

**Zeitschrift:** Rote Revue : sozialistische Monatsschrift  
**Band:** 39 (1960)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Wirtschaftliche und technische Probleme der Kernenergie  
**Autor:** Plasil, Franz  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-337186>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 08.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

FRANZ PLASIL, Queen Mary College, London

## Wirtschaftliche und technische Probleme der Kernenergie

Mit der raschen technischen und wissenschaftlichen Entwicklung, die in den letzten Jahren immer größere Bedeutung erlangte, ist es nötig, auch die wirtschaftliche Seite der Anwendung von Atomenergie zu betrachten. Es ist vorläufig eine Tatsache, daß die Energieerzeugung durch Kernspaltung wesentlich teurer ist als die konventionelle Erzeugung, und darum hat die wirtschaftliche Betrachtung nur einen Sinn, wenn sie im Zusammenhang mit der zukünftigen ökonomischen Entwicklung erfolgt. Die Probleme sind sehr kompliziert, und verhältnismäßig wenig Information ist vorhanden. Die Faktoren, die betrachtet werden müssen, sind unter anderem: der verschiedene Entwicklungszustand der Energieproduktion der einzelnen Länder, die Versorgung mit Kernbrennstoff, die verschiedenen Reaktortypen und die Möglichkeiten für die Anwendung der Atomenergie in der Industrie. Da es in der nahen Zukunft nicht möglich sein wird, Kernenergie in kleinem Maß und mit leichten Ausrüstungen herzustellen, muß damit gerechnet werden, daß die Anwendung nur im Feld der Stromerzeugung und der Wärmeproduktion in der Industrie, aber auch für größere Verkehrsmittel, wie Schiffe, Unterseeboote und Flugzeuge, stattfinden wird.

### *Zukunftsaussichten*

Wie schon angedeutet, ändern sich die Aussichten von Land zu Land. Sie hängen von der gesamten Entwicklung des Landes ab, vor allem aber vom Entwicklungszustand der Energieproduktion. Zukünftiger Energieverbrauch, gegenwärtige Energiekosten sowie Energiereserven, die wachsende Wichtigkeit bestimmter Brennstoffe in der chemischen Industrie, die ökonomische Struktur der verschiedenen Länder, Transportprobleme usw. spielen alle eine Rolle. Wachsende Kernenergieproduktion in industriellen Ländern wird eine ganze Reihe neuer Industriezweige mit sich bringen, und so ist es zu empfehlen, die Integration in die Industrie langsam durchzuführen, da sonst die Produktionskosten steigen würden. Aus diesem Grund ist die Einführung von Kernenergie jetzt schon berechtigt, obwohl die Kosten noch

hoch sind und es keinen Mangel an konventionellen Energiequellen gibt. In den USA, als Beispiel der Länder, wo die Stromerzeugung in Privathänden liegt, ist dadurch die Lage entstanden, daß der Staat die kostspielige technische Forschung bezahlt, damit die Gesellschaften, die das Kapital verschaffen müssen, genügend daran interessiert werden.

Man kann die Länder nach ihrer Energielage in vier Gruppen einteilen: 1. Länder, die schon große Mengen Energie einführen müssen; 2. Länder mit genügend Energiequellen, die aber auch bald ungenügend sein werden; 3. Länder, die sehr reich an Kohle sind; 4. Länder, die noch ziemlich lange genügend Energiequellen besitzen werden.

Die erste Gruppe ist natürlich am meisten an Kernenergie interessiert; in ihr befinden sich Frankreich, Großbritannien, Holland, Italien, Japan und Schweden. Für Frankreich, Italien und Schweden, die selber Uran besitzen, und für Großbritannien, das es von dem Commonwealth bekommen kann, hat die Kernenergie eine besondere Bedeutung. So führte Sir John Cockroft in «The Story of the Atom» aus, daß im Jahre 1975 Kernenergiekraftwerke in Großbritannien einen jährlichen Import im Werte von 200 Millionen Pfund Sterling ersparen sollen.

