Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 42 (1951)
Heft: 18

Artikel: Auswahl der Parameter von Wasserkraftwerken
Autor: Kroms, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061017

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: 01.10.2025

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

für die tatkräftige Mitarbeit und die gebrachten Opfer herzlich zu danken. Der schweizerische Markt ist für derartige Einrichtungen naturgemäss begrenzt, so dass zu wünschen ist, dass es unseren Firmen gelingen möge, auch hier für ihre Qualitätserzeugnisse einen entsprechenden Absatz im Ausland zu finden.

Adresse des Autors:
Hans Abrecht, Chef der Sektion «Teilnehmeranlagen» der Generaldirektion der PTT, Speichergasse 6, Bern.

Auswahl der Parameter von Wasserkraftwerken

Von *A. Kroms*, Boston (USA)

621.311.21.003

Wasserkraftwerke gehören zu den abhängigen Energieerzeugungsanlagen, mit einer veränderlichen verfügbaren Leistung. Solche Kraftwerke sollen in Verbundbetrieben zur Zusammenarbeit mit anderen Kraftwerken eingeschlossen werden. Deshalb werden ihre wirtschaftlichen Ergebnisse vom Standpunkt des ganzen Verbundbetriebes aus beurteilt, wobei als Grundkriterium die Energiekosten dienen. Als ein wichtiges ergänzendes Kriterium wird die Ausgleichszeit der Mehraufwendungen, die zur Verwirklichung der teureren Varianten notwendig sind, eingeführt; dieses Kriterium wird dann geprüft, wenn die geringsten Energiekosten mit den niedrigsten Anlagekosten nicht zusammenfallen. Die Anwendung dieser beiden Kriterien zum wirtschaftlichen Vergleich der Bauvarianten der Wasserkraftwerke ist im vorliegenden Aufsatz behandelt worden.

Les usines hydroélectriques sont des installations de production d'énergie, qui dépendent d'une puissance disponible variable, ce qui exige leur interconnexion avec d'autres usines génératrices. Leur rendement économique ne peut donc être jugé qu'en considérant l'ensemble de toutes les usines interconnectées, le critère essentiel étant celui des frais de production. Un autre critère important est celui de la durée d'amortissement des dépenses supplémentaires dues à la réalisation des variantes plus coûteuses. Ce critère est appliqué lorsque les frais de production les plus faibles ne coïncident pas avec les frais de premier établissement les plus bas. Dans cet article, les deux critères sont appliqués à la comparaison, du point de vue économique, des variantes de construction des usines hydroélectriques.

Die *energetischen Parameter* der Kraftwerke sind:

die Ausbauleistung P_n in MW,
die Energieausbeute W in MWh/Jahr,
die Benützungsdauer der Ausbauleistung t_n in h/Jahr.

Diese energetischen Parameter werden durch die *energetischen Charakteristiken* miteinander verbunden. Für Wasserkraftwerke können derartige Kennlinien von der Leistungsdauerkurve oder Wasserleistung $P = f(t)$ abgeleitet werden [1][1]):

die Integralkurve der Energieerzeugung $W = f(P_n)$
die Kurve der Benützungsdauer $t_n = f(P_n)$, wobei $t_n = W/P_n$.

Zur Festsetzung der wirtschaftlich optimalen Bereiche für die betreffenden Parameter sind die Zusammenhänge der energetischen Kennwerte mit den wirtschaftlichen Kriterien der Kraftwerke zu ermitteln. Der wichtigste energetische Parameter der Kraftwerke ist ihre Ausbauleistung, die die technischen Kenngrössen und die energetischen Möglichkeiten der Werke beeinflusst. Bei den Wasserkraftwerken ist die richtige Auswahl ihrer Ausbauleistung besonders wichtig, da die hierbei begangenen Fehler später schwer zu beheben sind. Deshalb muss beim Entwurf der Wasserkraftwerke gleich am Anfang ihre endgültige Leistung festgelegt werden. Der Auswahl dieses wichtigen Parameters wird besondere Beachtung gewidmet.

Die Wasserkraftwerke gehören zu den abhängigen Energieerzeugungsanlagen, weil ihre verfügbare Leistung vom Wasserzufluss abhängt. Diese Kraftwerke haben deshalb eine Ausgleichs- oder Kompensationsreserve für die trockenen Jahresperioden nötig. Die Ausgleichsleistung wird in Wasserkraftwerke mit grossen Speicherbecken oder in thermische Kraftwerke installiert, welche mit dem untersuchten Werk im Verbundbetrieb arbeiten, oder es wird in Mangelzeiten Energie von andern Gesellschaften hinzugekauft. Diese Kompensationsreserve ergänzt die Leistung des betrachteten Werkes, und verschlechtert die wirtschaftlichen Ergebnisse des Verbundbetriebes, weil sie nicht im ganzen Jahr ausgenützt werden kann.

Bei der Auswahl der Parameter eines Wasserkraftwerkes, das einem Verbundbetrieb eingegliedert wird, ist folgendes zu beachten: Beim Ansteigen des Energiebedarfes müssen einige Kraftwerke des Verbundbetriebes erweitert oder neue Kraftwerke gebaut werden, d. h. die zusätzlich nötige Energiemenge erfordert einen ganz bestimmten Bestand an Kraftwerken. Die dazu nötige zusätzliche Leistung kann entweder in dem zu untersuchenden Wasserkraftwerk oder in anderen Kraftwerken des Verbundvertriebes, die im folgenden «Ersatzkraftwerke» genannt werden, untergebracht werden. Das vorgesehene Wasserkraftwerk wird nun den Ersatzkraftwerken gegenübergestellt. Ein derartiger Vergleich erfolgt in zwei Stufen:

1. Der energetische Vergleich, d. h. der Vergleich in bezug auf energetische Gleichwertigkeit bei der Erfüllung der gegebenen Aufgabe.
2. Der Vergleich wirtschaftlicher Kennwerte und daraus die Feststellung der optimalen Bereiche für die Kraftwerksparameter.

Der energetische Vergleich erfordert die Aufstellung der Leistungs- und Energiebilanzen des Verbundbetriebes, woraus die energetischen Kennwerte zu entnehmen sind [2; 3; 4]. Beim wirtschaftlichen Vergleich ist die erste Aufgabe die Aufstellung der wirtschaftlichen Charakteristiken, aus denen zu ersehen ist, wie sich die wirtschaftlichen Kennwerte der Kraftwerke in Abhängigkeit von energetischen Parametern ändern. Nachher sollen die Standpunkte des wirtschaftlichen Vergleiches ausgewählt und zuletzt die optimalen Grenzen der energetischen Parameter festgesetzt werden.

Die wichtigsten *wirtschaftlichen Kriterien* sind die folgenden:

1. Die Anlagekosten der Kraftwerke:
   die Gesamtkosten K (Fr.)
   die spezifischen Anlagekosten k (Fr./MW)

[1]) Siehe Literaturverzeichnis am Schluss der Arbeit.

2. Die Betriebsausgaben:
   die gesamten Ausgaben J (Fr./Jahr)
   die spezifischen Ausgaben j (Fr./MW Jahr)
3. Die Energiekosten (die Ausgaben pro Energieeinheit):
   für die gesamte Energieerzeugung s (Fr./MWh)
   für die zusätzliche Energieerzeugung s_{sp} (Fr./MWh)

Sind die wirtschaftlichen Kennwerte des Wasserkraftwerkes als Funktionen eines energetischen Parameters bekannt, dann können diese Beziehungen in die Funktionen eines anderen Parameters umgewandelt werden, indem man die erwähnten energetischen Kurven als Verbindungskurven verwendet. Am einfachsten ist die Abhängigkeit der wirtschaftlichen Kriterien von der Ausbauleistung P_n des Kraftwerkes festzustellen. Demzufolge werden die wirtschaftlichen Kennkurven zuerst als Funktionen der Ausbauleistung aufgezeichnet und dann mit Hilfe der energetischen Charakteristiken in Funktionen der Energieausbeute W oder der Benützungsdauer t_n der Ausbauleistung umgewandelt. Das Gesamtergebnis ist ein Komplex der wirtschaftlichen Charakteristiken, der in Tabelle I zusammengestellt ist.

