Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 47 (1956)

Heft: 7

Artikel: Integralkurven der Energie : ihre Anwendung zur Lastverteilung in Verbundsystemen

Autor: Kroms, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060086

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: 15.01.2026

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

Kabelmantel bestehen aus öl-, benzin- und säurefestem Material. Die Lampe wird serienmässig mit einer Griffklammer aus Federstahl ausgerüstet, die mit einem Kugelgelenk versehen und deren Griff mit Kunststoff isoliert ist. Die Leuchte wurde vom SEV geprüft und vom Starkstrominspektorat für die Verwendung in trockenen und zeitweilig feuchten Räumen zugelassen. Normalausführungen: 2 × 4, 2 × 6 oder 2 × 8 W, für Netzanschluss 220 V ~. Lieferbar auch für 24, 36, 110 und 145 V ~.

Aktiengesellschaft Hermann Forster, Arbon

(Halle 13, Stand 4723.) Diese seit über 80 Jahren bestehende und als Lieferantin von *Stahlröhren, Küchen-Kombinationen* und *Ölradiatoren* bekannte Firma hat in ihr Fabrikationsprogramm *Kühlschränke* neu aufgenommen. Dieses Jahr wird schon eine zweite grössere Ausführung ausgestellt. Schon äusserlich fallen die Forster-Kühlschränke als etwas Besonderes auf. Ihr Vorteil liegt aber vor allem in ihrem äusserst leistungsstarken Kühlaggregat, dessen Leistung erst bei hochsommerlichen Temperaturen voll ausgenützt wird.

Sihlelektro GmbH, Zürich

(Halle 19, Stand 6207.) Die Sihlelektro GmbH zeigt ihre *Bodenpflegemaschinen* für Büro, Industrie, Gewerbe, Verwaltungen und Anstalten. Als Neuheit hat die Firma das Modell «Silectro-320» herausgebracht (Fig. 1). Dies ist eine mittelgrosse Mehrzweckmaschine zum Spänen, Fegen, Wachsen und Blochen, welche mit einer äusserst leistungsfähigen Staubabsaugevorrichtung versehen ist. Dadurch arbeitet der Apparat vollständig staubfrei und macht das Nachwischen, Flaumen und Abstauben nach der Reinigung überflüssig. Da der Apparat nach dem Baukastenprinzip konstruiert ist, kann das Zubehör je nach Art des zu reinigenden Bodens zusammengestellt werden. Das Gewicht der leeren Maschine beträgt nur 30 kg; zum Spänen und Reinigen kann der Apparat jedoch bis auf 50 kg belastet werden. Ein Kurzschlussankermotor von 450 W gewährleistet einen störungsfreien Dauerbetrieb. Für Grossbetriebe zeigt die Firma die bewährten Bodenpflegemaschinen «Rasant» und «Silectro-420» sowie den Hochleistungssauger «Silectro». Dieser dient für das Absaugen von Fegwasser und Staub. Als einziger Apparat dieser Art ist er mit einem Kurzschlussankermotor von 750 W versehen, so dass er eine Saugleistung von 1,90 m Wassersäule erreicht. Der Staubfilter wird durch die Zentrifugalwirkung des Luftstromes automatisch gereinigt. Eine selbsttätige Abstellvorrichtung verhindert das Überlaufen des aufgesogenen Wassers bei gefülltem Behälter.

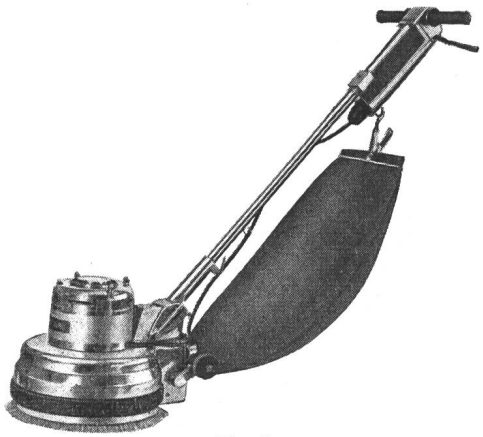


Fig. 1
Mehrzweck-Bodenpflegemaschine «Silectro-320»

R. Kälin, Basel

(Halle 8, Stand 2974.) Auch dieses Jahr wieder wird «Terolin»-*Rostschutz-* und *Dichtungslack* und «Terolin»-*Kitt* ausgestellt. Das von der Firma R. Kälin, Basel, seit 39 Jahren hergestellte «Terolin» eignet sich sowohl als Rostschutzmittel für Eisen und Blech, als auch zum Abdichten von Zement und Beton aller Art. Als Holzimprägnierungsmittel (Stangenschutz) eignet sich «Terolin»-Lack vorzüglich dank seiner Wetterbeständigkeit und Erdsäurebeständigkeit. Alle grösseren Elektrizitätswerke und Kraftwerke in der Schweiz verwenden «Terolin»-Produkte seit Jahrzehnten.

Integralkurven der Energie

Ihre Anwendung zur Lastverteilung in Verbundsystemen

Von *A. Kroms*, Boston (USA)

621.31.00.1.24 : 621.311.177 : 621.311.161

Zur Festlegung des Fahrplanes und der benötigten Kraftwerkleistung der Verbundsysteme müssen die Leistungs- und die Energiebilanzen für eine ausreichend lange Zeitperiode (ein oder mehrere Jahre) aufgestellt werden. Die Leistungsbilanz zeigt die Möglichkeiten der Lastdeckung während der verschiedenen Jahresperioden; die Energiebilanz stellt die Aufteilung der Energieversorgung auf einzelne Kraftwerkgruppen dar. Die beiden Bilanzen sind miteinander verbunden und sie verfolgen das gleiche Ziel: den gesamten Energiebedarf zwischen den zusammenwirkenden Kraftwerken so zu verteilen, dass die niedrigsten durchschnittlichen Energiekosten erzielt werden und die volkswirtschaftlichen Forderungen betreffs der Ausnützung der Wasserenergie und der anderen örtlichen Energiequellen erfüllt werden. Zur Ermittlung der optimalen Betriebsregimes verschiedener Kraftwerke können die Integralkurven der Energie viel beitragen; sie geben die Beziehung zwischen den Leistungs- und den Energiegrössen unmittelbar an und ermöglichen es dadurch, die Lastzonen der Kraftwerke so festzulegen, dass die Forderungen der beiden energetischen Bilanzen erfüllt werden. Die Anwendung de Integralkurven zur Lastplanung in Verbundsystemen wird in der vorliegenden Arbeit erörtert.

1. Die Last und die verfügbare Leistung

Die energetischen Kenngrössen der Energieerzeugungsanlagen — die Leistung P, bzw. die Last S und die Energieerzeugung W — sind durch die Zeitkoordinate t miteinander verbunden:

$$S = \mathrm{f}(t) \text{ und } W = \int S \, \mathrm{d}t = \Phi(t)$$

Die Beziehung zwischen S und t wird mittels zweierlei Kurven dargestellt (Fig. 1):

a) Die chronologischen oder die Gangkurven $S = f(t)$ zeigen den Lastablauf während der betreffenden Zeitperiode T (Tag, Monat, Jahr) an;

b) In den Dauerkurven sind die Lastwerte nach ihrer Grösse geordnet. Die Diagrammflächen unter

den Gang- und Dauerkurven stellen die entsprechenden Energiemengen dar. Diese Flächen können mathematisch (wenn die Gleichung der Kurve bekannt ist), durch Planimetrieren, oder durch graphisches Integrieren ermittelt werden. Da aber bei der Lastverteilung zwischen den Kraftwerken die

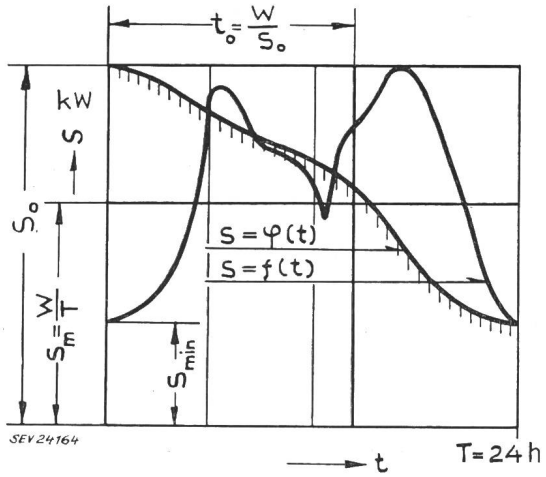
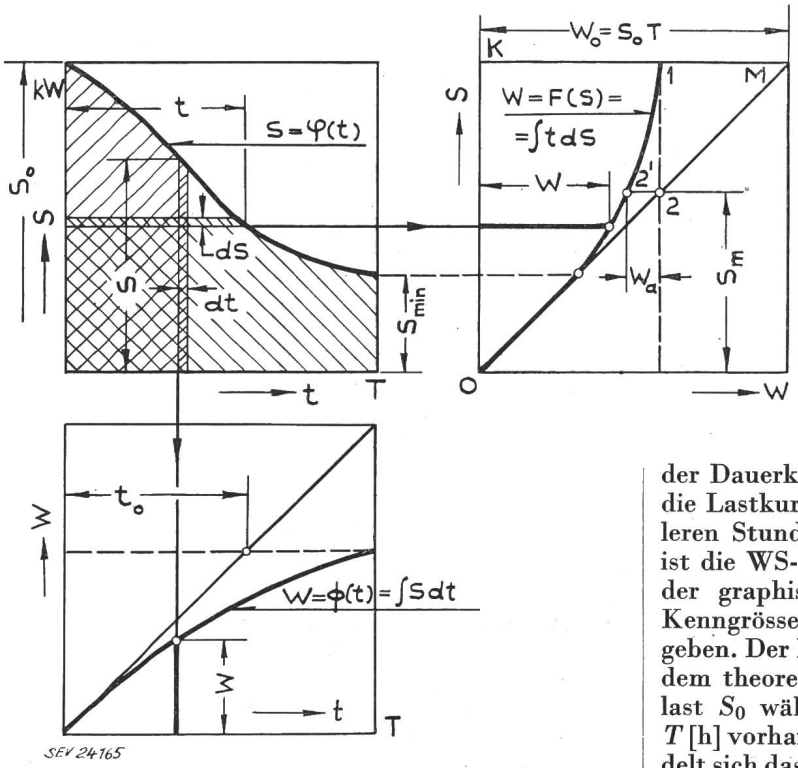


Fig. 1
Tageslastkurven
S Belastung; $S = f(t)$ Gangkurve; $S = \varphi(t)$ Dauerkurve; S_0 Tageshöchstlast; S_{min} Kleinstlast; S_m mittlere Last; t_0 Benützungsdauer der Höchstlast

Flächen verschiedener Zonen des Gesamtlastdiagrammes wiederholt bestimmt werden müssen, sind die genannten Verfahren zu diesem Zweck zu zeitraubend. Hier können *Integralkurven* helfen, mittels welcher die Energiemengen im linearen Maßstab



dargestellt werden und für jede Lastzone auf der W-Koordinatachse unmittelbar abzulesen sind. Dadurch ist es möglich, die Varianten der Lastverteilung schnell und bequem zu vergleichen, wie auch die besten Lastregimes bei den gegebenen Betriebsbedingungen zu finden.

Integralkurven zeigen die Energiemengen als Funktionen der Zeit oder der Leistung, je nach dem, ob man die Lastflächen entlang der Zeit- oder der Leistungskoordinate integriert (Fig. 2):

1. Die Beziehung

$$W = \int S \, dt = \Phi(t)$$

wird zur Festsetzung der benötigten Vorräte an Energieträgern, z. B. des Inhalts der Wasserspeicher oder der Brennstofflager, angewandt.

