

Das hydraulisch-thermische Energiesystem der Tennessee Valley Authority

Autor(en): **Kroms, A.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **60 (1969)**

Heft 22

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916193>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Das hydraulisch-thermische Energiesystem der Tennessee Valley Authority

Von *A. Kroms*, Boston (USA)

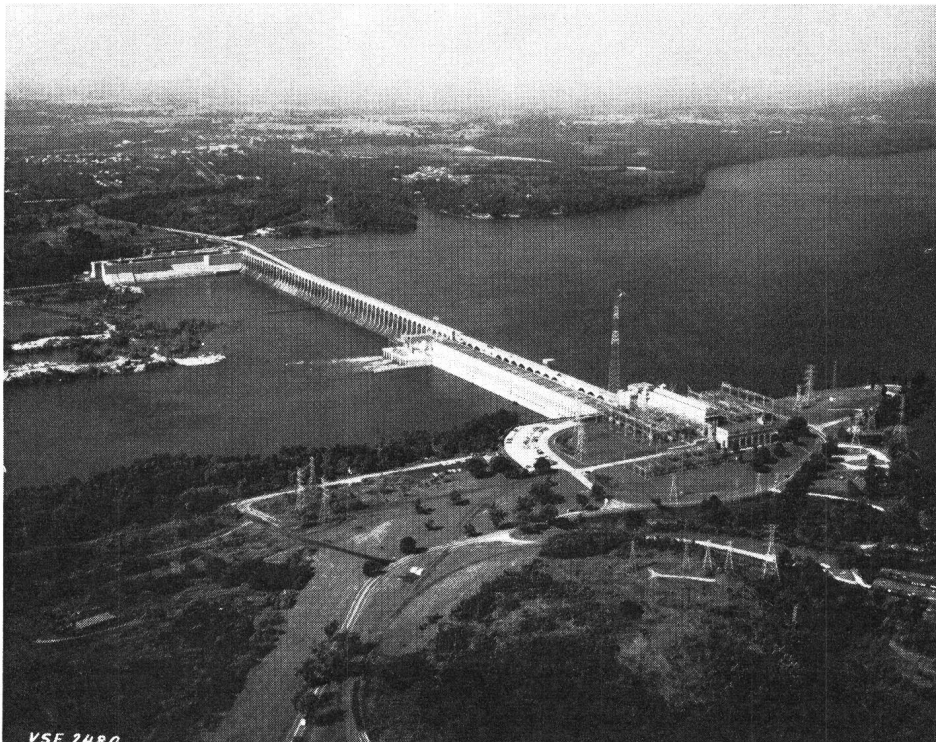
621.31:627(76)

1. Einleitung

Der Ausbau des Tennessee-Flußsystems in den USA stellt ein hervorragendes Beispiel einer allseitigen, zweckmässig koordinierten Nutzbarmachung der Naturschätze dar. Dieses Mehrzweck-Unternehmen hat seit Jahren die Beachtung der technischen und wirtschaftlichen Kreise der Welt auf sich gelenkt. Während die Form der Organisation und der Finanzierung dieses Vorhabens manche Diskussionen ausgelöst hat, in denen verschiedene Beurteilungen geäußert worden sind, wird doch von der technischen Seite aus der Ausbau des Tennessee Gebiets als ein Vorbild der allseitigen Flussausrüstung angesehen, mit dem man die anderen Mehrzweckbaupläne vergleicht. Die späteren Projekte der allseitigen Flussausrüstung werden öfters «neue Tennessee-Projekte» genannt. Da die Versorgung mit billiger Energie das Rückgrat sowohl des Tennessee-Projekts als auch anderer ähnlicher Entwicklungsprojekte bildet, ist die nachfolgende Abhandlung vorwiegend dem Sektor der Energielieferung gewidmet worden.

Das Tennessee-Kraftwerkssystem wurde im Laufe der Zeit tiefgreifenden strukturellen Veränderungen unterzogen. Dies ist von zwei Umständen — dem beständigen Anstieg des Energiebedarfs und den naturgemäss beschränkten Vorräten an Wasserenergie — verursacht worden; letzthin kommt hier ein dritter Faktor — der Einsatz von Kernenergie — hinzu, welcher die Entwicklung des Systems in Zukunft massgebend beeinflussen wird. Die erwähnten Faktoren haben sowohl die Leistungsstruktur des Systems als auch die Betriebsweise der Kraftanlagen wesentlich geändert.

Das Tennessee-Energiesystem war ursprünglich ein reines Wasserkraftsystem, welches Energie aus der Kraftwerkskette des Tennessee-Flusses bezog. Da mit dem raschen Anstieg des Energiebedarfs die vorhandenen Wasserkräfte bald erschlossen waren, musste die zusätzlich benötigte Leistung in Wärmekraftwerken installiert werden. Dies hat zur Errichtung von kohlengefeuerten Dampfkraftwerken geführt, weil im Versorgungsgebiet des Energiesystems ergiebige



VSE 2480

Fig. 1

Das Wilson-Wasserkraftwerk — die erste Kraftanlage des TVA-Systems

Die Leistung des Werks (630 MW) ist in 21 Maschinensätzen installiert. Die einfache Schiffahrtsschleuse, mit einem Hub von 30 m, gehört zu den grössten der Welt

Kohlenfelder vorhanden sind. Das Wasserkraftsystem hat sich dadurch in ein gemischtes hydraulisch-thermisches System verwandelt, in dem sich der Anteil der Wärmekraftwerke beständig vergrößert; zurzeit werden schon rund 80 % der Energie in Wärmekraftwerken erzeugt. Des grossen Umfangs des Systems und der einheitlichen Planung wegen sind die Wärmekraftwerke als ausgesprochene Grossanlagen ausgelegt worden, weshalb ihre wirtschaftlichen Ergebnisse die durchschnittlichen Resultate der USA-Kraftwerke übertreffen.

Die Kernkrafttechnik bringt tiefgreifende Umwandlungen in der Energieversorgung mit sich. Die Kernkraftwerke grosser Leistung sind schon imstande, mit den Kohlenkraftwerken sogar in Gebieten mit günstig auszubeutenden Kohlenvorräten zu wetteifern. Dies hat auch das Tennessee-System veranlasst, sich der Kernenergie zuzuwenden. Einige Grossleistungs-Kernkraftwerke werden gebaut, weitere Werke geplant. Obwohl vorläufig sowohl Brennstoff- als Kernkraftwerke erstellt werden, ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren die neuen Kraftwerke vorwiegend zur Ausnutzung der Kernenergie errichtet werden. Dies wird zum Zusammenwirken von drei Kraftwerkstypen führen. Es ist interessant, diese Entwicklung zu verfolgen, weil alle ursprünglichen Wasserkraftsysteme mit steigendem Energiebedarf und der Erschöpfung der auszubeutenden Wasserkräfte ähnlichen Wandlungen unterstehen und sich den neuen Betriebsbedingungen anpassen müssen. Das Tennessee-Energiesystem stellt ein charakteristisches Beispiel von Umwälzungen dieser Art dar.

2. Flussausrüstung

Die USA-Regierung unternahm 1933 einen planmässigen Ausbau des Tennessee-Flussgebiets. Dazu wurde eine Organisation — die Tennessee Valley Authority (TVA) — gegründet. Sie musste die Planung, den Ausbau und eine allseitige Ausnutzung der natürlichen Gegebenheiten des Gebiets durchführen. Die wichtigsten Aufgaben des umfangreichen Programms waren [1; 2; 3; 4]:

- die Schifffahrt im Tennessee-Flusssystem zu verbessern;
- die Überschwemmungen im Flusstal zu beseitigen;
- Kraftanlagen und Hochspannungsnetze zu errichten und zu betreiben;
- die Land- und Forstwirtschaft des Stromtals zu entwickeln;
- die Ausnutzung der Bodenschätze und den Ausbau der Industrie zu fördern.

Obwohl die TVA noch jetzt, nach 35 Jahren, alle ursprünglich gesteckten Ziele verfolgt, hat doch eine der erwähnten Aufgaben — die Energieversorgung — soviel an Vorrang gewonnen, dass die TVA zurzeit im allgemeinen als ein Energieversorgungsunternehmen angesehen wird. Die Energielieferung der TVA begann 1933 mit dem von den Kriegsbehörden erworbenen 250 MW-Wilson-Wasserkraftwerk (Fig. 1) und hat seitdem ihre Gesamtleistung auf 18 GW gebracht, wovon 4 GW in Wasser- und 14 GW in Wärmekraftanlagen untergebracht worden sind. Mit einer Jahresproduktion von rund 100 TWh ist die TVA zu einem der grössten Energielieferanten der Welt geworden.

