (EJ)

Region	Erdöl	Erdgas	Kohle	Uran	Gesamt	Anteil
Europa	32	16	14	10	72	20,7%
GUS	7	18	8	2	35	10,0%
Afrika	5	2	4	0	11	3,1%
Naher Osten	9	6	0	0	15	4,4%
Austral-Asien	41	10	43	5	98	28,3%
Nordamerika	45	25	25	8	102	29,6%
Lateinamerika	9	3	1	0	13	3,8%
Welt insgesamt	147	80	94	25	346	100,0%
Anteil spezieller Staatengruppen:						
OECD	91	57	46	22	217	62,6%
EU-15	26	17	9	8	61	17,5%
OPEC	11	11	1	0	23	6,7%

Förderung nicht-erneuerbarer Energierohstoffe (EJ)

Region	Erdöl	Erdgas	Hart-kohle	Weich-braun-kohle	Uran	Gesamt	Anteil
Europa	14	10	4	5	0	32	9,7%
GUS	17	23	8	1	3	53	15,8%
Afrika	16	4	5	0	2	27	8,1%
Naher Osten	45	7	0	0	0	52	15,5%
Austral-Asien	16	9	41	2	4	71	21,3%
Nordamerika	27	24	23	2	6	81	24,3%
Lateinamerika	13	3	1	0	0	18	5,3%
Welt insgesamt	147	80	82	9	15	335	100,0%
Anteil spezieller Staatengruppen:							
OECD	43	35	33	10	9	130	38,8%
EU-15	7	7	2	2	0	18	5,4%
OPEC	61	12	2	0	0	75	22,5%

Reserven nicht-erneuerbarer Energierohstoffe (EJ)

Region	Erdöl		Erdgas		Kohle		Uran	Thorium	Gesamt
	konv.	nicht-konv.	konv.	nicht-konv.	Hart-kohle	Weich-braunk.			
Europa	139	42	213	6	4.054	569	4	252	2.276
GUS	629	397	1.787	3	4.460	144	146		7.567
Afrika	470	24	375		917	0	78	21	1.881
Naher Osten	3.961	418	1.869		5				6.254
Austral-Asien	252	126	393	3	5.552	719	268	270	7.584
Nordamerika	354	1.297	240	48	5.198	522	133	108	7.900
Lateinamerika	546	460	224		480	0	18	255	1.984
Welt insgesamt	6.354	2.761	5.105	60	17.666	1.954	644	905	35.447
Anteil spezieller Staatengruppen:									
OECD	507	1.736	542	53	8.014	1.456	398	498	13.204
EU-15	59	43	144	3	750	398	12	0	1.378
OPEC	4.741	837	2.326	3	108	38			8.053

Ressourcen nicht-erneuerbarer Energierohstoffe (EJ)

Region	Erdöl		Erdgas		Kohle		Uran	Tho-rium	Gesamt
	konv.	nicht-konv.	konv.	nicht-konv.	Hart-kohle	Weich-braunk.			
Europa	152	84	226	1.869	11.963	1.779	259	293	16.625
GUS	890	1.255	3.048	6.073	45.359	3.533	1.304		61.463
Afrika	434	251	355	2.764	5.049	3	859	176	9.891
Naher Osten	904	502	1.350	3.649	30	28	5		6.469
Austral-Asien	268	962	720	8.012	22.214	1.893	2.930	59	37.057
Nordamerika	573	5.523	866	5.851	18.292	4.895	1.372	176	37.548
Lateinamerika	304	1.883	313	4.560	978	92	526	293	8.948
Welt insgesamt	3.525	10.460	6.879	32.779	103.884	12.224	7.256	996	178.002
Anteil spezieller Staatengruppen:									
OECD	759	5.858	1.143	10.059	35.800	1.422	3.040	469	58.549
EU-15	62	42	98	1.174	8.976	976	184		11.513
OPEC	1.209	2.092	1.669	5.524	357	202	74		11.125

Struktur des Energieverbrauchs in Deutschland zu Beginn des 21. Jahrhunderts (Quelle: AG Energiebilanzen)

Primärenergieverbrauch 2004 (in Mill. T SKE):

Energieträger		Anteile in %
Mineralöle	179,4	36,4
Erdgas	110,4	22,4
Steinkohlen	66,2	13,5
Braunkohlen	56,2	11,4
Kernenergie	62,2	12,6
Wasser- und Windkraft	5,6	1,2
Außenhandelssaldo Strom	- 0,8	- 0,2
Sonstige	13,4	2,7
Insgesamt	492,6	100,0

Struktur des Energieverbrauches nach Sektoren 2000 (in Mill. T SKE):

		Anteile in %
Primärenergieverbrauch	490,0	
Verbrauch und Verluste im Energiesektor	138,3	28,2
nichtenergetischer Verbrauch	37,4	7,6
Endenergieverbrauch insgesamt	314,3	64,1
davon: Verkehr	93,8	19,1
Industrie	82,3	16,8
Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	138,2	30,1

Anhang 2

Projekt-Aufgabe „Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen“ – Sammlung der berücksichtigten und von weiterführenden Publikationen

Die Sammlung ist nur grob geordnet. Sie enthält nur einige der Publikationen, die von den Autoren der Vorträge in den Workshops verwendet wurden und dort bereits zitiert wurden.

Die in der Sammlung aufgeführten Publikationen sind zum großen Teil allgemein verständlich. Soweit die Quellenangabe unvollständig ist, ist der Artikel im Internet zu finden.