Wirtschaftliche Charakteristiken der Kraftwerke Tabelle I

Wirtschaftliche Kennwerte	Bezeichnung	Einheit	Energetische Parameter		
			P_n	W	t_n
1. Anlagekosten	K k	Fr. Fr./MW	$f_1(P_n)$ $f_2(P_n)$	$f_1(W)$ $f_2(W)$	$f_1(t_n)$ $f_2(t_n)$
2. Betriebsausgaben	J j	Fr./Jahr Fr./MW Jahr	$f_3(P_n)$ $f_4(P_n)$	$f_3(W)$ $f_4(W)$	$f_3(t_n)$ $f_4(t_n)$
3. Energiekosten	s s_{sp}	Fr./MWh Fr./MWh	$f_5(P_n)$ $f_6(P_n)$	$f_5(W)$ $f_6(W)$	$f_5(t_n)$ $f_6(t_n)$

Als Grundkurve zur Aufzeichnung dieser Kurven dient allgemein die Kurve der Anlagekosten $K = f_1(P_n)$, aus welcher die übrigen Kurven abgeleitet werden können.

1. Grundlagen des wirtschaftlichen Vergleichs

Die wirtschaftlichen Ergebnisse der Kraftwerke sollen vom Standpunkt des ganzen Verbundbetriebes aus beurteilt werden. Zur Auswahl der zweckmässigsten Anlage oder deren Parameter werden mehrere Ausbauvarianten miteinander verglichen, wobei das zu untersuchende Werk den Ersatzkraftwerken des Verbundbetriebes gegenübergestellt wird. Dazu sollen die wirtschaftlichen Charakteristiken der Kraftwerke benutzt werden.

Die optimalen Grenzen der Parameter sind am einfachsten auf graphischem Weg zu ermitteln. Der Vergleich der wirtschaftlichen Kennwerte des zu untersuchenden Wasserkraftwerkes und seiner Ersatzkraftwerke ist in Fig. 1 schematisch dargestellt. Hier sind die Kennwerte des zu untersuchenden Wasserkraftwerkes mit dem Index w, die Grössen der Ersatzkraftwerke aber mit dem Index e versehen. Es ist zu beachten, dass die mit dem Index e bezeichneten Grössen sich auf die Kraftwerke beziehen, die die fehlende Energie in jenem Fall erzeugen müssten, wo das zu untersuchende Wasserkraftwerk ausfallen würde; diese Kriterien dürfen niemals mit den durchschnittlichen Kennzahlen des ganzen Verbundbetriebes verwechselt werden.

In Fig. 1 sind folgende Kennwerte des zu untersuchenden Wasserkraftwerkes und des Ersatzkraftwerkes miteinander verglichen:

I: die Anlagekosten K
II: die Betriebsausgaben J
III: die gesamten Energiekosten s, wobei $s = J/W$
IV: die Kosten der zusätzlichen Energie s_{sp}, wobei $s_{sp} = \mathrm{d}J/\mathrm{d}W$

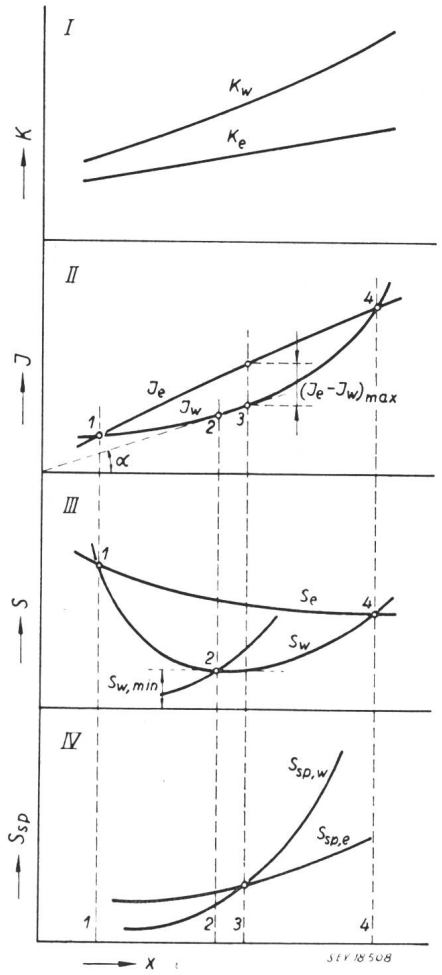

Fig. 1

Vergleich der wirtschaftlichen Kennwerte von Kraftwerken

K Anlagekosten; J Betriebsausgaben (Fr./Jahr); s mittlere Energiekosten (Fr./MWh); s_{sp} Kosten der zusätzlichen Energie (Fr./MWh); Index w Werte des untersuchten Wasserkraftwerkes; Index e Werte der Ersatzkraftwerke; x allgemeiner Parameter (P_n, W oder t_n)

Diese Kriterien werden als Funktionen desjenigen Parameters aufgezeichnet, für welchen die wirtschaftlichen Grenzen zu bestimmen sind. In der allgemeinen Betrachtung wird dieser Parameter mit x bezeichnet.

Das wichtigste Kriterium beim Ausbau der Kraftwerke sind die Kosten der erzeugten Energie. Ein umfassender Vergleich der Anlagen erfordert jedoch auch die Beachtung anderer wirtschaftlicher Kennwerte: der Anlagekosten, des Brennstoffverbrauchs usw., welche innerhalb gewisser Grenzen verbleiben sollen, die nach volkswirtschaftlichen Erwägungen festgesetzt sind. Aus diesem Grund sind neben den Energiekosten noch ergänzende Kriterien nötig. Als zusätzliches Kriterium dient z. B. die Kompensations- oder Ausgleichszeit für die Mehraufwendungen, die für die Ausführung der teureren Varianten nötig sind. Dieses Kriterium soll in jenen Fällen geprüft werden, in denen die niedrigsten Energiekosten mit den minimalen Bauaufwendungen nicht zusammenfallen, z. B. wenn die Varianten mit niedrigsten Energiekosten grössere Anlagekosten verlangen. Dann ist jede zusätzliche Aufwendung wirtschaftlich zu rechtfertigen, damit der für die Errichtung der Anlagen nötige Kapital- oder Materialverbrauch nicht übermässig ansteigt. Diesem Zweck dienen die Kontrollkriterien, die darüber Aufschluss erteilen, mit welchen Baumitteln die jährlichen Betriebsersparnisse zu erzielen sind.

Zwischen den Betriebsausgaben und Anlagekosten zweier Varianten mit gleicher Energieerzeugung können folgende Beziehungen bestehen:

1. $J_1 < J_2$ und $K_1 < K_2$

2. $J_1 < J_2$ und $K_1 > K_2$

Im ersten Fall braucht man kein zusätzliches Kriterium. Im zweiten sind zur Senkung der Betriebsausgaben höhere Kapitalaufwendungen erforderlich; ein derartiger Zustand ist oft beim Vergleich von Wasserkraftwerken mit Wärmekraftwerken zu erwarten. Es kann dabei vorkommen, dass die Ersparnisse an jährlichen Betriebsausgaben mit allzu hohen Baukosten verknüpft sind. Deshalb soll hier ein zusätzliches Kriterium eingeführt werden, wozu das Verhältnis

$$T = -\frac{\Delta K}{\Delta J} = \frac{K_1 - K_2}{J_2 - J_1} \text{ (Jahre)}$$

dient. Die Kennzahl T wird Ausgleichs- oder Kompensationszeit genannt, da sie die Zeitperiode bedeutet, in welcher die zusätzlichen Bauaufwendungen $K_1 - K_2$ (Fr.) durch die erzielbaren Ersparnisse $J_2 - J_1$ (Fr./Jahr) zurückerhalten werden.

