

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer
Elektrizitätswerke (VSE)

Band: 54 (1963)

Heft: 26

Artikel: Die Kernenergie in der Energieversorgung der USA

Autor: Kroms, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916551>

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: 18.10.2024

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

Die Kernenergie in der Energieversorgung der USA

von A. Kroms, Malden (USA)

Die amerikanische Staatsbehörde der Energieversorgung «Federal Power Commission» (FPC) hat eine Untersuchung der heutigen Verhältnisse und der voraussehbaren zukünftigen Entwicklung der Energieversorgung der USA angeordnet. Im Rahmen dieser Untersuchung (National Power Survey) werden von Spezialisten-Gruppen Berichte über verschiedene Gebiete der Energieversorgung ausgearbeitet und zur Diskussion gestellt. Im kürzlich erschienenen Bericht Nr. 15 «Nuclear Development» wird in groben Zügen der jetzige Stand der Kernenergieverwertung erörtert und die Entwicklung bis 1980 geschätzt. Nachstehend werden die wichtigsten Schlüsse dieses Berichtes sowie einige Angaben aus anderen Quellen zusammengefasst.

Erfahrungen mit den ersten Kernkraftwerken

Das amerikanische Kernenergieprogramm umfasst die Forschung sowie die Konstruktion und den Betrieb von Reaktoren sehr verschiedener Bauweise und Leistung. Einige Reaktortypen befinden sich vorläufig nur im Versuchsstadium, sodass Erfahrungen über ihre technische, betriebliche und wirtschaftliche Gegebenheiten noch nicht vorliegen. Der längere Betrieb der drei Kernkraftwerke Shippingport, Dresden und Yankee, die alle mit wassergekühlten Reaktoren ausgerüstet sind und eine elektrische Leistung von 100...200 MW abgeben können, hat die Tauglichkeit dieses Reaktortyps für die Energieerzeugung in grossem Maßstab schon bewiesen. Dies hat dem Reaktorbau eine vorherrschende Richtung gegeben. So werden die meisten Kernkraftwerke der nächsten Bauperiode mit wassergekühlten Reaktoren projektiert. Dies schliesst aber keineswegs aus, dass nach weiteren Versuchen noch andere Reaktortypen in den Vordergrund treten können. Bekanntlich werden in vielen Ländern grosse Hoffnungen auf gas- und metallgekühlte Reaktoren hoher Temperaturen gesetzt; auch erwartet man, dass in Zukunft die Schwerverwasserreaktoren noch mehr an Bedeutung gewinnen werden. Da aber die bisher hergestellten und die zurzeit projektierten amerikanischen Kernkraftwerke vorwiegend wassergekühlte (Druck- und Siedewasser-) Reaktoren enthalten, wird im genannten Bericht nur dieser Reaktortyp behandelt.

Die Produktion elektrischer Energie der drei erwähnten Kernkraftwerke betrug bis Dezember 1962

Shippingport	1,3 TWh ¹⁾
Dresden	2,5 „
Yankee	1,6 „
	<hr/>
	5,4 TWh

Alle drei Kernkraftwerke weisen eine grosse Anpassungsfähigkeit an rasche Lastschwankungen und eine hohe Betriebsbereitschaft auf. Sie sind imstande, plötzlichen Lastveränderungen noch besser zu folgen als die modernen Brennstoffkraftwerke. Der Grad ihrer Betriebsbereitschaft hat 90% übertroffen; für eine neue Art von Kraftanlagen ist dieses Resultat sehr bemerkenswert. Obwohl in dieser Hinsicht noch längere Betriebserfahrungen nötig sind, kann man schon auf Grund der bisherigen Praxis sagen, dass bezüglich der Be-

triebssicherheit die Kernkraftwerke mit den klassischen thermischen Kraftwerken erfolgreich wetteifern können.

