Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 2

Artikel: Die Kernenergie und die öffentliche Elektrizitätsversorgung

Autor: Ailleret, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916904

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

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

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Die Kernenergie und die öffentliche Elektrizitätsversorgung*)

Von *P. Ailleret*, Paris

621.039 : 621.311

Dieser Bericht enthält die Schlussfolgerungen, zu denen der Studienausschuss für Kernenergie der UNIPEDE bei der Untersuchung der hauptsächlichen Probleme gelangte, welche die Ausnutzung der Atomkraft für die Elektrizitätsversorgungsunternehmen aufwirft.

Es werden die Grösse der für den Versuchsbetrieb auf industrieller Ebene geeigneten Reaktoren und die verschiedenen zur Zeit möglichen Lösungen diskutiert. Weiter wird das Problem der geringen Wirtschaftlichkeit der gegenwärtigen Reaktoren im Vergleich zu künftigen Lösungen untersucht, die ohne Zweifel einen wesentlich höheren Abbrand ermöglichen werden. Sodann werden die Bedingungen für die Einplanung der Kernenergie in die Erzeugungsdiagramme geprüft, und schliesslich werden die Versorgung mit Kernbrennstoffen sowie die Anwendungsmöglichkeiten der Kernenergie auf den der Elektrizitätswirtschaft verwandten Gebieten wie z. B. der Stadtheizung besprochen.

Le présent rapport fait le point des conceptions qui se sont dégagées au sein du Comité d'Etudes de l'Energie Nucléaire de l'UNIPEDE au sujet des principaux problèmes que l'utilisation de cette forme d'énergie pose aux producteurs d'énergie électrique.

Il examine successivement la grandeur des réacteurs dont il paraît utile de faire l'expérimentation à l'échelle industrielle, les différentes solutions entre lesquelles il est possible de faire un choix à l'heure présente, le problème de la faible productivité des réacteurs actuels par rapport aux solutions d'avenir qui permettront sans doute d'accroître sensiblement les quantités d'énergie tirées des combustibles nucléaires, les conditions dans lesquelles l'énergie nucléaire pourra être intégrée dans les diagrammes de production, le problème de l'approvisionnement en combustibles nucléaires et les applications que cette énergie peut avoir dans des domaines voisins de l'énergie électrique, comme le chauffage urbain, par exemple.

I. Einleitung

Die öffentlichen Elektrizitäts-Versorgungsunternehmen haben sich zwei Ziele gesetzt: den Verbrauchern zu den niedrigstmöglichen Preisen elektrische Energie zu liefern und die Sicherstellung der Elektrizitätsversorgung weitgehendst zu garantieren. Die durch eine Unterbrechung oder Einschränkung von Energielieferungen hervorgerufenen grossen Schwierigkeiten haben gezeigt, dass das zweite Ziel ebenso wichtig ist wie das erste.

Die Zunahme des Verbrauches an elektrischer Energie in exponentieller Abhängigkeit von der Zeit gibt für die Zukunft zu Besorgnis Anlass, wenn man diese Funktion über einen grösseren Zeitraum extrapoliert, und zwar in Anbetracht der natürlichen Begrenzung der Wasserkräfte, der Ungewissheit hinsichtlich der Erschliessung neuer Erdölquellen sowie der mangelnden Elastizität der Kohleförderung.

Diese Perspektiven wären zweifellos beunruhigend, wenn die Kernenergie nicht eine Lösung für eine eventuelle künftige Energieverknappung bieten würde. Schon jetzt lässt die Grössenordnung der Kosten für die Kernenergie den Schluss zu, dass sie, auf lange Sicht gesehen, zur Energiebedarfsdeckung mit herangezogen werden kann.

Gegenwärtig jedoch bereitet die Ungewissheit über diese Kosten insofern Schwierigkeiten, als man sich nicht klar darüber ist, in welchem Tempo die Kernkraftwerke in die Versorgung einzubeziehen sind.

Diese Unsicherheit bezüglich der Gestehungskosten darf nicht unterschätzt werden. Tatsächlich liegen noch keine Erfahrungen über den Betrieb von eigentlichen Kernkraftwerken vor und man wird erst nach 3 oder 4 Jahren mit aus der Praxis gewonnenen Angaben über die tatsächlichen Gestehungskosten rechnen dürfen. Die Lebensdauer, nach der sich die Abschreibungen richten, bleibt eine unbekannte Grösse, bei der die Schätzungen zwischen 15 und 25 Jahren schwanken können. Die Betriebsfachleute neigen sowohl hierbei wie auch bei der voraussichtlichen technischen Verfügbarkeit der Kernkraftwerke zu einem gewissen Optimismus: die Unbekannten spielen jedoch noch eine grosse Rolle.

