

Zur Bewertung der Wasserkräfte

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

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **67 (1976)**

Heft 13

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915182>

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.

– Schwankender und unzeitgemässer Anfall von Primärenergie soll am Gewinnungsort und möglichst in der ursprünglichen Energieform gespeichert werden.

Beispiele: Stauseen für die Speicherung des sommerlichen Schmelzwassers, Hochtemperatur-Wärmespeicher für Sonnenkraftwerke

– Schwankungen im Bedarf an Endenergie sollen am Verbrauchsort und wenn möglich auch in Form der Endenergie ausgeglichen werden.

Beispiele: Mit Nachtstrom geheizte Warmwasserspeicher, kinetische und rein elektrische Speicher in den Unterstationen oder bei den Endabnehmern.

Auf diese Art wird erreicht, dass die hochwertigen Elektrizitätserzeugungs- und Transportanlagen, wie Kernkraftwerke, die Wärmekraftanlagen von Sonnenkraftwerken, das elektrische Hauptverteilstromnetz usw., mit einer hohen Ausnutzungsziffer betrieben werden können.

Literatur

- [1] Eidgenössisches Amt für Wasserwirtschaft, Mitteilung Nr. 46, Bern 1972.
- [2] P. V. Gilli und G. Beckmann: Spitzenlastdeckung durch thermische Energiespeicher, VDI-Berichte 236.
- [3] W. Heinz: Energiespeicherung mit supraleitenden Magneten, «E und M», Jahrgang 90, Heft 9.
- [4] H. A. Peterson, R. W. Boom und W. C. Young: A Look at Superconductive Storage, Electrical World, March 1, 1975.

Adresse des Autors

G. A. Burkhard, Grossplatzstrasse 7a, 8122 Pfaffhausen.

Zur Bewertung der Wasserkräfte

Von A. Kroms

Man unterscheidet in der Energiewirtschaft zwei Arten von Primärenergiequellen:

- die durch Naturvorgänge laufend sich erneuernden Energiequellen;
- die gelagerten oder erschöpfbaren Energievorräte, deren Energiereserven bei ihrem Abbau allmählich versiegen.

Zur ersten Gruppe gehört zurzeit vorwiegend die Wasserkraft, wogegen die zweite Gruppe die fossilen und Kernbrennstoffe umfasst. Bei der energiewirtschaftlichen Beurteilung der Primärenergievorkommen und ihrer Nutzung muss man die unterschiedlichen Eigenschaften beider Primärenergiegruppen in Rechnung stellen. Zu diesem Zweck sind gewisse Grundsätze nötig, nach denen die beiden Energiequellen gleichwertig erfasst und ausgewertet werden können. Obwohl die beiden Gruppen der Energiequellen seit langem in der Energiebilanz gegenüber stehen, fehlen leider noch allgemein vereinbarte Richtlinien darüber, wie die beiden Primärenergieträger in die Energiebilanz eingesetzt werden müssen.

Nachstehend sind einige Probleme, die bei der Eingliederung der Wasserkraft in die Primärenergiebilanz und bei der Auswertung des Nutzungsgrades der Wasserkraftvorkommen entstehen, erörtert.

1. Probleme der Energiebilanzen

Die Energieversorgung setzt sich auf ihrem Wege von den Primärenergievorräten bis zu den Endverbrauchern der Energie aus einer Reihe nacheinandergeschalteter Vorgänge zusammen (Fig. 1). Längs dieser Kette wird die in der Natur vorhandene Primärenergie in einer oder in mehreren Stufen in andere Energiearten umgewandelt, welche zum Energietransport und zum Gebrauch geeignet sind. Man nennt dies Veredelung der Primärenergie, wobei die in diesen Prozessen erzeugten Energieformen als Sekundärenergien bezeichnet werden. Leider bestehen bezüglich verschiedener Ebenen der umgewandelten Energie keine bestimmte, überall anerkannte Definitionen und Bezeichnungen.

Ein typischer Veredelungsprozess, der eine immer grössere Bedeutung in der Energieversorgung erlangt, ist die Erzeugung elektrischer Energie. Da die Nutzung der Wasserkräfte fast ausschliesslich über diese Umwandlungsstufe führt, sind die

En économie énergétique, on distingue deux genres de sources d'énergie primaire:

- les sources énergétiques inépuisables qui se renouvellent constamment au gré des phénomènes naturels;
- les réserves énergétiques accumulées ou tarissables, dont le montant s'épuise progressivement.

Au premier groupe se rattachent essentiellement les forces hydrauliques, tandis que le second groupe comprend les matières fossiles et nucléaires. Pour apprécier la présence et l'utilisation des énergies primaires, il faut tenir compte des propriétés différentes des énergies primaires des deux groupes. Pour cela certains principes sont nécessaires, qui permettent une commune mesure et appréciation de ces deux sources énergétiques. Bien que de longue date toutes deux se côtoient, nous manquons encore généralement de directives conventionnelles permettant d'introduire les deux sources d'énergie primaire dans les bilans énergétiques.

Nous évoquons ci-dessous quelques-uns des problèmes que soulève l'inclusion des forces hydrauliques dans le bilan des énergies primaires et l'évaluation du degré d'utilisation des réserves hydrauliques.

weiteren Erörterungen mit der Erzeugung elektrischer Energie verknüpft.

