Alfred Voss und Friedrich Niehaus

Die Zukunft des Weltenergiesystems

Globale Energieszenarien: 1. Status quo – 2. Einsatz der Kernenergie – 3. Gleichgewichtsstrategien

■ *Weltbevölkerung / Lebensstandard / Energieträger / Fossile Brennstoffe / Kohle / Kernenergie / CO_2-Problem*

Die Vorstellungen über die langfristige Zukunft der Menschheit werden heute von zwei grundsätzlich konträren Visionen beherrscht [1, 2, 3].

- *Die einen, die Neo-Malthusianer oder Katastrophisten, glauben, daß die aus einer weiter steigenden Weltbevölkerung resultierenden Ernährungsprobleme sowie die durch weiteres Wirtschaftswachstum sich verschärfenden Umweltprobleme und die Erschöpfung der Rohstoffreserven dieser Erde zu einer Katastrophe mit kaum vorstellbaren Folgen führen, wenn nicht unverzüglich drastische und weitreichende Maßnahmen zur Beendigung des Bevölkerungswachstums und des Wirtschaftswachstums eingeleitet werden.*
- *Die anderen, die technologischen Optimisten oder Wachstumsfetischisten, argumentieren, daß die Vorräte der wichtigsten Rohstoffe praktisch unbegrenzt sind und daß, die Entwicklung entsprechender Technologien vorausgesetzt, die Erde durchaus in der Lage ist, eine um ein Vielfaches größere Bevölkerung ausreichend zu ernähren und mit einem materiellen Lebensstandard auszustatten, der den der Amerikaner heute um ein Mehrfaches übersteigt.*

Wem soll man Glauben schenken? Es verwundert nicht, daß in Anbetracht derart auseinanderklaffender Zukunftsprojektionen die Ableitung konkreter Entscheidungen zur Gestaltung einer wünschenswerten Zukunft der Menschheit aus diesen Szenarien äußerst schwer fällt. Eine Schlüsselrolle bei allen Überlegungen über mögliche Zukünfte der Menschheit nimmt dabei die Energie ein, denn die Lösung des Rohstoffs- wie auch des Ernährungsproblems hängen im entscheidenden Maß von einer ausreichenden Energiebereitstellung ab. Wir wollen nun in diesem Aufsatz einige Szenarien der Entwicklung des Weltenergiesystems erläutern, und zwar unter besonderer Berücksichtigung ihrer Auswirkungen hinsichtlich der CO_2-Emissionen und der damit verbundenen klimatischen Effekte. Über die Grundlagen des CO_2-Problems ist bereits in den Heften 17 und 18 ausführlich berichtet worden.

Dr. A. Voss, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich.

Geb. 1945; Hauptarbeitsgebiete: Systemanalyse in den Bereichen Energie, Wirtschaft und Umwelt.

Dr. F. Niehaus, International Atomic Energy Agency, Wien.

Geb. 1944; Hauptarbeitsgebiete: Umwelt, Risiko und Risikoakzeptierung.

Dieser Aufsatz ist Teil einer Studie, die von der Kernforschungsanlage Jülich mit finanzieller Unterstützung der Volkswagenstiftung durchgeführt wurde.

Versucht man die gegenwärtige weltweite Energiesituation mit einigen Schlüsselbegriffen zu charakterisieren, so lauten diese

- krasse Unterschiede im pro-Kopf-Verbrauch an Energie
- geographische Ungleichgewichte zwischen Energieverbrauch und Energiereserven
- Abhängigkeit von Erdöl und Erdgas.

Weltweit gesehen, aber auch differenziert nach sozialen Gruppen, bestehen heute erhebliche Unterschiede in dem pro-Kopf-Verbrauch an Energie. So ist z. B. der pro-Kopf-Energieverbrauch in den Industrieländern etwa 20mal größer als in den Entwicklungsländern, und der Durchschnittsamerikaner verbraucht etwa 60mal mehr Energie als ein Inder.

Für den überwiegenden Teil der Weltbevölkerung, sowohl in den Entwicklungs- als auch in den Industrieländern ist heute die Verbesserung ihrer materiellen Lebensbedingungen entweder eine das Überleben sichernde Notwendigkeit und/oder ein wünschenswertes Ziel.

Allein deshalb und wegen der Zunahme der Weltbevölkerung muß auch in Zukunft mit erheblichen Steigerungen des Energieverbrauchs, auch in den Industrieländern, gerechnet werden. Die Schaffung der prinzipiellen Möglichkeiten zur Deckung dieses künftigen Energiebedarfs ist somit eine der notwendigen Voraussetzungen zur Angleichung des Lebensstandards zwischen den entwickelten und unterentwickelten Staaten, sowie zum Ausgleich sozialer Unterschiede in den einzelnen Ländern selbst; sie ist damit gleichzeitig ein notwendiger

Beitrag zum Abbau von politischem Konfliktpotential.

Wenn also auch in Zukunft mit einer weiteren Steigerung des Energieverbrauchs zu rechnen ist, so gewinnt die Frage nach den vorhandenen Energievorräten und ihrer Verteilung eine besondere Bedeutung. An der Deckung des heutigen Weltenergiebedarfs von etwa 8 Milliarden t SKE (Steinkohleneinheiten) sind das Erdöl und das Erdgas mit zusammen etwa $^2/_3$ beteiligt. Die Kohle deckt etwa 30% und der Rest wird durch Wasserkraft und Kernenergie bereitgestellt. Diese Abhängigkeit unserer Energieversorgung von Erdöl und Erdgas ist deshalb so bedenklich, da ihre Reserven im Vergleich z. B. zu den Kohlevorräten um etwa einem Faktor 10 geringer sind und sich in absehbarer Zeit erschöpfen werden.

Neben dieser ungünstigen Vorratssituation ist die Situation, insbesondere beim Erdöl, noch durch ein Ungleichgewicht zwischen Energieproduktion und Energieverbrauch in den wichtigsten Wirtschaftsräumen der Welt gekennzeichnet. So müssen z. B. die meisten Mitgliedsländer der Europäischen Gemeinschaft und Japan nahezu ihren gesamten Ölbedarf durch Importe, im wesentlichen aus dem Nahen Osten decken. Auch die USA werden in Zukunft verstärkt auf Ölimporte angewiesen sein, da ihre heimische Produktion in den letzten Jahren zurückgegangen ist. Die Probleme, die aus einer derartig ungleichen Verteilung von Primärenergieproduktion und Energieverbrauch resultieren können, hat die „Ölkrise" des Jahres 1973 drastisch verdeutlicht.

