Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 7

Artikel: Die Rolle der Atomkraftwerke in einem Netz mit hydraulischer Elektrizitätserzeugung : Erfahrungen und Aussichten in der Schweiz

Autor: Goldsmith, K. / Luder, H.A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915680

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: 13.12.2025

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

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Die Rolle der Atomkraftwerke in einem Netz mit hydraulischer Elektrizitätserzeugung Erfahrungen und Aussichten in der Schweiz

Von *K. Goldsmith*, Zürich und *H. A. Luder*, Laufenburg

Die nachfolgende Studie ist als Beitrag der beiden Autoren der 4. internationalen Konferenz über die friedliche Nutzung der Atomenergie, die vom 6.—16. September 1971 in Genf stattfand, vorgelegt worden. *Br.*

L'étude suivante est un exposé des deux auteurs à propos de la quatrième conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, qui aura lieu à Genève du 6 au 16 septembre 1971.

Entwicklung des elektrischen Netzes

Entwicklung der hydraulischen Elektrizitätserzeugung

Der schweizerische Verbrauch an elektrischer Energie pro Einwohner (ungefähr 4350 kWh pro Kopf im Jahre 1970) ist einer der höchsten der Welt. Er ist niedriger als in Nordamerika und Skandinavien, aber merklich höher als in den übrigen westeuropäischen Ländern. Diese Energie wird fast ausschliesslich durch die Ausnützung der Wasserkräfte gewonnen, da die Schweiz keine andern, wirtschaftlich ins Gewicht fallenden Energiequellen besitzt. So stammten auch neulich (1965/66[1]), 98,1 % der produzierten elektrischen Energie aus hydraulischen Energiequellen und nur 1,9 % wurden in thermischen Kraftwerken von geringer Grösse — zur Hauptsache für die Industrie und die Fernheizungen der Städte gebaut — erzeugt. Ungefähr 80 % der wirtschaftlich nutzbaren Wasserkräfte sind bereits ausgebaut.

Die ersten Kraftwerke der Schweiz entstanden an den Flussläufen, die einen sicheren Durchfluss gewährleisteten, auch wenn dieser grossen, saisonbedingten Schwankungen unterworfen war. Sehr bald hat man erkannt, dass die Fluktuationen der täglichen Nachfrage — die an einem mittleren Wochentag bis zu 100 % erreichen — Kraftwerke mit einem grossen Regelbereich erforderten. Es wurden deshalb Speicheranlagen gebaut, welche am Anfang, um die Nachfragebedürfnisse zu befriedigen, mit Tages- oder Wochenspeichern und später (seit 1950), um die saisonbedingten Schwankungen in den Laufkraftwerken zu kompensieren, mit Saisonspeichern ergänzt wurden. Das Speichervermögen der Saisonspeicher entspricht gegenwärtig ungefähr 27 % des jährlichen Elektrizitätsverbrauches der Schweiz und 46 % des gesamten Speichervermögens in Westeuropa. Der Lac des Dix, das grösste Speicherbecken der Schweiz, deckt ungefähr 6,5 % des jährlichen Verbrauches.

Die schweizerische Elektrizitätserzeugung ist auf ungefähr 300 Gesellschaften verteilt. Dabei handelt es sich zum grössten Teil um kleine Gemeindewerke, aber auch um einige regionale, relativ grosse Gesellschaften. Um den Bau von grossen Installationen, besonders die grosse Investitionen erfordernden Speicheranlagen zu erleichtern, welche den Energiebedarf eines einzelnen Unternehmens übersteigen, wurden Partnergesellschaften gegründet. Diese ermöglichen eine Aufteilung der Kosten und Gewinne einer Anlage auf mehrere Gesellschaften. Die Konzeption der Partnergemeinschaft erstreckt sich auch auf internationale Anlagen, die sich auf oder in der Nähe der Landesgrenze befinden, und in deren Eigentum sich die Elektrizitätsunternehmungen der Nachbarländer teilen.

Die grossen, saisonbedingten Änderungen der Wasserzuflüsse zu den schweizerischen Wasserkraftwerksanlagen — sie betragen nahezu 600 % in einem mittleren Jahr zwischen dem Minimum im Winter und dem Maximum im Sommer — führt zu grossen Energieüberschüssen im Sommer. Diese werden zur Hauptsache in den Nachbarnetzen abgesetzt. Das im Winter von Zeit zu Zeit auftretende Energiemanko erforderte die Hilfe von ausserhalb des Landes liegenden Energiequellen.

Deshalb enstanden grosse Verbundleitungen, welche anfänglich nur die Grenzregionen, dann aber nach und nach ganz Westeuropa zusammenschlossen. Das Transportvermögen der Leitungen von 150 kV, 220 kV und 380 kV zwischen der Schweiz und den Nachbarländern beträgt gegenwärtig nahezu 12000 MW und überschreitet die in der Schweiz installierte Leistung (10904 MW Ende 1970). Ein Drittel der in der Schweiz produzierten oder verbrauchten elektrischen Energie wird über die Landesgrenzen ausgetauscht. Die Elektrizitätserzeugung passt sich somit sowohl dem einheimischen Verbrauch wie demjenigen der Nachbarländer an. Dieser internationale Energieaustausch beruht auf vertraglichen, langfristigen und kurzfristigen Abmachungen, im allgemeinen aber auf Angebot und Nachfrage zwischen den Unternehmungen. Er hat zum Ziele, die verfügbaren hydraulischen Energiequellen zu jedem Zeitpunkt optimal auszunützen. In dieser Hinsicht gleichen die internationalen Abmachungen denjenigen zwischen den schweizerischen Gesellschaften. Das Transportvermögen der Verbundleitungen spielt auch eine wichtige Rolle in der Verbesserung der Versorgungssicherheit der daran beteiligten Unternehmungen und erlaubt in einem gewissen Masse, die rotierenden und stillstehenden Produktionsreserven betrieblich zusammenzulegen.