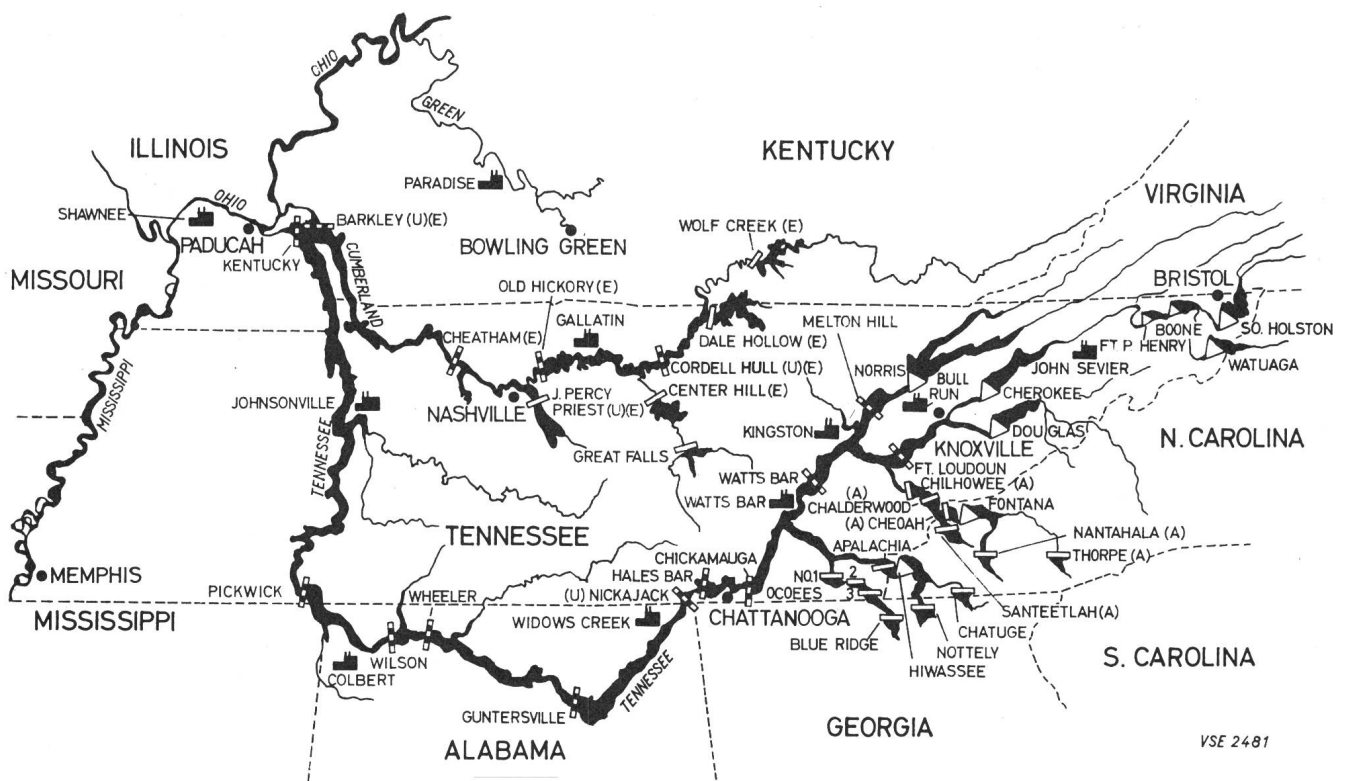


Fig. 2

Das Tennessee-Flussgebiet mit Kraftanlagen

Unten: Staustufen auf dem Hauptstrom

- Wärmekraftwerke
- ▽ hohe Staustämme

- niedrige Staustämme
- ▭ Schifffahrtsdämme

Im weitem wird die Entwicklung des TVA-Kraftwerks-systems erörtert; die Bedienung anderer Wassernutzer wird dabei nur soweit erwähnt, wie sie die Energieerzeugung beeinflusst.

Die TVA konzentrierte ihre Tätigkeit zuerst auf die Errichtung von Staudämmen und Wasserkraftwerken. Die dadurch auf dem Tennessee-Fluss entstandene Kraftwerkskette wurde zum Rückgrat der TVA-Operationen. Später aber, nachdem die vorhandenen Wasserkräfte ausgebaut waren, musste die weitere Zunahme des Energiebedarfs von Wärmekraftwerken übernommen werden. Dadurch ist ein gemischtes Energiesystem entstanden, in dem die thermischen Anlagen schon den überwiegenden Teil der Energie erzeugen. Das Zusammenwirken mit den thermischen Anlagen veränderte die Aufgaben und die Betriebsweise der Wasserkraftwerke [5;6;7]. Da es vorteilhaft ist, den Wasserkraftwerken die kurzfristigen Tageslastspitzen zuzuweisen, ist es wünschenswert, in den Wasserkraftwerken eine genügend grosse Maschinenleistung unterzubringen und zur Spitzendeckung bereitzuhalten. Die Tatsache aber, dass die meisten Wasserkraftwerke des Tennessee-Flußsystems Mehrzweckanlagen sind, welche verschiedene Wassernutzer bedienen, beschränkt die Möglichkeiten, diese Werke als reine Spitzenanlagen einzusetzen [8]. So muss z. B. für die Schifffahrt stets eine minimale Abflussmenge aufrechterhalten werden, weshalb einige Maschinensätze den ganzen Tag gefahren werden, so dass bei niedriger Wasserführung die Beteiligung der entsprechenden Wasserkraftwerke zur Spitzendeckung entsprechend vermindert wird. Es können jedoch geschlossene Kraftwerksketten auch im Mehrzweckbetrieb gewissermassen zur Spitzendeckung beitragen, falls am Oberlauf des Hauptflusses oder auf den Nebenflüssen genügende Wasserspeicher vorhanden sind. Da die Spitzenlastzone in der Leistungsbilanz der Energiesysteme sich allmählich erweitert, wird die zusätzlich nötige Spitzenleistung entweder durch die Erweiterung der bestehenden Wasserkraftwerke oder die Errichtung von Pumpenspeicherwerken erzielt [9]. Deshalb werden gewisse Bauarbeiten auch in den ausgebauten Wasserkraftsystemen fortgesetzt, so dass jedes System sich mit der Zeit verwandelt. Dies trifft auch auf das TVA-Wasserkraftsystem zu. Die Bautätigkeit umfasst hier zurzeit die Errichtung von zwei Staudämmen auf den Nebenflüssen,

die Vollendung des Nickajack-Wasserkraftwerkes (97 MW) auf dem Hauptstrom und den Umbau einiger bestehender Wasserkraftwerke. Es wird auch die Erstellung eines Pumpenspeicherwerkes für 1350 MW erwogen.

Die Auslegung und der Betrieb der Wasserkraftwerke werden von ihrer Energiequelle in grossem Masse beeinflusst. Der Tennessee-Fluss ist ein wasserreicher Strom, der nach der Jahresabflussmenge die vierte Stelle unter den Flüssen der USA einnimmt. Der Hauptstrom entspringt dem Appalachen-Gebirge und mündet nach einem mehr als 1000 km langen Lauf in den Ohio-Fluss (Fig. 2) [10; 11]. Das Einzugsgebiet des Flußsystems beträgt rund 100 000 km² und erstreckt sich auf sieben Staaten. Der Fluss fliesst durch niederschlagsreiche Gebiete (900...1300 mm/Jahr), wobei seine Wasserführung recht veränderlich ist. Die Hochwasserperiode fällt in den Winter, während dem rund 50 % der jährlichen Abflussmenge dargeboten werden. Wegen der stark schwankenden Wasserführung mussten geräumige Wasserspeicher am Oberlauf des Flusses zum Auffangen der Abflussspitzen errichtet werden.

Bei der Mehrzweck-Flussausnützung ist eine gut koordinierte Planung der Wasserbauten unbedingt nötig. Praktische Erfahrungen mit früheren Systemen können hier behilflich sein. Als vor 40 Jahren die ersten Staustufen der TVA geplant wurden, lagen aber noch keine umfangreichen Erfahrungen mit Mehrzweckanlagen vor, weshalb zahlreiche hierbei getroffene Entscheidungen als bahnbrechend angesehen werden können. Von Anfang an musste die Anzahl und die Höhe der Staustufen festgelegt werden. Der Vergleich verschiedener Bauvarianten zeigte, dass eine geringe Anzahl hoher Staudämme die Forderungen der Energieversorgung, der Schifffahrt und der Flutkontrolle besser als eine grössere Anzahl niedriger Aufstauungen erfüllen kann. Die hohen Staustufen schaffen grosse Wasserspeicher und ermöglichen eine wirksame Durchflussregelung zu verwirklichen, wodurch Überschwemmungen beseitigt und die Energieausbeute der Wasserkraftwerke erhöht werden; auch die Schifffahrt ist bei einer geringeren Anzahl von Schleusen bequemer durchführbar.

Die TVA besitzt 29 Wasserkraftwerke, wovon 20 von der TVA errichtet, die übrigen von anderen Organisationen erstellt und ins TVA-Energiesystem eingegliedert worden sind.