Die aufgrund der Vorratssituation absehbaren Erschöpfungstendenzen bei Erdöl und Erdgas – die kürzlich veröffentlichte Untersuchung des „Workshop on Alternative Energy Strategies" [7] kommt zu dem Ergebnis, daß bereits zwischen 1985 und 1995 die Ölproduktion die Ölnachfrage nicht mehr befriedigen können wird – führen notwendigerweise zu tiefgreifenden Änderungen unserer Energieversorgungsstruktur. Für diesen Übergang unserer heute vorwiegend auf Erdöl und Erdgas basierenden Energieversorgung auf eine langfristig ressourcenseitig praktisch nicht limitierte Energieversorgung stehen uns im Prinzip die in der *Tabelle* (S. 629) aufgelisteten Energieträger zur Verfügung.

Betrachtet man die in der *Tabelle* angegebenen theoretisch nutzbaren Potentiale der Kohle, Kernspaltung, Sonnenenergie, Kernfusion und der Geothermie, so wird ganz deutlich,

- **daß die der Menschheit von der Natur zur Verfügung stehenden Energiequellen auch in Anbetracht eines künftig weiter steigenden Energieverbrauchs nicht knapp sind.**

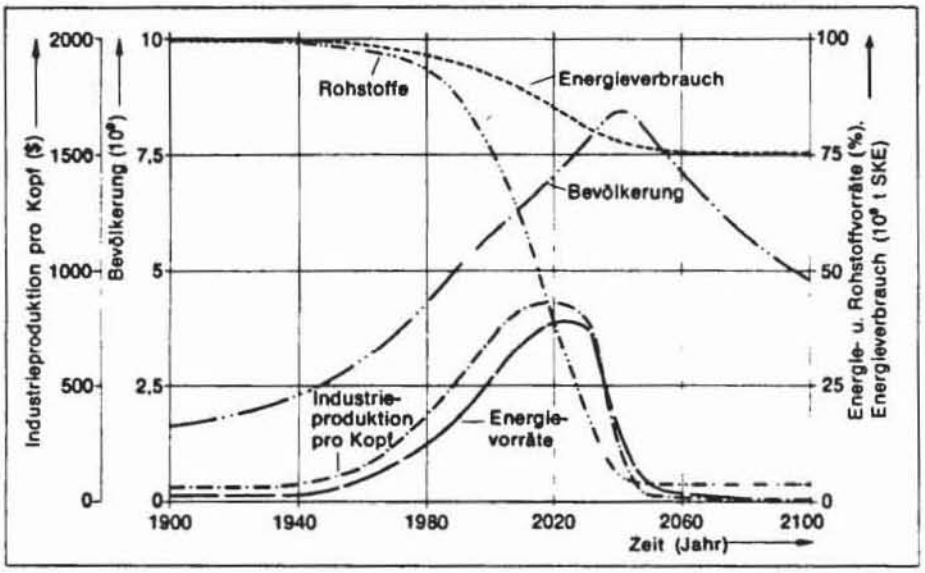

Bild 1

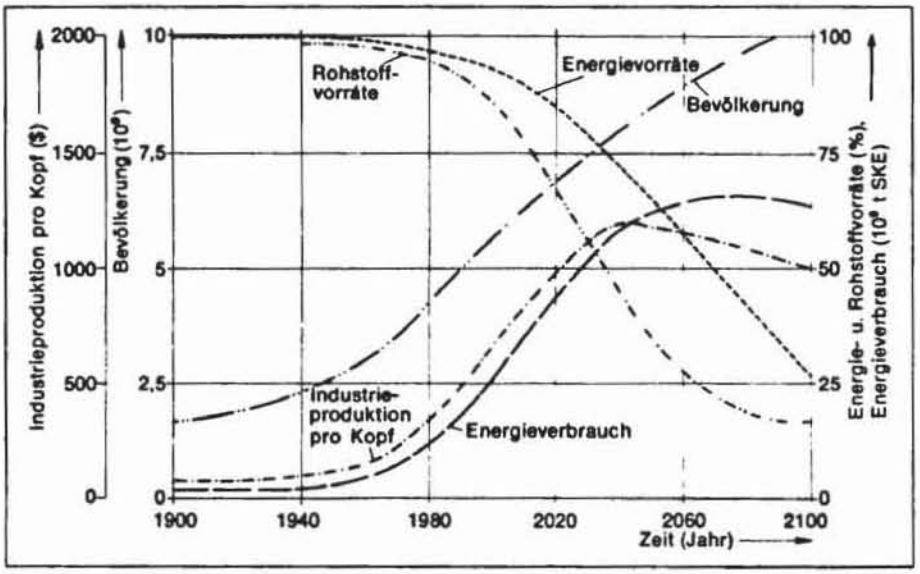

Bild 2

Bild 1: Status-quo-Szenario. Spätestens 2050 erfolgt ein Zusammenbruch.
Bild 2: Szenario wie Bild 1, zusätzlich mit Rohstoffrezyklierung. Die Bevölkerung wächst steil an, der Zusammenbruch wird lediglich hinausgeschoben.

Wenn dem so ist, worin besteht dann aber das Energieproblem?

Worin besteht eigentlich das Energieproblem?

Es ist heute allgemein akzeptiert, daß der Energie sowohl im Rahmen der Lösung der langfristigen Rohstoff- als auch der globalen Ernährungsprobleme, also für die materielle Entwicklung des Weltsystems, eine zentrale Rolle zukommt. Weiterhin hat die kurze Analyse der gegenwärtigen Energieversorgungssituation gezeigt, daß die Vorräte der Hauptstützen unserer heutigen Versorgung, nämlich Erdöl und Erdgas, sich in absehbaren Zeiten erschöpfen werden. Dies bedingt einen Übergang unserer Energieversorgung auf einen oder besser gesagt eine geeignete Kombination der uns zur Verfügung stehenden ressourcenseitig praktisch nicht begrenzten Energieoptionen Kohle, Kernspaltung, Sonne, Kernfusion oder Erdwärme.