Die Erzeugung in wirtschaftlich nutzbaren hydraulischen Energiequellen der Schweiz wird für ein Jahr mit mittlerer

[1]) In der Schweiz beginnt das hydrographische Jahr am 1. Oktober und endet am 30. September

Wasserführung auf 36000 GWh geschätzt. Dies entspricht ungefähr einem Viertel des gesamten Wasserkraftpotentials. Die ständige Erhöhung der Kosten für grosse Bauvorhaben mit den Problemen des Umweltschutzes hat die ausbaubaren Energiequellen auf ungefähr 34000 GWh begrenzt. Davon sind aber Energieerzeugungsanlagen in der Grössenordnung von 1000 GWh pro Jahr gegenwärtig noch in Frage gestellt. Die Erzeugungsmöglichkeit der bis Ende 1970 verwirklichten Wasserkraftwerksprojekte betrug 88 % dieser unteren Grenze. Dies entspricht ungefähr 30180 GWh für ein mittleres Jahr. Die Ausbaumöglichkeit der Wasserkräfte des Landes nähert sich also seiner Ausschöpfung.

Die zweckdienliche Ausnutzung der Speicherkapazität gestattet wohl, die saisonbedingten Produktionsänderungen auszugleichen; schwieriger ist es aber, die durch die hydrologischen Verhältnisse hervorgerufenen zusätzlichen Schwankungen der Zuflüsse zu kompensieren. Die Erzeugung der hydraulischen Energie kann sich in einem trockenen Jahr bis zu 20 % verringern und in einem sehr nassen Jahr bis zu 15 % erhöhen. So sind zum Beispiel im Jahre 1970/71 nur 24600 GWh an hydraulischer Energie zur Verfügung gestanden, während der Landesverbrauch nahezu 29000 GWh betrug. Dieses Energiedefizit wird sich in den künftigen Jahren noch vergrössern.

Entwicklung der thermischen Elektrizitätserzeugung

Der Einsatz zusätzlicher Energiequellen erschien seit einigen Jahren unumgänglich. Eine mit Schwerölfeuerung ausgerüstete thermische Zentrale von 300 MWe Nennleistung wurde 1965/66 — vor allem als Ergänzung der Speicherkraftwerke — im Westen des Landes erbaut. Die zunehmende Rentabilität der Atomenergie, die Versorgungsprobleme mit fossilen Brennstoffen und die Beachtung des Schutzes der Umwelt, haben die Aufmerksamkeit auf die Atomkraftwerke gelenkt. Das erste nukleare Kraftwerk Beznau I (350 MWe, PWR) wurde im September 1969 in Betrieb genommen. Diesem werden Mühleberg (306 MWe, PWR) und Beznau II (350 MWe, PWR) folgen. Nennenswert sind auch folgende vier Atomkraftwerkprojekte: Kaiseraugst (850 MWe), Leibstadt (850 MWe) und Gösgen (600 MWe) im Nordosten und Verbois (800 MWe) im Westen des Landes. Mindestens eines dieser Projekte wird voraussichtlich im Jahre 1977/78 den industriellen Betrieb aufnehmen, ein weiteres in den Jahren 1980/81. Die vier geplanten Kraftwerke werden bis Mitte der 1980-er Jahre in Betrieb sein, sofern die Projekte planmässig realisiert werden können. Mit Ausnahme von kleinen Kraftwerken für die Industrie oder für Spezialzwecke, wie Fernheizung oder Kehrichtverbrennung, ist die Errichtung von weiteren konventionellen thermischen Zentralen nicht vorgesehen.

Der vorgesehene Zuwachs an nuklearer Energieerzeugung bis 1982 ist in Fig. 1 dargestellt. Die Lage im Jahre 1982 ist natürlich gezwungenermassen eine Annahme. Der Einsatz der Atomenergieproduktion muss unter Berücksichtigung der Spitzenbelastung des Netzes und nicht unter Berücksichtigung der gesamten im Netz installierten Leistung angepasst werden, denn die Schwankungen der Zuflüsse bedingen eine Energieerzeugungsmöglichkeit der Wasserkraftwerke, welche viel grösser ist als die auftretende Spitzenbelastung. Die Speicherkraftwerke sind für Höchstleistungen während kurzen Perioden im Winter gebaut und die Laufwasseranlagen erzeugen die Energie vorwiegend im Sommer. Die gesamte Einsatzmöglichkeit der Wasserkraftwerke muss also plötzliche Spitzennachfragen übersteigen. Zum Beispiel: Die installierte Leistung betrug Ende 1970 223 % des Spitzenbedarfs des gesamten Schweizer Netzes; bei Einbezug des Exportes 164 % der maximal möglichen Erzeugung. Dieser Überschuss an installierter Leistung stellt keine «Reservemarge» im üblichen Sinne dar, da sie nicht immer verfügbar ist. Dieser Überhang hat aber gleichwohl grössere Investitionen pro angefordertes kW bedingt. In Anbetracht, dass die Produktion der thermischen und nuklearen Kraftwerke regelmässiger ist, kann der Leistungsüberschuss im Verhältnis zu der im Netz installierten thermischen und nuklearen Kraftwerksleistung verringert werden. Die Investitionen pro nachgefragtes kW werden ebenfalls reduziert.

