Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 12

Artikel: Erschliessung der Wasserkräfte der USA

Autor: Kroms, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915428

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: 16.07.2025

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

Erschliessung der Wasserkräfte der USA

Von A. Kroms

1. Einführung

Die Rolle und die Aufgaben der Wasserkraftanlagen haben sich mit der Entwicklung der elektrischen Energieversorgung erheblich geändert. Die wichtigsten Änderungen sind:

a) Der Anteil der Wasserenergie in der elektrischen Energiebilanz hat sich während der letzten Jahrzehnte in den meisten Ländern schrittweise vermindert. Dies ist auf mehrere Ursachen – den raschen Anstieg des Energiebedarfs, die begrenzten Vorräte an Wasserenergie, die hohen Bauaufwendungen ihrer Erschliessung u. a. – zurückzuführen. Während der ersten Entwicklungsperiode der elektrischen Energieversorgung, vor 40...50 Jahren, lieferten die Wasserkräfte der Welt mehr als ein Drittel der elektrischen Energieausbeute dieser Zeitperiode. Seitdem ist aber die Beteiligung der Wasserenergie in der Elektroenergiebilanz bis rund 25 % zurückgegangen [1–7], weil der kostspielige Ausbau von Wasserkraftanlagen nicht imstande gewesen ist, mit dem stürmischen Anstieg des Energiebedarfs Schritt zu halten; die Energieerzeugung ist daher mehr und mehr von den thermischen Anlagen übernommen worden. In den industriell entwickelten Ländern sind auch die günstigsten und ergiebigsten Wasserenergiequellen schon erschlossen worden, so dass man allmählich zum Ausbau von weniger geeigneten, manchmal weit abseitsliegenden Wasserkräften greifen muss. Die vorhandenen Wasserkräfte würden aber sogar bei ihrem vollständigen Ausbau nicht in der Lage sein, den enormen Bedarfszuwachs an Energie allein decken zu können. Demzufolge müssen die Wasserkraftwerke mit den thermischen Kraftanlagen eng zusammenwirken und bei dieser Zusammenarbeit diejenigen Aufgaben der Lastdeckung aufnehmen, die von der Wasserenergie am besten erfüllt werden können.

b) Flüsse gehören zu den wichtigsten Naturschätzen, wobei ihre Gegebenheiten auf verschiedenem Wege genutzt werden können. Daher muss der Flussausbau sorgfältig geplant werden mit dem Ziel, die höchsten Gewinne für alle Zweige der Wasserwirtschaft – der Energieerzeugung, Schiffahrt, Bewässerung, Wasserbeschaffung u. a. – zu erreichen. In der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts, als die elektrische Energieversorgung ihren raschen Entwicklungslauf begann, wurden beim Flussausbau in erster Linie die Bedürfnisse der Energieerzeugung berücksichtigt, wogegen die Forderungen anderer Wassernutzer nicht selten vernachlässigt wurden. In späteren Jahrzehnten dagegen, gemäss dem allgemeinen Bestreben, die vorhandenen Naturschätze möglichst vollständig zu verwerten, sind auch die Ziele der Flussnutzung erweitert worden, wobei man alle Wasserwirtschaftszweige in Betracht zieht. Da man die Bedingungen verschiedener Wassernutzer öfter nicht aufeinander abstimmen kann, muss man sich mit Kompromisslösungen begnügen, welche die besten volkswirtschaftlichen Gewinne versprechen. Die Priorität wird dabei jenen Wassernutzern gegeben, welche nicht imstande sind, das Wasser durch ein anderes Naturelement zu ersetzen. Dies führt zum Entstehen von *Mehrzweckanlagen,* die einen wichtigen Platz in den Neubauten der Wasserkraftwerke erworben haben [5–7]. Weil der Wasserbedarf in allen Zweigen des menschlichen Lebens ununterbrochen zunimmt, müssen die vorhandenen Wasserquellen immer sparsamer verwertet werden. Diese Umstände komplizieren, verteuern und verlangsamen den Flussausbau; sie beeinflussen auch die Betriebsart und die Energieabgabe der betreffenden Wasserkraftanlagen.

c) Die Ausdehnung der Hochspannungsnetze und die Erweiterung der Erzeugung thermischer Energie, vor allem aber der Einsatz von Kernkraftwerken, verändern die Auslastung und dementsprechend die Auslegung der Wasserkraftanlagen, wobei sie immer mehr mit der Deckung der Spitzenlastzonen der Verbundnetze beauftragt werden.

Während der ersten Phase des Wasserkraftwerkbaus war die Lieferung billiger Energie das Hauptziel der hydraulischen Kraftanlagen; ihrer Beteiligung in der Leistungsbilanz der Energiesysteme wurde damals weniger Bedeutung zugemessen. Da die Baukosten der Wasserkraftwerke hoch sind, wurden die Anlagen vorwiegend für die Deckung der Grundlast ausgelegt; ihre relativ niedrig ausgewählte installierte Leistung genügte nicht dazu, um eine breite Zone der Spitzenlast aufnehmen zu können, sogar wenn der Energieinhalt der Wasserspeicher für diesen Zweck ausreichend wäre [8].

Die energetischen Aufgaben der Wasserkraftwerke haben sich bei ihrer Zusammenarbeit mit der rasch zunehmenden thermischen Leistung derart geändert, dass der Einsatz der hydraulischen Leistung zur Deckung der veränderlichen Tageslastzonen in den Vordergrund getreten ist. Man strebt danach, die Rolle der Wasserkraftanlagen in der Leistungsbilanz der Energiesysteme zu erhöhen, d. h. mit den vorhandenen Wasserenergievorräten eine möglichst breite Lastzone zu decken. Dies führt zur Auswahl höherer Maschinenleistungen nicht bloss in den Kraftwerkneubauten, sondern auch zur Erweiterung zahlreicher früher gebauter Anlagen mit dem Ziel, die älteren Anlagen den neuen Betriebsbedingungen anzupassen. Da eine gut koordinierte Ausnutzung ganzer Flußstrecken mittels der Kraftwerksketten die Möglichkeiten der hydraulischen Spitzendeckung wesentlich verbessert, kann in den neu zu erstellenden Anlagen eine relativ grössere Maschinenleistung als in den früher erstellten Werken gerechtfertigt werden.

Entscheidend bei der Spitzendeckung sind die Möglichkeiten der Wasserspeicherung. Da aber der Umfang der Wasserspeicher in den Aufstauräumen der Flusskraftwerke durch die topographischen Umstände beschränkt ist, sind die Wasservorräte vieler primärer Wasserkraftwerke für den reinen Spitzenbetrieb ungenügend. Diese Begrenzungen haben zur Entwicklung von Pumpspeicherwerken geführt [9–12]. Mit dem raschen Anstieg der Lastspitzen und der Ausdeh-

Wasserenergievorräte der USA — Tabelle I

	Anzahl der Staustellen	Leistung GW	Mögliche Jahresarbeit TWh	Anteil des Potentials %
Ausgebaut	1507	53,4	256	30
Unausgebaut	1463	125,2	444	70
Insgesamt	2970	178,6	700	100

Die Aufteilung der Kraftwerkleistung (%) Tabelle II

Kraftwerkstyp	1970	1980	1990
Wasserkraftwerke:			
Primäranlagen	15	10	7
Pumpspeicherwerke	1	4	6
	16	14	13
Wärmekraftwerke:			
Brennstoffanlagen	82	64	47
Kernkraftanlagen	2	22	40
	84	86	87
Insgesamt	100	100	100

nung der Energienetze sind die Vorteile der Pumpspeicherung überall erkannt worden, wodurch sich ihre Bedeutung im Sektor der hydraulischen Energieerzeugung während der letzten Jahrzehnte stark vergrössert hat. Die Pumpspeicherung stellt die zurzeit einzige technisch und wirtschaftlich annehmbare Methode der Großspeicherung der elektrischen Energie dar. Man erwartet, dass die hydraulische Leistung in den kommenden Jahren zum grössten Teil mittels der Pumpspeicherwerke erhöht werden wird, besonders weil in den industriell entwickelten Ländern nur begrenzte Möglichkeiten zur Erstellung neuer primärer Wasserkraftanlagen verblieben sind [13, 14].

