

# BETRACHTUNGEN ÜBER BEWERTUNG UND ZUKUNFTAUSSICHTEN DER NATÜRLICHEN ENERGIETRÄGER\*

A. LÉVAI

Technische Universität, H-1521 Budapest  
Eingangen am 30 Juni 1983

## Summary

Energy carriers utilizable on the Earth have practically nuclear origin. During their release, resp. transformation the law of equivalency is prevailing, and the thermal contamination of the environment becomes unavoidable. Significance of the risk-coefficients, dynamics of the resource-exploitation, of the consumption-structure, also of the prices are highlighted. Conditions for the establishment of balanced nuclear energy systems and the expected benefits on natural uranium demand are discussed.

Man kann bei der Bewertung der natürlichen Energieträger ruhig davon ausgehen, daß diese alle — von ganz wenigen Ausnahmen abgesehen — nuklearen Ursprungs sind. Denn die Sonnenenergie, die seit Milliarden von Jahren uns zuströmt und auf der Erde durch Photosynthese alle unseren fossilen Brennstoffe entstehen läßt, stammt aus Kernverschmelzungsprozessen. Der ganze Wasserkreislauf, die Luft- und Meeresströmungen verdanken ihren Ursprung ebenfalls dieser Energie. Da sind die irdischen Kernbrennstoffe (U, Th, H, Li), die durch Freisetzung ihrer internuklearen Kräfte nützlich gemacht werden können. Aber auch die geothermische Energie bezieht ihren Wärmegehalt aus Kernspaltungs- oder Kernumwandlungsprozessen in der Erdkruste. Dargeboten wird diese Energie in Form von Heißwasser oder Dampf, oder durch künstliche Kühlung der heißen Felsen. Somit kann man zur Folgerung gelangen, daß die Nuklearenergie eigentlich die Grundlage von jedem kosmischen Sein bildet, sie erlaubt und ermöglicht erst das kosmische Leben.

Daß man bei diesen energetischen Betrachtungen sowohl zeitlich, wie räumlich in kosmischen Dimensionen denken kann und muß, beweist z. B. die Tatsache der so verblüffenden Entdeckung der in vorgeschichtlichen Zeiten stattgefundenen natürlichen Kernspaltungsprozesse in Oklo (Gabon). Spaltungsrückstände haben es bewiesen, daß dort etwa vor 2 Milliarden

\* Mit teilweiser Benützung eines Vortrages gehalten an der Technischen Universität Wien am 13. April 1983.

Jahren, ein — nach unseren heutigen Begriffen riesiger — Kernreaktor mit angereichertem Uran arbeitete. Aus den verschiedenen Halbwertszeiten der Uranisotope  $U^{235}$  und  $U^{238}$  läßt sich nämlich errechnen, daß der Gehalt des natürlichen Urans an  $U^{235}$  damals etwa 5–6-mal so hoch war, wie heute (also etwa 4% anstatt des heutigen 0,72%). Es brauchte nur durch Felsenrisse etwas Wasser dazukommen und es waren alle Bedingungen zum Betrieb eines Leichtwasserreaktors ungefähr mit den heutigen Parametern gegeben. Daß man dort kein Plutonium oder noch schwerere Brutprodukte fand, erklärt sich einfach aus den viel-viel kürzeren Halbwertszeiten letzterer. (Bei  $Pu^{239}$  z. B. 24 300 Jahre). Diese sind also inzwischen längst abgebaut, aber z. B. das Spaltungsprodukt Lanthanium ( $La^{138}$ ) mit einer Halbwertszeit von rd. 100 Milliarden Jahren ist heute noch feststellbar.

Es ist bekannt, daß bei der Freisetzung der, durch die Bindungskräfte physikalisch gebundenen nuklearen Energie die eine Erscheinungsform der Materie, die Masse, in die immer anwesende andere, in Energie, übergeht. Den Zusammenhang stellt das in 1905 erstellte Einstein'sche Äquivalenzgesetz ( $E=mc^2$ ) dar. Die Summe von Masse und Energie bleibt dabei immer konstant. Es ist bekannt, daß bei der Uranspaltung rund 1/1000 der Masse des ursprünglichen Atomkerns größtenteils als kinetische Energie der Spaltstücke und der Spaltungsneutronen in Erscheinung tritt. Bei der Verschmelzung von H, D oder T zu He wird — auf die Maßeinheit der am Prozess teilnehmenden Kerne bezogen, — die freigewordene Energie je nach Ausgangsmaterial, etwa bis 5-mal so groß, als bei der Kernspaltung. Die Berechnung der freigewordenen Energie geschieht eben aus den Differenzen der sog. Massendefekte.

Bei der Freisetzung der chemisch gebundenen Energie in exothermen Reaktionen, also z. B. bei der Verbrennung des Kohlenstoffs zu Kohlendioxyd, ist die freigewordene Energie ebenso aus den Massendefekten zu errechnen, wie bei den Kernprozessen. Nur sind eben diese Massendefektdifferenzen um viele Zehnerpotenzen geringer, als bei den nuklearen Vorgängen. (1 g Ausgangsmaterial liefert bei der Uranspaltung rund 80 GJ Wärme, 1 g Mischung von je 50% D und T zu He verschmolzen rund 400 GJ, die Verbrennung der Kohle zu  $CO_2$  dagegen nur rund 9 kJ.) Kernbrennstoffe sind also auf die Masseneinheit bezogen 10–40 millionenmal „energiereicher“ als die fossilen, die Bindungskräfte zwischen den Nukleonen sind eben um sehr viele zehner Größenordnungen stärker, als diejenigen zwischen den Atomen resp. Molekülen.

Die Energie wird häufig als einer der wesentlichsten Umweltzerstörer hingestellt. Tatsache ist, daß sämtliche freigelegte Energien — die Wasser- und die Windkraft, als umgewandelte Energieträger inbegriffen — unsere Umgebung schließlich als Wärme belasten. Wenn auch der, zuerst von Clausius und später durch weitere Forscher aus dieser Tatsache abgeleitete

Begriff des Wärmetodes heute mehr als diskutabel ist, so besteht aber auch weiterhin die Forderung unsere Welt so wenig wie möglich durch überflüssige Abwärme zu belasten, d. h. die Arbeitsfähigkeit der Energieträger bestens auszunutzen. Hierzu stehen außerordentlich viele Möglichkeiten zur Verfügung, wobei hier nur zwei Beispiele erwähnt werden sollen: die Kraft-Wärme Koppelung und die Nutzung der Abfallwärme durch Wärmepumpen.