Am Ende der Sammlung werden relevante Suchbegriffe genannt, zu denen im Internet in Wikipedia, der freien Enzyklopädie, ausführliche Darstellungen mit weiterführenden Links zu finden sind. Die Artikel werden laufend aktualisiert. Die Adresse von Wikipedia lautet: http://de.wikipedia.org/wiki/

Klimawandel und Energie

1. Was der Klimawandel kostet. 10. UN-Klimaschutzkonferenz. Berliner Zeitung, 15.12.2004
2. Claudia Kemfert: Die ökonomischen Kosten des Klimawandels. Wochenbericht des DIW Berlin 42/04
3. Umwelt – Acht Jahre sind vergangen, seit im japanischen Kyoto das internationale Klimaschutzabkommen unterzeichnet wurde. Heute tritt es in Kraft. Berliner Zeitung, 16.02.2005
4. Auswärtiges Amt: Klimaschutz. Stand Februar 2005
5. Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
6. Das Kyoto-Protokoll hält Klimawandel nicht auf. Die Welt, 16.02.2005
7. BMU: Klimaschutz Aktuell, Info zum Thema. 16.02.2005: H. Graßl: Warum die Klima-Skeptiker Unrecht haben
8. ICSU: A Framework for the International Polar Year 2007-2008. November 2004
9. Deutsche Kommission für das Internationale Polarjahr 207/08: Der deutsche Beitrag zum Internationalen Polarjahr 2007/08. Eine Vision für Forschung und innovative Technologien. 08.12.2004
10. Richard B. Alley: Das sprunghafte Klima. Spektrum der Wissenschaft, März 2005, S. 42 ff
11. Verdienste um den Klimaschutz. Das Kyoto-Protokoll fördert die Reduktion von Treibhausgasen. Einige Projekte sind erstaunlich lukrativ. Berliner Zeitung, 21.07.2005
12. Stefan Rahmstorf: Klimadebatte. Das ungeliebte Weder-noch. Die Zeit,

10.02.2005, Nr. 7, www.zeit.de
13. Marcel Crok: Risse im Klima-Konsens. Technology Review Nr. 3/2005. www.heise.de/tr/artikel/56529
14. R. Glaser, Ch. Beck, H. Stangl: Zur Temperatur- und Hochwasserentwicklung der letzten 1000 Jahre in Deutschland. Klimastatusbericht 2003, DWD. www.geographie.uni-freiburg.de/Publikationen/GlaserBeckStrangl2004/TemperaturUndHochwasserentwicklung
15. Stefan Militzer: Klima, Umwelt, Mensch (1500-18000): Studien und Quellen zur Bedeutung von Klima und Witterung in der vorindustriellen Gesellschaft. http://mitglied.lycos.de/mili04/?
16. Zentrale für Unterrichtsmedien im Internet e.V. (ZUM): Wissenschaftliche Fakten zur Atmosphäre, Strahlung, CO2, Wetter, Klima, Thermodynamik. Global Warming früher. www.zum.de/Faecher/Materialien/beck/13/bs13-73.htm
17. Jörg F. Negendank: Klima im Wandel: Die Geschichte des Klimas aus geobiowissenschaftlichen Archiven. www.gfz-potsdam.de/bib/pub/Schule/neg_kiw_0209.pdf
18. KIHZ – Natürliche Klimavariationen in Historischen Zeiten bis 10.000 Jahren vor heute. Sommerschule September 2001: Holozäne Klimavariabilität: Synthese von Proxydaten und Klimamodellen. www.gfz-potsdam.de/pb3/pb33/kihzhome/kihz06/summerschool
19. AWI: Paleoklimadynamik – Konzept: Regionale und globale Klimaänderungen auf Paläozeitskalen. www.awi-bremerhaven.de/Modelling/Paleo/Konzept.html
20. EGBs E-Learning: Umweltbelastung und Umweltschutz. Informationen aus der Vergangenheit – Eisbohrkerne und andere Proxydaten. www.biokurs.de/Skripten/bs11-32.htm
21. Ottmar Edenhofer: Globales Umweltmanagement angesichts des Klimawandels. www.pik-potsdam.de/~edenhof/stdzfinal.pdf

Energetik - Allgemein

1. K. Viemann: Die Energieträger der Welt: Vorkommen, Reichweite, Ressourcenverteilung und weltpolitische Auswirkungen. Studienarbeit TU Braunschweig, Juli 2003
2. R. Klingholz (Berlin-Institut): Energie. Ca. 2002
3. Misereor, Das Hilfswerk: Energie ist knapp. 2005
4. Was kommt nach dem Öl? Die Energien der Zukunft. National Geographic Deutschland, August 2005, S. 40 ff
5. Bundesverband WindEnergie e.V. BWE, Hintergrundinformation: Externe Kosten. Die vergessenen Kosten der Energieversorgung. www.wind-energie.de
6. Dietrich Pelte: Die Zukunft unserer Energieversorgung. Physikalische Grundlagen und Folgerungen. SS 2002. http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrslg/

Energie-Bilanzen

1. World Energy Council. Survey of Energy Resources 2001. Overview

2. AG Energiebilanzen: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2004 auf Vorjahresniveau
3. AGEB, AG Energiebilanzen: Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland
4. BP Global: Record Demand drove Energy Markets in 2004. Press Release 14.06.2005
5. BP Statistical Review of World Energy: 2003 in Review,
6. BP 2004 Statistical Review of World Energy
7. EUROSTAT: Energieverbrauch 2002 im Ländervergleich
8. K. Siekermann (HAW Hamburg): Welt-Energieverbrauch pro Kopf und Jahr. 23.06.05
9. Energie, Statistiken. www.erdkunde-wissen.de, 21.09.05
10. BWE Hintergrundinformation: Endliche Rohstoffe. www.wind-energie.de

