

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

**Band:** 58 (1967)

**Heft:** 21

**Artikel:** Energiequellen der amerikanischen Elektrizitätswirtschaft [Fortsetzung]

**Autor:** Kroms, A.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916293>

### **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>**

# Energie-Erzeugung und -Verteilung

## Die Seiten des VSE

### Energiequellen der amerikanischen Elektrizitätswirtschaft

von A. Kroms, Malden USA

(Fortsetzung aus Nr. 20)

620.91 : 621.31 (73)

#### 3. Wasserkraftanlagen

Die Rolle der Wasserkraft in der elektrischen Energieversorgung wird von den ausbauwürdigen Wasserkraftreserven, den Brennstoffvorräten, dem Standort und den Eigenschaften der Wasserkraftquellen bedingt. Bei der Erschliessung der Wasserkräfte sind folgende Umstände wichtig:

1. der Wasserkraftausbau verlangt hohe Kapitalanlagen und ist mit langen Baufristen verknüpft;

2. Wasserkraftwerke sind standortgebundene Anlagen, mit veränderlichem, von der Energiequelle bedingtem Energiedargebot; sie benötigen nicht selten lange Übertragungsleitungen und müssen zwecks Leistungsausgleichs in ausgedehnte Verbundnetze eingeschlossen werden;

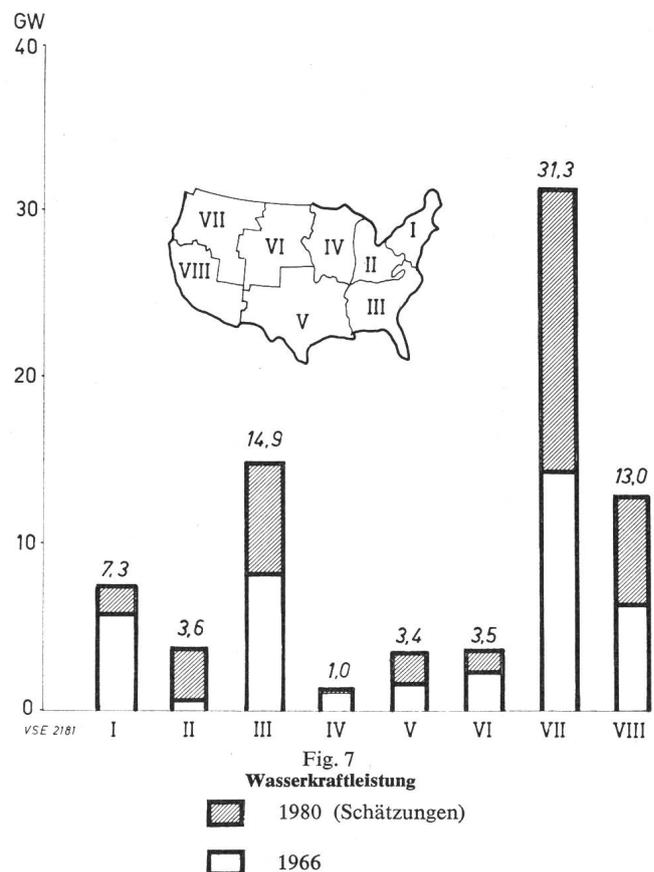
3. die Ausnützung der Wasserkraft ist mit anderen Zweigen der Wasserwirtschaft — der Schifffahrt, Bewässerung u. a. — eng verbunden, weshalb die Flussbauten verschiedenen Wassernutzern gleichzeitig dienen müssen; dies hat zur Errichtung von Mehrzweckanlagen geführt.

Die Abbauwürdigkeit der Wasserkräfte ist kein fester Begriff. Sie verändert sich mit der Zeit und dem Ort, je nach der Verfügbarkeit anderer Energiequellen, dem Ausbaugrad der Verbundnetze, den wirtschaftlichen Umständen und dem Betriebsregime der Wasserkraftwerke im Zusammenwirken mit anderen Kraftwerken. So wird Kernenergie in Zukunft die Errichtung neuer Wasserkraftwerke in einigen Gebieten verlangsamen oder völlig beenden. Der beständige Anstieg der Lastspitzen in den ausgedehnten Verbundnetzen wird dagegen eine gut regelbare Wasserkraftleistung zur Deckung der Spitzenlast benötigen. Daher wird in neuen Projekten des Wasserkraftausbaus eine relativ höhere elektrische Leistung als in den früheren Bauvorhaben ausgewählt; auch in den bestehenden Wasserkraftwerken werden zusätzliche Aggregate untergebracht. Zur Spitzendeckung verwendet man ausserdem immer mehr Pumpspeicherwerke. Demzufolge werden Wasserkraftwerke in Zukunft in der Leistungsbilanz des Verbundbetriebs eine grössere Rolle als in der Energiebilanz spielen, weil man sich bemüht, Wasserkraftwerke zur Aufnahme der Lastspitzen auszuliegen [9].

Um die Gegebenheiten grosser Flußsysteme für die Volkswirtschaft vollwertig auszunutzen, hat der Kongress der USA mehrere Gesetze herausgegeben, in denen die Grundlagen des Flussausbaus dargelegt worden sind. In jedem Flussgebiet werden die Bauprojekte derart miteinander koordiniert, dass die besten Gesamtergebnisse vom Standpunkt der nationalen Wirtschaft erzielt werden können. Jede Staustufe muss in den Rahmenplan des Flussausbaus organisch hineingefügt werden, wobei dies sich sowohl auf die staatlichen als auch auf die privaten Bauprojekte bezieht. Die Aufsicht über

den Flussausbau gehört zu den Pflichten der staatlichen Elektrizitätsbehörde — «Federal Power Commission (FPC)» —, welche die Erlaubnis oder die Lizenz zur Errichtung von Wasserkraftwerken erteilt. Die Bauvorhaben werden sowohl von den staatlichen Behörden — «Bureau of Reclamation» und «Corps of Engineering» [10, 11] — als auch von privaten Unternehmen durchgeführt.

