

Riezler, W.

Article — Digitized Version

Kernreaktoren und ihre wirtschaftliche Bedeutung

Wirtschaftsdienst

Suggested Citation: Riezler, W. (1956) : Kernreaktoren und ihre wirtschaftliche Bedeutung, Wirtschaftsdienst, ISSN 0043-6275, Verlag Weltarchiv, Hamburg, Vol. 36, Iss. 6, pp. 313-317

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/132293>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

ABHANDLUNGEN

Weltwirtschaft Kiel

-5. FEB. 1957

TECHNISCHER FORTSCHRITT IN WIRTSCHAFTLICHER SICHT

In der Diskussion über die zukünftige Wirtschaftsentwicklung wird heute überall - hoffend oder bangend - auf die Fortschritte in der physikalischen und chemischen Forschung als bestimmenden Faktor hingewiesen. Dabei muß man feststellen, daß sich diese Bezugnahme im allgemeinen in Schlagworten erschöpft. Das mag verständlich sein, wenn man bedenkt, welche sachlichen Schwierigkeiten dem Wirtschaftler die Einfühlung in die technische Materie und die technische Sprache erschweren. Wenn es auch heute noch nicht voll zu übersehen ist, in welchen Anwendungsgebieten sich die Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Forschungen niederschlagen werden, so kann doch mit Sicherheit gesagt werden, daß sie von tiefgreifenden wirtschaftlichen Auswirkungen begleitet sein werden. Wenn der Wirtschaftler den Wirtschaftsablauf in der Hand behalten will, muß er sich auch sachlich mit der technischen Entwicklung auseinandersetzen. Wir haben uns deshalb entschlossen, in einer Reihe von Abhandlungen in die wirtschaftlichen Grundprobleme des technischen Neulandes einzuführen.

Kernreaktoren und ihre wirtschaftliche Bedeutung

Prof. Dr. W. Riezler, Bonn

Noch vor 100 Jahren waren die wesentlichen Energiequellen, die der Wirtschaft zur Verfügung standen, menschliche und tierische Muskelkraft. Heute sind es Kohle, Erdöl, Erdgas und Wasserkraft. Auf der Ausschöpfung dieser Energiequellen beruhen die Erhöhung des Lebensstandards und die starke Vermehrung der Bevölkerung in den Kulturländern während der vergangenen Jahrzehnte. Beides konnte nicht einmal durch zwei Weltkriege nachhaltig aufgehalten werden.

Die Nachfrage nach Energie nimmt dauernd zu. Lebensstandard und Bevölkerungszahl steigen weiter an. Es ist abzusehen, daß die bereitgestellte Leistung diesem Zuwachs bald nicht mehr folgen können. In den meisten Kulturländern sind die wirtschaftlich aussichtsreichen Wasserkräfte weitgehend ausgenutzt. Erdöl- und Erdgasquellen werden in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein. Kohle ist zwar noch reichlich vorhanden, doch muß man sie in immer größeren Tiefen und dadurch mit höheren Kosten fördern. Die großen Energiequellen, welche Wind, Ebbe und Flut und vor allem die Sonneneinstrahlung darstellen, lassen sich nach dem heutigen Stand der Technik nicht in wirtschaftlicher Weise ausnützen.

Da kam wohl gerade im richtigen Moment eine neue physikalische Entdeckung, welche aus grundlegenden Forschungen zahlreicher Physiker und Chemiker über die Natur und das Verhalten der Atomkerne entsprungen ist. Durch geeignete Maßnahmen, nämlich durch Spaltung von Kernen der schwersten Atome, lassen sich Energiemengen gewinnen, die ausreichend und billig genug sein könnten, um die drohende Energielücke zu füllen.