Die Tabelle zeigt die geplante Entwicklung dieser Gruppe, zusammengestellt auf Grund von Informationen, die der zweiten Atomkonferenz in Genf (1958) vorlagen. Westdeutschland, das in die Gruppe 3 gehört, und die USA (Gruppe 4) sind für Vergleichszwecke angeführt.

*Geplante Kernenergieproduktion  
in MW und als Prozent der Gesamtproduktion*

Land	1959	1962	1965	1975	1965 1975	
	MW	MW	MW	MW	%	%
Frankreich	128	470	800	8000	5	30
Italien	—	200	900		3,4	
Japan	—	150	600	7000		19,1
Holland	—	100	400	3000	7,9	34,7
Schweden	—		130	2000	1,2	11,3
Großbritannien	266	1679	5000–6000	20 000–30 000	25	50–70
USA	76,5	1048	1648		0,9	6,9
Westdeutschland	—	—	500	6000	1,3	8,6

Die Länder in der Gruppe 2, zu denen Spanien und Portugal gehören, warten mit ihrem Konstruktionsprogramm und verfolgen die technischen Entwicklungen. So hofft Portugal zum Beispiel, im Jahre 1975 100 MW Kernenergie zu erzeugen, was nur 2,8 Prozent der Totalerzeugung entsprechen würde.

Zur Gruppe 3 gehören Westdeutschland, Belgien und Polen. Diese Länder führen vorläufig hauptsächlich Versuchsprogramme durch. Trotzdem aber soll die Integration bei ihnen bald beginnen. So hofft man, daß im Jahre 1975 in Belgien 24,7 Prozent, in Westdeutschland 8,6 Prozent und in Polen 10 Prozent der Gesamtstromerzeugung aus Kernenergie stammen werden.

Gruppe 4 besteht aus Australien, Burma, Kanada, Formosa, Indien, Pakistan, Rumänien, der Tschechoslowakei, der Türkei, der Sowjetunion, den USA und Uruguay. Trotzdem keine Not besteht, gibt es in einigen dieser Länder Gegenden, wo die Stromerzeugung wegen der Transportprobleme so teuer kommt, daß Kernenergie jetzt schon vorteilhaft sein würde. Die USA und die Sowjetunion führen zwar umfangreiche Versuchsprogramme durch, aber die Energieerzeugung in Amerika wird solange nur sehr langsam vorwärtsrücken, bis sie billiger sein wird als die konventionelle Erzeugung, und über die Anwendung in Sowjetrußland ist nicht viel bekannt.

### *Reaktortypen*

Das Prinzip, das angewendet wird, durch ein kontrolliertes Verfahren Energie aus dem Atomkern freizusetzen, ist die Fission. Die Fusion, das Prinzip der Wasserstoffbombe, die eine noch größere Quantität Energie von der gleichen Masse freisetzt, kann man leider noch nicht kontrollieren. Da aber die Fusion kein teures Uran benötigt, sondern nur schweres Wasser, das verhältnismäßig billig aus leichtem (gewöhnlichem) Wasser hergestellt werden kann, muß man der Möglichkeit, sie zu ändern als zu Vernichtungszwecken zu verwenden, auch Aufmerksamkeit schenken. Die Fission besteht darin, daß die Atomkerne einiger schwerer Elemente wie Uran 235 durch Neutronen, die eines der fundamentalen Bestandteile aller Atome sind, gespalten werden. Dadurch entstehen neue leichtere, meistens gefährlich radioaktive Atome, die die Asche bilden, während Energie, Kernenergie genannt, weil sie durch die Vernichtung eines kleinen Teiles der Kernmasse entstanden ist, in der Form von Wärme freigelassen wird.