Die bislang aus naturwissenschaftlicher Sicht behandelten Faktoren der Bewertung der Energieträger, nämlich der beinahe lückenlose nukleare Ursprung, die Gültigkeit des Äquivalenzgesetzes und bei der Umformung die Wärmebelastung der Umwelt sind sozusagen gemeinsame Merkmale. Übergeht man — einstweilen ebenfalls aus naturwissenschaftlicher Sicht — zu der wichtigen Frage des Ausstoßes von Schadstoffen bei der Förderung, Transport, Umformung und Verbrauch der natürlichen Energieträger, so lassen sich bereits gewaltige Unterschiede zwischen ihnen feststellen. Natürlich läßt sich in dieser Hinsicht keine allgemeingültige Formel aufstellen. Ein einziges Beispiel, die Gegenüberstellung von Kohle und Uran soll bloß den einzuschlagenden Weg der Bewertung skizzieren. Man muß dabei prinzipiell immer den sog. Risikofaktor, d. h. den Einfluß der Verunreinigungen von Luft, Wasser, Boden usw., auf die lebenden Organismen, zuletzt auf den Menschen vor Auge halten. Es soll vorangestellt werden, daß der objektive, also tatsächlich vorhandene oder realistisch geschätzte Risikofaktor bei der Entscheidung, aber auch bei der Beeinflussung der öffentlichen Meinung eine eher untergeordnete Rolle gegenüber dem subjektiven, also durch die persönliche Einstellung beeinflussten Risikofaktor spielt. Die Gründe hiefür liegen nur teilweise in dem sehr weitgespannten Bogen der Forschungstätigkeit, die sich beginnend vom Auswurf der Schadstoffe in den verschiedenen Phasen der Technologie, über die Verteilung in der Biosphäre und die darin inzwischen stattfindenden physikalischen und chemischen Umwandlungen bis zur Aufnahme durch den Letztverbraucher erstreckt. Dabei stellt der, in den lebenden Organismen entstandene Schaden allein ein heute noch mit sehr wesentlichen Unsicherheiten behaftetes Forschungsgebiet dar. Die Forschungen sind noch relativ jung, sie begannen etwa vor 10–15 Jahren: wegen der ungenügenden Tiefe der Kenntnisse ist die Signifikanz der Resultate verhältnismäßig schwach (etwa unter 60% gegenüber über 95% bei erfolgreichen Forschungen). Dieser Umstand wird z. B. im Falle der Kohle- resp. der Kernenergie zur Irreführung der öffentlichen Meinung zu Genüge ausgenutzt.

Nach einer vergleichenden Untersuchung, die von den zuständigen staatlichen Organen in den Vereinigten Staaten durchgeführt wurde, sind Kraftwerke im Kohlezyklus ungefähr um eine zehner Größenordnung umweltgefährlicher, als die im Uranzyklus, wohlbemerkt, immer von der Grube bis zum Menschen, gerechnet [1]. Daß solche Rechnungen keine

Allgemeingültigkeit haben, soll jedoch betont werden. Fest steht aber, daß — wenn man von der landschaftsbeeinträchtigenden Wirkung der Wasserkraftwerke, oder der durch die Hohlspiegel bedeckten Fläche der Sonnenkraftwerke absieht —, praktisch alle Energiefreisetzungen und Umformungen mit Schadstoffemissionen verbunden sind, die die Lebensbedingungen im verschiedenen Ausmaß beeinflussen. Betrachtet man bloß die, im Betrieb kontinuierlich ausgestossenen Schadstoffe, so können bei den fossilen Brennstoffen das Kohlendioxyd und der Schwefel in grösserem Umfang Schäden anrichten, als die Radionuklide der Kernkraftwerke. Unvorhergesehene grössere Betriebsunfälle der letzteren könnten aber einmal diesen, bis dato durch die Tatsachen noch nicht in Frage gestellten Vorteil der Kernkraftwerke im negativen Sinne wettmachen.

Bei der Bewertung der Energieträger sind neben den bisher behandelten Fragen, die sich auf Naturgesetze stützen und von uns also kaum beeinflußt werden können, diejenigen der Wirtschaftlichkeit von mindestens gleicher Bedeutung. Bezeichnend hierfür sind die letzten 10 Jahre, in denen klar zu Tage getreten ist, daß zum wirtschaftlichen Aufschwung unter anderen unumgänglich notwendig ist, daß bei sparsamsten Verbrauch genügende Energie zu annehmbaren Preisen und mit hinreichender Sicherheit zur Verfügung stehe. Es soll daher in den weiteren Ausführungen etwas näher auf die Fragen der Energievorräte, der Verbrauchsstruktur, der Preise und des Welthandels eingegangen werden.

Was die ausbauwürdigen Vorräte an fossilen Energieträger, also die sog. Reserven anbelangt, bestehen diese nach Angaben der Weltenergiekonferenz vom Jahre 1980 zu über 70% aus Kohle, über 20% aus Erdöl, darunter aber ründ ein Drittel in der Form von Ölschiefer und Sand, und weniger als 10% aus Erdgas [2]. Unter Berücksichtigung der geologisch wahrscheinlichen Vorräte, — also der geschätzten zusätzlichen Ressourcen — verschieben sich die Zahlen bei der Kohle zu rund 85%, beim Erdöl zu unter 13%, darunter aber 75% in Schiefer und Sand und zu weniger als 3% beim Erdgas [3]. Die Verbrauchsstruktur setzte sich in 1980 aber aus 31% Kohle, 49% Erdöl, — darunter nur unter 4% Schiefer und Sand —, und 20% Erdgas zusammen [4]. Aus diesen Zahlen läßt sich die erwartete Lebensdauer der einzelnen Reserven nach Annahme einiger Inputdaten leicht errechnen. Nicht uninteressant ist es in dieser Hinsicht an Hand der Abb. 1 einen Blick auf die Dynamik, d. h. auf die zeitliche Entwicklung der gesicherten Reserven in dem Zeitabschnitt 1962–80 zu werfen [5]. Es ergibt sich daß während die gesicherten Reserven der fossilen Energieträger in der Periode 1962–74 jährlich um 2,7% zunahmen, sank diese Zahl in der Zeit zwischen 1975–80 auf 2%. Schuld daran ist das Öl, mit einer jährlichen Zunahme der gemeldeten Reserven zwischen 1962–74 von rund 10% (darunter Ölschiefer und Sand sogar 12,2%). Für die Periode 1974–80, also nach dem großen Ölpreisanstieg, wurden überhaupt keine neuen Ölreserven

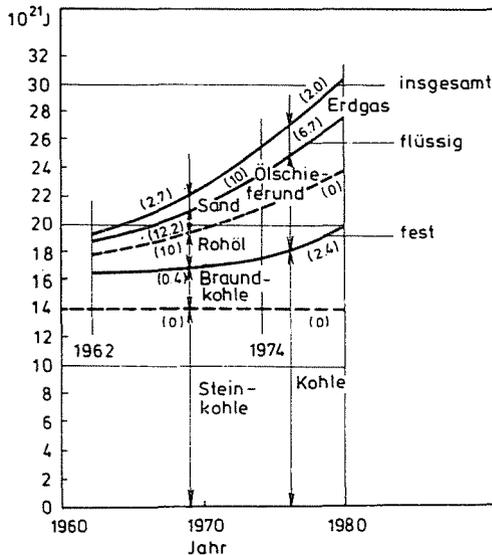


Abb. 1. Änderung der gesicherten Reserven der fossilen Energieträger 1962–1980 (jährliche exp. Zuwachsraten %/a)

mehr gemeldet. Es steht außer Zweifel, daß die letzteren Zahlen aus wirtschaftspolitischen Gründen manipuliert sind. Bei Erdgas sank die jährliche Zuwachsrate von 10% der ersten Periode auf 6,7% in der zweiten. Die Steinkohlenreserven weisen schon seit 1950 überhaupt keine Zunahme auf, bei der Braunkohle stieg die Zuwachsrate von 0,4% der Periode 1962–74 nach dieser Zeit auf 2,4%, ein Zeichen für das zunehmende Interesse der Kohlengruben am Energiemarkt.