Bei der Bewertung der Rolle einzelner Energieformen in der Energiebilanz können nur diejenigen Energiemengen unmittelbar verglichen werden, die sich in der gleichen Phase der Energieumwandlungskette befinden. Hierzu können entweder die Endstufe der Kette, das heisst die von den Verbrauchern verwertete End- oder Gebrauchenergie, die Mittelstufe der Sekundärenergien oder auch die Anfangsstufe der Versorgungskette, das heisst der Primärenergieaufwand, benutzt werden. Obwohl die Endstufe der Versorgungskette den tatsächlichen Energieeinsatz für die eigentlichen Gebrauchszwecke andeutet und dadurch die effektiven Energiebedürfnisse an den Verbrauchsorten zeigt, begegnet man hier Schwierigkeiten dadurch, dass die Bewertung der «genutzten» Energie eine Analyse zahlreicher Verbrauchsprozesse und die Kenntnis der entsprechenden Umwandlungsgrade voraussetzt. Dies ist

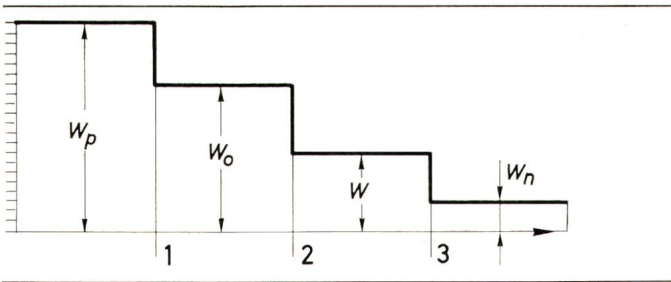


Fig. 1 Energieversorgungskette (in vereinfachter Darstellung)

- 1 Abbau der Primärenergiequelle
- 2 Umwandlung (Veredelung) der Primärenergie
- 3 Gebrauchsenergie (sekundäre Umwandlung)
- W_p Primärenergievorräte der Energiequelle
- W_0 eingesetzte Primärenergie (Aufwand der Umwandlungsanlage)
- W umgewandelte Energie (Ertrag der Umwandlungsanlage)
- W_n netto verwertete Energie (Endenergie)

aber praktisch kaum möglich. Ein anderes Problem besteht darin, dass über die Berechnung der «gebrauchten» Energie keine Einigkeit besteht, so dass man sich bei der Bestimmung der im Sinne der Verbrauchszielsetzung eingesetzten Energie auf verschiedene Begriffe stützen muss [1-4].

Aus den erwähnten Gründen werden die Energiebilanzen in der Regel am Anfang der Versorgungskette, mit dem Primärenergieaufwand, erstellt.

Die Menge der in Kraftwerken verbrauchten Primärenergie ergibt den Anteil der Versorgung mit elektrischer Energie am gesamten Primärenergieaufwand. Wenn die Primärenergiebilanz der Kraftwerke sich aus thermischer und hydraulischer Energie zusammensetzt, dann muss die Wasserkraft in eine äquivalente Menge thermischer Energie umgerechnet werden. Da man hierbei mit Energiemengen unterschiedlicher Natur, welche aus erschöpfbaren und unerschöpfbaren Quellen stammen, zu tun hat, wird die Umrechnung nach unterschiedlichen Methoden vorgenommen.

2. Wasserkräfte in der Primärenergiebilanz

Bei der Aufstellung der Energiebilanzen, welche unerschöpfbare und erschöpfbare Primärenergiequellen umfassen, müssen die Äquivalenzwerte beider Primärenergiegruppen festgelegt werden. Dies wird in der energiewirtschaftlichen Praxis auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen durchgeführt.

2.1 Man geht von der umgewandelten Energie aus, wobei in die Primärenergiebilanz 1 kWh der hydraulisch erzeugten elektrischen Energie mit ihrem physikalischen Energieäquivalent eingesetzt wird. Bei der Umrechnung in thermische Einheiten entspricht dann 1 kWh hydraulische Energie dem Primärenergiebetrag von 860 kcal (\triangleq 3600 kJ) (Fig. 2).

Damit wird der Anteil der Wasserkräfte am gesamten Primärenergieaufwand eher unterschätzt, weil unberücksichtigt bleibt, dass zur Erzeugung gleicher Mengen Elektrizität (W_n) auf thermischem Wege eine zusätzliche Menge erschöpfbare Primärenergie in der Höhe von

$$\Delta W_{0t} = k_t W_n - W_n = W_n (k_t - 1)$$

aufgebracht werden müsste, wobei W_n die hydraulisch erzeugte Energie und $k_t = 1/\eta_t$ den Verbrauchskennwert der thermischen Energieumwandlung bedeutet.

Beim angenommenen thermischen Wirkungsgrad von $\eta_t = 0,33$ ergibt sich hieraus

$$\Delta W_{0t} = 2 W_n \text{ oder } \Delta W_{0th}/W_n = 2$$

Falls man die gesamte tatsächlich aufgewendete Primärenergie eines Energiesystems abzuschätzen wünscht, dann müssen alle Nutzenergieströme, die aus Primärenergie verschiedener Art stammen, mittels ihrer Umwandlungskennwerte in entsprechende Primärenergieumengen umgerechnet werden:

$$W_0 = \sum_{i=1}^n k_i W_i,$$

wo k_i die entsprechenden Verbrauchskoeffizienten bedeutet.