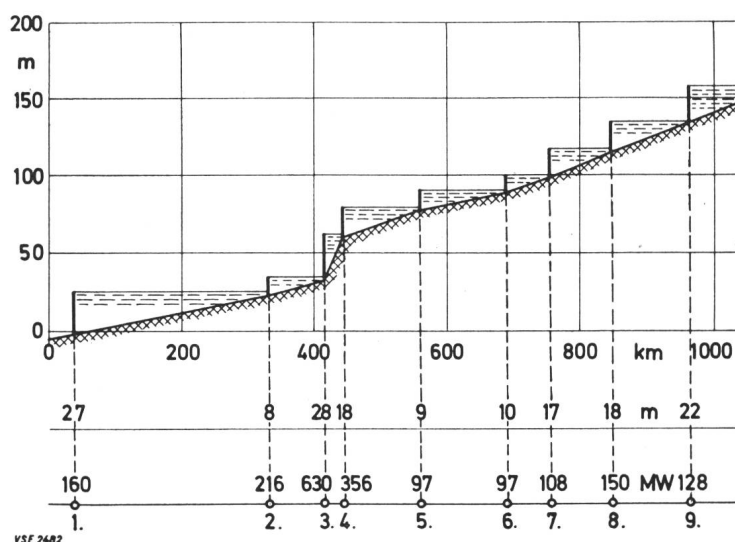


Fig. 3

Die Kraftwerkskette auf dem Tennessee-Hauptstrom

Die Staustufen: 1 Kentucky; 2 Pickwick; 3 Wilson; 4 Wheeler; 5 Gunterville; 6 Nickajack; 7 Chickamauga; 8 Watts Bar; 9 Fort Loudoun



Fig. 4

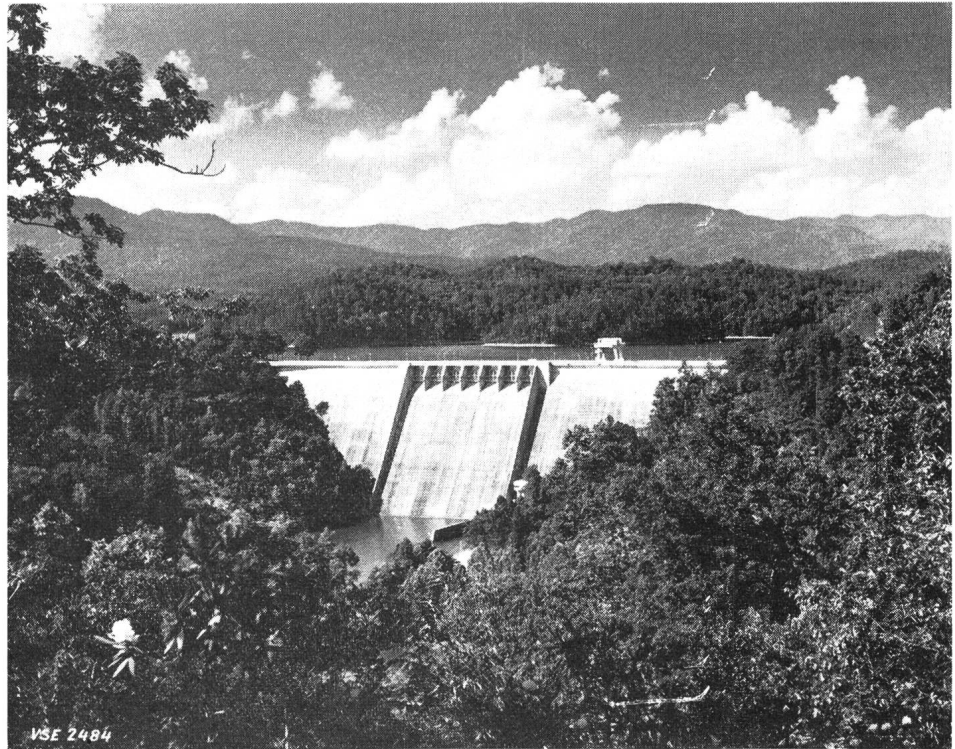
Die Hochwasserschutz-Staudämme auf den Tennessee-Nebenflüssen

Fig. 5

Der Hiwassee-Staudamm

Höhe 100 m, Länge 420 m, das 35 km lange Staubecken hat einen Nutzinhalt von $0,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$

Die Maschinenanlage, gleich hinter dem Damm gelagert (nicht sichtbar), enthält einen 57 MW-Turbinensatz und einen 60 MW-Pumpspeichersatz



Die meisten Staustufen sind Mehrzweckanlagen, welche der Energieerzeugung, der Schifffahrt und dem Hochwasserschutz dienen. Die Staudammkette hat den Tennessee-Hauptstrom auf einer Länge von 900 km schiffbar gemacht, wo-

Die Gesamtleistung der TVA-Wasserkraftwerke beträgt rund 3100 MW; sie liefert jährlich ca. 15 TWh, so dass die Ausnutzungsstunden durchschnittlich 4800...5000 h/a betragen. Die Ausnutzungsdauer einzelner Wasserkraftwerke ist, je nach ihrer Betriebsweise, sehr verschieden — von 1800 bis 8000 h/a.

Wasserkraftwerke auf dem Hauptstrom

Tabelle I

Kraftwerk	Fallhöhe m	Inst. Leistung MW	Jahresarbeit ¹⁾ GWh
Kentucky	27	160	1 300
Pickwick	8	216	1 385
Wilson	28	630	2 825
Wheeler	18	356	1 475
Guntersville	9	97	795
Nickajack ²⁾	10	97	195
Chickamauga	17	108	770
Watts Bar	18	150	1 015
Fort Loud	22	128	620
Insgesamt	157	1942	10 380

¹⁾ Angaben des Betriebsjahres 1968.
²⁾ Neues Werk, welches das Hales Bar-Werk ersetzt hat und 1968 in Betrieb genommen worden ist.

Bei allseitiger Flussaunutzung können die Forderungen einzelner Wasserwirtschaftszweige nur teilweise erfüllt werden, weil die Verarbeitung der Wasservorräte für jede Zwecksetzung verschieden verlaufen soll [5; 8]. Man muss hier deshalb zu einer Kompromisslösung greifen. Die Energieversorgung nutzt die Wasservorräte gemäss dem Ablauf des Energiebedarfs aus, wobei es vorteilhaft ist, den Wasserstand in den Speichern hochzuhalten, so dass die volle Fallhöhe zur Energieerzeugung ausgenutzt werden kann. Der Wasservorrat wird nur kurz vor der Hochwasserperiode verarbeitet, um das Speichervolumen zur Aufnahme neuer Hochwassermengen freizumachen. Falls die Wasserkraftwerke bei niedrigem Wasserdargebot zur Spitzendeckung eingesetzt werden, dann gefährden die starken Schwankun-

bei der Wasserablass aus den Staubecken der Nebenflüsse so geregelt wird, dass Hochwasserschäden verhindert werden. Die billige Wasserenergie hat die energieintensiven Industrien — elektrochemische und elektrothermische Werke — im Versorgungsgebiet der TVA gefördert.

Auf dem Hauptstrom befinden sich neun Dämme (Fig. 3 und Tabelle I), an welchen eine Wasserkraftleistung von rund 1950 MW installiert worden ist; sie kann jährlich rund 10 TWh Energie ins Netz abgeben [12].

Auf den Nebenflüssen sind 20 Staudämme erstellt worden, die in grossem Masse der Abflussregelung dienen (Fig. 4) [13]. Die auf diesen Gebirgsflüssen erreichbaren Fallhöhen sind im allgemeinen grösser als im Mittel- und Unterlauf des Hauptstroms (Fig. 5). Angaben bezüglich einiger der höchsten Staustufen sind in Tabelle II angeführt.

Die Staudämme der TVA

Tabelle II

Staustufe	Dammbauart	Ausmasse, m		Zweck ¹⁾	Leistung des Wasserkraftwerks MW
		Höhe	Länge		
Fontana	Schwerkraft-Beton	155	780	H-E	202
Watauga	Erd- und Stein	105	300	H-E	50
Hiwassee	Schwerkraft-Beton	100	420	H-E-S	117
South Holston	Erd- und Stein	95	490	H-E	35
Norris	Schwerkraft-Beton	87	610	H-E	100
Kentucky	Schwerkraft-Beton	68	2760	H-E-S	160
Douglas	Schwerkraft-Beton	66	560	H-E	112
Cherokee	Erd- und Stein	70	2250	H-E	120

¹⁾ H = Hochwasserschutz, E = Energieerzeugung, S = Schifffahrt.

Zwecksetzung: Kosten:	Energie- versorgung	Schifffahrt	Flut- kontrolle	Insgesamt
Unmittelbare Baukosten	Mio \$ 281	132	57	470
	% 60	28	12	100
Mehrzweck-Kosten	Mio \$ 177	119	137	433
	% 41	27	32	100
Total	Mio \$ 458	251	194	903
	% 51	28	21	100

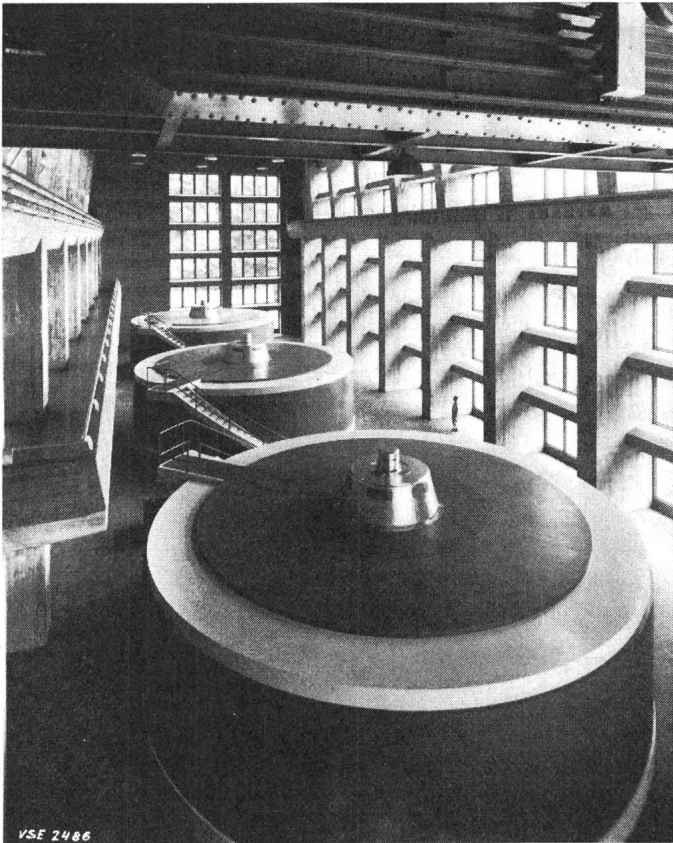


Fig. 7

Die Maschinenanlage des Fontana-Wasserkraftwerks (3x67,5 MW)

des Gebiets. Am schwierigsten ist es, die mit der Flutabwendung verknüpften Gewinne zu bewerten, weshalb man sich mit Schätzungen begnügen muss. Man nimmt an, dass der Hochwasserschutz der TVA-Anlagen bisher Flutverwüstungen in einem Wert von 520 Mio. \$ abgewendet hat, d. h. die Ersparnisse übertreffen das Doppelte der entsprechenden Aufwendungen.