Die verschiedenen Reaktortypen unterscheiden sich nicht nur durch Einzelheiten der Anlage, sondern auch grundsätzlich durch verschiedene Brennstoffe, Neutronengeschwindigkeiten, Moderatoren, Kühlmittel usw. Bei der Planung des Reaktors muß man nicht nur dessen Wirksamkeit, sondern auch die Operationskosten, die Sicherheitsmaßnahmen und die eventuelle Nebenproduktion des wertvollen, auch spaltbaren Plutoniums im Auge behalten. Es ist heute noch nicht klar, welcher der vielen möglichen Reaktortypen am wirtschaftlichsten zur Energie- und Plutoniumproduktion verwendet werden kann. Reaktoren kann man grob in zwei Klassen teilen: «langsame» und «schnelle» Reaktoren,

Die bis dahin am meisten verwendeten langsamen (thermischen) Reaktoren arbeiten nach dem Prinzip, daß sich Uran 235 nach der Aufnahme eines langsam bewegten Neutrons spaltet und dabei wieder einige Neutronen freigibt. Diese mit großer Geschwindigkeit abgegebenen Neutronen müssen, um weiter wirksam zu sein, mit Hilfe eines Moderators abgebremst werden. Die erhöhte Wirksamkeit, die mit dem Abbremsen erreicht wird, macht es in einigen Fällen sogar möglich, natürliches Uran als Brennstoff zu benützen. Uran, wie es in der Erdkruste vorkommt, enthält 99,29 Prozent Uran 238, das sich nicht spaltet, und 0,71 Prozent wirksames Uran 235. Angereichertes Uran ist viel teurer als natürliches Uran, da zu dessen Herstellung mittels Gasdiffusion U 235 von U 238 getrennt werden muß. Dazu muß man darauf hinweisen, daß die meisten Länder noch keine Möglichkeit besitzen, selber Uran anzureichern, und so ist der Reaktortyp, der sich mit natürlichem Uran begnügt, sehr vorteilhaft.

Die Moderatoren, die in den langsamen Reaktoren bis dahin am meisten verwendet wurden, sind Graphit und leichtes sowie schweres Wasser. Graphit und schweres Wasser haben den Vorteil, daß es möglich ist, sie mit natürlichem Uran zu benützen. Leichtes Wasser benötigt zwar angereichertes Uran, dafür wirkt es zugleich als Moderator und Kühlmittel, was aber auch im Falle des schweren Wassers möglich ist.

Als Kühlmittel werden bis jetzt hauptsächlich die folgenden benützt: leichtes und schweres Wasser, Natrium, organische Erzeugnisse, wie zum Beispiel «Terphenyl», und Gase, wie Luft, Helium und Kohlensäure. In den USA und in der Sowjetunion werden vorzugsweise leichtes Wasser unter Druck und Natrium benützt. Leichtes Wasser hat den Vorteil, daß es ein leichtes Kontrollieren des Reaktors ermöglicht, daß es zugleich als Moderator wirkt und daß der Reaktor eine hohe Kraftdichte besitzt. Die Nachteile sind der hohe Druck, die niedrige Temperatur des Dampfes der in dem Wärmeaustauscher erzeugt wird, und die Tatsache, daß man angereichertes Uran benützen muß. Natrium als Kühlmittel wird zusammen mit Graphit oder schwerem Wasser benützt. Hohe Temperaturen können erzeugt werden ohne Hochdruckausrüstungen, dagegen entsteht aber eine Reihe neuer technischer Probleme, wie zum Beispiel der Schutz des Graphits vor dem hochreaktiven Natrium, und die Einführung eines dritten Mediums in den Wärmeaustauscher, um die heftige Reaktion zwischen Wasser und Natrium zu vermeiden. Experimente mit siedendem Wasser und organischen Flüssigkeiten sind besonders in den USA weit fortgeschritten. Siedendes Wasser schließt die Benützung des Wärmeaustauschers und der Dampferzeugungsausrüstungen aus, da die Reaktorwärme direkt Dampf erzeugt, und dazu ist dieser Reaktortyp besonders stabil. Der organische Reaktor, eine Variation des Reaktors, der Wasser unter Druck benützt, scheint besonders günstig zu

sein, weil die organische Flüssigkeit höhere Temperaturen erlaubt und die Abnutzung des Reaktors minimalisiert.