2. Wasserkräfte der USA

Das ausbauwürdige Wasserkraftpotential der USA wird auf rund 180 GW, mit einer möglichen Jahresarbeit von 700 TWh, geschätzt; dieses Arbeitsvermögen beträgt rund 40 % der gegenwärtigen Energieausbeute aller Kraftwerke der USA. Der angegebene Leistungswert der hydraulischen Energie entspricht einer mittleren Benutzungsdauer von rund 4000 h/a; da aber in den Wasserkraftwerken letztlich eine immer grössere Leistung zur Spitzendeckung untergebracht wird, die für eine weit geringere Auslastung bestimmt ist, kann die installierte hydraulische Leistung erheblich höhere Werte annehmen. Der Ausbaugrad des Wasserkraftpotentials, nach dem Stand vom 1. Januar 1972, ist in Tabelle I angegeben [11].

Die Aufteilung der Wasserkräfte auf die einzelnen Gebiete und die Ausmasse ihrer Erschliessung sind in Fig. 1 dargestellt. Die wichtigsten Wasserenergiequellen sind im gebirgigen Westen des Landes, einschliesslich Alaska, konzentriert, wobei das sich im Nordwesten befindende Columbia-Flußsystem diesbezüglich die führende Stelle einnimmt [12]. Da die industrielle Entwicklung im Westen später als im Osten begann, ist ein beträchtlicher Teil der Wasserkräfte der westlichen Gebiete noch nicht erschlossen; so liegen z. B. die reichlichen Wasserenergiequellen Alaskas vorläufig vollständig brach.

Bei der Bewertung der potentiellen Wasserenergiequellen und ihres möglichen Ausbaus muss man beachten, dass die Ausbauwürdigkeit der Wasserkräfte nur ungefähr geschätzt werden kann, wobei diese Schätzung sich mit der Zeit je nach dem Stand der Energietechnik, den wirtschaftlichen Umständen und den Lastverhältnissen erheblich verändert. Der Flussausbau wird letztlich in einem zunehmenden Masse auch von den Forderungen des Umweltschutzes beeinflusst. Einige Projekte des Wasserkraftbaus wurden infolge der Einwände der Naturschutzorganisationen um mehrere Jahre verzögert, mehrfach umgeändert oder völlig aufgegeben, so dass man damit zu rechnen hat, dass einige Flußstrecken für immer unausgebaut bleiben werden.

Die Wasserenergie hat die Entwicklung der elektrischen Energieversorgung der USA erheblich beeinflusst. Während der ersten Hälfte des Jahrhunderts betrug der Anteil der Wasserenergie in der Elektroenergiebilanz der amerikanischen EVU >30 %. In späteren Jahren ist die relative Rolle der Wasserenergie zurückgegangen, weil der Wasserkraftbau nicht imstande gewesen ist, mit dem stürmischen Anstieg des Energiebedarfs, der sich alle 10 Jahre verdoppelte, Schritt zu halten, so dass die Erzeugung thermischer Energie mehr und mehr in den Vordergrund getreten ist. Dieser Prozess wird

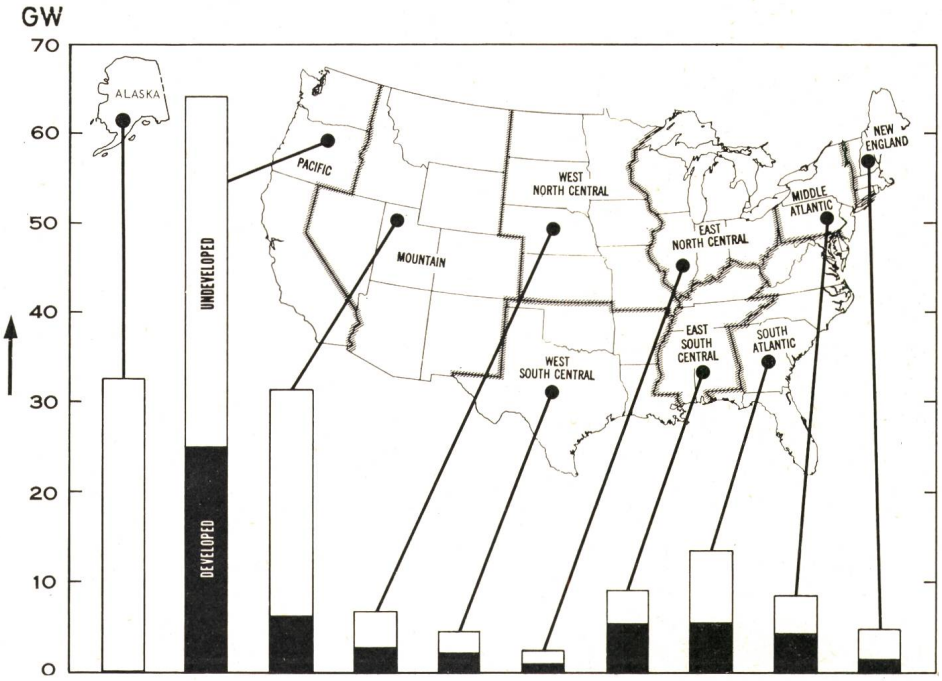


Fig. 1
Das Wasserkraftpotential der USA
Die Kolonnen zeigen die 6monatige Wasserkraftleistung:
die schwarzen Kolonnen zeigen die erschlossene Leistung (Januar 1972),
die weissen Kolonnen zeigen die nicht erschlossene Leistung.

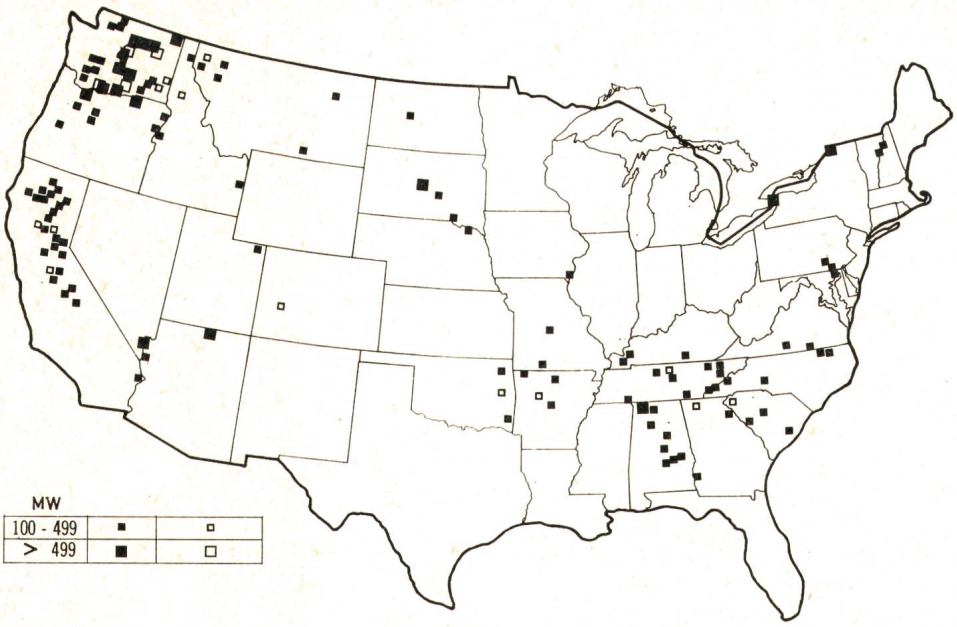


Fig. 2
Wasserkraftanlagen mit Leistungen über 300 MW (Januar 1972)
Die schwarzen Rechtecke zeigen Werke im Betrieb, die weissen Rechtecke zeigen Werke im Bau. Die Pumpspeicherwerke sind nicht eingezeichnet

sich voraussichtlich auch in den kommenden Jahren fortsetzen (Tabelle II) [13].

Man schätzt, dass der Anteil der primären Wasserkraftwerke in der Leistungsbilanz der Kraftwerke während der Zeitspanne 1970...1990 von 15 % bis 7 % zurückgehen, wogegen die Rolle der Pumpspeicherwerke beträchtlich zunehmen wird. Trotz dem prozentuellen Rückgang wird die primäre Wasserkraftleistung im Laufe der kommenden 20 Jahre um rund 60 % zunehmen. Die Schätzungen der Federal Power Commission (FPC) sind in Tabelle III wiedergegeben [13].

Bemerkenswert ist die Erwartung eines besonders raschen Leistungsanstiegs der Pumpspeicherwerke, welche zur Aufnahme der Tageslastspitzen in einem beschleunigten Tempo erstellt werden.