Die Dynamik der Verbrauchsstruktur zeigt nach Abb. 2 gewaltige Unterschiede der einzelnen fossilen Energieträger auf. So sank die jährliche Zuwachsrate der Kohlenförderung von der zweiten Hälfte der 50-er Jahre beginnend kontinuierlich bis zum Tiefpunkt null um 1973. Rohöl und Erdgas erreichten dabei Zuwachsraten von 6–9%. Mit den OPEC-Rohölpreisex- pllosionen von 1973 und 1979 begann ein Come-back der Kohle, wobei heute die jährlichen Zuwachsraten der einzelnen fossilen Energieträger mit gewissen Schwankungen sich weltweit ungefähr die Waage halten.

Der Preis ist natürlich der wichtigste wirtschaftliche Bewertungsfaktor der Energieträger, wobei vorausgeschickt werden kann, daß erfahrungsgemäß ein mengenmäßig ausreichendes Angebot an Energie ausschließlich eine Preisfrage ist. Eine jede Volkswirtschaft, die geneigt ist die, am Weltmarkt herrschenden jeweiligen Preise zu bezahlen, wird immer in der Lage sein die notwendigen Energiemengen zu beschaffen, vorausgesetzt, daß die internationale Arbeitsteilung zur Geltung kommen kann. Andererseits werden

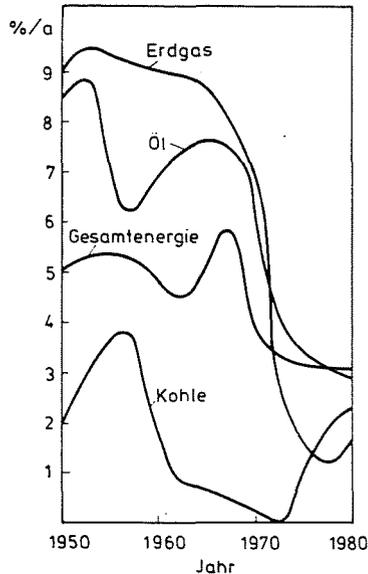


Abb. 2. Jährliche Zuwachsraten der fossilen Energieträger und des Gesamtenergieverbrauches %/a (1950–1980)

die Energiepreise heute im allgemeinen mit gutem Grund als ein Mitterreger der Inflation betrachtet, hauptsächlich in Ländern mit vorwiegend starkem Energieimport. In diesen wird ein immer größer werdender Anteil der Zahlungsbilanz zum Ausgleich der Energieimporte benutzt, wobei die, in vielen Ländern beobachtete Verschlechterung der Austauschverhältnisse mit zur Gravierung der Lage beiträgt. Schwere Gleichgewichtsstörungen im Außenhandel dieser Staaten sind die Folge. Bekannte und betrübliche Beispiele liefern die meisten, Agrarprodukte oder Rohstoffe erzeugenden Entwicklungsländer. Während die Preise der Energieträger, in erster Linie die des Rohöls nach Abb. 3 in den 70-er Jahren in die Höhe schellten [4], ist bei vielen Rohstoffen das relative Preisnivo nach einem vorübergehenden Anstieg sogar unter das Nivo der ersten 70-er Jahre gesunken. (z. B. Stahl, Buntmetalle, einige Rohstoffe der organischen Chemie, usw.).

Daß die Preise der Energieträger die Wettbewerbsfähigkeit selbst der starken Industrieländer beeinflussen, beweist eine Studie des Rheinisch-Westphälischen Instituts für Wirtschaftsforschung [6]. Danach sind die Aufwendungen für die Investitionen in der BRD zufolge der Ölpreiserhöhung im Jahre 1979 um 2,5%, in 1980 um 5,2% gestiegen. Die Zuwachsrate des brutto Nationaleinkommens wurde in 1979 um 0,1%, in 1980 um 1,3% geringer. Der Verbraucherpreisindex stieg in 1979 um 0,3%, in 1980 um 1,3%. Die Staatsschulden der BRD waren in 1980 um 4,4 Mrd Mark höher, als sie ohne die

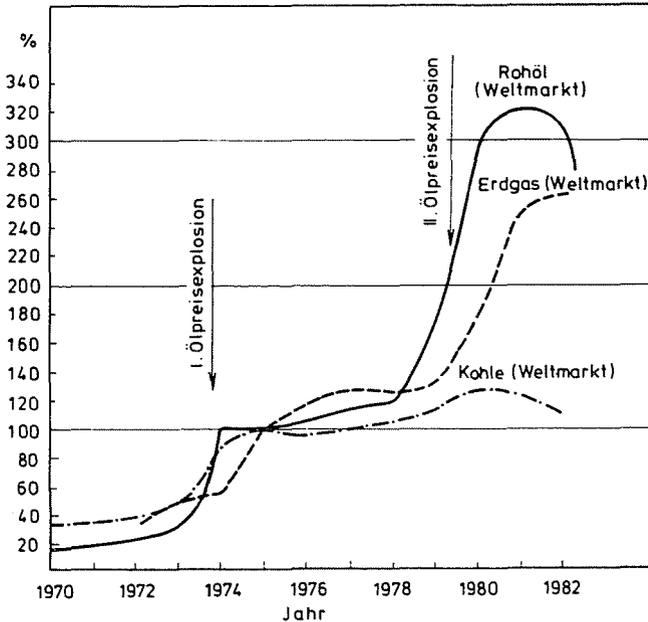


Abb. 3. Relative Preisindexe der fossilen Energieträger (1975 = 100%)

zweite Ölpreiserhöhung gewesen wären. Die Wettbewerbsfähigkeit wurde in erster Linie in der Grundstoff- und Halbzeugindustrie mit einem hohen Anteil der Energiekosten (Stahl 23,1%, Chemie 17,2%, Papier 16,8%) spürbar, besonders dort, wo die Konkurrenzländer energiepolitisch mehr oder weniger autarch waren. Die Preisindexe einzelner hochgezüchteter Fertigprodukte wuchsen gleichzeitig, wozu die Monopolstellung der Erzeuger sicherlich mitgewirkt hat. Im Gegensatz dazu ist bei den Kommerzartikeln ein Zurückbleiben gegenüber dem Durchschnitt festzustellen.