Die zulässige Grenze der Ausgleichszeit T_0 wird auf Grund der Kapitalreserven oder anderer wirtschaftlicher Überlegungen festgesetzt. Wenn die aus den Entwurfsangaben errechneten T-Werte sich unter T_0 befinden, dann hat die teurere Variante den Vorzug; wenn dagegen $T > T_0$ ist, dann kann die Variante mit niedrigeren Baukosten in Frage kommen. Als typisches Beispiel dient hierbei der Vergleich von Wasser- und Wärmekraftwerken, wo sehr oft die teurere Ausbauvariante, d. h. das Wasserkraftwerk, gewählt wird, um die Energiekosten und besonders den Brennstoffverbrauch zu verringern.

Die Parameter der Energieanlagen werden also auf Grund zweier Kriterien, der Energiekosten und der Ausgleichszeit für die Bauaufwendungen gewählt. Dabei soll der folgende Grundsatz beachtet werden: die Kosten sind nur für Anlagen direkt vergleichbar, die ganz gleiche Aufgaben erfüllen. Deshalb sollen die Kosten der Energieanlagen auf gleiche Basis umgerechnet und nur jene äquivalenten Werte einander gegenübergestellt werden, die beim Einsatz der zu vergleichenden Anlagen unter gleichen Arbeitsbedingungen zu erwarten sind. Da die Wasserbauten der Wasserkraftwerke auch für andere Zwecke, z. B. für Schiffahrt, Bewässerung usw. dienen, sind ihre Baukosten zwischen der Energiewirtschaft und den anderen Zweigen der Wasserwirtschaft aufzuteilen. Es soll ausserdem der Einfluss der Wasserkraftwerke auf die Belastungsart anderer Kraftwerke des Verbundbetriebes berücksichtigt werden.

Die endgültige Entscheidung bei der Wahl der Ausbauvarianten wird ausser durch die ökonomischen Ergebnisse noch durch eine Reihe anderer Erwägungen beeinflusst, z. B. durch Streben nach wirtschaftlicher Selbstständigkeit, die Pläne der Brennstoffbewirtschaftung usw. Diese Faktoren können in die technisch-wirtschaftlichen Berechnungen zahlenmässig nicht eingefügt werden; man muss jedoch immer eine Übersicht darüber haben, welche zusätzlichen Aufwendungen oder jährlichen Betriebsausgaben zu erwarten sind, wenn an Stelle der wirtschaftlich optimalen Variante eine andere ausgewählt wird.

2. Vergleich nach den Energiekosten

Beim Ausbau der Wasserkraftwerke sind folgende Ziele erstrebenswert:

1. die niedrigsten Energiekosten in den neuen oder erweiterten Kraftwerken;
2. die niedrigsten Energiekosten im ganzen Verbundbetrieb;
3. die gleichen Energiekosten in den neuen Kraftwerken und in den Ersatzkraftwerken des Verbundbetriebes.

1. Der Wert des Parameters x, bei welchem die Energiekosten der neuen Wasserkraftwerke minimal sind, ergibt sich aus der Kurve $s_w = f_5(x)$ (Punkt *2* in Fig. 1). Wenn als Parameter x die Energieerzeugung W_w dient, dann zeigt auch die Tangente vom Nullpunkt der Koordinaten an die Kurve $J_w = f_3(W_w)$ denjenigen W_w-Wert an, bei welchem die Energiekosten $s_w = J_w/W_w = \operatorname{tg} \alpha$ ihren niedrigsten Stand erreichen.

Solange der Leistungszuwachs des zu untersuchenden Wasserkraftwerkes im Verbundbetrieb eine Leistung ersetzt, für welche die Energiekosten höher liegen als für die entsprechende Leistung des Wasserkraftwerkes, setzt sich die Verminderung der mittleren Energiekosten fort, wenn auch im Wasserkraftwerk selbst der Leistungsbereich der

minimalen Energiekosten schon übertroffen wäre. Für ein Wasserkraftwerk, das im Verbundbetrieb eingeschlossen ist, übersteigt deshalb die optimale Ausbauleistung jenen Wert, bei welchem $s_w = s_{w,\,min}$ wird.

2. Die Betriebsausgaben des Verbundbetriebes setzen sich zusammen aus jenen der schon bestehenden Kraftwerke J_0, jenen des zu untersuchenden Wasserkraftwerkes J_w und jenen der Ersatzkraftwerke J_e:

$$J_v' = J_0 + J_w + J_e$$

Da die Kosten J_0 vom Parameter x nicht beeinflusst werden, müssen sie bei der Wahl des Parameters auch nicht mit eingerechnet werden. Damit betragen die uns interessierenden Betriebsausgaben des Verbundbetriebes:

$$J_v = J_w + J_e$$

Die niedrigsten Energiekosten des Verbundbetriebes $s_{v,\,min}$ entsprechen den minimalen Ausgaben $J_{v,\,min}$ dieser Betriebsart. Diese optimale Lösung kann auf verschiedenem Wege ermittelt werden:

a) Es werden mehrere Werte des Parameters x angenommen, die entsprechenden J_v-Werte berechnet und miteinander verglichen. Dies kann rein analytisch oder auch graphisch mit Hilfe der Kurven $J_w = f_3(x)$ und $J_e = f_3(x)$ ermittelt werden.

b) Wenn der zu deckende Energiebedarf W_0 zwischen dem zu untersuchenden Wasserkraftwerk und den Ersatzkraftwerken des Verbundbetriebes verteilt werden soll, lautet die Energiebilanz

$$W_0 = W_w + W_e$$

und die niedrigsten Betriebsausgaben ergeben sich bei

$$\frac{dJ_v}{dW_w} = 0, \text{ oder } \frac{dJ_w}{dW_w} + \frac{dJ_e}{dW_e} \cdot \frac{dW_e}{dW_w} = 0$$

Aus der Energiebilanz ergibt sich $W_e = W_0 - W_w$ oder $\frac{dW_e}{dW_w} = -1$, woraus man

$$\frac{dJ_w}{dW_w} - \frac{dJ_e}{dW_e} = 0, \text{ und } \frac{dJ_w}{dW_w} = \frac{dJ_e}{dW_e} \text{ oder } s_{sp,w} = s_{sp,e}$$

erhält. Die Betriebsausgaben J_v des Verbundbetriebes erreichen also den niedrigsten Wert, wenn die Kosten der zusätzlichen Energie s_{sp} für beide Kraftwerke oder Kraftwerkgruppen gleich werden. Dieser Bedingung entspricht in Fig. 1 der Schnittpunkt *3* der beiden s_{sp}-Kurven.

Die Gleichung $s_{sp,\,w} = s_{sp,\,e}$ kann entwickelt werden, indem man die Betriebsausgaben durch die Kosten der Kraftwerke ausdrückt [5]:

Die Betriebsausgaben der Wasserkraftwerke $J_w = p_w K_w$ werden nach Einsetzen von $K_w = a_w + b_w P_{wn}$ folgendermassen ausgedrückt:

$$J_w = c_w + e_w P_{wn} \text{ (Fr./Jahr)}$$

wobei

p_w den Koeffizienten der Betriebsausgaben,

a_w und c_w die festen Anlagekosten und Betriebsausgaben,

b_w und e_w die Koeffizienten der leistungsabhängigen Anlagekosten und Betriebsausgaben, und

P_{wn} die Nennleistung des Wasserkraftwerkes bedeuten.