Integration der Atomkraftwerke

Charakteristiken des Netzes mit hydraulischer Elektrizitätserzeugung

Durch die hydrologischen Verhältnisse entwickelte sich das Schweizer Netz mehr im Hinblick darauf, die Marktverhältnisse statt die Leistungsnachfragen zu befriedigen. Das führte zur Bildung eines komplexen Erzeugersystems, das aus mehr als 300 Kraftwerken mit sehr unterschiedlichen Betriebsbedingungen besteht.

Die durch die Wasserkraftwerke erzeugte Energie lässt sich, je nach Art des Kraftwerkes, einer der nachstehenden Kategorien zuordnen:

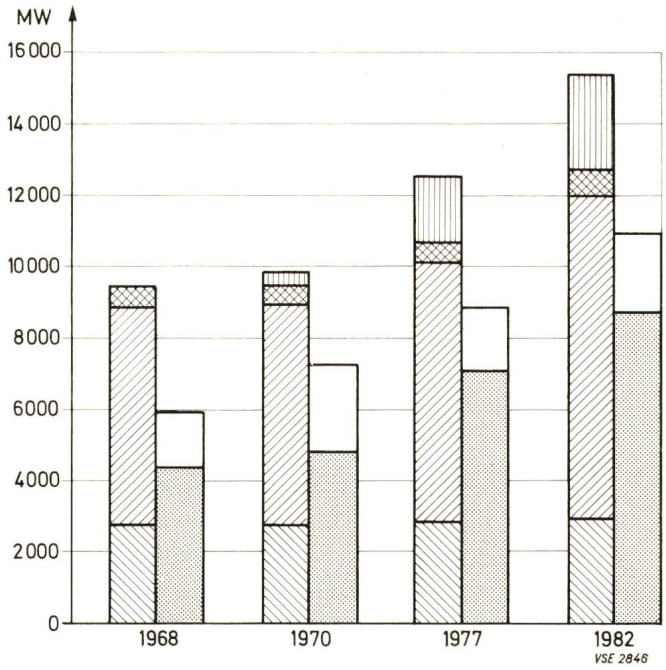

Fig. 1
Erzeugungskapazität der Kraftwerke

Kraftwerke:
- Laufwasser
- Speicher
- Thermisch mit fossilen Brennstoffen
- Thermisch nuklear

Höchstleistungen:
- Landesverbrauch
- Gesamterzeugung

— Nicht regulierbare und den hydrologischen Bedingungen stark unterworfene Laufwasserenergie; sie liefert einen Teil der Grundlast.
— Aus den Zwischenzuflüssen der Speicheranlagen erzeugte Laufwasserenergie; diese Energie ist ebenfalls nicht regulierbar und zudem noch kurzzeitiger verfügbar.
— Regulierbare Energie aus Tages- oder Wochenspeichern; ihr Einsatz folgt den Bedarfsschwankungen.
— Regulierbare Energie aus Saisonspeichern; diese Energie dient besonders im Winter zur Deckung der Differenz zwischen dem Gesamtverbrauch und der Erzeugung der andern Kraftwerke.

Die Kraftwerke an den Flüssen sind einer beachtlichen Betriebsstarrheit unterworfen; sie müssen dann betrieben werden, wenn Wasser zur Verfügung steht. Die Erzeugungsmöglichkeit kann nur für einige Tage und nur mit einer grossen Unsicherheit vorausgesehen werden. Das Netz muss also eine genügend grosse Betriebselastizität haben, damit die Verfügbarkeitsschwankungen der Laufenergie aufgefangen werden können. Das schweizerische Netz weist diesbezüglich zwei wichtige Vorzüge auf:

1. Von der Produktionsseite her gesehen:
   Einsatz von Speicheranlagen mit sehr grossem Speichervermögen (siehe Fig. 1).
2. Von der Verbraucherseite her gesehen:
   Die Möglichkeit, am internationalen Energieaustausch teilzunehmen; dadurch können Überschüsse und Defizite des Landes kompensiert werden.

Das Belastungsdiagramm — es entsteht aus der Aufeinanderreihung der verschiedenen Energiearten — ist für einen typischen Wintertag im Jahre 1967 in Fig. 2a aufgezeichnet. Die mit herkömmlichen Brennstoffen betriebenen thermischen Kraftwerke waren während dieses Tages als Ergänzung der Laufwasserproduktion ständig in Betrieb. Ihr Anteil am Tagestotal ist klein und beträgt nur 1,5 % der gesamten erzeugten Energie. Auf Grund von vertraglichen Abmachungen wurde zur Tagesspitze eine kleine, aus den Speicherbecken stammende Energiemenge exportiert. Diese tägliche Umkehr der Energieflüsse — Import in der Nacht und Export zur Tagesspitze — ist charakteristisch für die Winterperiode. Im Sommer ergeben die grossen zur Verfügung stehenden Zuflüsse ein fortwährendes Energieband, das während den 24 h des Tages exportiert wird.