AUSGANGSMATERIAL UND BRENNSTOFFE

Ausgangsmaterial für diese neue Art von Energieerzeugung sind Uran und Thorium. Keiner dieser beiden Stoffe kommt in der Natur in einer Form vor, die wie Kohle direkt in einen Ofen oder, wie man in diesem Falle sagt, „Reaktor“ gesteckt werden kann. Es sind teure Aufbereitungs- und Reinigungsprozesse, metallurgische Veredelungen und vielfach Isotopentrennung oder Umwandlungsprozesse im Reaktor erforderlich, um aus diesem Ausgangsstoff brauchbare Kernbrennstoffe zu machen.

Wie die meisten chemischen Elemente hat das Element Uran verschiedene sogenannte Isotope. Unter Isotopen versteht man zwei Arten des gleichen chemischen Elements, die sich durch gewisse physikalische Eigenschaften, insbesondere durch ihr Atomgewicht und gegebenenfalls durch ihre radioaktive Strahlung, unterscheiden. In der Natur kommen die stabilen und die extrem langlebigen (= sehr schwach radioaktiven) Isotope eines Elementes immer in einem überall praktisch konstanten Mischungsverhältnis vor; nur deswegen können die Chemiker ein einheitliches Atomgewicht feststellen. Das natürliche Uran enthält zwei Isotope mit dem Atomgewicht 238 und 235 zu 99,3% bzw. 0,7%. Daneben können zum Uran wie zu allen anderen Elementen künstliche Isotope erzeugt werden, die regelmäßig radioaktiv sind.

Als Kernbrennstoffe kommen praktisch die folgenden Substanzen in Frage: Uran 235, Uran 233 und Plutonium 239. Nur die erste dieser drei Substanzen ist, wie eben erwähnt, in der Natur anzutreffen, als geringe Beimengung des natürlichen Urans. Die beiden anderen Substanzen müssen künstlich in Kernreak-

toren erzeugt werden. Sie entstehen unter dem Einfluß von Neutronenstrahlung, und zwar das Plutonium 239 aus dem Hauptisotop des Urans: Uran 238, das Uran 233 aus Thorium.

Mit Uran 238 oder Thorium allein kann keine selbständige Verbrennung (Kettenreaktion) in einem Reaktor aufrechterhalten werden, es muß in ihm gleichzeitig ein gewisser Anteil der genannten Kernbrennstoffe vorhanden sein. Sind genügend Kernbrennstoffe vorhanden, so kann daneben ein gewisser Prozentsatz der Ausgangsstoffe direkt mit verbrannt werden. In bestimmten Reaktortypen, den „thermischen“ Reaktoren mit natürlichem Uran, sind das etwa 3%, in anderen, den „schnellen Brutbrennern“, können es 30% bis 40% sein. Viel wichtiger als diese doch relativ geringfügige direkte Verbrennung der Ausgangsstoffe ist die Umwandlung dieser Stoffe in Kernbrennstoffe im Reaktor, die gleich näher beschrieben werden soll.

Die Wirkungsweise des Reaktors

Die Wirkungsweise eines Reaktors beruht auf folgendem: Die Kerne der schwersten Elemente können unter Freisetzung einer sehr bedeutenden Menge von Energie gespalten werden. In extrem geringem Maße tritt diese Spaltung bei Uran und Thorium bereits spontan, d. h. ohne äußere Einwirkung ein. Bei einer solchen Spaltung werden zwei Atomkerne von Elementen in der Mitte des periodischen Systems gebildet, die zunächst fast regelmäßig radioaktiv sind. Daneben werden im Durchschnitt ungefähr drei Neutronen freigesetzt. Trifft ein solches Neutron auf einen spaltbaren Kern, so wird es diesen in vielen, aber doch nicht in allen Fällen zur Spaltung veranlassen. Wenn es also gelingt, eine Anordnung zu konstruieren, in der von den rund drei bei einer Spaltung freierwerdenden Neutronen im Durchschnitt eines wieder eine neue Spaltung auslöst, so bildet sich eine sogenannte Kettenreaktion, eine Reaktion, die sich von selbst unterhält und laufend Energie freisetzt. Eine derartige Anordnung nennt man einen Reaktor.