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen werden im allgemeinen mit einer übertriebenen Genauigkeit durchgeführt, die angesichts der Unsicherheit der Ausgangsgrössen sachlich nicht gerechtfertigt ist; eine Tatsache, der sich auch diejenigen bewusst sind, die über die Investition von bedeutenden Summen zu entscheiden haben.

II. Grösse der Reaktoren

Die ersten Atomkraftwerke sollen hauptsächlich vorbereitenden Versuchen dienen und nicht der Erzeugung elektrischer Energie, die gegenwärtig billiger und risikoloser aus den herkömmlichen Brennstoffen gewonnen werden kann, bei denen sich übrigens ein Überangebot abzeichnet.

Eine erste Lösung besteht darin, die Leistung der Reaktoren nach Industrie- und nicht nach Laboratoriumsmaßstäben zu bemessen, sie dabei aber doch so niedrig zu halten, dass die Investitionskosten im Rahmen des Tragbaren bleiben.

Es kommen dafür Einheiten mit einer elektrischen Leistung von 10...30 MW in Frage, wobei die Investitionen ausschliesslich als Forschungsaufwendungen zu betrachten sind. Der Wert der erzeugten kWh wird nur wenig über den Gesamtbetriebskosten liegen, und der Ertrag aus dem in die Erstausstattung investierten Kapital wird daher nicht sehr hoch sein.

Der Bau solcher Reaktoren ist durchaus berechtigt, wenn ein Land oder eine Industrie dadurch Gelegenheit erhält, einen Stab von Ingenieuren auszubilden und sich im Hinblick auf die Zukunft mit den Problemen der Kernenergie vertraut zu machen.

Man ist sich jedoch im klaren, dass energiewirtschaftlich vertretbare Gestehungskosten nicht nur technologische Fortschritte, sondern auch den Übergang zu wesentlich höheren Leistungen voraussetzen.

Neben den allgemeinen Gründen, die zu einer ständigen Leistungssteigerung bei den herkömmlichen Erzeugungsgruppen führen, sind bei den Kernkrafwerken noch andere Gesichtspunkte zu beachten, die den Übergang zu grösseren Einheitsleistungen nahelegen. Sie erfordern Messinstrumente und Anlagen für die Handhabung der Brennstoffe, die sehr kostspielig sind und deren Preis nur in geringem Masse von der Leistung abhängt. Der Strahlenschutz bedingt Abschir-

*) UNIPEDE-Kongress Baden-Baden 1961, Bericht I.

mungen, deren Stärke vorgeschrieben ist und deren Kosten daher proportional zur Oberfläche und nicht zum Volumen des Reaktors sind. Die Neutronenbilanz, die von der Reaktorgrösse abhängt, ist bei grösseren Reaktoren besser, da hier prozentual weniger Neutronen durch die Oberfläche entweichen, was bei der Wahl der Baustoffe, der Anordnung des Kerns usw. einen grösseren Spielraum gestattet.

Je grösser die Reaktoren, desto weniger werden die Gestehungskosten der Kernenergie den Preis der herkömmlichen Energie überschreiten. Es scheint, dass beim gegenwärtigen Stand der Technik sich die Reaktorgrösse in wirtschaftlicher Hinsicht wie folgt auswirkt:

III. Vorläufiges empirisches Gesetz über die grössenabhängigen Mehrkosten

Bei der Schätzung der wirtschaftlichen Verluste, die sich ergeben, wenn man den Bau eines Reaktor-Turbosatzes statt eines konventionellen Dampfkessel-Turbosatzes mit gleicher Leistung vorsieht, müssen nicht nur die Unterschiede in der Investition, sondern auch die Kapitalisierung aller späteren Mehrkosten berücksichtigt werden. Die auf dieser Grundlage ermittelten Werte scheinen von der Reaktorgrösse fast unabhängig zu sein, wenigstens im Bereich von 100 bis 500 MW elektrischer Einheitsleistung. Erst bei einer Leistung, die wesentlich unter diesem Bereich liegt, verringert sich effektiv der kapitalisierte Verlust.

Der Wert dieses Verlustes innerhalb des betrachteten Leistungsbereiches ist unbestimmter als seine approximative Unabhängigkeit von der Leistung, doch scheint die Zahl von 25 Millionen Zahlungseinheiten des Europäischen Währungsabkommens (d. s. ca. 25 Millionen US-Dollar) gegenwärtig grössenordnungsmässig vertretbar zu sein.

Dieses Gesetz, das indessen provisorisch ist und auf einer Annäherung beruht, bedeutet, dass sich jede Leistungserhöhung bei einem geplanten Reaktor in der heutigen Situation lohnt. Bei höheren Leistungen ist die Kernenergie in Grenzfällen schon jetzt wettbewerbsfähig; gleichwohl bleibt der Entschluss, einen Reaktor zu bauen, eine kostspielige Entscheidung.