- **Die gewaltigen Veränderungen, die mit diesem Übergang verbunden sein werden, machen das eigentliche Energieproblem aus; insbesondere die Frage, ob wir während dieses Übergangs immer ausreichende und kostengünstige Energiemengen zur Verfügung stellen können, um ökonomische und damit soziale Katastrophen zu vermeiden.**

Integriert in die übrigen miteinander eng verflochtenen Probleme des Weltsystems lautet die entscheidende Frage: Können wir in Anbetracht einer steigenden Weltbevölkerung sowie steigender Erfordernisse für die Rohstoffproduktion und einer begrenzten Belastbarkeit der

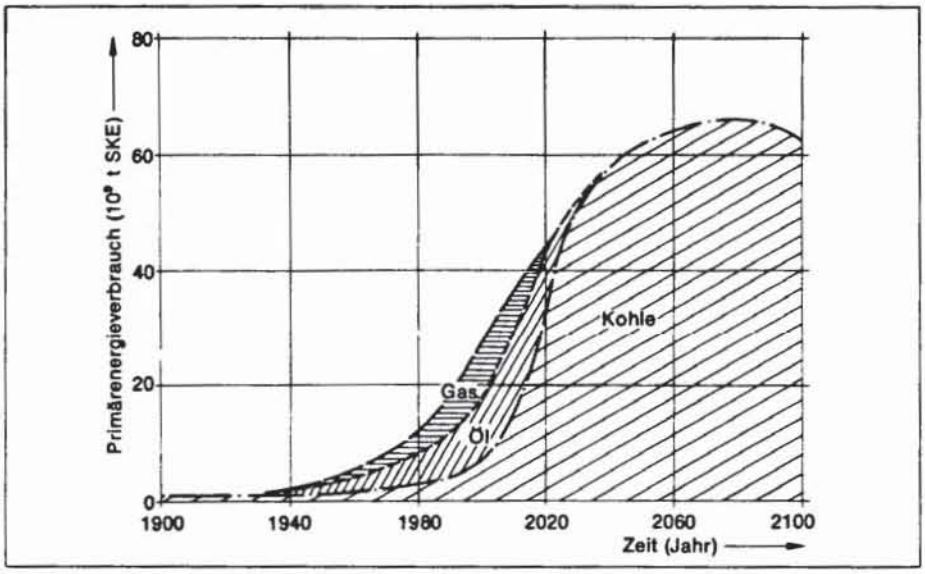

Bild 3

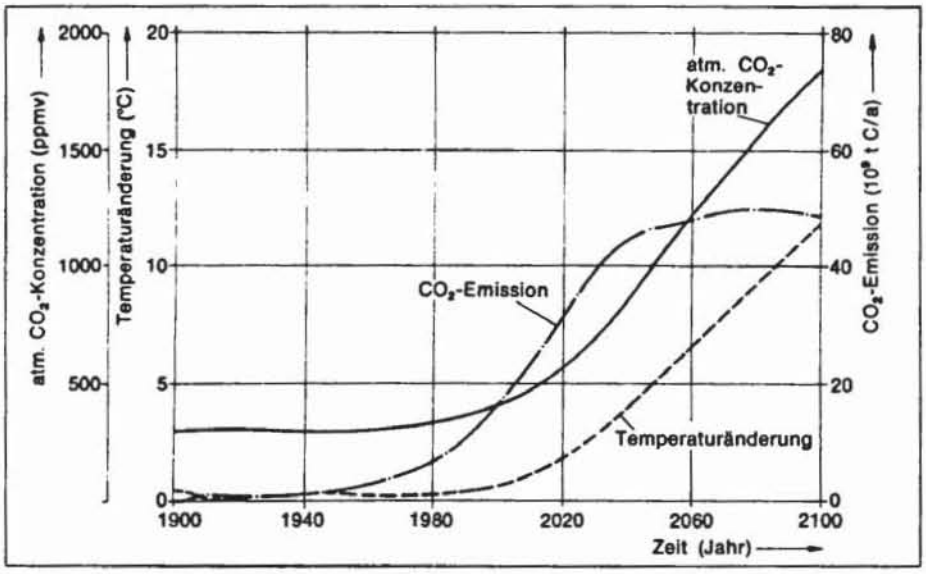

Bild 4

Bild 3: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern im Falle des Status-quo-Szenario. Weit vor der Erschöpfung der Vorräte der fossilen Energieträger würde aber schon eine andere Grenze erreicht, nämlich eine immense Klimaerwärmung.
Bild 4: Simulation zukünftiger CO_2-Belastung der Atmosphäre unter ausschließlicher Verwendung fossiler Energieträger.

Ökosysteme die verfügbaren Energiemengen und unser Wissen so schnell steigern, daß globale Katastrophen vermieden werden. Und, was ebenso wichtig ist, können oder sind wir überhaupt bereit, die Unterschiede im materiellen Lebensstandard zwischen den entwickelten und unterentwickelten Ländern, zwischen Arm und Reich, zu beseitigen, um soziale Katastrophen zu vermeiden? Wir sind sicher noch weit davon entfernt, zufriedenstellende Antworten auf diese Fragen geben zu können, insbesondere, was die zukünftige Entwicklung zwischen den Industrienationen und der dritten und vierten Welt angeht. Dennoch wollen wir im folgenden versuchen, mit Hilfe einiger Szenarien die materiellen Möglichkeiten und Folgen alternativer energetischer Zukünfte und Übergangsstrategien genauer zu analysieren. Dem CO_2-Problem wird dabei eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Die Kenntnis möglicher materieller Zukünfte des Weltsystems scheint uns ein wichtiger Input für eine Diskussion der mit der zukünftigen Entwicklung verknüpften sozialen Probleme zu sein.

Zur Generierung alternativer Szenarien des Weltsystems bedienen wir uns zweier globaler Simulationsmodelle, die in der Kernforschungsanlage Jülich entwickelt wurden und in [4, 6] ausführlich beschrieben sind. Es handelt sich dabei um Modelle, die zum einen die globalen Zusammenhänge zwischen Bevölkerungsentwicklung, wirtschaftlicher Entwicklung, Energieverbrauch, Rohstoffverbrauch und Umweltbelastung und zum anderen der Kohlenstoffkreislauf der Erde abbilden.

1. Szenario: Status quo

In dem ersten Szenario wollen wir untersuchen, ob eine zukünftige Energieversorgung allein auf fossiler Basis möglich ist. In bezug auf die zuvor angegebenen langfristigen Energieoptionen bedeutet dies also den Übergang von den flüssigen und gasförmigen fossilen Energieträgern auf die Kohle, also genau eine Umkehrung der Strukturänderungen, die seit 1900 bis heute stattgefunden haben. Der Entwicklung des Weltsystems quasi unter Status-quo-Bedingungen im Energiesektor (kein Einsatz der Kernenergie und der regenerativen Energiequellen), wie sie in *Bild 1* für die wichtigsten Modellgrößen dargestellt ist, liegen noch die wichtigen Hypothesen zugrunde, daß weder drastische Maßnahmen zur Beschränkung des Bevölkerungswachstums noch eine Rohstoffrezyklierung eingeführt werden. Bis zum Jahre 1975 stimmen die Werte der Modellgrößen mit den historischen Werten – soweit sie bekannt sind – überein.

Das Systemverhalten ist durch die Fortsetzung des exponentiellen Wachstums der Bevölkerung, der Industrieproduktion und des Energieverbrauchs bis in das nächste Jahrhundert gekennzeichnet.