Beim Zusammenwirken von hydraulischen und thermischen Energieanlagen ergibt sich hieraus

$$W_0 = k_t W_t + k_h W_h$$

Unter Annahme folgender Durchschnittswerte der Erzeugung elektrischer Energie:

hydraulisch: $\eta_h = 0,83$ und $k_h = 1,2$

thermisch: $\eta_t = 0,33$ und $k_t = 3,0$

erhält man den gesamten Primärenergieaufwand mit:

$$W = 3 W_t + 1,2 W_h = 3 W_t (1 + 0,4 h),$$

wo $h = W_h/W_t$ das Verhältnis der Erzeugung von hydraulischer zu thermischer Energie angibt. Durch die Einführung der gesamten umgewandelten Energie $W = W_t + W_h$ erhält man

$$W_0 = 3 W (W_t/W + 0,4 W_h/W) = 3 W (X_t + 0,4 X_h),$$

wobei X_t und X_h den Anteil der thermischen und hydraulischen Energiequellen an der gesamten Energieproduktion W bedeuten.

2.2 Eine andere Methode setzt die Verbrauchsmenge an thermischer Primärenergie in die Primärenergiebilanz ein, die von den Wasserkraften eingespart worden ist. Dadurch wird der Einfluss des Wasserkrafteinsatzes auf den Aufwand an erschöpfbaren thermischen Energieträgern erfasst (Fig. 3).

Damit wird der Anteil der Wasserkräfte am Primärenergieaufwand mittels einer Vergleichsmenge von

$$W_{vh} = W_h/\eta_t = k_t W_h$$

bestimmt. η_t entspricht dem Wirkungsgrad derjenigen thermischen Anlagen, welche durch die Wasserkräfte entlastet werden. Der Kennwert W_{vh} stellt die Einsparung an erschöpfbarer

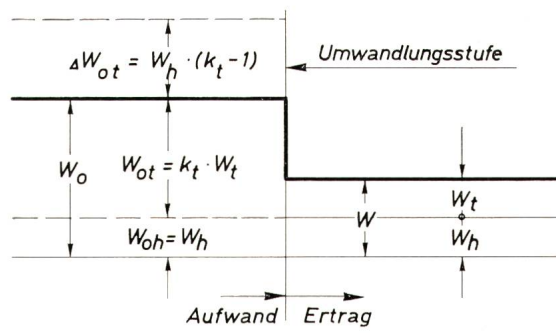


Fig. 2 Energiebilanz der Umwandlungsstufe (erste Methode)

W_0 Energieaufwand (Primärenergie)

W Energieertrag (umgewandelte Energie)

Indizes: t Energiestrom der thermischen Umwandlung

h Energiestrom der hydraulischen Umwandlung

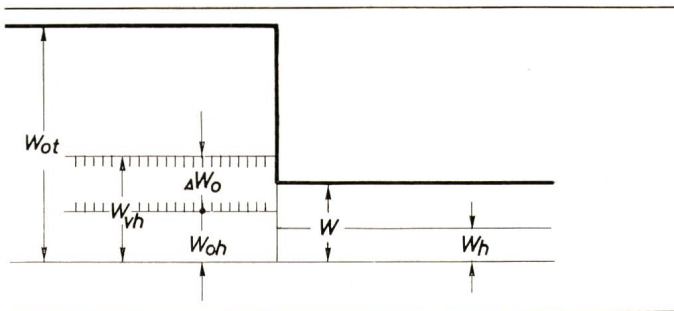


Fig. 3 Energiebilanz der Umwandlungsstufe (zweite Methode)

- W umgewandelte Energie
- W_{0t} Primärenergieaufwand bei ausschliesslich thermischer Umwandlung (wenn $W = W_i$)
- W_h Energieertrag der hydraulischen Umwandlung
- W_{0h} $k_h \cdot W_h$ Energieaufwand der hydraulischen Umwandlung
- ΔW_0 gesamte Ersparnis an Primärenergie
- W_{vh} Ersparnis an erschöpfbarer (thermischer) Primärenergie

Primärenergie dar, die von der hydraulischen Energieausbeute W_h verursacht wird.

Der Umrechnungswert k_t ist eine variable Grösse, die sich mit der Zeit und dem Ort verändert; dadurch hängt auch das Verhältnis W_{vh}/W_h von der jeweiligen Art der Erzeugung von thermischer Energie ab, so dass nur die Grössenordnung der Umrechnungsfaktoren, nicht aber feste Zahlen angegeben werden können.

Wenn man bedenkt, dass die Erzeugung der Energie W_h mit einem Aufwand an hydraulischer Primärenergie von

$$W_{0h} = W_h / \eta_h = k_h W_h$$

verknüpft ist, dann wird der totale Primärenergieaufwand durch den Einsatz der Wasserkräfte um

$$\Delta W_0 = W_h (k_t - k_h)$$

vermindert. Die relative Ersparnis in bezug auf die Primärenergie $W_{0t} = k_t W$, die bei ausschliesslicher Erzeugung von thermischer Energie aufgebracht werden müsste, ist

$$e = \Delta W_0 / W_{0t} = W_h (k_t - k_h) / k_t W = X_h (1 - k_h / k_t)$$

Bei $k_h = 1,2$ und $k_t = 3,0$ ergibt sich

$$e = X_h (1 - 0,4) = 0,6 X_h$$

Da die Wasserkraft kontinuierlich anfällt, so dass bei ihrer Nutzung die Primärenergiequelle nicht erschöpft wird, kann die wirkliche Ersparnis an vorhandenen Primärenergievorräten, die durch die Erschliessung der Wasserkräfte erzielbar ist, mittels der Vergleichsmenge

$$W_{vh} = k_t W_h$$

allein erfasst werden. Die relative Ersparnis an erschöpfbaren Primärenergievorräten ist dann

$$e_t = W_{vh} / W_{0t} = k_t W_h / k_t W = X_h,$$

das heisst, sie ist gleich dem Anteil der hydraulischen Energie in der Bilanz der umgewandelten Energie.