2. Die Integralkurve

$$W = \int t \, dS = \int \psi(S) \cdot dS = F(S)$$

stellt die Beziehung zwischen den beiden energetischen Kenngrössen — S (bzw. P) und W — dar. Diese Kurve wird Energieinhaltskurve genannt und ist bei den energiewirtschaftlichen Kalkulationen, vor allem bei der Lastverteilung zwischen den verschiedenen Kraftwerksarten, als ein wichtiges Hilfsmittel anzusehen. Die Möglichkeiten, die diese Integralkurve bei der Aufstellung von Lastplänen der Verbundsysteme bietet, sind in der Energiewirtschaft jedoch bisher noch nicht vollständig erkannt. Es ist deshalb angebracht, auf einige charakteristische Probleme der Energieversorgung, die mittels Integralkurven auf einfachem Wege gelöst werden können, hier in Kürze einzugehen.

Die Kurve $W = F(S)$ ist besonders für die Auswahl der Lastregime der abhängigen Kraftwerke, deren Energiedarbietung von ihren Energiequellen bestimmt wird und sich fortwährend verändert, unentbehrlich. Dies bezieht sich vor allem auf Wasserkraftwerke, Heizkraftwerke, wie auch auf andere Kraftwerkarten, bei deren Einsatz die Energiereserven ihrer Energiequellen massgebend sind. Weiterhin wird die Integralkurve $W = F(S)$ verkürzt als WS-Kurve bezeichnet. Sie kann aus der Gang- oder

Fig. 2
Integralkurven der Energie
Bezeichnungen siehe im Text

der Dauerkurve der Last entwickelt werden. Wenn die Lastkurven treppenförmig, z. B. nach den mittleren Stunden- oder Tageswerten, dargestellt sind, ist die WS-Kurve mittels der bekannten Verfahren der graphischen Integrierung aufzuzeichnen. Die Kenngrössen der WS-Kurve sind in Fig. 2 angegeben. Der Maßstab der Energieskala ergibt sich aus dem theoretischen Grenzregime: wenn die Höchstlast S_0 während der ganzen betrachteten Periode T [h] vorhanden ist, d. h. $S = S_0 =$ konst., verwandelt sich das Lastdiagramm $S = f(t)$ in ein Rechteck, dessen Fläche dem theoretisch höchsten Arbeitsvermögen $W_0 = S_0 \, T$ [kWh] entspricht. Die WS-Kurve fällt dann mit der Grenzgeraden OM zusammen; die W-Skale KM zeigt dadurch die höchste Energie-

ausbeute W_0. Die Ordinate, die vom Endpunkt der WS-Kurve gezogen wird, schneidet die Gerade OM im Punkt 2, der dem mittleren Lastwert $S_m = W/T$ entspricht. Der Abschnitt 2—2′ stellt die Schwankungen des Energiebedarfs W_a beiderseits des Mittelwerts S_m, d. h. ober- und unterhalb der S_m-Linie, dar. Wird der Energieträger dem Kraftwerk gleichmässig herangeschafft, dann entspricht W_a der Energiemenge, die dem Energiespeicher (Wasserspeicher, Brennstofflager) zu entnehmen ist, um die Schwankungen des Energiebedarfs zu überbrücken.

Nach den Ausgangsgrössen unterscheidet man Kurven der Last und der verfügbaren Kraftwerkleistung. Die Kurven beider Art sind miteinander verbunden, weil:

1. die mögliche Last von der verfügbaren Leistung der Kraftwerke begrenzt wird und
2. die Leistung einiger Kraftwerksarten, z. B. der Wasserkraftwerke, von ihrem Lastregime abhängig ist.

Die Ausgangskurven der Last sind die Tageskurven, mittels deren die Monats-, Saison- und Jahreskurven ermittelt werden. Es sind Versuche zu verzeichnen, die Beziehungen $S = f(t)$ und dadurch auch $W = F(S)$ mathematisch auszudrücken. Da aber der Verlauf des Energiebedarfs von zahlreichen örtlichen Faktoren beeinflusst wird, die sich ständig verändern, können die sichersten Ergebnisse auf zeichnerischem Wege erzielt werden. Dazu müssen typische Tageslastkurven für die in Frage kommende Zeitperiode aufgestellt werden. Auf Grund der typischen Kurven einzelner Jahressaisons oder Monate können die Leistungs- und Energiebilanzen des Verbundbetriebs zusammengestellt werden. Dafür sind die Lastkurven und die Kurven der verfügbaren Kraftwerkleistung gegenüberzustellen. Wenn die verfügbare Leistung der Kraftwerke sich mit der Zeit verändert, dann sind die Leistungsbeträge des Bedarfes und des Dargebots zeitlich zu koordinieren, um über die tatsächlichen Möglichkeiten der Bedarfsdeckung urteilen zu können [1][1]). Hier sollen die Ganglinien des Bedarfes und des Energiedargebots angewendet werden, um den Einfluss des Zeitelements zu erfassen. Je weniger zusätzliche Umwandlungen der Kurven vorgenommen werden, desto zuverlässiger und übersichtlicher sind die Ausführungen.

Die verfügbare Leistung der Kraftwerke oder der Verbundsysteme ist die Leistung, die bei den gegebenen Betriebsbedingungen tatsächlich erreicht werden kann. Nach dem Charakter der verfügbaren Leistung können Kraftwerke in zwei Gruppen eingeteilt werden [2]:

1. Die verfügbare Leistung der *unabhängigen* Kraftwerke ist bei normalen Betriebsumständen fast unveränderlich. Während der Perioden, in denen kein Aggregat beschädigt oder zum Zweck der planmässigen Überholung stillgelegt worden ist, kann die verfügbare Leistung dieser Werke ihrer installierten Engpassleistung P_n gleichgestellt werden. Zu den unabhängigen Kraftwerken gehört die Mehrzahl der Wärmekraftwerke, z. B. die Kondensationskraftwerke (K-Werke); hier sind ausserdem die Wasserkraftwerke einzureihen, welche grosse Jahresspeicher, oder sogar mehrjährige Wasservorräte besitzen (ausgedehnte Seen am Oberlauf des Flusses), so dass ihre verfügbare Leistung von den Schwankungen der Wasserführung nicht beeinflusst wird.

Im Lastplan des Verbundsystems müssen die Lastzonen der unabhängigen Kraftwerke auf Grund ihres energiewirtschaftlichen Vergleichs mit anderen Kraftwerken des Verbundbetriebs festgesetzt werden; hier sind verschiedene Faktoren — die Brennstoffart, die Energiekosten, die Anpassungsfähigkeit der Kraftwerke an Lastschwankungen u. a. zu berücksichtigen.

2. Die verfügbare Leistung der *abhängigen* Kraftwerke verändert sich in verschiedenen Jahreszeiten, in einzelnen Tagen, ja sogar innerhalb weniger Tagesstunden, je nach dem Energiedargebot ihrer Energiequellen oder nach dem Lastregime des Kraftwerks. Die wichtigste Kraftwerksart dieser Gruppe ist das Wasserkraftwerk (WK-Werk), wenn es entweder ohne Durchflussregelung arbeitet (Laufwerk), oder nur über einen Kleinspeicher zur kurzzeitigen Regelung verfügt. Eigentlich sind auch die WK-Werke mit Saison- oder Jahresspeichern abhängige Werke, weil sie nicht imstande sind, die Unterschiede in der Wasserführung verschiedener hydrologischer Jahre auszugleichen. Von Wärmekraftwerken sind hier die Heizkraftwerke (HK-Werke), wie auch diejenigen K-Werke einzureihen, deren Energieausbeute von ihrer Brennstoffgrundlage begrenzt wird.

Die abhängigen Kraftwerke unterscheiden sich weiter nach den Regelungsmöglichkeiten ihrer Leistung:

a) Bei einigen Kraftwerken ist der Verlauf der verfügbaren Leistung von der Energiequelle so festgesetzt, dass er mittels der Betriebsmassnahmen nur in mässigen Grenzen geregelt werden kann. Hierher gehören Laufwerke, Heizkraftwerke, wie auch Wind- und Gezeitenkraftwerke [3; 4]. Die verfügbare Leistung dieser Kraftwerke muss in jedem Zeitpunkt möglichst vollständig belastet werden, um die Verluste am zwangläufig anfallenden Energieträger einzuschränken.

b) Bei den anderen Kraftwerken ist es möglich, die Ausnützung der dargebotenen Energiemengen innerhalb einer gewissen Zeitperiode (Tage, Wochen oder Jahressaison) den Lastbedürfnissen anzupassen. Die Lastzonen dieser Werke sind im Lastdiagramm des Verbundsystems je nach dem Energiedargebot ihrer Energiequellen auszuwählen. Hierher gehören die meisten WK-Werke, welche Wasserspeicher zur Durchflussregelung besitzen; ihr Betriebsregime wird von der Wasserführung und dem Inhalt des Wasserspeichers bedingt. Bei dem gegebenen Energiedargebot W_q hängt die verfügbare Leistung dieser Kraftwerke $P = W_q/t$ [kW] von der ausgewählten Lastzone ab, weil die Benützungsdauer t sich je nach der Lage der Lastzone im Gesamtlastdiagramm verändert.

Bei der Aufstellung des Lastplans für Verbundsysteme sind die Forderungen der Leistungs- und der Energiebilanz gleichzeitig zu erfüllen. In der Leistungsbilanz muss die Gesamtlast zwischen den

[1]) siehe Literatur am Schluss der Arbeit.

einzelnen Kraftwerkgruppen so verteilt werden, dass die installierte Leistung eines jeden Kraftwerkes möglichst vollständig zur Deckung der Höchstlast eingesetzt wird. In der Energiebilanz ist dafür zu sorgen, dass die naturbedingt anfallenden Energiemengen der abhängigen Kraftwerke vom Verbundnetz jederzeit aufgenommen werden können. Die energetisch günstigste Lastverteilung zwischen den verschiedenen Kraftwerkstypen, die die beiden erwähnten Bedingungen erfüllt, kann mittels der *WS-Kurve* der Gesamtlast bestimmt werden. Dabei sind alle Leistungs- und Energiegrössen auf die Klemmen der Kraftwerke, d. h. auf die abgegebene Energie zu beziehen.

2. Charakteristik der Lastzonen

Die einzelnen Kraftwerke oder Kraftwerkgruppen decken in Verbundsystemen verschiedene Zonen der Gesamtlast. Je nach der Lage der Lastzonen unterscheidet man Grund-, Mittel- und Spitzenlast. Diese Aufteilung ist aber nur qualitativ und dient dazu, die einzelnen Lastbereiche allgemein zu charakterisieren, weil zwischen diesen Lastzonen keine bestimmten Grenzen bestehen. Deshalb wird weiterhin die Lastzone als Grundlast bezeichnet, die sich von der Grundlinie (Abszisse) des Gesamtlastdiagramms bis zum gegebenen Leistungswert nach oben erstreckt. Die Zone der Spitzenlast wird dagegen von den Lastspitzen abwärts gemessen. Bei den beiden Lastregimen wird die Kraftwerkleistung also in zwei entgegengesetzten Richtungen — beim Grundlastbetrieb von unten, beim Spitzenlastbetrieb von oben — in das Lastdiagramm eingesetzt. Die Breite der Lastzonen wird dabei nicht begrenzt, d. h. ein jeder Leistungswert zerteilt das Lastdiagramm in die Grundlast- und die Spitzenlastzone.

Die Ermittlung der energetischen Kennwerte von Kraftwerken ist in verschiedenen Lastregimes mit Hilfe der Integralkurve $W = F(S)$ in den Fig. 3...8 veranschaulicht worden.