Fig. 2 zeigt die territoriale Aufteilung der Wasserkraftanlagen, welche Ende 1970 sich im Betrieb oder im Bau befanden [13]. Man sieht die dichte Leistungskonzentration im Nordwesten, im Columbia-Fluss-Gebiet, wobei der Bau von Wasserkraftanlagen in diesem Gebiet noch rege fortgesetzt wird. Die Baupläne des Flussausbaus, die bis zum Jahre 1990 reichen, sind in Fig. 3 dargestellt; auch hier kommt die dominierende Rolle des Columbia-Flusses klar zum Vorschein.

Das Tempo des Wasserkraftbaus während der zwei vergangenen Jahrzehnte war wie folgt:

Jahr	Installierte Leistung	Ausbaugrad
1953	21,4 GW	12 %
1972	53,4 GW	30 %

Im Laufe von 20 Jahren hat also die Leistung der hydraulischen Kraftanlagen 2,5mal zugenommen, dem ein durchschnittlicher 10-Jahres-Zuwachsfaktor von $k_{10} = \sqrt{2{,}5} = 1{,}6$ entspricht. Die von der FPC geschätzte Entwicklung der primären Wasserkraftwerke für die zwei kommenden Jahrzehnte ergibt folgende Zuwachsfaktoren:

1970...80 $k_{10} = 1{,}30$
1980...90 $k_{10} = 1{,}20$

Da diese Zuwachsraten niedriger als der voraussehbare Anstieg des Energiebedarfs sind, wird die Lastzunahme in der Zukunft in erster Linie von den thermischen Anlagen, vor allem von den Kernkraftwerken, übernommen werden.

Da die Wasserkraftwerke grosse Investitionen erfordern, ihre Erstellung lange dauert und die Wasserbauten für mehrere Wasserwirtschaftszweige dienen, muss der Flussausbau auf einer breiten nationalwirtschaftlichen Grundlage geplant werden. Die Federal Power Commission wertet die Bauprojekte aus und erteilt die Lizenzen. Erhebliche Versäumungen beim Flussausbau können von den strikten Verordnungen des Umweltschutzes verursacht werden.

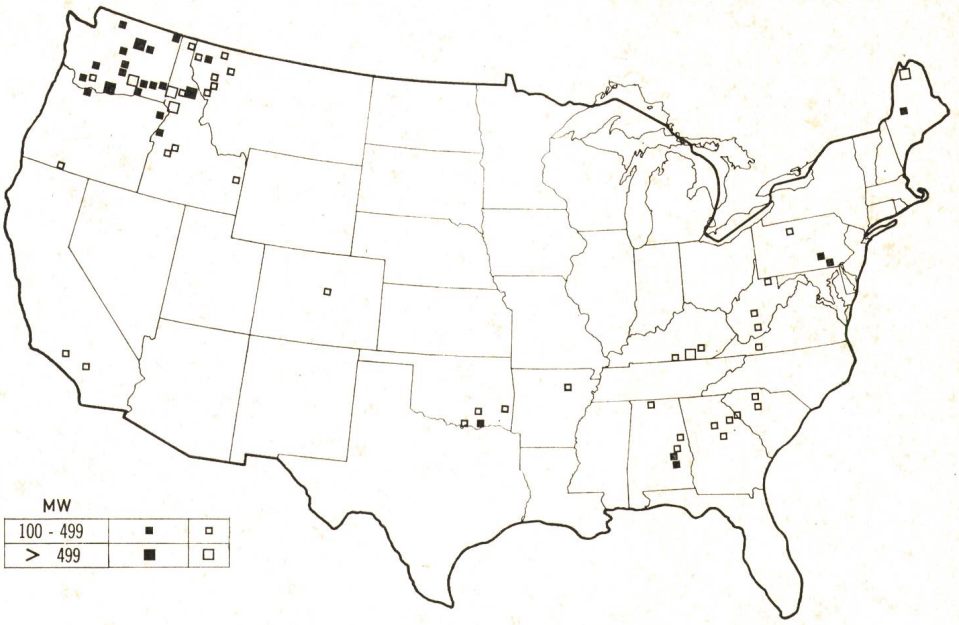
Am 1. Januar 1972 befanden sich konventionelle Wasserkraftwerke für eine Leistung von 7,8 GW im Bau, wobei ein erheblicher Anteil dieser Leistung für die Erweiterungen der bestehenden Anlagen vorgesehen war. Man wertet, dass während der Zeitperiode 1970...1990 die Leistung der primären Wasserkraftwerke sich um 30...35 GW vergrössern wird; dabei wird diese Leistung zum überwiegenden Teil in Grossanlagen untergebracht werden. Da die veralteten Kleinanlagen allmählich abgestellt werden, geht die Anzahl der aktiven Wasserkraftanlagen beständig zurück. So hat sich in den Jahren 1968...1972 die Anlagezahl von 1560...1500 vermindert, obwohl die Wasserkraftleistung im Laufe dieser Zeitperiode um 7,6 GW anstieg. Die zunehmende Bedeutung der Grossanlagen ist in Tabelle IV angegeben [11].

Man schätzt, dass die Leistung dieser Grosskraftwerkgruppe rund 60 GW erreichen kann. Anfang 1972 befanden sich 7,6 GW in den Grosskraftwerken im Bau, wobei 4,7 GW oder 67 % dieser Leistung in den Erweiterungen von nur drei bestehenden Werken installiert wurden; dies zeigt die Tendenz der Leistungskonzentration im Wasserkraftbau deutlich an.

Anstieg der hydraulischen Leistung — Tabelle III

Kraftwerkart	1970 GW	%	1980 GW	%	1990 GW	%
Primäre Wasserkraftwerke	52	93	68	72	82	54
Pumpspeicherwerke	4	7	27	28	71	46
Insgesamt	56	100	95	100	153	100

Fig. 3
Die bis 1990 geplante primäre Wasserkraftleistung (ohne Pumpspeicherwerke)
Die schwarzen Rechtecke zeigen die Erweiterungen, die weissen Rechtecke zeigen die neuen Anlagen.



Die Gruppe der Grosskraftwerke enthält 12 Werke, deren Endleistungen laut dem geplanten Endausbau 1000 MW übersteigen werden (Tabelle V) [11].

Von den 12 in der Tabelle V angegebenen Grosskraftwerken befinden sich 10 Werke im Columbia-Fluss-System. Die Kraftwerksketten dieses Flussgebietes (mit einer installierten Gesamtleistung von mehr als 13 GW) sind in Fig. 4 dargestellt [13]; man plant, durch die Erweiterungen der bestehenden Anlagen wie auch durch einige Neubauten die Leistung dieses Wasserkraftsystems auf rund 25 GW zu bringen, d. h. ungefähr zu verdoppeln. Da das Interesse der Energieversorgung sich auf die grossen Wasserkraftanlagen konzentriert, ist damit zu rechnen, dass kleinere Wasserenergiequellen sowohl in diesem als auch in anderen Flußsystemen für immer unausgebaut bleiben werden.

Die Errichtung leistungsfähiger Hochspannungsnetze ermöglicht es, Wasserenergie aus ihren standortgebundenen Quellen den weitentfernten Schwerpunkten der Energieabnahme zuzuleiten. Ein Beispiel hierüber ist die Fernverbindung längs der Westküste, welche das Columbia-Fluss-System mit den Verbrauchszentren Südkaliforniens über eine Entfernung von mehr als 2000 km verbindet (Fig. 5) [5]. Wenn man die Kraftwerkgruppen einzelner, zumal weit entfernt liegender Flußsysteme verbindet, dann ist es möglich, den Speicherbetrieb so zu koordinieren, dass die verfügbare Wasserkraftleistung ausgeglichen und die Wasserverluste vermindert werden.

Das Dargebot an Wasserenergie könnte in den USA aus zwei zusätzlichen Quellen – den Wasserkräften Alaskas und Kanadas – ergänzt werden.