3. Thermische Kraftanlagen

Das TVA-Energiesystem, mit einer Jahresarbeit von nahezu 100 TWh, ist der grösste Energieversorger der USA. Sein Versorgungsgebiet umfasst 200 000 km² und übertrifft zweimal das Einzugsgebiet des Tennessee-Flußsystems. Da ein Werk die Energienachfrage seines Gebiets vollständig befriedigen soll, musste der Kraftwerksbau auch nach der Fertigstellung der ausbauwürdigen Wasserkraftstufen fortgesetzt werden. Die Bautätigkeit wurde dann auf den Sektor der Dampfkraftwerke umgelagert. Der Anteil der Wärmekraftwerke hat nach dem Jahre 1954 rasch zugenommen, weil der Bau von neuen Wasserkraftwerken zu diesem Zeitpunkt im wesentlichen abgeschlossen war. Diese Veränderung der Leistungsstruktur beeinflusst die Aufgaben der Wasserkraftwerke, indem die regelbaren Wasserkraftwerke mehr und mehr mit der Deckung der Tageslastspitzen beauftragt werden. Wenn die Wasserkraftwerke die Schwan-

kungen der Tageslast aufnehmen, dann fahren die Wärmekraftwerke mit einer im voraus festgelegten Last, wodurch ihre Betriebsverhältnisse sich verbessern. Dieser Umstand hat die Ergebnisse der TVA-Dampfkraftwerke günstig beeinflusst.

Die Aufteilung der Energieausbeute auf die hydraulische und thermische Leistung ist in Tabelle IV angegeben [12].

Tabelle IV enthält auch den Energieertrag der Wasserkraftwerke der ALCOA und Corps of Engineering (424 und 725 MW), weil diese Werke ins TVA-Verbundnetz eingeschlossen sind.

Nach 1954 ist die Leistungszunahme des TVA-Systems vorwiegend durch den Ausbau der thermischen Anlagen erzielt worden, so dass von der zurzeit installierten Gesamtleistung von rund 18 GW ungefähr 14 GW oder 78 % sich in Wärmekraftwerken befinden (Fig. 8) [15]. Dieser Vorgang wird sich in den kommenden Jahren fortsetzen, wobei

Die Energieausbeute des TVA-Systems

Tabelle IV

Jahr	Inst. Leistung MW	Lastspitze MW	Energieausbeute				
			hydraulische TWh	%	thermische TWh	%	gesamte TWh
1954	6 075	5 295	12,8	43	17,1	57	29,9
1960	11 370	9 640	17,5	28	45,9	72	63,4
1964	13 350	12 220	16,8	23	56,5	77	73,3
1968	18 200	15 270	20,8	23	69,6	77	90,4

in Neubauten des thermischen Sektors Kernkraftwerke die führende Rolle übernehmen werden. Die hydraulische Leistung kann nur durch Erweiterung einiger bestehenden Werke oder durch Erstellung von Pumpspeicherwerken erhöht werden.

Fig. 8
Der Leistungsanstieg des TVA-Systems
a Wasserkraftleistung
b thermische Leistung

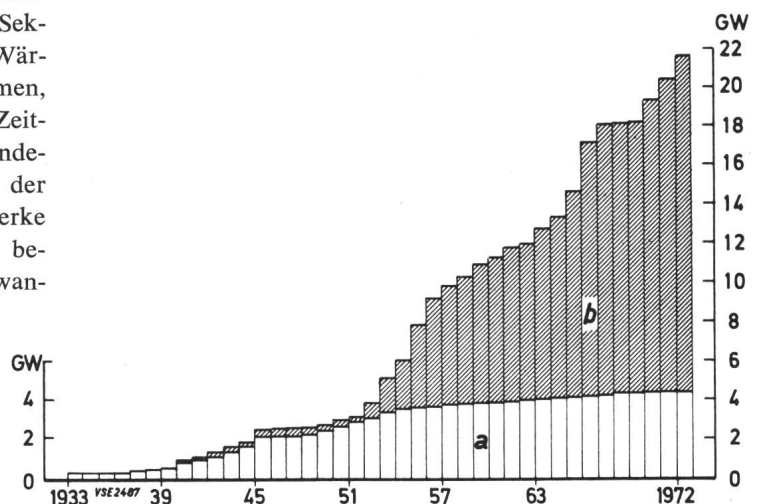


Tabelle V

Kraftwerk	Inbetriebnahme	Leistung MW	Anzahl der Aggregate	Erzeugung ¹⁾ GWh	Ausnutzungsstunden h/a
Johansville	1951-58	1 480	10	6 550	4425
Widows-Creek	1952-61	1 980	8	8 980	4535
Shawnee	1953	1 725	10	10 240	5940
John Sevier	1955	825	4	3 670	4450
Colbert	1955-65	1 400	5	6 790	4850
Gallatin	1958	1 255	4	6 360	5070
Allen Thomas H.	1958	990	3	5 050	5100
Paradise	1963	1 410	2	9 560	6780
Kingston	1964	1 700	9	7 020	4130
Bull Run	1967	950	1	5 400	5680
Insgesamt		13 715	56	69 620	5080

¹⁾ Im Betriebsjahr 1968.

Die Dampfkraftwerke der TVA sind grosse, moderne Anlagen; die Leistungen der meisten Werke übertreffen 1,0 GW, wobei in den Neubauten Maschinensätze sogar für 1,0...1,3 GW installiert werden (Tabelle V und VI).

Seit 1958 sind in den Kohlenkraftwerken der TVA sechs neue Maschinensätze für Einheitsleistungen über 500 MW installiert worden; durch ihre hohen Leistungen sind erhebliche Ersparnisse an Baukosten erzielt worden (Fig. 9) [16]. Die 500...700 MW-Aggregate arbeiten mit einem Dampfdruck von 169 kg/cm²; für die grösseren Einheiten wird der überkritische Druck (246 kg/cm²) gewählt [17]. Das neue Bull Run-Dampfkraftwerk ist in Fig. 10, sein Turboaggregate in Fig. 11 gezeigt. Dieses Werk hat nur einen 950 MW-Maschinensatz, wobei die Kondensatoren der Turbine beiderseits des Niederdruckteils angeordnet sind, wodurch tiefe Fundamente vermieden wurden; der Schornstein des Werks ist 240 m hoch.

Die thermischen Anlagen der TVA arbeiten sehr wirtschaftlich; ihr spezifischer Wärmeverbrauch betrug im Jahre 1967 durchschnittlich 2400 kcal/kWh, dem ein thermi-

Die neu zu erstellenden Aggregate

Tabelle VI

Kraftwerke	Energiequelle	Anzahl der Aggregate	Leistung MW	Anteil %
Tims Ford	Wasserkraft	1	45	0,4
Paradise	Kohle	1	1150	38,6
Cumberland	Kohle	2	2600	
Browns Ferry	Kernenergie	3	3456	60,7
Sequoyah	Kernenergie	2	2441	
Umbauten			25	0,3
Insgesamt		9	9717	100,0

scher Wirkungsgrad von 35,8 % entspricht. Der Wärmeverbrauch der besten Werke lag bei 2280 kcal/kWh. Man hofft, mit den neu zu erstellenden Grossaggregaten Wirkungsgrade von ca. 40 % zu erreichen. Die Dampfkraftwerke verwerten Steinkohle, die aus den örtlichen Kohlenfeldern stammt. 1968 wurden 27,7 · 10⁶ t Kohle verbraucht; der durchschnittliche Kohlenpreis war 4,36 \$/t, dem ein Wärmepreis von 0,75 \$/Gcal entspricht. Der grösste Teil der Kohle wurde über den Schienenweg (52 %), der Rest über den Wasserweg oder mittels Lastkraftwagen zu den Kraftwerken

gebracht. Die günstigen Ergebnisse der Dampfkraftwerke sind nicht bloss durch ihre grosse Leistung und technisch vollkommene Ausrüstung, sondern auch durch die günstige Auslastung zu erklären. Zwei Faktoren gleichen die Belastung der thermischen Anlagen aus:

- a) die regelbaren Wasserkraftwerke übernehmen die kurzfristigen Tageslastspitzen;
- b) die im TVA-Gebiet konzentrierten energieintensiven Industrieanlagen weisen einen gleichmässigen Lastverlauf während des ganzen Jahres auf.