Damit ein Reaktor funktioniert, muß die Neutronenbilanz ausgeglichen sein. Es dürfen von den gebildeten Neutronen nicht zu viele durch die Oberfläche entweichen. Je größer der Reaktor ist, desto kleiner ist naturgemäß der Prozentsatz der entweichenden Neutronen. Die Größe, bei der die Bedingung, daß je ein Neutron aus der Spaltung im Durchschnitt eine neue Spaltung auslöst, gerade erreicht ist, nennt man die kritische Größe. Die kritische Größe ist um so geringer, je weniger Neutronen innerhalb des Reaktors absorbiert werden, ohne damit eine neue Spaltung hervorzurufen. Solche parasitären Effekte sind vor allem die sogenannten Einfangprozesse, d. h. Reaktionen mit anderen Atomkernen, bei denen sich das aufgeschossene Neutron mit dem getroffenen Kern vereinigt und ein neues, um eine Einheit schwereres Isotop bildet. Solche Einfangprozesse treten, allerdings in sehr verschiedenem Ausmaß, in allen Stoffen, außer Helium, auf, also in allen Strukturmaterialien, Kühl-

substanzen usw., aus denen der Reaktor zusammengesetzt ist. Die Auswahl der Reaktorbaustoffe muß also unter dem Gesichtspunkt erfolgen, daß sie so wenig Neutronen wie möglich wegfangen. Die Einfangprozesse treten auch in den Kernbrennstoffen selbst auf. Durch sie werden Kernbrennstoffe zerstört, ohne daß ein wesentlicher Energiebetrag freigesetzt wird und ohne daß neue Neutronen für eine Kettenreaktion geliefert werden. Dieser Nebeneffekt ist unvermeidlich, seine Stärke ist von der Art des Brennstoffes und von der Energie der auftreffenden Neutronen abhängig. Er verbraucht zwischen 10 und 30% der auf Brennstoffkerne treffenden Neutronen.

Sind neben den Kernbrennstoffen Ausgangsstoffe im Reaktor, also Uran 238 oder Thorium 233, so fangen diese Neutronen ein. Das wirkt sich einerseits ungünstig auf die Neutronenbilanz des Reaktors aus, andererseits werden aber durch diesen Prozeß Kerne der Ausgangsstoffe in neuartige Brennstoffkerne umgewandelt.

Reaktoren können mit natürlichem Uran betrieben werden. Dies scheint zunächst verwunderlich, da das natürliche Uran nur 0,7% Brennstoff enthält. Langsame Neutronen reagieren jedoch mit dem Brennstoff Uran 235 etwa 300 mal stärker als mit dem Ausgangsstoff Uran 238, so daß insgesamt doch die Reaktionen mit dem seltenen Uran 235 überwiegen. In diesem Reaktortyp muß man dafür sorgen, daß die verhältnismäßig energiereichen, also schnellen, emittierten Spaltungsneutronen verlangsamt werden, ohne daß sie während des Bremsprozesses mit dem Uran in Berührung sind. Dies wird dadurch bewerkstelligt, daß Uranstangen in einen Moderator eingelegt werden. Das ist ein Stoff mit niedrigem Atomgewicht, der durch elastische Stöße die Neutronen verlangsamt, ohne allzuvielen zu absorbieren. Die wichtigsten Moderatoren sind Graphit und schweres Wasser. Der Graphit muß extrem rein sein, die Herstellung von schwerem Wasser erfordert eine Isotopentrennung von normalem und schwerem Wasserstoff (Deuterium). Beide Moderator-Substanzen sind daher relativ teuer. Normales Wasser ist in Verbindung mit natürlichem Uran als Moderator nicht brauchbar, da der normale Wasserstoff zu viele Neutronen wegfängt. Ein Teil der Neutronen wird in einem Reaktor mit natürlichem Uran immer von Uran 238 eingefangen und bildet dabei zunächst Uran 239 und über zwei radioaktive Betastrahlungen Plutonium 239. Auf 100 verbrauchte Kerne des Brennstoffs Uran 235 werden, je nach Bauart des Reaktors, 80 bis 90 Kerne Plutonium 239 nachgebildet. Man sagt, ein solcher Reaktor hat eine „Umwandlungsrate“ von 0,8—0,9. Ein Reaktor mit natürlichem Uran und Graphit benötigt etwa 30 bis 40 t metallisches Uran und 300 bis 400 t Graphit, unabhängig von der Leistung, die von ihm aufgenommen wird. Verwendet man statt Graphit schweres Wasser, so kommt man mit 5—7 t Uran aus und braucht etwa 5—10 t schweres Wasser. Reaktoren mit natürlichem Uran sind also unter allen Umständen sehr groß.