Das Wasserkraftpotential der USA wird auf 150 GW geschätzt. Die Jahresarbeit der ausbauwürdigen Wasserenergiequellen beträgt 500...550 TWh; dies entspricht 40...45 % der gegenwärtigen Energieabgabe aller Kraftwerke der USA. Bisher sind rund 50 GW in Wasserkraftwerken installiert worden; sie liefern in einem mittleren hydrographischen Jahr 180...200 TWh. Die Aufteilung der Wasserkraftleistung auf die Gebiete der USA ist in Fig. 7 veranschaulicht. Die grössten Wasserenergiequellen befinden sich in den westlichen und östlichen Gebirgsgegenden, wogegen in der mittleren Flachlandzone nur geringe Wasserkräfte vorhanden sind. Mehr als 50 % der Wasserkräfte sind in westlichen Küstengebieten, besonders im Nordwesten, konzentriert. Dort ist im Columbia-Flußsystem eine besonders leistungsfähige Kraft-



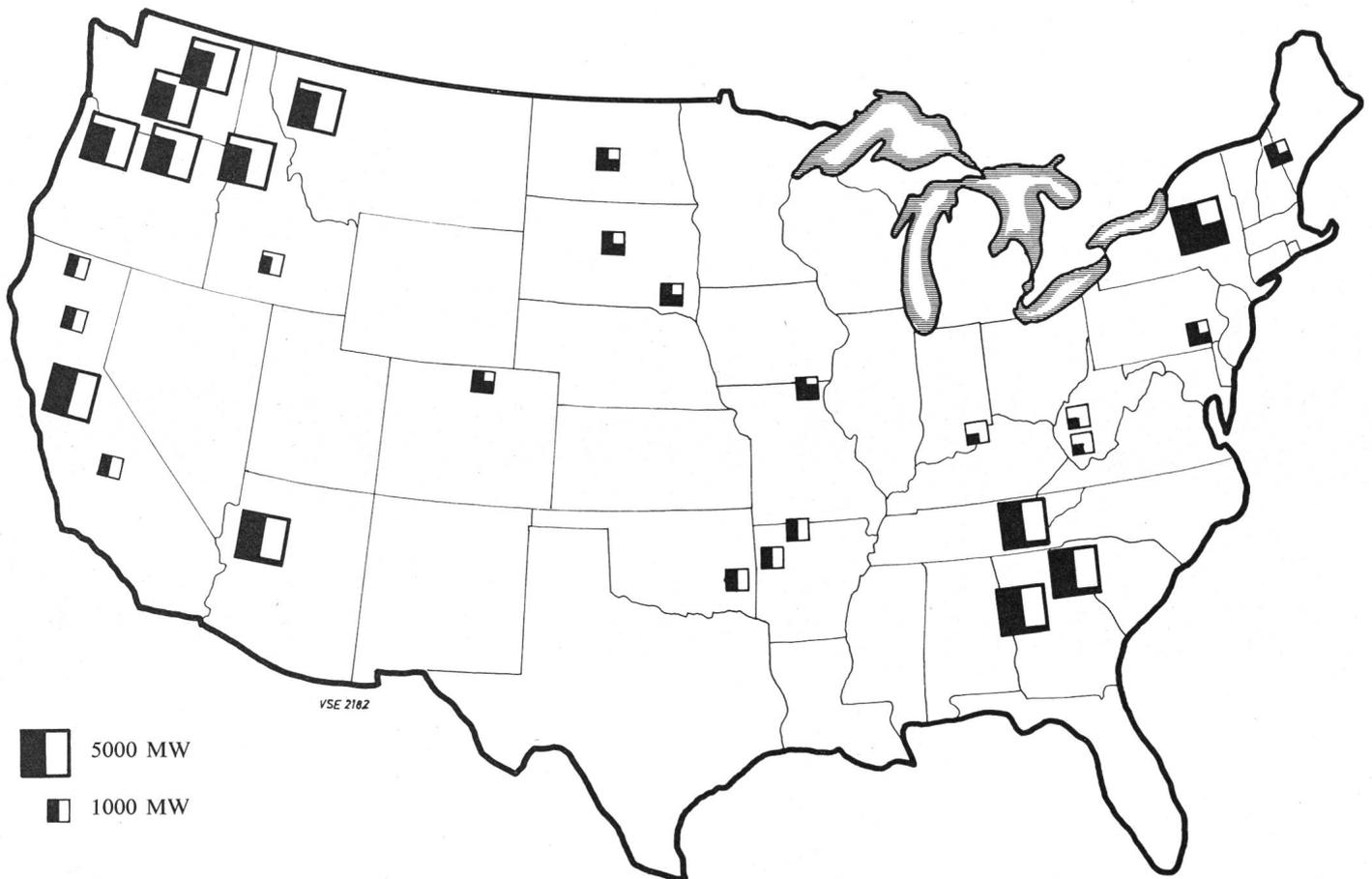


Fig. 8  
 Die wichtigsten Wasserkraftwerksgruppen im Jahre 1980 (ohne Pumpspeicherwerke)  
 Schwarze Rechtecke: im Jahre 1966 ausgebaute Leistung

werkskette ausgebaut worden, welche durch die Errichtung neuer Kraftanlagen oder die Vergrößerung bestehender Werke noch erweitert wird; in diesem Gebiet kann die Wasserkraft auch im kommenden Jahrzehnt noch die führende Energiequelle sein.