In Westeuropa, besonders in Großbritannien und Frankreich, wird der gasgekühlte Reaktortyp bevorzugt. Gaskühlung, die meistens mit Graphitmoderation benützt wird, hat die großen Vorteile, daß natürliches Uran benützt werden kann und daß ziemlich hohe Temperaturen erreicht werden können. In Frankreich wird Luft benützt, in England Kohlensäure. Englische Versuche auf dem Gebiet der Gaskühlung benützen unter anderem auch Helium als Kühlmittel und Uranoxyd als Brennstoff. Diese Kombination erreicht viel höhere Temperaturen, und dadurch wird die pro Tonne Uran erzeugte Wärme vier- bis fünfmal größer.

In allen Reaktortypen, die bis jetzt beschrieben wurden, wurde der Brennstoff in fester Form benützt. Die Herstellungskosten der Brennstoffelemente machen oft bis zu 40 Prozent der Totalkosten der Brennstoffe aus, und darum werden Versuchsreaktoren gebaut, die den Brennstoff in flüssiger Form benützen. Einer dieser Reaktoren wird durch eine Wasserlösung von Uranylsulphats getrieben. Die Flüssigkeit wird durch den Reaktor zum Wärmeaustauscher gepumpt, und so wirkt der Brennstoff zugleich als Kühlmittel. Leider ist Uranylsulphat hochkorrosiv, weshalb man auch mit anderen Flüssigkeiten experimentiert.

Schnelle Reaktoren, die meistens als «Breeding»-Reaktoren gebaut werden, sind theoretisch schwerer zu bauen. Die Schwierigkeit besteht darin, daß schnelle Reaktoren wesentlich größere Massen von Uran benötigen; dadurch besteht grundsätzlich die Möglichkeit, daß ein solcher Reaktor explodiert. Das hat zur Folge, daß die Anforderungen an die Steuerung sehr hoch sind. Schnelle Reaktoren arbeiten nach dem Prinzip, daß ein schnell bewegtes Neutron Uran 238 in Plutonium umformt. Plutonium hat fast die gleichen Eigenschaften wie das teure spaltbare Uran 235, hat aber diesem gegenüber den bedeutenden Vorteil, daß es sich chemisch von Uran trennen läßt, während die Trennung des U 235 von U 238 außerordentliche Aufwendungen bedingt. Dadurch wird die gleichzeitige Erzeugung von Energie und Plutonium wirtschaftlich besonders günstig, und in manchen Ländern wird Strom als Nebenprodukt einer Plutoniumanlage erzeugt, deren Reaktor mittlere Neutronengeschwindigkeiten (durch den Moderator festgesetzt) benützt.

### *Die Versorgung mit Kernbrennstoff*

Wie aus den Arbeiten der zweiten Atomkonferenz in Genf hervorgeht, muß man sich keine Sorgen darüber machen, daß die Uranreserven bald erschöpft sein könnten. Die Weltreserven an Uranoxyd werden auf 10 Millionen Tonnen im uranreichen und auf über 20 Millionen Tonnen im weniger reichen Erz geschätzt. Die gesamte Uranoxydproduktion in Kanada, Süd-

afrika, USA, Frankreich, Belgisch-Kongo, Portugal und Australien betrug im Jahre 1958 35 000 Tonnen (wovon 28 000 allein in Kanada und in den USA), was um 204 Prozent mehr ist als im Jahre 1955. Dieses Jahr soll die Produktion wieder um 20 Prozent zunehmen. Uranoxyd wird in der nächsten Zukunft wie früher zwischen 16 und 20 Dollar pro Kilo kosten. Uranoxyd-erzeugung aus weniger reichem Erz würde auf 90 Dollar pro Kilo kommen. Über die Uranoxyderzeugung Osteuropas wurde nichts bekanntgegeben, aber es ist bekannt, daß in der Tschechoslowakei eine große Menge Uranoxyd in dem Zwangsarbeitslager von Jachymov erzeugt wird.