Charakteristiken des Netzes mit hydraulischer und thermischer Elektrizitätserzeugung

Der Einfluss des ersten Atomkraftwerkes auf das Belastungsdiagramm eines typischen Wintertages im Jahre 1970 ist in der Fig. 2b dargestellt. Die allgemeine Form der Belastungskurve ist die gleiche wie 1967, aber das Band an thermischer Grundlastenergie ist bedeutend grösser geworden. Es enthält nun die durch das Atomkraftwerk Beznau I (350 MWe) erzeugte Energie. Der Beitrag der thermischen Kraftwerke beläuft sich auf 13,8 % der gesamten, an diesem Tag erzeugten Energiemenge.

Der wirtschaftliche Einsatz der Atomkraftwerke nach dem heutigen Aufbau und in der Tat auch jeder andern nur denkbaren wirtschaftlichen Konzeption, hängt von einem sehr hohen Benützungsfaktor ab. Die grossen Investitionen pro installiertes kW — mindestens 50 % über denjenigen eines konventionellen thermischen Kraftwerkes von gleicher Grösse — können nur amortisiert werden, wenn das Kraftwerk dauernd in Betrieb ist und somit ermöglicht, von den niedrigen Energieerzeugungskosten zu profitieren. (Die Energieerzeugungskosten betragen ungefähr einen Drittel derjenigen eines Kraftwerkes mit fossilen Brennstoffen mit einem angenommenen Preis von 2 Dollar/10^6 kcal.)

In dieser Hinsicht können für Atomkraftwerke und Laufwasserkraftwerke ähnliche Überlegungen gemacht werden. Die wirtschaftliche Betriebsdauer der beiden Kraftwerksarten ist nur durch die Verschiedenartigkeit der technischen Verfügbarkeit der Versorgungsanlagen für den nuklearen Brennstoff oder für das Wasser begrenzt. Die Atomenergie und die Laufwasserenergie treten deshalb in Konkurrenz für die Grundlastversorgung des Netzes. Der Vorzug wird aber den Wasserkraftwerken eingeräumt werden müssen, da die Betriebskosten dieser Kraftwerke niedriger sind. Im Idealfall dürfte die Produktion der beiden Kraftwerksarten die Bedürfnisse des Netzes an Grundlastenergie nicht übersteigen. Dies würde die mit einem hohen Auslastungsfaktor nutzbare Kapazität der Atomenergie begrenzen, sofern nicht Sonderabnehmer für überschüssige Grundlastenergie gefunden werden. Die Pumpspeicherwerke erfüllen die Anforderungen solcher Sonderabnehmer; sie werden durch überschüssige Nachtenergie gespiesen, welche alsdann in Tagesspitzenenergie umgewandelt werden kann. Da gegenwärtig die Betriebsweise der Speicherwerke ermöglicht, Tagesspitzenenergie in genügender Menge zu liefern, sind Pumpspeicher für den täglichen Wälzbetrieb noch nicht stark verbreitet. Trotzdem sind schon einige grosse Pumpspeicherwerke in Betrieb. Diese dienen aber vorwiegend der Saisonspeicherung. Die Überschüsse an Grundlastenergie könnten auch im Winter exportiert werden. Dies geschieht ja bereits auch schon während den Sommermonaten. Die Gründung von Partnergesellschaften für den Betrieb zukünftiger Atomkraftwerke kann die Unterbringung überschüssiger Grundlastenergie in den Nachbarnetzen erleichtern.

Die Vorausschau auf ein Produktionsdiagramm für einen Wintertag im Jahre 1977, bei dem der Einsatz von vier Atomkraftwerken mit einer möglichen Gesamtleistung von 1856 MWe berücksichtigt ist, ist in Fig. 2c dargestellt. Diesem Diagramm liegt ab 1970 eine angenommene jährliche Zuwachsrate für den Landesverbrauch von 5 % zugrunde. Die Produktionskapazität der Wasserkraftwerke wurde für das Jahr 1977/78 auf 33 120 GWh geschätzt, d. h. 9,7 % über dem Erzeugungsvermögen der Ende 1970 installierten Anlagen. Wie schon erwähnt, ist diese Zahl sehr nahe an der Grenze der wirtschaftlich ausbaubaren Wasserkräfte. Für den typischen Wintertag wurde die Erzeugung der Atomkraftwerke mit 91 % ihrer Nennleistung und die der konventionellen thermischen Kraftwerke mit 47 % ihrer Nennleistung eingesetzt. Während der Nacht genügt eine kleine Energiemenge aus den Speicherseen, um das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch herzustellen. Die Energiebewegungen — Import und Export — sind während der Nacht sehr klein. Die Speicherkraftwerke erlauben aber den Export einer ansehnlichen Energiemenge während des Tages. Die internationalen Energieflüsse von der Schweiz aus gesehen werden zum «Einbahnbetrieb». Die transportierten Energiemengen in jeder Richtung können aber durch eine zweckmässige Bewirtschaftung der Speicherbecken bestimmt werden.