Übrigens ist es sicher, dass der Betrieb eines Reaktors grösserer Leistung es gestattet, wertvollere Erfahrungen für die Zukunft zu gewinnen. Anderseits ist das technische Risiko grösser und ein mögliches Versagen der Anlagen kann für den Unternehmer schwerwiegende Folgen haben. Zweifellos ist es üblich, dass sich die Unternehmer gegenseitig aushelfen; sie sind dahin gekommen, gegenseitige Leistungsgarantie- oder Versicherungsverträge abzuschliessen. So spielt auch die eigentliche Grösse eines Unternehmens keine Rolle, sondern die in Frage stehenden Übertragungsentfernungen, denn bei der elektrischen Energie handelt es sich vom wirtschaftlichen Gesichtspunkt aus um ein Produkt, das ziemlich schwer zu transportieren ist. Deshalb wird die Möglichkeit, die bestehenden Erzeugungsanlagen durch wesentliche Kernkraftleistungen zu ergänzen, letzten Endes durch die Höhe des Verbrauches in dem geographischen Umkreis bestimmt, innerhalb dessen die Energieübertragung ohne überhöhte Kosten möglich ist.

IV. Die verschiedenen Typen der konkurrierenden Reaktoren

Eine der Schwierigkeiten auf dem Gebiet der Kernenergie ist darauf zurückzuführen, dass eine Reihe von Reaktortypen angeboten wird, und dass z. Z. noch ungewiss ist, welcher sich als der zweckmässigste erweisen wird.

Bei den mit angereichertem Uran betriebenen Reaktoren hat man die Wahl zwischen Siedewasser und Druckwasser (hier ist übrigens eine gewisse Annäherung gegeben). Die Reaktoren mit organischen Moderatoren berechtigen zu grossen Hoffnungen.

Unter den auf natürlichem Uran basierenden Reaktoren sind die graphitmoderierten am weitesten entwickelt, doch beginnen auch die mit schwerem Wasser moderierten in Konkurrenz zu treten.

Indessen muss bei einem wirtschaftlichen Vergleich zwischen den mit angereichertem und mit natürlichem Uran arbeitenden Anlagen der künstlich fixierte Preis für angereichertes Uran sowie die grosse Unsicherheit seiner künftigen Verfügbarkeit in Betracht gezogen werden.

Schliesslich kommt noch der Brutreaktor in Frage, der eine besondere Untersuchung hinsichtlich der Möglichkeiten verdient, die er zusätzlich zu den vorgenannten Reaktortypen bietet.

V. Der Einwand der begrenzten Uranvorkommen und das Brutverfahren

Bei den derzeitigen mit natürlichem und angereichertem Uran betriebenen Reaktoren lässt sich einwenden, dass die vorhandenen Uranreserven nur einen befristeten Betrieb zulassen, d. h. der durch Extrapolierung seines exponentiellen Anstiegs ermittelte Energiebedarf kann nur wenige Jahrzehnte lang aus Kernkraft gedeckt werden. Dies wird bei einem Vergleich der Aequivalenz von Uran und Kohle ersichtlich.

Das verwendete natürliche Uran mit einer Wärmeleistung von 3000 MW-Tagen je Tonne entspricht vom Gesichtspunkt der Stromerzeugung aus etwa dem 7000fachen Kohlegewicht [1]).

So würde die gegenwärtige französische Jahreserzeugung von etwa 1200 t Uranmetall, das ausschliesslich in Kraftwerken zur Verwendung kommt, lediglich einer zusätzlichen jährlichen Kohleförderung von 8 Millionen t entsprechen, was nicht gerade bedeutend ist.

Desgleichen würde die derzeitige Welterzeugung an Uran, die sich auf etwa 3000 t beziffert, einer jährlichen Kohleföderung von 200 Millionen t entsprechen, wogegen die derzeitige Jahresproduktion 1900 Millionen t Kohle erreichte, während die gesamten fossilen Brennstoffe 4000 Millionen t Kohleäquivalent pro Jahr darstellen.

Mit angereichertem Uran lassen sich die MW-Tage/t verdreifachen oder vervierfachen, wobei jedoch noch die Kosten für die Isotopentrennung (Kapitalinvestition, Stromverbrauch, Verluste durch ausgelaugtes Uran) anfallen. Man könnte sich übrigens auch nicht vorstellen, dass die gesamte Uranproduktion der Elektrizitätswirtschaft zur Verfügung gestellt wird.

