

EINIGE VORAUSSETZUNGEN EINER ZWECKENTSPRECHENDEN SPALTSTOFFBEWIRTSCHAFTUNG

Von

A. LÉVAI

Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, Technische Universität Budapest

Eingegangen am 10. Mai, 1978

Bekanntlich nimmt die Kernenergie in der Befriedigung des Energiebedarfes der Menschheit aus wohlbekannten Gründen eine ständig zunehmende Rolle ein. Das Interesse an Kernkraftwerken hat seit der Ölkrise Ende 1973 sprunghaft zugenommen, so daß man heute für die Zeit um die Jahrhundertwende mit einer Kernkraftwerkskapazität in der Größenordnung von 4500—5500 GWe rechnet, ein Betrag, welcher etwa dreimal so hoch ist, wie die heutige Gesamtkapazität der Erde an Kraftwerken. Eine vordringliche Aufgabe ist im Lichte solcher Zahlen, die Lage der Spaltstoffbewirtschaftung womöglich eingehend zu untersuchen, um unangenehme Überraschungen rechtzeitig vorzusehen, bzw. in der Forschung und Entwicklung in jene Richtung zu arbeiten, welche eine Garantie für die gesicherte Versorgung obengeschätzter und im nächsten Jahrhundert noch dazukommender Kernkraftwerkskapazitäten mit Spaltstoffen gewährleistet. Es handelt sich dabei natürlich um die Einsetzung der Brutreaktoren. Die nicht einfach zu beantwortenden Fragen sind:

- wie sind diese zweckmäßig auszulegen;
- wann werden sie einsatzbereit sein müssen, resp.
- welche Auswirkung haben diese Merkmale auf die Vorräte an natürlichem Uran resp. Thorium?

In nachstehender Arbeit wird versucht, die wesentlichsten Einflußfaktoren in großen Zügen zu analysieren.

Spaltstoffreserven

Die Gesamtreserven an metallischem Uran und Thorium in der Erde werden in der Größenordnung von 10^{14} Tonnen geschätzt, wobei aber der überwiegende Anteil in äußerst schwacher Konzentration (etwa 12 g Uran in 1 Tonne Gestein) und sehr weit verteilt vorkommt. Die Gewinnungskosten des Uranoxids wären bei diesen Erzen unerschwinglich hoch (mindestens 1000 \$ pro kg U_3O_8), so daß man sicherlich nicht fehl geht, wenn man einen Höchstwert

von cca 100—300 Millionen Tonnen Uran als obere Grenze der geologisch nicht nachgewiesenen Mengen annimmt. Die im Meerwasser in einer durchschnittlichen Konzentration von etwa 3 mg/t vorhandene Uranmenge beläuft sich auf etwa 4 Milliarden Tonnen, mit einem Gewinnungspreis von etwa 150 bis 200 \$/kg U_3O_8 . (Die hierzu geeigneten Verfahren sind vielversprechend, wenn auch die aus dem Inhalt der Meere effektiv erhaltbare Menge nur einen Bruchteil des obigen Wertes betragen kann.) Die heutigen Gewinnungskosten aus den abbauwürdigen Erzen liegen etwa bei 30—40 \$/kg. Die Menge der in diese Kategorie fallenden Erze wird heute etwa auf eine Million Tonnen Uran resp. 0,5 Million Tonnen Thorium geschätzt. Man könnte also in die Bilanz eine in weiten Grenzen schwankende Zahl ansetzen. Um sich doch auf irgend eine Zahl festzunageln, wird nach den Daten der IX. Weltenergiekonferenz angenommen, daß die Menge der fündig gemachten oder wahrscheinlichen Spaltstoffreserven (Uran und Thorium) bis zu einem Gewinnungspreis von 38 \$/kg etwa 7,2 Million Tonnen beträgt.