Was die, in der Zukunft zu erwartenden Preisverhältnisse anbelangt, kann man davon ausgehen, daß auf lange Sicht bedeutende und bleibende Änderungen der Preisnivos zwischen den einzelnen Produkten nur durch eine technische Revolution, resp. bei den Rohstoffen durch eine plötzliche Änderung der natürlichen Bedingungen hervorgebracht werden können.

Beim Rohöl waren in den Jahren 1973/74 politisch-wirtschaftliche Entscheidungen der damals wichtigsten Produzenten, der OPEC-Staaten die auslösenden Ursachen. Da die grossen Verbraucherländer ihre Nachfragen damals nicht gedrosselt haben — was ihrerseits gewiß ein Fehler war — stiegen die Preise entsprechend den Marktgesetzen weiter. Diese wurden nach dem Ausfall der iranischen Ölproduktion in 1979 künstlich noch weitergetrieben, ein Fehler der OPEC-Staaten. Folge davon waren verminderte Gewinne in den fortentwickelten Industriestaaten, steigende Arbeitslosigkeit, Inflation,

Sättigung des Marktes mit Rohöl auch durch Verbrauchseinschränkungen. Hierzu kam die Entdeckung und Inbetriebnahme neuer bedeutenden Ölfelder in Mexiko, in der Nordsee, Alaska, weiterhin der Druck seitens der alternativen Energiequellen (Kohle, Uran). Da die Inflation aber in den meisten Ländern auf etwa 5% gedrosselt werden konnte war eine Angleichung der Ölpreise zu denen der Industrieartikel unerlässlich. Es liegt heute eine Überproduktion an Rohöl vor. Ob aber die letzte Preissenkung von nahezu 15% sich als dauernd erweisen wird, ist zweifelhaft. Nach einzelnen Berichten arbeiten bereits jetzt einige Ölfelder in der Nordsee und Alaska unwirtschaftlich. Dies gilt in erhöhtem Masse für die neu zu erforschenden kontinentalen Shelve und für die Erschliessung der Ölschieferlagerstätten. Es ist zu befürchten, daß einzelne Regierungen und Riesenunternehmen deshalb einige Ölfelder — wahrscheinlich nur vorübergehend — stilllegen und sich mit den Alternativenergien nicht mehr beschäftigen werden. Da bei den Ölfeldern wegen des bereits investierten Kapitals schließlich doch nur die laufenden Produktionskosten maßgebend sind und diese bei dem teureren Nordseeöl noch immer unter 10 \$/barrel liegen, wird man den Betrieb selbst bei dem jetzigen OPEC-Preis von 29 \$ wahrscheinlich nicht einstellen. Die Erschliessung neuer Fundstellen und die Forschungstätigkeit der sog. Alternativenergien wird aber sicherlich Verzögerung erleiden. Eine Stabilisierung des Ölpreises wesentlich unter dem Spitzenniveau von 1979/80 wird von vielen Experten erwartet.

Was die übrigen fossilen Energieträger anbelangt, so ist sicherlich anzunehmen, daß deren Preise im verlangsamten Tempo dem des Rohöls nachziehen, wie es die Abb. 3 veranschaulicht. So wurde z. B. auch die Kohle in den letzten 3 Jahrzehnten wegen den Unterschieden in der Produktivität gegenüber den Fertigprodukten aufgewertet.

Die Gestaltung des Uranpreises wurde in den vergangenen Jahren durch besondere Umstände beeinflusst, die teilweise durch die Zurückhaltung des Kernkraftwerksbaues in vielen kapitalistischen Ländern, teilweise durch ein Überangebot der Uranproduktions- und Anreicherungsbetriebe bedingt waren. Abb. 4 zeigt den Freimarktspreis des natürlichen Urans in Dollar pro Pfund  $U_3O_8$  in der Periode VI. 1978 bis IX. 1982, woraus aber auch zu ersehen ist, daß seit dem Tiefpunkt in März 1982 der Uranpreis wieder ansteigt [7].

Vom Standpunkte des Verbrauchers ist aber niemals der Preis allein wirtschaftlich ausschlaggebend, sondern der Gebrauchswert des Energieträgers. Der Gebrauchswert ist der, auf die Einheit der Erzeugung (Lieferung, Transportleistung, etc.) bezogene und in Währungseinheiten ausgedrückte Verbrauch der verschiedenen Energieträger. In diesem spiegelt sich der wirtschaftliche Vor- resp. Nachteil wieder, wobei außer den energietechnischen Faktoren, wie Wirkungsgrade, Ausnutzungsgrade, Leistungsziffer, usw. die zur Erreichung dieser Faktoren notwendigen Investitionen, ferner die, auf die gleiche Basis gebrachten Aufwendungen für

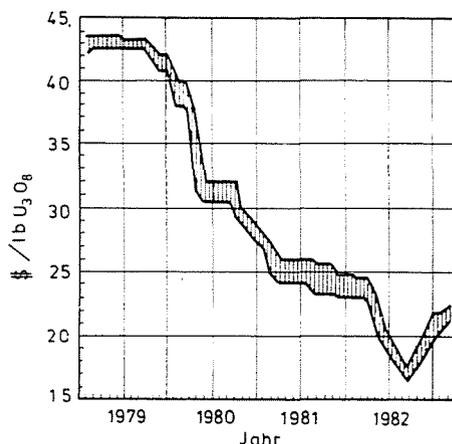


Abb. 4. Freimarktpreis des natürlichen Urans 1978–1982

den Umweltschutz und alle anderen Begleitumstände mitberücksichtigt werden müssen. Die Bestimmung des jeweiligen, sich mit der Zeit dynamisch ändernden Gebrauchswertes ist eine vordringliche Aufgabe eines jeden Energiewirtschafters.