Betriebserfahrungen haben bis jetzt bewiesen, dass diese Kraftwerktypen eine erheblich höhere Leistung liefern können als projektiert wurde. In der Tat konnte bei den Kernkraftwerken der ersten Bauperiode allgemein eine nachträgliche Leistungssteigerung vorgenommen werden. Es ist offensichtlich, dass aus Sicherheitsgründen die Leistung ursprünglich allzu vorsichtig angesetzt wurde; nach einer Umformung des Reaktorkerns war es möglich, die Energieabgabe beträchtlich zu steigern. So konnte nach gewissen konstruktiven Änderungen die elektrische Bruttoleistung des ersten Kernkraftwerkes bei Shippingport von 68 auf 150 MW, diejenige des Yankee-Werkes von 110 auf 160 MW und diejenige des Dresden-Werkes von 180 auf 200 MW erhöht werden.

Eine wichtige Aufgabe bei der technischen Entwicklung von Kernkraftwerken ist die Herabsetzung ihrer vorläufig noch hohen spezifischen Baukosten. Obgleich in dieser Hinsicht schon manches erzielt worden ist, liegen die Errichtungskosten der Kernkraftwerke noch beträchtlich höher als die der klassischen thermischen Kraftwerke. Dieser Kostenunterschied vermindert sich aber bei steigender Einheitsleistung der Energieaggregate. Die zurzeit im Kraftwerkbau vorherrschende Tendenz, die Grösse der Aggregate erheblich zu steigern, begünstigt also die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Kernkraftwerke. Obgleich auch die thermischen Kraftwerke klassischer Bauart fortwährend vervollkommen werden, ist eine Kostensenkung bei diesen technisch bereits hochentwickelten Anlagen langsamer als bei den Kernkraftwerken. Aus diesem Grunde kann man erwarten, dass für sehr grosse Einheitsleistungen (500...1000 MW) die Unterschiede zwischen den Baukosten der Kern- und der klassischen thermischen Kraftwerke schon in baldiger Zukunft sehr gering sein werden.

Vor einigen Jahren wurde die Ansicht vertreten, dass die elektrischen Grenzleistungen der wassergekühlten Reaktoren bei 300...400 MW liegen. Später hat es sich aber herausgestellt, dass eine 2- und vielleicht sogar 3-mal grössere Einheitsleistung erreicht werden kann. Die Leistungsgrenzen werden dabei vorwiegend durch die Transportmöglichkeiten des schweren Reaktor-Druckgefässes gegeben. So wiegt das Gehäuse eines 1000 MW Druckwasser-Reaktors rund 900 t und es kann nur über Wasserwege transportiert werden. Der Leistung von Reaktoren anderer Bauart, welche keine schweren Druckgefässe benötigen, wird von dieser Seite keine Grenze gesetzt. So kann z. B. die Hülle der gasgekühlten Reaktoren, welche mit weit geringeren Betriebsdrücken als die wassergekühlten Reaktoren arbeiten, unmittelbar am Aufstellungsort zusammengeschweisst werden. Da die genannten Leistungsgrenzen ziemlich hoch liegen, kann man im allgemeinen annehmen, dass die Ausbauleistung der Kernkraftwerke vorwiegend durch die Leistungsbedürfnisse des Versorgungsnetzes bestimmt werden.

Aus Sicherheitsgründen werden die Kernkraftwerke grosser Leistung nur ausserhalb der Stadtgrenzen oder dicht besiedelter Ortschaften erstellt. Es ist aber zu erwarten, dass die anfänglich übertriebenen Sicherheitsmassnahmen allmählich