Spaltstoff-Ausnutzungsfaktor

Bekanntlich wird der theoretische Energieinhalt des Spaltstoffes in den heutigen, mit thermischen Neutronen arbeitenden Konverter-Reaktoren sehr schlecht ausgenutzt. Führt man den Begriff des Spaltstoff-Ausnutzungsfaktors ein, worunter das Verhältnis der im Reaktor effektiv erzeugten Wärme zum theoretischen Energieinhalt des Erzes bzw. des Konzentrates bei Spaltung sämtlicher spaltbaren Kerne verstanden werden soll, so liegt diese Zahl bei den heute meistverbreiteten Leichtwasserreaktoren unter 0,5%. Rechnet man mit teilweiser Rückführung des im Reaktor erzeugten Plutoniums und des wiederverarbeiteten Urans, so kommt man auf 0,7—0,8%. Unter idealen Verhältnissen würden sich mit Brutreaktoren Spaltstoff-Ausnutzungsfaktoren bis zu etwa 75% erreichen lassen (s. später). Kombinierte Systeme liegen in der Wirklichkeit aus zwingenden Gründen, die noch erörtert werden sollen, zwischen diesen Zahlen, aber noch lange Zeit hindurch mit Bestimmtheit viel näher zur unteren Grenze. (Um die Jahrhundertwende etwa bei 2%.)

Kernenergiesysteme

Bei der Untersuchung von kombinierten Kernenergiesystemen wird eine Zunahme der Kernkraftwerkskapazitäten auf der Erde zugrunde gelegt, wie dies aus *Abb. 1* ersichtlich ist. In derselben Abbildung erscheint auch die angenommene Gesamtkapazität der Kraftwerke, wie auch die für Zeitperioden von je 5 Jahren gerechnete Verdoppelungszeit (T_{2x}) der Kernkraftwerke.

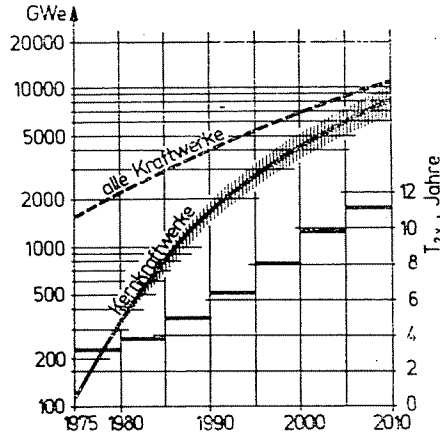


Abb. 1. Kraftwerks- und Kernkraftwerkskapazitäten. Verdoppelungszeit der Kernkraftwerke

(Die Streuung der verschiedenen Aussagen über den Energieverbrauch in der Zukunft soll dabei durch die schraffierte Zone der Kernkraftwerksleistungen angedeutet werden.) Dabei wird die Verwendung der Kernenergie außerhalb von Kraftwerken (so z. B. für technologische Wärmeerzeugung, Fernheizung, Schiffsantrieb usw.) außer acht gelassen, um so mehr, da solche — an und für sich wichtige — Verwendungszwecke selbst in den späteren Jahrzehnten neben der Elektroenergieerzeugung nicht zu sehr ins Gewicht fallen dürften.

Um den Einfluß der einzelnen Reaktortypen auf die Spaltstoffbewirtschaftung zu analysieren, wurden die nachfolgenden Varianten untersucht:

Variante I. Alle Kernkraftwerke werden mit thermischen Konverterreaktoren des Typs LWR gebaut (keine Brutreaktoren). Für eine bessere Übersichtbarkeit wurden in den Untersuchungen andere Konvertertypen (z. B. gas- oder schwerwassergekühlte), ferner andere Brüter (z. B. thermische), wie auch das Th—U²³³-System nicht mit in den Kreis der Betrachtungen einbezogen.

Die übrigen Varianten rechnen mit Schnellbrütern in der Weise, daß deren Leistungsfähigkeit den realen Verhältnissen entsprechend in den nächsten Jahren nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der neu zu errichtenden Kernkraftwerkskapazitäten ausmacht (im Jahre 1975, den Tatsachen entsprechend, etwa 1%, 1981 2%, 1985 4%, 1990 10,5%). Nach 1990 sind zwei Alternativen angenommen.

Variante II setzt voraus, daß nach 1990 die bis dahin erreichte Erzeugungskapazität der Konverterreaktoren von etwa 140 GWe/Jahr beibehalten und jährlich neu errichtet wird. Den notwendigen Rest machen schnelle Brutreaktoren aus.