Es ist möglich, mit Hilfe einer Isotopentrennanlage den Gehalt des Brennstoffes Uran 235 im Uran von 0,707% auf beliebige Werte zu erhöhen. Die großen, heute in Gebrauch befindlichen Trennanlagen arbeiten alle nach dem von Gustav Hertz 1932 in Berlin entwickelten Diffusionsprinzip. In einer derartigen Anlagelage benötigt man viele tausend hintereinandergesetzte Diffusionsstufen. Die Erstellungskosten einer solchen Anlage liegen in der Größenordnung von einer Milliarde Mark, die benötigte Leistung in der Größenordnung von einigen tausend Megawatt. Die abgetrennte Menge an hoch angereichertem (zirka 90%igem) Uran 235 liegt in der Größenordnung von 10 kg pro Tag. Eine solche Anlage braucht etwa ein halbes Jahr, bis sie im Gleichgewicht ist und produzieren kann. Nach amerikanischen Angaben liegt der Preis für 1 g abgetrenntes Uran 235 bei etwa 100 Mark. Für kleinere Anlagen ist das Diffusionsverfahren nicht geeignet. Es ist wahrscheinlich, daß man hier mit Hilfe von Ultrazentrifugen zum Ziel kommen kann, obwohl durch dieses Verfahren 1 g Uran 235 wohl merklich teurer wird als durch das Diffusionsverfahren.

Neben der Abtrennung des Isotopes Uran 235 kann man durch chemische Aufarbeitung von natürlichem Uran oder Thorium, das längere Zeit in einem Reaktor exponiert war, Kernbrennstoffe in Form von Plutonium 239 oder Uran 233 gewinnen. Die chemische Aufarbeitung ist zwar wesentlich einfacher als eine Isotopentrennung. Trotzdem ist sie hier recht kostspielig, da die exponierten Materialien extrem stark radioaktiv sind, so daß ihre Aufarbeitung nur unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen erfolgen kann, und da der Gehalt an Brennstoff in dem aufzubereitenden Material im allgemeinen nur in der Größenordnung von Promille liegt.

Hat man angereicherten oder reinen Brennstoff, so läßt sich eine recht große Zahl von verschiedenen Reaktortypen konstruieren, auf die hier nicht im einzelnen eingegangen werden soll. Diese Reaktoren sind regelmäßig wesentlich kleiner als die mit natürlichem Uran. Die kleinste Type kommt mit weniger als 1 kg Brennstoff aus. Als Moderator kann im allgemeinen gewöhnliches Wasser dienen.