Kohle

1. DEBRIV Bundesverband Braunkohle: Braunkohle in Deutschland 2005 – Profil eines Industriezweiges (15.05.05)
2. GVSt Gesamtverband des deutschen Steinkohlenbergbaus: Steinkohle 2004. Sichere Energie wichtiger denn je. Oktober 2004
3. W. Clement, Rede, 21.04.2005 zur Eröffnung der Veranstaltung „Energiemix der Zukunft".
4. F. May, J.P. Gerling, P. Krull (BGR): Underground Storage of CO2. Ca. 2002
5. RAG und STEAG: Energien für das neue Jahrtausend. Studie 2002

Erdöl, Erdgas

1. Learn-Line, Agenda 21: Erdöl, Erdgas: Daten, Statistiken, Infografiken. 30.05.05
2. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung: Erdöl- und Erdgasreserven in der Bundesrepublik Deutschland am 1. Januar 2005
3. P. Kehrer (BGR): Das Erdöl im 21. Jahrhundert – Mangel oder Überfluß. Vortrag 10.03.2000
4. H. Rempel (BGR): Geht die Kohlenwasserstoff-Ära zu Ende? Vortrag 23.05.2000
5. Deutsche Energie-Agentur, 2. Mobilitätsdiskurs „Schritte zu einer postfossilen Mobilitätskultur", 27.04.2005: J. Schindler: Das Ende des billigen Erdöls / E. Kuhla, Berichterstatter 1. Teil: Das Ende des billigen Erdöls: Worauf haben wir uns einzustellen? /. Voigt: Entwicklung des Verkehrsaufkommens: Weltweite Prognosen
6. Kampf ums Erdöl. Die Suche nach dem letzten Tropfen. Süddeutsche Zeitung, Wissen. 01/2005, S. 52 ff
7. Gas aus dem langen Lindwurm. Ingenieure wagen sich in die Tiefsee und erschließen das Gasfeld Ormen Lange vor der Küste Norwegens. Berliner Zeitung, 25.05.2004
8. Vorbei an Feindesland. Die neue Pipeline von Baku nach Ceyhan versorgt Europa

und die USA mit Öl vom Kaspischen Meer. Berliner Zeitung 24.05.2005
9. Erdöl und Erdgas im Iran. Commodity Top News Nr. 23. BGR 2005
10. Erdöl und Erdgas im Irak. Commodity Top News Nr. 18. BGR 2003
11. Erdöl/Erdgas Materialien. Terra-Alexander-Datenbank. www.klett-verlag.de 13.07.05
12. Ein zweiter Golf? Mittelasiens Öl- und Gaspotential. PGM 5/2003. www.klett-verlag.de
13. Erdölreserven am Arabischen Golf. Terra-Alexander-Datenbank. 2003. www.klett-verlag.de
14. Erdöl und Erdgas aus deutschen Quellen. www.erdoel-erdgas.de
15. Die Nordsee im Öl. Greenpeace. http://webplaza.pt.lu
16. Carmen Junghanns: Die Erdöl- und Erdgaslagerstätten der Nordsee. 2000. www.geo.tu-freiberg.de
17. Infoblatt Alternativen zum Erdöl. Terra-Alexander-Datenbank. 2004. www.klett-verlag.de
18. Infoblatt Transportwege des Erdöls. Terra-Alexander-Datenbank. 2004. www.klett-verlag.de
19. Erdöl-Lagerstätten. Terra-Alexander-Datenbank. www.klett-verlag.de 13.07.05
20. Entstehung von Erdöl. Terra-Alexander-Datenbank. 2003. www.klett-verlag.de
21. Kazakhstan International Oil and Gas Exhibition and Conference (KIOGE), Almaty, Kazakhstan, 2005. www.bisnis.doc.gov
22. Moscow International Oil an Gas Exhibition and Conference (MIOGE) 2005. www.mioge.ru
23. Caspian Oil and Gas Exhibiton and Conference, Baku, Azerbaijan, 2005. www.caspianoilgas.co.uk
24. Petroleum Economist. www.petroleum-economist.com
25. 18th World Petroleum Congress, 25-29 September 2005, Johannesburg, RSA. www.18wpc.com
26. Neftegaz. www.neftegaz.ru

Kernenergie

1. Bundesamt für Strahlenschutz: Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland. Übersicht Stand 15.11.2003
2. Energie-Fakten: Wir über uns (Initiative). 30.05.05
3. Energie-Fakten: 30.05.05
4. FAQs zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Ist eine langfristig sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle in Gesteinen der Erdkruste möglich?
5. F. Umbach: Nuclear Energy Issues: Global Dimensions and Security Challenges. Im Symposium „Nuclear Issues in the Post-September 11 Era. March 2003"
6. IPPNW/EUROSOLAR: Fakten zur Atomenergie. Hintergrundinformationen. Info 09.09.2004
7. E. Melzer: Nukleare Waffen und Kernenergie – das wirkliche Risiko. 23.03.2001