Es leuchtet daher ein, dass die zur Zeit produzierte Uranmenge, wenn in anderen als Brutreaktoren ver-

[1]) 3 000 MW-Tage/t = 3 000 × 24 kWh/kg = 72 000 kWh Wärmeleistung/kg Uran.

Die Bezugskohle liefert 7 000 kcal/kg = 7 000 000 × 4,18 Joule/kg = $\frac{7\,000\,000 \times 4{,}18}{3\,600\,000}$ kWh/kg = 8,1 kWh Wärmeleistung/kg Kohle.

Die aus dem Uran gewonnene Wärmeenergie ist bei gleichem Gewicht $\frac{72\,000}{8{,}1}$ = 9 000 Mal grösser als die der Kohle.

Indessen ist bei der Umwandlung in elektrische Energie der Wirkungsgrad der Kernkraftwerke ungünstiger als bei den Kohlekraftwerken, da die Temperaturen nicht so hoch sind, wodurch sich das Äquivalenzverhältnis von etwa 9 000 auf 7 000 verringert.

wendet, nicht ausreicht, um den voraussichtlichen Energiebedarf der Welt zu decken.

Nun könnte eingewendet werden, dass es im Augenblick eine Überproduktion an Uran gibt, und dass sich noch mehr davon gewinnen liesse, falls sich der Bedarf erhöhen sollte. Es lässt sich übrigens feststellen, dass sowohl beim Uran als auch beim Erdöl die geschätzten Reserven von Jahr zu Jahr proportional zum Verbrauch zunehmen. Wenn dies auch nicht immer so bleiben wird, so ist es doch wahrscheinlich, dass sich die gegenwärtige Urangewinnung um das Fünf- oder Zehnfache steigern liesse, ohne eine wesentliche Preiserhöhung nach sich zu ziehen.

Übrigens ist es möglich, dass sich die MW-Tage/t erhöhen lassen und zweifellos wird eines Tages das erzeugte Plutonium in den Reaktoren wiederverwendet werden. Hierbei handelt es sich nebenbei gesagt um ein Problem, dass eine gründliche Untersuchung verdient und von dem man annehmen kann, dass es in wenigen Jahren gelöst sein wird [2]).

Die Umwandlungsfaktoren können sich erhöhen, so dass die gewöhnlichen Reaktoren allmählich den Brutreaktoren nahekommen, denen die vollständige Umwandlung eigen ist.

Man gelangt zum Schluss, dass die Brutreaktoren zur Lösung der Probleme einer ferneren Zukunft bestimmt sind, die normalen Reaktoren aber schon jetzt die Aufgabe übernehmen können, während der nächsten Jahrzehnte die herkömmlichen Energiequellen zu ergänzen.

Schliesslich bleibt noch die Frage der Gestehungskosten. Die Brutreaktoren eröffnen zwar interessante Aussichten, aber bisher fehlen sichere Ausgangspunkte.

Im übrigen müssen bei den Brutreaktoren zwei Arten unterschieden werden:

In Holland wird an einem Brutreaktor mit thermischen Neutronen, die Thorium in U_{235} umwandeln, gearbeitet. Holland verfügt über grosse natürliche Thoriumvorkommen, die für Industriezwecke (Herstellung von Glühstrümpfen für die Gasbeleuchtung) praktisch nicht mehr ausgenutzt werden. Die gegenwärtig durchgeführten Untersuchungen sind zwar sehr interessant, gestatten es jedoch noch nicht, Gestehungskosten zu nennen.

Brutreaktoren mit schnellen Neutronen befinden sich in Amerika, England und jetzt auch in Frankreich im Versuchsstadium. Der Brutreaktor des Enrico Fermi-Kraftwerkes in Detroit (100 MW elektrische Leistung) geht seiner Vollendung entgegen. Doch lassen sich die Kosten für die Energie, die dieses Kraftwerk einmal erzeugen soll, noch nicht genau angeben, zumal der Reaktor anfänglich mit U_{235} beschickt und erst später auf das seine Wirtschaftlichkeit bestimmende Plutonium umgestellt wird.

[2]) Bei Reaktoren mit thermischen Neutronen befindet sich das Plutonium — ein reiner Kernbrennstoff mit einem wesentlich grösseren Einfangquerschnitt als der des Urans — zwangsläufig stark verdünnt in einer Legierung oder keramischen Masse. Aus diesem Grunde treten seine nachteiligen physikalischen Eigenschaften bei Reaktoren mit thermischen Neutronen nicht in Erscheinung. Ausserdem verbindet er sich gut mit Aluminium, Uran usw. Seine hohe Toxität stellt zwar die Forschung vor schwierige Probleme, doch dürfte sich dadurch seine fabrikmässige Erzeugung nicht wesentlich verteuern.