Alaska verfügt über reichliche Wasserkräfte mit einer möglichen Jahresarbeit von 170 TWh (s. Fig. 1) [15]; dieser Energievorrat macht rund 25 % des gesamten Wasserkraftpotentials der USA aus. Vorläufig sind diese Wasserenergiequellen fast gar nicht erschlossen. Der hohen Leistungskonzentration wegen könnten hier aber einige Grosskraftwerke errichtet werden; so ist, z. B., auf dem Yukon-Fluss, beim Rampert Canyon, eine günstige Baustelle vorhanden, wo ein Werk für ≧5 GW errichtet werden kann, wobei dadurch ein

Die Grosskraftwerke (für ≧ 100 MW) — Tabelle IV

Jahr	Anzahl der Anlagen	% der Gesamtanzahl	Leistung GW	% der Gesamtleistung	Durchschnittliche Einheitsleistung MW
1960	85	5,0	19,5	61	230
1972	129	8,6	38,6	72	300

Wasserkraftwerke für 1000 MW (Januar 1972) — Tabelle V

Kraftwerk	Fluss	Besitzer	Leistung, MW im Betrieb	im Bau	Endleistung
Grand Coulee	Columbia	Bureau of Reclamation	2100	3600	5870 [1])
John Day	Columbia	Corps of Engineers	2160	–	2700
Cheif Joseph	Columbia	Corps of Engineers	1024	–	2069
R. Moses	Niagara	Power Authority, N.Y.	1954	–	1954
The Dalles	Columbia	Corps of Engineers	1119	688	1807
McNary	Columbia	Corps of Engineers	980	–	1400
Hoover	Colorado	Bureau of Reclamation	1340	–	1340
Wanapum	Columbia	Grant County PUD2	831	–	1330
Priest Rapids	Columbia	Grant County PUD2	788	–	1262
Rocky Reach	Columbia	Chelan County PUD1	1213	–	1213
Dworshak	N.Fk. Clearwater	Corps of Engineers	0	400	1060
Bonneville	Columbia	Corps of Engineers	518	–	1016
Insgesamt			14027	4688	23015

[1]) Nach einer späteren Erweiterung kann 9,4 GW erreicht werden.

Wasserspeicher mit einem Inhalt von 150 Gm³ entstehen würde. Der Ausbau dieser günstigen Wasserkräfte ist dadurch behindert worden, dass sie weit abseits der Energieverbrauchszentren liegen. Die Entfernung bis zum Columbia-Kraftwerksystem beträgt >2000 km, wobei die Fernleitungen über das kanadische Territorium führen und ein schwieriges Bergland überqueren müssten. Man kann aber erwarten, dass die Ausbeutung der neuentdeckten Ölfelder den Ausbau dieser Wasserenergiequellen fördern wird.

Die Wasserenergiequellen *Kanadas* sind bisher nur teilweise erschlossen worden [16–20]. Die sechsmonatige Leistung der ausbauwürdigen Wasserkräfte wird hier auf rund 70 GW geschätzt, wobei aber mehrere ergiebige Energiequellen sich in nördlichen Gebieten befinden, wo Bauarbeiten kostspielig sind und die Energieübertragung bis zu den südlich liegenden Verbrauchszentren teure Hochspannungslinien benötigt. Man hat vor einigen Jahren beabsichtigt, diese Wasserkräfte mit finanzieller Hilfe der USA auszubauen und die Wasserenergie zeitweilig den Energiesystemen der USA abzugeben [15]. Da aber die sich rasch entwickelnde Wirtschaft Kanadas selbst immer grössere Energiemengen benötigt, sind hier keine Energieüberschüsse zum Export mehr vorhanden, so dass Kanada sich selbst in einem zunehmenden Masse der thermischen Energieerzeugung zuwenden muss. Die Hochspannungsverbindungen über die Grenze USA–Kanada dienen daher vorwiegend zum Leistungsaustausch und zur Reserve, wogegen eine einseitige Energieabgabe nur in einem sehr mässigen Umfang erfolgt. Die Elektrizitätswirtschaft der USA kann also keine wesentliche Unterstützung von den nördlich liegenden Wasserenergiequellen erwarten. Man ist daher gezwungen, die einheimischen Wasserkräfte weiter auszubauen und zweckmässig in die kombinierte thermisch-hydraulische Energieversorgung einzugliedern.

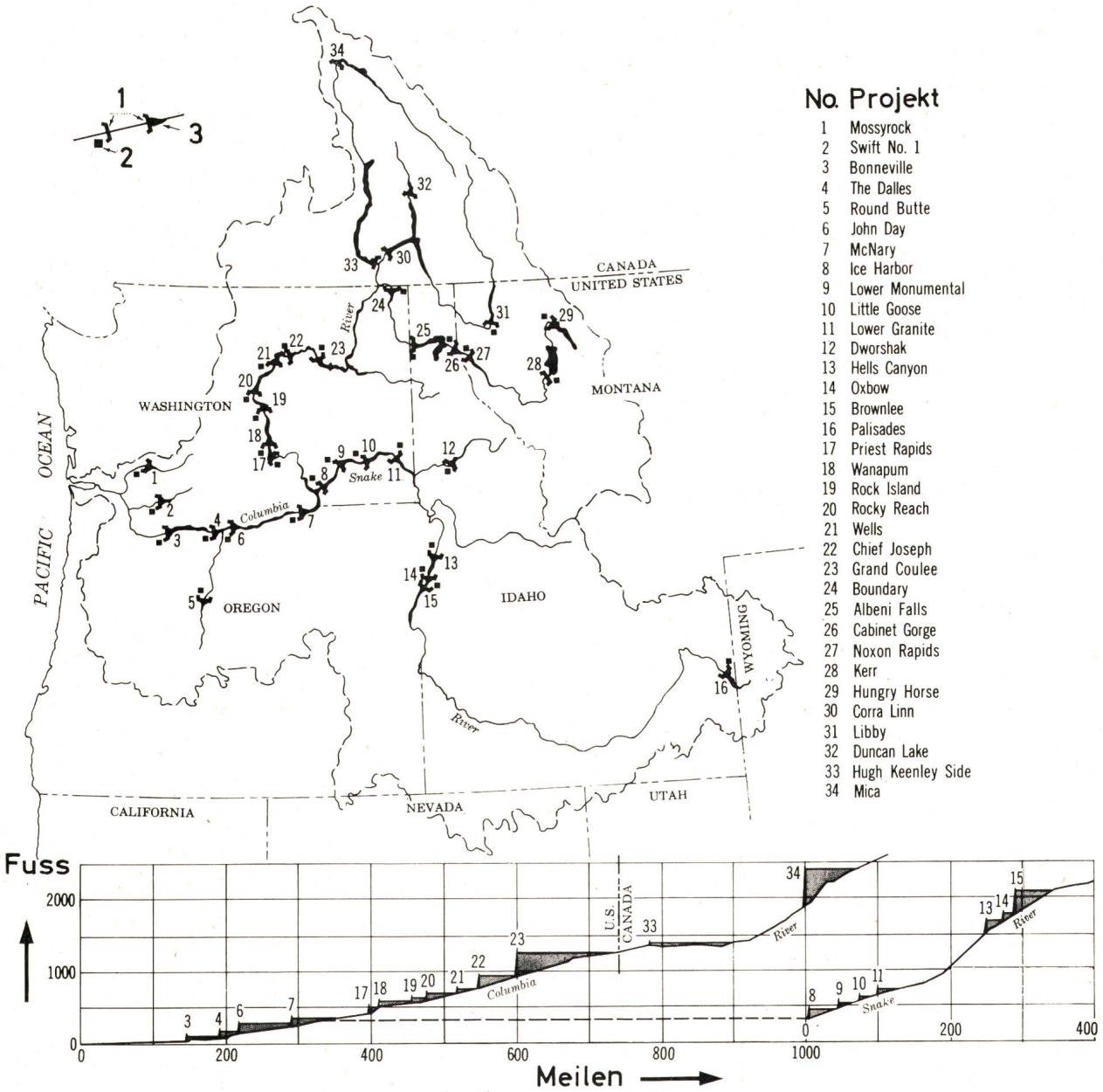


Fig. 4 Die Kraftwerksketten des Columbia-Flußsystems
Oben der Lageplan, *unten* die Gefällstufen.
(1 Meile ≙ 1,6 km; 1 Fuss ≙ 0,30 m)
1 Staudamm *2* Kraftwerk *3* Staubecken

3. Der Flussausbau

Die Auslegung und der Betrieb der Wasserkraftwerke wird von den Eigenschaften ihrer Energiequelle auf verschiedenem Wege beeinflusst. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind [6, 21]:

a) Der Ausbau der Wasserkräfte ist mit hohen Kapitalinvestitionen und langen Bauzeiten verknüpft.

b) Die Wasserkraftwerke sind standortgebundene Anlagen mit einem von der Natur bedingten Energiedargebot, welches in einem nur beschränkten Masse geregelt und den Lastforderungen angepasst werden kann.

c) Der Flussausbau ist mit anderen Zweigen der Wasserwirtschaft – der Schiffahrt, der Bewässerung u. a. – eng verbunden; bei einer allseitigen Flussausnutzung müssen die Bedürfnisse aller Wassernutzer in Kauf genommen werden.