Hat man hoch angereichten Brennstoff, so kann man in verschiedenen Reaktortypen den Moderator ganz weglassen und direkt mit schnellen Neutronen arbeiten. Diese Typen von Reaktoren sind als Brutreaktoren sehr aussichtsreich. Unter Brutreaktor versteht man eine Anordnung, in der mehr Brennstoffatome aus dem Ausgangsmaterial (natürlichem Uran oder Thorium) erzeugt werden, als durch Spaltung und andere Prozesse verbraucht werden. Die Umwandlungsrate in einem Brutreaktor ist also größer als 1. Bei Verwendung langsamer Neutronen ist ein Brutreaktor nur möglich, wenn Uran 233 als Brennstoff vorhanden ist. Ur. Uran 235 oder Plutonium geben bei Spaltung durch langsame Neutronen keinen genügenden Neutronenüberschuß für einen echten Brutprozeß. Bei Verwendung langsamer Neutronen läßt sich also nur Thorium,

nicht aber Uran 238 voll verbrennen. Bei Verwendung schneller Neutronen ist dagegen auch mit den letztgenannten Materialien ein Brüten möglich. Jeder Brutreaktor erfordert so hoch angereichten Brennstoff, daß dieser in der gleichen Konzentration auch zum Bau von Atombomben verwendbar wäre. Deshalb haben alle Länder, die über hoch angereicherte Kernbrennstoffe verfügen (USA, Großbritannien, Rußland), neben scharfen Kontrollmaßnahmen im eigenen Lande strengste Ausfuhrverbote für diese Stoffe. Es ist kaum damit zu rechnen, daß diese in absehbarer Zeit gemildert werden. Die Vorteile eines Brutreaktors liegen natürlich darin, daß bei ihm die eigentlichen Brennstoffe nur einmal investiertes Kapital darstellen, während tatsächlich die viel billigeren Ausgangsstoffe verbraucht werden.

DIE WIRTSCHAFTLICHE ANWENDUNG

In einem Kraftwerk ersetzt der Reaktor den Feuerungskessel, denn er verwandelt die Kernenergie in Wärme. Es sei jedoch auf einige grundlegende Unterschiede gegenüber einer gewöhnlichen Kohlenfeuerung hingewiesen. Der Reaktor läßt sich nicht über 600° C erhitzen, denn oberhalb dieser Temperatur hat metallisches Uran einen kristallographischen Umwandlungspunkt, bei dem es sein Volumen beträchtlich verändert. Es kann nicht der gesamte im Reaktor vorhandene Brennstoff ausgenutzt werden, denn die Forderung, daß das System kritisch bleiben muß, setzt voraus, daß er dauernd eine erhebliche Menge überschüssigen Brennstoff enthält und daß nicht zu viel Abfallstoffe in ihm gebildet worden sind, die Neutronen wegfangen. Im allgemeinen müssen die Brennstoffelemente nach 10 bis 15% Abbrand ausgewechselt und chemisch umgearbeitet werden, was erhebliche Kosten verursacht. Die „Asche“ besteht beim Reaktor aus den sogenannten Spaltprodukten, einem Gemisch höchst radioaktiver Isotope. Sie ist in die festen Brennstoffelemente in atomarer Verteilung eingebettet und kann nicht, wie beim Ofen, mechanisch beseitigt werden. Sie wird ebenfalls durch chemische Aufarbeitung entfernt. Die hohe Radioaktivität läßt es ratsam erscheinen, die Kühlflüssigkeit, welche mit den Brennstoffelementen in Berührung kommt, nicht direkt in eine Turbine zu schicken. Dabei bestände die Gefahr, daß auch diese so stark radioaktiv verunreinigt wird, daß etwa nötige Reparaturen unmöglich würden. Man benutzt daher wohl regelmäßig zwei Kühlkreise unter Zwischenschaltung eines Wärmeaustauschers. Als Wärmeübertrager dienen Wasser oder flüssiges Natrium. Für die Verwendung des letzteren ist eine eigene Technik entwickelt worden.

Die kritische Größe eines Reaktors hängt nicht von der entnommenen Leistung ab. Mit dem Typ des Reaktors ist daher auch seine Größe festgelegt. Die Regulierung erfolgt durch Bewegung von eingeführten Teilen, die Neutronen absorbieren. Mit welcher Höchstleistung man den Reaktor fahren kann, hängt in erster Linie davon ab, wieviel Energie man durch das Kühlsystem wegschaffen kann.