Hieraus erhält man

$$s_{sp,w} = \frac{dJ_w}{dW_w} = e_w \frac{dP_{wn}}{dW_w} \text{ oder } s_{sp,w} = \frac{e_w}{t_{sp,n}}$$

wo $t_{sp,n} = \frac{dW_w}{dP_{wn}}$ (h/Jahr) die Benützungsdauer der zusätzlichen Leistung in der betreffenden Zone der Leistungsdauerkurve $P_w = f(t)$ ist (Fig. 2).

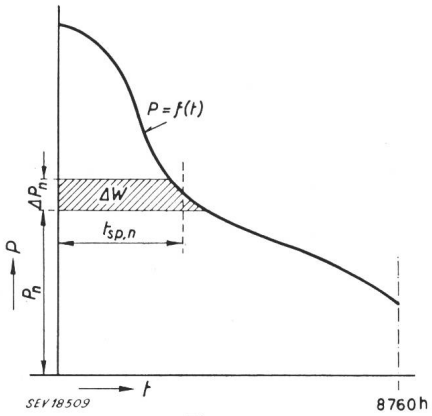

Fig. 2
Leistungskurven
P_n Ausbauleistung; $t_{sp,n}$ Benützungsdauer der zusätzlichen Leistung

Die Betriebsausgaben der Wärmekraftwerke und die Kosten gekaufter Fremdenergie setzen sich wie folgt zusammen:

$$J_e = c_e + e_e \cdot P_{en} + f \cdot W_e$$

wobei f der Koeffizient der energieabhängigen Ausgaben in Fr./MWh ist. Dann betragen die Kosten der zusätzlichen Energie

$$s_{sp,e} = \frac{dJ_e}{dW_e} = e_e \frac{dP_e}{dW_e} + f$$

und die Gleichung der minimalen Betriebsausgaben $s_{sp,w} = s_{sp,e}$ erhält folgende Form:

$$\frac{e_w}{t_{sp,n}} = e_e \frac{dP_e}{dW_e} + f$$

In dieser Gleichung enthält das Glied $e_e \frac{dP_e}{dW_e}$ die Ausgaben, die mit der Erhöhung der thermischen Leistung verknüpft sind.

Wenn der Verbundbetrieb eine zusätzliche verfügbare Leistung P_0 erfordert, ist die Leistungsbilanz

$$P_0 = P_w + P_e \text{ und } P_e = P_0 - P_w$$

wobei P_w die veränderliche verfügbare Leistung des betrachteten Wasserkraftwerkes bedeutet. Be-

zeichnet man das Verhältnis $\gamma = P_w / P_{wn}$ als Koeffizient der Leistungssicherung, dann ist

$$P_e = P_0 - \gamma P_{wn}$$

und

$$\frac{dP_e}{dW_e} = \frac{d(P_0 - \gamma P_{wn})}{d(W_0 - W_w)} = \gamma \frac{dP_{wn}}{dW_w} = \frac{\gamma}{t_{sp,n}}$$

Damit wird $s_{sp,e} = \frac{e_e \gamma}{t_{sp,n}} + f$ (Fr./MWh). Aus der Gleichung $s_{sp,w} = s_{sp,e}$ erhält man dann

$$\frac{e_w}{t_{sp,n}} = \frac{e_e \gamma}{t_{sp,n}} + f \text{ oder } t_{sp,n} = \frac{e_w - \gamma e_e}{f} \text{ (h/Jahr)}$$

Die spezifischen Ausgaben der zusätzlichen Leistung $e_w = p_w b_w$ und $e_e = p_e b_e$ sind aus den Charakteristiken der Baukosten zu ermitteln, wobei p Erfahrungswerte der festen Ausgaben bedeuten, die von der Kraftwerksart abhängig sind.

Mit dem errechneten Wert von $t_{sp,n}$ kann man in der Dauerkurve $P_w = f(t)$ die Verteilung der Leistungen zwischen dem untersuchten Wasserkraftwerk und den Ersatzkraftwerken ermitteln. Wenn die Leistung des Wasserkraftwerkes diese Grenze überschreitet, dann erzeugt diese zusätzliche Leistung des Werkes zu wenig Energie, um die Erstellungskosten zu rechtfertigen.

Wenn der Koeffizient γ während der Lastspitzen des Verbundbetriebes $< 1{,}0$ ist, dann wird $P_{wn} + P_e > P_0$. Im Verbundbetrieb entsteht dadurch ein nicht einsetzbarer Überschuss an installierter Leistung, da ein Teil der Ersatzleistung als Kompensationsreserve dient. Das Ausmass dieses Überschusses ist hauptsächlich von der Durchflussregelung in den Wasserkraftwerken abhängig. Dabei sind zwei Grenzfälle zu verzeichnen:

α) Wenn bei den Laufwerken die Periode niedriger Wasserführung während des höchsten Leistungsbedarfs eintreten kann, dann ist γ sehr niedrig; bei $\gamma = 0$ erhält man

$$t_{sp,n} = \frac{e_w}{f} \text{ oder } e_w = f\, t_{sp,n}$$

Hier wird durch die Vergrösserung der installierten Leistung des Wasserkraftwerkes P_{wn} die Ersatzleistung nicht eingespart. Die Ausgaben der zusätzlichen Wasserkraftleistung e_w müssen deshalb nur durch die Ersparnisse der Brennstoffkosten $f \cdot t_{sp,n}$ ausgeglichen werden.

β) Für ein Speicherkraftwerk bei $\gamma = 1{,}0$ wird

$$t_{sp,n} = \frac{e_w - e_e}{f}, \text{ oder } e_w - e_e = f t_n$$

Hier ist ein Leistungsüberschuss ganz vermieden, weshalb nur die Differenz der leistungsabhängigen Ausgaben $e_w - e_e$ durch die Ersparnisse $f \cdot t_{sp,n}$ ausgeglichen werden soll. Dadurch werden die wirtschaftlichen Aussichten der Wasserkraftwerke viel günstiger.

Wenn zwei Wasserkraftwerke miteinander verglichen werden, dann fällt in den entwickelten Formeln f weg und es wird $e_w = \gamma e_e$, woraus bei $\gamma = 1{,}0$ man $e_w = e_e$ erhält, d. h. die zusätzliche Leistung soll ganz im Wasserkraftwerk installiert werden, welches den niedrigsten Zuwachs der Ausgaben e aufweist.

c) Wenn durch Einschluss des untersuchten Wasserkraftwerkes in den Verbundbetrieb die niedrigsten Betriebsausgaben erreicht werden, dann sind gegenüber den Ersatzkraftwerken die maximalen Ersparnisse erzielt worden. Die Differenz $J_e - J_w$ wird dann ein Maximum (Punkt *3* im Feld II der Fig. 1).

3. Die Errichtung neuer Wasserkraftwerke im Verbundbetrieb wird bei $s_w < s_e$ wirtschaftlich gerechtfertigt. Die wirtschaftlichen Grenzen des Parameters x werden für ein neu zu errichtendes Wasserkraftwerk mit der Gleichung $s_w = s_e$ festgesetzt (Punkt *1* und *4* in Fig. 1).

Beim Vergleich verschiedener Ausbauvarianten können die s_w- und s_e-Kurven in den technisch möglichen Grenzen des Parameters x verschiedene Stellungen einnehmen (Fig. 3).