Aus wirtschaftlicher Sicht liegt zwischen den Energieträgern ein grosser Unterschied bestimmt durch deren Anteil am Welthandelsumsatz. Der gesamte Aussenhandelsumsatz hat in den Industrieländern in den Nachkriegsjahren — etwa bis 1975–78 — jährlich etwa doppelt so stark zugenommen, wie das brutto Nationalprodukt. In den letzten Jahren war diese Zunahme wesentlich flauer und ist heute eher als stagnierend zu bezeichnen. Aus der Produktion der fossilen Energieträgern kommen heute weniger als 6% der Kohle in den Welthandelsumsatz, bei Rohöl sind es über 50%. Um zu dem, von Sachverständigen für die Jahrhundertwende erwarteten Anteil der Kohle im Weltenergieverbrauch von rund 27% zu kommen, wäre es notwendig, daß das Volumen des Kohlenhandels am Weltmarkt sich etwa vervier- bis fünffacht und einen Jahresbetrag von rund 1 Milliarde T erreicht. Die hierzu notwendige Infrastruktur an Verladeeinrichtungen, Transportmitteln am Land und See, Hafenanlagen usw. erfordert lange Zeit und grosse Investitionen. (Allein die Kosten für die Anschaffung der benötigten cca 1000 Frachtschiffe mit je 100 000 T Wasserverdrängung wurden zu 40 Milliarden \$ ermittelt, die Gesamtkosten der Umstellung der Energiestruktur von Öl auf Kohle und Kernbrennstoff sollen in der Grössenordnung von 10 Billionen \$ liegen.) Es ist nur natürlich, daß das Rohöl unter solchen Umständen den Welthandel am Energiemarkt beherrscht und noch lange beherrschen wird.

Das Erdgas — mit ungefähr 6% Beteiligung im Aussenhandel — nimmt dabei eine spezielle Rolle ein, da es an allen Transportwegen besondere

Einrichtungen verlangt. Unabhängig davon, ob der Transport via Pipe-line oder Tanker mit flüßigem Erdgas erfolgt, müssen zwischen dem exportierenden und dem importierenden Land ganz enge Verbindungen bestehen, die aber leicht störungsanfällig werden können. (Ein Beispiel hierfür liefern die Schwierigkeiten bei der Durchführung der Verträge zwischen den Vereinigten Staaten und Algerien. Andererseits ist die 4500 km lange Erdgas-pipeline zwischen Sibirien und Europa ein gutes Gegenbeispiel.) Von den politischen Implikationen abgesehen, hat die Atomenergie gegenüber den anderen Energieträgern in dieser Hinsicht ganz besondere Vorteile aufzuweisen.

Energiepolitische Erwägungen spielen also bei der Bewertung der Energieträger sicherlich eine bedeutende Rolle. So sollte im Mittelpunkt aller energiewirtschaftlichen Überlegungen überall der möglichst sparsame, rationelle Verbrauch der Rohenergien stehen. (Hierfür gebraucht man heute oft den Ausdruck Energiekonservierung, da darunter nicht nur die Einsparungen im gebräulichen Sinne, sondern auch die technologischen Änderungen des Ausbringens verstanden werden sollen.) Es gehört auch die energiepolitisch zweckmäßige Auswahl der Produktionsstruktur unter Berücksichtigung der energietechnischen Investitionen hiezu. Als eines der Endziele der industriellen und landwirtschaftlichen Produktion sollte stets das Streben nach einer möglichst niedrigen, auf die Einheit des Bruttonationalproduktes bezogenen Energiebedarfs sein. Die richtige Lenkung des Energiebedarfs wird sicherlich allmählich einer der wichtigsten Faktoren bei den staatlichen und privatwirtschaftlichen Entscheidungen über die zukünftige Entwicklung sein.

Bei der Gewinnung, Transport, Umformung und Verbrauch der verschiedenen Energieträgern sind in allen Sektoren der Energiewirtschaft zahlreiche, mehr oder minder wichtige Neuerungen möglich und zu erwarten. So seien nur beispielsweise genannt: die Flüssigbett-Verbrennung der Kohle, neue Verfahren der Kohlenvergasung und Verflüssigung, sekundäre und terziäre Verfahren bei der Rohölförderung, usw. In den folgenden soll nur einer Frage, nämlich der besseren Ausnützung der Spaltmaterial-Vorräte einige Aufmerksamkeit gewidmet werden. Der Grund hierfür ist nicht allein der Umstand, daß dieser Energieform in den kommenden Jahrzehnten neben der wiederentdeckten Kohle gewiß eine wichtige Rolle zukommt, sondern auch die Tatsache, daß der bisher weltweit eingeschlagene Weg der Ausnützung der Spaltmaterialvorräte keinesfalls als ideal und richtig bezeichnet werden kann.

Die Frage läßt sich nicht einfach dadurch erledigen, daß die Kernenergie im Jahre 1980 erst einen Anteil von etwas über 3% am Weltenergieverbrauch hatte, denn in dieser Hinsicht sehr vorsichtige Schätzungen erwarten bis zur Jahrhundertwende weltweit eine mindestens auf 13, eher aber bis auf 17% steigende Anteilnahme der Kernenergie. Die Unsicherheiten in den Schätzungen beruhen nur teils an der derzeit eher ablehnenden Haltung einiger

wichtigen Industriestaaten, auch nur teils an den nur sehr angenähert bekannten — oder eher bekannt gegebenen — Ressourcen.

Um die Rolle der Kernenergetik in der Zukunft einigermaßen richtig bewerten zu können, ist es unerlässlich die Ausnützung der natürlichen Spaltmaterialvorräte etwas näher zu betrachten. Hierzu dient der Begriff des sog. Materialwirkungsgrades oder Materialausnutzungsgrades. Darunter soll das Verhältnis der effektiv gewonnenen Nutzwärme zum potentiellen Energieinhalt des natürlichen Urans (Zahlenmäßig rund 830 000 MWtage/t) verstanden werden. Dabei ist sowohl der Spaltmaterialbedarf für die erste Füllung, als auch derjenige für den laufenden Betrieb der Reaktoren in Rechnung zu stellen.

Dieser Ausnutzungsgrad ist bei den heute meistverbreiteten Leichtwasserreaktoren sehr niedrig. Die erzeugte Wärme beträgt heute größenordnungsmäßig nur etwa 0,5–0,6% des potentiellen Wärmegehaltes, d. h. der Ausnutzungsgrad ist kaum höher, als er vor 250 Jahren bei der Newcomen'schen atmosphärischen Dampfmaschine war (dort natürlich auf die Förderkohle bezogen). In der Abb. 5 sind neben dem Materialwirkungsgrad des heute allgemein verwendeten Druckwasserreaktor (PWR) mit einem Ausbrand von cca 30 000 MWd/t eingesetztes Uran in einem Durchgang, d. h. offener Zyklus ohne Rezirkulation („once through“), (Kurve 1), auch derjenige für einen erhöhten Ausbrand (cca 40 000 MWd/t Kurve 2) eingetragen, jeweils als Funktion der exponentiell gerechneten Verdoppelungszeit des Kernkraftwerkssystems in Jahren ( $T_{2e}$ ). Das starke Abfallen der Kurven nach links, bei kurzen Verdoppelungszeiten, hat seine Ursache im großen Uranaufwand der ersten Füllung. Unter Berücksichtigung der heutzutage nur in sehr geringem Umfang durchgeführten Plutoniumrezirkulation würde sich der Ausnutzungsgrad auf etwa 0,8–0,9% erhöhen, wobei es auffallen mag, daß der Wert des verbesserten PWR-Reaktors mit erhöhtem Ausbrand und mit Pu-Rezirkulation (Kurve 3) niedriger liegt, als derjenige der heutigen Typen mit Rezirkulation (Kurve 4). Dies deutet darauf hin, daß die Erhöhung des Ausbrandes unter Zugrundelegung des offenen Zyklus optimallisiert wurde. Aber alle Werte des Materialwirkungsgrades bleiben auch weiterhin sehr niedrig [8].