Alle Reaktoren senden sehr intensive Neutronen- und Gammastrahlen aus, die durch einen besonderen Schutzmantel abgeschirmt werden müssen. Man kann rechnen, daß der Mantel bei einem Leistungsreaktor aus einer mindestens 2 m dicken Betonschicht bestehen muß. Diese macht das Volumen und das Gewicht eines jeden Reaktors, auch eines solchen, bei dem das eigentliche energieliefernde System recht klein ist, so groß, daß eine Verwendung in kleineren beweglichen Fahrzeugen ausgeschlossen ist.

Neben der Strahlung verursacht die starke Radioaktivität der Spaltprodukte eine beträchtliche Erschwerung bei dem Betrieb eines Reaktors. Es müssen sehr umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden, um auch bei technischen Mängeln, Fehlsteuerungen oder gar Sabotagehandlungen ein Entweichen der radioaktiven Substanzen zu verhindern, oder sie wenigstens an Stellen zu leiten, wo sie keinen großen Schaden anrichten können. Dies erfordert unter anderem sehr sorgfältige Ortsauswahl nach völlig neuartigen Gesichtspunkten, und es erfordert eine besondere Konstruktion des Reaktorgebäudes. Hier werden vielfach gasdichte Bauten gewählt.

Die Beseitigung der Restradioaktivität ist zwar technisch nicht schwierig, erfordert aber nicht unerhebliche Mittel. Ein Ausgießen in Flüsse oder auch ins Meer ist in größerem Umfang nicht möglich. Am zweckmäßigsten dürfte das Versenken in alte Bergwerksschächte und gleichzeitiges Einschließen in Betonklötze sein. Bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer Anlage muß auch an diese Frage gedacht werden.

Die Kosten beim Reaktorbetrieb setzen sich zusammen aus einmaligen Anlagekosten, den laufenden Kosten für Personal usw. und den Kosten für Brennstoffe und deren Wiederverarbeitung. Die letzteren sind der abgegebenen Energiemenge proportional. Um einen Megawatt-Tag an Wärmeenergie (noch nicht an elektrischer Energie!) zu erzeugen, wird etwas mehr als ein Gramm Kernbrennstoff tatsächlich verbraucht. Man kann also ganz grob rechnen, daß 1 g Kernbrennstoff im Brennwert 2,5 t Kohle entspricht. Legt man den von den USA heute angegebenen Preis von 25 \$ pro Gramm Kernbrennstoff zugrunde, so wäre dieser der Kohle überlegen. Man muß jedoch bedenken, daß der Brennstoff einer Charge nur zu 15 % ausgenutzt wird und daß erhebliche zusätzliche Kosten durch weitere chemische Aufarbeitung und durch Beseitigung der radioaktiven Abfallprodukte entstehen. Dies stellt die Wirtschaftlichkeit bei einfacher Ausnutzung von reinen Kernbrennstoffen in Frage. Erst die Mitverwertung der Ausgangsstoffe im Brutreaktor dürfte das Bild entscheidend ändern. Für natürliches Uran wird in den USA ein Preis von 40 \$/kg angegeben, also rund 6 \$ pro Gramm des darin enthaltenen Uran 235. Da jedoch die Anlagekosten für einen Reaktor mit natürlichem Uran im allgemeinen höher sind als für einen solchen mit angereichertem, ist nicht ohne weiteres zu entscheiden, welcher Reaktortyp auf die Dauer der wirtschaftlichere sein wird. Betrachtlich gehen die

Schätzungen über die festen Anlagekosten auseinander. Die amerikanische Schätzung liegt im allgemeinen zwischen 200 und 400 \$ pro investiertem Kilowatt. Größere Anlagen arbeiten sicher wesentlich rationeller als kleinere. Wie hoch man die jährlichen Abschreibungen einsetzen muß, weiß heute noch niemand genau, da noch keine Großanlage wirklich gelaufen ist oder gar schon längeren Betrieb hinter sich hat. Nach den üblichen Schätzungen wird etwa $\frac{1}{13}$ der investierten Summe als jährliche Verzinsung und Abschreibung eingesetzt, ein Ansatz, der für deutsche Verhältnisse reichlich niedrig erscheint.