Die meisten in den früheren Jahren gebauten Wasserkraftwerke sind als Einzweckanlagen errichtet worden mit der einzigen Aufgabe, billige elektrische Energie zu liefern. In späteren Bauperioden wurden die Aufgaben der Wasserbauten allmählich erweitert mit der Absicht, sie nicht bloss für die Energieerzeugung, sondern auch für die anderen Zwecke der Wassernutzung einzusetzen. Der überwiegende Teil der neu zu errichtenden Wasserkraftanlagen gehört daher zur Gruppe der Mehrzweckanlagen, welche mehr oder weniger die Forderungen erfüllen, die von einer vollständigen Flussausnutzung gestellt werden.

Der Kongress der USA hat die Grundsätze der Flussnutzung durch mehrere Gesetze dargelegt. Die Bauprojekte innerhalb eines jeden Flußsystems müssen miteinander so koordiniert werden, dass sie die besten wirtschaftlichen Ergebnisse aus der Flussverwertung ergeben können. Deshalb müssen die Bauprojekte Rücksicht nicht nur auf die Energieversorgung, sondern auch auf die Schiffahrt, die Wasserversorgung, den Hochwasserschutz u. a. nehmen. Durch die Kostenaufteilung auf mehrere Wirtschaftszweige sind die Mehrzweckanlagen in der Lage, Energie billiger als die Einzweckanlagen zu liefern.

Der Bau von Mehrzweckanlagen hat die Beteiligung der Regierung an der Flussausnutzung vergrössert, besonders weil diese Anlagen solche Wasserwirtschaftszweige bedienen sollen, welche keine unmittelbaren Erträge bringen; hierher gehört die Flutabwendung, die eine zunehmende Bedeutung in den dichtbesiedelten Flusstälern erwirbt. Die Mitwirkung der USA-Regierung am Flussausbau wurde nach dem Jahre 1930 durch die wirtschaftliche Krise und die dadurch verursachte Arbeitslosigkeit eingeleitet. So wurde im Jahre 1933 die «Tennessee Valley Authority (TVA)» gegründet, welche das weltbekannte Musterprojekt der allseitigen Flussnutzung durchgeführt und seine Zweckmässigkeit überzeugend bewiesen hat. Gemäss diesem erfolgreichen Beispiel ist in späteren Bauvorhaben jedes Projekt der Wassernutzung in einem Rahmenplan des Flußsystems eingeordnet worden, um die volkswirtschaftlich günstigste Ausnutzung des ganzen Stromsystems erzielen zu können.

Wasserkraftleistung der staatlichen Behörden[1]) Tabelle VI

Behörde	Installierte Leistung, GW im Betrieb	im Bau	geplant	insgesamt
Corps of Engineers	13,03	3,89	8,41	25,33
Bureau of Reclamation	7,81	4,15	0,62	12,58
TVA	3,14	1,57	0,01	4,72
Andere Behörden	0,08	–	0,08	0,16
Insgesamt	24,06	9,61	9,12	42,79

[1]) Stand 1. 1. 1972 einschliesslich Pumpspeicherwerke.

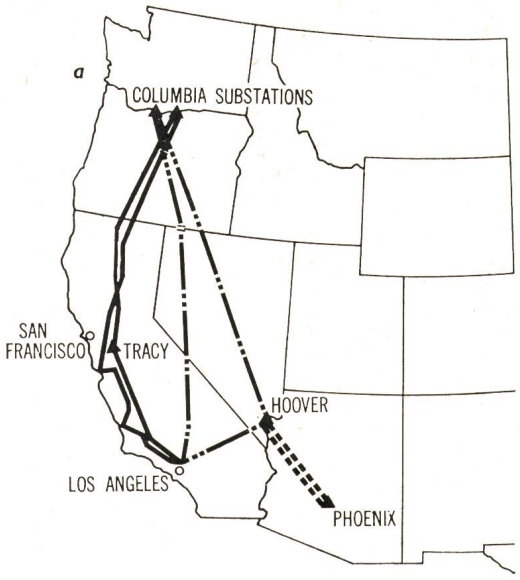


Fig. 5 Fernübertragungen längs der Westküste, vom Columbia-Flußsystem nach Südkalifornien

- - - - - - 345-kV-Wechselstromleitungen
——— 500-kV-Gleichstromleitungen
—·—·— 750-kV-Gleichstromleitungen

Im Ausbau von Mehrzweckanlagen haben sich drei staatliche Behörden – Corps of Engineers, Bureau of Reclamation und TVA – massgebend beteiligt (Tabelle VI) [11].

Die Leistung der Wasserkraftanlagen, die von den staatlichen Behörden erstellt worden sind, beträgt 45 % der hydraulischen Gesamtleistung. Corps of Engineers hat grosse Werke im Westen, in den Flussgebieten von Columbia, Colorado und Missouri, errichtet. In den wasserarmen westlichen Gebieten wird neben der Energieerzeugung eine hohe Priorität auch den anderen Wasserbedürfnissen – der Bewässerung und der Wasserversorgung – gegeben. Bureau of Reclamation hat ebenfalls einige grosse Wasserkraftwerke, darunter die zwei bekanntesten Grosswerke – Grand Coulee und Hoover –, erstellt.

Zwei Flußsysteme – Tennessee und Columbia – nehmen eine besondere Stellung in der Wasserkraftausnutzung der USA ein; sie sind hervorragende Beispiele einer allseitigen Flussausnutzung. Der Ausbau des Tennessee-Flußsystems ist fast abgeschlossen, wogegen im Columbia-System die Bauarbeiten noch fortgesetzt werden, wobei die Erweiterung einer Reihe der früher erstellten Anlagen hier die führende Rolle erworben hat.

Der *Tennessee* ist der viertgrösste Fluss der USA; er liegt im östlichen Teil des Landes. Vor der Errichtung von Staudämmen wurden von der sehr ungleichmässigen Wasserführung des Flusses schwere Hochwasserschäden im Flusstal verursacht; der Fluss war auch für die Schiffahrt ungeeignet. Zur Verbesserung der Lebensbedingungen in diesem damals rückständigen Gebiet gründete die USA-Regierung im Jahre 1933 eine Behörde «Tennessee Valley Authority», welche die Lebensverhältnisse in diesem ausgedehnten Gebiet grundlegend verändert hat [7, 13, 22, 23]. Die TVA hat das

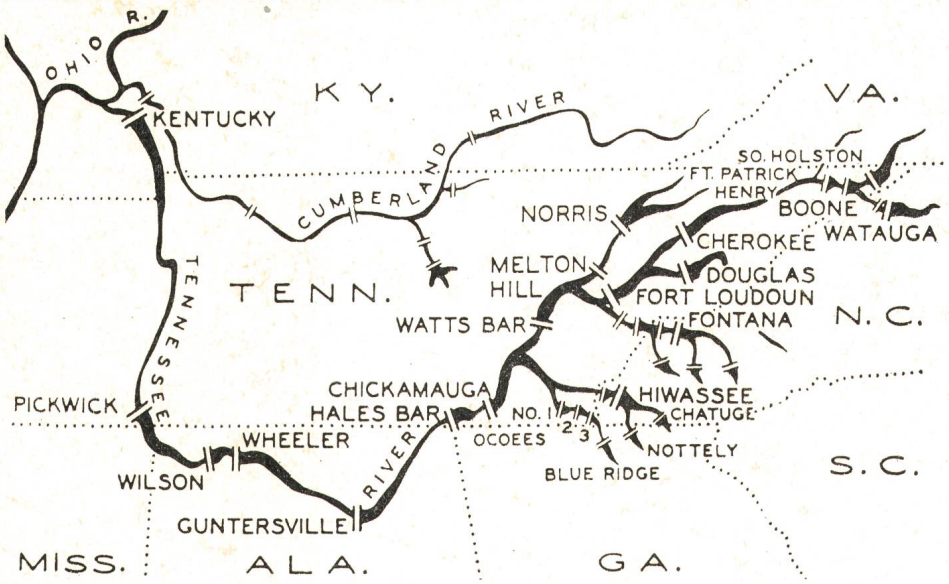


Fig. 6
Die Staustufen des Tennessee-Flußsystems
Die meisten Staustufen sind Mehrzweckanlagen für Energieerzeugung, Schiffahrt und Flutabwendung.