Zu einer, mit den fossilen Brennstoffen auch nur vergleichbar guten Ausnutzung der Naturenergiequellen, — im Falle von Wärmekraftwerken also bis zu einem Wert von über 30%, — wäre bekanntlich die weit ausgedehnte Einführung des Brüttersystems notwendig. Man hört oft, daß durch das Brüterprinzip Materialwirkungsgrade von theoretisch 70–75%, praktisch von 25–30% sich erreichen lassen. Es soll aber darauf hingewiesen werden, daß diese Zahlen irreführend sind. Nicht nur deshalb, da Brüter dieser Art noch überhaupt nicht existieren und es noch mindestens 1 1/2–2 Jahrzehnte braucht, bis zuverlässige und auch wirtschaftlich vertretbare Brüter — wenn

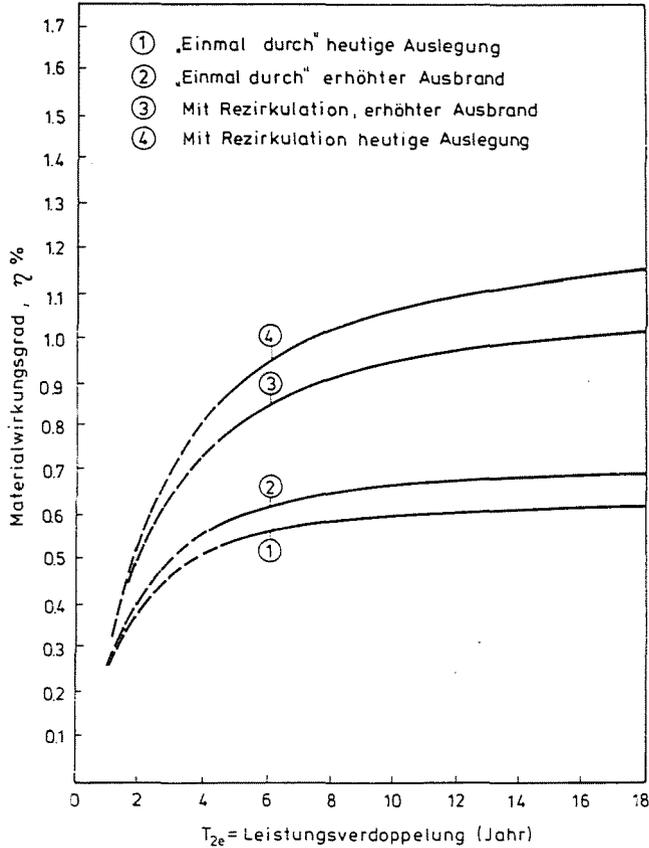


Abb. 5. Materialwirkungsgrad für Druckwasserreaktorsysteme

überhaupt — auf den Markt kommen, sondern schon einfach aus der unerläßlichen — leider aber meistens vernachlässigten oder fehlenden — systemtechnischen Betrachtung der Kernenergiesysteme. Solche Systeme bestehen nämlich aus einer Anzahl von Elementen, um nur die wichtigsten zu nennen: Bergwerke, Erzanreicherungsstätte, Uranfabriken- und Anreicherungsanlagen, Brennelementefabriken, thermische und Schnellreaktoren, Reprozessionsanlagen, Entsorgungsanlagen, usw.

Bei der Auslegung solcher Systeme sollten prinzipiell zwei, für die Zukunft der Menschheit grundlegende Leitgedanken vor Auge gehalten werden, nämlich: erstens der absolut gesicherte Schutz des zwangsweise erzeugten Plutoniums damit dieses nicht in unzulässigen Besitz gelangen kann und, zweitens die Entsorgung, d. h. die gesicherte Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle, in erster Linie der ausgebrannten und abermals aufbereiteten Brennelemente. Ein, diese Bedingungen erfüllendes System soll aus thermi-

schen und Schnellreaktoren bestehen, so aber, daß die Brüterreaktoren, die Wiederaufbereitungsanlagen, die Fabriken zur Brennelementenherstellung für beide Reaktortypen, usw., kurzum alle Anlagen in denen das Plutonium anfällt oder behandelt wird, nur in jenen wenigen Staaten errichtet werden, die durch den Besitz von Kernwaffen bereits heute die besondere moralische Verantwortung für die Kernwaffenmaterialien haben. Die übrigen Staaten oder Staatengruppen sollten nur thermische Reaktoren errichten, bzw. besitzen. Eine solche Aufteilung der Kernkraftwerkbesitzer wäre nicht nur politisch-militärisch, sondern auch wirtschaftlich vertretbar. Selbstredend wäre aber dazu eine, aufeinander präzise angepaßte internationale Zusammenarbeit erforderlich mit dem Ziele, wenigstens regional sog. Gleichgewichtssysteme der nuklearen Brennstoffzyklen zu erreichen. Unter ein solches System soll jenes verstanden werden, in dem das Verhältnis von schnellen und thermischen Reaktoren derart aneinander abgestimmt ist, daß der Natururanbedarf für die Erstellung der neuen Reaktoren und für den Betrieb der bestehenden Typen minimalisiert wird, wobei eine Anhäufung weder an Plutonium, noch an abgemagerten Uran entstehen kann. Die Funktion eines solchen Gleichgewichtssystems soll an Hand der Abb. 6 erläutert werden [9].

Das Natururan wird — nach Erreichung des Gleichgewichtssystems — nicht angereichert, sondern direkt in den Brutmantel der Brüter, eventuell zusammen mit noch vorhandenen abgemagerten Uran eingesetzt. Das in genügender Menge erzeugte Plutonium bedient die Schnellreaktoren und als Anreicherungs material die thermischen Reaktoren. Der entnommene abgemagerte Uran der letzteren wird also durch — mit Pu angereichertem — Natururan ersetzt. Es ist somit ein geschlossenes System vorhanden, in das nur Natururan eingespeist und elektrische Energie abgeführt wird. Urananreicherungsanlagen sind nicht mehr notwendig.

Selbstredend gehört zum einwandfreien Funktionieren eines solchen Systems ein wohl abgewogenes Verhältnis von schnellen und thermischen Reaktoren, wobei auch die, in dieser Hinsicht maßgebenden Parameter dieser Reaktoren aufeinander abgestimmt werden müssen (z. B. erste Füllung, Ausbrand, Bruteigenschaften, usw.). Wesentlich ist auch die exponentiell gerechnete jährliche Zuwachsrate der Kernkraftwerkssysteme, bzw. deren Verdoppelungszeit ( $T_{2e}$ ). Einen großen Einfluß übt auch die Zeitdauer aus, während welcher die bestrahlten Brennelemente vor der Wiederaufbereitung gekühlt werden.