Die amtliche englische Schätzung ergibt als Erzeugungspreis pro kWh 0,6 Pence = 3 Pfg. Amerikanische Schätzungen liegen in ähnlicher Größenordnung. Andere private Schätzungen gehen aber bis 20 Pfg. pro kWh. Die Zukunft der Kernreaktoren liegt in erster Linie bei den großen Kraftwerken. Hier ist es sehr wahrscheinlich, daß sie nach einer gewissen Entwicklungszeit die Energie nicht mehr teurer produzieren als die herkömmlichen Anlagen.

Als nächstes kommen wohl große Schiffe für den Reaktorbetrieb in Frage. Ob Zivilflugzeuge in absehbarer Zeit mit Reaktoren angetrieben werden können, muß noch zweifelhaft erscheinen. Die notwendige schwere Abschirmung läßt sicher nur eine Verwendung in den größten Transozeanmaschinen zu. Die Forderung der Sicherheit, insbesondere der Sicherung der Flugplätze gegenüber einer möglichen radioaktiven Verseuchung bei einem Unfall, bringt jedoch technische Probleme, die noch nicht als gelöst gelten können. Für kleinere Fahrzeuge, insbesondere alle Schienenfahrzeuge und alle Arten von Automobilen, und auch für kleinere Flugzeuge hat der Reaktor als mitgeführte Energiequelle vorläufig keinerlei Aussicht.

Viel diskutiert wird in der letzten Zeit die Möglichkeit eines Fusions-Reaktors, d. h. einer Anlage, die Kernenergie durch Verschmelzung der leichtesten Atomkerne freisetzt. Daß solche Anlagen im Prinzip möglich sind, zeigen die Sonne und alle Fixsterne, die ihre Energie fast ausschließlich aus solchen Prozessen gewinnen. Die einzige von Menschen hergestellte Anlage ähnlicher Art ist bisher die Wasserstoffbombe. Es sind aber noch keine Wege bekannt, um analoge Reaktionen in einem gesteuerten System langsam durchzuführen. Die Schwierigkeit liegt darin, daß die Reaktion erst bei Temperaturen in der Größenordnung von hundert Millionen Grad vor sich geht. Solche Temperaturen zu erzeugen ist außer durch Atombomben bisher nicht gelungen. Selbst bei den Temperaturen in den heißesten elektrischen Entladungen fehlt noch mindestens ein Faktor 1000. Aber auch wenn dieser erste Schritt der Temperaturerzeugung getan wäre, bliebe immer noch das Problem, die heiße Zone so weit von der Gefäßwand zu halten, daß diese nicht mehr zerstört wird. Man kann also getrost noch einige Jahre lang Kraftwerke auf der Basis von Uran und Thorium bauen, ohne befürchten zu müssen, daß diese vorzeitig durch Fusionskraftwerke überholt werden.

Summary: Atomic Reactors, and What They Mean Economically. Nuclear fission of the heaviest atoms is holding out prospects of energy production in such quantities, and at such prices, as promise to make it a means of closing the energy gap which threatens to be opening in the course of rapid economic development. The fissile material supplied by nature must be subjected to expensive upgrading and purification processes before it can be used in the reactors. The author gives an outline of the atomic fuels and of the mode of operation and the various types of atomic reactors, and then proceeds to analyse their economic possibilities for the production of power. The "critical size" at which a reactor will be able to produce a chain reaction, is determined by the type of fuel to be used so that, where economic calculation is concerned, the reactor size depends not only on the projected capacity but also on the selected type of reactor. Apart from plant investment — which requires a much higher outlay for reactors fed with natural uranium than for those working on upgraded fuels — other important items in the determination of production costs are the cost of the fuel, duly considering its maximum utilization and the cost of repeated processing after use, then also the wage cost, the cost of the safety arrangements and of the disposal of atomic waste. Estimates on the cost of plant and equipment differ by a wide margin. No exact figures can yet be given as to the amount of depreciation required, since full-sized reactors are not yet in operation anywhere. The usual estimates — which seem to be too much on the conservative side where conditions in Germany are concerned — put the amount required for interest and depreciation at $\frac{1}{15}$ th of the total invested.