Ein letztes Problem bietet die Bildung der Isotope 240, die einen grossen Teil der Neutronen absorbiert und daher den Meiler rasch vergiftet, wenn man ihm keinen neuen Spaltstoff zuführt (z. B. zusätzliches Plutonium). Es handelt sich also hier um ein Problem, das den Kreislauf betrifft. Die bisherigen Erfahrungen gestatten es noch nicht, die Wirtschaftlichkeit der möglichen Kreisläufe zu bestimmen.

VI. Die Sicherstellung der künftigen Energieversorgung

Die öffentliche Meinung, die durch die Suezkrise stark beunruhigt wurde, da nicht nur eine akute, sondern langdauernde Energieverknappung zu befüchten war, hat diese Ereignisse jetzt vergessen und verfolgt mit Besorgnis die Entwicklung der sozialen Probleme, die durch die Absatzschwierigkeiten auf dem Kohlemarkt entstanden sind.

Die für die Sicherstellung der Energieversorgung Verantwortlichen verlieren aber nicht die Tatsache aus den Augen, dass sich die Primärenergiequellen auf lange Sicht erschöpfen können, noch übersehen sie die allerdings wenig wahrscheinliche Möglichkeit einer plötzlich auftretenden Verknappung vor allem des für politische Krisen anfälligen Erdöls. Auch die Erschliessung neuer Erdölquellen hängt von Zufälligkeiten ab, so dass auf eine Zeit des Ölüberflusses, wie er in den letzten Jahren als Folge der gleichzeitigen Entdeckung ausgiebiger Ölquellen in Kanada, Russland, der Sahara und Lybien auftrat, eine Periode des Ölmangels folgen kann.

Schon jetzt ist das Kostenverhältnis zwischen Grossreaktoren, die entweder für natürliches oder angereichertes Uran ausgelegt sind, und herkömmlichen Kraftwerken so, dass die Mehrkosten beim Auftreten einer Energieknappheit ohne weiteres in Kauf genommen werden könnten.

Die Entwicklung von Reaktoren der obigen Art bietet schon heute eine gewisse Sicherheit gegen die Gefahren eines eventuellen Energiemangels in einigen Jahren.

Es ist übrigens wenig wahrscheinlich, dass der Bau von Kernkraftwerken zur absoluten Notwendigkeit wird, ehe die Elektrizitätswerke Gelegenheit gehabt haben, ihren Einsatz sorgfältig vorzubereiten.

VII. Die progressive Heranziehung der Kernenergie

Es darf also angenommen werden, dass sich die Ablösung der herkömmlichen Erzeugungsanlagen durch Kernkraftwerke nur langsam und schrittweise vollziehen wird, wenn nicht politische Ereignisse eine plötzliche Verknappung der Primärenergie zur Folge haben werden.

Tatsächlich verringern sich die Selbstkosten der Kernenergieerzeugung nur langsam. Gleichzeitig sinken aber auch die Selbstkosten bei den herkömmlichen Kraftwerken, denn bei den neuen Kraftwerken nimmt der spezifische Wärmeverbrauch je kWh jährlich um etwas mehr als 1 Prozent ab, während sich die Investitions- und Betriebskosten jährlich um etwa 2 Prozent verringern.

Vom Unterschied der Kostensenkung bei Kernkraftwerken und herkömmlichen Kraftwerken hängt es nun ab, wann die Kraftwerke rentabel werden.

Es ist daher wahrscheinlich, dass die Überschneidung der Kurven, welche die Selbstkosten bei herkömmlichen und bei Kernkraftwerken in Abhängigkeit von der Zeit darstellen, einen Winkel bildet, der bedeutend kleiner ist als derjenige, zu dem zahlreiche Wirtschaftlichkeitsstudien gelangen.

VIII. Die Einbeziehung der Kernkraft in das Erzeugungsdiagramm

Die Probleme, die sich bei Aufteilung der Erzeugung auf Kernkraftwerke und herkömmliche Kraftwerke er-

geben, sind in Ländern mit rein thermischer Energieerzeugung anderer Art als in Ländern mit hydraulischer Erzeugung.

In einem Land mit nur thermischen Kraftwerken spielt ein in das Erzeugungsprogramm eines Unternehmens eingeplantes Kernkraftwerk die Rolle einer neuen thermischen Gruppe. Da diese neue Einheit grenzkostenmässig wirtschaftlicher ist als die älteren Gruppen, würde sie mehrere Jahre lang die Grundlast decken, wobei ihr Einsatz allein von ihrem Verfügbarkeitsfaktor abhinge. Hat ihr Alter aber den Punkt erreicht, wo die neueren Kraftwerke eine der niedrigsten Sommernachtlast entsprechende verfügbare Leistung erreichen, so beginnnt sich ihre Ausnutzungsdauer zu verringern (Fig. 1).