Der internationale Energieaustausch im Winter 1977 wird sich dagegen sehr verändern, sobald eines der Atomkraftwerke

Belastungsdiagramm des Schweizer Netzes

(typischer Wintertag)

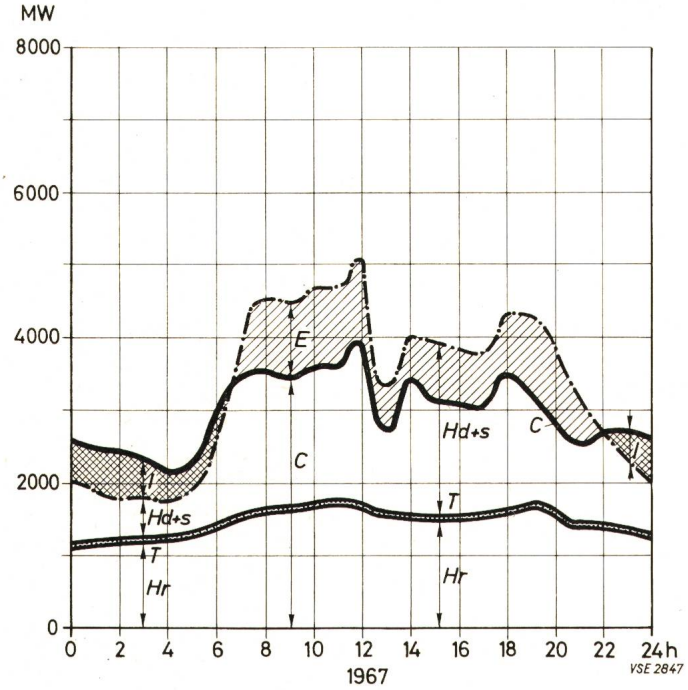

Fig. 2a

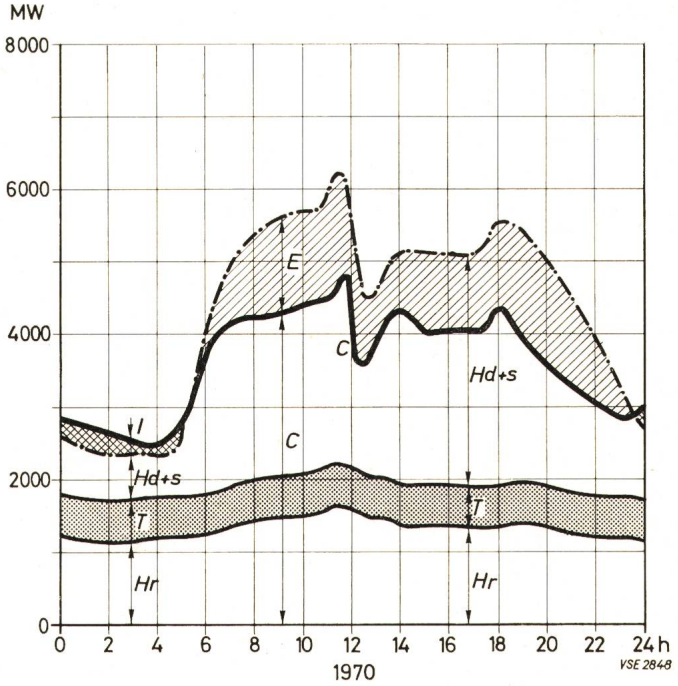

Fig. 2b

Energiequellen:

Hr	= Laufwasser	C	= Landesverbrauch
Hd + s	= Speicher	I	= Import
T	= Thermisch	E	= Export