Résumé: Le réacteur atomique — Nouveau facteur économique. Par la fission nucléaire sera rendue possible la production d'énergie en quantité suffisante et à prix assez avantageux pour combler le déficit dont est menacé le secteur de l'énergie à cause du développement rapide de l'économie. Afin de préparer la matière fissile naturelle pour son emploi dans les réacteurs, il lui faut faire subir des procédés de purification et des traitements fort coûteux. L'auteur nous renseigne sur les matières combustibles atomiques, le principe de fonctionnement et les types différents des réacteurs. Cette description lui sert de base pour une analyse des possibilités économiques offertes par la production d'énergie atomique. Quant à l'importance relative du réacteur, i. e. au "volume critique" garantissant la mise en marche d'une réaction en chaîne, le volume est déterminé par le genre carburant employé. Ainsi la calculation économique doit prendre en considération le fait que le volume du réacteur ne dépend pas seulement de la capacité prévue, mais aussi du model-type du réacteur. Pour établir les frais de construction d'un réacteur il faut compter avec les facteurs suivants: 1. Dépenses d'installation, plus onéreuses d'ailleurs pour les réacteurs opérés à base d'uranium naturel que pour les modèles opérés à base de matières enrichies. 2. Prix des matières combustibles, eu égard au maximum d'exploitation et au coût de leur revalorisation. 3. Frais de personnel. 4. Dépenses pour les installations et les mesures de sécurité ainsi que pour disposer des déchets atomiques. Quant aux frais d'installation les estimations émises varient bien fort. Eu égard au fait que, jusqu'à présent, aucun réacteur à échelle industrielle ne se trouve en opération, il est impossible de déterminer le degré de dépréciation et le montant des amortissements obligatoires. Selon les estimations généralement émises, mais jugées trop conservatives pour les données de la situation allemande, les dépenses pour service des intérêts et les amortissements se chiffrent à un quinzième des capitaux investis.

Resumen: Reactores nucleares y su importancia económica. Por la fisión nuclear de átomos pesadísimos se pueden producir cantidades de energía suficientes y bastante baratas para cubrir la deficiencia de energía amenazante debido al rápido desarrollo económico. Los materiales fisionables que se hallan en la naturaleza deben ser sujetos a costosos procesos de preparación y purificación antes de ser empleados en el reactor. Después de haber dado un resumen de los materiales fisionables, de la eficacia del reactor y los tipos de reactores, el autor examina la aplicación económica para producir energía. La base fundamental para el cálculo económico es la exigencia de que el tamaño crítico de un reactor no dependa de la potencia tomada, sino que el tipo del reactor elegido determine su tamaño. Además de los costos de instalación que son más altos para reactores que emplean uranio natural, que los para reactores que emplean material combustible preparado, los costos del material combustible, considerando su grado de aprovechamiento, y los costos de su reemplazo, los gastos corrientes de personal, los gastos de las medidas de seguridad, el quitamiento de los desperdicios, desempeñan un papel importante a la averiguación de los costos de producción. Las estimaciones de los costos fijos de instalaciones divergen considerablemente. Como hasta ahora no está en servicio ninguna planta grande, no se puede determinar exactamente los necesarios deducciones para la depreciación. Las estimaciones ordinarias que aparecen demasiado bajas en lo que a las condiciones en Alemania se refiere, calculan para interés y depreciaciones con $\frac{1}{15}$ de la suma invertida.