Während der Kennwert e die Veränderung des totalen Primärenergieaufwands W ausdrückt, gibt e_t nur den Einfluss der hydraulischen Energie auf den Aufwand an erschöpfbaren Energievorräten an. In einzelnen Ländern wird die Wasserkraft auf verschiedene Art in die Primärenergiebilanz eingegliedert [5, 6]. So wird zum Beispiel 1 kWh (\triangleq 3,6 MJ) mit folgenden Faktoren umgerechnet:

USA, BRD, Japan und andere	mit 9,768 MJ oder $k = 2,7$
Kanada	mit 10,55 MJ oder $k = 2,9$
OECD-Länder	mit 4,5 MJ oder $k = 1,25$
Schweiz, Schweden	mit 3,6 MJ oder $k = 1,0$

Man sieht daraus, dass in der Praxis beide Umrechnungsmethoden angewandt werden. Dies erschwert den Vergleich und die Auswertung von statistischen Angaben.

3. Nutzungskennwerte der Wasserkräfte

Die Nutzung der Wasserkräfte wird grundsätzlich von zwei Faktoren beeinflusst:

1. von der Umwandlung der Energie im Kraftwerk;
2. vom Ausbaugrad des verfügbaren Energiepotentials.

3.1 Nutzungsgrad der Wasserkraftwerke

Im Gegensatz zu den erschöpfbaren Energiequellen kann das Wasser nicht über mehrere Jahre gelagert werden, so dass die Nutzung der Wasserkräfte zeitgebunden ist. Die Grundforderung besteht in der möglichst vollständigen Nutzung des Energiedargebotes, weil die Energie des ungenutzt vorbeifliessenden Wassers in einem Flusskraftwerk einen Energieverlust darstellt, der in thermischen Anlagen durch Brennstoffaufwand ersetzt werden muss.

Die den Wasserkraftaggregaten zugeführte Energie wird mit einem sehr hohen Wirkungsgrad in elektrische Energie umgesetzt; in dieser Hinsicht übertreffen die Wasserkraftwerke alle anderen Kraftwerkarten. Erhebliche Verluste können aber bei der Nutzung der enormen Mengen des ungleichmässig anfallenden Energieträgers entstehen. Das Wasser ist eine Energiequelle mit einer verhältnismässig niedrigen Energiekonzentration, welche öfter nicht in gewünschter Masse aufgespeichert werden kann, so dass in den Perioden hohen Wasserdargebotes ein Teil des Energieträgers unausgenutzt abgeleitet werden muss.

Die Ausnutzung der verfügbaren Energie wird in Laufkraftwerken von zwei Faktoren bestimmt (Fig. 3) [7]:

- a) von der Ausnutzung des Energiepotential des Flusses,
- b) von der Energieumsetzung im Kraftwerk.

Bezeichnet man mit

W_0 das theoretische Energiepotential des Flusses bei gegebenem Gefälle,

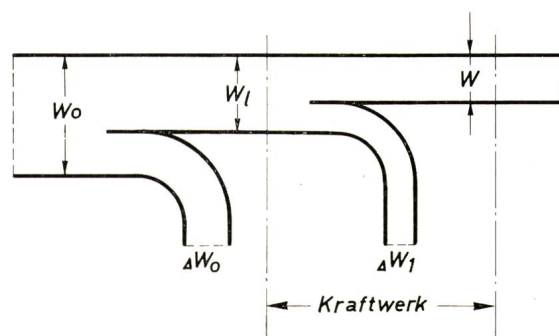


Fig. 4 Energiefluss im Wasserkraftwerk

- W_0 verfügbare hydraulische Energie (Primärenergie)
- W_1 Brutto-Energie des im Kraftwerk ausnutzbaren Wassers
- W Nettoenergie (Endenergie)
- ΔW_0 Verluste durch die Abzweigung des Wassers
- ΔW_1 Verluste bei der Energieumwandlung in der Kraftanlage

W_1 die Bruttoenergie der im Kraftwerk umgesetzten Wassermenge,

W die umgewandelte Energie (elektrische Energie),

dann erhält man folgende Kennwerte der Energienutzung:

$\eta_w = W_1/W_0$ Kennwert der Wasserflussnutzung

$\eta_e = W/W_1$ Wirkungsgrad der Energieumsetzung

Daraus ergibt sich der Nutzungsgrad:

$$\eta_h = \eta_w \cdot \eta_e$$

Im Wirkungsgrad η_e sind die Verluste enthalten, die mit dem eigenen Kraftwerkbetrieb verknüpft sind (in Turbosätzen, in Wasserbauten, bei der Regelung der Durchflussmenge u. a.). Der Wirkungsgrad der Wasserkraftmaschinen erreicht heute so hohe Werte ($\geq 0,85$), dass in dieser Richtung fast die überhaupt möglichen Grenzwerte erzielt worden sind. Eine grosse Bedeutung muss deshalb bei der Auslegung und beim Betrieb der Wasserkraftanlagen der Verwertung des verfügbaren Wasserdargebots beigemessen werden. Wasserverluste entstehen hauptsächlich aus zwei Gründen:

a) aus Überlaufverlusten, wenn die Schluckfähigkeit der Maschinenanlage oder die Aufnahmekapazität des Wasserspeichers überschritten wird,

b) aus der Wasserentnahme für andere Zwecke (Bewässerung, Schifffahrt, Wasserversorgung u. a.).