¹⁾ 1 TWh (Terawattstunde) = 1 Milliarde kWh

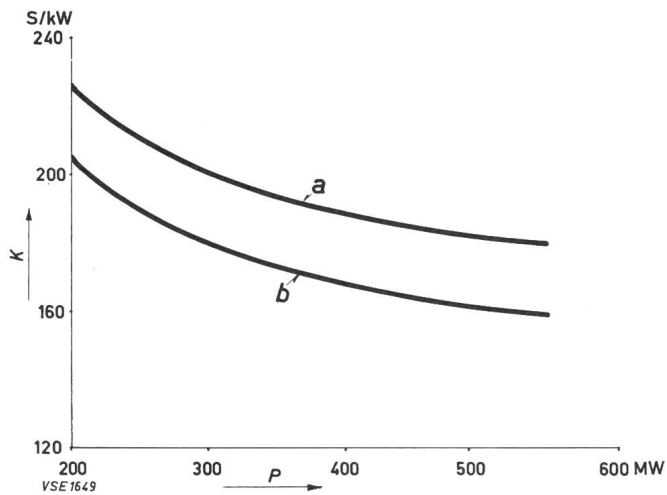


Fig. 1

Spezifische Baukosten der Kernkraftwerke mit wassergekühlten Reaktoren, die 1967 den Betrieb aufnehmen können

- P maximal mögliche Leistung ab Generator
 K Baukosten in \$ per kW ab Generator
 a Schätzung der privaten Elektrizitätsgesellschaften
 b Berechnungen der Atomic Energy Commission auf Grund der Leistungen, die nach 5jährigem Betrieb der Anlagen erreicht werden können

gelockert werden. So wird in Zukunft der Standort von Kernkraftwerken immer mehr in unmittelbarer Nähe der grossen Verbrauchszentren der Energie z. B. inmitten der Städte gewählt werden können. Es wird bereits die Erstellung eines 1000 MW Kernkraftwerkes innerhalb der Stadt New York erwogen; man plant auch ein grosses Kraftwerk in Los Angeles. Die Errichtung der Kraftwerke in den Verbrauchsschwerpunkten würde die Übertragungskosten grosser Energiemengen wesentlich herabsetzen. Als Vorteile der Kernkraftwerke kommt dazu, dass die Probleme der Beschaffung und Lagerung grosser Brennstoffmengen, der Aschebeseitigung und der Luftverunreinigung, die bei den Kohle- und Öl gefeuerten Grosskraftwerken innerhalb der Stadtgrenzen erhebliche Schwierigkeiten bereiten, fortfallen. Man kann mit Sicherheit annehmen, dass künftig für die Lagerung der Spaltstoffe nur

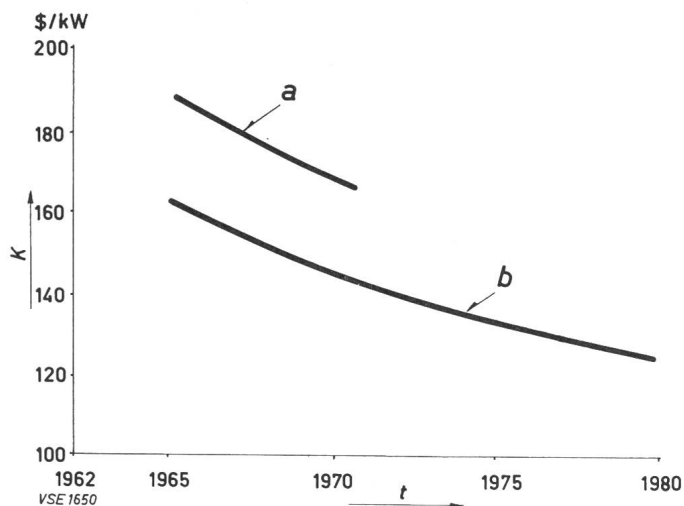


Fig. 2

Voraussichtliche Entwicklung der spezifischen Baukosten von Kernkraftwerken mit einer elektrischen Leistung von ca. 500 MW in den nächsten Jahren

- t Jahr der Inbetriebnahme
 K Baukosten pro kW ab Generator
 a Schätzung der privaten Elektrizitätsgesellschaften
 b Berechnungen der Atomic Energy Commission auf Grund der Leistungen, die nach 5jährigem Betrieb der Anlagen erreicht werden können

wenige Einschränkungen bestehen werden, was die genannte Tendenz fördern wird. Die Verbilligung der Übertragungsnetze wird dann auch dazu beitragen, die höheren Baukosten der Kernkraftwerkenanlagen gewissermassen auszugleichen.