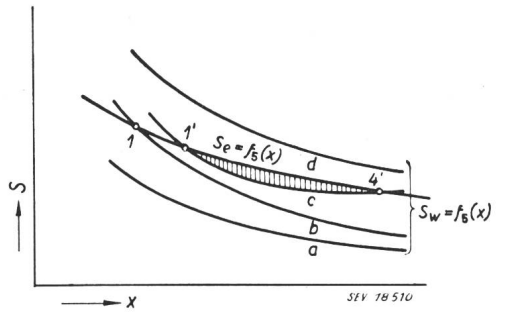

Fig. 3
Vergleich der s_w- und s_e-Kurven
Erläuterungen im Text

a) Die s_w-Kurve befinde sich in ihrer vollen Länge unter der s_e-Kurve. Das Wasserkraftwerk ist damit bei jeder Ausbauleistung den zu ersetzenden Wärmekraftwerken überlegen.

b) Die Kurven der Energiekosten schneiden sich in einem Punkt (Punkt *1*), welcher gewöhnlich die Ausbauleistung kennzeichnet, von welcher an sich der Einschluss eines Wasserkraftwerkes in den Verbundbetrieb wirtschaftlich rechtfertigt. Liegt P_{wn} unter diesem Grenzwert, dann sind die durch das Werk erzeugte Energiemenge W_w und die erzielbaren Ersparnisse des Verbundbetriebes zu gering, um die hohen Kapitalaufwendungen der Wasserbauten zu rechtfertigen.

c) Die Kurven der Energiekosten schneiden sich in zwei Punkten. Hier ist der wirtschaftlich gerechtfertigte Bereich des Parameters beidseitig begrenzt. Bei zu niedriger Leistung reicht die erzielbare Ersparnis zum Ausgleich der höheren Baukosten des Wasserkraftwerkes nicht aus; wenn dagegen die Leistung des Wasserkraftwerkes den obern Grenzwert übersteigt, ist die Ausnutzung der zusätzlichen Leistung wegen des Wassermangels unzureichend.

d) Die s_w-Kurve befinde sich in ihrer vollen Länge oberhalb der s_e-Kurve. In diesem Fall ist die Wasserkraft nicht in der Lage, mit den Ersatzkraftwerken des Verbundbetriebes in Wettbewerb zu treten.

Durch die Einsetzung der Kostengrössen der Kraftwerke kann auch die Gleichung $s_w = s_e$ entwickelt werden. Die mittleren Energiekosten sind:

in Wasserkraftwerken $s_w = \frac{J_w}{W_w} = \frac{P_w j_w}{W_w} = \frac{p_w k_w}{t_n}$

in Ersatzkraftwerken $s_e = \frac{p_e k_e}{t_n} + f$ (Fr./MWh)

Bei der Entwicklung der Gleichung $s_w = s_e$ soll auch die Überschussleistung berücksichtigt werden. Bei $\gamma < 1{,}0$ ersetzt 1 MW der installierten Wasserkraftleistung nur γ MW in den Ersatzkraftwerken des Verbundbetriebes, weshalb den jährlichen Ausgaben des Wasserkraftwerkes $j_w = p_w k_w$ (Fr./MW Jahr) die Ersparnisse der festen Ausgaben

der Ersatzkraftwerke $\gamma\, p_w\, t_n$ gegenübergestellt werden sollen. Die Bedingung $s_w = s_e$ lautet dann:

$$\frac{p_w\, k_w}{t_n} = \frac{\gamma\, p_e\, k_e}{t_n} + f, \text{ oder } t_n = \frac{p_w k_w - \gamma p_e k_e}{f} \text{ (h/Jahr)}$$

Im Gegensatz zu den vorherigen Formeln für $t_{sp,n}$ treten hier an Stelle der Ausgaben für zusätzliche Leistung $e = p\, b$ die mittleren Ausgaben je Leistungseinheit $p\, k$.

Bei $\gamma = 1{,}0$ erhält man $t_n = \dfrac{p_w\, k_w - p_e\, k_e}{f}$ für ein Speicherkraftwerk und

bei $\gamma = 0$ erhält man $t_n = \dfrac{p_w\, k_w}{f}$ für ein Laufwerk.

Im zweiten Falle werden die Ausgaben des Wasserkraftwerkes $p_w\, k_w$ nur mit energieabhängigen Kosten der Ersatzkraftwerke $f\, t_n$ verglichen, da Wasserkraft wegen der sehr ungünstigen Wasserverhältnisse keine Ersparnisse der Ersatzleistung im Verbundbetrieb gibt.

Zur Lösung der letzten Gleichungen müssen alle veränderlichen Grössen als Funktionen eines energetischen Parameters P, W oder t_n ausgedrückt werden.

4. Eine Übersicht über die erörterten Methoden der Auslegung von Kraftwerken ist in Tabelle II und in Fig. 4 gegeben [5].

miteinander zu vergleichen, da die mittleren Energiekosten durch die Ergebnisse der schon bestehenden Leistungen beeinflusst werden. Hieraus folgt: Wenn mehrere Kraftwerke an einem gemeinsamen Netz angeschlossen sind, soll bei der Erhöhung der Gesamtbelastung jenes Kraftwerk erweitert werden, in welchem die geringsten Kosten der zusätzlichen Energie s_{sp} zu erwarten sind,

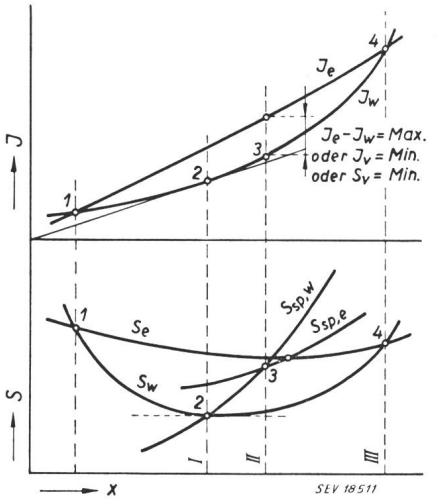

Fig. 4
Methoden der Auslegung von Wasserkraftwerken
I s_w = Min.
II $s_{sp,w} = s_{sp,e}$
III $s_w = s_e$

Methoden der Auslegung von Kraftwerken Tabelle II

Kurven: / Bedingungen:	Betriebsausgaben $J = f_3(x)$	Energiekosten: mittlere $s = f_5(x)$	Energiekosten: der zusätzlichen Energie $s_{sp} = f_6(x)$	Punkt der Kurven in Fig. 4
I. Niedrigste Energiekosten im Wasserkraftwerk	—	s_w = Min.	$s_{sp,w} = s_w$	2
II. Niedrigste Energiekosten im Verbundbetrieb	$J_e - J_w$ = Max.	—	$s_{sp,w} = s_{sp,e}$	3
III. Gleiche Energiekosten in Wasser- und Ersatzkraftwerken	$J_w = J_e$	$s_w = s_e$	—	1 und 4

Der Verbundbetrieb ist ein organischer Komplex der Energieversorgung, in welchem das gegebene Wasserkraftwerk nur ein Element darstellt. Deshalb soll man sich bei der Auswahl der Energieanlagen und ihrer Parameter nach den Ergebnissen des ganzen Verbundbetriebes richten. Bei der Überschreitung des Bereichs der minimalen Energiekosten s_w = Min. erhöhen sich die Kosten der zusätzlichen hydraulischen Energie ($s_{sp,w} > s_w$), doch setzt sich die Verminderung der gesamten Ausgaben des Verbundbetriebes fort, bis der Stand J_v = Min. (oder s_v = Min.) erreicht wird; dieser Zustand entsteht bei $s_{sp,w} = s_{sp,e}$. Oberhalb dieser Grenze wird $s_{sp,w} > s_{sp,e}$, und der weitere Leistungszuwachs sollte den Ersatzkraftwerken des Verbundbetriebes zugewiesen werden, wenn auch die mittleren Energiekosten s_e höher wären als jene im Wasserkraftwerk. Bei der Erweiterung der Kraftwerke sind also nur die Betriebsresultate der zusätzlichen Leistungen wenn auch die mittleren Energiekosten in diesem Werk manchmal höher liegen als in anderen Kraftwerken.