• Die Krise, sichtbar am starken Abfall der Industrieproduktion pro Kopf und am Rückgang der Bevölkerung, hat ihre Ursache in den mit der Erschöpfung der Rohstoffreserven verbundenen wachsenden Kapitalaufwendungen zur Sicherung der Rohstoffversorgung.

Die abbaubaren Rohstoffreserven wurden hier 500mal größer als der heutige Verbrauch angenommen und eine Rohstoffrezyklierung war nicht zugelassen. Lassen sich nun die Rohstoffprobleme durch die Einführung der Rezyklierung lösen?

Außer der Einführung der Rohstoffrezyklierung wollen wir in dem nächsten Szenario noch annehmen, daß sowohl durch die Verbesserung der Rohstoffgewinnungsmethoden und durch die Entdeckung neuer Rohstofflager als auch durch eine verbesserte Rohstoffnutzung die statische Reichweite der Rohstoffreserven sich verdoppelt. Die Auswirkungen dieser Annahmen zeigt *Bild 2*.

• Die Rohstoffrezyklierung und die vergrößerten Rohstoffreserven schieben die Wachstumsgrenze der Industrieproduktion pro Kopf (ein Maßstab für den materiellen Lebensstandard) bis in die Mitte des nächsten Jahrhunderts hinaus.

Die bis zum Ende der Betrachtungsperiode das Jahr 2100 weiter auf über zehn

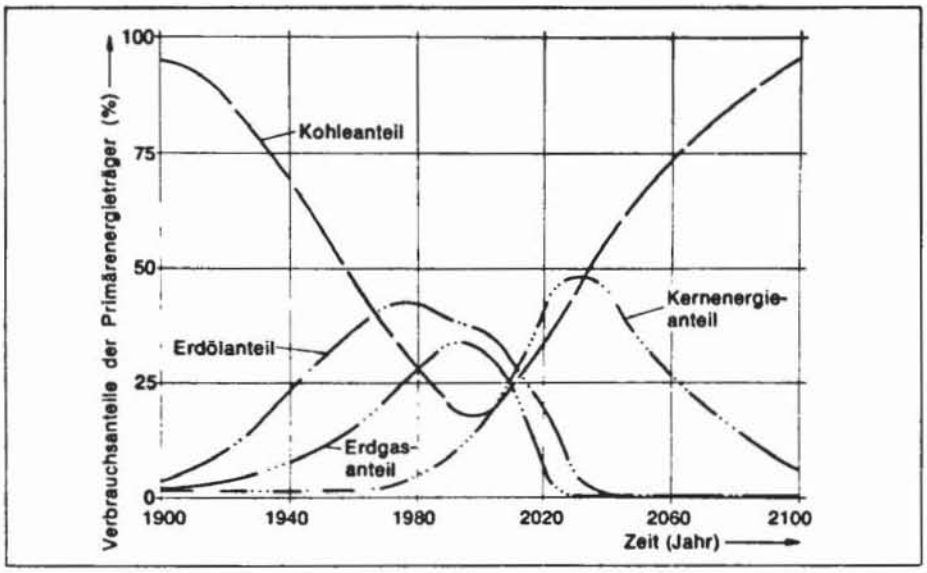

Bild 5

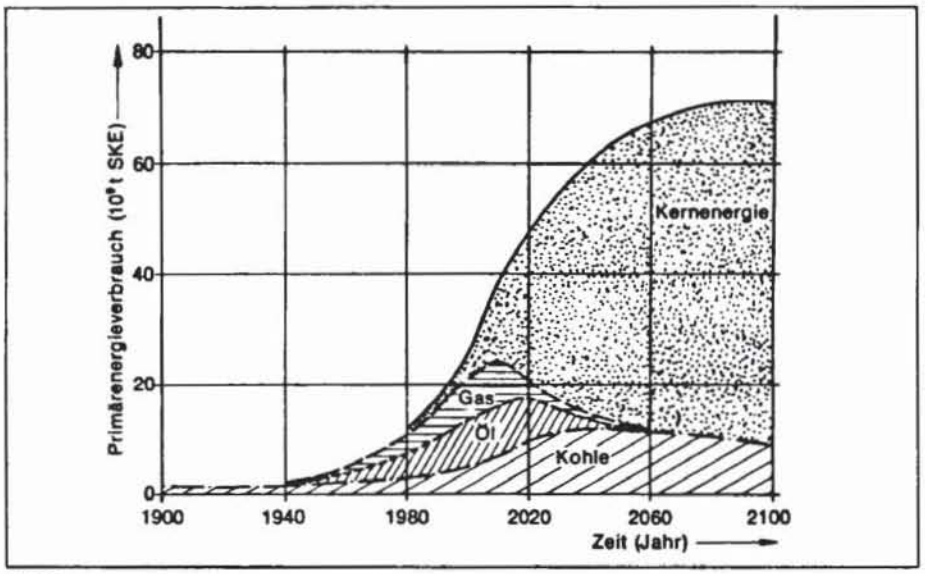

Bild 6

Bild 7

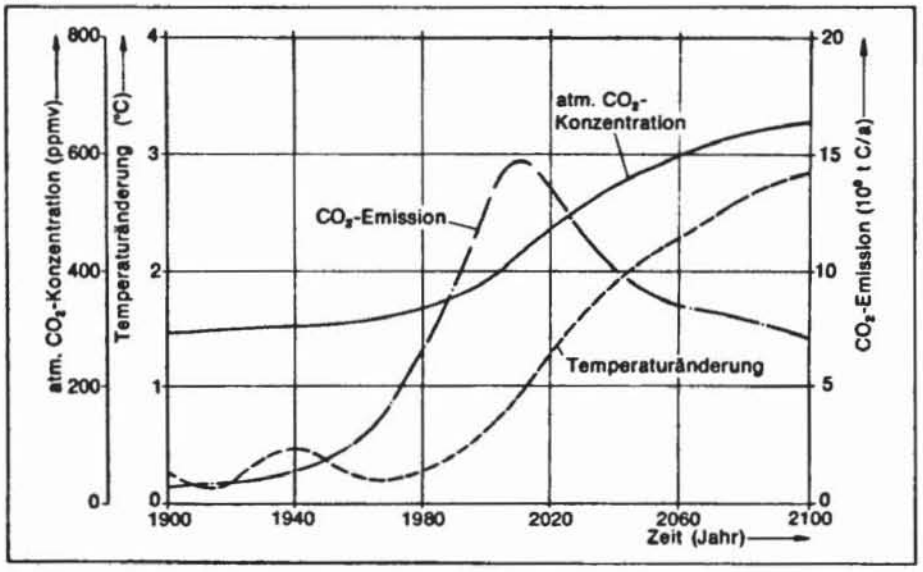

Bild 5: Struktur des Primärenergieverbrauchs bei ausschließlicher Einführung der ersten Reaktorgeneration. Die Kohle würde nur vorübergehend zurückgedrängt.
Bild 6: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs bei Einführung fortgeschrittener Reaktortypen.
Bild 7: Simulation zukünftiger CO_2-Belastung der Atmosphäre unter Einsatz fortgeschrittener Reaktoren, wobei entsprechend Bild 6 die Kohle immer noch einen gewissen Anteil stellt. Auch hier würden sich im nächsten Jahrhundert die Temperaturen in nicht mehr akzeptabler Weise erhöhen.