Wird die Kraftwerkleistung zur Deckung der *Grundlast* eingesetzt, dann sind nach der Art des Kraftwerkes zwei Fälle zu unterscheiden (Fig. 3):

a) Die energetische Ausgangsgrösse der unabhängigen Kraftwerke ist ihre Nennleistung P_n. Die Energieausbeute dieser Werke wird von der relativen Grösse der Kraftwerksleistung (P_n/S_0) und der Art des Lastdiagramms, d. h. von der Breite der unveränderlichen Grundlast (S_0/S_{min}) bestimmt. Die Energieerzeugung W, die mittlere Belastung S_m und die Schwankungen der Energieerzeugung sind dem WS-Diagramm zu entnehmen.

b) Die Ausgangsgrösse der meisten abhängigen Kraftwerke ist das Energiedargebot W_q (bzw. die Leistung P_q) ihrer Energiequelle, das sich normalerweise mit der Zeit verändert. Die verfügbare Leistung, die in der Starklastzeit erreicht werden kann, hängt von mehreren Umständen ab: 1. von der Möglichkeit, den Energieträger aufzuspeichern und gemäss den Lastforderungen zu verarbeiten; 2. von der Art des Lastdiagrammes und der relativen Grösse des Energiedargebotes W_q/W, wobei W der gesamte Energiebedarf des Verbundsystems ist. Ist das Kraftwerk imstande, den Lastschwankungen ohne Verlust am Energieträger zu folgen, dann kann seine verfügbare Leistung während der Starklaststunden die mittlere Leistung der Energiequelle überschreiten, d. h. $P > P_q$; hier muss ein ausreichender Energiespeicher (W_a) vorhanden sein. $P = P_q$ ist die höchste verfügbare Leistung ohne Energiespeicher, weshalb in der Schwachlastzeit mit dem Verlust einer Energiemenge W_v zu rechnen ist; die verwertbare Energie ist dann $W = W_q - W_v$ und die mittlere Leistung des Kraftwerks $P_m < P_q$. Dies kommt bei Laufwerken vor, wenn ihre Rolle in der Leistungsbilanz des Verbundsystems so bedeutend ist, dass sie während der Hochwasserperiode teilweise auch die veränderliche Mittellast decken; die Wasserverluste

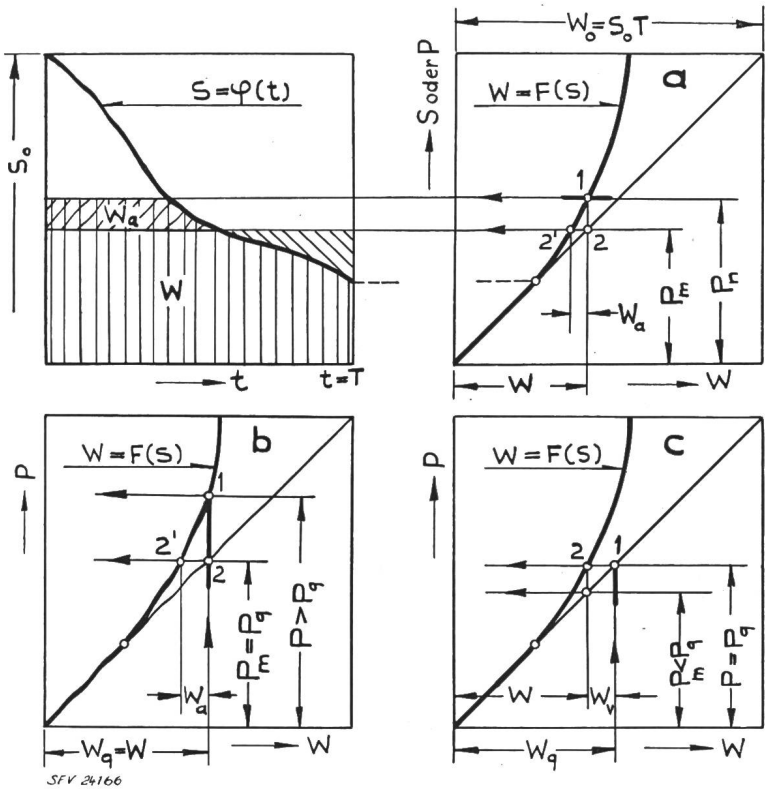


Fig. 3
Kenngrössen der Kraftwerke im Grundlastbetrieb

a unabhängiges Kraftwerk (P_n gegeben)
b abhängiges Kraftwerk, mit Energiespeicher (W_q gegeben)
c abhängiges Kraftwerk, ohne Energiespeicher (W_q gegeben)

P_n installierte Leistung; P verfügbare Leistung; W_q Energiedargebot der Energiequelle; P_q Leistung der Energiequelle; W ausgenützte Energie; W_a aufgespeicherte Energie; W_v verlorene Energie

in den Schwachlaststunden können durch Erweiterung der Verbundnetze oder durch Entwicklung besonderer anpassungsfähiger Energieverbraucher herabgesetzt werden.

Die Ausnützung der verfügbaren Energiequelle kann von zwei Faktoren — dem Energiespeicher und der installierten Leistung des Kraftwerks — beschränkt werden. Bei der Mehrzahl der WK-Werke sind die Möglichkeiten der Durchflussregelung begrenzt. Trägt man in das WS-Diagramm eine Hilfskurve ein (Fig. 4), deren waagrechter Abstand von der Integralkurve $W = F(S)$ dem Energieinhalt des Ausgleichspeichers W_a entspricht, dann zerteilt diese Hilfskurve den Energiebetrag 2 — 2′ in die aufzuspeichernde (d. h. ausnützbare) Energie W_a und die verlorene Wasserenergie W_v. Die verfügbare Leistung des WK-Werks P entspricht der verwerteten Energie $W = W_q - W_v$. Falls der Energiespeicher im Laufe der betreffenden Zeitperiode mehrmals gefüllt und entleert wird, muss der Abstand zwischen der WS- und der Hilfskurve entsprechend vergrössert werden. Zur Festsetzung des benötigten Speicherinhalts sind die Integralkurven $W = \Phi(t)$, welche den Verlauf des Energiebedarfs und Dargebots darstellen, anzuwenden.

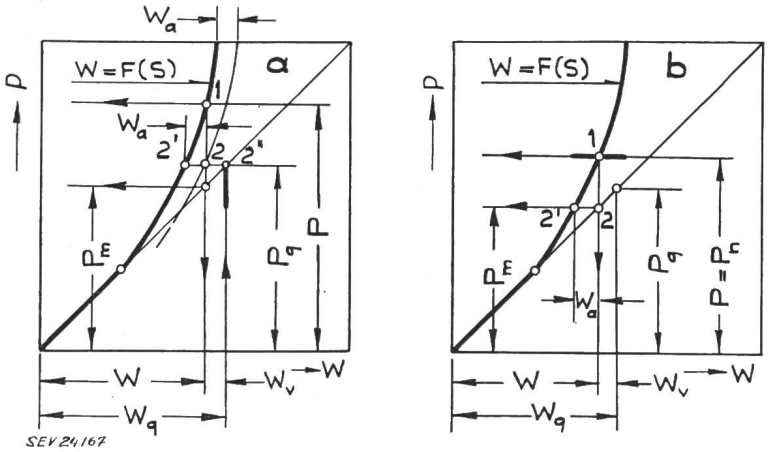


Fig. 4
Beschränkungen in der Ausnützung der naturbedingt anfallenden Energiemengen W_q
a vom Energiespeicher W_a; *b* von der installierten Leistung P_n

Wenn das Energiedargebot der Energiequelle W_q eine verfügbare Leistung ermöglicht, die die installierte Leistung des Kraftwerks P_n übertrifft, dann muss der überschüssige Energieträger für die anderen Jahressaisons aufgespeichert werden, anderenfalls man mit gewissen Verlusten am Energieträger zu rechnen hat. Eine zu niedrig ausgewählte Ausbauleistung P_n verursacht beträchtliche Wasserverluste während der Hochwasserperioden in Laufwerken und auch in WK-Werken mit Kleinspeichern. Deshalb ist die wirtschaftlich günstigste Ausbauleistung der abhängigen Kraftwerke sehr sorgfältig zu prüfen, weil von der richtigen Auswahl des P_n die energiewirtschaftlichen Ergebnisse und die Rolle dieser Kraftwerke in den Verbundsystemen wesentlich beeinflusst werden [5].

In den Jahresperioden, in denen das Energiedargebot W_q zurückgegangen ist, kann die verfügbare Leistung der abhängigen Kraftwerke erheblich sinken. Wenn eine entsprechende Senkung der Nutzlast in der betreffenden Jahressaison nicht zu erwarten ist, dann muss das Verbundsystem eine besondere Ausgleichsleistung bereithalten, die den Rückgang der abhängigen Kraftwerkleistung überbrückt [6]. Die Ausgleichsleistung verdoppelt (doubliert) die schwankende Leistung der abhängigen Kraftwerke und erhöht entsprechend die installierte Gesamtleistung des Verbundsystems. Die Grösse der benötigten Ausgleichsleistung ist mit baulichen und betrieblichen Massnahmen nach Möglichkeit zu beschränken, weil sie wenig ausgenützt wird und die Bauaufwendungen der Verbundsysteme vergrössert. Die jahreszeitlich freie Ausgleichsleistung kann durch Errichtung besonderer regelbarer Energieabnehmer belastet werden [7].

Die jahreszeitlichen Leistungsrückgänge der abhängigen Kraftwerke können mittels der Energiespeicher vermindert oder sogar vollständig vermieden werden:

a) Die Überschüsse des Energieträgers werden für die energiearmen Saisons aufgespeichert, d. h. man verteilt den Energieträger mit Hilfe von Langspeichern zwischen die verschiedenen Jahresperioden je nach Energiebedarf. Ein charakteristisches Beispiel der Langspeicherung ist die Aufteilung der Wasserenergie von Gebirgsflüssen auf die Winter- und Sommerenergie.

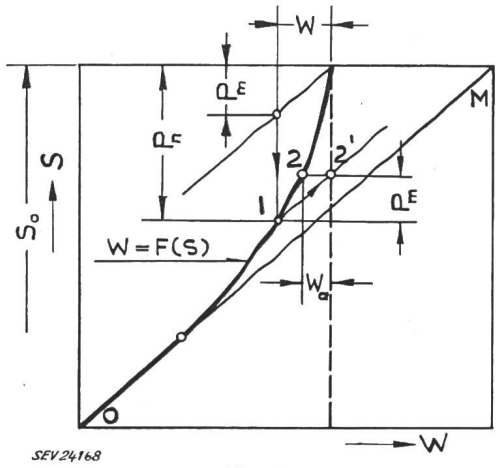


Fig. 5
Kenngrössen der abhängigen Kraftwerke im Spitzenlastbetrieb
Bezeichnungen siehe im Text

b) In Perioden des niedrigen Energiedargebotes W_q werden die Lastzonen der betreffenden Kraftwerke in die Tageslastdiagramme des Verbundsystems nach oben, in Richtung der Spitzenlast, verschoben. Dies kann mittels der Kleinspeicher (Tagesspeicher) erreicht werden und ist eine übliche Massnahme bei der Auswahl der Lastzonen der Flusskraftwerke. In den höher liegenden Lastzonen ist es möglich, beim sinkenden Energiedargebot W_q eine grössere verfügbare Leistung $P = W_q/t$ während der Starklaststunden aufrecht zu erhalten.