Die Rolle der Wasserkraft in der elektrischen Energiebilanz hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte allmählich vermindert. Während 1940 der Anteil der Wasserkraft 34 % betrug, ist ihr Anteil jetzt auf 18 % zurückgegangen. Obwohl zum Ausbau dieser unversiegbaren Energiequelle grosse Mittel erteilt werden, können die teuren Wasserbauten mit dem rasch ansteigenden Energiebedarf nicht Schritt halten. Ausserdem sind die meisten der günstigen Wasserkraftquellen schon erschlossen worden, so dass man allmählich zum Bau der weniger günstigen Wasserkräfte antreten muss, wodurch die Baukosten sich entsprechend erhöhen. Eine ähnliche Erscheinung kann in den meisten industriell entwickelten Ländern beobachtet werden, weil dort die Erschliessung der Wasserkräfte sich ihrem Ende nähert.

Der erwähnten Gründe wegen wird erwartet, dass Wasserkraftwerke, ohne Pumpspeicherwerke, um 1980 nur 10...12 % der gesamten Elektrizitätsproduktion liefern werden. Trotz dem prozentuellen Rückgang wird die Leistung der Wasserkraftwerke bis 1980 voraussichtlich auf 80...90 GW ansteigen. Wasserkraftwerke mit einer Leistung von rund 13 GW befinden sich zurzeit im Bau; weitere Projekte, deren Vollendung bis 1980 erfolgen soll, umfassen eine Leistung von 28 GW. Hierher gehören einige umfangreiche Projekte der Erweiterung von bestehenden Wasserkraftwerken, um

ihre Beteiligung an der Spitzendeckung der Verbundnetze erhöhen zu können. Die voraussehbare Lagerung der Wasserkraftleistung um das Jahr 1980 ist in Fig. 8 angegeben. Man beabsichtigt ausserdem, Wasserenergie aus den neu zu erstellenden Wasserkraftwerken Kanadas zu beziehen [4]. Grosse Wasserkraftvorräte befinden sich auch in Alaska; sie können jährlich mehr als 50 TWh abgeben, doch sind sie noch nicht ausgebaut worden. Man erwägt hier die Erstellung eines Grosskraftwerks für 5 GW auf dem wasserreichen Yukon-Fluss.

Die Wasserkraftleistung ist vorwiegend in grossen Anlagen, mit Leistungen von mehr als 50 MW, untergebracht worden. Sechs Wasserkraftwerke haben eine installierte Leistung von mehr als 1000 MW; vier von diesen Werken befinden sich auf dem Colorado-Fluss. Einige Wasserkraftwerke mit Leistungen über 300 MW befinden sich im Bau. Die Energiesysteme interessieren sich hauptsächlich für grosse Wasserkraftquellen, weil der Umfang der Energieversorgung so weit zugenommen hat, dass kleinere Werke nicht imstande sind, zur Deckung des ansteigenden Energiebedarfs wesentlich beizutragen. Für die örtlichen Bedürfnisse von abgelegenen Gegenden werden aber auch kleine Wasserkraftwerke errichtet.

Einige Projekte der amerikanischen Flussaussnutzung haben die Aufmerksamkeit der Welt auf sich gelenkt. Ein Beispiel der vortrefflich durchgeführten Mehrzweck-Flussaussnutzung stellt der Ausbau des Tennessee-Flussystems dar [12]. Das Kraftwerkssystem der Tennessee Valley Authority (TVA) enthält 30 Staudämme und Wasserkraftwerke mit

einer installierten Leistung von rund 4 GW. Da die Wasserkräfte des Tennessee-Flusses schon ausgebaut worden sind, hat TVA zur Deckung des Lastanstiegs thermische Grosskraftwerke errichtet, welche zurzeit mehr als 70 % der Energie liefern. Die TVA ist das grösste Elektrizitätsunternehmen der USA mit einer Jahreslieferung von mehr als 70 TWh. Obwohl die Rolle der thermischen Kraftwerke in ihm ständig zunimmt, werden auch in den Wasserkraftwerken zusätzliche Spitzenaggregate untergebracht. Die TVA hat den Energieabsatz in ihrem Versorgungsgebiet mit niedrigen Energietarifen wesentlich gefördert. Als ein planmässig ausgeführtes Vorhaben der allseitigen Flussausnutzung ist das TVA-System zum Muster für Planungen in anderen Ländern geworden.

Eine andere, viel leistungsfähigere Kraftwerkskette ist im Nordwesten, im Columbia-Flußsystem, errichtet worden. Die Gesamtleistung dieser Wasserkraftwerke soll im Endausbau 30 GW übersteigen; mehr als 50 % dieser Leistung befinden sich schon in Betrieb. Da die bestehenden Wasserkraftwerke zur Erzielung der Spitzenleistung erweitert werden, kann die Endleistung noch bedeutend höhere Werte annehmen. Ein typisches Beispiel ist das Erweiterungsprojekt des bekannten Grand Coulee-Wasserkraftwerkes, dessen Leistung zurzeit rund 2 GW beträgt. Man beabsichtigt, in diesem Werke 12 zusätzliche 600 MW-Aggregate einzubauen und dadurch die Gesamtleistung des Werks bis 1980 auf  $2,0 + 7,2 = 9,2$  GW zu bringen; die geplanten Aggregate sollen die grössten Wasserkraftmaschinen der westlichen Welt sein [13].

Die Columbia-Kraftwerksgruppe wird teilweise von staatlichen, teilweise von privaten Gesellschaften betrieben. Die meisten Staustufen bilden Mehrzweckanlagen, welche zur Energieerzeugung, Bewässerung, Schifffahrt und zur Abwendung von Hochwasserschäden dienen. Die USA haben mit Kanada eine Vereinbarung über die Errichtung einiger Staudämme am Oberlauf des Flusses getroffen; die Dämme sollen durch Zurückhalten der Hochwasser die Wasserführung des Flusses ausgleichen. Dies wird die Energieausbeute der Wasserkraftwerke erhöhen und die Hochwassergefahr herabsetzen. Die dadurch zusätzlich zu erzeugende Wasserenergie von rund 80 TWh/Jahr wird in den USA verbraucht werden, wofür die USA Baumittel zur Erstellung der Dämme an Kanada abgeben werden. Die zeitweilig überschüssige Wasserenergie wird mittels Hochspannungs-Fernleitungen nach Kalifornien abgeleitet.