Milliarden ansteigende Weltbevölkerung und vor allem die mit der Erschöpfung der fossilen Energieträger verbundenen höheren Aufwendungen für die Energieversorgung führen zu einem Absinken des materiellen Lebensstandards. In diesem, wie in den folgenden Szenarien wurde dabei von den folgenden gewinnbaren Vorräten an fossiler Energie ausgegangen: Kohle 7600 · 10^9 t SKE, Erdöl 500 · 10^9 t SKE, Erdgas 300 · 10^9 t SKE. Wichtig ist aber auch noch eine andere Erscheinung, die schon weit vor der Verknappung der Energiereserven auftritt. Wie nicht anders zu erwarten, erzwingt die Erschöpfung der Erdöl- und Erdgasvorräte eine grundlegende Änderung in der Struktur der Energieversorgung. Ähnlich wie zwischen 1900 und 1975, als die Kohle ihre Stellung als Hauptenergielieferant verlor, findet in den neunziger Jahren derselbe Prozeß nur mit umgekehrtem Vorzeichen statt.

Energiepolitisch beängstigend ist dabei vor allem die Tatsache, daß für diese grundlegenden erzwungenen Änderungen nur etwa 25 Jahre zur Verfügung stehen und dies bei weiter wachsendem Gesamtbedarf. Trotz optimistischer Annahmen über die Produktionssteigerungsmöglichkeiten bei der Kohle – in einem Zeitraum von 25 Jahren steigt die Produktion um 700% – reicht die Substitutionsgeschwindigkeit nicht aus, um einen durch die schnelle Erschöpfung der Erdöl- und Erdgasvorräte bedingten Anstieg des Energiekostenniveaus um 300% zu verhindern.

Bild 3 verdeutlich anschaulich, daß die Epoche des Erdöls und Erdgases, die heute fast zwei Drittel unseres Primärenergiebedarfs abdecken, in geschichtlichen Zeiträumen gemessen nur eine kurze Episode darstellt. Weit vor der Erschöpfung der Vorräte der fossilen Energieträger würde aber schon eine andere Grenze erreicht.

Ausgehend von diesen Verbrauchsraten fossiler Energieträger ergibt sich der in *Bild 4* dargestellte Verlauf der CO_2-Produktion (vgl. auch UMSCHAU 1977, Heft 17, S. 561, Heft 18, S. 599). Das exponentielle Wachstum der CO_2-Emission flacht zu Beginn des nächsten Jahrhunderts ab und erreicht ein Maximum von 50 x 10^9 t Kohlenstoff/Jahr. Diese Emissionen haben einen raschen Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration zur Folge, die gegen Ende des nächsten Jahrhunderts mit 1800 ppm sechsmal so hoch ist wie die Normalkonzentration. Dies führt dazu, daß bereits im Jahr 2015 ein Temperaturanstieg errechnet wird, der um 1 °C über dem heutigen Temperaturniveau liegt.

• Im weiteren Verlauf des nächsten Jahrhunderts wird dann ein weiteres Ansteigen der Temperatur um mehr als 10 °C errechnet.

Charakterisierung der langfristigen Optionen der Energieversorgung.

	Theoret. Potential 10^{12} t SKE	Entwicklungsstand	Nebenwirkungen
Kohle	8	Großtechnische Kohlevergasung und -verflüssigung noch zu entwickeln	Schlechte Arbeitsbedingungen. Landbedarf. CO_2- und SO_2-Emis.
Kernspaltung	450[1])	Erste Reaktorgeneration zur großtechnischen Stromerzeugung verfügbar. Zweite Reaktorgeneration und nicht elektrische Anwendungsmöglichkeiten noch in der Demonstrationsphase.	Emission von Radionukliden. Anfall von langlebigen Spaltprodukten. Höheres potentielles Risiko.
Sonne	123	Dezentrale Anwendungstechnologien in der Demonstrationsphase, zentrale Großanlagen noch zu entwickeln.	Landbedarf. Klimabeeinflussung?
Kernfusion	1500[2])	Physikalisch-technische Durchführbarkeit noch nicht nachgewiesen.	Emission von Radionukliden. Großes Inventar an Radionukliden.
Geothermie	21	Großtechnische Verfahren noch zu entwickeln.	Schadstoffemissionen. Erdbeben?

[1]) Bei Einsatz fortgeschrittener Reaktoren und Einbeziehung von Uran- und Thoriumreserven bis 1000 $/kg
[2]) D-T-Reaktion

Diese Angabe darf nicht buchstäblich genommen werden, da sie aus einer linearen Extrapolation der Werte für den CO_2-Temperatureffekt gewonnen wurde, die nur eine Verdoppelung der Konzentration in Betracht zogen. Mit zunehmender CO_2-Konzentration ist ein Sättigungseffekt zu erwarten, der bisher nur grob abgeschätzt [5] und somit in diesen Rechnungen nicht berücksichtigt worden ist. Deshalb gibt dieser Wert von 10 °C nur die Größenordnung der Temperaturänderung wieder und betont die Feststellung, daß durch eine solche Verbrauchsstruktur zukünftiger Energieversorgung nicht akzeptable Änderungen des Klimas erwartet werden.
Auf der anderen Seite hätte die Berücksichtigung eines Sättigungseffektes aber auch die Folge, daß bei Konzentrationen unterhalb der zweifachen Normalkonzentration höhere Temperaturänderungen als hier angegeben zu erwarten sind. Dies würde die Zeitspanne bis zum Erreichen der 1 °C-Grenze noch weiter verkürzen.