ganze Flußsystem zur Energieerzeugung, zur Schiffahrt und zum Hochwasserschutz ausgebaut. Zu diesem Zweck sind 30 Staudämme mit erheblichen Wasserspeichern und mit Wasserkraftwerken für eine Gesamtleistung von 3,2 GW errichtet worden (Fig. 6); dadurch ist der Fluss auf eine Länge von 1000 km schiffbar gemacht worden. Da die Wasserenergiequellen des TVA-Systems fast vollständig erschlossen worden sind, wobei aber die verfügbare Wasserenergie zur Dekkung des beständig ansteigenden Energiebedarfs bei weitem nicht genügt, wird die TVA gezwungen sein, auch grosse thermische Kraftwerke zu errichten, welche zurzeit rund 80 % des Energiebedarfs des Versorgungsgebiets aufnehmen. Wenn auch dadurch die Rolle der Wasserenergie erheblich zurückgegangen ist, erfüllen doch die Wasserkraftwerke wichtige Aufgaben in der Leistungsbilanz des Systems, indem sie die Schwankungen der Tageslast aufnehmen. Um eine zusätzliche Spitzenleistung zu erhalten, wird im TVA-System ein Pumpspeicherwerk für $4 \times 382{,}5 = 1530$ MW errichtet [9].

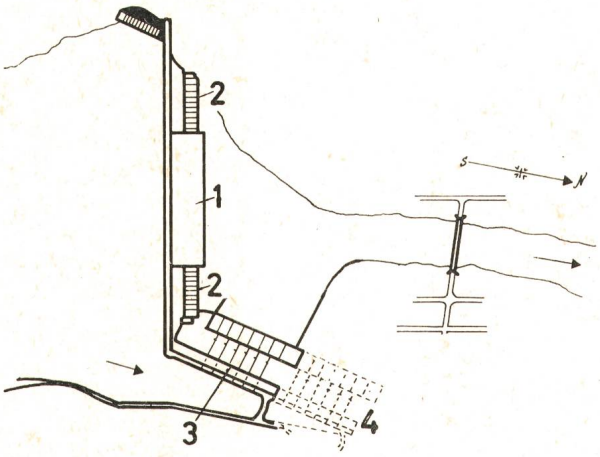


Fig. 7 Lageplan des Grand-Coulee-Kraftwerks
1 der bestehende Staudamm
2 die bestehenden Maschinenanlagen (für etwa 2 GW)
3 die erste Erweiterungsstufe, im Bau (für ≥ 3,6 GW)
4 die zweite Erweiterungsstufe, in Planung (für ≥ 3,6 GW)

Die grössten Wasserenergiequellen der USA befinden sich im Nordwesten, im *Columbia-Flußsystem,* dessen Energiepotential auf 240 TWh/a bewertet wird (s. Fig. 1). Das Einzugsgebiet des Flußsystems beträgt 67 000 km², wovon 15 % (am Oberlauf des Flusses) in Kanada liegen. Die Abflussmenge des Flusses schwankt zwischen 1200 und 35 000 m³/s, wobei die niedrigste Wasserführung im Winter, die höchste im Frühsommer eintritt. Das stark schwankende Wasserdargebot erfordert grosse Wasserspeicher, um Hochwasserschäden abwenden und die verfügbare Leistung der Kraftwerke regeln zu können. Die meisten hier errichteten Staustufen erfüllen demzufolge mehrere Aufgaben, indem sie der Energieerzeugung, Bewässerung, Schiffahrt und der Flutabwendung dienen.

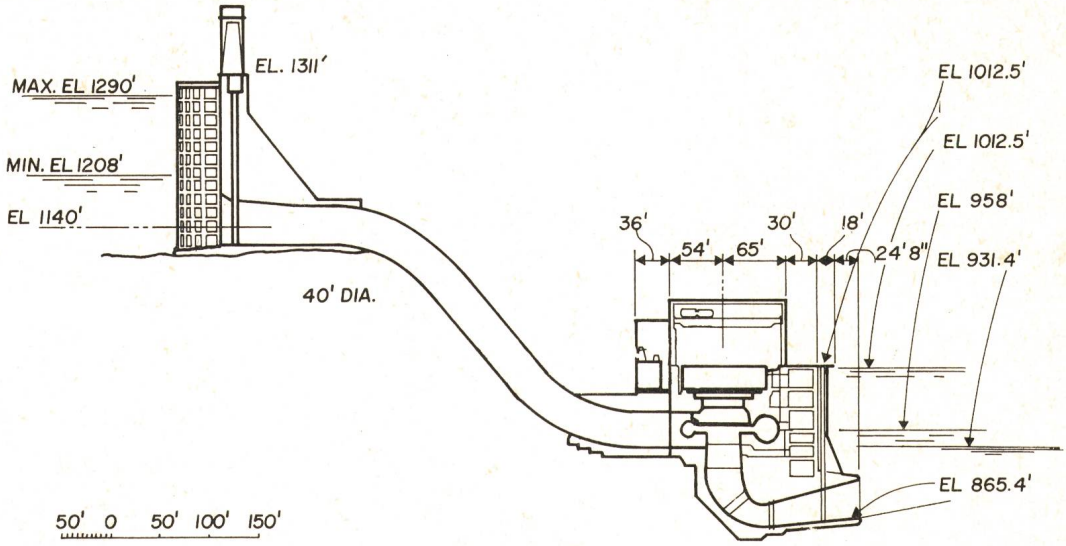
Die Gesamtleistung der Wasserkraftwerke des Columbia-Systems wird nach der Vollendung der sich zurzeit im Bau befindenden Erweiterungen rund 20 GW betragen; sie wird imstande sein, jährlich 80...100 TWh zu erzeugen. Hier befinden sich mehrere Grosskraftwerke mit Leistungen von > 1000 MW (s. Tabelle V und Fig. 4). Das grösste Werk darunter ist das Grand-Coulee-Kraftwerk mit einer installierten Leistung von rund 2 GW. Dieses Werk wird zurzeit erweitert mit 6 Aggregaten für je ≧ 600 MW, wodurch die Leistung des Werks auf 5,7 GW gebracht werden wird (Fig. 7 und 8) [24, 25]. Nach einer geplanten späteren Erweiterung für 3,6...4 GW wird die Endleistung des Grand-Coulee-Kraftwerkes 9,3...9,7 GW erreichen. Diese zusätzliche Leistung wird zur Aufnahme der unterbrochenen Tageslastzonen dienen.

Da auf dem Columbia-Hauptfluss keine Baustellen zur Errichtung neuer Kraftwerke mehr verblieben sind, treten hier folgende Bauarbeiten in den Vordergrund:

a) die Erweiterung der bestehenden Kraftwerke;
b) die Erstellung von Staudämmen auf den Nebenflüssen;
c) der Ausbau des Oberlaufs im kanadischen Territorium.

Zum wirkungsvollen Ausbau des Columbia-Flußsystems müssen die USA und Kanada zusammenwirken. Vor kurzem war der in Kanada liegende Oberlauf des Flusses gar nicht erschlossen. Staudämme in diesem Gebirgsgebiet können

Fig. 8
Die Anordnung der 600-MW-Wasserkraftaggregate im Grand-Coulee-Kraftwerk
Die Abmessungen in Fuss (1 Fuss ≙0,30 m)



aber nicht bloss neue Energieerzeugungsanlagen schaffen, sondern auch den Wasserabfluss ausgleichen, die Energieausbeute der ganzen abwärtsliegenden Kraftwerkskette erhöhen und die Hochwasserschäden herabsetzen. Letzthin hat Kanada (Provinz British Columbia) auf dem Oberlauf einige Staudämme errichtet, an denen Wasserkraftwerke für eine Gesamtleistung von rund 5,4 GW erstellt und geplant werden [26, 27]. Dies wird die Wirksamkeit dieses wasserreichen Flußsystems beträchtlich verbessern.

4. Pumpspeicherung

Die beständige Lastzunahme und die Ausdehnung der Netzsysteme vergrössern das Bedürfnis nach einer wirtschaftlich günstigen Spitzenleistung. Zur Spitzendeckung sind die hydraulischen Anlagen besonders geeignet, falls sie nur eine genügende Speicherungsmöglichkeit besitzen.