Die Wirtschaftlichkeit

Infolge der schon erwähnten Tendenz, die Leistung der Kernkraftwerke ständig zu erhöhen, werden die Fragen der Wirtschaftlichkeit nachfolgend nur für die Einheiten mit einer Leistung von 100 MW und mehr behandelt. Die Baukosten der Kernkraftwerke mit wassergekühlten Reaktoren, die 1967 in Betrieb gesetzt werden könnten, sind in Fig. 1 angegeben. Es sind da zwei Kurven eingetragen, von denen die obere den Schätzungen von privaten Elektrizitätsgesellschaften, die untere dagegen den Berechnungen der Atomic Energy Commission (AEC) entspricht. Die untere Kurve be-

Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Kern- und Kohle-Kraftwerken

Tabelle I

Jahr der Inbetriebnahme		1967	1967	1972	1980
Elektrische Leistung	MW	300	500	500	1000
1. Spez. Baukosten					
Kernkraftwerke	\$/kW	180...200	160...185	145...160	125
Kohlenkraftwerke	\$/kW	125	120	115	105
Unterschied	\$/kW	55...75	40...65	30...45	20
2. Mehrkosten der Kern- gegenüber den Kohle-Kraftwerken					
feste Kosten	Mills/kWh	1,1...1,5	0,9...1,4	0,7...1,0	0,5
variable Kosten ohne Brennstoff	Mills/kWh	0,2	0,1...0,2	0,1	
insgesamt	Mills/kWh	1,3...1,7	1,0...1,6	0,8...1,1	0,5
3. Kosten des Spaltstoffes	Mills/kWh	1,8...2,0	1,8...2,0	1,3...1,7	1,0...1,5
4. Summe (2) + (3)	Mills/kWh	3,1...3,7	2,8...3,6	2,1...2,8	1,5...2,0
5. Wirtschaftlich gleichwertige Wärmekosten der Kohle	\$/Gcal	1,40...1,64	1,27...1,63	0,95...1,31	0,72...0,95

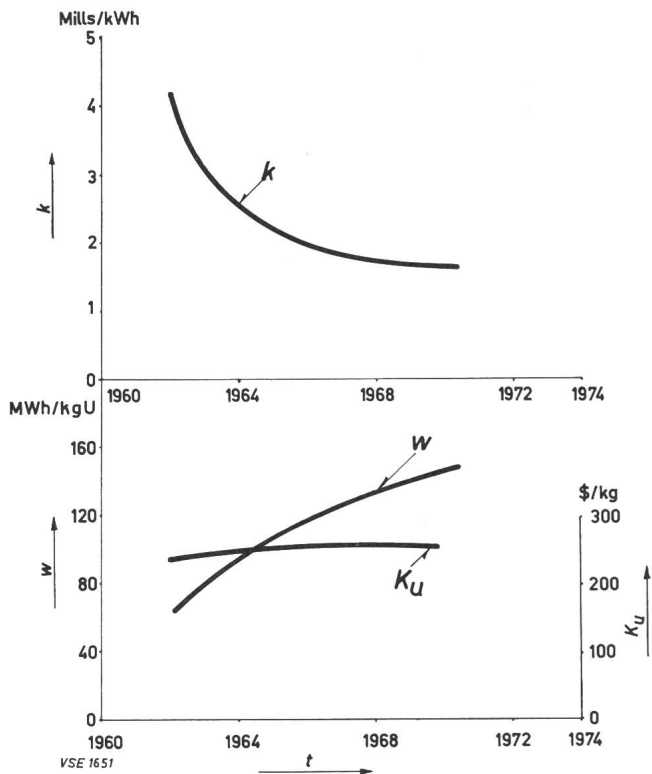


Fig. 3

Entwicklung des Uranpreises, der Energieausbeute und der Brennstoffkosten pro erzeugte kWh in den nächsten Jahren

k_u Uranpreis w Energieausbeute
 k Brennstoffkosten pro erzeugte kWh

zieht sich auf Leistungen, welche nach einem 5jährigen Betrieb der Anlagen erreicht werden können; im Laufe dieser Zeitspanne lässt sich die Wärmeleistung des Kernreaktors durch eine bessere Neutronenausnutzung im Reaktorkern um rund 10 % vergrößern. Die technischen Fortschritte im Reaktorbau, welche eine höhere spezifische Energieausbeute im Reaktorkern ermöglichen, werden in den folgenden Jahren die Baukosten von Kernkraftwerken allmählich vermindern; die voraussichtliche Kostenentwicklung ist in Fig. 2 veranschaulicht.