Die Ausnutzung des Wasserkraftpotentials eines Flusssystems kann durch verschiedene Massnahmen verbessert werden [9; 10]:

- durch die Erhöhung der installierten Kraftwerkleistung,
- durch die Errichtung grosser Wasserspeicher,
- durch eine zweckmässige Auslastung der Wasserkraftwerke in Energiesystemen.

Eine höhere Maschinenleistung ermöglicht es, die Verluste zu verringern, wodurch auch die hohen Bauaufwendungen für die Wasserbauten besser ausgenutzt werden. Eine geringere Auslastung einer vergrösserten Maschinenanlage während der

wasserarmen Jahreszeiten ist annehmbar, weil die Kosten des maschinellen Teils im Verhältnis zu den umfangreichen Wasserbauten gering sind [11]. Wenn diese Aggregate bei niedriger Wasserführung die Tageslastspitzen decken können, wird im Energiesystem eine entsprechende thermische Leistung eingespart.

Der ausschlaggebende Faktor bei der Ausnutzung des ungleichmässigen Wasserdargebots ist die Möglichkeit der Wasserspeicherung. Dabei erhöht jeder neuer Speicher die Elastizität aller niedriger liegenden Kraftwerke. Es entstehen *Kraftwerkketten* die als elastische Energieerzeugungsgruppen anzusehen sind.

Beim Zusammenwirken der Wasserkraftwerke mit anderen Stromerzeugungsanlagen des Energiesystems müssen die Wasserkraftwerke so ausgelastet werden, dass sie die Forderungen der Energie- und der Leistungsbilanz des Systems gleichzeitig so weit wie möglich erfüllen. Dies wird erzielt, wenn die Wasserkraftwerke bei zurückgehendem Wasserdargebot zur Deckung der Lastspitzen eingesetzt werden (Fig. 5) [7; 9; 10]. Dadurch wird die Jahreskurve ihrer verfügbaren Leistung ausgeglichen und der Bedarf von thermischer Reserve vermindert.

3.2 Nutzung des naturgegebenen Potentials

Das Wasser gibt seine potentielle Energie längs des ganzen Flusslaufs ab. Um die Wasserkräfte völlig auszunutzen, muss das Potential einer Flussstrecke an einer Stelle gestaut werden. Dadurch wird ein Staubecken gebildet, dem die gespeicherte Energie je nach dem Bedarf entnommen werden kann.

Praktisch kann man bei der Bewertung der verfügbaren Vorräte an Primärenergie nur eine begrenzte Strecke des Potentialgefälles (bei Wasserkraft der Höhenunterschied) berücksichtigen. Aus diesem Grunde ist die verfügbare Primärenergie von den zugrunde gelegten Annahmen abhängig. Die energetischen Kennwerte, welche die Ausnutzung der Primärenergie charakterisieren, werden beeinflusst, je nachdem wie das naturgegebene Potential der Energiequelle erfasst worden ist. Diese Tatsache kommt bei der Bewertung der Wasserkraftvorräte besonders zum Ausdruck [3, 12]. Man spricht dabei von «ausbauwürdigen» und «nicht ausbauwürdigen» Wasserkraften, wobei die Ausbauwürdigkeit im Sinne eines Vergleichs mit andern Arten der Energieerzeugung gemeint ist. Die Ausbauwürdigkeit wird von technischen, energetischen und wirtschaftlichen Faktoren beeinflusst, welche verschieden bewertet werden können und von Zeit und Ort abhängen. Dies führt dazu, dass die Angaben über das verwertbare Wasserkraftpotential sehr stark streuen.

Der Energieumwandlungsgrad jeder Anlage setzt sich aus zwei Grundkennwerten zusammen:

$$\eta_u = \eta_0 \cdot \eta_a,$$

worin η_0 den theoretischen Wirkungsgrad des Umwandlungsvorgangs und η_a den technischen Gütegrad der Anlage bedeutet.

Der Nutzungsgrad der Wasserkraftwerke η_h enthält eigentlich nur den technischen Gütegrad der Anlage η_a . Nachstehend wird der Begriff des zweiten Kennwerts, des theoretischen Umwandlungsgrads, betrachtet, wobei hierüber verschiedene Ansichten möglich sind.

Bei der üblichen Bewertung der Wasserkraftnutzung wird die potentielle Energie, welche dem durch die Aufstauung erzielten Höhenunterschied ΔH proportional ist, als die ver-