8. N. Gottschalk, C. Hubig, N. Mazous (Uni Stuttgart): Untersuchung zur Nachhaltigkeit der Kernenergie. Studie 31.05.2002
9. INRA (Europe) for European Commission, DG Energy and Transport: European and Radioactive Waste. Report, 19.04.2002
10. Auswärtiges Amt: IAEO (Internationale Atomenergie-Organisation) Stand Juni 2004
11. Agenda 21, Lexikon: IAEO (Internationale Atomenergie-Organisation) / IAEA (International Atomic Energy Agency). 19.06.05
12. Anti-Atom-Lexikon: Länderübersicht – Anzahl der AKW (2001). 19.06.05
13. International Atomic Energy Agency: Latest News and Announcements. 19.06.05
14. IAEA: Nuclear Safety and Security. 19.06.05
15. IAEA: The Promise of Underground Geological Repositories. Staff Report 23.01.2003
16. IAEA: Country Waste Profile Reports for Reporting Year 2000. Country Germany
17. ITAS-News 14.01.05 (Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis 13 (Dez. 2004), Nr. 13): Konferenzbericht –Technik in einer fragilen Welt
18. EU-Projekt – The Institutionalisation of Ethics in Science Policy
19. ITAS-Workshop zur Endlagerung nuklearer Abfälle in Deutschland
20. ITAS-Tagung „Nachwachsende Rohstoffe – Forschungsprojekte für den Ländlichen Raum“
21. International Energy Agency (IEA). An Overview. Home 28.06.05
22. OECD, Nuclear Energy Agency (NEA): Society and Nuclear Agency: Towards a Better Understanding. Report 2002
23. OECD, NEA: The Strategic Plan of the Nuclear Energy Agency 2005-2009
24. Ein heißes Geschäft: In Karlsruhe lagern seit Jahren 70 Tonnen Atommüll. Das strahlende Material soll jetzt in Glas eingeschmolzen werden. Berliner Zeitung, 19.07.2005
25. Nuclear energy – The benefits of an unpopular sector. RTDinfo, Nr. 40, February 2004
26. Nuclear energy – There are risks and risks. RTDinfo, Nr. 40, February 2004
27. Nuclear energy – Waste management: a crucial matter. RTDinfo, Nr. 40, February 2004
28. Eberhard Wagner: Wie ist der Stand beim Ausstieg aus der Kernenergie in Schweden? www.energie-fakten.de
29. David Gugerli: Kernenergienutzung – ein nachhaltiger Irrtum der Geschichte? Nova Acta Leopoldina NF 91, Nr. 339, 331-342 (2004)

Erneuerbare Energien

1. BMU: Entwicklung der erneuerbaren Energien – Aktueller Sachstand – Stand November 2004
2. T. Promny: Hausarbeit Alternative Energien. Ca. 2003
3. Bundesverband WindEnergie e.V.: BWE Marktübersicht 2005, www.wind-energie.de

4. BWE Hintergrundinformation: Datenblatt Windenergie in Deutschland. Zuletzt aktualisiert: 13.04.2005. www.wind-energie.de
5. DENA: Deutsche Energie-Agentur startet energiewirtschaftliche Studie zur Integration von Windkraftwerken in das Verbundsystem. Hintergrundpapier zur Pressekonferenz der DENA am 08.09.2003
6. Windkraft schwächt Energieversorgung. Studie der Deutschen Energie-Agentur. Berliner Zeitung, 10.01.2005
7. Zwischen Sturm und Flaute. Alternative Energie – Könnte die Windkraft Europas Hochspannungsleitungen lahm legen? Berliner Zeitung, 11.01.2005
8. Deutsche Energie-Agentur: Netzstudie. (Ankündigung) 14.01.05
9. P. Pentschew, M. Kuntz (Uni Rostock): Untersuchungen zur Umwandlung der Meereswellenenergie in elektrische Energie mit Hilfe von Piezoelementen. Ca. 1998
10. Sonnenstrom statt Frankenwein: In der Nähe von Würzburg entsteht das größte Solarkraftwerk der Welt. Berliner Zeitung 10.05.2005
11. Blumenthal, Gert (Herausgeber): Solarzeitalter – Vision und Realität. Konferenzband einer Tagung vom 11. bis 13. September 2003 auf Schloß Augustusburg. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät, Band 13, trafo verlag 2004
12. Bescheidener Anfang. Heute geht das erste deutsche Erdwärmekraftwerk ans Netz bei Neustadt-Glewe. Berliner Zeitung, 12.11.2003
13. Das deutsche Ausbaupotential Erneuerbarer Energien im Stromsektor. EUROSOLAR-Studie über die Möglichkeiten eines Verzichts auf neue konventionelle Großkraftwerke. Version 21.12.2004, Aachen
14. DLR: Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. Executive Summary, Stuttgart 16.04.2005
15. Misereor, Das Hilfswerk: Energie aus Wasser und Wind. 2005
16. Irm Pontenagel: Keine Alternative. Allein die Erneuerbaren Energien haben eine Zukunft. Eurosolar.org, 01.06.05
17. Die primäre Energiewirtschaft wird wieder primär. Antwort auf die fossile Energiekrise. 7. Eurosolar-Konferenz, 17.-18.02.2005
18. Ludwig Lindner: Wie sind die Aussichten einer solaren Wasserstoffwirtschaft? www.energie-fakten.de
19. Photovoltaik. www.energieinfo.de/eglossar/
20. Photovoltaisches Kraftwerk. www.energieinfo.de/eglossar
21. Performance von Photovoltaik-Anlagen. www.bine.info/meta/
22. Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e.V. (UVS): Hintergrundinformationen. www.solarwirtschaft.de
23. UVS: Solarenergie für Deutschland. www.solarbusiness.de
24. Energie-evolution.de: Nachhaltige Energieversorgung mit regenerativen Technologien. Startseite. Die Seite zur Energiewende. www.energie-evolution.de
25. Energie-Evolution: Die Energiewende. www.energie-evolution.de/wende/wende.htm

26. Energie-Evolution: Konventionelle Energieerzeugung. www.energie-evolution.de/konventionell/konventionell.htm
27. Energie-Evolution: Wasserkraft. www.energie-evolution.de/wasser/wasser.htm

Energie-Effizienz

1. Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Grünbuch über Energieeffizienz oder Weniger ist mehr.
2. European Commission, DG for Energy and Transport: Intelligent Energy – Europe. EIE is the Community's support programme for non-technological actions in the field of energy efficiency and renewable energy sources. Overview 29.06.2005