Die energetischen Kenngrössen der abhängigen Kraftwerke im *Spitzenlastbetrieb* sind bei dem gegebenen Energiedargebot W_q in Fig. 5 dargestellt. Die Voraussetzung zur Verwirklichung dieses Lastregimes ist das Vorhandensein eines ausreichenden Energiespeichers W_a.

Auf gleichem Wege werden die Kennwerte der Kraftwerke im WS-Diagramm ermittelt, wenn das Kraftwerk eine beliebige Zone der Mittellast deckt.

Die Energieausbeute und die Leistung der Kraftwerke sind miteinander verbunden: $t = W/P$ [h], wobei t die Ausnützungsstunden der Leistung bedeutet. Die zeichnerische Ermittlung der Kurven $t = \Psi(P)$ ist für verschiedene Lastzonen in Fig. 6 dargestellt; dabei entspricht die t_g-Kurve der Grundlastzone, die t_s-Kurve dagegen der Zone der Spitzenlast. Die Ermittlung der Kurven stützt sich auf die Beziehung

$$t_g = \frac{W_g}{P_g} = \frac{a}{S_0}$$

Bei $S_0 = 1{,}0$ wird die Länge der Energieskala $KM = S_0\,T = T$ und der Abschnitt $a = t_g$; ähnlich werden die t_s-Werte ermittelt. Bei der Erweiterung der Grundlastzone von S_{min} bis S_0 vermindern sich die t_g-Werte von T bis t_0, wobei t_0 die Benützungsdauer der Höchstlast bedeutet. Im Spitzenlastbetrieb erhöht sich t_s von 0 bis t_0.

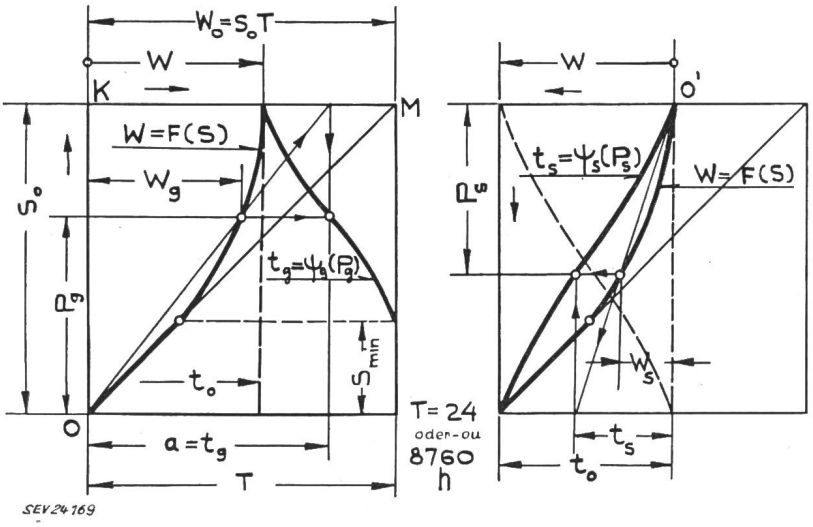


Fig. 6
Ermittlung der Kurven $t = \Psi(P)$ für Grund- und Spitzenlast

P_g, W_g, t_g	Kenngrössen der Grundlastzone
P_s, W_s, t_s	Kenngrössen der Spitzenlastzone
S_0, W, t_0	Kenngrössen der Gesamtlast

Die Beziehungen zwischen den Kennwerten der Grund- und der Spitzenlastzonen veranschaulicht Fig. 7. Wenn eine der energetischen Kenngrössen gegeben ist, dann können *alle* übrigen Kennwerte der Grund- und der Spitzenlast bequem abgelesen werden. Die Beziehungen zwischen den verschiedenen Lastzonen sind für zahlreiche energiewirtschaftliche Kalkulationen nötig. Ein Beispiel ist hier die Festsetzung der besten Lastverteilung zwischen den Grund- und den Spitzenlastwerken. Die Gesamtlast muss so aufgeteilt werden, dass die Betriebsausgaben des Verbundsystems den Kleinstwert erreichen. Bezeichnet man die Grössen der Grundlastwerke mit dem Index «g», die der Spitzenlastwerke mit «s», dann lautet diese Bedingung:

$$\frac{\mathrm{d}\,(I_g + I_s)}{\mathrm{d}\,P_g} = 0,$$

wobei I [Fr./Jahr] die jährlichen Betriebsausgaben bedeuten. Diese setzen sich wie folgt zusammen

$$I = c + e\,P + f\,W;$$

darin sind c [Fr./Jahr] die festen Ausgaben, e [Fr./kW-Jahr] Koeffizient der leistungsabhängigen und f [Fr./kWh] Koeffizient der arbeitsabhängigen Ausgaben. Mit den Gleichungen $P_g + P_s =$ konst. und $W_g + W_s =$ konst. ergibt sich nach der Umformung die Bedingung der wirtschaftlich besten Lastverteilung

$$\frac{\mathrm{d}W_g}{\mathrm{d}P_g} = t = \frac{e_g - e_s}{f_s - f_g}$$

Der Quotient $t = \mathrm{d}W_g/\mathrm{d}P_g$ stellt die tatsächliche Benützungsdauer auf der Grenzlinie der beiden Lastzonen dar. Diese Grösse ist mit der mittleren Benützungsdauer der *ganzen* Lastzone $t_g = W_g/P_g$ nicht zu verwechseln. Die Leistung P_g, die dem berechneten t-Wert entspricht, ergibt sich aus der

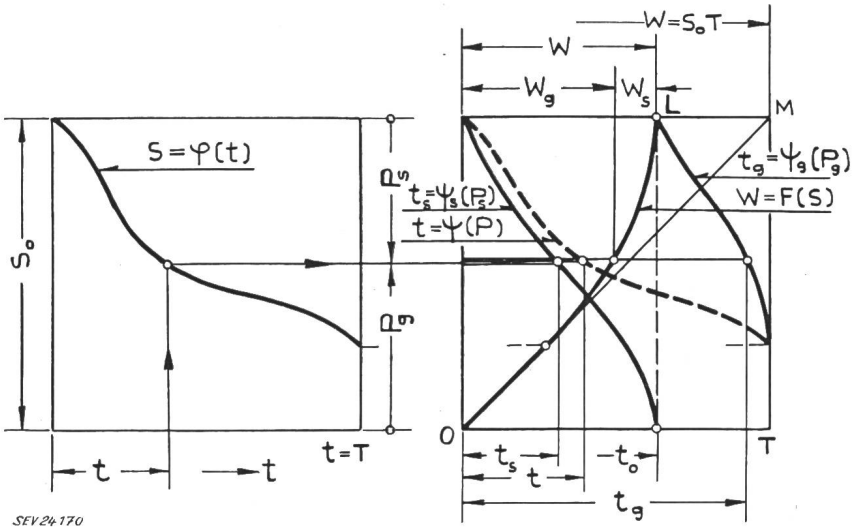


Fig. 7
Beziehungen zwischen den Kennwerten der Grund- und Spitzenlastzonen
Bezeichnungen siehe im Text

Dauerkurve $S = \varphi(t)$. Im WS-Diagramm können die zugehörigen W_g- und W_s-, bzw. t_g- und t_s-Werte abgelesen werden, woraus die zu erwartenden Ausgaben $I = I_g + I_s$ zu berechnen sind. Trägt man die Dauerkurve $S = \varphi(t)$ in das Integraldiagramm $W = F(S)$ ein, dann erhält man einen gut übersehbaren Zusammenhang aller drei Ausnutzungskennwerte t_g, t_s und t (Fig. 7, rechts).

Die Ermittlung der optimalen Lastzonen von abhängigen Kraftwerken, in denen die Energiequelle (W_q) und die installierte Kraftwerkleistung (P_n) vollwertig ausgenützt sind, ist weiterhin in Fig. 9 dargestellt.

Die Integralkurven $W = F(S)$ sind stets auf eine Zeitperiode zu beziehen, innerhalb der die Last und das Energiedargebot der Energiequelle sich nicht wesentlich verändern. Das Betriebsjahr der Kraftwerke muss daher in mehrere Zeitabschnitte (Saisons, Monate) geteilt werden, die den charakteristischen Perioden des Lastablaufs oder des Energieanfalls entsprechen [8].

3. Die freie Leistung

Das Diagramm der verfügbaren Leistung von Verbundsystemen $P = \Psi(t)$ wird von der Lastkurve $S = f(t)$ zerteilt (Fig. 8). Die Fläche unterhalb der Lastkurve stellt den Energiebedarf dar, der ohne Einschränkungen gedeckt werden muss; daraus ist die zu installierende Leistung zu bestimmen. Die Leistungsordinaten $P_u = P - S$ oberhalb der Lastkurve entsprechen der freien Leistung, die sich an der Lastdeckung nicht beteiligt. Die Entstehung der freien Leistung in Verbundsystemen wird durch zwei Umstände hervorgerufen [7]:

a) Die Lastschwankungen befreien eine gewisse Leistung, die sich nach den Tagesstunden und Jahressaisons verändert.

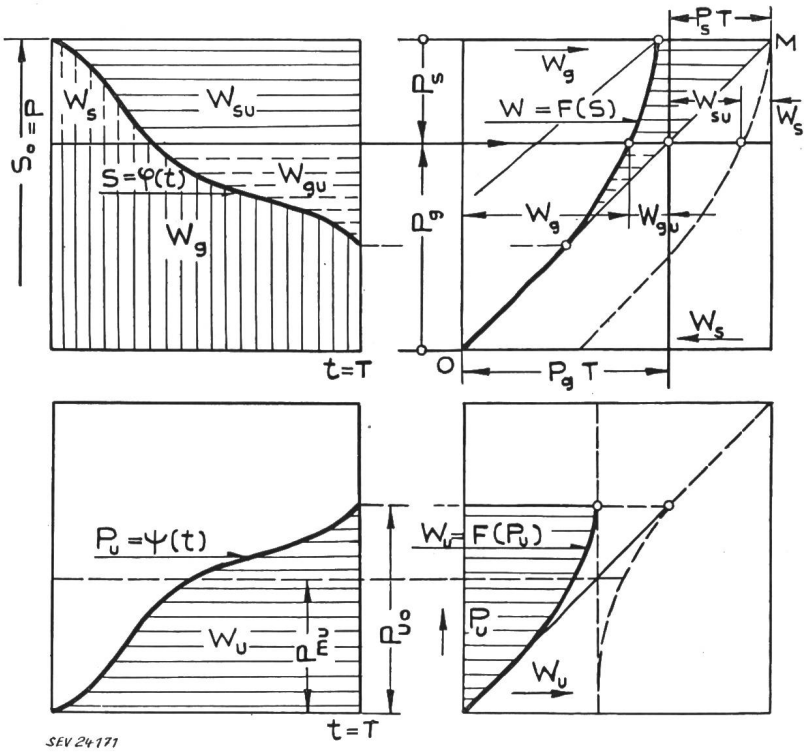


Fig. 8
Integralkurven der freien Leistung
oben: Arbeitsvermögen der freien Leistung des Grundlastwerkes W_{gu} und des Spitzenlastwerkes W_{su}

unten: die Umkehrdiagramme der freien Leistung

b) Jedes Verbundsystem enthält eine Reserveleistung, die zur Überbrückung der Leistungsausfälle bereitzuhalten ist. Diese werden von Betriebsstörungen, Stillegung der Aggregate zur Überholung und dem zeitweiligen Leistungsrückgang der abhängigen Kraftwerke verursacht; ein gewisser Leistungsbetrag muss auch zur Deckung der zu erwartenden Lastzunahme reserviert werden. In den Zeitperioden, wenn die Reserveleistung zur Erfüllung ihrer Grundaufgabe nicht eingesetzt worden ist, stellt sie eine konstante freie Leistung in den Tageslastdiagrammen dar.