### *Atomkraftwerke*

Bis zum Zeitpunkt der Genfer Konferenz wurden neun Reaktoren mit über fünf MW Stromkapazität in Betrieb gesetzt. Ihre Gesamtkapazität beträgt etwa 182 MW, davon entfallen allein 114 MW auf die Kapazität der englischen Reaktoren. Ein Reaktor arbeitet in Frankreich, drei in Großbritannien, vier in den USA und einer in der Sowjetunion. Die amerikanischen und russischen Anlagen sind Versuchskraftwerke, während in England und Frankreich die gleichzeitige Plutoniumerzeugung wichtig ist.

Das russische Kraftwerk wurde mit einer Kapazität von nur fünf MW 1954 als erstes eröffnet. Der Reaktor ist graphitmoderiert und mit Druckwasser gekühlt. Der Versuch scheint befriedigend zu sein, da seither nach diesem Modell ein 600-MW-Kraftwerk in Sibirien gebaut wurde.

1956 wurden drei Kraftwerke eröffnet, je eines in Frankreich, England und in den USA. Der französische Reaktor ist graphitmoderiert und luftgekühlt, mit einer Kapazität von 5,75 MW. Natürliches Uran wird als Brennstoff verwendet. Den gleichen Brennstoff verwendet auch der englische Reaktor von Calder Hall, der mit einer Kapazität von 38 MW der größte ist; er ist auch graphitmoderiert und gasgekühlt (Kohlensäure). Drei andere gleicher Kapazität wurden seither in England in Betrieb gesetzt. Zwei dieser Reaktoren arbeiten in Calder Hall, das mit 76 MW zum ersten richtigen Kernkraftwerk wurde. Das Kraftwerk verursachte wenig Schwierigkeiten, weniger sogar, als es bei gewöhnlichen Kraftwerken normal ist, und es wird als ein großer Erfolg angesehen.

Das erste amerikanische Kraftwerk wurde mit einer Kapazität von nur fünf MW im «Aragonne National Laboratories» eröffnet. Es besteht aus einem Siedwasserreaktor, der, wie fast alle amerikanischen Reaktoren, angereichertes Uran benötigt. Ein Jahr später wurde noch ein Kraftwerk dieses Typs, von gleicher Kapazität, in Kalifornien in Betrieb gesetzt. Im gleichen Jahr wurde ein Kraftwerk von 6,5 MW eröffnet, das höhere Temperaturen erzeugt, in dem es graphitmoderiert und natriumgekühlt ist. Das wichtigste der amerikanischen Kraftwerke ist das Shippingport-Kraftwerk in Pennsyl-

vanien, das bei der Stromversorgung von Pittsburg aushilft. Der Druckwasserreaktor benützt angereichertes Uran. Mit 60 MW erzeugt das Kraftwerk mehr Strom mit einem Reaktor als irgendein anderes Kraftwerk.

### *Kraftwerke der Zukunft*

Die Tabelle zeigt die geplante Gesamtkapazität der verschiedenen Kraftwerktypen, die zur Zeit der Genfer Konferenz (September 1958) entweder im Bau oder entworfen waren, sowie die Länder, die sie bauen werden.

#### *Geplante Kapazität verschiedener Kraftwerktypen*

<i>Reaktortyp</i>	<i>Moderator</i>	<i>Kühlungsmittel</i>	<i>Zahl</i>	<i>MW</i>	<i>Länder</i>
Gasgekühlt	Graphit	Kohlensäure	11	2117	GB, D, Fr, Ital.
Druckwasser	Leichtes Wasser	Leichtes Wasser	6	1360	D, USA, USSR, B
Druckwasser	Graphit	Leichtes Wasser	2	1000	USSR
Siedwasser	Leichtes Wasser	Leichtes Wasser	6	393	D, USA, USSR
Schweres Wasser	Schweres Wasser	Schweres Wasser	5	249	D, USA, K, Sch
Schweres Wasser	Schweres Wasser	Kohlensäure	2	200	USA, Tschech.
Organisch	Organ. Flüssigkeit	Organ. Flüssigkeit	2	112	D, USA
Natrium/Graphit	Graphit	Natrium	2	130	USA, USSR
«Breeder»		Natrium	3	208	USA, USSR