2. Szenario: Einsatz der Kernenergie

Kann nun der Einsatz der Kernenergie die Probleme der Energieverknappung und der globalen Klimaveränderungen durch das Kohlendioxid verhindern? Untersuchen wir zunächst die Auswirkungen des Einsatzes der Kernreaktoren der ersten Generation, d. h. im wesentlichen der Leichtwasserreaktoren (LWR), die ihre technische Zuverlässigkeit und ihre Wirtschaftlichkeit mittlerweile bewiesen haben. Die Leichtwasserreaktoren werden ab 1975 zur Energieerzeugung mit herangezogen. Die Entwicklung des Weltsystems (Bevölkerung, Energieverbrauch, Industrieproduktion) weist trotz Einführung der Kernenergie eine große Übereinstimmung mit dem vorangegangenen Szenario auf. Zu erklären ist dies mit dem schlechten Ausnutzungsfaktor des Urans der Leichtwasserreaktoren, womit sich die Energieversorgungssituation langfristig nicht wesentlich verbessert. Der Anteil der Kernenergie (LWR) nimmt nach ihrer Einführung schnell zu und erreicht um die Jahrhundertwende einen Wert von 15% *(Bild 5)*. Diese Wachstumsphase der Kernenergie wird etwa 25 Jahre später durch die Verknappung des Kernbrennstoffes gestoppt. Die Renaissance der Kohle findet trotz des Einsatzes der Kernenergie statt. Zwar sind die Zuwachsraten der Kohle im Ver-

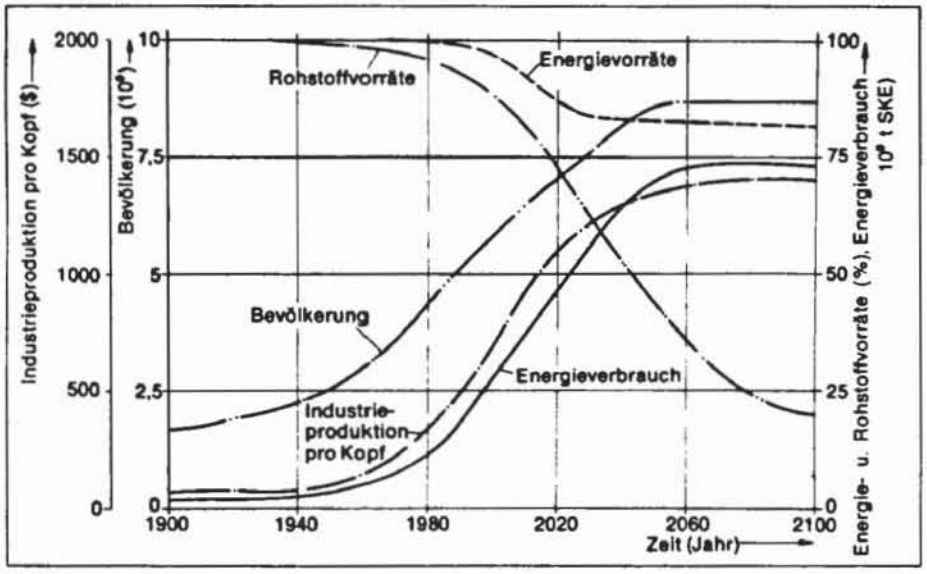

Bild 8

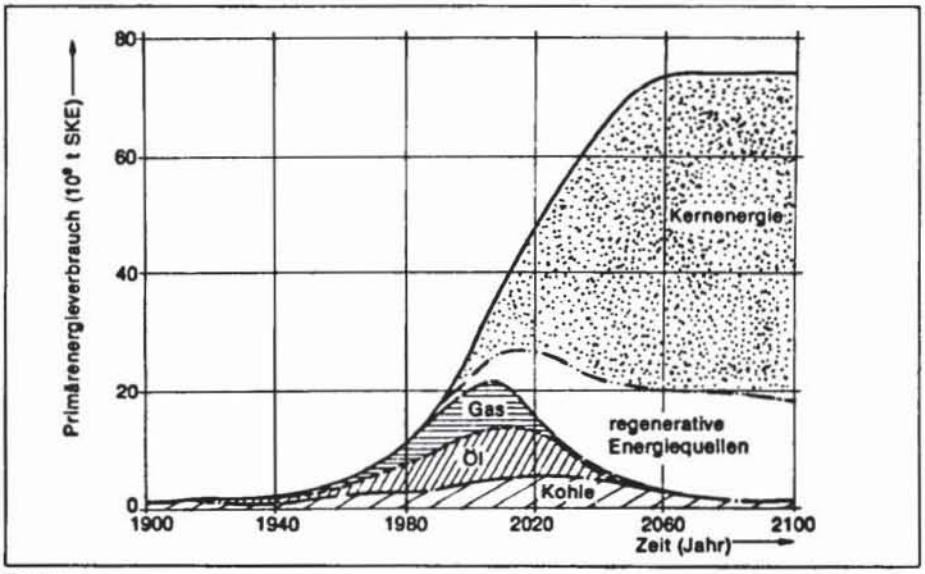

Bild 9

Bild 10

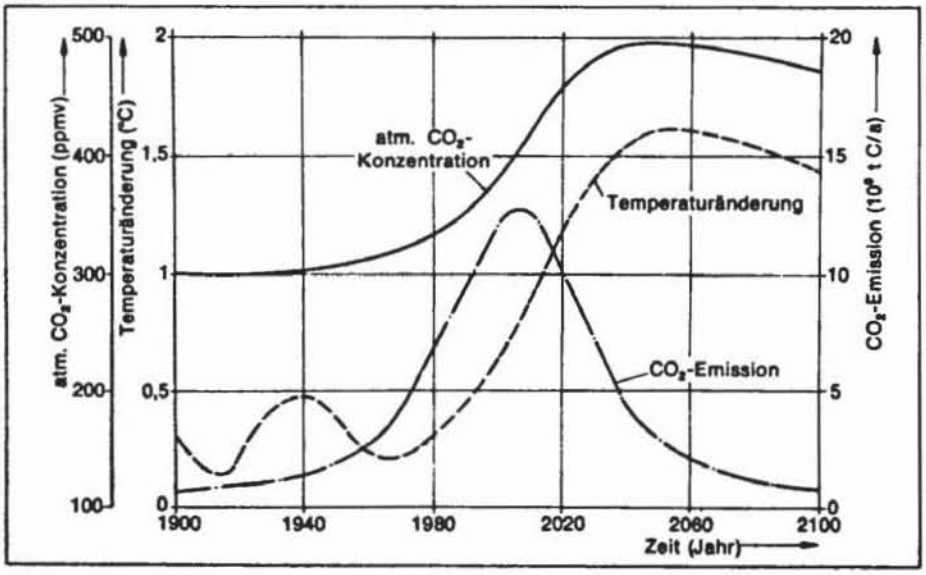

Bild 8: Gleichgewichts-Szenario.
Bild 9: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Gleichgewichts-Szenario. An die Stelle der Kohle in Bild 6 treten hier regenerative Energiequellen, vor allem die Sonnenenergie.
Bild 10: Simulation zukünftiger CO_2-Belastung der Atmosphäre unter Einsatz von 75% Kernenergie und 22% regenerativer Energiequellen. Nur in diesem Szenario hält sich der Temperaturanstieg unter einer tragbaren Grenze.

gleich zum vorangegangenen Szenario geringer, dennoch steigt die Kohleproduktion im Zeitraum 2000 bis 2025 um 400% an.