Ist die Nichtverfügbarkeit eines Kernkraftwerkes nicht grösser als die eines herkömmlichen Kraftwerkes (worüber sich noch nichts Bestimmtes sagen lässt), so folgt seine Ausnutzungsdauer dem gleichen Gesetz. Sie bestimmt sich zunächst aus der Nichtverfügbarkeit, und zwar bis zu dem Punkt, wo die gesamte verfügbare Leistung der Kernkraftwerke die Sommernachtspitze erreicht. Von diesem Moment an nimmt seine Ausnutzungsdauer von Jahr zu Jahr ab.

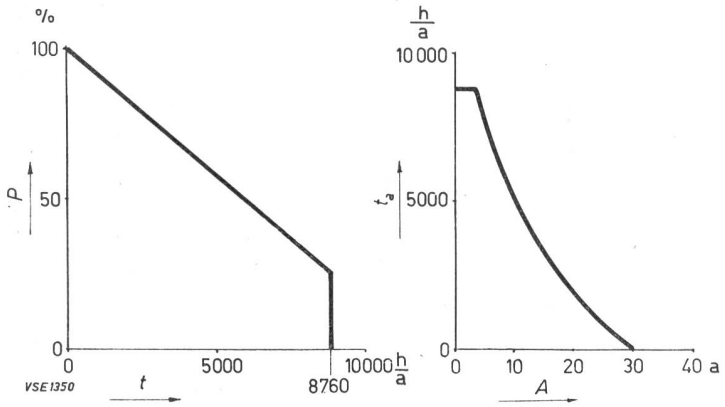

Fig. 1
Ausnützung der thermischen Einheiten in Abhängigkeit von ihrem Alter

Wenn eine Lastdauerlinie wie im Diagramm links zugrunde gelegt wird, ergibt sich aus dem Diagramm rechts das Gesetz der abnehmenden Ausnutzungsdauer. Der Rechnung ist ein exponentieller Zuwachs des Anlagenbestandes von jährlich 7 Prozent zugrunde gelegt

P Last in % der Höchstlast
t Lastdauer
t_a Jährliche Benutzungsdauer der verfügbaren mittleren Leistung
A Alter der Einheit

Diese Gegebenheiten müssen natürlich bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung von Kernkraftwerken in Betracht gezogen werden. Tatsächlich muss bei einer solchen Berechnung, soll sie genau sein, ein Vergleich zweier bestimmter Möglichkeiten durchgeführt werden, die es gestatten, die gleiche Leistung mit gleicher Garantie bereitzustellen, und zwar einmal ohne Kernkraftwerke und einmal mit einem klar umrissenen Kernkraftprogramm, wobei der Vergleich der Kostenentwicklung in beiden Fällen bis zu einem ziemlich weit entfernten Jahr durchzuführen ist, damit sich spätere Abweichungen nicht mehr auswirken können.

In einem Land mit überwiegend hydraulischer Energieerzeugung liegt das Problem wesentlich anders, denn dort müssen die Laufwasserkraftwerke oder die Kraftwerke, bei denen der Speicherfüllungsgrad einen Überlauf erwarten lässt, natürlich für die Deckung der Grundlast eingesetzt werden. Aus diesem Grunde würde dort die anfängliche Ausnutzungsdauer der Kernkraftwerke geringer sein als der unter Zugrundelegung ihrer Nichtverfügbarkeit ermittelte Wert, und ihre Ausnutzungsdauer würde daher sofort einer jährlichen Abnahme unterliegen. Doch lassen sich in diesem Fall keine allgemeinen Regeln aufstellen, da die Merkmale der Wasserkrafterzeugung je nach der Hydrologie des betreffenden Landes und dem Anteil der Speicher recht unterschiedlich sein können.

IX. Die Brennstoffversorgung

Die Tatsache, dass sich die Gestehungskostenkurven von Kern- und herkömmlichen Kraftwerken in einem sehr kleinen Winkel schneiden, lässt erkennen, dass nicht mit einer plötzlichen wirtschaftlichen Notwendigkeit, ausschliesslich Kernkraftwerke zu bauen, zu rechnen ist. Daraus ziehen die Elektrizitätswerke aber auch den Schluss, dass sie ohne wesentliche Mehrkosten noch einige Jahre lang auf diese geringe Kostendivergenz bauen können.

Die Aussicht ist für sie sehr günstig, denn sie bietet ihnen die Möglichkeit, sehr bald über Erfahrungen zu verfügen, die sie in den Stand setzen, den Anteil der verschiedenen Energiearten an der Erzeugung genauer zu bestimmen. Dabei dürfen aber gewisse Bedingungen, die ausserhalb ihres Industriezweiges liegen, nicht ausser Betracht gelassen werden.