(D = Westdeutschland, GB = England, Fr = Frankreich, B = Belgien, K = Kanada, Sch = Schweden)

Der gasgekühlte Reaktor scheint einer der beliebtesten zu sein, obwohl er in Amerika als wirtschaftlich ungünstig angesehen wird. Die Engländer dagegen, die das entwickeltste Programm für Kernenergieerzeugung besitzen, werden nur diesen Reaktortyp benützen. Von den 3030 MW, die die Sowjetunion plant, sollen 600 MW in dem «Ersten Großen Kernkraftwerk» in Sibirien, dessen erster Teil bereits im Betrieb ist, erzeugt werden. Die geplante Erzeugung der USA von den in der Tabelle angegebenen Reaktoren beträgt nur 1014 MW, was im Vergleich mit Großbritannien und der Sowjetunion sehr wenig ist. Aus der Tabelle ist auch zu sehen, daß nur die USA, die Sowjetunion und Westdeutschland eine größere Zahl verschiedener Reaktoren bauen werden.

### *Wirtschaftliche Betrachtungen*

Hauptsächlich wegen der ungenügenden Erfahrungen über Betriebskosten und Lebensdauer der Kernkraftwerke ist es nicht möglich, einen rationellen Vergleich zwischen der konventionellen und der atomischen Stromerzeugung zu ziehen. Wie schon früher dargelegt, ist es nicht einmal möglich, einen besonderen Kraftwerktyp für wesentlich vorteilhafter als alle anderen zu betrachten. Die Kernenergieproduktion ist zwar teurer als die konventionelle

Produktion; aber die Kernenergiekosten werden ohne Zweifel weiter sinken, während die Kosten der konventionellen Erzeugung ansteigen werden. Es kann also damit gerechnet werden, daß sich die Kosten in überraschend kurzer Zeit ausgleichen.

Die Kosten der Energieerzeugung kann man in drei Teile spalten: Anlagekosten, Brennstoffkosten und Betriebskosten. Betriebskosten, das heißt die Ausgaben für Arbeitskräfte, Reparaturen, Versicherung und Administration, sollen mehr oder weniger gleich sein, ob es sich um Kern- oder konventionelle Erzeugung handelt, mit der Ausnahme, daß die Versicherung im ersten Falle höher ist. Nach englischen Informationen sollen die Erzeugungskosten in einem konventionellen Kraftwerk so verteilt sein, daß 20 Prozent auf Anlagekosten zurückzuführen sind und 70 Prozent auf Brennstoffkosten. Die Situation in der Kernenergie soll umgekehrt sein: 70 Prozent ist der Anlagekostenanteil und 20 Prozent der Brennstoffanteil. Daraus kann man schließen, daß es im Falle der Kernenergie noch wichtiger ist, daß das Kraftwerk nur so selten wie möglich die Erzeugung einstellt.

Die Anlagekosten der Kernstromerzeugung werden durch Reaktorgröße, Reaktortyp, Lebensdauer, Verzinsung, Baumaterialkosten usw. beeinflußt. Die Wichtigkeit des Reaktortyps wurde bereits betont. So zum Beispiel wird geschätzt, daß die Anlagekosten eines Gas/Graphit-Reaktors um 40 Prozent höher sind als die eines Druckwasserreaktors von gleicher Kapazität. Dafür sind aber die Brennstoffkosten des Gasreaktors um 56 Prozent niedriger, und die Erzeugungskosten verringern sich dadurch um 16 Prozent. Auch die Reaktorgröße spielt eine Rolle. Je größer der Reaktor, desto wirtschaftlicher ist er. Bei einem Reaktor von 200 MW Kapazität sollen zum Beispiel die Anlagekosten pro Stromeinheit nur halb so groß sein wie bei einem 50-MW-Reaktor. Die Reaktorgröße beeinflußt auch die Brennstoffkosten. Über die Lebensdauer weiß man natürlich noch nichts Genaues; sie wird aber auf 15 bis 20 Jahre geschätzt. Dadurch ist es schwer, die Anlagekosten pro Stromeinheit zu berechnen. Auch durch Vereinfachungen in der Anlage, durch billigere Baumaterialien und durch höhere Betriebstemperaturen werden die Stromkosten herabgesetzt.