Abb. 6 zeigt nach Untersuchungen von Csom und Fehér (Technische Universität, Budapest) das Resultat solcher Systembetrachtungen für eine Kombination von Druckwasserreaktoren (PWR) mit flüßigmetallgekühlten Schnellbrütern (LMFBR). Es wurde als praktischer Wert eine Abkühlzeit von 3 Jahren angenommen. (Der theoretische Grenzwert rechnet mit keiner Abkühlzeit). In die Abbildung sind zwecks Vergleich maßstabgerecht auch die

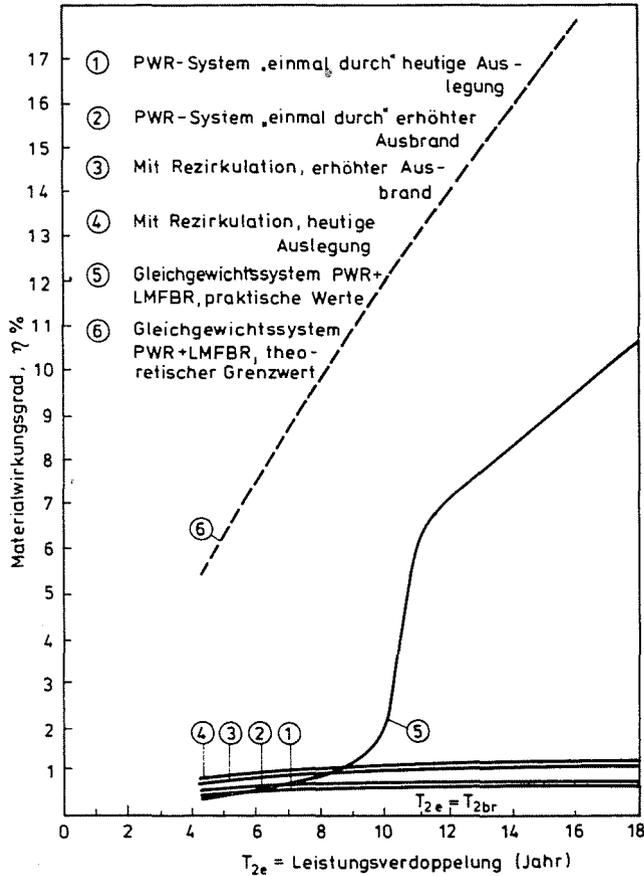


Abb. 6. Materialwirkungsgrade für Reaktorsysteme bestehend aus PWR und LMFBR Reaktoren

Kurven der Abb. 5 übernommen. Man sieht, daß bei einem verhältnismäßig langsamen — daher auch realistischen — Ausbau des Kernkraftwerkssystems ( $T_{2e}$  größer als 11–12 Jahre) ein solches gemischtes Gleichgewichtssystem wohl denkbar ist, wobei im Realfall verhältnismäßig gute Materialwirkungsgrade von 7–10% zu erreichen wären. Es muß aber ausdrücklich betont werden, daß hierzu solche Brüterkonstruktionen notwendig sind, die eine geringere erste Füllung benötigen und eine raschere Doppelungszeit des erbrüteten Materials ( $T_{2br}$ ) ermöglichen, als die heutigen flüßigmetallgekühlten Schnellbrüter. Solche Reaktoren sind aber — wie bereits erwähnt — noch nicht entwickelt. Bei einem hypothetisch raschen Ausbautempo der Kernkraftwerke ( $T_{2e}$  kleiner als 7–8 Jahre) kann ein gemischtes System überhaupt nicht in Gleichgewicht kommen, da die schnellen Brüter so viel Plutonium benötigen, das sie selbst nicht erzeugen können. Es müßte daher Uran angereichert werden, es

entstünden gleichzeitig Lagerbestände mit abgereichertem Uran. Der Materialwirkungsgrad wäre auch schlechter als mit thermischen Reaktoren allein. Im angenommenen Beispiel, etwa bei einem Systemverdoppelungszeit von 11–12 Jahren (steiler Anstieg der Kurve 5 in der Abb. 6) könnte das Brennstoffgleichgewicht durch Schnellreaktoren allein hergestellt werden, das wäre aber kein gemischtes System mehr. Die jetzt bereits vorhandenen thermischen Reaktoren müßten dann für sich betrieben oder stillgelegt werden. Wieder ein sicherlich nie eintretender Fall.

Realistisch kann man nur mit einem langsameren Ausbau des Kernkraftwerkssystems rechnen ( $T_{2e}$  über 12 Jahre) stets aber unter Berücksichtigung der Tatsache, daß etwa 85% der heute im Betrieb oder im Bau befindlichen rund 380 GWe Kernkraftwerke Leichtwasserreaktoren besitzen. Schnelle Brüter machen derzeit weniger als 1% aus (rund 3 GWe). Praktisch werden die Brüter immer mit den, bis zum Zeitpunkt ihrer kommerziellen Einführung vorhandenen thermischen Reaktoren zusammenarbeiten müssen, d. h. sie werden mit letzteren immer ein Kernkraftwerkssystem bilden. Wird aus den angeführten Gründen das optimale Gleichgewichtssystem angestrebt, so wird dieses nie von Null starten können wie es in den vorangehenden Beispielen angenommen wurde. Man wird immer mit dem Vorhandensein einer großen Menge abgemagerten Urans und einer verhältnismäßig kleineren Menge noch nicht isolierten Plutoniums rechnen müssen. Die erwähnten Untersuchungen haben gezeigt, daß unter solchen Umständen mindestens 40–50 Jahre nötig wären, bis ein Gleichgewichtssystem erreicht werden kann, wobei für diese Übergangsperiode der durchschnittliche Materialwirkungsgrad weit unter 3% bleiben wird. Dieser Wert ist der, in der Fachliteratur oft zitierten Zahl von 25–30% (manchmal 60–70%) entgegenzusetzen. Selbst dieser niedrige Wert von 3% ist aber aus den erwähnten Gründen heute noch äußerst fraglich.

Sich heute also auf die Nutzung der Spaltungsenergie zu verlassen, ist — neben allen anderen Problemen — gleichbedeutend mit einer starken Verschwendung der uns zur Verfügung stehenden Rohenergiequellen. Allein aus diesem Grunde kann daher die Kernenergie aus Spaltungsreaktoren immer nur eine, neben den anderen Energiequellen ergänzende, kompetitive Energieform bleiben.