Die primären Wasserkraftwerke der USA sind nicht imstande, die nötige Spitzenleistung allein bereitzustellen. Da ausserdem zur Errichtung von neuen primären Wasserkraftwerken nur noch wenige Möglichkeiten vorhanden sind, wird die hydraulische Leistung in kommenden Jahren in erster Linie durch die Erstellung von sekundären hydraulischen Anlagen – den Pumpspeicherwerken – zunehmen. Pumpspeicherwerke können erfolgreich zur Spitzendeckung beitragen, falls günstig gelegene Baustellen (mit genügend hohen Nutzgefällen und den Möglichkeiten einer ausreichenden Wasserspeicherung) vorhanden sind. Um die Übertragungskosten gering zu halten, müssen die Pumpspeicherwerke möglichst nahe an den Quellen der Pumpenergie und bei den Abnehmern der Spitzenenergie liegen. Die Voraussetzungen für die Anwendung der Pumpspeicherung sind:

a) hohe Tageslastspitzen beim Mangel anderer Spitzenwerke – primärer Wasserkraftwerke (Speicherwerke) u. a.;

b) geeignete topographische Verhältnisse – grosse Fallhöhen, genügende Speicherbecken;

c) Verfügbarkeit an billiger Pumpenergie (aus Kernkraftwerken) und leistungsfähiger Netze zur Übertragung grosser Spitzenleistungen.

Die ansteigenden Lastspitzen, die Erschöpfung der ausbauwürdigen Wasserkräfte, der Ausbau von Hochspannungsnetzen und die Ausrüstung der thermischen Kraftwerke mit Grossaggregaten, die für eine zyklische Belastung wenig geeignet sind, haben das Interesse der amerikanischen Energieversorgung der Pumpspeicherung zugewandt. Für die Pumpspeicherwerke sind hier zahlreiche geeignete Baustellen vorhanden (Fig. 9) [13]. Die meisten Anlagen werden in den östlichen Gebieten errichtet und geplant, wo ein grosser Bedarf an Spitzenleistung besteht (Tabelle VII).

Die Pumpspeicherleistung (Ende 1970) Tabelle VII

	im Betrieb	im Bau
Im östlichen Teil	2000 MW oder 54%	6300 MW oder 86%
Im westlichen Teil	1690 MW oder 46%	1000 MW oder 14%
Insgesamt	3690 MW oder 100%	7300 MW oder 199%

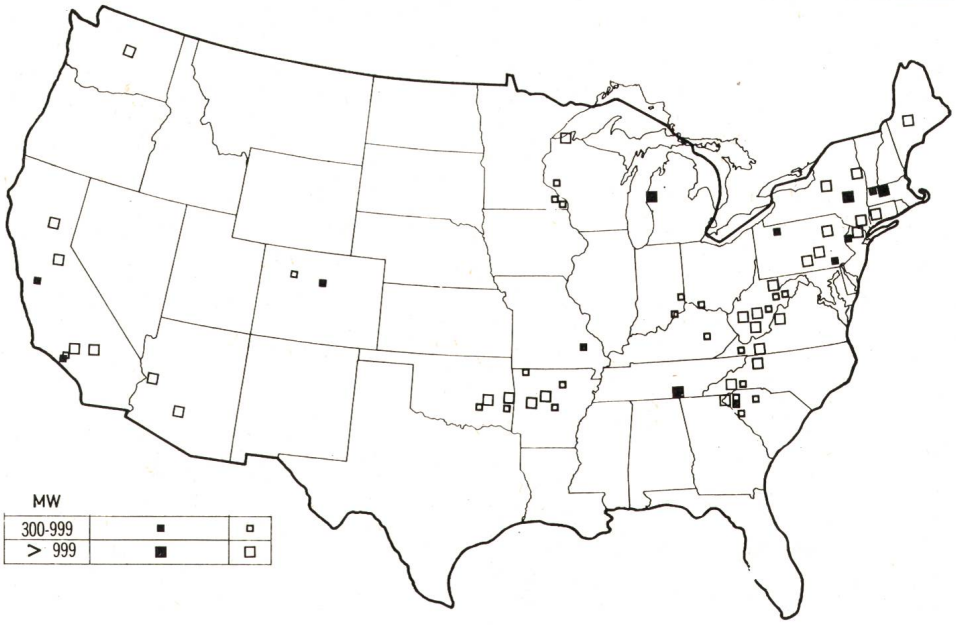
In den Energiesystemen der USA befinden sich zurzeit Pumpspeicherwerke für 9...10 GW im Bau und in Planung. In den neuen Werken werden vorwiegend grosse Pumpaggregate, mit Leistungen von ≧ 300 MW, installiert, so dass sogar die Grossanlagen nur 2...6 Aggregate enthalten. Die Anwendung von umkehrbaren Pumpturbinen vereinfacht die Bauweise der Anlagen und ermöglicht es, die Leistung in so grossen Einheiten zu konzentrieren, die mit getrennten Pumpen und Turbinen kaum erreichbar sind. Die Maschinenanlagen der neuen Werke werden zum überwiegenden Teil unterirdisch angeordnet, wodurch man Kostenersparnisse erzielt, wobei es auch möglich ist, die Einwände des Umweltschutzes abzuwenden.

Die bis 1990 vorausgesehene Entwicklung des Pumpspeicherbaus ist in Tabelle III und in Fig. 10 angegeben [13]. Die wichtigsten Merkmale dieser Entwicklung sind:

1. Der Bau von hydraulischen Anlagen wird sich von den bisher dominierenden primären Wasserkraftwerken auf die Pumpspeicherwerke verlagern. Während im Jahre 1970 nur 3,7 GW oder 7 % der hydraulischen Leistung sich in Pumpspeichern befanden, wird ihre Leistung um 1990 schätzungsweise 71 GW oder 46 % der hydraulischen Gesamtleistung erreichen.

2. Die geplanten Werke sind auf die einzelnen Gebiete sehr ungleichmässig aufgeteilt. Die meisten Pumpspeicherwerke werden für die Energiesysteme der östlichen Gebiete geplant, wo die ausbauwürdigen Wasserkräfte schon fast

Fig. 9
Pumpspeicherwerke mit Leistungen von über 100 MW (Januar 1971)
Schwarze Rechtecke: im Betrieb und im Bau
Weisse Rechtecke: in Planung (bis 1990)



vollständig erschlossen sind, wogegen die nahegelegenen Energiebedarfszentren eine grosse Spitzenleistung benötigen; ausserdem sind auch die Bauverhältnisse hier günstig. Dieser Umstände wegen sind 70 % der neuen Pumpspeicherleistung zur Errichtung im östlichen Drittel des Landes erwogen worden. Die mittleren Flachländer dagegen sind für die Pumpspeicherung wenig geeignet. Im Nordwesten kann die hydraulische Leistung vorläufig noch durch die Erweiterung der primären Wasserkraftwerke vergrössert werden, so dass die Pumpspeicherung hier nicht so dringend nötig ist. Laut Tabelle V wird die Leistung der 10 Grosskraftwerke des Columbia-Flußsystems durch die Erweiterungen der bestehen-