Die Wasserkraftwerke, welche die Möglichkeiten einer Durchflussregelung besitzen, werden nach der Ausdehnung der Verbundnetze mehr und mehr zur Deckung der Spitzenlast eingesetzt. Der Mangel an ausreichender Wasserkraftleistung, die zur Spitzendeckung geeignet ist, hat die Errichtung von Pumpspeicherwerken veranlasst. Der Bau von Pumpspeicherwerken ist in den USA später als in Europa aufgenommen worden, doch befinden sich einige grosse Werke schon in Betrieb; eine Reihe anderer Werke mit einer Gesamtleistung von ungefähr 10 GW wird gebaut oder geplant, wobei einige Pumpspeicherwerke für Leistungen von 1,0...1,8 GW ausgelegt werden. Mit dem Ausbau von Kernkraftwerken, welche die Grundlast übernehmen werden, wird die Rolle der Pumpspeicherwerke voraussichtlich ständig zunehmen, weil es vorläufig an anderen Mitteln zur Gross-

speicherung der elektrischen Energie fehlt. Man schätzt, dass 1980 der Anteil der Pumpspeicherwerke in der elektrischen Leistungsbilanz der USA 4 % oder mehr betragen wird.

#### 4. Kernkraftwerke

Die Bedeutung der Kernenergie in der elektrischen Energieerzeugung wird in den kommen Jahren schnell zunehmen. Obgleich diese Entwicklung sich zurzeit nur an ihrem Anfang befindet, hat sie doch in kurzer Zeit erstaunliche Erfolge mit sich gebracht.

Während der vergangenen 10...15 Jahre sind in den USA grosse Mittel zur Entwicklung von Kernenergieanlagen bereitgestellt worden. Da aber die USA über reichliche Vorkommen an konventionellen Brennstoffen verfügen, wurden bisher vorwiegend Versuchsreaktoren gebaut, weshalb der Anteil der Kernkraftwerke in der elektrischen Energiebilanz gering war. Die Leistung der sich zurzeit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke beträgt 2,3 GW, und sie haben rund 30 TWh ins Netz abgegeben. Im Jahre 1966 hat sich die Situation aber geändert, weil die Kernkraftwerke soweit vervollkommen worden sind, dass sie mit den Brennstoffkraftwerken wirtschaftlich wetteifern können. Von der im Jahre 1966 neu bestellten elektrischen Leistung sind über 50 % für Kernkraftanlagen in Auftrag gegeben worden. Diese Tendenz setzt sich 1967 fort, so dass man mit Sicherheit annehmen kann, dass in den nächsten Jahren der Anteil der Kernkraftwerke rasch ansteigen wird. So sind in der ersten Hälfte des Jahres 1967 Pläne für 23 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von mehr als 18 GW bekanntgegeben worden; die üblichen Grössen der Aggregate (Reaktor und Turbine) sind 600...1000 MW.

Die Leistung der sich zurzeit im Bau, im Entwurf und in Planung befindlichen Kernkraftwerke, welche bis 1973 in Betrieb genommen werden sollen, wird mit rund 50 GW angegeben. Während der 70er Jahre werden schätzungsweise rund 60 % der neuen Kraftwerksleistung in Kernkraftwerken untergebracht werden (Fig. 9) [14]. Man rechnet, dass um 1980 die Leistung der Kernkraftwerke 140 GW betragen wird und sie 25...30 % der elektrischen Energie liefern werden. Danach wird die Umstellung auf Kernenergie noch schneller vor sich gehen, so dass am Ende des Jahrhunderts mehr als 50 % der elektrischen Energie in Kernanlagen erzeugt werden sollen. Es ist bemerkenswert, dass die Bestellungen von Kernkraftaggregaten alle früheren Voraussagen übertreffen. So hat vor zwei Jahren die Atomenergie-Kommission (AEC) die 1980 zu erwartende Kernkraft-Leistung auf 40...50 GW bewertet; obgleich zurzeit diese Zahl dreifach worden ist, ist es durchaus möglich, dass sogar die letzten Schätzungen zu niedrig sind und 1980 die Leistung der Kernkraftwerke 175 GW oder noch höhere Werte erreichen wird. Es ist durchaus möglich, dass am Ende des Jahrhunderts die Leistung der Kernkraftwerke sich 1000 GW nähern wird [15].

Die meisten Kernkraftwerke werden in Küstengebieten errichtet. Die Gründe dafür sind:

- a) an den Ozeanküsten befinden sich zahlreiche Grossstädte, welche enorme Mengen an Energie benötigen;
- b) in den meisten Küstengebieten sind keine reichlichen Vorkommen an fossilen Brennstoffen vorhanden;