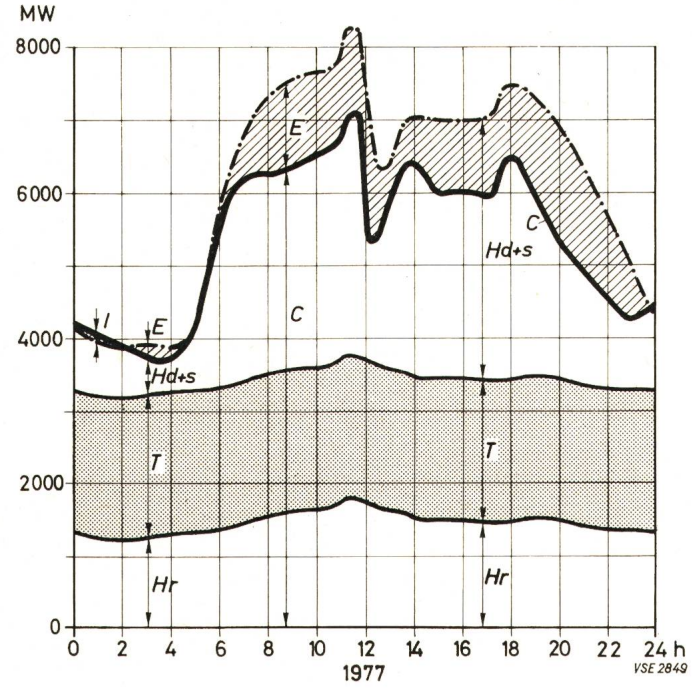

Fig. 2c
Alle Kernkraftwerke in Betrieb

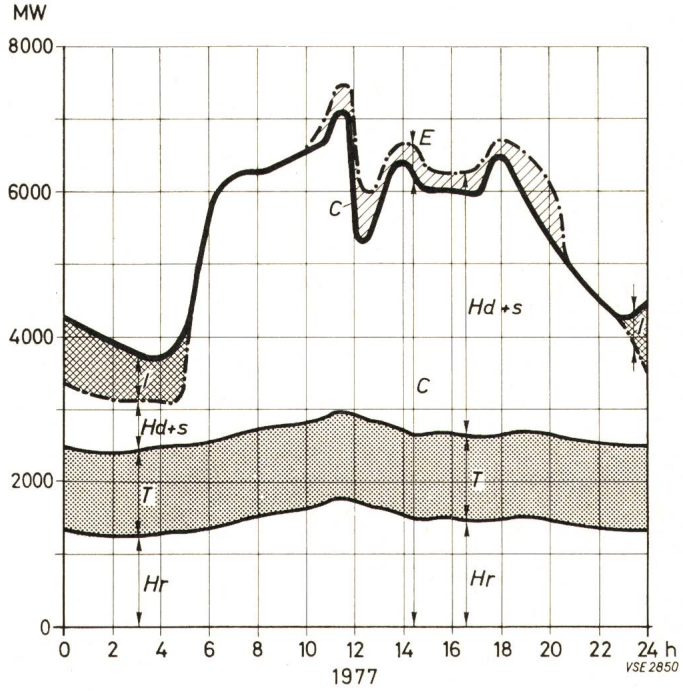

Fig. 2d
Ein Kernkraftwerk ausser Betrieb

ausser Betrieb ist. In einem Netz mit vorwiegend hydraulischer Elektrizitätserzeugung hat man sich an die sehr hohe Verfügbarkeit gewöhnt. Die Auswirkungen der selten auftretenden Störungen sind im allgemeinen — im Verhältnis zu den grossen und unvorhersehbaren Änderungen der Zuflüsse — vernachlässigbar. Normalerweise genügt die Produktionskapazität der Speicherwerke, um Ausfälle von Wasserkraftwerken zu übernehmen. Dagegen ist die Verfügbarkeit der Atomkraftwerke viel geringer. Die Unterhaltsarbeiten für ein solches Werk können im Sommer eingeplant werden. In dieser Zeit ist normalerweise genügend hydraulische Energie vorhanden. Die laufende Erfahrung im Betrieb von Atomkraftwerken zeigt, dass jede Anlage ungefähr 8 % der Zeit als Folge einer Störung ausser Betrieb ist, d. h. auch im Winter fehlt diese während 350 h. Gleichwohl ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass zwei der vier im Winter 1977 in Betrieb stehenden Kraftwerke gleichzeitig ausfallen werden. Falls aber ein Atomkraftwerk ausser Betrieb sein wird, dürfte die verbleibende Produktion von Grundlastenergie nicht ausreichen, um die Nachfrage nach dieser zu befriedigen, und es wird somit eine ansehnliche Menge Nachtenergie importiert werden müssen. Die für den Export verfügbare Tagesenergie wird geringer sein; während den Spitzenzeiten kann aber noch eine beschränkte Menge aus den Speicherseen exportiert werden. Fig. 2d zeigt diese Situation für einen typischen Wintertag im Jahre 1977, wobei die Atomenergieerzeugung um 850 MW herabgesetzt wurde. Dieses Produktionsabbild unterscheidet sich nicht sehr stark von demjenigen des Jahres 1970.

Zukünftige Entwicklung

Man ist versucht, für die Entwicklung auf lange Sicht Prognosen aufzustellen. Es darf angenommen werden, dass eine Kapazitätserweiterung der «natürlichen» Wasserkräfte über den gegen Ende der 70er Jahre erreichten Stand hinaus nicht möglich sein wird und die Atomkraftwerke einen ständig zunehmenden Anteil der Nachfrage an Grundlastenergie decken werden. Fig. 2c zeigt ein Bild der möglichen Energieerzeugung in den frühen 80er Jahren. Das Band der erzeugten thermischen Energie wird grösser werden, und damit wird sich das Problem der Unterbringung von Nachtenergieüberschüssen zuspitzen. Das natürliche Speichervermögen wie auch das von Pumpen gespiesene wird immer wichtiger, da damit das Gleichgewicht zwischen dem Landesverbrauch und dem Exportanteil von Spitzenenergie aufrechterhalten werden kann. Die internationalen Verbundleitungen werden deshalb weiterhin von grosser Bedeutung sein.

Gegenwärtig stehen einige Produktionsreserven allen am westeuropäischen Verbundbetrieb beteiligten Partnern für die gegenseitige Aushilfe bei Ausfällen zur Verfügung. Eine thermische Reserve bleibt immer verfügbar. Ende 1970 wurde sie auf 3000 MW geschätzt. Dies entspricht ungefähr 3,2 % der gesamten Spitzenbelastung des Verbundnetzes. Die Schweiz leistet ihren Beitrag an diese Reserve durch die Lieferung von Energie aus Speicherkraftwerken. Einige grosse Speicheranlagen spielen ja durch die Lieferung von Regelenergie schon eine wichtige Rolle für die Frequenzhaltung im europäischen Netz. Diese Rolle wird in der Zukunft immer wichtiger werden und kann sich auf die Deckung kurzer Produktionsausfälle der Atomkraftwerke in der Schweiz und den Nachbarländern ausdehnen. Aber die beschränkte Energiemenge, welche den Speicherseen entnommen werden kann, muss durch andere Energiequellen wieder ersetzt werden. In der Tat kann deshalb der Betriebszustand von der in Fig. 2d für einen mittleren Tag dargestellten Situation sehr stark abweichen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass ein Mangel an Grundlastenergie für eine kürzere Dauer durch einheimische Energie ausgeglichen werden kann und nachher so lange durch Importe ersetzt wird, bis das Volumen der vorher verfügbaren Speicherenergie wieder erreicht ist. Durch den Einsatz von Pumpspeicheranlagen werden diese Massnahmen noch begünstigt.