In erster Linie bieten die klassischen Brennstoffe wie Kohle und Erdöl den Elektrizitätswerken eine gewisse Sicherheit für die Zukunft. Es besteht ein Weltmarkt, auf dem sich Kohle und Heizöl beschaffen lassen, sei es durch Direkteinkauf oder auf der Grundlage langfristiger Lieferverträge. Die Erfahrungen über einen Zeitraum von nahezu hundert Jahren zeigen, dass die von den Änderungen der Währungseinheiten unabhängigen Kursschwankungen vorübergehender Natur sind, und dass langfristige Voraussagen, die bei Investitionen mit langer Abschreibungszeit zugrunde gelegt werden müssen, nicht mit einem zu grossen Unsicherheitsfaktor belastet sind.

Für die Kernbrennstoffe hat sich ein ähnlicher Markt noch nicht herausgebildet. Bei den 6 Ländern der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft hat die EURATOM die Beschaffung von Kernbrennstoffen übernommen. Bis jetzt erfolgte sie im Rahmen eines Abkommens, das ausser den die eigentliche Brennstoffbeschaffung betreffenden Problemen noch eine grosse Anzahl anderer Fragen behandelt (Inbetriebnahmetermine, Form der Ausschreibungen, Anleihen, usw.). Die Verquickung dieser verschiedenen Fragen hat zur Folge, dass das Abkommen nur in sehr beschränktem Umfang Anwendung finden wird.

Wenn die künftige natürliche Entwicklung der Atomkraftwerke der 6 Länder ungehindert erfolgen soll, so erscheint es unerlässlich, den Brennstoff zu einem jeweils genau bestimmten Preis bereitzustellen. Der Preis kann im übrigen genauso frei gebildet werden wie die Preise für Kohle und Erdöl. Dieser Preis muss bei gleichem 235-Gehalt für alle gleich sein, unbeschadet der Art des Kraftwerkes und seines Brennstoffes, ausserdem soll er von der Methode der Kraftwerksfinanzierung unabhängig sein. Anders ausgedrückt: Es sollten alle Fragen, welche die Unterstützung und Ver-

mittlung durch die EURATOM für andere Zwecke betreffen, getrennt behandelt werden.

Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, so verliert der Vergleich zwischen klassischen und Kernkraftwerken gerade im Augenblick der Annäherung der Wettbewerbsfähigkeit, wo ihm die grösste Bedeutung zukommt, seinen Sinn, was sich bei langfristiger Investition bedeutender Geldmittel in Kernkraftwerke sehr nachteilig auswirken würde.

X. Förderung der am Bau von Kernkraftanlagen interessierten Konstruktionsfirmen

Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Förderung von Firmen, die Kernkraftausrüstungen herstellen. Hierbei handelt es sich um eine Frage, die natürlich die Regierungen und die EURATOM angeht. Jede Art von finanzieller Unterstützung muss daher von dieser Seite kommen, denn es kann den Elektrizitätswerken, die ihre eigenen Ingenieure für die künftigen technischen Aufgaben ausbilden müssen, nicht zugemutet werden, dass sie die gesamte Industrie ihres Landes darauf vorbereiten.

Dabei ist allerdings in Betracht zu ziehen, dass sich nicht alle Konstruktionsfirmen für den Bau von Kernkraftausrüstungen interessieren. Einige von ihnen entfalten bereits eine rege Tätigkeit auf diesem Gebiet und scheuen keine Kosten, um sich für zukünftige technische Aufgaben vorzubereiten. Andere Firmen ziehen es vor, sich erst dann voll dem Kernenergiesektor zuzuwenden, wenn Gewinne erzielt werden und sie von den mit erheblichen Kosten gemachten Erfahrungen anderer profitieren können.

Selbstverständlich liegt es im Interesse der Elektrizitätswerke, dass den Konstruktionsfirmen, die schon jetzt an der Entwicklung von Kernkraftausrüstungen arbeiten, jede Art von Unterstützung zuteil wird und dass sie damit rechnen können, ihre erworbenen Erfahrungen später finanziell zu verwerten.

Im übrigen wäre es wünschenswert, eine Möglichkeit für die gemeinsame Auswertung der allgemeinen Erfahrungen im Kernenergiesektor zu schaffen.

Dieses Problem liesse sich so lösen, dass die Betriebserfahrungen allen Interessierten zugänglich gemacht werden, die speziellen Erfahrungen der Konstruktionsfirmen aber ihr Eigentum bleiben und nicht den üblichen Grundsätzen auf dem Gebiet des industriellen Eigentums entzogen werden, wenn sie anderen Konstrukteuren aufgrund vertraglicher Vereinbarungen überlassen werden oder durch Indiskretion von Praktikanten zur Kenntnis gelangen. Die Betriebsgesellschaften der 6 Länder haben die EURATOM besonders auf diesen Fragenkomplex hingewiesen.