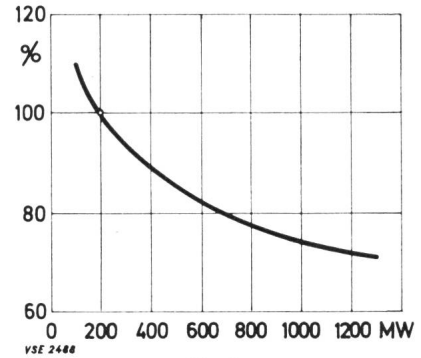


Fig. 9

Die relativen Baukosten der Dampfkraftanlagen je nach der Einheitsleistung der Maschinensätze

Die grosse Last des TVA-Netzes, der rasche Lastanstieg und die einheitliche Planung der Energieanlagen bieten hier die Möglichkeit, von den wirtschaftlichen Vorzügen der sehr grossen Energieaggregate vollen Gebrauch zu machen. Ende 1968 befand sich im TVA-System eine neue Kraftwerkslei-

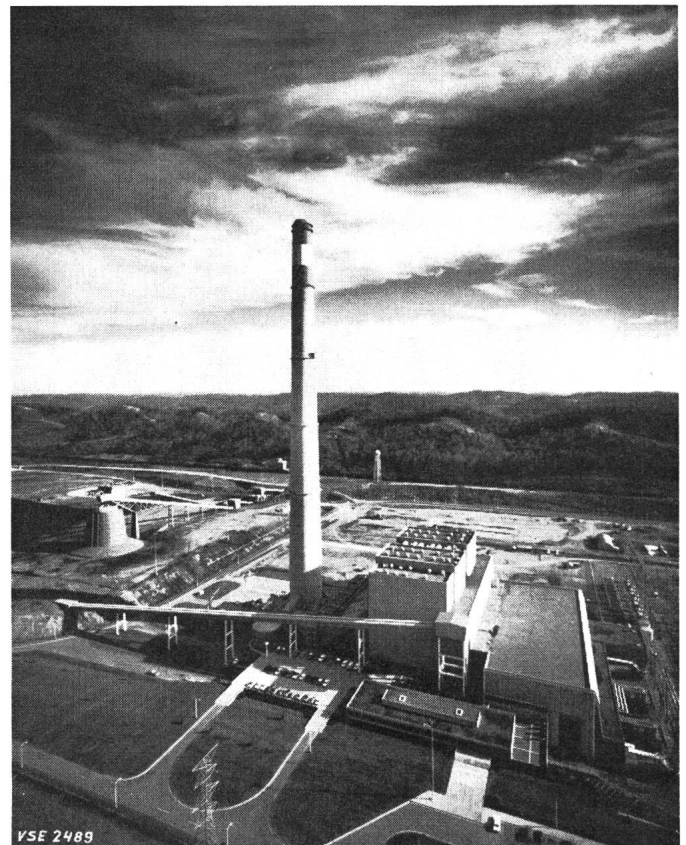
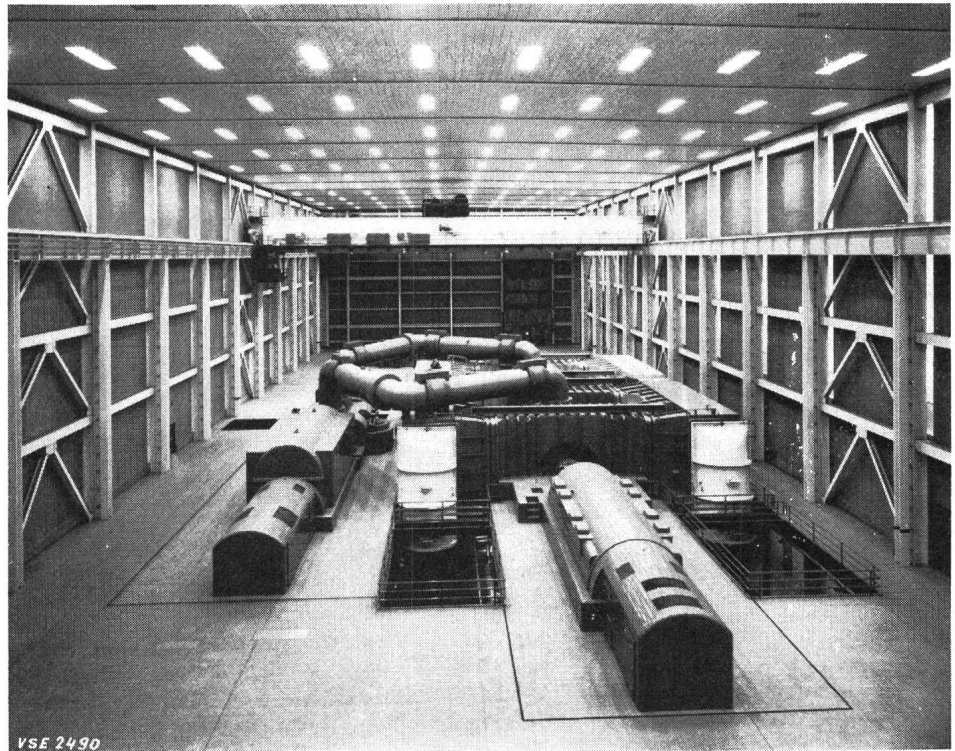


Fig. 10

Die Gesamtansicht des Bull Run-Dampfkraftwerks

Fig. 11

Der 950 MW-Turbosatz des Bull Run-Dampfkraftwerks



stung von 9,7 GW im Bau oder in Planung, welche bis 1974 in Betrieb genommen werden soll. Sie wird die installierte Leistung der TVA von 18,2 auf 28 GW bringen, d. h. um 50 % erhöhen. Die neue thermische Leistung wird in nur 8 Grossaggregaten mit Einheitsleistungen von über 1,0 GW installiert werden (Tabelle VI).

Zwei Tendenzen sind ganz klar in der Entwicklung des TVA-Systems zu ersehen:

- a) der überwiegende Teil der neuen Leistung wird in Kernkraftwerken installiert werden;
- b) die Leistung wird in ausgesprochenen Grossaggregaten untergebracht werden.

Die neuen Aggregate werden die grössten Energieerzeugungseinheiten der Welt sein. Es ist bemerkenswert, dass 8 solche Aggregate, die gewissermassen als Versuchseinheiten angesehen werden können, fast gleichzeitig erstellt werden und in einer Zeitspanne von vier Jahren (1970...74) in Betrieb genommen werden sollen. Dies illustriert Möglichkeiten, welche in ausgedehnten Verbundsystemen verwirklicht werden können. Der Ausbau der Kraftwerke und Hochspannungsnetze wird eine Kapitalanlage von mehr als 1,5 Mia \$ benötigen, die mittels Einnahmen aus Energielieferung und Regierungs-Schuldscheinen (Bonds) gedeckt werden soll.

Die Aggregate für mehr als 700 MW haben bisher eine etwas geringere Betriebssicherheit als die kleineren Aggregate aufgewiesen. Es mangelt aber noch an genügend Betriebserfahrungen bezüglich Einheiten dieser Grösse, und man erwartet, dass nach einer gewissen Betriebsperiode sie einen ungefähr gleichen Verfügbarkeitsgrad wie die kleineren Einheiten aufweisen werden [16].

Die Gründe, die zur Auswahl der angegebenen Kraftwerk-ausrüstung führten, sind folgende: Eine rasche Lastzunahme fördert die Leistungskonzentration in grossen Ma-

schinensätzen, wodurch die Kernkraftwerke gewisse Vorteile erwerben, weil ihre spezifischen Baukosten bei der Leistungserhöhung mehr als die Kosten der Brennstoffkraftwerke zurückgehen. Fig. 12 zeigt die Wochenlastdiagramme des TVA-Systems. Die Tageslastkurven sind gut ausgeglichen, so dass der Tageslastfaktor 0,85 übersteigt; jahreszeitliche Lastunterschiede werden aber durch die klimatischen Verhältnisse verursacht, besonders weil die elektrische Raumheizung eine wichtige Rolle im Energiebedarf erworben hat. Die Wasserkraftwerke der TVA decken vorwiegend die veränderlichen Tageslastzonen, wogegen die technisch vollkommenen

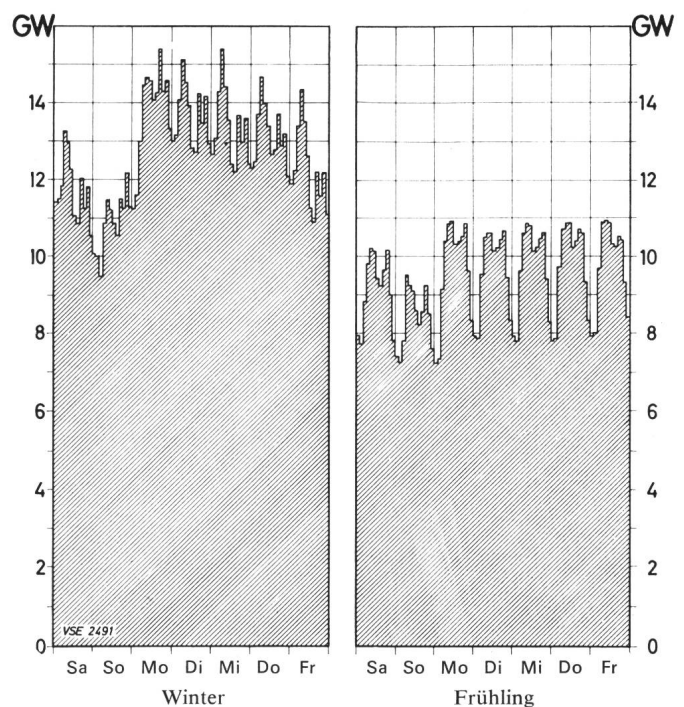


Fig. 12

Die Wochenlastdiagramme des TVA-Energiesystems (1966)

Wärme- kraftwerke in der Grundlastzone arbeiten. Die Lastzunahme kann dabei entweder durch die Leistungserhöhung der Spitzen- oder der Grundlastwerke erzielt werden (Fig. 13):

Im ersten Falle soll die neue Leistung in regelbaren Wasserkraftwerken oder in besonders ausgelegten Wärme- kraftwerken, deren Anlagekosten niedrig liegen, installiert werden. Wenn die ausbauwürdigen Wasserkräfte schon erschlossen sind, kommen für Spitzenzwecke vorwiegend Pumpspeicherwerke in Frage. Bei der Leistungserhöhung des Systems mittels zusätzlicher Spitzenwerke werden die bestehenden Mittellastwerke mit der Zeit mehr ausgelastet, weil sie den Lastanstieg der Schwachlastperiode aufnehmen oder auch Pumpenergie für Pumpspeicherwerke liefern.