Die Grösse der freien Leistung wird von dem Reservefaktor $r = \Sigma P_n / S_{max}$ (ΣP_n installierte Gesamtleistung, S_{max} Jahreshöchstlast), den energetischen Eigenschaften der Kraftwerke und der Art der Lastkurve bedingt. Nach dem Charakter der verfügbaren Kraftwerkleistung sind hier zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die verfügbare Leistung des Verbundsystems ist unveränderlich, d. h. das System ist imstande, seine volle Leistung während der ganzen Zeitperiode T zu entwickeln. Dies kommt dann vor, wenn im Verbundsystem nur unabhängige Kraftwerke zusammenwirken; es kann aber auch beim Vorhandensein der abhängigen Kraftwerke der Fall sein, wenn die Energiequelle es ermöglicht, jahreszeitlich die volle Leistung dieser Kraftwerke aufrecht zu erhalten (z. B. bei Hochwasser).

Bei $P = P_n =$ konst. ist das Diagramm der verfügbaren Leistung $P = \Psi(t)$ ein Rechteck und die entsprechende Integralkurve $W = F(P)$ fällt mit der Grenzgeraden OM zusammen. Das Arbeitsvermögen der freien Leistung W_u wird im Lastdiagramm durch die Fläche oberhalb der Lastkurve $S = f(t)$, im Integraldiagramm durch die Abschnitte zwischen der WS-Kurve und der Geraden OM dargestellt. In Fig. 8 sind die Energiebeträge auf die Grund- und die Spitzenleistung (P_g und P_s) aufgeteilt. Bei Kalkulationen über die Ausnützung der freien Leistung ist es bequemer, die Leistungsgrössen umgekehrt, von oben nach unten zu messen. Die Umkehrdiagramme der Dauer- und Integralkurven sind in Fig. 8 unten eingezeichnet, wodurch sich für die freie Leistung Diagramme üblicher Art ergeben.

2. Die abhängigen Kraftwerke sind aus Mangel an Energieträger nicht imstande, ihre volle Leistung auf die Dauer der betrachteten Zeitspanne zu entwickeln. Wenn sich die verfügbare Leistung des Verbundsystems im Laufe des Tages verändert, dann enthält das Leistungsdiagramm zwei Kurven: $S = f(t)$ und $P = \Psi(t)$. Die mögliche Energieausbeute der freien Leistung wird dann durch Abszissenabschnitte zwischen den beiden Integralkurven ausgedrückt.

Die freie Leistung kann Energie an besondere regelbare Energieabnehmer liefern. Der Betriebsplan dieser Abnehmer muss dem Verlauf der freien Leistung, die vom Lastverteiler des Verbundsystems zur Verfügung gestellt wird, angepasst werden. Die regelbaren Verbraucher sind von besonderer Bedeutung, wenn die Leistung der abhängigen Kraftwerke erheblichen Saisonschwankungen unterworfen ist; dann muss im Verbundsystem eine grosse Ausgleichsleistung bereitgehalten werden, die in einzelnen Jahresperioden unbelastet ist und für spezielle Zwecke eingesetzt werden kann. Dadurch kann die Ausnützung der Energieanlagen und der Energiequellen verbessert werden. Die elastische Zusammenarbeit der Energieerzeuger und der Verbraucher bringt beachtenswerte Vorteile für die beiden Teilnehmer mit sich, weil die Verbraucher, die mit Energie von der überschüssigen Leistung versorgt werden, sich an der Jahreshöchstlast nicht beteiligen und die installierte Leistung des Verbundsystems nicht erhöhen. Die Produktionsmöglichkeiten der besonderen Energieverbraucher können auf Grund der Integralkurven der freien Leistung $W_u = F(P_u)$ bewertet werden.

4. Betriebsregime der Wasserkraftwerke

Die WK-Werke stellen zurzeit die wichtigste Gruppe der abhängigen Kraftwerke dar. Ihre Einsetzung zur Lastdeckung der Verbundsysteme wird durch folgende Eigenschaften der WK-Werke beeinflusst:

1. Die Energieausbeute der WK-Werke ist von ihrer Energiequelle begrenzt; ihre verfügbare Leistung verändert sich nach der Wasserführung und dem Lastregime des Kraftwerks.

2. Der Energieträger fällt naturbedingt an und kann nur in beschränktem Masse aufgespeichert werden, weshalb die verfügbare Wasserenergie im Laufe einer bestimmten Zeitspanne ausgenützt werden muss. Die Länge dieser Zeitperiode hängt vom Inhalt des Wasserspeichers ab: bei WK-Werken mit Tagesspeichern ist der bestehende Tageszufluss in etwa 24 h zu verarbeiten; bei Speicherwerken mit Langspeichern kann Wasserenergie dagegen zwischen den einzelnen Jahressaisons gemäss der Leistungsbilanz des Verbundsystems verteilt werden.

Die Lastzonen der WK-Werke sind in Tageslastdiagrammen des Verbundsystems so auszuwählen, dass die WK-Werke die Forderungen der Leistungs- und der Energiebilanz — sich mit ihrer vollen Leistung P_n an der Deckung der Höchstlast S_0 zu beteiligen und die anfallende Wasserenergie W_q mit den geringsten Verlusten auszunutzen — am besten erfüllen können. Im idealen Falle sollte bei jeder Wasserführung $P = P_n$ und $W = W_q$ erreicht werden, wobei P — die verfügbare Leistung des WK-Werkes während der Starklaststunden und W — die ausgenützte Wasserenergie bedeuten. Um einem derartigen Betriebsregime möglichst nahe zu kommen, werden die Lastzonen der WK-Werke je nach W_q-Werten verlagert: bei hoher Wasserführung decken die WK-Werke die Grundlast; bei niedrigem Wasserstand sind sie dagegen in den Spitzenlastbetrieb zu überführen, um trotz des geringen Energieanfalls eine ausreichende verfügbare Leistung während der Starklastzeit vorrätig zu haben. Bei mittlerer Wasserführung übernehmen die WK-Werke entweder eine Mittellastzone, oder einige Aggregate werden von der Grundlastzone zur Deckung der reinen Spitzenlast übergeführt, um die Bedingung $P = P_g + P_s = P_n$ und $W = W_g + W_s = W_q$ zu erfüllen.

Das optimale Lastregime der WK-Werke wird in den WS-Diagrammen ermittelt. Wie erwähnt, sind hier zwei Betriebsarten zu unterscheiden (Fig. 9):

a) Bei abnehmendem Wasserzufluss verschiebt man die ganze Lastzone des WK-Werkes aufwärts, in die Richtung der Spitzenlast.

b) Die WK-Aggregate werden bei sinkendem Wasserdargebot eins nach dem anderen unmittelbar in die reine Spitzenlast übergeführt.

Mittels dieser Massnahmen wird $P = P_n =$ konst. so lange aufrechterhalten, bis die ganze WK-Leistung in die Spitzenlastzone verschoben worden ist. Bei weiterem Zurückgehen des Wasserflusses ist eine Senkung der verfügbaren WK-Leistung nicht mehr abzuwenden.

Zur Festsetzung der optimalen Lastzone sind im WS-Diagramm (Fig. 9, rechts) zwei Hilfskurven eingetragen worden: 1. eine Leistungskurve, im senkrechten Abstand P_n von der WS-Kurve; 2. eine Energiekurve, im waagrechten Abstand W_q von der Integralkurve $W = F(S)$. Man erhält die Hilfskurven durch Verschieben der WS-Kurve entlang der Leistungs- und der Energieachse. Der Schnittpunkt beider Hilfskurven A gibt die Lage der Lastzone an, in der die Forderung $P = P_n$ und $W = W_q$ erfüllt werden kann. In dem darunter liegenden Lastbereich wird die verfügbare Leistung des WK-Werkes vom unzureichenden Dargebot an Wasserenergie W_q beschränkt. In den höher liegenden Lastzonen ist dagegen die Lastdauer der WK-Aggregate zu kurz, um die anfallende Wasserenergie vollständig auszunützen. Vom Punkt A aufwärts muss man also entlang der P_n-Kurve, abwärts entlang der W_q-Kurve gehen.

Zur Verteilung der WK-Leistung zwischen der Grund- und der Spitzenlastzone (Fig. 9, rechts) sind die Ausgangspunkte der beiden Lastzonen so zu koordinieren, dass $P = P_g + P_s = P_n$ bei gegebenem Energiedargebot W_q erreicht werden kann. Verlagert man das obere Ende der Integralkurve $W = F(S)$ in den Punkt A, der den Koordinaten P_n W_q entspricht, dann gibt der Schnittpunkt der verschobenen Spitzenzone mit dem Grundlastteil der Integralkurve die zu ermittelnden P_g- und P_s-, bzw. W_g- und W_s-Werte an. Durch Verschieben des

Spitzenteils der WS-Kurve entlang der Leistungslinie $P = P_n =$ konst., erhält man die Lastverteilung $P_n = P_g + P_s$ bei jedem W_q-Wert.

Der Vergleich der beiden erwähnten Lastverteilungsverfahren zeigt, dass die Verlagerung der ganzen WK-Leistung in die Mittellastzone einen grösseren Speicherinhalt erfordert, weil dann alle Aggregate eine veränderliche Last übernehmen. Wenn dagegen die WK-Aggregate von der Grundlast unmittelbar in die reine Spitzenlast übergeführt werden, dann benötigen nur die Aggregate, welche die Lastspitzen decken, einen Ausgleichsvorrat; da ihre Energieausbeute der kurzen Lastdauer wegen gering ist, kommt man diesmal mit einem kleineren Speicher aus. Die Art der Lastverteilung ist also von der verfügbaren Wasserreserve abhängig.

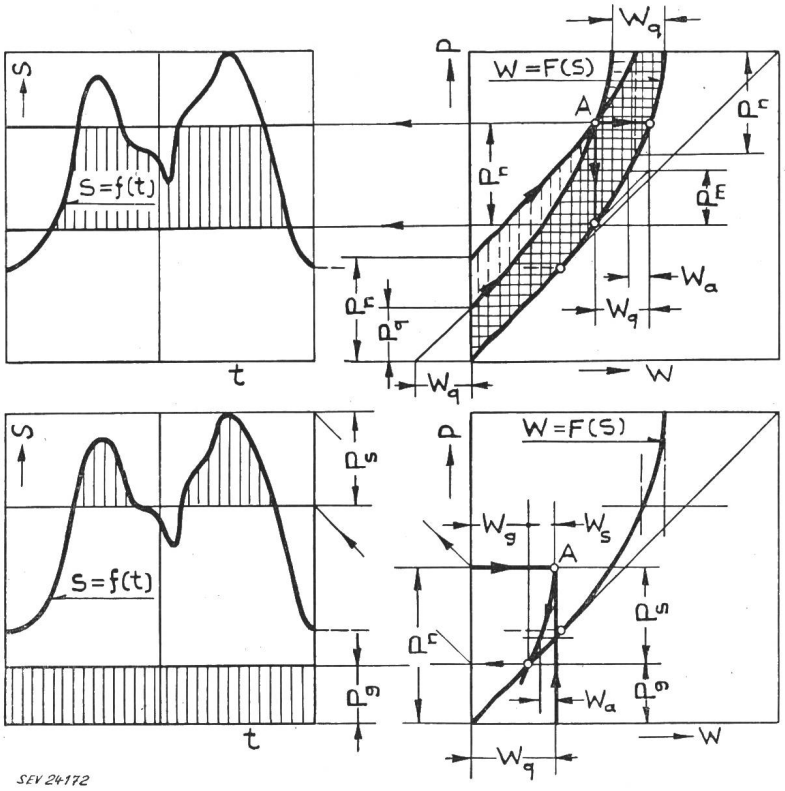


Fig. 9
Ermittlung des optimalen Lastregimes der WK-Werke
oben: die WK-Leistung deckt eine Mittellastzone
unten: die WK-Leistung ist zwischen Grund- und Spitzenlast verteilt
Bezeichnungen siehe im Text

Das Integraldiagramm kann dem praktischen Gebrauch ganz einfach angepasst werden. Zeichnet man z. B. im WS-Diagramm eine Hilfskurve ein, welche der installierten WK-Leistung P_n entspricht, und trägt man eine andere WS-Kurve auf Pauspapier, dann kann die Lage der optimalen Lastzone durch das Verschieben des Pauspapiers entlang der W-Skale ohne weiteres ermittelt werden. Die Lastzonen, oder die Aufteilung $P_n = P_g + P_s$, sind bei veränderlicher Energiedarbietung in Fig. 10 dargestellt.