Energieforschung

1. Wissenschaftsrat: Stellungnahme zur Energieforschung. 04.01.1999
2. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WBGU: Jahresgutachten 1996. Welt im Wandel – Herausforderung für die deutsche Wissenschaft. Zusammenfassung für Entscheidungsträger
3. Rat für Nachhaltige Entwicklung: Effizienz und Energieforschung als Bausteine einer konsistenten Energiepolitik. Endfassung vom 11.10.2004
4. Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrage des BMU. Kurzfassung, Februar 2004
5. Konzept der Energieforschung der Schweiz 2004 bis 2007. Zusammenfassung
6. BMWA: Innovation und neue Energietechnologien. Das 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. 1. Juni 2005-07-05
7. Schwerpunkt Wasserstoff. Energie für die Zukunft. Viel zu teuer oder die beste Wahl? (mit weiterführenden web-links). Spektrum der Wissenschaft, Juni 2005, S.86 ff
8. BMU: Förderkonzept „Photovoltaik Forschung 2004-2008", Stand: Juni 2004

Meinungsumfragen zur Zukunftsenergie

1. Das Orakel hat geschrieben … und gibt Empfehlungen für die künftige europäische Energieversorgung ab. Berliner Zeitung, 26.11.2004
2. EurEnDel. Technology and Social Visions for Europe's Energy Future – A Europe-wide Delphi Study. Version 1.2, July 2004, Summary Report, November 2004

Energiepolitik

1. K. Töpfer: Rede zur Konferenz „Energie für morgen. Vom Öl zum solaren Wasserstoff". 01.03.2002
2. M. Deshaies (Geograph. Institut, Uni-Marburg): Energie und Umwelt in Frankreich und Deutschland. 30.05.05
3. Rat für Nachhaltige Entwicklung – News 08.12.2004: Perspektiven nach dem Öl
4. J. Auer (Deutsche Bank Research): Energieperspektiven nach dem Ölzeitalter. Workshop DBR 02.12.2004
5. Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Mitteilung der Kommission an den Rat und an das Europäische Parlament „Die Zusammenarbeit mit den Ent-

wicklungsländern im Energiebereich“. 17.07.2002
6. BMU, Mitteilung: Atomausstieg steht nicht in Frage. 03.03.2005
7. The White House: National Energy Policy. Overview. Reliable, Affordable, and Environmental Sound Energy for America’s Future. 2002
8. National Commission on Energy Policy: Bipartisan Commission Issues Strategy to Address Long-Term U. S. Energy Challenges. Press Release 14.01.2005
9. F. Umbach (DGAP): Chinas Energiepolitik. Globale Dimensionen und Auswirkungen. In: Internationale Politik 1/2001
10. Hans-Josef Fell, MdB: Globale Solarwirtschaft – Eine Chance auch für Entwicklungsländer. 29.06.2005
11. O. Preuß (Financial Times Deutschland): Energie für die Zukunft. Bei innovativen Energieträgern sollte Deutschland eine Pionierrolle spielen. 20.04.2005
12. KfW: Förderung der Entwicklungsländer Energie und Umwelt. September 2003
13. K. Traube, H. Scheer: Kernspaltung, Kernfusion, Sonnenenergie – Stadien eines Lernprozesses. Solarzeitalter 2/98, S. 22 ff
14. Verknappung fossiler Energieressourcen. Beschluß der BAG Energie, 12.2003. www.energienetz.de
15. Peter Hennicke, Michael Müller: Weltmacht Energie. Herausforderung für Demokratie und Wohlstand. Hirzel-Verlag, Stuttgart, 2005
16. Herrmann Scheer: Energieautonomie. Eine neue Politik für erneuerbare Energien. Kunstmann, München, 2005
17. Die deutsche Kreditanstalt für Wiederaufbau versucht in Brasilien Einfluss auf die Privatisierung der Energiewirtschaft zu nehmen. www.german-goreign-policy.com 13.07.05
18. Klaus-Peter Schmid: Die kleine Ölkrise. Der Rohstoff kostet so viel wie nie zuvor – trotzdem schadet das der Wirtschaft kaum. Die Zeit, 43/2004. http://zeus.zeit.de 13.08.04
19. Rot/grüne Energiepolitik – was ist das? Meinungsbeeinflussung durch Politik und Medien. www.klimaschutz-durch-kernenergie.de 12.08.05
20. Energy Policy Act 2005. http://energycommerce.house.gov
21. Manfred Mai: Steuerungstheoretische Überlegungen über die veränderte Rolle des Staates bei technischen Infrastrukturen. Vortrag 15.06.2001. www.politik.uni-essen.de
22. Warum hat sich in Deutschland kein integrierter nationaler Mineralölkonzern gebildet? www.diplomica.com/db/diplomarbeiten8140.html
23. Hans-Heinrich Sander: Deutsche Energiepolitik in der Sackgasse? – Konsequenzen aus dem AkEnd-Prozess. Rede 10.05.05 in Nürnberg. www.umwelt.niedersachsen.de
24. Ottmar Edenhofer: Energiepolitik in globaler Verantwortung. www.stimmen-der-zeit.de/StdZ_09_03_5_Edenhofer.pdf
25. Leopoldina: Deutsche Energieforschung und Energiepolitik auf dem Prüfstand. Thesenpapier 17.12.2003. www.sturmlauf.de/SingleDocs/Leopoldina.pdf