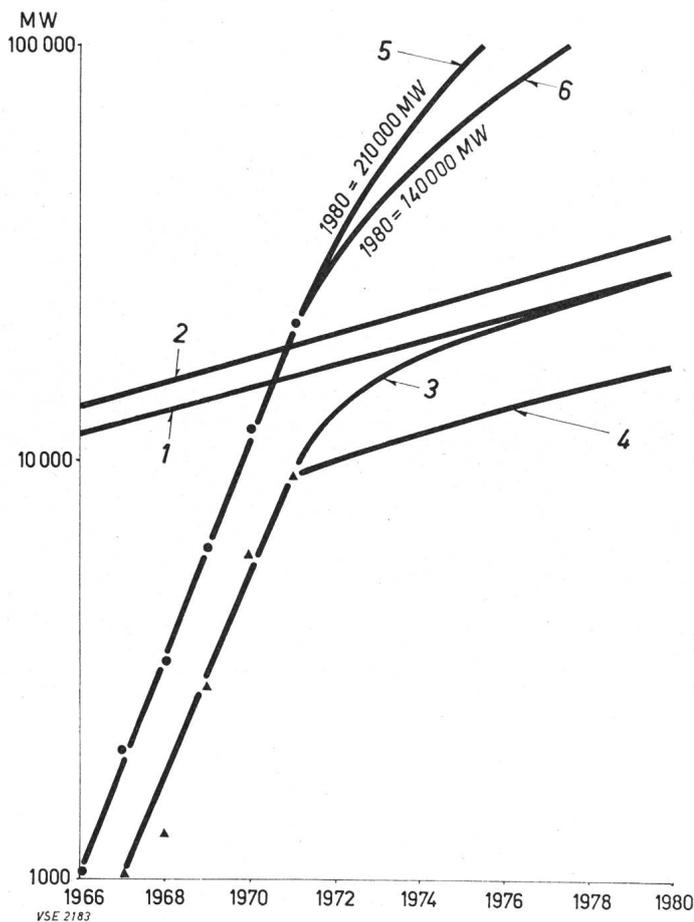


Fig. 9  
Leistungszunahme der Kernkraftwerke  
Jahreszuwachs (MW/Jahr)

alle thermischen Kraftwerke:

- 1 bei einer Jahreszuwachsrate von 6,5 %
- 2 bei einer Jahreszuwachsrate von 7,0 %

Kernkraftwerke:

- 3 bei 80 % der Werte der Kurve 2
- 4 bei 60 % der Werte der Kurve 1

Gesamtleistung der Kernkraftwerke: 5 und 6  
(auf Grund der Zuwachsraten 3 und 4)

c) da Kernkraftwerke keine Probleme der Brennstoffbeschaffung und Luftverunreinigung haben, können sie in der Nähe der Verbrauchsschwerpunkte gebaut werden.

Grosse Kernkraftwerke mit Aggregatleistungen von 400...1000 MW sind schon imstande, mit den kohlengefeuerten Kraftwerken nicht nur in den Brennstoff-, sondern sogar in den Anlagekosten zu wetteifern. Die Erstellungskosten der Kernkraftwerke liegen bei 120 \$/kW, d. h. in gleicher Gröszenordnung wie die Baukosten der Brennstoffkraftwerke. Dies ist dadurch erreicht worden, dass in Kernkraftwerken Kernreaktoren eines Typs — wassergekühlte Reaktoren — eingebaut werden. Sie verwerten leicht angereichertes Uranium und werden in zwei Bauarten — Druck- und Siedereaktoren — von wenigen Grossfirmen hergestellt. Dies hat zur Vereinheitlichung der Konstruktion und zur Verminderung der Errichtungskosten geführt. Die Hauptersparnisse gegenüber den Brennstoffkraftwerken werden aber durch die niedrigeren Ausgaben für den Rohenergieträger erzielt.

Kohlenkraftwerke können zurzeit noch mit Kernkraftwerken in den Kohlengebieten wetteifern. In den Küstengebieten dagegen, wo die Wärmekosten der fossilen Brennstoffe

höher liegen, ist mit einem rascheren Ausbau der Kernkraftwerke zu rechnen. Der Rückgang der Kernenergiekosten ist auf die technische Vervollkommnung der Anlagen, bessere Ausnutzung der Kernenergieträger und grosse Einheitsleistungen der Kernkraft-Aggregate (bis 1000 MW) zurückzuführen. Man schätzt, dass 1975 die Kernkraftwerke mit den Brennstoffkraftwerken bei einem Brennstoffpreis von 0,60...0,90 \$/Gcal wetteifern werden. Die Gestehungskosten der Kernenergie wird zu diesem Zeitpunkt 0,30...0,35 cents/kWh oder noch weniger betragen. Die Brennstoffwerke müssen daher alle möglichen Massnahmen der Kostensenkung treffen. Da Transportkosten bei Kernenergie praktisch wegfallen und ihr Preis überall derselbe ist, wird Kernenergie die Brennstoffpreise gewissermassen ausgleichen und die höchste Preisgrenze bestimmen. Deshalb erwartet man, dass 1970...80 Brennstoffe für niedrigere Preise (bei festem Dollar) als heute verfügbar sein werden.

Die Wettbewerbsfähigkeit der Kernkraftwerke wird von dem staatlichen Unternehmen Tennessee Valley Authority (TVA) bestätigt, welches einen Auftrag für ein 2,1 GW-Kernkraftwerk erteilt hat; ein zweites Werk gleicher Leistung wird geplant. Da das Kraftwerk in einem Kohlengebiet erstellt werden wird, sind ausführliche Vergleiche mit der Variante des Kohlenkraftwerks durchgeführt worden; die voraussehbaren durchschnittlichen Energiekosten während der ersten 12 Betriebsjahre sind in Tabelle VII angegeben.

Trotz des niedrigen Kohlenpreises verspricht das Kernkraftwerk im Grundlastbetrieb wirtschaftliche Vorteile, so dass TVA in den ersten 12 Betriebsjahren mit einer Ersparnis von 100 Millionen \$ rechnet.

Da die festen Kosten bei privatem Kapital höher sind, schätzt man, dass die Gestehungskosten der Kernenergie in den Kraftwerken der privaten Gesellschaften in der Höhe von 0,35...0,40 cents/kWh liegen werden. Bei diesen Kosten können die Kernkraftwerke nicht bloss mit Brennstoff-, sondern sogar mit Wasserkraftwerken wetteifern, besonders weil Kernkraftwerke an den Verbrauchszentren erstellt werden, wodurch die Fernübertragung der Energie wegfällt.