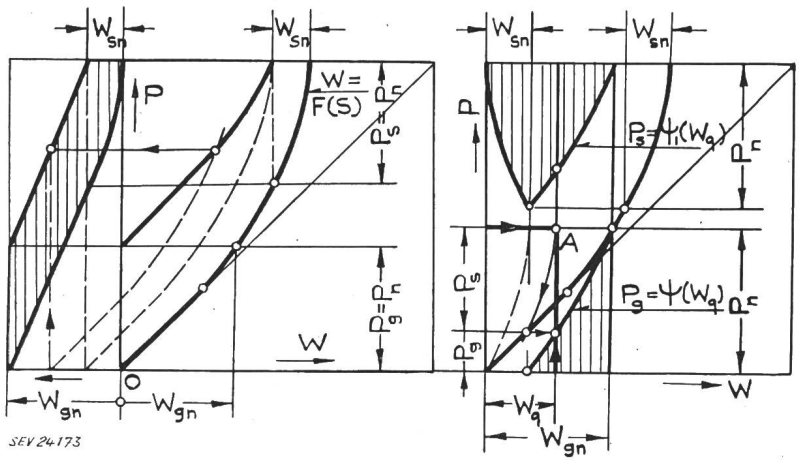


Fig. 10
Die Lastzonen der WK-Werke nach dem Energiedargebot W_q
W_{gn} ausnützbare Wasserenergie im reinen Grundlastbetrieb (bei $P = P_n$)
W_{sn} ausnützbare Wasserenergie im reinen Spitzenlastbetrieb (bei $P = P_n$)

Auf Grund der erörterten Verfahren werden die *Regimediagramme* der WK-Werke entwickelt, die zur Aufstellung der Leistungsbilanz von Verbundsystemen zu benützen sind. Zwei Regimediagramme sind für die WK-Werke mit Tagesregelung in Fig. 11 und 12 veranschaulicht:

1. Die Kurven der verfügbaren WK-Leistung bei der gegebenen Energiedarbietung W_q, je nach der Lage der Lastzone;

2. Die Kurven der möglichen Energieerzeugung in verschiedenen Lastzonen bei der gegebenen installierten Leistung P_n.

In Fig. 11 ist eine Energiekurve ($W_q =$ konst.) eingetragen, welche die um W_q verschobene Integralkurve $W = F(S)$ darstellt. Die senkrechten Abstände zwischen den beiden Kurven geben die verfügbare Kraftwerkleistung P an, die bei gegebenem W_q-Wert in jeder Lastzone erreicht werden kann. Mittels dieser P-Werte sind rechts die Kurven der verfügbaren Leistung bei $W_q =$ konst. eingetragen, aus welchen zu ersehen ist, wie sich die Rolle der WK-Werke in der Leistungsbilanz des Verbundsystems je nach ihrem Lastregime verändert. Die tatsächlich erreichbare Leistung wird vom P_n-Wert begrenzt; der Schnittpunkt A der Linien $P = P_n$ und $W_q =$ konst. zeigt die Lage der energetisch optimalen Lastzone. Oberhalb des Punktes A wird die Forderung der Energiebilanz, unterhalb dagegen die der Leistungsbilanz nicht vollständig erfüllt.

In Fig. 12 ist eine Leistungs-Hilfskurve eingetragen; sie wird durch das Verschieben der WS-

Kurve um P_n nach oben erhalten. Die waagrechten Abstände zwischen den Kurven entsprechen den ausnützbaren Energiemengen; mittels dieser W-Werte werden die Energiekurven gezeichnet (Fig. 12, rechts), die zwischen der Integralkurve $W = F(S)$ und der Linie der Höchstlast verlaufen. Die Endpunkte der Kurven entsprechen den Grenzregimes — dem reinen Grundlast und Spitzenlastbetrieb —, vorausgesetzt, dass die dargebotene Wasserenergie W_q zur Entwicklung der vollen Leistung P_n aus-

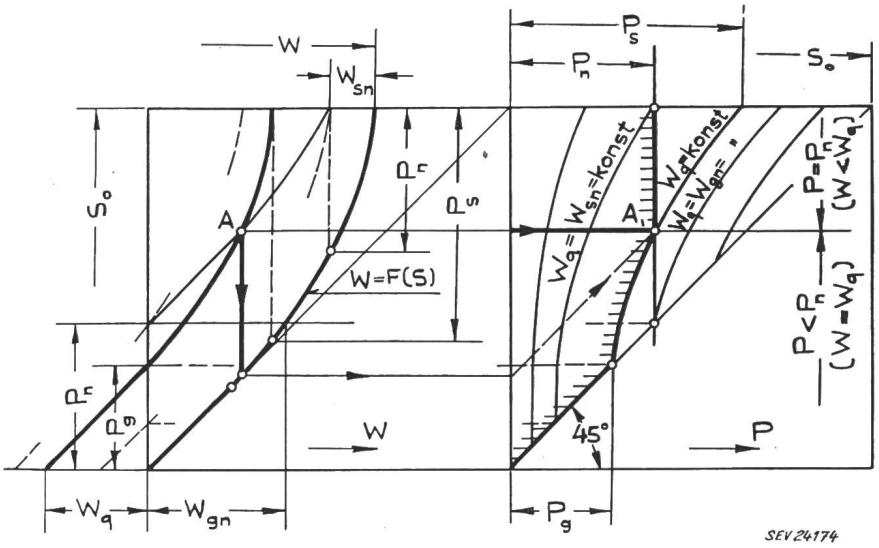


Fig. 11
Die Regimekurven der WK-Werke bei gegebenen W_q-Werten

P_n installierte WK-Leistung
W ausnützbare Energie
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 10

reicht. Der Schnittpunkt der Linien $P = P_n =$ konst. und $W = W_q$ entspricht wie vorher der Lage der optimalen Betriebszone. In dem darunter liegenden Lastbereich vermindert sich die verfügbare WK-Leistung, in den höher liegenden Zonen aber die Energieausbeute des WK-Werks.

Das Zusammenwirken der WK-Werke mit den unabhängigen Kraftwerken des Verbundsystems ist in Fig. 13 zusammenfassend dargestellt. Wenn das WK-Werk keinen Ausgleichsspeicher hat, dann ist seine verfügbare Leistung $P = P_q$ (bei $P_q < P_n$). Bei $S_{min} < P$ werden während der Schwachlaststunden gewisse Energieverluste vom Überlauf verursacht, weshalb $W = W_q - W_v$ und $P_m < P_q$ sind. Die WK-Werke mit Tagesspeichern können dagegen eine Spitzenleistung $P > P_q$ entwickeln; es ist im Lastdiagramm des Verbundsystems eine Lastzone für diese Werke zu finden, in der die Ausnützung der Wasserenergie weder von der installierten Kraftwerkleistung P_n noch von einer allzu niedrigen Lastdauer begrenzt wird. Bei sinkendem Wasserzufluss sind ihre Lastzonen nach oben zu verlagern, um die Bedingungen $P = P_n$ und $W = W_q$ erfüllen zu können. Nachdem die ganze WK-Leistung in die reine Spitzenlast übergeführt worden ist, fängt P bei weiterem Rückgang des Wasserzuflusses zu sinken an.

Bei WK-Werken mit Langspeichern, die zur Wasserverteilung zwischen den verschiedenen Jahressaisons ausreichen, kann die Jahresarbeit auf einzelne Jahresperioden mittels der Integralkurven der Jahresbelastung und des Energiedargebotes auf ähnlichem Wege aufgeteilt werden.

5. Lastplan der Verbundsysteme

Der Lastplan der Verbundsysteme wird auf Grund ihrer Leistungs- und Energiebilanz aufgestellt.

Die Leistungsbilanz bestimmt die Beteiligung einzelner Kraftwerkgruppen in der Deckung der Höchstlast des Verbundnetzes während der verschiedenen Jahressaisons. Die abhängigen Kraftwerke sind in den Perioden des Leistungsmangels so zu belasten, dass sie ihre höchste verfügbare Leistung entwickeln können. Dadurch lässt sich die Ausgleichsleistung der abhängigen Kraftwerke P_c und demzufolge die installierbare Gesamtleistung des Verbundsystems ΣP_n herabsetzen. Im idealen Falle ist die Ausgleichsleistung $P_c = 0$ und $\Sigma P_n = r_a S_{max}$, wobei S_{max} die Jahreshöchstlast und r_a den Faktor der Störungsreserve bedeuten (normalerweise ist $r_a = 1{,}10...1{,}15$). Die gesamte Jahresarbeit muss in der Energiebilanz zwischen den verschiede-

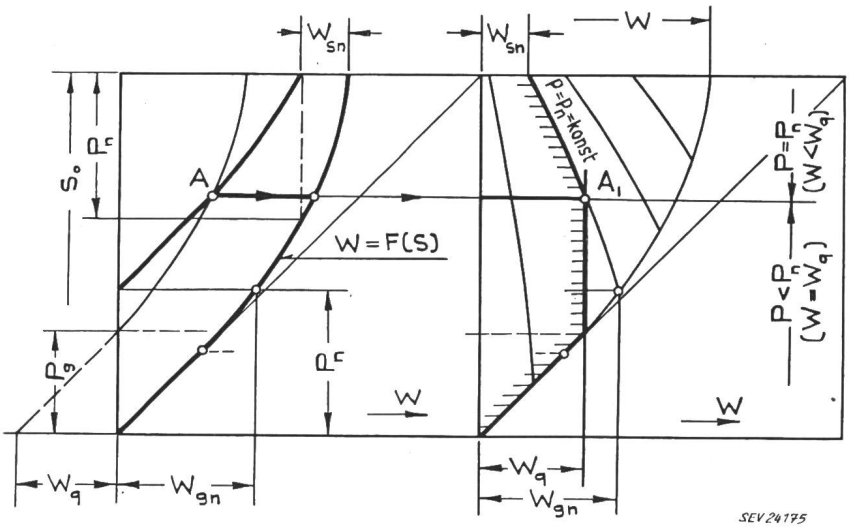


Fig. 12
Die Regimekurven der WK-Werke bei gegebenen P_n-Werten

nen Energiequellen gemäss den wirtschaftlichen Forderungen verteilt werden. Es ist vor allem die Energieausbeute der WK-Werke zu erhöhen; dasselbe gilt für die Wärmekraftwerke, welche minderwertige Brennstoffe verwerten, die für die anderen Industriezweige wenig geeignet sind.

stung der meisten abhängigen Kraftwerke (z. B. der WK-Werke) in hohem Masse von dem Lastregime, das dem Kraftwerk im Verbundsystem zugewiesen wird, beeinflusst wird. Aus diesen Gründen müssen die energetischen Bilanzen mit Hilfe der Ganglinien der Gesamtlast und des Energiedarge-