In *Variante III* wird als Extremfall vorausgesetzt, daß nach 1990 die Kapazität der neu zu errichtenden thermischen Kernkraftwerke jährlich um je 25% abnimmt, es wird also mit einem raschen Anstieg der Schnellbrüter gerechnet. Die Wirklichkeit dürfte dabei zwischen den Extremfällen II und III liegen.

Um den Einfluß des Brutreakortyps auf die Spaltstoffbewirtschaftung verfolgen zu können, sind bei den Varianten II und III drei Subvarianten für die Schnellreaktoren untersucht worden:

Fall a); es werden nur flüssigmetall-(Na)gekühlte Schnellreaktoren gebaut, ähnlich den Typen, wie sie heute in der Sowjetunion, in Frankreich, im Vereinigten Königreich und in den Vereinigten Staaten in Betrieb bzw. in Bau sind;

Fall b): die flüssigmetallgekühlten Brutreaktoren werden durch konstruktive und technologische Verbesserungen der Brennelemente (Karbide oder Nitrid anstatt Oxyd), resp. der Kühlung, derart weiterentwickelt, daß der spezifische Spaltstoffaufwand für die I. Füllung gegenüber Fall a) auf etwa die Hälfte reduziert werden kann;

Fall c): neben der Verkleinerung der spezifischen Kernfüllung wird die Erzeugungsgeschwindigkeit des neuen Brutstoffes auf das Zweifache erhöht, was nach den heutigen Kenntnissen nur mit gasgekühlten (Hochtemperatur-Helium oder dissoziierendes Gas) Brutreaktoren möglich ist.

Eine auf den obendargelegten Annahmen beruhende Aufteilung der Gesamtkapazität zwischen Konverter- und Brutreaktoren in den Jahren 1975 bis 2010 ist aus *Abb. 2* ersichtlich.

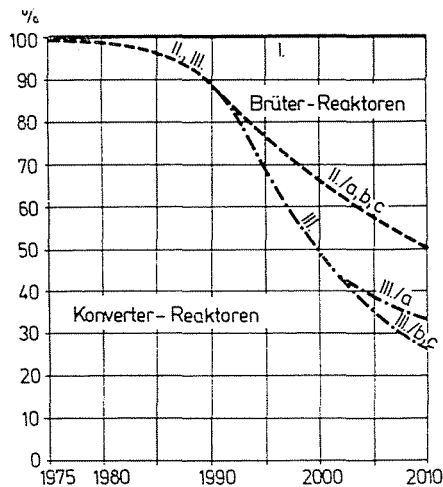


Abb. 2. Prozentuelle Unterteilung der Kernkraftwerke in Konverter und Brüter

Das Schema in *Abb. 3* zeigt den zugrunde gelegten Brennstoffzyklus, wobei aus Materialbewirtschaftungsgründen für die Brutreaktoren nebst abgereichertem Uran nur Plutoniumfüllung angenommen wird. Das abgereicherte Uran enthält angenommenerweise 0,2% U^{235} , die Reprozessionsverluste für Uran und Plutonium werden jeweils zu je 0,5% angenommen, die spezifische Trennarbeit der Isotopenanreicherungsanlage wurde mit 2500 kWh/kg in Rechnung gestellt, wobei auch die notwendige elektrische Leistung dieser Anlage in *Abb. 1* mit in Betracht genommen wurde. In den Konverterreaktoren wurde 1 t Plutonium verschiedener Zusammensetzung der Menge von 0,65 t U^{235} gleichgesetzt. Wie bereits erwähnt, wurden als Konverter nur die Leichtwassertypen angenommen mit einer spezifischen ersten Füllung von 105 t/GWe bei einer durchschnittlichen Anreicherung von 2,5%; ferner ein Jahresverbrauch von 35 t/GWe (durchschnittlich 3,3% U^{235}), ein Auswurf an Gesamtplutonium unter Berücksichtigung der Verluste von 0,3 t/GWe/Jahr und an abgereichertem Uran mit 0,8% U^{235} von 33 t/GWe/Jahr.