Bei der Beurteilung der Neubauten von Kraftwerken sind im Vergleich auch die festen Baukosten einzusetzen, die bei den Wasserkraftwerken besonders hoch sind. In diesem Falle muss man über die wirtschaftlichen Vorteile einzelner Kraftwerke nach den mittleren Energiekosten urteilen, in denen die gesamten Ausgaben eingegliedert sind. Die untere Grenze der Wasserkraftleistung wird durch die hohen Aufwendungen für die Wasserbauten festgesetzt, da bei niedriger Energieausbeute die Energiekosten s_w übermässig ansteigen. Die obere Leistungsgrenze wird dagegen durch die geringe Ausnutzung der zusätzlichen Leistung gezogen, da möglicherweise wegen Wassermangels die zuletzt aufgestellten Maschinensätze die Energieausbeute des Werkes nur geringfügig erhöhen.

3. Vergleich nach der Ausgleichszeit

Die Varianten der Energieversorgung, bei welchen die geringsten Energiekosten zu erwarten sind, verlangen nicht selten erhöhte Baukosten. Zur Bewertung der Auswirkungen dieser zusätzlichen Bauaufwendungen dient die Kennzahl

$$T = -\frac{\Delta K}{\Delta J} \text{ (Jahre)}$$

welche die Ausgleichsperiode für ΔK auf Grund der jährlichen Ersparnisse ΔJ darstellt. Wenn die Kennzahl T durch das Verhältnis endlicher Grössen ausgedrückt wird, erhält man den mittleren T-Wert, der bei neuzuerrichtenden Energieanlagen auszuwerten ist, wie oben die mittleren Energiekosten s. Bei der Festsetzung der wirtschaftlichen Grenzen des Parameters x kann dagegen der mittlere T-Wert nicht angewendet werden, da bei der Veränderung des Parameters die Grössen K und J nicht linear verlaufen, weshalb es möglich ist, dass trotz eines annehmbaren mittleren T-Wertes eine weitere Vergrösserung des Parameters nicht mehr wirtschaftlich gerechtfertigt werden kann. Deshalb soll hier T in Differentialform ausgedrückt werden:

$$T_{sp} = -\frac{\mathrm{d}K}{\mathrm{d}J}$$

Dieses T_{sp} stellt die Kompensationsperiode der zusätzlichen Bauaufwendungen für die teurere Variante dar, ähnlich wie oben s_{sp} die Energiekosten der zusätzlichen Energie.

1. Der Ausdruck für die mittlere Ausgleichszeit T kann verschieden entwickelt werden. Man erhält z. B. durch Einsetzung der spezifischen Kostengrössen:

$$T = -\frac{\Delta k}{\Delta j} = \frac{k_1 - k_2}{j_2 - j_1} = \frac{k_1 - k_2}{t_n\,(s_2 - s_1)} \text{ (Jahre)}$$

und die zulässige Erhöhung der Bauaufwendungen ist $\Delta k = T\,t_n\,(s_2 - s_1)$ (Fr./MW). Je höher t_n und der Grenzwert von T, desto grösser wird der zulässige Unterschied $\Delta k = k_1 - k_2$. Deshalb sind technisch hochwertige und teure Anlagen an erster Stelle zur Deckung gleichmässiger Grundlast zu verwenden.

Die Anwendung der Ausgleichszeit T bei der Bestimmung der wirtschaftlichen Ausbaugrösse eines Kraftwerkes kann auf verschiedene Art erfolgen:

a) Aus den Kurven $K = \mathrm{f}_1(x)$ und $J = \mathrm{f}_3(x)$ wird die Kurve $T = -\Delta K/\Delta J = \mathrm{f}(x)$ entwickelt. Im Bereich, in welchem T sich unter der zulässigen Grenze T_0 befindet, werden die erhöhten Baukosten $\Delta K = K_w - K_e$ durch die jährlichen Ersparnisse $\Delta J = J_e - J_w$ gerechtfertigt. Der maximale Effekt dieser Aufwendungen wird bei $T = T_{min}$ erzielt (Fig. 5).

b) Wenn die Grenze der Ausgleichsperiode T_0 durch die volkswirtschaftlichen Erwägungen festgesetzt ist, dann ist es möglich mit Hilfe der Formel

$$T_0 \geqq \frac{k_w - k_e}{j_e - j_w}$$

die höchstzulässigen Baukosten des Wasserkraftwerkes $k_{w0} = \mathrm{f}(x)$ zu ermitteln. Danach werden zwei Kurven miteinander verglichen (Fig. 6):

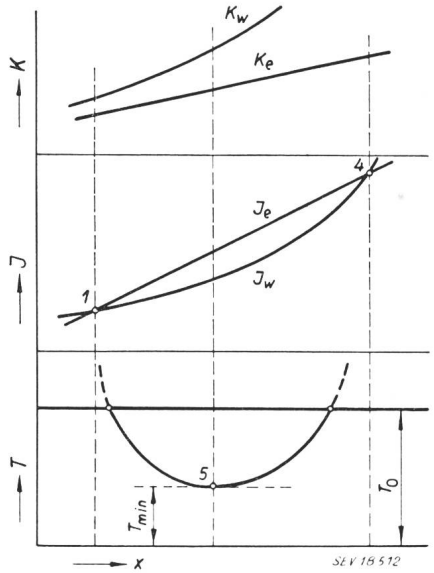

Fig. 5
Ermittlung der Ausgleichsperiode T
Erläuterungen im Text

α) die Kurve der nach den Entwurfsangaben zu erwartenden Baukosten $k_w = \mathrm{f}_2(x)$.

β) die Kurve der zulässigen Baukosten $k_{w0} = \mathrm{f}(x)$.

Bei $k_w < k_{w0}$ können die Mehraufwendungen $\Delta k = k_w - k_e$ im Laufe der festgesetzten Periode T_0 zurückerhalten werden. Nach Einsetzen von

$$\Delta j = j_e - j_w = (p_e\,k_e + f\,t_n) - p_w\,k_w$$

in die Formel für T_0 erhält man den Grenzwert der Baukosten

$$k_{w0} = \frac{k_e\,(1 + p_e\,T_0) + f\,t_n\,T_0}{1 + p_w\,T_0} \text{ (Fr./MW)}$$

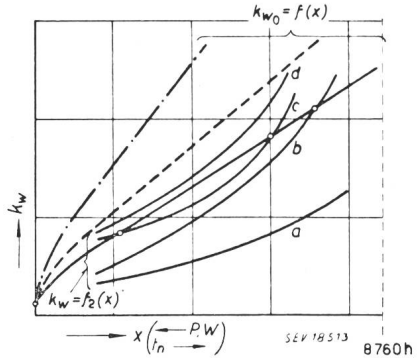

Fig. 6
Vergleich der tatsächlichen und zulässigen Baukosten
Erläuterungen im Text

Wenn eine Überschussleistung installiert werden muss, erhält man bei $\gamma < 1{,}0$ ähnlich

$$k_{w0} = \frac{\gamma\,k_e\,(1 + p_e\,T_0) + f\,t_n\,T_0}{1 + p_w\,T_0} \text{ (Fr./MW)}$$

Die Baukosten der Wasserkraftwerke dürfen um so höher liegen, je grösser γ, t_n, f und T_0 sind. Wenn T_0 und die Kostengrössen angegeben sind, dann ist $k_{w0} = f(t_n)$, wobei an Stelle des Parameters t_n auch die anderen energetischen Grössen P_n oder W eingesetzt werden können. Eine Gruppe derartiger Kurven für verschiedene f-Werte sind in Fig. 6 eingetragen, wobei diese Kurven sich alle bei $t_n = 0$ in einem Punkt der Ordinate treffen.