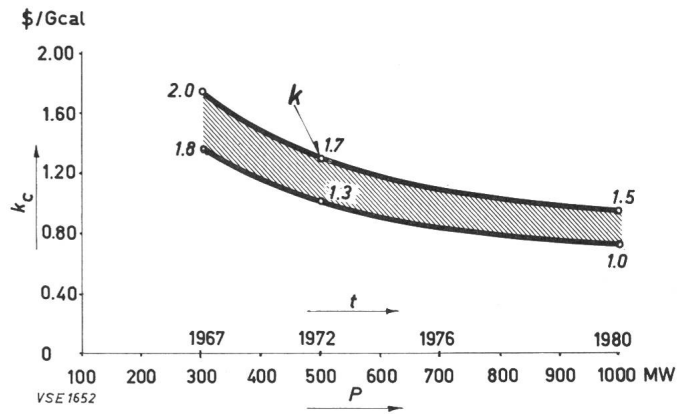


Fig. 4

Aequivalente Kohlenkosten für Kernkraftwerke in Funktion der elektrischen Leistung und des Jahres der Inbetriebsetzung

k_c äquivalente Kohlenkosten
 k Spaltstoffkosten, Mills pro erzeugte kWh
 P maximal mögliche Leistung ab Generator
 t Jahr der Inbetriebnahme

Die Kosten des Energieträgers (des «Kernbrennstoffs») betragen in Kernkraftwerken 2,5...3,0 Mills/kWh (1 Mill = 0,1 cent = 0,001 \$), wenn man einen Preis von 30 \$/g für das verkaufte Plutonium rechnet; dieser Plutoniumpreis ist von der AEC bis zum Ende des Jahres 1963 festgesetzt worden. Nimmt man für das Plutonium einen niedrigeren Marktpreis von nur 8 \$/g an, dann erhöhen sich die Brennstoffkosten auf 4...5 Mills/kWh. Man erwartet, dass bis zum Ende dieses Jahrzehnts die spezifischen Brennstoffkosten merkbar zurückgehen werden (Fig. 3). Dies wird vorwiegend durch einen höheren Abbrand des Spaltstoffes, sowie durch einen besseren thermischen Wirkungsgrad der Kraftanlagen erreicht werden. Der Preis des Brennstoffes wird sich aber nur unbedeutend verändern, weil die Kosten der Uran-Anreicherung, die zur Erzielung eines höheren Abbrandes nötig ist, durch die verbesserten Fabrikationsmethoden der Brennstoffelemente einigermaßen ausgeglichen werden dürften. Unter Berücksichtigung aller erwähnten Umstände werden die Kosten des Kernbrennstoffes im Jahre 1967 auf ca. 2 Mills/kWh

Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Kern- und Öl- bzw. Gas-Kraftwerken

Tabelle II

Jahr der Inbetriebnahme		1967	1967	1972	1980	
Elektrische Leistung	MW	300	500	500	1000	
1. Spez. Baukosten Kernkraftwerke Öl- bzw. Gas-Kraftwerke	\$/kW	180...200	160...185	145...160	125	
	\$/kW	110	105	105	95	
	Unterschied	70...90	55...80	40...55	30	
2. Mehrkosten der Kern- gegenüber den Öl- bzw. Gas-Kraftwerken	feste Kosten	Mills/kWh	1,5...1,8	1,2...1,6	0,9...1,2	0,7
	variable Kosten ohne Brennstoff	Mills/kWh	0,2	0,15	0,10	0,05
	insgesamt	Mills/kWh	1,7...2,0	1,35...1,75	1,0...1,3	0,75
3. Kosten des Spaltstoffes	Mills/kWh	1,8...2,0	1,80...2,00	1,3...1,7	1,0...1,5	
4. Summe (2) + (3)	Mills/kWh	3,5...4,0	3,15...3,75	2,3...3,0	1,75...2,25	
5. Wirtschaftlich gleichwertige Wärmekosten des Öls bzw. Gases	\$/Gcal	1,55...1,78	1,43...1,70	1,07...1,39	0,83...1,03	