Die allgemeine Bewertung dieser Energieform ist sehr verschieden einerseits in den meisten westlichen kapitalistischen, andererseits in den östlichen, sozialistischen Ländern. Im Westen war noch vor der ersten Ölkriese die Ansicht allgemein verbreitet, daß die Benutzung der Spaltungsenergie in den nächsten Jahrzehnten den größten Teil der elektrischen Energieerzeugung übernehmen wird und dadurch die Strompreise sich an einem niedrigeren Nivo einspielen werden. Dieser Standpunkt wird heute noch vielleicht allein in Frankreich und Japan vertreten. In der Wirklichkeit folgte in den meisten westlichen Industriestaaten eine traurige Periode für die Kernenergetik, welche

— nur teilweise durch die spätere Rezession bedingt — einerseits in den Fachkreisen durch eine äußerst vorsichtige und zurückhaltende Stellungnahme gegenüber den technischen und wirtschaftlichen Parametern, andererseits in vielen Staaten durch ein starkes Mißtrauen der Öffentlichkeit gekennzeichnet wird. Dieses Mißtrauen wurde und wird mit Argumentationen des Umweltschutzes, d. h. mit biologischen und sozialen, aber auch mit weltpolitischen Faktoren aufrechterhalten, wobei den Gegenargumenten meistens wenig, oder überhaupt kein Gehör geschenkt wird. Eine direkte Folge ist die — oft schon übertrieben erscheinende — Ausbreitung der Sicherheitsmaßnahmen, Verlängerung der Bauzeit auf über 10–12 Jahre, Erhöhung der Kosten, usw.

Demgegenüber ist die Bewertung der Kernenergie in den sozialistischen Ländern und in erster Linie in der Sowjetunion viel konkreter und konsekventer. Nach dieser Ansicht werden die Grenzen der Nutzung der Kernenergie um die Jahrhundertwende durch technische, wirtschaftliche, soziale und politische Faktoren beeinflusst. Unter den technischen Faktoren werden die, im Westen so stark hervorgehobenen Probleme der Reprozession und der Abfalllagerung als gelöst betrachtet. Die Reprozession soll in der Zukunft nicht ausbleiben.

Eines ist aber sicher. Die bisher bekannten, oder besser gesagt, bekannt gegebenen Uran- und Thoriumvorräte verlangen eine viel wirksamere Ausnutzung dieser Energieform. Das Ziel ist die Erreichung eines viel größeren Materialausnutzungsgrades durch des Brüterverfahren, ein Ziel, das aber die Gesamtheit der Kernkraftwerke betrachtet, noch in der fernen Zukunft zu liegen scheint. Es besteht die große Frage, ob es überhaupt noch zu dieser Entwicklung kommen wird.

Denn die andere Möglichkeit der Kernenergienutzung, die durch die Fusion der leichten Atomkerne, steht — wenn auch nicht unmittelbar — vor der Tür, schickt ihre Boten aber bereits in die wissenschaftlichen Laboratorien voraus und wird nachher sicherlich in den Versuchsbetrieben erscheinen. Nach Berichten ist es 1981 in Princeton (USA) gelungen die stattgefunden Fusion zwischen  $\text{He}^3$  und D-Kernen mit einer Leistung von 60 W zu beweisen. Anfangs dieses Jahres war die Tokamak-Anlage in Princeton 60 ms lang in effektivem Fusionsbetrieb, was als ein geschichtliches Ereignis betrachtet wird. Der technische Durchbruch (technical feasibility), wobei also aus der Einrichtung dauernd mehr Energie gewonnen, als es zur Einleitung der Kernverschmelzung benötigt wird, wird derzeit etwa im Jahre 1986 erwartet. (Ein Termin, der bereits zahlreichen Verschiebungen unterlag.)

Wie immer, mit ihren tatsächlich unerschöpflichen Rohstoffen aus dem Meerwasser (Anteil des  $\text{D}_2$  rund 1/6000-stel) und mit dem weit umweltfreundlicheren Verhalten gegenüber der Spaltungsenergie wird die Fusion gewiß die wichtigste Energiequelle der Zukunft sein. Selbst dann, wenn heute noch der

physikalische Beweis der Dauerdurchführbarkeit des Verfahrens nicht erbracht ist und die technischen und technologischen Schwierigkeiten ungeheuer groß sind, von der erwarteten Wirtschaftlichkeit ganz zu schweigen. Selbst dann, wenn — vielleicht am Centennarium der Aufstellung des Einsteinschen Äquivalenzgesetzes, etwa nach 2000 — der erste Prototypreaktor nach dem Fusionsprinzip in Betrieb geht und damit überhaupt das kostspieligste Experiment der Weltgeschichte vom endgültigen Erfolg gekrönt wird. (Allein der 60 ms-währende Betrieb in Princeton soll Ausgaben von 314 M\$ verursacht haben.) Der Erfolg kann aber nicht Ausbleiben, denn kein Naturgesetz verbietet die Fusion, diese findet ja z. B. in der Sonne ständig statt. Infolgedessen kann und wird sie einmal auch künstlich realisierbar sein.

### Zusammenfassung

In vorliegender Arbeit wird zunächst auf den beinahe lückenlos für alle, auf der Erde brauchbaren Energiequellen geltenden nuklearen Ursprung hingewiesen. Bei der Befreiung, resp. Umwandlung dieser Energie gilt das Äquivalenzgesetz, die Wärmebelastung der Umwelt ist dabei unvermeidlich. Es wird auf die Wichtigkeit der übrigen Risikofaktoren aufmerksam gemacht.

Behandelt wird die Dynamik der Ausnutzung der Energiereserven, der Verbrauchsstruktur und der Preise. Die Bedingungen für die Errichtung eines nuklearen Gleichgewichtssystems und die dadurch zu erwartenden Verbesserungen des Spaltstoffausnutzungsgrades werden kurz untersucht.

### Literatur

1. HAMILTON, L. D.: „Comparative Risks from Different Energy Systems: Evolution of the Methods of Studies“ IAEA Bulletin, **22**, N° 5/6, October 1980.
2. XI World Energy Conference, München 1980. Survey of Energy Resources. Part B. Appendixes.
3. XI World Energy Conference, München 1980. Generalbericht G. 1. p. 260.
4. Monthly Bulletin of Statistics, United Nations.
5. Jahrbücher der Weltkraft-, resp. der Weltenergiekonferenz.
6. Mitteilungen des RWF. 33. 2. 1982.
7. Handelsblatt, 1983 15. III.
8. CSOM, G.—FEHÉR, S.: Realistic Evaluation of the Natural Uranium Demand of Nuclear Power Systems Based on Thermal Reactors (Transactions ANS Vol. 40. 1982. Brussels).
9. CSOM, G.—FEHÉR, S.: Advantages of the Regional Nuclear Energy System and Conditions for Realizing Such a System. (IAEA-CN-42/372.)

Prof. Dr. András LÉVAI H-1022 Budapest, Fillér u. 56.