Beim Vergleich der k_w-Kurven sind mehrere Fälle zu unterscheiden, ähnlich wie bei den vorherigen s_w- und s_e-Kurven:

a) die k_w-Kurve befindet sich unterhalb der k_{w0}-Kurve;
b) die k_w-Kurve schneidet die k_{w0}-Kurve in einem Punkt;
c) die k_w-Kurve schneidet die Grenzkurve $k_{w0} = f(x)$ in zwei Punkten;
d) die Kurve $k_w = f_2(x)$ befindet sich oberhalb der entsprechenden Grenzkurve.

Im Bereich des Parameters x, in welchem $k_w < k_{w0}$ ist können die Mehraufwendungen der Baukosten $K_w - K_e$ im Laufe der festgesetzten Periode T_0 zurückerhalten werden.

2. Zur Ermittlung von $T_{sp} = -\mathrm{d}K/\mathrm{d}J$ können als Ausgangsfunktionen die Beziehungen $P_n = f(x)$ oder $W = f(x)$ dienen.

a) Für das Wasserkraftwerk werden auf Grund der Entwurfsangaben die Beziehungen

$$P_{wn} = f(x) \text{ und } K_w = f_1(P_{wn}) = \varphi(x)$$

aufgestellt. Wenn der Verbundbetrieb eine zusätzliche Leistung P_0 benötigt, ist die Leistungsbilanz $P_w + P_e = P_0$ woraus folgt:

$$P_e = P_0 - \gamma P_{wn} = P_0 - \gamma f(x)$$

Dann sind die vom Parameter x abhängigen Baukosten

$$K_v = K_w + K_e = \varphi(x) + k_e [P_0 - \gamma f(x)]$$

und die entsprechenden Betriebsausgaben

$$J_v = p_w K_w + j_e P_e = p_w \varphi(x) + j_e [P_0 - \gamma f(x)]$$

Nimmt man an, dass j_e vom Parameter x unabhängig ist, dann wird

$$T_{sp} = -\frac{\mathrm{d}K_v}{\mathrm{d}J_v} = -\frac{\varphi'(x) - k_e \gamma f'(x)}{p_w \varphi'(x) - j_e \gamma f'(x)}$$

Wenn γ konstant ist, wird T_{sp} eine Funktion von x und j_e.

Wenn bei den Veränderungen des Parameters x die beiden Grössen K_v und J_v in gleicher Richtung verlaufen, dann wird T_{sp} negativ. Dies bedeutet, dass der Parameter sich ausserhalb seines optimalen Bereichs befindet, d. h. er ist entweder viel zu gross oder zu klein. Wenn dagegen die Veränderungen der Baukosten K_v und der Betriebsausgaben J_v entgegengesetzt verlaufen, dann ist T_{sp} positiv und stellt die Kompensationszeit dar, in welcher die Erhöhung einer Kostengruppe mit den dadurch erzielbaren Ersparnissen der zweiten Kostengruppe ausgeglichen werden.

Für die Kompensationsperiode T_{sp} gilt als obere Grenze die Amortisationszeit der Anlage T_a. Es ist zu erstreben, dass während der Zeit T_a die Gesamtausgaben für Ausbau und Betrieb minimal seien. Diese Summe

$$\Sigma (K_v + J_v T_a) = \varphi(x) + k_e [P_0 - \gamma f(x)] + T_a \left\{ p_w \varphi(x) + j_e [P_0 - \gamma f(x)] \right\}$$

als Funktion des Parameters x erreicht ihren niedrigsten Wert bei

$$\varphi'(x) - k_e \gamma f'(x) + T_a \left\{ p_w \varphi'(x) - j_e \gamma f'(x) \right\} = 0$$

woraus sich für T_a ergibt:

$$T_a = \frac{\varphi'(x) - k_e \gamma f'(x)}{p_w \varphi'(x) - j_e \gamma f'(x)} = T_{sp}$$

Um die niedrigsten Gesamtausgaben (Anlagekosten plus Betriebsausgaben) während der Betriebsdauer der Anlage zu erreichen, soll T_{sp} der Amortisationszeit gleichgestellt werden. Praktisch wird T_{sp} zwischen den Grenzen 0 und T_a nach volkswirtschaftlichen Erwägungen ausgewählt.

b) Wenn als veränderlicher Parameter x die installierte Leistung des Wasserkraftwerkes $P = P_{wn}$ eingesetzt wird, sind die Ausgangsfunktionen

$$W_w = f(P_{wn}) \text{ und } K_w = f_1(P_{wn})$$

Die erste Funktion ist die energetische Charakteristik des Wasserkraftwerkes. Die von P_{wn} abhängigen Ausgaben des Verbundbetriebes sind:

$$K_v = f_1(P_{wn}) + k_e (P_0 - \gamma P_{wn})$$

und

$$J_v = p_w f_1(P_{wn}) + p_e k_e (P_0 - \gamma P_{wn}) + f \cdot f(P_{wn})$$

wobei f (Fr./MWh) wie vorher die vom Energieaufkommen abhängigen Ausgaben der Ersatzkraftwerke bedeutet. Dann beträgt die Ausgleichszeit

$$T_{sp} = -\frac{f_1'(P_{wn}) - \gamma k_e}{p_w f_1'(P_{wn}) - \gamma p_e k_e + f \cdot f'(P_{wn})}$$

Mit Hilfe der aufgestellten Formel ist es möglich, jenen Bereich des Parameters x zu ermitteln, in welchem die T_{sp}-Werte wirtschaftlich annehmbar sind.

4. Zusammenfassung

Die Grundforderung des wirtschaftlichen Vergleichs besteht im Erreichen der geringsten Betriebsausgaben im ganzen Komplex der Energieversorgung. Die Energiekosten allein geben jedoch nicht das entscheidende Urteil über die wirtschaftlich günstigste Energieanlage oder über die Grösse des betreffenden Parameters. Hier muss auch eine Reihe anderer Faktoren geprüft werden, die manchmal zu Abweichungen von der Zone der minimalen Energiekosten zwingen können. Als ein derartiges zusätzliches Kriterium dient die Ausgleichszeit der Bauaufwendungen, wobei die Betriebsausgaben mit den entsprechenden Baukosten verglichen werden, d. h. neben den jährlichen

Ausgaben auch die erforderlichen Investitionen zum Ausbau der Energieanlagen berücksichtigt werden.

Die wirtschaftlichen Berechnungen können jedoch nicht immer eine erschöpfende Antwort über die volkswirtschaftlichen Vorteile verschiedener Varianten bieten, da neben den mengenmässigen Faktoren noch andere wichtige Umstände massgebend sind, die in den mathematischen Formeln nicht eingesetzt werden können. Würden diese Faktoren ausser Acht gelassen werden, dann bekäme der Vergleich einen rein formalen Charakter, ohne das Wesen der tatsächlichen Vorteile einzelner Varianten auszuschöpfen.

Literatur

[1] Gesamtbericht, Zweite Weltkraftkonferenz 1930, Bd. IX, S. 3...17.