Im zweiten Falle wird die neue Leistung in technisch vollkommenen Wärme- kraftwerken untergebracht und zur Deckung der Grundlast eingesetzt. Dadurch werden die Lastzonen der bestehenden älteren Wärme- kraftwerke nach oben verschoben, so dass ihre Energieausbeute sich vermindert.

Die Auswahl der günstigsten Bauvariante wird durch den wirtschaftlichen Vergleich der erwähnten Möglichkeiten entschieden, wobei in Energiesystemen mit ausgeglichenen Last-

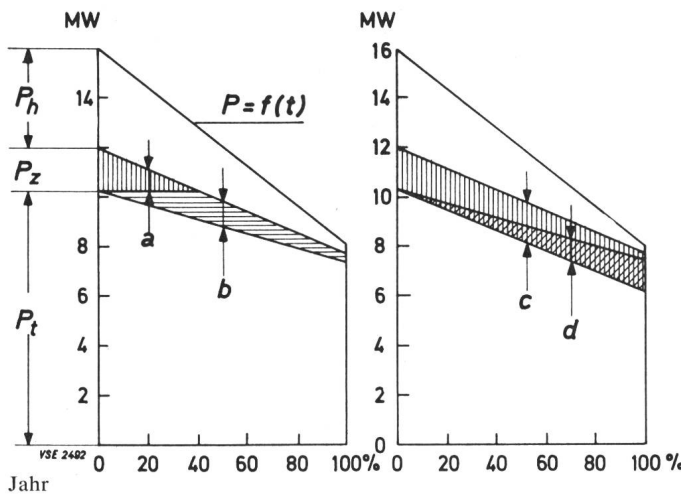


Fig. 13

Die Deckung der Lastzunahme

links: mittels neuer Spitzenwerke; rechts: mittels neuer Grundlastwerke; $P = f(t)$ vereinfachte Jahresdauerkurve; P_t Last der Dampfkraftwerke; P_h Last der Wasserkraftwerke; P_z Lastzunahme (zwischen den Lastzonen der thermischen und hydraulischen Leistung eingetragen); a Auslastung der neuen Spitzenwerke; b Auslastung der älteren Dampfkraftwerke; c Auslastung der neuen Dampfkraftwerke; d Entlastung der älteren Dampfkraftwerke

diagrammen die Variante der neuen Grundlastwerke sich vorteilhafter erweisen kann. Dies ist bei der Erweiterung des TVA-Systems der Fall gewesen. Ein anderes Problem ist die Entscheidung über die auszubehutende Primärenergiequelle; diesbezüglich steht im TVA-Gebiet Kohle aus den örtlichen Kohlenfeldern mit der Kernenergie im Wettbewerb. Da die Kostenstruktur der beiden Varianten sich unterscheiden, müssen die Energiekosten am Verbrauchsort verglichen werden; die Kernkraftwerke werden dabei in der Regel mit geringeren Kosten der Energieübertragung belastet, weil sie die Möglichkeit bieten, in der Nähe der Verbrauchszentren erstellt werden zu können.

Der Kostenvergleich der Kernenergie- und der Brennstoffkraftwerke ist in Tabelle VII angegeben [18; 19]. Für das Kernkraftwerk waren Angebote mit Siede- und Druckwasserreaktoren eingereicht worden, die sich wirtschaftlich

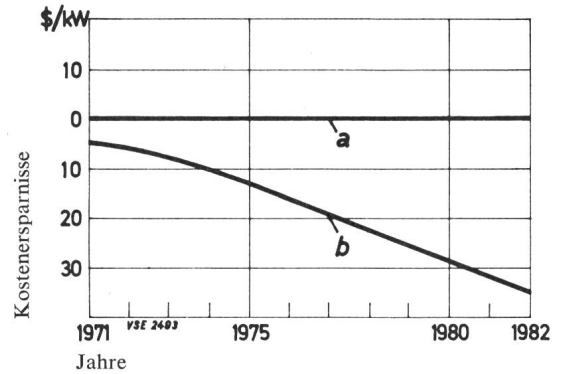


Fig. 14

Die zu erwartenden Kostensparnisse nach dem Barwert der sämtlichen Ausgaben

- a Cumberland-Kohlenkraftwerk (Bezugswert);
- b Browns Ferry-Kernkraftwerk, mit Siedewasser-Kernreaktoren

nur unwesentlich unterschieden. In Tabelle VII sind die Zahlenangaben nur bezüglich des Siedewasserreaktors angeführt, weil Reaktoren dieser Bauart für das betreffende Kernkraftwerk ausgewählt worden sind. Die Kostengrößen beziehen sich auf die ersten 12 Betriebsjahre der Anlagen (nach dem Jahre 1970), bei einer Abschreibungsdauer von 35 Jahren und einem Zinssatz von 4,5 %. Da die neuen Werke für den Grundlastbetrieb geplant sind, ist ihr Vergleich bei einem Ausnutzungsfaktor von 0,85 durchgeführt worden.

Die Ersparnisse, die durch die Auswahl des Kernkraftwerks zu erwarten sind, werden mittels des Barwerts aller Ausgaben je kW für eine 12jährige Betriebsperiode in Tabelle VIII und Fig. 14 angegeben [18].

Das Kernkraftwerk wird also in 12 Jahren Ersparnisse von rund 35 \$/kW ergeben. Man schätzt, dass die in Fig. 14 veranschaulichte Kostentendenz sich in den folgenden Jah-

Kostenvergleich

Tabelle VII

Kraftwerksart Standort		Kernkraftwerk Browns Ferry	Brennstoffkraftwerk Cumberland
Elektrische Leistung	MW	2 × 1150	2 × 1100
Dampfzustand	at/°C	68/284 ⁰	246/540 ⁰ /540 ⁰
Wärmeverbrauch	kcal/kWh	2660	2255
Primärenergiepreis	\$/Gcal	0,47	0,75
Die Baukosten:			
des Kraftwerks	\$/kW	116,0	117,0
der Übertragung	\$/kW	1,4	6,0
Energiekosten am Kraftwerk			
Kapitalkosten	Mills/kWh ¹⁾	0,93	0,90
Energieträger	Mills/kWh ¹⁾	1,25	1,69
Betriebsausgaben	Mills/kWh	0,19	0,24
Insgesamt	Mills/kWh ¹⁾	2,37	2,83
Übertragungskosten	Mills/kWh	0,02	0,07
Energiekosten am Verbrauchsort	Mills/kWh	2,39	2,90

¹⁾ 1 Mill = 0,001 \$.

Ausgaben:		Browns Ferry Kernkraftwerk	Cumberland Brennstoff- kraftwerk
Baukosten	\$/kW	116,0	117,0
Energieträger	\$/kW	82,8	111,7
Betriebsausgaben	\$/kW	15,2	15,8
Kraftwerksausgaben	\$/kW	214,0	244,5
+ Energieübertragung	\$/kW	2,1	7,2
Insgesamt	\$/kW	216,1	251,7

ren fortsetzen wird, so dass nach 25 Jahren die Ersparnisse auf rund 70 \$/kW anwachsen werden.

Bei Aggregatleistungen in einer Größenordnung von 1000 MW sind die Erstellungskosten des Kern- und des Kohlenkraftwerks ungefähr gleich, weil die etwas höheren Baukosten der Kernreaktoranlage durch den Wegfall der Kohlenbehandlungsanlage ausgeglichen werden. Auch die Übertragungskosten der Energie sind für das Kernkraftwerk niedriger. Die Vorzüge eines besseren thermischen Wirkungsgrads des Kohlenkraftwerks werden durch den höheren Preis der fossilen Brennstoffe wettgemacht, so dass die Kosten des Primärenergieträgers im Kernkraftwerk sogar niedriger als im Kohlenkraftwerk erwartet werden. Die Zinsen für die kostspielige Uranladung (ca. 33 Mio \$) sind in die Energiekosten einbezogen worden. Das Kohlenkraftwerk benötigt eine grössere Anzahl von Betriebspersonal (250 gegenüber 150 im Kernkraftwerk), weil zur Kohlenbeschaffung eine erhebliche Anzahl von Arbeitern erforderlich ist.

Auf Grund des angeführten Kostenvergleichs hat sich die TVA für den Bau eines Kernkraftwerks am Browns Ferry entschlossen, wozu die Bauarbeiten schon im Gange sind. Das Werk wird am Wheeler Staudamm errichtet; es wird drei Aggregate enthalten, die 1970...72 in Betrieb gesetzt werden sollen; mit einer Endleistung von 3,4 GW wird das Werk das grösste Kernkraftwerk der Welt sein. Ein zweites Kernkraftwerk wird bei Sequoyah für eine Leistung von $2 \times 1220 = 2440$ MW erstellt; seine Inbetriebnahme soll planungsgemäss 1973/74 erfolgen. Die TVA wird dann mit einer installierten Kernkraftleistung von 5,8 GW die führende Rolle unter den Werken der USA in der Verwertung dieser neuen Energiequellen spielen.