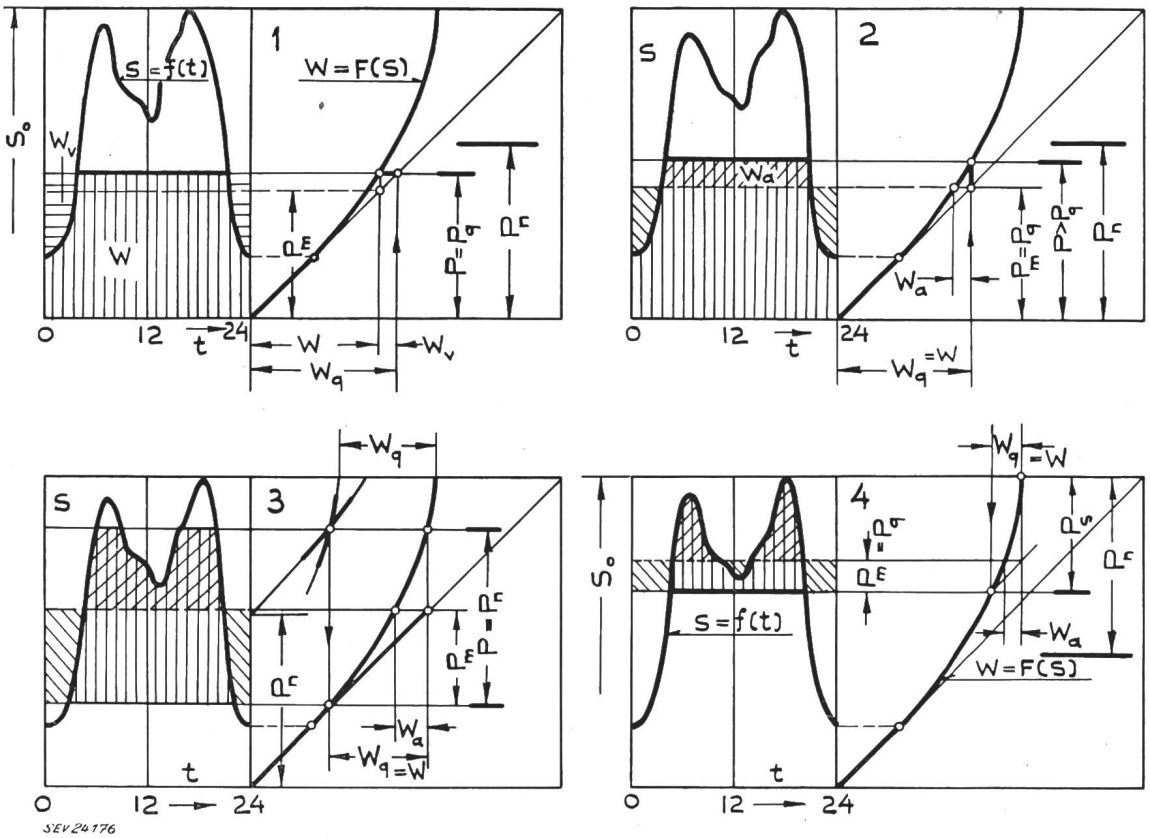


Fig. 13
WK-Werke im Verbundsystem

1 Laufwerk (bei $P_q < P_n$)
2 WK-Werk mit Tagesspeicher im Grundlastbetrieb (bei $P_q < P_n$)
3 WK-Werk mit Mittellastbetrieb ($W = W_q$, $P = P_n$)
4 WK-Werk im Spitzenlastbetrieb ($W = W_q$, $P_s \leqq P_n$)

Die Leistungs- und die Energiebilanzen stehen in fester Verbindung zueinander. Sie verfolgen das gleiche Ziel: die niedrigsten durchschnittlichen Energiekosten zu erzielen und die volkswirtschaftlichen Forderungen betreffs der Ausnützung der örtlichen Energiequellen zu erfüllen. Die wirtschaftlichen Ergebnisse der Verbundsysteme werden jedoch von den beiden Bilanzen auf verschiedenem Wege beeinflusst: die installierte Leistung einzelner Kraftwerkgruppen und dadurch die Baukosten, bzw. die festen Ausgaben, sind von den Varianten der Leistungsbilanz, die veränderlichen Betriebsausgaben aber von der Energiebilanz abhängig.

Die verfügbare Leistung der Verbundsysteme verändert sich im Laufe einzelner Jahressaisons oder sogar innerhalb weniger Tage oder Tagesstunden (bei Heizkraftwerken), je nach dem Energiedargebot ihrer Energiequellen und den Regelungsmöglichkeiten der Kraftwerkleistung. Bei der Gegenüberstellung von Leistungs- und Lastgrössen muss deshalb der *Zeitfaktor*, d. h. der zeitliche Zusammenhang der Kurven, berücksichtigt werden. Es ist ausserdem zu beachten, dass die verfügbare Lei-

botes der Energiequellen aufgestellt werden. Es sind verschiedene Methoden ausgearbeitet worden, mit dem Ziel, die Aufstellung der Bilanzen dadurch zu verkürzen und zu vereinfachen, dass man anstatt der Ganglinien die vereinfachten Dauerlinien anwendet [9; 10; 11]. Diese Methoden verlangen es aber, gewisse Annäherungen einzuführen; es wird dabei die Übersicht über die wahren Verhältnisse verloren, weshalb es schwierig ist, die erzielten Ergebnisse zu prüfen und Korrekturen anzubringen. Dauerkurven können unter gewissen Voraussetzungen zur Verteilung der Tageslast zwischen den verschiedenen Kraftwerken angewandt werden, wenn das Arbeitsvermögen der abhängigen Kraftwerke bekannt ist. Zur Aufstellung der Jahresbilanzen, in denen sich die beiden Leistungsgrössen — die Last und die verfügbare Leistung — ununterbrochen verändern, sind die Gangkurven den Dauerkurven vorzuziehen; nur dadurch kommt man zu übersichtlichen Ergebnissen.

Im folgenden soll in Kürze erörtert werden, wie der Lastplan von Verbundsystemen mittels der Integralkurven der Energie aufzustellen ist. Die

Lastzonen verschiedener Kraftwerkarten sind dabei ins Gesamtlastdiagramm in folgender Reihenfolge einzutragen:

A. Die abhängigen Kraftwerke

a) die zwangsläufig anfallende Leistung der nicht regelbaren Kraftwerke (der Laufwerke, der Heizkraftwerke u. a.);

b) die WK-Werke mit Kurzspeichern, zur Tages- und Wochenregelung;

c) die WK-Werke mit Langspeichern, zur Saison- oder Jahresregelung.

B. Der Rest des Lastdiagramms ist zwischen den unabhängigen Kraftwerken, vorwiegend Wärmekraftwerken, zu verteilen.

Die Aufstellung der Leistungsbilanz für ein Verbundsystem, in dem die WK-Werke mit den unabhängigen Wärmekraftwerken zusammenwirken, ist in Fig. 14 und 15 veranschaulicht. Die Gruppe der WK-Werke enthält Laufwerke, Werke mit Kleinspeichern (Tagesspeicher, Schwellbetriebe) und Werke mit Langspeichern. In Fig. 14 sind die Energiedargebotslinien von Lauf- und Kleinspeichern eingetragen. Die Lastzonen dieser Kraftwerke werden in jeder Saison mittels der Integralkurven der Tageslast $W = F(S)$ bestimmt; die WS-Kurven dienen als Verbindungsglied zwischen den Kurven $S_0 = \psi(t)$ und $P_q = \varphi(t)$. Die Laufwerke übernehmen die untere Grundlastzone; die Lastzonen der beschränkt regelbaren WK-Werke sind so festzusetzen, dass sie bei gegebenem Wasserdargebot die höchste verfügbare Leistung während der Starklaststunden erreichen (siehe Fig. 9). Wenn dabei in den wasserreichen Jahresperioden erhebliche Verluste an Wasserenergie entstehen, können dem Verbundnetz neue regelbare Energieabnehmer angeschlossen werden. Während der trockenen Jahreszeiten ist dagegen mit einer Senkung der verfügbaren Spitzenleistung dieser WK-Werke zu rechnen, weshalb in den anderen Kraftwerken des Systems eine gewisse Ausgleichsleistung unterzubringen ist.

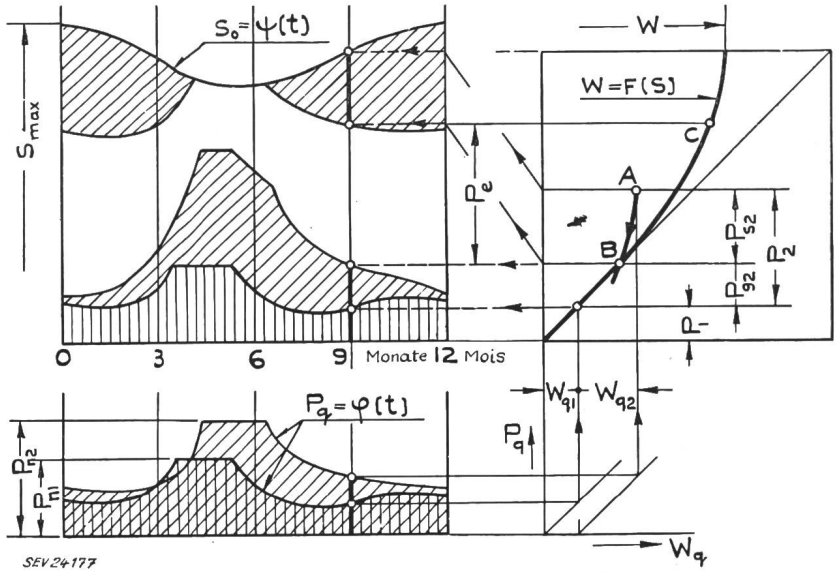


Fig. 14

Leistungsbilanz des Verbundsystems

$S_0 = \psi(t)$ Jahreskurve der Tageslastspitzen; S_{max} Jahreshöchstlast; $P_q = \varphi(t)$ Kurven des Energiedargebotes; P_{n1} und P_{n2} installierte Leistung der Laufwerke und der Kleinspeicherwerke; P_e benötigte Arbeitsleistung der Speicher- und Wärmekraftwerke (ohne Betriebsreserve)

Die Leistungsbilanz benötigt folgende Angaben:

1. Die vorauszusehenden Lastkurven: die Tageskurven $S = f(t)$ und die Jahreskurve der Tageshöchstlast $S_0 = \psi(t)$. Dazu muss das Jahr in mehrere charakteristische Perioden so aufgeteilt werden, dass die Last innerhalb dieser Zeitabschnitte sich nur unwesentlich verändert und mittels der *typischen* (durchschnittlichen) Tageskurven dargestellt werden kann.

2. Die Energiedargebotskurven der abhängigen Kraftwerke $P_q = \varphi(t)$ sind für eine jede charakteristische Gruppe dieser Kraftwerke anzugeben; dazu müssen die WK-Werke in Laufwerke, Kurz- und Langspeicherwerke eingeteilt werden.

3. Die energetischen und wirtschaftlichen Eigenschaften der Kraftwerke: Möglichkeit der Leistungsregelung, Anpassungsfähigkeit an schnelle Lastschwankungen, Brennstoffart u. a.

4. Betriebliche Faktoren: der technische Zustand der Kraftwerksausrüstung, der Überholungsplan, die Grösse der benötigten Reserveleistung u. a.