Geopolitische Aspekte des Energiebereiches

1. P. Reuber: Conflict Studies and critical geopolitics – theoretical concepts and recent research in political geography. Abstract. GeoJournal, January 2000
2. F. Umbach (Deutsche Gesellschaft für Auswärtige Politik): Internationale Energiesicherheit zu Beginn des 21. Jahrhunderts. 2004
3. F. Umbach (DGAP): Europäische Energiesicherheit. Die Problematik internationaler Ordnungspolitik zu Beginn des 21. Jahrhunderts. In Reader Sicherheitspolitik. Redaktionsschluß 15.10.2002
4. R. Nabiev: Geopolitische Neuordnung im Kaukasus, Mittleren Osten und im Zentralasien. Eurasisches Magazin 06-03, 25.06.2003
5. German Foreign Policy: Hintergrundbericht : Deutsche „Geopolitik“ und der Kampf um die Energiequellen. 23.08.2004
6. German Foreign Policy: Informationen zur deutschen Außenpolitik ca. 2003: Bundesregierung will Expansion deutscher Energiekonzerne fördern. BDI-Positionen zur Energiepolitik. Plädoyer für „Moderne Geopolitik“ bei deutscher Energieversorgung
7. P. Knoedel (BP Deutschland): Geopolitik und Energieversorgung. 10.04.2001
8. German Foreign Policy, 05.12.2004: Unbeherrschbar. Bericht über „Gazprom“.
9. Beziehung voller Energie. Hannover-Messe – Erdöl und Erdgas aus Russland werden immer wichtiger für die deutsche Wirtschaft. Berliner Zeitung, 11.04.2005
10. Weltordnung – Indien hat 1,1 Milliarden Einwohner, eine boomende Wirtschaft und besitzt Kernwaffen – so ein Land haben die USA lieber zum Partner als zum Gegner. Und man kann viele AKWs dorthin verkaufen: Die neue atomare Allianz / Energiemarkt Indien - Türöffner für die amerikanische Nuklear-Industrie. Berliner Zeitung, 20.07.2005
11. Wer bestimmen kann, wie die Pipeline-Karte aussieht ... wird die Zukunft eines riesigen Teils der Welt bestimmen. Brisante Pipelines am Kaspischen Meer. 2002. www.uni-kassel.de
12. Hella Engerer, Christian von Hirschhausen: Die Energiewirtschaft am Kaspischen Meer: Enttäuschte Erwartungen – Unsichere Perspektiven. DIW, Berlin, Juli 1998. Diskussionspapier Nr. 171. www.diw.de/deutsch
13. Reinhard Blomert: Der Traum ist ausgeträumt. Wird die Petroleum-Ära im Krieg der Kulturen enden? Berliner Zeitung, 1.0/11.09.2005, Magazin
14. William Engdahl: Demokratie oder Energie und Geopolitik. Washingtons Interesse an der Ukraine. 2005. www.swg-hamburg.de
15. Parwini Zora, Daniel Woreck: Indien beteiligt sich am Kampf ums Öl. April 2005. World Socialist Web Site. www.wsws.org
16. Gerhard Ott: Globale Aspekte einer nachhaltigen Energieversorgung. 18.03.2002. www.econsense.de/pdf/2_veranstaltungen_und_dialog/
17. Peter Knoedel: Faszination Wissenschaft. Geopolitik und Energieversorgung. Konrad-Adenauer-Stiftung, 10.04.2001. http://www1.kas.de/aktionsthemen/

18. William Engdahl: Läuft Washington gegen den „BRIC-Wall“? Kalter Krieg um Energie. Mit einem strategischen Bündnis fordern Brasilien, Russland, Indien und China die Vereinigten Staaten heraus. Freitag, 11.03.2005
19. Bestimmen Medien und Banker das Regelwerk? Energie ist Element der Infrastruktur. 4. Internationales Energiesymposium, Salzburg-Fuschl, 24.09.2003. www.energysymposium.at
20. GTZ- Konferenz 29.09.05: Mission Statement. Energieeffizienz – Gemeinsames Bemühen um die Verringerung der Energieabhängigkeit
21. Friedemann Müller: Sicherheit der Energieversorgung – Zu kompliziert für Europas Politiker? Stiftung Wissenschaft und Politik Berlin, August 2003. www.swp-berlin.org
22. Rudolf Botzian: Multilaterale energietechnische Zusammenarbeit. Verbindung zum G8-Aktionsplan für Klima, Energie und nachhaltige Entwicklung. Stiftung Wissenschaft und Politik Berlin, August 2005. www.swp-berlin.org
23. Friedemann Müller: Geopolitische Marktstörungen bei endlichen Ressourcen. Z. f. Energiewirtschaft 29 (2005) 3. www.swp-berlin.org
24. F. William Engdahl: Mit der Ölwaffe zur Weltmacht. Der Weg zur neuen Weltordnung. Studien von Zeitfragen. 36. Jg. Internetausgabe 2002. www.jahrbuch2002.studien-von-zeitfragen.net/Weltmacht 02.10.05
25. Der Ölfaktor in Bushs „Krieg gegen die Tyrannei“. August 2005. www.das-gibt’s-doch-nicht.de/seite3580.php

Strategie der nachhaltigen Entwicklung

1. Umweltschulen: Energie und nachhaltige Entwicklung. 20.06.05
2. Rat für Nachhaltige Entwicklung: Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. 2002
3. Bundesregierung: Fortschrittsbericht zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie September 2004
4. Stellungnahme der Bundesregierung zu den Empfehlungen des Rates für Nachhaltige Entwicklung zu „Effizienz und Energieforschung als Bausteine einer konsistenten Energiepolitik“. BMWA, April 2005
5. WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit. Jahresgutachten 2003. Zusammenfassung für Entscheidungsträger.
6. ITAS-Dissertationsprojekt „Zielkonflikte im integrativen Nachhaltigkeitskonzept der HGF – Auftreten und Lösungsmöglichkeiten am Beispiel der nationalen Bioenergieziele Deutschlands“
7. BRICS+G: Sustainability and Growth in Brazil, Russia, India, China, South Africa and Germany. Ein Kooperationsprojekt der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit und des Rates für Nachhaltige Entwicklung. Ab 2005
8. Rat für Nachhaltige Entwicklung – Bericht „Evaluierung der Nachhaltigkeitspolitik in Deutschland. Konferenz im Rahmen des Projektes BRICS+G Sustainability and Growth“, 09.06.2005