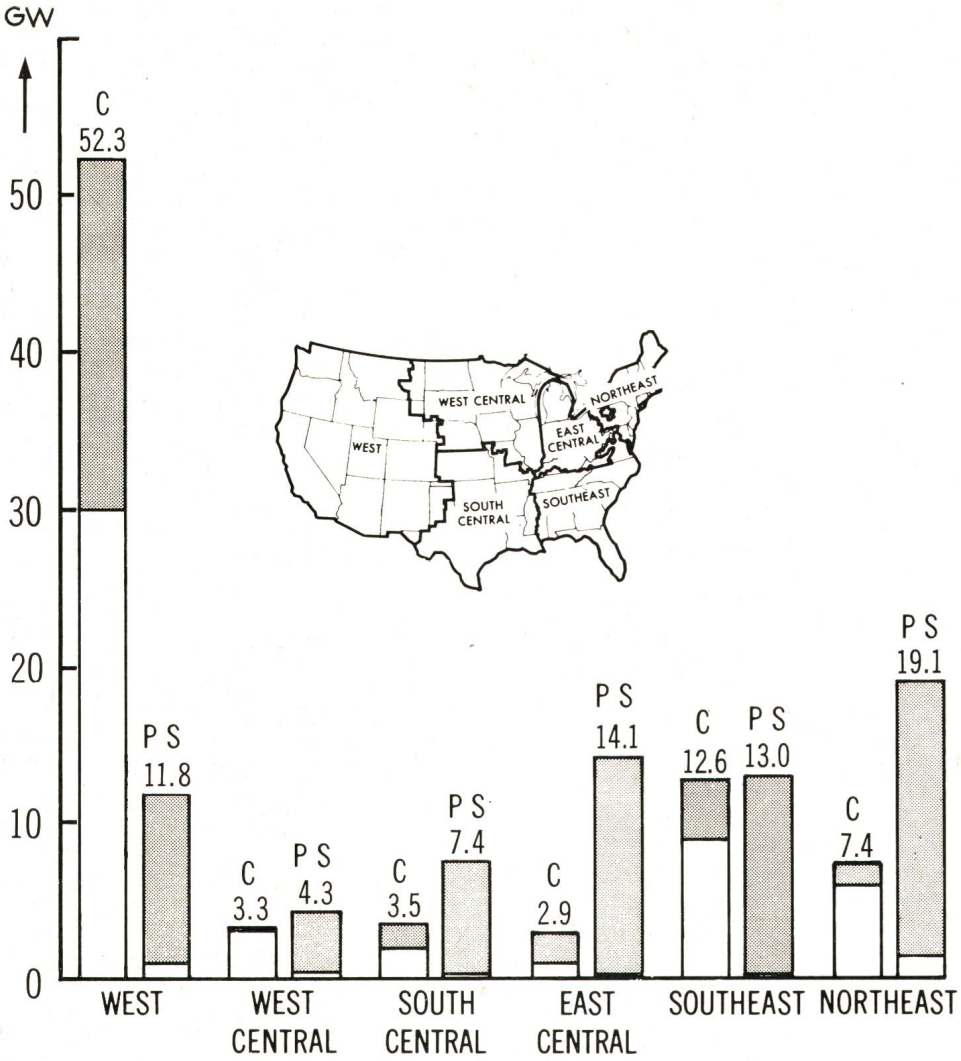


Fig. 10
Die Leistungsaufteilung auf die primären Wasserkraftwerke und die Pumpspeicherwerke
im Betrieb (Januar 1971)
im Bau und in Planung (bis 1990)
C primäre Wasserkraftwerke
PS Pumpspeicherwerke

den Anlagen von 10,7 GW auf 19,7 GW gebracht, d. h. um > 80 % vergrössert werden. Trotz dieser hier noch vorhandenen Möglichkeiten wird doch auch in diesem Gebiet der Bau von grossen Pumpspeichern für die kommenden Dekaden erwogen; sie sollen mit den zu errichtenden Wärmekraftwerken, vorwiegend den Kernkraftwerken, zusammenwirken.

3. Die Pumpspeicherleistung wird zum überwiegenden Teil in Grossanlagen untergebracht, wobei die Leistungen einiger geplanter Werke 2 GW übersteigen. Der Anteil der kleineren Anlagen, für <300 MW, ist in den geplanten Leistungszugängen unbedeutend. Man bemüht sich, mittels der Leistungskonzentration den dringenden Bedarf an zusätzlicher Spitzenleistung rechtzeitig zu erfüllen und die Errichtungskosten auf einer ertragbaren Höhe zu halten.

Die wichtigsten Wettbewerber der Pumpspeicherwerke sind die Gasturbinenanlagen, deren Leistung ebenfalls rasch zunimmt. Ein Vorteil der Gasturbinenanlagen ist ihre verhältnismässig kurze Bauzeit, so dass die in den Energiesystemen auftretenden Leistungsmängel mittels der Gasturbinen am schnellsten abgewendet werden können, wogegen die Errichtung von Pumpspeicherwerken 4...5 Jahre in Anspruch nimmt. Die Nachteile der Gasturbinenanlagen sind die verhältnismässig geringen Einheitsleistungen ihrer Aggregate wie auch die Notwendigkeit, einen hochwertigen, rar werdenden Brennstoff – Öl oder Gas – zu verwerten.

Es ist zu erwarten, dass während der kommenden Jahre die beiden Anlagetypen – die Pumpspeicherwerke und die Gasturbinenanlagen – sich an der Deckung der ansteigenden Lastspitzen beteiligen werden. Das Ausbauprogramm des TVA-Systems stellt ein charakteristisches Beispiel dieser Tendenz dar, weil hier ein Pumpspeicherwerk für 1530 MW und Gasturbinenanlagen für rund 960 MW zur Spitzendekkung errichtet werden [9, 22, 23].

Die wichtigste Aufgabe der neuen hydraulischen Anlagen wird in der Deckung der unterbrochenen Tageslastzonen liegen; in diese Richtung wird die Auslegung der zu errichtenden Wasserkraftanlagen gezielt.

Literatur

[1] *A. Kroms:* Die Weltproduktion der elektrischen Energie. Technische Rundschau, 63(1971)52, S. 1...7 und 15.

[2] World Power Data, 1969. U. S. Federal Power Commission, Washington, D. C.

[3] *A. Kroms:* Stromversorgung der Welt. Elektrizitätswirtschaft, 68(1969)11, S. 367...375.

[4] *W. Mackenthun:* Die 7. Weltkraftkonferenz, 1968. Elektrizitätswirtschaft, 67(1968)26, S. 761...797.

[5] *A. Kroms:* Der Mehrzweck-Flussausbau. Technische Rundschau, 58(1966)25, S. 1...7.

[6] *A. Kroms:* Wasserkraftwerke in Energiesystemen verschiedener Leistungsstruktur. ÖZE, 18(1965)10, S. 385...396.

[7] *A. Kroms:* Das hydraulisch-thermische Energiesystem der Tennessee Valley Authority. Bulletin des SEV («Die Seiten des VSE»), 60(1969)22 und 23, S. 281...292 und 300...302.

[8] *A. Kroms:* Über die Ausbauleistung der Wasserkraftwerke. ÖZE, 8(1955)2, S. 47...62.

[9] *A. Kroms:* Pumpspeicherung in den USA. Elektrizitätswirtschaft, 72(1973)6, S. 162...167.

[10] *G. D. Johnson:* Worldwide pumped-storage projects. Power Engineering, 72(1968)10, pg. 58...63.

[11] Hydroelectric Power Resources of the United States. U. S. Federal Power Commission, 1972, Washington, D. C.

[12] *A. Kroms:* Wasserkraft in der Energieversorgung der USA. ÖZE, 19(1966)2, S. 85...98.

[13] The 1970 National Power Survey. Part I. U. S. Federal Power Commission, Washington, D. C.

[14] VII. Volltagung der Weltkraftkonferenz in Moskau, 1968. Brennstoff-Wärme-Kraft, 21(1969)2, S. 49...114.

[15] National Power Survey. 1964. U. S. Federal Power Commission, Washington, D. C.

[16] Electric Power in Canada, 1971. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa.

[17] *A. Kroms:* Die Ausnutzung der kanadischen Wasserkräfte. Schweizerische Bauzeitung, 86(1968)35, S. 621...629.

[18] *A. Kroms:* Ein Grosskraftwerk im Hohen Norden. ÖZE, 24(1971)12, S. 489...502.

[19] *A. Kroms:* Ausbau eines nordischen Flußsystems. Schweizerische Bauzeitung, 91(1973)17, S. 404...411.

[20] *A. Kroms:* Die Elektrizitätsversorgung in Kanada. Technische Rundschau, 64(1972)42, S. 33...37.

[21] *A. Kroms:* Kraftwerke als Elemente der elektrischen Verbundsysteme. Bulletin des SEV («Die Seiten des VSE»), 51(1960)19 und 20, S. 221...228 und 242...244.

[22] TVA Annual Report, 1971. U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.

[23] *A. Kroms:* Zur Erweiterung eines Energiesystems. Elektrizitätswirtschaft, 70(1971)20, S. 591...600.

[24] 600 MW Units for Grand Coulee. Power Engineering, 72(1968)5, pg. 58...59.

[25] *A. Kroms:* Zur Erweiterung des Grand-Coulee Kraftwerks. ÖZE, 21(1968)3, S. 118...123.

[26] *G. H. Fernald:* Columbia River Treaty Implementation. World Power Conference, Tokto, 1966, Paper 1C-81.

[27] *A. Kroms:* Wasserkraft im Westen Kanadas. Bulletin des SEV («Die Seiten des VSE»), 64(1973)1, S. 4...14.

Adresse des Autors:

A. Kroms, dipl. Ing., Boston, USA.