Der Einsatz grosser Kernkraftwerke in die elektrische Energieversorgung stellt die Frage über die Verfügbarkeit und die damit verbundene Kostenentwicklung der Kernenergieträger auf. Der Bedarf an Kernenergieträgern wird nicht nur von der Leistung der Kernkraftwerke, sondern in hohem Masse auch von den Bauarten der Kernreaktoren

#### Kostenvergleich

Tabelle VII

		Kernkraftwerk	Kohlenkraftwerk
Leistung des Kraftwerks	MW	2100	2200
Anzahl der Aggregate		2	2
Spezifischer Wärmeverbrauch	kcal/kWh	2660	2250
Brennstoffpreis	\$/Gcal	0,50	0,75
Anlagekosten	\$/kW	116	117
Gestehungskosten der Energie:			
Kapitaldienst <sup>1)</sup>	cents/kWh	0,09	0,09
Energieträger	cents/kWh	0,13	0,17
Betriebskosten	cents/kWh	0,02	0,02
Insgesamt		0,24	0,28

<sup>1)</sup> 4½ %, 35 Jahre, einschliesslich Versicherung.

bedingt. In den Kernkraftwerken der USA werden zurzeit fast ausschliesslich wassergekühlte thermische Reaktoren angewandt. Im Bau dieses Reaktortyps ist hier eine hohe Stufe der technischen Reife erreicht worden. Diese Reaktoren arbeiten mit leicht angereichertem Uran ( $\sim 3\%$  U 235); sie verwerten weniger als 1% des Energievorrats des Energieträgers, und da ihr Brutfaktor niedrig ist, muss der verarbeitete Energieträger periodisch mit frischem Reagent ersetzt werden. Ein wassergekühlter Reaktor mit einer elektrischen Leistung von 1000 MW verlangt 600 t Uran zur Aufbereitung der ersten Ladung; danach werden jährlich 150 t Uran zur Ersetzung des verarbeiteten Energieträgers benötigt.

Die rasche Leistungszunahme der mit wassergekühlten Reaktoren ausgerüsteten Kernkraftwerke wird in Zukunft die Urangewinnung stark belasten, wobei nach dem Erschöpfen der konzentrierten Uranerze mit höheren Kosten des Energieträgers zu rechnen ist, weil die Gewinnung des Urans aus armen Erzen mit erheblich grösseren Kosten verknüpft ist. Die wassergekühlten Reaktoren würden bis Ende des Jahrhunderts 1,5 Mt  $U_3O_8$  oder mehr benötigen (Fig. 10); zur Gewinnung dieser Uranmengen wäre es nötig, auch ärmere Erze zu verarbeiten oder Uran zu importieren (möglicherweise aus Kanada). Da in Brutreaktoren aus einer gleichen Menge Uran rund fünfzigmal mehr Energie als in thermischen Reaktoren erzeugt werden kann, wird es sich rechtfertigen, einen fünfzigmal höheren Preis für Uran zu bezahlen (1000 \$ anstatt 20 \$/kg  $U_3O_8$ ). Unter diesen Voraussetzungen würde kein Rohstoffmangel für die Kernenergieanlagen mehr bestehen.

Das zurzeit wichtigste Problem des Kernkraftwerkbaus ist eine möglichst schnelle Entwicklung von Brutreaktoren;

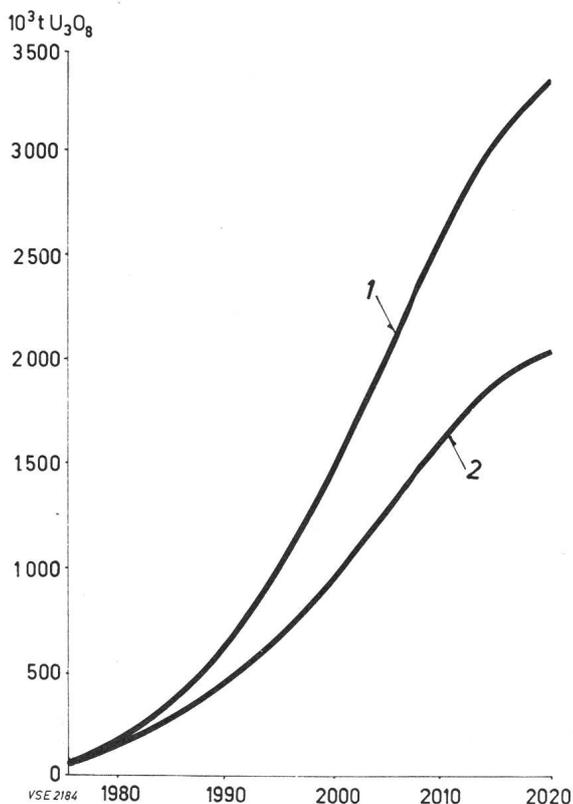


Fig. 10  
Vorraussichtlicher Uranbedarf

- 1 nur wassergekühlte Reaktoren bis zum Einsatz von Brutreaktoren  
2 Konverter-Reaktoren in der Übergangsperiode zu den Brutreaktoren

die damit verbundenen Fragen werden daher in der technischen Literatur ausführlich behandelt [15, 16, 17, 18, 19]. Man kommt dabei zur Schlussfolgerung, dass, falls die Kernkraftwerke ausschliesslich mit wassergekühlten Reaktoren ausgerüstet wären, das Erschöpfen der konzentrierten Uranerze den Uranpreis so weit erhöhen würde, dass die wirtschaftlichen Vorzüge der Kernenergie in Frage gestellt wären.