Auch die Brennstoffkosten werden durch viele Faktoren bestimmt. Außer den Unterschieden, die durch den verschiedenen Wert der Brennstoffe entstehen, gibt es noch die Probleme der Entfernung der Asche, der Zurückgewinnung von Spaltungsmaterial und der Brennstoffelementfabrikation. Die Asche nimmt Neutronen auf, und darum muß sie frühzeitig entfernt werden. Bei langer Bestrahlung besteht auch die Gefahr, daß durch Veränderungen in der Kristallstruktur des Urans die Brennstoffelemente platzen. Die Kernasche besteht aus gefährlich radioaktiven leichteren Atomen, derer man sich meistens mit vielen Sicherheitsmaßnahmen entledigen muß. Weiter besteht

die Asche aus unverbrauchtem Uran und neuen wertvollen Spaltungsbrennstoffen. Dadurch hat die Asche einen gewissen Wert, und die Brennstoffe werden aus ihr mittels teurer chemischer Verfahren wieder zurückgewonnen. Es gibt zahlreiche solcher Verfahren oder Brennstoffzyklen, und dadurch gibt es noch mehr Raum für Variationen der Brennstoffkosten. Man hofft, in der Zukunft die Kosten durch bessere Brennstoffzyklen und verbesserte Elemente herabzusetzen.

Außer für Stromerzeugung gibt es vorläufig wenig andere wirtschaftliche Anwendungen der Kernenergie. Die größten Erfahrungen besitzt man im Bau von Unterseebooten, wo die Kosten nicht sehr wichtig sind, gemessen am Vorteil, daß die Atomboote große Strecken zurücklegen können, ohne Treibstoff nachzufüllen. Aus diesem Grunde wird auch in der Sowjetunion ein Atomeisbrecher, «Lenin», gebaut. Auch für sehr große Schiffe könnte die Kernenergie bald von Vorteil sein, und es sind bereits mehrere Schiffe im Bau oder in Planung. In Schweden hat man angefangen, Atomenergie zur Wärmeerzeugung anzuwenden.

### *Fusion*

Im Gegenteil zum Prinzip der Kernspaltung wird bei der Fusion aus zwei sehr leichten Atomkernen ein schwererer Kern erzeugt unter Freisetzung einer großen Menge Energie. Die leichten Atomkerne, die benützt werden, sind die Kerne des «schweren» Wasserstoffs, der aus gewöhnlichem Wasser hergestellt werden kann. Zur Energieerzeugung muß eine Temperatur von über 100 Millionen Zentigrad (mehr als sechsmal die Temperatur der Sonnenmitte) während etwa einer Sekunde gehalten werden. Dies konnte zwar noch nicht erreicht werden, aber es wurden doch Schritte in dieser Richtung gemacht. Der schwere Wasserstoff wird durch eine Stromentladung stark geheizt. Die Elektronen der Atome trennen sich von den Kernen, und es entsteht eine Mischung von schweren Wasserstoffkernen und Elektronen, die glücklicherweise nur schwach Wärme ausstrahlen kann. Dieses Plasma, dessen Temperatur schon so hoch ist, daß es kein Material aushält, wird nur durch ein starkes magnetisches Feld beisammengehalten. Wenn die Temperatur genügend hoch ist, entsteht die Reaktion, die noch weitere Wärme erzeugt.

Die technischen Erfordernisse sind natürlich außerordentlich groß, und trotzdem ein Fortschritt gemacht wurde, wird noch viel Zeit vergehen, bis auf diese Weise Energie erzeugt werden kann. Darum ist es nicht ratsam, die Möglichkeit der Kernspaltung abzulehnen und zu warten, bis die technischen Probleme der Fusion gelöst sind. Die Fusion würde den Vorteil haben, daß keine gefährliche Asche erzeugt wird und daß es möglich sein würde, Elektrizität direkt, ohne Dampfanlage, zu erzeugen.