9. OECD-DAC Policy Brief: Strategien für nachhaltige Entwicklung. September 2001
10. Rat für Nachhaltige Entwicklung – News 26.01.2005: Lissabon-Strategie: Wie wird die EU zum erfolgreichsten Wirtschaftsraum der Welt?
11. Rat für Nachhaltige Entwicklung – News 23.02.2005: US-Report skizziert die Welt im Jahr 2020
12. Rat für Nachhaltige Entwicklung – News 29.06.2005: Europa lebt auf Kosten anderer. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WBGU: Jahresgutachten 2004. Welt im Wandel – Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik. Zusammenfassung für Entscheidungsträger, 2004.
13. Karl-Werner Brand, Volker Fürst: Bedingungen einer Politik für Nachhaltige Entwicklung – Endbericht. Oktober 2001. www.gsf.de/ptukf/bmbf/
14. Reinhard Coenen, Armin Grunwald (Hrsg.): Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland – Analyse und Lösungsstrategien. Berlin: edition sigma. 2003
15. Wachstum, Wachstum über alles. Debatte. www.attac.de/debatte/wachstum_xvi.php 17.08.05
16. Jürgen Leibiger: Die Linke und das Wirtschaftswachstum. Versuch einer Positionsbestimmung. 2003. www.attac.de/debatte/sozialismus_supplement.pdf
17. Manuela Risch, Andreas Wolf: Wirtschaftswachstum. Eine Auseinandersetzung mit den Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit. Aargau, 03.09.2004. www.naturama.ch/projekte/nachhaltigkeit/Wirtschaftswachstum.pdf
18. Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amora Loins, Hunter Lovins: Faktor vier, doppelter Wohlstand, halbierter Verbrauch. Der neue Bericht des Club of Rome. Droemer Knaur, 1997

Geopolititik, Sicherheitspolitik

1. German Foreign Policy: Hintergrundbericht: Deutschland auf dem Wege zur Atommacht. 14.01.2002
2. German Foreign Policy: Hintergrundbericht: Das deutsche „Netzwerk raumwissenschaftlicher Forschungseinrichtungen“. 16.10.2002
3. German Foreign Policy: Hintergrundbericht: Bundesakademie für Sicherheitspolitik. 21.03.2004
4. Bundesregierung: Aktionsplan der G8 zur Nichtverbreitung von Massenvernichtungswaffen. 22.06.05
5. H. Großmann (Dresdener Studiengemeinschaft Sicherheitspolitik DSS): Der Irak und die Geopolitik der USA. Vortrag 23.02.2003
6. E. Woit (DSS): Geostrategische und ideologische Aspekte der EU-Integration Europas. Vortrag 27.11.2004
7. B. Teschke: Geopolitik und Marxismus. In: Historisch-Kritisches Wörterbuch des Marxismus, Band 5, 2001, S. 322–344
8. R. Freitag-Wirminghaus (Bundes für politische Bildung): Zentralasien und der Kaukasus nach dem 11. September: Geopolitische Interessen und der Kampf gegen den Terrorismus. In: Politik und Zeitgeschichte B 8/2002

9. Z. Brzezinski: Die einzige Weltmacht. Amerikas Strategie der Vorherrschaft. 1997
10. H. Münkler (HU Berlin): Die neuen Kriege. Berliner Zeitung, 24./25.11.2004
11. Erich Reiter: Ein Essay zur neuen globalen Geopolitik. www.bmlv.at/pdf_pool/publikationen/ 13.07.05
12. Horst Großmann: Eurasien – geopolitischer Angelpunkt. www.sicherheitspolitik-dss.de 13.07.05
13. Martin Malek: Russland – eine Großmacht? Bestandsaufnahme und Zukunftsperspektiven. Studien und Berichte zur Sicherheitspolitik 4/2003. www.bmlv.gv.at/pdf_pool/publikationen/
14. Rußland zwischen NATO und ESVP. Auf dem Weg zur Eurasischen Union? Eurasisches Magazin Ausgabe 03-05 www.eurasischesmagazin.de
15. China wird langfristig doch zur Supermacht aufsteigen. Eurasisches Magazin 03-05
16. Rußland wird ein eurasischer Integrationsknoten. Eurasisches Magazin 03-05
17. Rußland und Europa. „Putin ist kein Diktator". Eurasisches Magazin 03-05
18. Land der Zukunft. Neue Weltmacht Indien. Eurasisches Magazin 09-04
19. Massenvernichtungswaffen. Die EU braucht keine Atombombe. Eurasisches Magazin 10-04
20. G8 Gleneagles Summit, 6-8 July 2005. Chair's Summary. www.g8.gov.uk/servlet/
21. Die USA. http://www.uni-muenster.de/PeaCon/s-eliten/weltpolitik
22. Amnesty International Deutschland. Themenbericht. Allgemeine Erklärung der Menschenrechte. http://www2.amnesty.de
23. Johannes Winter: Die Entwicklungspolitik im Wandel der Zeit. 29.03.2004. www.weltpolitik.net/print/1468.html
24. Christian Hacke: Zuviel Theorie? Zuwenig Geschichte? Eine kritische Zwischenbilanz der Disziplin der Internationalen Beziehungen in Deutschland. Studie 2003. www.politik.uni-bonn.de
25. Mark Mauderer: Brasilien: Zwölf Jahre liberaler Reformkurs vor dem Ende? www.weltpolitik.net/print/1511.html
26. Hans Wagner: Aufstieg Chinas. Weltmacht des „Asiatischen Jahrhunderts". Eurasisches Magazin 07-05. www.eurasischesmagazin.de
27. Kai Ehlers: Strategiedebatte: Rußland – ein Entwicklungsland neuen Typs. Eurasisches Magazin 09-05. www.eurasischesmagazin.de
28. Alexander Rahr: Rußlandpolitik: Berlin – Moskau: 2005 bis 2008. Eurasisches Magazin 09-05. www.eurasischesmagazin.de
29. Emanuel Todd: Weltmacht USA. Ein Nachruf. Piper Verlag München, 2004
30. Detlef Bimboes: Strategiedebatte: Rußlands Rolle als Rohstoffschleuder ist tragisch. Eurasisches Magazin 09-05. www.eurasischesmagazin.de
31. Alexander Pilny: Das Asiatische Jahrhundert. Eurasisches Magazin 09-05. www.eurasischesmagazin.de
32. Kay Möller, Markus Tidten: China und Japan: der ungeheilte Bruch. SWP-Aktuell 20. Mai 2005. www.swp-berlin.org