Zur Verminderung des Uranbedarfs werden zwei Reaktorarten — Konverter und Brutreaktoren — erwogen. Jene weisen einen erheblich höheren Brutfaktor als die wassergekühlten Reaktoren auf, doch bleibt er unter dem Wert 1,0. Sie ermöglichen es aber auch, einen anderen Kernenergie-träger — Thorium — zu verwerten, dessen Vorräte die Uranreserven in der Erdkruste weit übertreffen. Zu den Konvertern gehören Schwerwasser-, gasgekühlte Hochtemperatur-Reaktoren und andere Bauarten; bei der Ausnutzung des Thoriums kann ihr Brutfaktor sich 1,0 nähern. Um eine wirtschaftlich günstige Energiegrundlage für eine praktisch unbegrenzte Zeitspanne zu sichern, müssen aber schnelle Brutreaktoren entwickelt werden. Dabei muss ein so hoher Brutfaktor erreicht werden, dass die Reaktoren genügende Plutoniummengen zur Inbetriebnahme neuer Reaktoren bereitstellen. Wenn die Verdoppelung des Plutoniums nicht in einer kürzeren Zeitspanne als die Verdoppelungszeit der Kernkraftleistung erzielt wird, dann ist es unmöglich, den Anteil der Brutreaktoren zu erhöhen, weil es am zusätzlich erforderlichen Plutonium mangelt. Da der Energiebedarf sich innerhalb von rund 10 Jahren verdoppelt, ist es nötig, Brutreaktoren mit einer Verdoppelungszeit von ca. 7 Jahren zu entwickeln; dann werden die Plutoniummengen zur Ladung neuer Reaktoren genügen. Da Brutreaktoren imstande sind, das verarbeitete Uran der wassergekühlten Reaktoren, welches vorwiegend aus U 238 besteht, in Plutonium umzuwandeln, werden nach der Verbreitung der Brutreaktoren nur geringe Mengen an frischem Uran benötigt werden.

Man schätzt, dass, wenn die Brutreaktoren mit einer Verdoppelungszeit von 7...8 Jahren bis 1980 entwickelt werden könnten, der Uranbedarf für die kommenden 50 Jahre 1,6...2,0 Mt betragen würde [16]; nachher würden die Brutreaktoren den ganzen Lastzuwachs aufnehmen und die Urangewinnung entlasten. Bei einem geringeren Brutfaktor oder einem späteren Einsatz von Brutreaktoren kann der Uranbedarf fast doppelte Werte annehmen. Diese Energieträgermengen können die USA aus eigenen Vorräten ohne erhebliche Preissteigerungen nicht versorgen. Dies beweist, wie wichtig es ist, wirkungsvolle Brutreaktoren zu einem möglichst nahen Zeitpunkt in die Energieerzeugung einzuschliessen. Da hierbei aber noch manche technische Probleme gelöst werden müssen, werden voraussichtlich in der Übergangszeit auch die Konverter-Reaktoren eine gewisse Rolle spielen können. Infolge der sehr raschen Entwicklung auf diesem Felde können die voraussehbaren Ergebnisse nur ungefähr umrissen werden.

Kostenmässig werden Kernkraftwerke mit Brutreaktoren sich ähnlich wie die Wasserkraftwerke verhalten, weil sie verhältnismässig hohe feste Kosten und nur geringfügige Ausgaben für den Energieträger aufweisen. Bei ihnen wird auch ein höherer Uranpreis keinen merklichen Einfluss auf die Gestehungskosten der Energie ausüben. Bei einer hohen

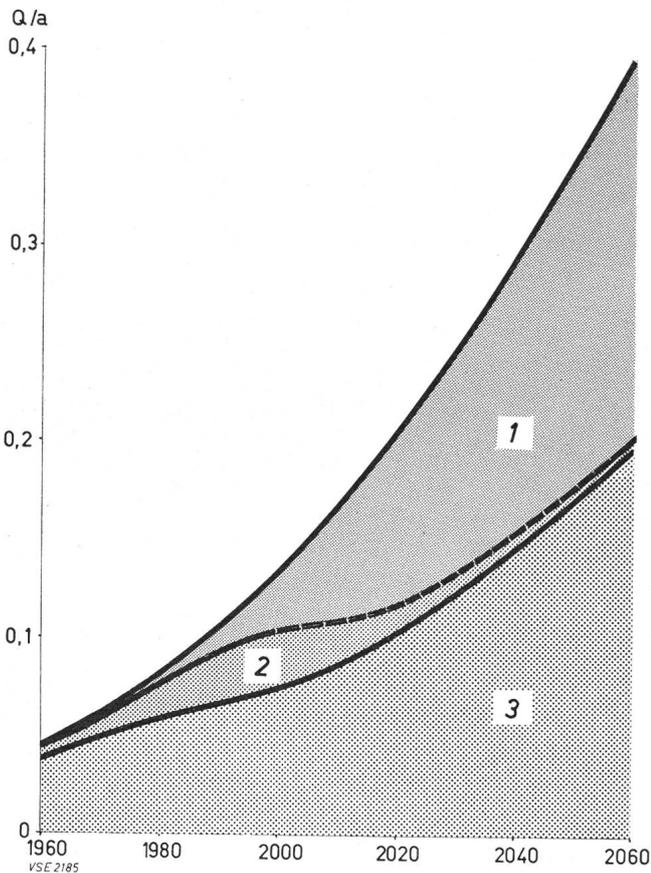


Fig. 11  
**Voraussichtlicher Brennstoffbedarf**  
 1 Kernbrennstoffe  
 2 fossile Brennstoffe  
 3 sonstiger Bedarf  
 in Kraftwerken

Brutrate kann der Kostenanteil des Energieträgers bis Null herabgehen.

Die Kernkraftwerke der ersten Bauperiode werden infolge ihrer höheren Baukosten vorwiegend zur Deckung der Grundlast eingesetzt. Da aber ihre spezifischen Errichtungskosten allmählich zurückgehen, liegt kein Grund vor, warum die Kernkraftwerke späterer Ausführung sich nicht auch zur Deckung der Mittel- und Spitzenlast beteiligen könnten.