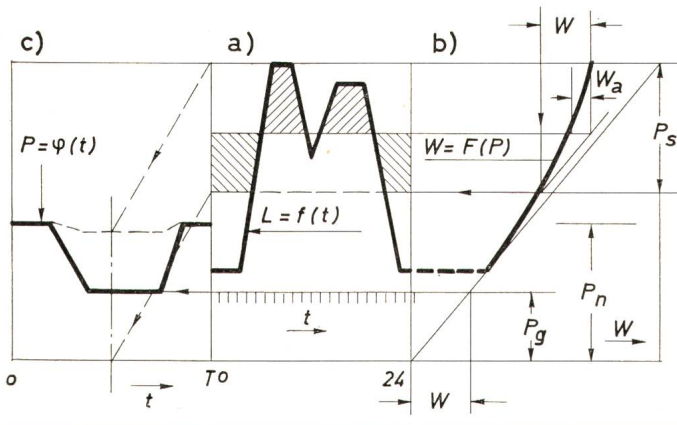


Fig. 5 Wasserkraftwerk im Grund- und im Spitzenlastbetrieb

- a) $L = f(t)$ Tageslastkurve
 b) $W = F(P)$ Integralkurve der Energie (Energieleistungskurve)
 c) $P_h = f(t)$ Jahreskurve der verfügbaren Wasserkraftleistung
 W erzeugte hydraulische Energie
 P_g und P_s verfügbare Grund- und Spitzenleistung
 P_n installierte Wasserkraftleistung
 W_a erforderlicher Speicherinhalt

fügbare Primärenergie der Energiequelle angenommen (Fig. 6); es wird also $\Delta H = H_0$ gesetzt, wobei H_0 das ausnutzbare Potential bedeutet. In bezug auf diesen begrenzten Potentialbetrag ist der theoretische Umwandlungsgrad $\eta_0 = \Delta H/H_0 = 1,0$, so dass man einen totalen Nutzungsgrad von

$$\eta_u = \eta_a = \eta_h = \eta_w \cdot \eta_e$$

erhält. Wenn dabei eine vollständige Ausnutzung des Wasserdargebots erzielt wird, dann ist $\eta_w = 1,0$ und $\eta_u = \eta_e \cong 0,80$. Bei diesen Annahmen übertrifft der Wirkungsgrad der Wasserkraftwerke bei weitem die Wirkungsgradwerte der thermischen Anlagen.

Dabei ist der Nutzungsgrad der Wasserkräfte η_u auf das Potential einer willkürlich herausgegriffenen Flußstrecke bezogen worden, ohne die höher und niedriger liegenden Potentialstufen der Energiequelle in Rechnung zu stellen. Er drückt also nicht die Nutzung des Arbeitsvermögens der ganzen Energiequelle aus. Die Verluste an naturbedingt anfallender Energie, die längs der unausgebauten Flußstrecken auftreten, sind im Ausdruck $\eta_u = \eta_a$ nicht erfasst.

Wenn man das verfügbare Potential der Energiequelle längs des *ganzen Flusslaufs* H_p berücksichtigt, ergibt sich als theoretischer Wirkungsgrad

$$\eta_0 = \Delta H/H_p < 1,0$$

Da das Verhältnis $\Delta H/H_p$ je nach dem Flussausbau verschiedene Werte annimmt, kann der auf diese Weise errechnete Wert erheblich unterhalb der oben angeführten η_h -Werte liegen.

4. Ausnutzungsgrad der Energiequelle

Die bei der Bestimmung des Nutzungsgrads der vorhandenen Energiequellen entstehenden Probleme ergeben sich aus der Tatsache, dass die verfügbare Primärenergie auf verschiedene Weise geschätzt werden kann. Ob man einige Energiebeträge als Verluste bei der Erschliessung der Primärenergiequellen ansehen oder sie in die Energiebilanz gar nicht aufnehmen soll, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Die praktisch angewendeten Lösungen liegen zwischen zwei Grenzfällen:

- dem Wirkungsgrad der Energieumwandlung innerhalb der Kraftanlage;
- dem totalen Nutzungsgrad des verfügbaren Energiepotentials.

4.1 Im ersten Falle wird die verfügbare Primärenergie nur durch das Potentialgefälle innerhalb des eigentlichen Energieumwandlers, das heisst zwischen dem Ein- und Austrittspunkt des Energieträgers, ausgedrückt. Die vor und nach der Anlage vorhandenen Potentialstufen, welche aus praktischen Gründen unausgenutzt geblieben sind, werden nicht mitgezählt. Laut dieser Auffassung des Primärenergiedargebots ist der theoretische Wirkungsgrad $\eta_0 = 1,0$, so dass der praktische Kennwert $\eta_u = \eta_0 \cdot \eta_a = \eta_a$ nur die technische Güte der Anlage charakterisiert. Er gibt nicht an, in welchem Masse die natürlichen Gegebenheiten der vorhandenen Energiequelle von der betreffenden Anlage ausgenutzt werden. Man nennt diesen Kennwert *innerer Wirkungsgrad* des Umformers, weil er nur im Rahmen der eigentlichen Anlage gilt, ohne die Potentialstufen ausserhalb des Umformers zu berücksichtigen. Dieser Kennwert wird zur Beurteilung der Energienutzung in Wasser-

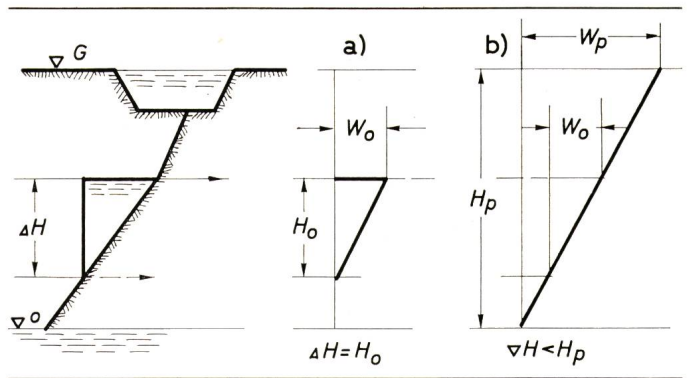


Fig. 6 Nutzung des verfügbaren Energiepotentials

«O» Nullebene (Meeresspiegel)