Für die heutigen schnellen Brutreaktoren (Fall a) werden eine erste spezifische Plutoniumfüllung von 2,5 t/GWe und als Brutmaterial 60 t/GWe abgereichertes Uran angenommen. Die jährliche Plutoniummehrerzeugung soll nach Abzug der Reprozessionsverluste und der rezirkulierten Mengen 0,17 t/GWe pro Jahr, die jährliche Nachfüllung an abgereichertem Uran 1,25 t/GWe pro Jahr betragen. Aus diesen Daten ergibt sich eine Verdopplungszeit des Spaltstoffes für die Reaktoren selbst — also ohne Berücksichtigung der außerhalb des Reaktors notwendigen Kühlungs-, Lagerungs-, Verarbeitungs- etc. Zeiten — für den Fall a) von 14,7 Jahren. Im Falle b) ergibt sich sinngemäß eine halb so große Verdopplungszeit, im Falle c) die Hälfte von Fall b).

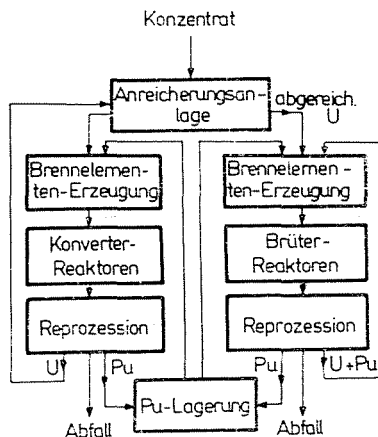


Abb. 3. Brennstoffzyklus

Zusammenfassend sind die obengenannten Charakteristiken der schnellen Brutreaktoren aus nachstehender Tabelle ersichtlich.

Sub-variante	Kühlung	I. Füllung		Jährliche Nachfüllung 0,2% U^{235} t/GWe/J.	Jährlicher Spaltstoffgewinn Pu t/GWe/J	Verdoppelungszeit Jahr
		Pu t/GWe	0,2% U^{235} t/GWe			
a	Flüssig. Metall	2,5	60	1,25	0,17	14,7
b	Flüssig. Metall	1,25	30	1,25	0,17	7,4
c	Gas	1,25	30	1,25	0,34	3,7

Untersuchungsergebnisse

Zugegeben, daß die Berechnungsgrundlagen und Voraussetzungen mancherorts unsicher sind, können trotzdem die Ergebnisse der Untersuchungen als charakteristisch und unter Berücksichtigung der Zielsetzung dieser Studie für den Vergleich der einzelnen Varianten als geeignet bewertet werden.

Als maßgebendes Ergebnis kann der Verbrauch an Uranerzkonzentrat gemäß *Abb. 4* angesehen werden. Der vorher als Basis angenommene Vorrat von 7,2 Millionen Tonnen U_3O_8 billigen Uranerzes wird im Falle der Variante I (nur thermische Konverter) bereits um die Jahrtausendwende aufgebraucht sein. Dieser Zeitpunkt verschiebt sich im Falle von Variante II (verhältnismäßig langsamer Einsatz der Brüter) nur um einige Jahre und hängt kaum

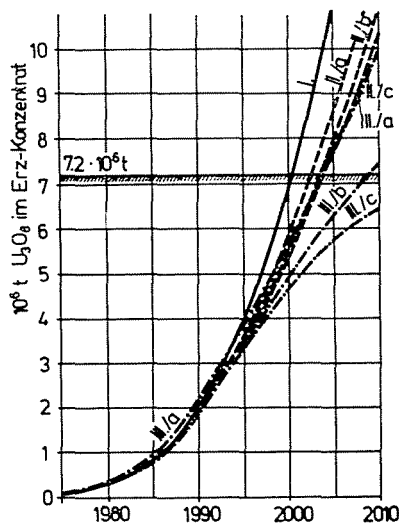


Abb. 4. Kumulativer Uranverbrauch im Erzkonzentrat

von der Type dieser Reaktoren ab. Der Grund hiefür liegt darin, daß der Anteil der Brutreaktoren um die Jahrhundertwende nur etwa 35% erreicht, so daß diese bei weitem nicht jene zusätzliche Menge an Spaltstoffen produzieren können, welche als erste Füllung der neu zu errichtenden Konverter- und Brutreaktoren sowie für den Betrieb der bereits vorhandenen und an Leistungsfähigkeit weiter zunehmenden Konverterreaktoren notwendig ist.