Eine wesentlich bessere Ausnutzung der Vorräte an Kernbrennstoffmaterialien erlauben die fortgeschrittenen Reaktortypen, gemeint sind der Schnelle Brutreaktor und der Hochtemperaturreaktor. Neben einem geringeren Einfluß von Kernbrennstoffpreissteigerungen auf die Energieerzeugungskosten als bei den Reaktoren der ersten Generation ermöglicht vor allem der Hochtemperaturreaktor auch eine Versorgung des nichtelektrischen Energiemarktes. Wegen seines hohen Temperaturniveaus (bis 1000 °C) erlaubt er die Erzeugung von industrieller Prozeßwärme, die Erzeugung von Wasserstoff (H_2) aus Wasser sowie in Kombination mit fossilen Primärenergieträgern die Bereitstellung von synthetischem Erdgas (CH_4) durch die nukleare Kohlevergasung.

Die Auswirkungen der Einführung der fortgeschrittenen Reaktortypen auf die Entwicklung der Energieversorgungsstruktur ist in *Bild 6* dargestellt. Der Beginn der kommerziellen Verfügbarkeit der fortgeschrittenen Reaktoren wurde für 1985 angenommen. Mit dem Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren wird die Kernenergie zum Hauptenergielieferanten. 20% der Primärenergie werden im Jahre 2000 durch sie gedeckt, und ihr Anteil am Ende des Betrachtungszeitraumes – also im Jahr 2100 – liegt bei 85%.

• Dieser Übergang von einer fossilen zu einer überwiegend nuklearen Energieversorgung erfordert einen enormen Ausbau der Kernkraftwerkskapazität.

Im Jahre 2000 beträgt die installierte thermische Reaktorleistung 5,4 x 10^6 MWth, in den nächsten 20 Jahren verfünffacht sie sich dann und beträgt am Ende des Betrachtungszeitraumes 70 x 10^6 MWth. Dieser massive Einsatz der Kernenergie hat zur Folge, daß der fossile Energieverbrauch sein Maximum etwa im Jahre 2010 erreicht, um dann bis zum Jahre 2100 stetig zurückzugehen. Am Ende des Betrachtungszeitraumes sind erst 20% der vorhandenen Energiereserven (fossil plus nuklear) verbraucht. Aufgrund einer solchen Energieversorgungsstruktur ergeben sich die in *Bild 7* dargestellten CO_2-Emissionen. Das Maximum mit etwa 15 x 10^9 t Kohlenstoff tritt um die Jahrhundertwende auf. Danach fallen die Emissionen rasch ab, bleiben aber während des gesamten Berechnungszeitraumes über den heutigen Werten. Dies führt zu einem Anstieg der atmosphärischen Konzentration auf etwa 650 ppm. Da in diesem Beispiel nur etwa die doppelte Normalkonzentration erreicht wird, hat ein Sättigungswert des

CO_2-Temperatureffektes keinen Einfluß. Die angegebenen Temperaturwerte sind aus diesem Grund realistisch bzw. im unteren Bereich eher unterschätzt. Die 1 °C Grenze über heutigem Niveau wird etwa um das Jahr 2020 erreicht.

- **In der Folge wird dann ein weiterer Anstieg auf 2,6 °C gegen Ende des nächsten Jahrhunderts errechnet.**

Damit stellt nach heutigem Wissen eine solche Verbrauchsstruktur ein nicht akzeptables Risiko dar.

3. Szenario: Gleichgewichtsstrategien

In dem vorangegangenen Szenario könnte trotz ausreichender Energiereserven ein Absinken der Industrieproduktion pro Kopf, die hier als Maßzahl für den materiellen Lebensstandard angesehen werden kann, in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts nicht vermieden werden. Ursache dafür war im wesentlichen die bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes stetig zunehmende Bevölkerungszahl, die schneller als die durch höhere Rohstoffaufwendungen gehandicapte Industrieproduktion anstieg.
Wir wollen nun untersuchen, welche Strategien zur Erreichung eines langfristig konstanten Niveaus des materiellen Lebensstandards führen. Zusätzlich zu den in den vorangegangenen Szenario schon simulierten Maßnahmen der Rohstoffrezyklierung und der Einführung der Kernenergie unterstellen wir, daß

- bis zum Jahre 2050 eine Stabilisierung der Weltbevölkerungszahl erreicht wird;
- beginnend mit dem Jahr 1990 großtechnische Anlagen zur Sonnenenergienutzung zur Verfügung stehen;
- die fossilen Energieträger insbesondere die Kohle verstärkt als Rohstoff genutzt werden.

Die Auswirkungen dieser Maßnahmen zeigt *Bild 8*. Der in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts erreichte stationäre Zustand ist gekennzeichnet durch eine Bevölkerungszahl von fast 9 Mrd. Menschen und einem materiellen Lebensstandard, der etwa fünfmal so hoch ist wie der heutige Weltdurchschnitt. Der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch an Energie liegt bei 8,5 t SKE pro Jahr, also etwa 50% über dem heutigen Verbrauch in der Bundesrepublik Deutschland. Die zu diesem stationären Zustand führende Entwicklung des Primärenergieverbrauchs ist in *Bild 9* dargestellt.

• **Trotz Nutzung der Sonnenenergie, die etwa 22% des Energiebedarfs im Jahre 2100 deckt, trägt die Kernenergie die Hauptlast der Energieversorgung.**

In diesem Szenario wurde der Verbrauch der Kohle beginnend mit dem Jahre 2000 eingeschränkt, um die Freisetzung von CO_2 zu reduzieren.
Eine solche Strategie führt zu den Verläufen in *Bild 10*. Durch die drastische Reduzierung der Emissionen erreicht die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre in der Mitte des nächsten Jahrhunderts 500 ppm und ist dann wieder rückläufig.