Energieerzeugung

Es ist aufschlussreich, den Einfluss der Atomenergieerzeugung auf die Energiebeschaffung während des ganzen Jahres zu untersuchen. Die monatlichen Energiemengen, die 1969/70 von jedem schweizerischen Kraftwerkstyp geliefert wurden, sind aus Fig. 3 ersichtlich. Über das ganze Jahr betrachtet sind alle Typen gleich wichtig einzustufen.

Die Bänder der Grundlastenergieerzeugung sind kontinuierlich, ihre Grösse variiert aber mit den Jahreszeiten wie folgt:

— Das Band der Laufwasserproduktion mit den Schwankungen der Wasserführung.

— Das Band der thermischen Erzeugung durch den Umstand, dass die Überholungsperioden auf den Sommer konzentriert werden.

Der Verlauf der beiden Bänder ergänzt sich gegenseitig. Die Energieerzeugung aus Tagesspeichern ist im Winter kaum, im

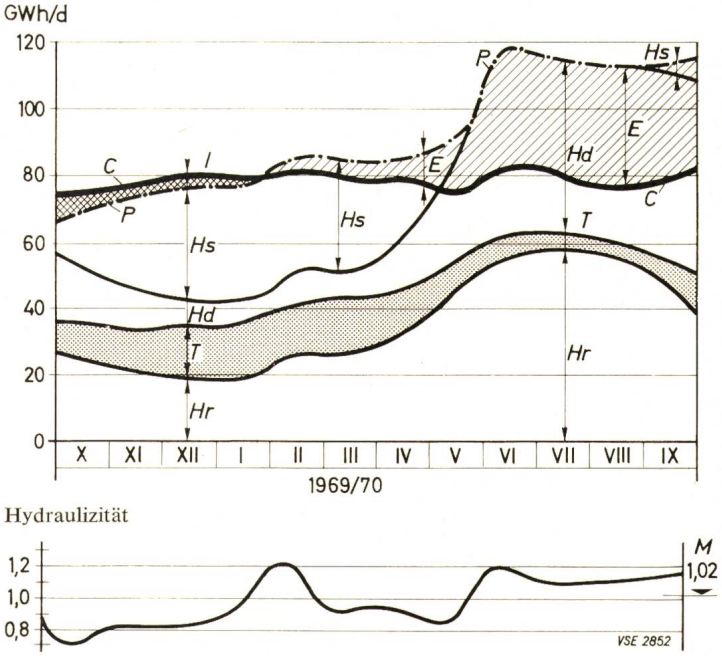

Fig. 3
Abbild der heutigen Energieerzeugung

Energiequellen:

Hr = Hydraulisch, Laufwasser
Hd = Hydraulisch, Tages- und Wochenspeicher
Hs = Hydraulisch, Saisonspeicher
T = Thermisch, konventionell und nuklear
I = Import
E = Export
C = Landesverbrauch
P = Gesamterzeugung
Mittlere Hydraulizität = 1,02
GWh/d = Produktion pro Tag

Tabelle I

Kraftwerktypen	Energieproduktion (GWh) Winter		Sommer		Total	
Laufwasser	4 425	(4 097)	10 458	(9 683)	14 883	(13 780)
Tages- und Wochenspeicher	2 160	(1 964)	8 093	(7 358)	10 253	(9 322)
Saisonspeicher	6 028	(5 382)	948	(846)	6 976	(6 228)
Thermisch konventionell	1 170		585		1 755	
Thermisch nuklear	7 420	(2 583)	4 637	(1 260)	12 057	(3 843)
Totalproduktion	21 203	(15 026)	24 721	(19 147)	45 924	(33 173)
Landesverbrauch	20 948	(14 154)	19 535	(14 259)	40 483	(28 413)
Export (+) Import (—)	+ 255	(— 128)	+ 5 186	(+ 4 888)	+ 5 441	(+ 4 760)

Sommer aber fast zur Hälfte an der monatlichen Energieerzeugung beteiligt. Die Produktion aus Saisonspeichern ergänzt diejenige aus den Tagesspeichern und deckt fast die Hälfte des Energieverbrauchs in einigen Wintermonaten. Sie ist indessen im Sommer während der Füllung der Seen ausser Betrieb. Eine ungünstige Hydrologie anfangs Winter kann zu Energieimporten zwingen. Der Export während des verbleibenden Winters und auch anfangs Sommer ist von geringer Bedeutung. Aber die bessere Überblickbarkeit der hydraulischen Verhältnisse gegen Ende des hydrographischen Jahres erlaubt den Export eines Drittels der produzierten Energie.