Demgegenüber spielt bei der Variante III (rascher Einsatz der Schnellbrüter) die Type der Brutreaktoren eine entscheidende Rolle. Wie ersichtlich, beginnt bei den Subvarianten III/b und III/c die beanspruchte Menge an Uranerzkonzentrat nach 1990 abzunehmen und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert, der bei Subvariante III/b zwischen 15 und 20, bei Subvariante III/c bei etwa 7 Millionen Tonnen U_3O_8 liegt.

Variante III/a weist in der ersten Periode (etwa bis 1993) den größten Verbrauch an Uranerz auf und sinkt nur langsam unter die Werte der Variante II. Wie bereits erwähnt, liegt der Grund in der Tatsache, daß ein rascher Ausbau von Brüteru, die eine hohe spezifische Erstfüllung beanspruchen, die in den Konverterreaktoren erzeugten Plutoniummengen stark in Anspruch nimmt. Es wird nämlich bei jeder Variante vorausgesetzt daß die in den Konverterreaktoren jährlich erzeugten Plutoniummengen — nach Abzug der für die Erstfüllungen der Brüter nötigen Mengen — als Brennstoff für thermische Reaktoren zur Verfügung stehen. Bei der Subvariante III/a bedingen aber der rasch erfolgte Ausbau und die hohe spezifische Füllung der angenommenen Brüter, daß ein Teil des "überflüssigen" Plutoniums gelagert werden muß um zu jener Zeit als I. Füllung zur Verfügung zu stehen als die Konverter nicht mehr genügend neuen Spaltstoff erzeugen. Selbst so muß nach Erschöp-

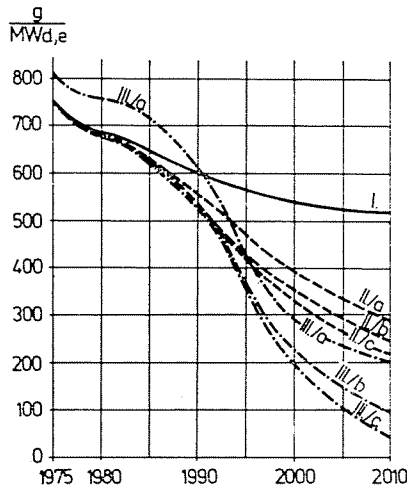


Abb. 5. Spezifischer Uranverbrauch der elektrischen Energie (I. Füllung und Betrieb)

fung der Pu-Reserven (etwa um 2000 nach Abb. 2) der Anteil der schnellen Brüter bei der Subvariante III/a gegenüber III/b und III/c vermindert werden.

Der verlängerte Ausbau der Konverter mit angereichertem Uran und der starke Pu-Verbrauch der Brüter bei Subvariante III/a führen — wenigstens in den ersten etwa 15 Jahren — zu einer stärkeren Inanspruchnahme der Uranerzreserven als bei der Variante I. Die Verhältnisse sind aus der Abb. 5 klar ersichtlich, in der die für die Einheit der elektrischen Energie (MWd, e) notwendige Menge an Uran im Erz aufgetragen ist. Diese beinhaltet sowohl die für die erste Füllung als auch die für den Betrieb notwendige Menge. Auch aus dieser Abbildung geht die große Bedeutung der "guten" Schnellbrüter, besonders der Subvariante III/c, hervor. Schnellbrüter der heutigen Type können nur verhältnismäßig langsam gebaut werden, da ansonsten die beschränkten Spaltstoffreserven noch rascher aufgebraucht würden als in dem Falle, wenn keine Schnellbrüter eingesetzt werden. Selbstredend ist die Forderung nach neuen Anreicherungs-kapazitäten usw. in diesem Falle auch am grössten.