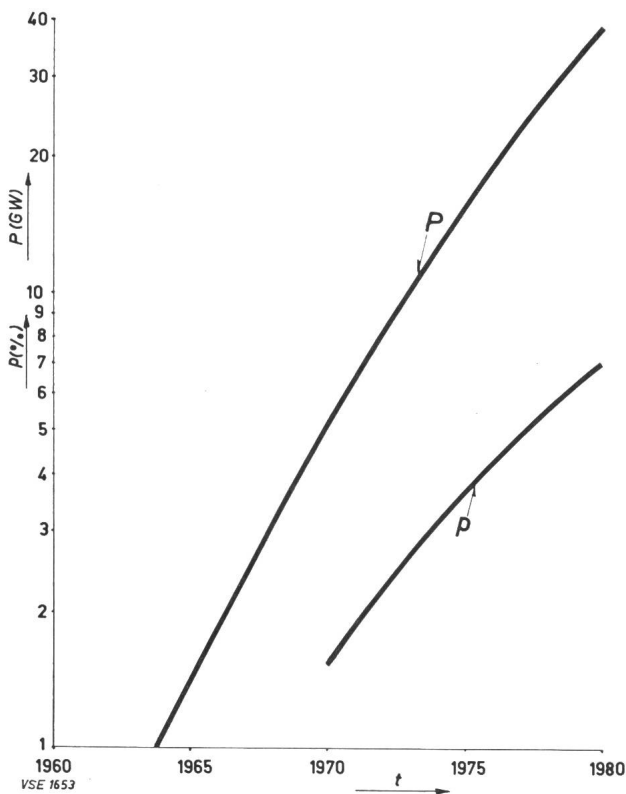


Fig. 5

Voraussichtlicher Ausbau der Kernkraftwerke in den USA

P maximal mögliche Leistung ab Generator
 p Anteil an der totalen installierten Leistung

veranschlagt. In der darauf folgenden Periode wird sicherlich eine weitere Kostensenkung infolge eines vollständigeren Abbrandes in fortgeschrittenen Reaktortypen und der niedrigeren Fabrikationskosten von Uralelementen eintreten; so dürften die Brennstoffkosten um 1980 ca. 1,5 Mills/kWh betragen. Die Kostensenkung soll dann auch durch die zunehmenden Mengen der benötigten Spaltstoffe begünstigt werden; nach 1980 dürfte zwar die Gesamtleistung der Kernkraftwerke und demzufolge die Nachfrage nach Spaltstoffen rasch zunehmen.

Die voraussichtliche Wettbewerbsfähigkeit der Kernkraftwerke mit den klassisch-thermischen Kraftwerken ist in den Tabellen I und II angegeben. Die Angaben über die Kernkraftwerke gelten für die Verhältnisse, die sich ca. 5 Jahre nach der Inbetriebsetzung einstellen. Die Zahlen der Tabellen sind auf Grund folgender Annahmen gerechnet worden:

- feste Kosten für Kernkraftwerke 13 %, für klassisch-thermische Kraftwerke 12 % der Erstellungskosten
- Benützungsdauer der installierten Leistung für beide Kraftwerkstypen 7000 h/a
- spezifischer Wärmeverbrauch: 2240...2140 kcal/kWh

Die letzte Zeile (5) beider Tabellen gibt die wirtschaftlich gleichwertigen Wärmekosten der Brennstoffe an; wenn die tatsächlichen Wärmekosten oberhalb dieser Grenzwerte liegen, dann sind die Kernkraftwerke in der Lage, mit den klassischen thermischen Kraftwerken zu wetteifern. Die Verminderung dieser Grenzwerte der Brennstoffkosten je nach dem Entwicklungsstand der Kernkraftwerke ist in Fig. 4 dargestellt.