«G» obere Grenzebene

H_p verfügbares Potential der Energiequelle

W_p Energieinhalt der Energiequelle

$\Delta H = H_0$ ausgenutzte Potentialstufe

W_0 Energieinhalt des ausgenutzten Potentialbetrags

a) Nutzungsgrad nach dem ersten Grenzverfahren (innerer Wirkungsgrad):

$$\Delta H = H_0 \text{ und } \eta_0 = \Delta H/H_0 = 1,0$$

b) Nutzungsgrad nach dem zweiten Grenzverfahren (Einsatzgrad der Energiequelle):

$$\Delta H = H_0 < H_p; \eta_{0p} = \Delta H/H_p < 1,0 \text{ (oder } W_0/W_p < 1,0 \text{).}$$

kraftwerken angewandt, und da er sich auf den begrenzten Potentialbetrag der Aufstauung ΔH bezieht, übertrifft der auf diesem Wege berechnete Wirkungsgrad der Wasserkraftanlagen in der Grössenordnung von $\eta_u \cong 0,80$ den Wirkungsgrad der thermischen Anlagen [12-14].

4.2 Im anderen Grenzfall wird das Primärenergiedargebot der Energiequelle mit ihrem totalen Arbeitsvermögen bis zu den physikalischen Grenzen des naturgegebenen Potentials (H_p), eingesetzt. Der theoretische Nutzungsgrad des Wasserkraftdargebots bestimmt sich damit zu

$$\eta_{0p} = \Delta H / H_p < 1,0$$

Der Kennwert η_{0p} stellt den *Ausnutzungsgrad der verfügbaren Energiequelle* dar; er charakterisiert den Ausbaugrad des Flusses. Wenn das Potential der Energiequelle in mehreren nacheinandergeschalteten Stufen ausgenutzt wird, dann setzt sich der totale Wirkungsgrad aus der Summe der Teilwirkungsgrade zusammen:

$$\eta_{0p} = \Delta H_1 / H_p + \Delta H_2 / H_p + \dots = \sum_{i=1}^n \Delta H_i / H_p$$

Je nach dem Ausbaugrad des Flusses kann η_{0p} verschiedene Zahlenwerte von 0 bis max. $\eta_{0p} < 1,0$ annehmen.

4.3 Die Bedeutung des Ausnutzungsgrads der Wasserkräfte η_{0p} ergibt sich aus den Besonderheiten dieser Energiequelle. Beim Vergleich der Wasserkräfte mit den erschöpfbaren Energievorräten ergibt sich folgendes:

- Die Nutzung der laufend sich erneuernden Energiequellen ist zeitgebunden. Obwohl bei ihrer Verwertung die Energiequelle nicht erschöpft wird, muss der laufend anfallende Energieträger innerhalb einer kurzen Zeitspanne ausgenutzt werden, weil die grossen Massen des Energieträgers nur beschränkt gelagert werden können. Der ungenutzte Anteil verursacht eine Minderung an Nutzenergie, wodurch die erschöpfbaren Energiequellen verstärkt abgebaut werden müssen.

– Die nicht abgebauten Energieträger der erschöpfbaren Energiequellen stehen für eine spätere Ausnutzung bereit; ihre Nutzung ist grundsätzlich nicht zeitgebunden. Falls man aber ihre Vorkommen unvollständig abbaut, wobei die verbliebenen Vorräte so zerstreut sind, dass ihr späterer Abbau wirtschaftlich nicht mehr zu rechtfertigen ist, dann müssen auch diese Restvorräte als Verluste betrachtet werden. Durch einen unvollständigen Abbau der Energieträger aus ihren natürlichen Lagerstätten entstehen vielfach erhebliche Verluste längs einer Energieversorgungskette [4, 12, 16].

Die Verbrauchszahl

$$k = W_0/W$$

gibt die Vorräte an Primärenergie an, die zur Erzeugung der benötigten Nutzenergie (W) verbraucht werden müssen. Manchmal setzt man bei den erneuerbaren Energiequellen, wie bei der Wasserkraft, $k = 0$ mit der Begründung, dass es sich hier um Energie handelt, die ohnehin ständig verfügbar ist, dass also die Primärenergiequelle durch den Kraftwerkbetrieb nicht erschöpft wird [17]. Diese Auffassung könnte den Eindruck erwecken, dass sich die Wasserkraft am Primärenergieaufwand gar nicht beteiligen. Eine Bewertung dieser Art ist nur dann vertretbar, wenn die unversiegenden Energiequellen zur Deckung des ganzen Energiebedarfs ausreichen würden, so dass sich die Nutzung der erschöpfbaren Energiequellen erübrigt. Praktisch ist dies keineswegs der Fall, weil die vorhandenen Wasserkraften sogar bei ihrem vollständigen Ausbau nicht imstande sein würden, den beständig ansteigenden Energiebedarf allein zu decken. Das Schwergewicht der Energieerzeugung verlagert sich deshalb allmählich auf thermische Anlagen.