Von dem Standpunkte des Spaltstoffausnutzungsgrades (η_a) betrachtet ist es aus Abb. 6 zu entnehmen, daß bei Variante II selbst im Jahre 2010, als etwa die Hälfte aller Kernkraftwerkskapazitäten mit Schnellbrütern vorausgesetzt ist (Abb. 2), nur ein Wert von weniger als 2% zu erreichen ist. Die Subvarianten III/a und insbesondere III/b liegen zu diesem Zeitpunkt bereits bedeutend besser, bei der Subvariante III/c muß nach einiger Zeit — solange

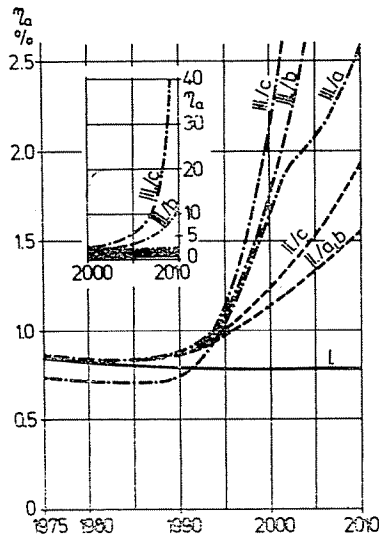


Abb. 6. Spaltstoffausnutzungsgrade

die angesammelten Vorräte an Plutonium und abgereichertem Uran nicht verbraucht sind — überhaupt kein Erz mehr gefördert werden. Nach diesem Zeitpunkt bestimmt das sog. Gleichgewichtssystem von Konverter- und Brutreaktoren mit einem Spaltstoffausnutzungsgrad von etwa 75% die zu fördernde Menge.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Kernenergiesysteme mit verschiedenen Brutreakortypen und mit verschiedenen Ausbauprogrammen beweisen, dass die heute vorhandenen und vorausgesetzten, als abbauwürdig betrachteten Erzvorräte beim Bau von Kernkraftwerken mit Konverterreaktoren bis zur Jahrhundertwende mit Sicherheit aufgebraucht sein werden. Sollten keine neuen und billigen Vorräte dazukommen, so wird unausweichlich ein starkes Anziehen der Spaltstoffpreise erfolgen. Ein verlangsamter Ausbau der Schnellreaktoren verschiebt den vorerwähnten Zeitpunkt nur unwesentlich, um einige Jahre. Das Beschleunigen des Brutreaktorbaues in der heutigen Auslegung löst das Problem ebenso wenig, da eine starke Diskrepanz zwischen der Verdoppelungszeit des Kernkraftwerkbaues von 4 bis 8 Jahren (laut Abb. 1) und der neuen Spaltstoffherzeugung von mindestens 10 bis 15 Jahren in flüssigmetallgekühlten Brutreaktoren besteht. Bei Intensivierung des Brüterbauprogrammes ist es notwendig, solche Typen zu entwickeln, die einerseits eine wesentlich geringere Erstfüllung beanspruchen, gleichzeitig aber durch technologische und konstruktive Verbesserungen Verdoppelungszeiten in der Plutoniumherzeugung von etwa 4 bis 5 Jahren aufweisen. Eine angestrebte Ausnutzung mit hohem Wirkungsgrad der Kernenergie — wenigstens im nächsten Jahrhundert — erfordert die Entwicklung von neuen, voraussichtlich gasgekühlten Typen der Schnellreaktoren und eine womöglich rasche Verbreitung derselben.

Literatur

WEC Survey of Energy Resources 1974—1976

ORLOV V. V. u.a.: Wege zur Erzielung kleiner Verdoppelungszeiten für schnelle natriumgekühlte Reaktoren mit oxidischen Brennstoff. — Kernenergie 18. Jg. Heft 2/1975.

FEINBERG, S. M.: Bystrye gasowye i teplowye reaktory-rasmnoshiteli. — Atomnaja energija Tom 37. wyp. 1. 1974.

KRASIN, A. K.—NESTERENKO, V. B.: Novye wosmoshnosti sosdaniija gasoohlashdaemych bystrych reaktorow s malym wremenem udwoenija na dissozirujuschtschej, N₂O₄. — Atomnaja energija Tom 37 wyp. 1 1974.

VENTRE, M.: L'utilisation du combustible dans les filières nucléaires: comparaison graphique. — Revue de l'Energie, Janvier, 1975.

LÉVAI, A.: A magenergia hasznosításának néhány időszerű kérdése. — Műszaki Tudomány 50, 1975.

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