[2] *Kuckel-Krajevsky, S.:* Das elektroenergetische System. 1938. (russ.).

[3] *Kroms, A.:* Wasserkraftwerke im Verbundbetrieb. «Wasserkraft und Wasserwirtschaft» Bd. 38 (1943), Nr. 12.

[4] *Kroms, A.:* Zusammenarbeit der Wasser- und Wärmekraftwerke. «Technik und Verkehr» (1944), Nr. 8/9.

[5] *Solotarew, T.:* Wasserkraftwerk im elektroenergetischen System. 1939. (russ.).

Adresse des Autors:

A. Kroms, Engineer, 12 Brainerd Rd., Allston 34, Boston, Mass., USA.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Projekt eines neuen Unterwerkes in Winterthur

621.316.262.0011(494.34)

Die Leistungsfähigkeit der Verteilanlagen des Elektrizitätswerkes der Stadt Winterthur ist fast vollkommen in Anspruch genommen, da in den letzten 10 Jahren die Beanspruchung des Hochspannungsnetzes um etwa 60 % gestiegen ist. Bekanntlich bezieht das EW Winterthur die Energie von den Nordostschweizerischen Kraftwerken (NOK). Die bezogene 45-kV-Energie wird in 4 Unterwerken auf 3 kV abtransformiert und so verteilt. Um das Mittelspannungsnetz besser ausnützen und die nötigen Reserven schaffen zu können, wird z. Z. das 3-kV-Netz auf eine Spannung von 6 kV umgebaut.

Anders ist es bei den Unterwerken, deren Transformatorenleistung z. T. fast ganz ausgenützt ist. Das ist hauptsächlich beim Unterwerk Mattenbach so, wo es z. B. nicht mehr möglich ist, bei Ausfall benachbarter Unterwerke zusätzliche Versorgungsgebiete anzuschliessen. Dieses Unterwerk kann aber aus baulichen Gründen nicht mehr erweitert werden.

Auch das Verteilnetz genügt den heutigen Anforderungen nicht mehr. Die Gegend Grüze in Oberwinterthur ist durch die industrielle Erschliessung zu einem der Hauptbelastungszentren geworden. Das gesamte Gebiet wird heute über eine Freileitung versorgt, die noch dazu durch Gewitter-Überspannungen sehr gefährdet ist. Diese Leitung kann nur an Sonntagen während einiger Stunden für Unterhaltsarbeiten ausser Betrieb gesetzt werden, weil mehrere Betriebe durchgehend arbeiten und dauernd mit Energie versorgt werden müssen.

Aus diesen und ähnlichen Gründen beantragt der Stadtrat von Winterthur dem Grossen Gemeinderat die Erstellung eines neuen Unterwerkes «Grüze» und der dazu gehörenden Leitungen.

Das projektierte Unterwerk besteht aus einer 45-kV-Anlage mit einer Sammelschiene. An die Sammelschiene werden 5 Schaltfelder für 45-kV-Kabel und 3 Transformatorenfelder angeschlossen. Auf der 6-kV-Niederspannungsseite sind 2 Hauptsammelschienen und eine Hilfsschiene vorgesehen. Niederspannungsseitig werden 12 Schaltfelder ausgebaut und weitere drei als Reserve geplant. Die Anlage wird ohne weiteren Ausbau den Anschluss eines vierten Transformators ermöglichen. Vorläufig sollen nur 2 in Mattenbach freiwerdende Transformatoren von 8000 kVA Leistung installiert werden. Damit fallen beim Projekt die Anschaffungskosten für Transformatoren weg.

Die Firma Gebrüder Sulzer in Oberwinterthur muss mit Rücksicht auf ihre Hochspannungsapparate nach Umschaltung des Mittelspannungsnetzes von 3 auf 6 kV weiterhin mit 3-kV-Energie versorgt werden. Um dies zu ermöglichen, baut die Firma auf eigene Kosten eine 45/3-kV-Transformatorenanlage, die über ein besonderes 45-kV-Kabel durch das Unterwerk Grüze gespeist wird. Infolge dieser direkten Speisung der Firma Gebrüder Sulzer erhöht sich die Reserve-Transformatorenleistung des neuen Unterwerkes auf etwa 3000 kVA; die Leistung wird aber nach Vollausbau 20 000 kVA betragen.

Das Unterwerk wird auch mit einem Reserveanschluss des Hochspannungsnetzes der NOK ausgestattet, um in Notfällen die Stadt Winterthur von einer zweiten Stelle aus versorgen zu können.

Für die Heizung der Schaltanlagen und des Kommandoraumes soll die Verlustwärme der 45/6-kV-Transformatoren herangezogen werden.

Das Unterwerk wird keine ständige Bedienung erfordern. Allfällige Störungen werden über das bestehende Fernmeldenetz an eine zentrale Stelle gemeldet.

Die Baukosten sind auf Fr. 1 315 000 veranschlagt. Davon fallen Fr. 947 000 auf das Unterwerk Grüze und Fr. 368 000 auf die zu erstellenden Hoch- und Mittelspannungsleitungen. Dabei ist, wie bereits erwähnt, zu beachten, dass in den Baukosten die bereits vorhandenen Transformatoren nicht inbegriffen sind. *Schi.*

Beschädigung dreier 40-MW-Generatoren infolge eines Schalterdefektes

621.313.322.2.0046

[Nach *R. Doehne:* Three 40 Kw generators damaged by Circuit Breaker Failure, Electr. Wld. Bd. 135(1951), Nr. 23, S. 88...90.]

Vorwort der Redaktion: Der folgende Auszug aus der Beschreibung einer schweren Betriebsstörung in einem Kraftwerk ist der angesehenen amerikanischen Zeitschrift «Electrical World» entnommen. Die Techniker und Betriebsleiter in den Vereinigten Staaten verschliessen sich der Einsicht nicht, dass Betriebsstörungen, seien sie auf Konstruktions-, Materialfehler oder auf menschliches Versagen zurückzuführen, Vorkommnisse sind, aus denen es gilt, zum Nutzen der Allgemeinheit Lehren zu ziehen. Damit auch die Berufskollegen Gelegenheit haben, dies zu tun, vertrauen sie die Beschreibung von Störungen den Fachzeitschriften an. Es scheint uns, dass dieses Vorgehen verdient, auch bei uns, mehr als es bisher geschah, nachgeahmt zu werden.

Der Defekt am Antriebgestänge eines Generatorschalters verursachte im Kraftwerk Kearny (USA) Störungen an drei Generatoren und damit einen nicht unbedeutenden Produktionsausfall. Im folgenden wird die Störung erläutert und deren Verlauf dargestellt.

Die Störung

In Fig. 1 ist das Schaltschema des Kraftwerkes wiedergegeben. Wie diese Figur zeigt, war vor der Störung nur Generator *1* an die Sammelschiene angeschlossen. Sein Stator war im Sternpunkt über eine gemeinsame Nullpunktschiene und einen gemeinsamen Widerstand von 2 Ω geerdet. Beim Synchronisieren von Generator *3* um 5.33 Uhr brach das Gestänge des Generatorschalters zu Pol R. Dadurch wurde die Maschine nur einpolig mit der Sammelschiene verbunden. Einige Sekunden, nachdem auch der Nullpunktschalter geschlossen war, schaltete der Differentialschutz den Generator wieder ab; Kontrollen und Isolationsprüfungen enthüllten jedoch den Fehler nicht.

Inzwischen wurden die Generatoren *2*, *4* und *5* in Betrieb genommen. Um 7.29 Uhr wurde Generator *3* neuerdings auf die Sammelschiene synchronisiert. Hierauf lösten alle Generatorenschalter mit Ausnahme derjenigen der Ma-