Die Anordnung des Browns Ferry-Kernkraftwerks ist in Fig. 15, die Erstellung der Reaktorgehäuse in Fig. 16 gezeigt [20; 21; 22]. Die beiden Reaktoren werden in einem gemeinsamen Gebäude untergebracht. Sie werden eine gedrängte Bauweise aufweisen, mit einer Leistungsdichte des Reaktorkerns von 50 kW/l; der Abbrand des leicht angereicherten Urans soll 19 000...25 000 MWd/t betragen. Die 1150 MW-Einwellen-Dampfturbinen werden mit Satttdampf arbeiten und 1280 MVA-Generatoren betreiben; die Ständer der Generatoren sollen mit Wasser, die Läufer mit Wasserstoff gekühlt werden. Die Gesamtlänge des Turbosatzes wird 70 m betragen, wogegen die 210 MW-Turbosätze des vor 10 Jahren erstellten Kernkraftwerkes Dresden 35 m lang waren; also während die Länge der Turbosätze sich verdoppelt hat, ist ihre Leistung um das fünffache erhöht worden. Diese Tatsachen betonen die Vorzüge der sehr grossen Aggregate in ausgedehnten Energiesystemen.

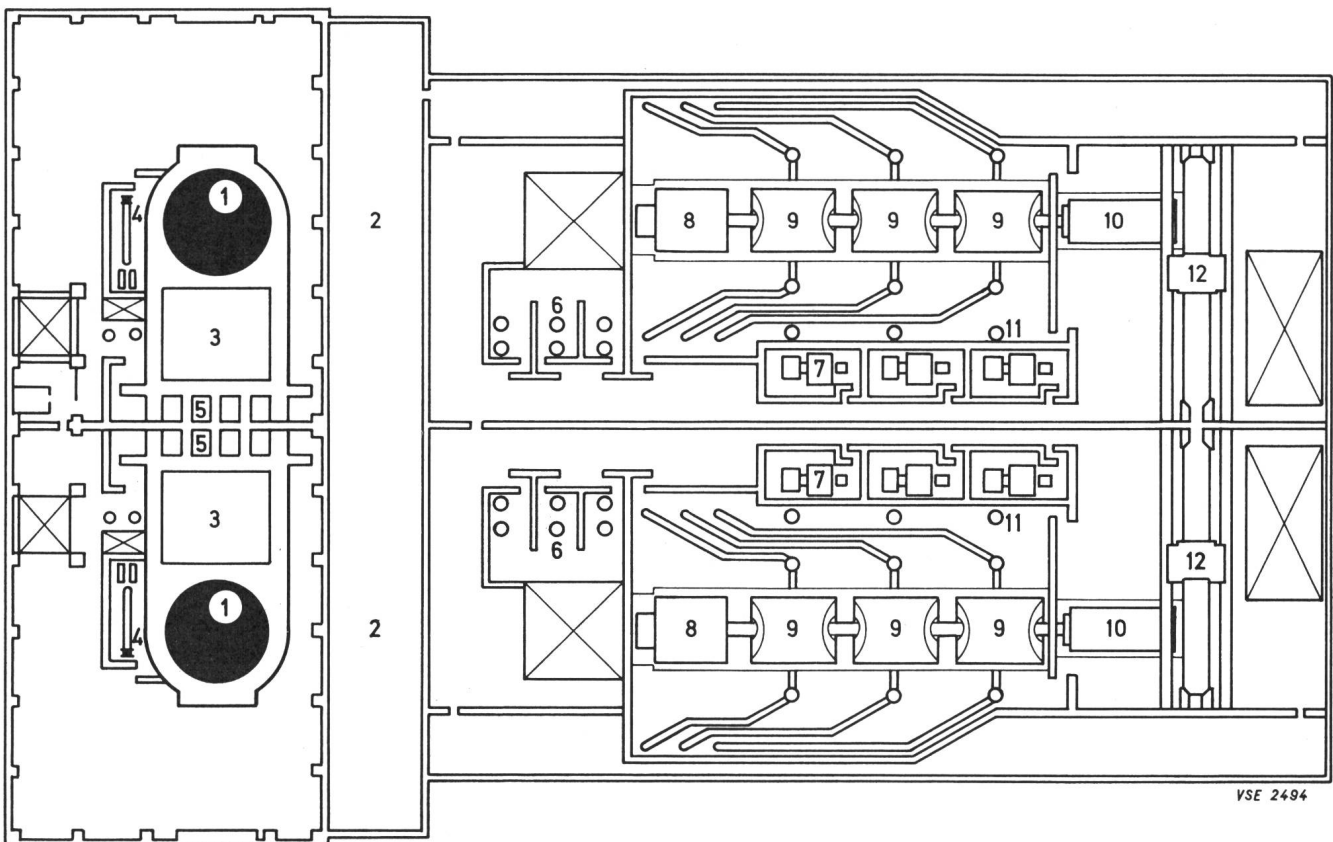
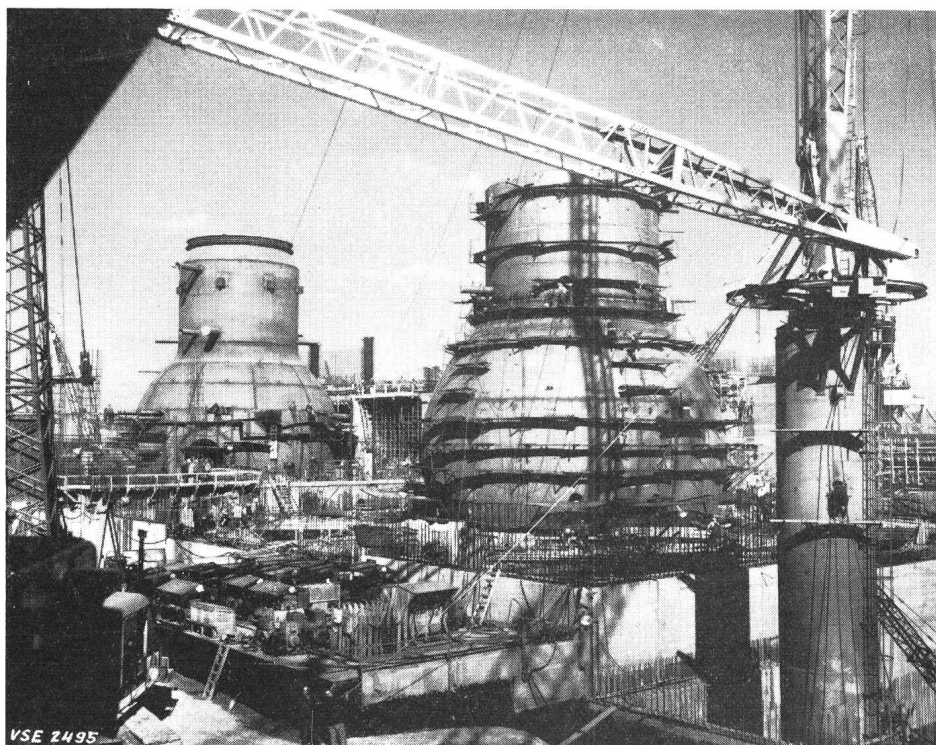


Fig. 15
Der Plan des Browns Ferry-Kernkraftwerks

- 1 Reaktoren; 2 Kommandoraum; 3 Brennstofflager-Becken; 4 Brennstoff-Becken (bestrahlte Elemente), Wärmeaustauscher und Pumpen;
- 5 Brauchwasser-Reinigungsanlage; 6 Hochdruck-Überhitzer; 7 Speiswasser-Pumpenturbinen; 8 Hochdruckturbinen; 9 Niederdruckturbinen;
- 10 Generatoren; 11 Niederdruck-Überhitzer; 12 Krananlage



Das Sequoyah-Kernkraftwerk wird zwei Druckwasserreaktoren enthalten. Die Verkleinerung des kostspieligen Reaktorgebäudes wird hier durch den von Westinghouse vorgeschlagenen Eiskühler, d. h. durch Aufspeicherung von grossen Eismassen (ca. 2000 t) oberhalb des Kernreaktors erzielt werden [17].

Die beachtungswerten Umstände bezüglich des Kernenergieeinsatzes in das TVA-System sind:

1) die ausserordentlich grosse Leistung der ersten Kernkraftwerke und ihrer Aggregate, welche die Leistungswerte der bisher betriebenen Kernkraftanlagen bei weitem übertreffen;

2) gleichzeitige Installierung von fünf Grossaggregaten, die in Zeitabständen von nur je einem Jahr in Betrieb genommen werden sollen;

3) die von den Kernkraftwerken erwarteten Kosteneinsparungen, die durch hohe Einheitsleistungen, technische Fortschritte im Kernreaktorbau und Erstellung von mehreren Aggregaten gleicher Bauart erzielt werden können. Dies weist auf das hohe Vertrauen hin, welches diese neue Energiequelle schon erworben hat.

Die Ausnützung der fossilen Brennstoffe ist mit dem Bau der erwähnten Kernkraftwerke noch nicht aufgegeben. So wird zurzeit auch ein neues Kohlenkraftwerk für $2 \times 1300 = 2600$ MW im Cumberland-Gebiet errichtet, wo Kohle aus den nahen Kohlenfeldern herangeschafft werden kann. Die Erweiterung des TVA-Systems wird in den kommenden Jahren noch auf der Grundlage aller drei vorhandenen Energiequellen — der Wasser-, Kohlen- und Kernenergie — erfolgen. Man versucht, diese Primärenergieträger gemäss ihren Eigentümlichkeiten in den Systembetrieb so einzuglie-

dern, dass optimale Gesamtergebnisse erzielt werden können. Eine vielseitige wirtschaftliche Beurteilung aller vorhandenen Naturgegebenheiten ist von Anfang an die führende Richtlinie in der Entwicklung des TVA-Systems gewesen; es scheint, dass dieser Grundgedanke auch in Zukunft beibehalten werden wird.