Aus den Tabellen I, II und der Fig. 4 geht hervor, dass die Kernkraftwerke, im Leistungsbereich von 300...500 MW, die um 1967 fertiggestellt sein werden, in Gegenden mit hohen Brennstoffkosten (1,20...1,60 \$/Gcal¹⁾ etwa 5 Jahre nach Betriebsaufnahme wirtschaftlich arbeiten können. Anlagen einer späteren Bauperiode, 1970...1980, mit Leistungen von 500...1000 MW, dürften in den meisten Gebieten der USA mit klassischen thermischen Kraftwerken erfolgreich wetteifern können.

Die Gesteungskosten der in 500 MW Kraftwerken erzeugten Energie werden um 1968...70 rund 6 Mills/kWh, 10 Jahre später etwa 5...5,5 Mills/kWh betragen. Für noch grössere Anlagen mit Einheitsleistungen von 500...1000 MW werden die Gesteungskosten der Energie um 1980 auf schätzungsweise 4...5 Mills/kWh reduziert werden können.

Die Entwicklungsaussichten

Die Gesamtleistung der zurzeit in den USA erstellten Kernkraftwerke, einschliesslich aller Versuchsanlagen, beträgt rund 1 GW oder ca. 0,5 % der Leistung sämtlicher Kraftwerke. Der voraussichtliche Ausbau von Kernkraftwerken bis 1980 ist in Fig. 5 angegeben. Nach diesen Kurven kann die installierte Leistung der Kernkraftwerke um 1980 schon 40 GW oder 7 % der gesamten Kraftwerksleistung erreichen. Da Kernkraftwerke vorwiegend die Grundlast decken und deshalb mit einer höheren Benützungsdauer der installierten Leistung als die übrigen Kraftwerke arbeiten, wird ihr Anteil in der Energiebilanz höher als in der Leistungsbilanz sein; man schätzt, dass im Jahre 1980 10 % der Produktion durch Kernkraftwerke gedeckt sein werden. Es ist zu erwarten, dass nach diesem Zeitpunkt die Erstellung von Kernkraftwerken in einem noch rascheren Tempo fortschreiten wird.

Die bisher entwickelten Reaktoren arbeiten, bis auf eine Ausnahme, mit langsamen Neutronen; sie gehören zur Gruppe der sogenannten thermischen Reaktoren. Kernreaktoren dieser Art arbeiten mit einem niedrig angereichertem Energieträger; sie verwerten aber nur einen kleinen Bruchteil des potentiellen Energievorrates. Sie nutzen z. B. vom Uran nur das aktive Isotop U₂₃₅ aus, dessen Anteil aber im Natururan bloss 0,7 % beträgt. Um die Spaltstoffe vollständiger als bisher ausnutzen zu können, ist es notwendig, Brutreaktoren zu entwickeln. Diese sind im Stande, das inerte Haupturan-Isotop U₂₃₈, wie auch andere Elemente z. B. Thorium (Th₂₃₂), in aktive Kernenergieträger — Plutonium 239 und Uran 233 (Pu₂₃₉ und U₂₃₃) — umzuwandeln. Eine vollständigere Ausnutzung der Spaltstoffe muss unbedingt erreicht werden, will man die Energieerzeugung von den klassischen Brennstoffen auf die Kernenergiequellen verlagern. Bemühungen, die technischen Entwicklungen von Brut- und Konvertor-Reaktoren vorzutreiben, werden deshalb, wie in den USA, auch in anderen Ländern eifrig fortgesetzt.

¹⁾ 1 Gcal = 10⁶ kcal

Adresse des Autors:
 A. Kroms, 30, Rockland Ave., Malden 48, Mass. USA.