33. Rahul Peter Das: Europa im Strategiefeld Eurasien. www.bmlv.gv.at/pdf_pool/publikationen/09_sse_01_ege.pdf
34. Wladimir Maximenko: Der Kampf gegen Eurasien. Ein Jahrhundert US-amerikanischer Geostrategie in der Alten Welt. 24.04.2001. www.eussner.net/print_artikel_2004-10-29_23-24-08.html
35. Tim Johnson: A 21st century powerhouse: China rising. Jul. 18,2005 www.realcities.com/mld/krwashington/12161566.html
36. Ulrich Berger, Christoph Stein: Der Aufstieg Chinas zur politischen und wirtschaftlichen Weltmacht. Heise Telepolis 28.04.2005. www.telepolis.de/r4/artikel/19/19949/1.html
37. Alexander Skiba: Geostrategische Aspekte der Türkei. Kann Europa von den USA lernen? FU Berlin, Otto-Suhr-Institut. 15.03.2003. www.geopowers.com/Machte/Sudflanke/Skiba_T_urkei.pdf
38. Dietrich von Kyaw: Die strategische Bedeutung der Türkei für die Europäische Union. Vortrag in der Europäischen Akademie Berlin, 13.10.2003. www.eab-berlin.de/berichte/k-o/berichtkyaw131993.pdf
39. Geopolitik und Antiterrorkampf. Peter Gowan über die globalen Strategien der USA. SoZ-Sozialistische Zeitung, Juni 2002, Seite 11. www.vsp-vernetzt.de/soz/020611.htm
40. Markus Kaiser: Eurasien: Neo-imperialistischer Diskurs oder gesellschaftliche Realität? Working Paper No 337, 2001. www.uni-bielefeld.de/sdrc

Allgemeines

1. Eric Hobsbawm: Das Zeitalter der Extreme. Weltgeschichte des 20. Jahrhunderts. Dtv, 4.Auflage 2000
2. Parviz Khalatbari: Aus dem Gleichgewicht. Die globalen Probleme aus demographischer Sicht. Scripta Mercturae Verlag, St. Katharinen 2001
3. Helwig Schmitz-Glintzer: Das neue China. Von den Opiumkriegen bis heute. C.H. Beck, München. 3. aktualisierte Auflage 2004
4. Peter J. Bowler: Viewegs Geschichte der Umweltwissenschaften. Vieweg Braunschweig/Wiesbaden. 1997
5. Donald Cardwell: Viewegs Geschichte der Technik. Vieweg Braunschweig/Wiesbaden. 1997

Relevante Suchbegriffe in Wikipedia

http://de.wikipedia.org

(Das Datum bezeichnet den letzten Tag der Durchsicht des Artikels und damit den letzten Stand der Bearbeitung.)

Club of Rome. 14.08.05
Die Grenzen des Wachstums. 14.08.05
Brundtland-Bericht. 14.08.05
Entwicklungstheorie. 14.08.05
Industrieland. 14.08.05
Entwicklungsland. 14.08.05
Schwellenland. 14.08.05
OECD Organisation for Economic Co-operation and Development. 28.06.05
Wirtschaftswachstum. 14.08.05
Bruttoinlandsprodukt. 18.08.05
Makroökonomie. 29.08.05
Globalisierung. 03.10.05
Nachhaltigkeitswissenschaft. 04.08.05
Kyoto-Protokoll. 16.2.05
Infrastruktur. 09.08.05
Energieversorgung. 09.08.05
Kategorie: Energieversorger. 30.09.05
Kategorie: Mineralölunternehmen. 30.09.05
Kraftwerksmanagement. 30.09.05
Energie. 30.09.05
Größenordnung (Energie). 30.09.05
Energiebilanz (Umwelt). 30.09.05
Primärenergie. 30.09.05
Sekundärenergie. 30.09.05
Endenergie. 30.09.05
Nutzenergie. 30.09.05
Energieträger. 21.06.05
Erdöl. 04.06.05
Erdgas. 05.06.05
Kernenergie. 14.07.05
Atomkraftgegner. 07.08.05
Atomausstieg. 04.08.05
Erneuerbare Energie. 04.05.05
Photovoltaik. 27.09.05
Brennstoffzelle. 27.09.05
Wasserstoffwirtschaft. 27.09.05
Geothermie. 27.09.05
OPEC. 04.06.05
Ölkrise. 13.08.05
Geopolitik. 21.06.05
Geopolitische Kriegstheorien. 13.07.05
Nahostkonflikt. 04.06.05
Imperialismus. 22.06.05
Neokolonialismus. 22.06.05
Project for the New American Century. 22.06.05
Der Krieg der USA gegen den Terrorismus. 22.06.05
Staat. 07.09.05
Menschenrechte. 13.08.05
Afrika-Eurasien. 02.10.05
Eurasien. 02.10.05
Indien. 21.09.05
Wirtschaft Indiens. 21.09.05
Brasilien. 07.09.05