Im Prinzip ist diese Situation während mehrerer Jahre unverändert geblieben. Die thermisch erzeugte Energiemenge wird zu einem wichtigen Faktor (11,6 % der gesamten Energieerzeugung), aber ihr Einfluss wird im Jahre 1977/78 noch ausgeprägter, denn die jährliche Produktion aus thermischen Kraftwerken wird 30,1 % betragen. Das Produktionsbild für das oben erwähnte Jahr ist in Fig. 4 dargestellt. Um den Vergleich zu erleichtern wurde die monatliche Hydrologie derjenigen von 1969/70 gleichgesetzt. Für die kumulierte Verbrauchszunahme sind 5 % im Winter- und 4 % im Sommerhalbjahr eingesetzt. Die von den verschiedenen Kraftwerkstypen erzeugten Energiemengen sind in Tabelle I aufgeführt; in Klammern sind die entsprechenden Zahlen für das Jahr 1969/70 angegeben.

Daraus geht hervor, dass sich das allgemeine Produktionsabbild zwischen den Jahren 1969/70 und 1977/78 nicht stark verändert. Das Gleichgewicht zwischen dem Landesverbrauch und der Energieerzeugung ist im Winter günstiger, hingegen sind im Sommer immer noch bedeutende Energieüberschüsse zu erwarten. Der internationale Energieverkehr ist also unerlässlich, um alle verfügbaren hydraulischen Energiequellen optimal ausnützen zu können. Die langfristige Prognose lässt vermuten, dass die internationalen Energiebewegungen im Winter von kürzerer Dauer sein und sich die Flussrichtungen öfters ändern werden. Im Sommer behalten die Energieflüsse, soweit sich dies im voraus beurteilen lässt, ihre Charakteristik bei.

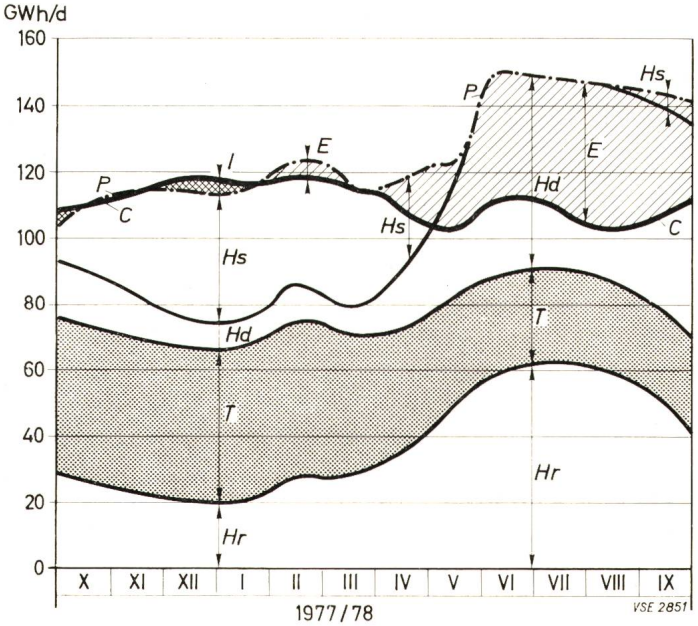

Fig. 4
Abbild der Energieproduktion in der Zukunft

Energiequellen:
Hr = Hydraulisch, Laufwasser
Hd = Hydraulisch, Tages- und Wochenspeicher
Hs = Hydraulisch, Saisonspeicher
T = Thermisch, konventionell und nuklear
I = Import
E = Export
C = Landesverbrauch
P = Gesamterzeugung
Mittlere Hydraulizität = 1,02
GWh/d = Produktion pro Tag

Schlussfolgerung

Damit aus dem Einsatz grosser Einheiten für die Grundlastenergieerzeugung — wie sie durch den Bau der Atomkraftwerke entstehen — Vorteile erwachsen, müssen genügend Quellen regelbarer Energie zur Verfügung stehen, damit eine rasche Anpassung an die Verbrauchsschwankungen möglich ist. Die Schweiz befindet sich diesbezüglich in einer günstigen Lage, denn sie verfügt über grosse Speicherbecken, welche die nötige Produktionsflexibilität ermöglichen. Auf lange Sicht gesehen kann diese Speicherkapazität noch durch Pumpspeicheranlagen gesteigert werden. Das Energieproduktionsvermögen kann somit erweitert und durch den Einbau von zusätzlichen Generatorgruppen in einigen bestehenden Speicheranlagen kann den grössten Verbrauchsschwankungen Rechnung getragen werden. Die Topographie des Landes begünstigt diese Entwicklungen. Der Einsatz der Atomenergie wird für die Zukunft weder im Produktionsabbild des Schweizer Netzes noch im Energieaustausch mit den Nachbarländern grosse Veränderungen hervorrufen. Komplexere Anpassungsprobleme werden sich erst dann ergeben, wenn das Produktionsvermögen der Atomkraftwerke bedeutend grössere als die hier betrachteten Dimensionen angenommen hat.

Adresse der Autoren:
K. Goldsmith, beratender Ingenieur der Elektro-Watt Ingenieurunternehmung AG, 8001 Zürich.
H. A. Luder, Vizedirektor der Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG, 4335 Laufenburg.