### 5. Schlussfolgerungen

In der Zeitperiode 1965...75 wird sich der Brennstoffbedarf (einschliesslich Kernenergie) der amerikanischen Kraftwerke ungefähr verdoppeln. Diese Bedarfszunahme ist auf zwei Umstände zurückzuführen:

a) der rasche Anstieg des elektrischen Energieverbrauchs setzt sich ununterbrochen mit einer jährlichen Zuwachsrate von 7...8 % fort;

b) die Wasserkraften können mit dieser Bedarfszunahme nicht Schritt halten, weshalb der Anstieg des Energiebedarfs von den thermischen Kraftwerken aufgenommen werden muss. Dabei wird Kohle mit Kernenergie im Wettbewerb stehen, weil die Beteiligung von Gas nur mässig zunehmen wird, wogegen Öl als Kraftwerksbrennstoff an Bedeutung verlieren wird. Man erwartet, dass die schnellste Bedarfszunahme im Sektor der Kernenergie erfolgen wird, so dass nach 1980 Kernenergie die Bedarfszunahme der fossilen Brennstoffe schon merkbar verlangsamen wird. Der Anteil der

fossilen Brennstoffe in der Brennstoffbilanz der Kraftwerke wird zwischen 1966 und 1980 von rund 100 % voraussichtlich bis rund 70 % zurückgehen. Dabei soll der Anteil der Kohle 50 %, der Gasanteil 17 % und der Ölanteil 3 % betragen. Die beiden letztgenannten Brennstoffe werden teilweise von der Kernenergie, teilweise von der Kohle verdrängt werden. Kohle wird bis zum Ende des Jahrhunderts noch eine wichtige Energiequelle darstellen, so dass ihr absoluter Verbrauch bis dahin sogar zunehmen wird.

Die voraussehbare Entwicklung des Brennstoffbedarfs der USA ist in Fig. 11 dargestellt. Daraus sind zwei grundsätzliche Richtungen ersichtlich:

a) der Anteil der elektrischen Energie in der gesamten Energiebilanz wird sich beständig erhöhen und in der ersten Hälfte des kommenden Jahrhunderts rund 50 % des gesamten Brennstoffbedarfs betragen;

b) der absolute Verbrauch der fossilen Brennstoffe im Kraftwerksbetrieb wird bis zum Ende des Jahrhunderts noch zunehmen, wonach er aber allmählich zurückgehen wird. Selbstverständlich können die Auswirkungen der technischen Entwicklung auf eine so lange Zeitperiode nur ungefähr im voraus geschätzt werden.

Der Wettbewerb zwischen den verschiedenen Kraftwerksarten bringt die Verminderung der Energiepreise mit sich, wodurch der rasche Anstieg des Energieverbrauchs aufrechterhalten wird, weil für billige Energie immer neue Anwendungsgebiete hinzukommen.

### Literatur

- [1] *Cambel, A. B.*: Energy R & D and National Progress. An Interdepartmental Energy Study. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1966.
- [2] *Landsberg, H. H.* et al.: Resources in America's Future: Patterns of Requirements and Availabilities, 1960—2000. John Hopkins Press, Baltimore, Md., 1963.
- [3] *Dunsmore, L. C.*: Our Nuclear Future. Power Engineering, 71(1967), Nr 6, Pg. 48...51 and Nr 7, Pg. 62...64.
- [4] *National Power Survey*. A Report by the Federal Power Commission. Part I and II. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 1964.
- [5] *Dillard, J. K.; Baldwin, C. J.*: The Economic Development of Mine-Mouth Power Plants, EHV Transmission and Nuclear Generation in the United States. World Power Conference, Lausanne, 1964. Paper III — 78.
- [6] *Will Nuclear Depose King Coal?* Electrical World, 167(1967), Nr 16, Pg. 145...148.
- [7] *Dunn, S. F.*: Status of Coal. Power Engineering, 71(1967), Nr 6, Pg. 36...39.
- [8] *Status of Power Pools. Part 1 and 2*. Power Engineering, 71(1967), Nr 5, Pg. 63...65 and Nr 6, Pg. 58...61.
- [9] *Kroms, A.*: Wasserkraftwerke in Energiesystemen verschiedener Leistungsstruktur. ÖZE, 18(1965), Nr 10, S. 385...396.
- [10] *Holum, K.*: Electric Power Program of the Department of the Interior. Power Engineering, 66(1962), Nr 7, Pg. 41...43.
- [11] *Wilson, W. K.*: Army's Hydro Power Complex. Power Engineering, 66(1962), Nr 3, Pg. 37...40.
- [12] *Wessenauer, G. D.*: The Story of TVA-Multipurpose Development. Power Engineering, 67(1963), Nr 2, Pg. 43...46.
- [13] *Bellport, B. P.*: 12 600 MW-Units Planned for Grand Coulee Nr 3. Electrical World, 168(1967), Nr 2, Pg. 91...94.
- [14] *Sandhaus, S.; McLeod, N. B.*: Managing Your Nuclear Fuel. Part I. Nucleonics, 25(1967), Nr 3, Pg. 34...44.
- [15] *Starr, Ch.*: Chauncey Starr Looks at the U.S. National Reactor Program. Nucleonics, 25(1967), Nr 6, Pg. 46...51.
- [16] *Wright, J. H.*: Only Breeder Can Make Reactor Industry Viable. Electrical World, 167(1967), Nr 22, Pg. 45...47 and 121.
- [17] *Corey, G. R.*: U.S. Nuclear Power Strides Augur 150 000 MW by 1980. Electrical World, 167(1967), Nr 20, Pg. 82...85.
- [18] *Warren, F. H.; Steyn, J. J.*: Managing Your Nuclear Fuel. Part 2. Nucleonics, 25(1967), Nr 3, Pg. 34...44.
- [19] *What's Ahead for Nuclear Power?* 12th Annual Nuclear Report. Electrical World, 167(1967), Nr. 24, Pg. 91...114.

### Adresse des Autors:

A. Kroms, Dipl. Ing., 30, Rockland Avenue, Malden, Mass. 02148, USA.