Wenn man zur Berechnung des Primärenergieaufwands die hydraulische und die thermische Energie mittels ihrer entsprechenden Verbrauchszahlen einsetzt, dann ergibt sich:

$$\text{bei thermischer Erzeugung } W_0 = k_t W$$

$$\text{bei kombinierter Erzeugung } W_0 = k_t (W - W_h) + k_h W_h$$

Die Ersparnis an Primärenergie durch den Einsatz von hydraulischer Energie ergibt sich zu

$$\Delta W_0 = (k_t - k_h) W_h \text{ oder } \Delta W_0/W = (k_t - k_h) X_h$$

Falls man $k_h = 0$ einsetzt, dann stellt der Ausdruck $\Delta W_0/W = k_t X_h$ die Ersparnis an erschöpfbarer Primärenergie, bezogen auf die Einheit der erzeugten Energie, dar.

4.4 Es stellt sich die Frage, ob die Wasserkraften der Welt imstande sind, ihren Anteil in der Primärenergiebilanz noch erheblich zu vergrößern.

Nach Angaben der 7. Weltenergiekonferenz, Moskau, 1968, wurde das gesamte Wasserkraftpotential der Welt auf

32900 TWh/a oder 3750 GWh (1 GWh \cong 8,76 TWh) geschätzt, wovon ungefähr 25 % oder 8200 TWh/a als technisch und wirtschaftlich ausbauwürdig erachtet wurden [18]. In den Berichten der 9. Weltenergiekonferenz, Detroit, 1974, ist das theoretische Wasserkraftpotential auf 80000 TWh/a oder 9100 GWh geschätzt worden [19]. Dabei ist angenommen worden, dass davon rund 13 % für die praktische Nutzung in Frage kommen; dies würde eine Energiemenge von 10300 TWh/a ergeben, deren Ausnutzung eine installierte Kraftwerkleistung von rund 2500 GW benötigen würde. Nach anderen Angaben beträgt das Wasserkraftpotential der Welt 3000 GWh oder 26300 TWh/a [20].

Die ausgebaute Wasserkraftleistung der Welt beträgt zurzeit rund 330 GW mit einer Jahresarbeit von 1300 TWh; dies bedeutet, dass vom ausbauwürdigen Wasserkraftpotential nur 12...15 % erschlossen worden ist. Im Weltmaßstab sind noch erhebliche Möglichkeiten für den Wasserkraftausbau vorhanden.

Literatur

- [1] Forschungsstelle für Energiewirtschaft an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Festlegung der Definitionen über den Nutzungsgrad in der Energiewirtschaft. *Praktische Energiekunde*, 11(1963)1, S. 3...15.
- [2] H. F. Müller und H. Schäfer: Energiewirtschaftliche Begriffe, Definitionen und Massgrößen. *Praktische Energiekunde*, 4(1956)2, S. 138...157.
- [3] A. Kroms: Zum Begriff des Wirkungsgrades der Energieanlagen. *Praktische Energiekunde*, 16(1968)5/6, S. 89...97.
- [4] A. Kroms: Zur Verringerung der Energieverluste. *Energie*, 18(1966)10 und 12, S. 424...432 und 528...533.
- [5] Bericht über die Energiekonzeptionen im Ausland. *Bulletin SEV/VSE* 67(1976)3, S. 112...119.
- [6] *Electric Power in Canada*, 1973. Department of Energy, Mines & Resources, Ottawa, Canada.
- [7] A. Kroms: Energetische Charakteristik der Wasserkraftwerke. *Die Wasserkraftwirtschaft*, (1952)6, S. 204...212.
- [8] A. Kroms: Der Mehrzweck-Flussausbau. *Technische Rundschau*, 58(1966)25, S. 1...7.
- [9] A. Kroms: Über die Ausbauleistung der Wasserkraftwerke. *ÖZE*, 8(1955)2, S. 48...62.
- [10] A. Kroms: Wasserkraftwerke in Energiesystemen verschiedener Leistungsstruktur. *ÖZE*, 18(1965)10, S. 385...396.
- [11] A. Kroms: Vergleich der Errichtungskosten von Kraftwerken. *ÖZE*, 16(1963)4, S. 289...301.
- [12] A. Kroms: Energieverluste und ihre Ursachen. *Wärme*, 79(1973)2/3, S. 21...29.
- [13] L. Heller: Beiträge zum Kampf gegen Nichtumkehrbarkeiten. *Energetische Technik*, 4(1954)9, 10 und 11, S. 381...385, 425...429 und 490...494.
- [14] A. Kroms: Kraftwerke als Elemente der elektrischen Verbundbetriebe. *Bulletin SEV (Die Seiten des VSE)*, 51(1960)19 und 20, S. 221...228 und 242...244.
- [15] J. J. Gilmore: Hydro's potential should be exploited. *Electrical World*, 185(1976)4, S. 28...31.
- [16] A. Kroms: Verluste: von der Energiequelle bis zum Verbraucher. *Bulletin des SEV*, 60(1969)21, S. 994...1002.
- [17] Elektrizität und Wärme. *Bulletin SEV/VSE*, 66(1975)21, S. 1161...1195.
- [18] L. Bauer: 7. Weltkraftkonferenz, Moskau, 1968., *ÖZE*, 22(1969)1, S. 1...19.
- [19] E. L. Nelson u. a.: Survey of World Energy Resources, 1974. 9. World Energy Conference, Detroit, 1974. Paper 1.2-33.
- [20] J. J. Morf und M. Roux: Überblick über die Weltenergielage. *Bulletin SEV/VSE*, 65(1974)24, S. 1761...1766.

Adresse des Autors

A. Kroms, 30 Rockland Av., Malden, Ma., 02148 USA.