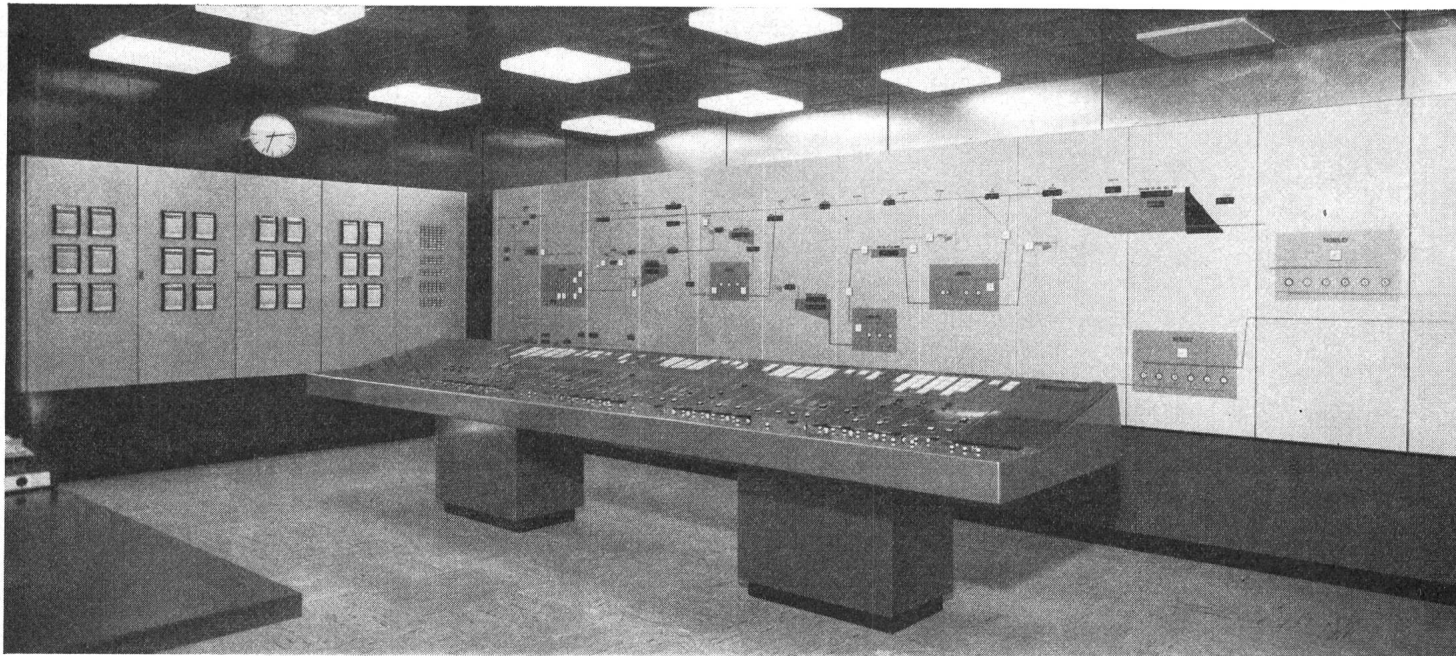
4. Die Energiewirtschaft des TVA-Systems

Die Lieferung von Energie ist zur weitaus wichtigsten Tätigkeit der TVA geworden. Die Energieversorgung wird unabhängig von den anderen Aufgaben der TVA betrieben und muss wirtschaftlich selbständig sein. Da die Energieversorgung unmittelbare Einnahmen bringt, muss die von der Regierung aufgebrachte Kapitalanlage nach einer gewissen Zeitperiode samt mässigen Zinsen an die Regierungskasse zurückgezahlt werden.

Die Kraftwerksleistung des TVA-Systems setzt sich aus einer beschränkt regelbaren hydraulischen Leistung (ca. 20 %) und aus der Leistung grosser technisch vollkommener Dampfkraftwerke zusammen. Die Lastkurven sind ziemlich ausgeglichen, wozu industrielle Grossverbraucher — die elektrochemische Industrie und die Anlagen der Atomenergiekommission — viel beitragen. Im Falle eines vorübergehenden Leistungsmangels, z. B. bei einer ungewöhnlich niedrigen Wasserführung, können einige Industrieabnehmer vom Netz abgeschaltet werden; dies setzt den Bedarf an Spitzen- und Reserveleistung des Kraftwerkssystems zeitweilig herab [23; 24]. Der Ausgleich der Leistungsbilanz wird in zunehmendem Masse auch durch Leistungsaustausch mit anderen Energiesystemen erreicht; dazu werden leistungsfähige 500 kV-Verbindungsleitungen ausgebaut.

Fortsetzung in der nächsten Nummer

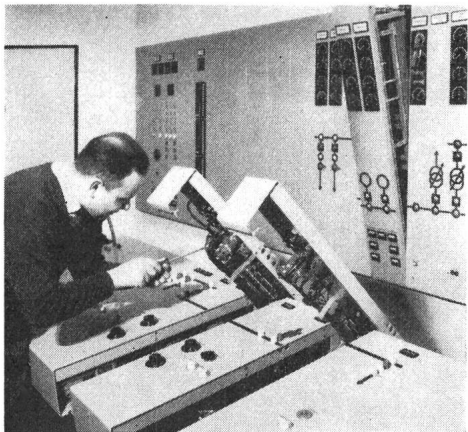
Der Kommandoraum für ein Kraftwerk im Jahr 1975?



Ja und nein. Nein, weil diese Anlage im letzten Jahr von Sprecher & Schuh gebaut wurde. Ja, weil in ihr bereits ein Stück der Zukunft liegt. Steuerungstechnisch, fabrikationstechnisch und organisatorisch.

Elektrische Energie steuern, verteilen, leiten – die Versorgung ganzer Landesteile sicherstellen – an solchen Aufgaben zeigt sich der Wert unserer jahrzehntelangen Erfahrung.

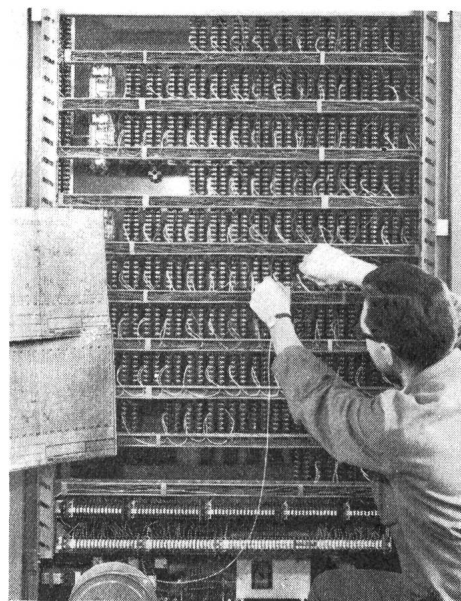
Sicherstellen heisst z. B., dass der Betriebszustand jeder Maschinen- gruppe, jeder Schaltanlage jederzeit überwacht wird. Die kleinste Störung wird augenblicklich signalisiert, so dass der Bedienungsmann sofort mit dem folgerichtigen Schaltmanöver reagieren kann.



Der äussere Sicherheitsfaktor heisst also «funktionelle Übersichtlichkeit». Alle betriebsnotwendigen Steuer-, Regel- und Überwachungseinrichtungen fassen wir in logische Einheiten zusammen. Schutzrelais, Schreiber, Messwertumformer, Zähler usw. werden meistens im Apparateraum oder in Relaishäusern der Schaltanlage untergebracht. So ergibt sich ein vorbildlicher Kommandoraum, der ein zuverlässiges Steuern und Überwachen gewährleistet.

Der innere Sicherheitsfaktor liegt in der Vollkommenheit der Technik und in der Qualität der Bauteile. 7 verschiedene Systeme ermöglichen es, je nach Schaltanlage die zweckmässigste Steuerart zu wählen: Starkstromsteuerung, Schwachstromsteuerung, Relaissteuerung, Einzel-Anwahlsteuerung, Zentralfeldsteuerung, S & S-Elektroniksteuerung, Computersteuerung.

Ausschlaggebend für den heutigen Entwicklungsstand von Kommandoranlagen war der Übergang von Starkstromsteuerungen auf Schwachstromsteuerungen. Die Perfektion in der Automatisierung von Steuervorgängen wäre undenkbar, würden wir nicht kontaktlose S & S-Bausteine verwenden und die zuverlässigsten Eingangselemente, die wir kennen.



Dank dem exakten Zusammenspiel all dieser Details erzielen wir die überdurchschnittliche Betriebssicherheit einer hochmodernen S & S-Anlage. Und diese Erfahrungen stellen wir auch Ihnen gerne zur Verfügung.



Sprecher & Schuh AG
Aarau/Schweiz



Einpoliger
Gleichstrom-Schnellschalter
2500 A
1000 oder 2000 V
Ausfahrbare Ausführung
oder
fester Einbau.

S.A.
des Ateliers
de Sécheron
1211 Genève 21

sécheron

Tel. 022 32 67 50
Telex 22130

H 107 d