• **Damit ergibt sich ein maximaler Temperaturanstieg von 1,5 °C über dem heutigen Temperaturniveau.**

Bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts sinkt die durchschnittliche Temperatur dann wieder um etwa 3/10 °C ab. Ob eine solche Temperaturänderung tragbar wäre, kann heute noch nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

Ozean als „Mülldeponie" für CO_2

Bei der Kernenergie gibt es strenge Auflagen hinsichtlich der Handhabung der radioaktiven Verbrennungsprodukte. Auch für eine Reihe von Abgasen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe gibt es gesetzliche Regelungen, so beispielsweise für CO, SO_2, NO_x. Warum gibt es noch kein Gesetz, das die CO_2-Emission einschränkt, die langfristig möglicherweise größere Schäden verursacht als die vorher genannten Abgasbestandteile.
Was ist das Schicksal des Kohlenstoffs bei der Verbrennung? Wir beginnen mit einer sehr hohen Kohlenstoff-Konzentration, verdünnen den Kohlenstoff bei der Verbrennung und warten bis das stark verdünnte Kohlendioxid schließlich im Ozean „verschwindet". Der tiefe Ozean hat ein sehr großes Aufnahmevermögen für Kohlendioxid, so daß die Ableitung des Kohlenstoffs in diese „Senke" nur eine Frage der Zeit ist. Man könnte diese Ableitung aber auch beschleunigen und direkter gestalten.

• **Daher scheint eine Lösung des Problems darin zu liegen, daß man die ganze Kette der Verdünnungseffekte bei der Verbrennung vermeidet und das CO_2 direkt in den tiefen Ozean ableitet.**

Das scheint leichter gesagt als getan, aber es gibt bereits einen technisch und wirtschaftlich denkbar erscheinenden Vorschlag veröffentlicht von *Cesare Marchetti*, International Institute for Applied Systems Analysis in Laxenburg bei Wien. Das Verfahren ist unterteilt in drei Stufen:

- Abscheidung von CO_2 aus den Rauchgasen,
- Transport,
- Endlagerung.

Es gibt chemische Verfahren, um in großen Feuerungsanlagen, wie Kraftwerken und Hochöfen (80% des Kohlenverbrauchs), das CO_2 aus den Rauchgasen abzutrennen. In Raffinerien kann das entweichende CO_2 ebenfalls eingefangen werden. Somit könnten 50% des heute entstehenden CO_2 zurückgehalten und „beseitigt" werden.
Eine weitere Möglichkeit, allerdings teurer, besteht darin, den primären Brennstoff umzuwandeln in einen Brennstoff, der keinen Kohlenstoff mehr enthält, beispielsweise Wasserstoff:

$$C+2H_2O \rightarrow CO_2+2H_2.$$

• **Eine Energiewirtschaft auf der Basis von Wasserstoff würde uns aller CO_2-Problematik entheben.**

Der Transport von CO_2 ist relativ unproblematisch.
Schließlich die Ablagerung von CO_2. Zunächst wäre daran zu denken, CO_2 tief in die Erde zu versenken, beispielsweise in erschöpfte Erdgas- und Erdöl-Lagerstätten. Als Dauerlösung ist die direkte Einleitung in den tiefen Ozean die bessere Methode.

• **Als „CO_2-Mülldeponie" scheint das Mittelmeer gut geeignet.**

Am Boden der Straße von Gibraltar ergießt sich ein Wasserstrom in den Atlantik. Da die Dichte dieses Wassers infolge des früheren Salzgehaltes größer ist als die des Atlantikwassers, sinkt das Mittelmeerwasser schnell in die Tiefe und breitet sich dort aus. In diesen Wasserfall von Gibraltar könnte das CO_2 eingebracht werden. Es läßt sich leicht errechnen, daß dieser Wasserstrom das in Verbrennungsanlagen auf der ganzen Welt freigesetzte CO_2 aufnehmen könnte. Aber man braucht die Kapazität dieses Stromes gar nicht auszuschöpfen, denn es gibt noch eine Reihe anderer Plätze auf der Erde, die ebenso günstige Voraussetzungen bieten, z. B. das Rote Meer, die Arktis und die Antarktis. Man kann das CO_2 auch direkt über lange Röhren in die Tiefsee ableiten, wo es sich als CO_2-See am Boden ansammeln würde.

Literatur:

Marchetti, C.: Climatic Change (1977) Nr. 1.

Facit

Versucht man aus den zuvor erläuterten Modellrechnungen, die nicht als Prognosen, sondern als der Versuch anzusehen sind, die Auswirkungen alternativer Energieversorgungsstrategien aufzuzeigen, ein Facit zu ziehen, so lautet es wie folgt:

1. Mit der Nutzbarmachung der Kern- und Sonnenenergie stehen ausreichende Energiereserven für den Übergang des Weltsystems in einen langfristig stationären Zustand zur Verfügung. Dieser ist gekennzeichnet durch eine Bevölkerungszahl von fast 9 Milliarden Menschen und einem materiellen Lebensstandard, der etwa fünfmal so hoch wie der heutige ist.
2. Der durch die sich erschöpfenden Erdöl- und Erdgasreserven erzwungene Übergang auf die ressourcenseitig praktisch nicht limitierten Energieversorgungsoptionen, Kern- und Sonnenenergie, muß wegen der langen Substitutionszeiten unverzüglich eingeleitet werden.
3. Die mit der Verbrennung von Kohle notwendigerweise verbundene Erzeugung von Kohlendioxid und dessen klimatische Auswirkungen scheinen einen limitierenden Faktor für die Nutzung der Kohle darzustellen.

Voss, A. (KFA, Jülich); *Niehaus, F.* (IAEA, Wien): Die Zukunft des Weltenergiesystems. UMSCHAU 77 (1977) Heft 19, S. 625–632.

Summary:

The present global energy situation is characterized by considerable differences in the per capita consumption and a heavy reliance on oil and natural gas, which are limited and will probably fail to meet increasing demand before the year 2000. The continued growth of energy demand requires a transition to energy sources with nearly unlimited supply. Different alternative scenarios for this transition period are discussed and special emphasis is given to carbon dioxide emissions caused by the combustion of fossil fuels. It turns out that climatic changes, due to increased carbon dioxide emissions, seem to be a limiting factor for the future use of coal.

Literatur:

1. *Kahn, H.:* The next 200 years. William Morrow and Company, Inc., New York 1976.
2. *Meadows, D.:* Die Grenzen des Wachstums. DVA, Stuttgart 1972.
3. *Mesarovic, M.; Pestel, E.:* Menschheit am Wendepunkt. DVA, Stuttgart 1974.
4. *Niehaus, F.:* Computersimulation langfristiger Umweltbelastung durch Energieerzeugung: Kohlendioxid, Tritium, Radiokohlenstoff. ISR 41. Birkhäuser Verlag, Basel 1977.
5. *Rasool, S. I.; Schneider S. H.:* Atmospheric Carbon Dioxide and Airosols Effects of Large Increase on Global Climate. Science *173* (1971) Nr. 3992, S. 138.
6. *Voss, A.:* Ansätze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch-Energie-Umwelt. ISR 30. Birkhäuser Verlag, Basel 1977.
7. Energy: Global Prospects 1985–2000. Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies. Mc Graw-Hill Book Company, New York 1977.