XI. Die anderen Anwendungsgebiete der Atomtechnik

Bei einer Untersuchung der Probleme, welche die Entwicklung der Kerntechnik den Elektrizitätswerken stellt, darf auch die Tatsache nicht ausser Betracht gelassen werden, dass die Energieversorgung nur eines der Zweiggebiete ist, auf denen sich diese neue Industrierevolution vollzieht.

Grosse Fortschritte werden bereits auf dem Gebiet der Sprengstoffe, der Unterseeschiffahrt sowie der radioaktiven Indikatoren erzielt, deren langfristige Auswirkungen auf die Technik und Biologie nicht unterschätzt werden dürfen. Andere Sektoren werden ebenfalls aus der Kernphysik Nutzen ziehen, einige davon können wiederum den Energiemarkt beeinflussen.

An erster Stelle wäre die Handelsschiffahrt zu erwähnen. Allerdings steht noch nicht fest, ob hier die Kernreaktoren rasch Eingang finden werden, da die Schiffe beim Transport der Güter von einem Hafen zum anderen ihre Heizölvorräte leicht ergänzen können und die Grösse ihres Aktionsradius keine Rolle spielt. Es lässt sich daher schwer voraussehen, ob und wann das Uran das Heizöl ablösen wird, ähnlich wie dieses die Kohle abgelöst hat und die Kohle an die Stelle des Segels getreten ist. Sollte sich aber diese Entwicklung ergeben, so kann man mit einer Auswirkung auf den Primärenergiemarkt rechnen, da die in den Schiffskesseln verfeuerten Brennstoffe etwa 20 Prozent der in den Kraftwerken verbrauchten erreichen.

Zweitens kommen wir zur Stadtheizung, die häufig als ein Anwendungsgebiet für Kernreaktoren angesehen wird, da hier nur niedrige Temperaturen erforderlich sind, ganz im Gegensatz zu den Kraftwerken, die mit möglichst hohen Temperaturen arbeiten.

Leider ist der Transport von Wärme sehr kostspielig, wobei noch hinzukommt, dass ihre Ausnutzungsdauer, wenn man von den Polargebieten absieht, nur sehr gering ist. Man zögert auch, Reaktoren in unmittelbarer Nähe der Städte aufzustellen, wo die Verbrauchsdichte an sich ein Heiznetz zulassen würde. Andererseits erfordert die Erstausstattung von Reaktoren erhebliche Aufwendungen, so dass ihr Einsatz zur Deckung eines jahreszeitlichen Schwankungen unterworfenen Wärmebedarfes unwirtschaftlich ist.

Trotzdem sind die Elektrizitätswerke weitgehend an den Problemen der Stadtheizung interessiert, die den ihren verwandt sind und zu deren Lösung sie beitragen können. Sie sind sich auch über den bedeutenden Bedarf der Haushaltheizungen im klaren, die mehr Primärenergie verbrauchen als die Gesamtheit der Wärme- und Wasserkraftwerke in elektrische Energie umwandelt. Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen sind daher an den in Stockholm gemachten Erfahrungen besonders interessiert.

XII. Andere mögliche Energiequellen

Es wird häufig darauf hingewiesen, dass dank der Fortschritte der Wissenschaft die Ausnutzung anderer natürlicher Energiequellen nur eine Frage der Zeit sei. Der Mensch lebt in einem Kraftfeld potentieller Energien. So entspricht z. B. die Strahlung der Sonne mehreren hundert MW je km^2, was die höchste Energieverbrauchsdichte wesentlich übersteigt. Die physikalischen Phänomene, auf denen z. B. die Fotozelle oder die Fusion der leichten Atome beruht, lassen sich aber derzeit noch nicht wirtschaftlich ausnutzen.

Man kann daher auch noch nicht mit Sicherheit sagen, ob rasche Fortschritte der Grundlagenforschung in absehbarer Zeit neue industrielle Möglichkeiten eröffnen werden.

Die einzige Schlussfolgerung, die aus dieser Möglichkeit gezogen werden kann, ist die Erkenntnis, dass bei Vorhersagen kürzere Zeiträume als bisher in Betracht zu ziehen sind, und dass daher auch unsere wirtschaftlichen Entscheidungen auf Schätzungen beruhen müssen, die von nicht zu langen Abschreibungszeiten ausgehen.

Adresse des Autors:
P. Ailleret, Directeur général adjoint, Electricité de France, Paris.