Auf Grund dieser Angaben werden die Lastzonen einzelner Kraftwerkgruppen in den typischen Tageslastdiagrammen festgesetzt. Trägt man die Ergebnisse aus den Integralkurven der Tageslast in das Jahresdiagramm der Gesamtlast ein, dann erhält man die Leistungsbilanz für das ganze Jahr.

Die Lastzonen der Lauf- und der Kleinspeicher-WK-Werke geben für das Jahreslastdiagramm den Lastplan der genannten WK-Werke. Der Rest des Lastdiagramms ist zwischen den Speicher-WK-Werken und den Wärmekraftwerken zu verteilen. Der Jahresverlauf der Restlast $P_e = f(t)$ ist in Fig. 15 dargestellt; daneben sind die entsprechenden Zonen der typischen Integralkurven, von der Abszisse an, eingetragen. Das Betriebsregime der Speicherwerke kann mittels der summaren Integralkurve des Restlastdiagrammes festgelegt werden. Diese Integralkurve wird ermittelt, wenn man die Energiemengen aus den Tagesintegralkurven der Restlast (W_i) bei jedem Leistungswert P_e summiert. Man erhält dadurch die Werte $\Sigma W = \Sigma W_i \cdot T_i$, wobei T_i die Dauer der Jahressaison (Tage) bedeutet, auf die sich die betreffende Tagesintegralkurve bezieht. Die summare Integralkurve $\Sigma W = F(P_e)$ stellt die Jahresarbeit der Speicherwerke und Wärmekraftwerke dar. Die Speicherwerke müssen den oberen, veränderlichen Teil dieser Last übernehmen, um die Wärmekraftwerke mit einer möglichst gleichmässi-

gen Belastung betreiben zu können; dadurch wird die geringste installierbare Leistung der Wärmekraftwerke und der niedrigste Brennstoffverbrauch erzielt. Trägt man die zu erwartende Jahresarbeit der Speicherkraftwerke W_{q3} in das summare Integraldiagramm ein, so werden die Lastzonen der Speicher- und der Wärmekraftwerke ermittelt. Bei der Festlegung der zu installierenden Leistungen ist die benötigte Leistung der Betriebsreserve P_r zu berücksichtigen. Für den Fall, daß die Leistung der Speicherkraftwerke bereits vorher festgelegt worden ist, müssen ihre Lastzonen im summaren Integraldiagramm auf dieselbe Weise wie die Lastzonen der Kleinspeicherwerke in den Tageslastdiagrammen (s. Fig. 9) bestimmt werden. Die Jahreskurven der täglichen Energieausbeute der Kraftwerkgruppen werden mittels der typischen Integralkurven der Tageslast erzielt (Fig. 15, unten). Auf Grund dieser Energiekurven wird der Fahrplan der Energiespeicher, z. B. die Füllung und Entleerung der Wasserspeicher, aufgestellt.

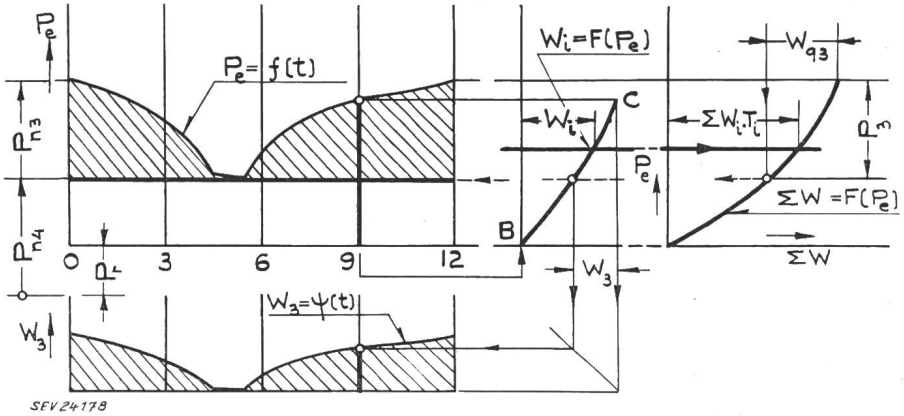


Fig. 15
Verteilung der Restlast zwischen den Speicher- und Wärmekraftwerken

$P_e = f(t)$ Jahreskurve der benötigten Arbeitsleistung; $W_i = F(P_e)$ Tagesintegralkurve der Restlast; $\Sigma W = F(P_e)$ Jahresintegralkurve der Restlast; P_{n3} *und* P_{n4} installierbare Leistung der Speicher- und der Wärmekraftwerke; P_r Leistung der Betriebsreserve; $W_3 = \psi(t)$ Energieausbeute der Speicherkraftwerke

Verteilung der Jahresarbeit auf Winter- und Sommerhalbjahr zu ermöglichen. Deshalb müssen Speicherkraftwerke nicht selten zur teilweisen Deckung der niedrigeren Lastzonen eingesetzt werden. Dann verläuft ihre Jahresarbeit gleichmässiger, weshalb die installierbare Leistung der Wärmekraftwerke erhöht werden muss und die Lastverhältnisse der Wärmekraftwerke sich entsprechend verschlechtern. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass ein gewisser jahreszeitlicher Lastrückgang der Wärmekraftwerke notwendig ist, um die planmässigen Überholungen der Aggregate durchführen zu können.

Nachdem die Lastzonen der Speicher- und der Wärmekraftwerke in das Jahresdiagramm der Gesamtlast eingetragen worden sind, erhält man das volle Diagramm der Leistungsbilanz des Verbundsystems (Fig. 16). Da die einzelnen Gruppen der abhängigen Kraftwerke ihre volle Leistung in verschiedenen Jahressaisons (oder in verschiedenen Tagesstunden) erreichen, ist die Summe der installierten Leistungen ΣP_n normalerweise grösser als $r_a S_{max}$. In diesem Fall enthält das Verbundsystem eine Ausgleichsleistung

$$P_c = \Sigma P_n - r_a S_{max}$$

welche die veränderliche Leistung der abhängigen Kraftwerke doubliert und die jahreszeitlichen Leistungsrückgänge dieser Werke überbrückt. Die Ausgleichsleistung wird vorwiegend von Laufwerken, teilweise aber auch von Kleinspeicher-WK-Werken, benötigt, wenn in den trockenen Jahresperioden der Rückgang ihrer verfügbaren Spitzenleistung durch eine entsprechende Lastsenkung nicht ausgeglichen werden kann [6]. Um die Baukosten der Verbundsysteme zu verringern, ist die Ausgleichsleistung möglichst in denjenigen Kraftwerken unterzubringen, in denen die Errichtungskosten einer jeden zu-

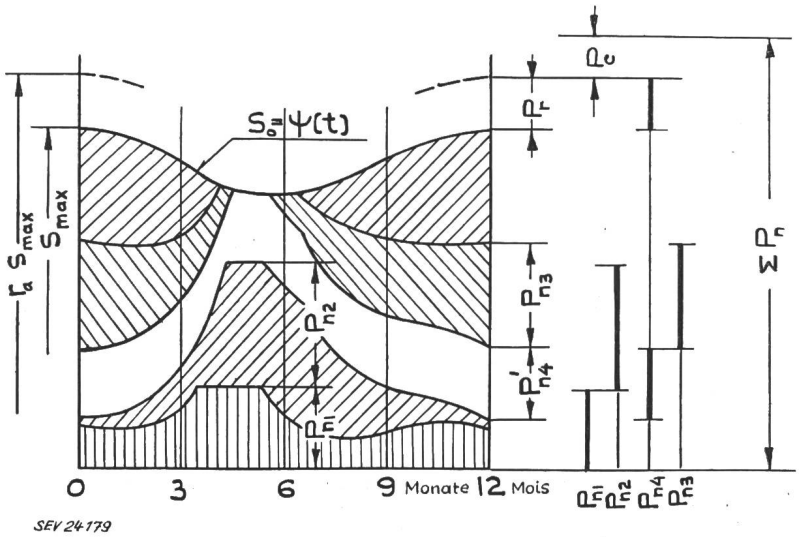


Fig. 16
Lastplan des Verbundsystems

ΣP_n installierte Leistung
P_c Ausgleichsleistung

Die Verwirklichung der energetisch besten Lastverteilung kann von zwei Umständen gehindert werden: a) die installierte Leistung der regelbaren WK-Werke ist zu niedrig, um die verfügbare Wasserenergie in den oberen Zonen des Gesamtlastdiagramms ausnützen zu können; b) der Inhalt des Wasserspeichers reicht nicht aus, um die gewünschte

sätzlichen Leistungseinheit niedrig liegen. Diese Forderung kann oft durch die Leistungserhöhung der Speicherkraftwerke erfüllt werden, wenn nur ihre Wasserspeicher zur Erzielung des geforderten Leistungsausgleichs ausreichen.

Zur Aufstellung der Leistungsbilanz sind die Wasserabflusskurven der typischen trockenen hydrologischen Jahre zu benützen; dadurch wird die Lastdeckung auch bei ungünstigem Energiedargebot gesichert. Wenn in manchen Jahren ein aussergewöhnlicher Wassermangel eintritt, dann kann zur Lastdeckung vorübergehend auch die Störungsreserve eingesetzt werden, oder man muss während einiger Jahresperioden die Energieabgabe an gewisse Verbrauchergruppen einschränken.

Wenn im Laufe des Kraftwerkbetriebes einige Ausgangsgrössen von ihren angenommenen Werten abweichen (die Lastkurve, das Energiedargebot der abhängigen Kraftwerke, die installierten Kraftwerkleistungen), dann helfen die Integralkurven, den Lastplan den neuen Umständen schnell anzupassen. Diese Elastizität der Lastverteilungsverfahren nimmt mit der Erweiterung der Verbundsysteme an Bedeutung zu.

6. Zusammenfassung

Es ist in Kürze erörtert worden, wie die Integralkurven der Energie zur Lastverteilung zwischen den verschiedenen Kraftwerkgruppen der Verbundsysteme anzuwenden sind. Auf Grund der behandelten Richtlinien kann in jedem Falle eine praktische Methodik der Lastverteilung ausgearbeitet werden. Das Jahresdiagramm der Leistungsbilanz lässt sich mittels Integralkurven aufstellen. Aus dem Jahresdiagramm geht hervor, wie die einzelnen Kraftwerkgruppen im Laufe des Jahres zur Deckung der Gesamtlast einzusetzen sind. Dies ermöglicht die Überholung der Energieaggregate, die Ausnützung der jahreszeitlichen Energieüberschüsse, die Regelung der Lastkurven, den Bau neuer Kraftwerke und Netze, wie auch andere Betriebsfragen zweckmässig zu planen.

Literatur

[1] *Stephenson, H.:* Ermittlung von Fehlbedarfs- und Überschussenergien. ÖZE Bd. 3(1950), Nr. 6, S. 161...166.
[2] *Kroms, A.:* Struktur der Verbundsysteme. Technik Bd. 8 (1953), Nr. 11, S. 725...733; 752.
[3] *Kroms, A.:* Energieversorgung der Industrie. Energie Bd. 7(1955), Folge 3, S. 69...75.
[4] *Kroms, A.:* Windkraftwerke im Verbundbetrieb. Bull. SEV Bd. 45(1954), Nr. 5, S. 135...144.
[5] *Kroms, A.:* Über die Ausbauleitung der Wasserkraftwerke. ÖZE Bd. 8(1955), Nr. 2, S. 48...62.
[6] *Kroms, A.:* Reserveleistung in Verbundsystemen. ÖZE Bd. 7(1954), Nr. 1, S. 1...15.
[7] *Kroms, A.:* Ausnutzung der überschüssigen Leistung der Verbundbetriebe. Technik Bd. 7(1952), Nr. 8, S. 435...444; Nr. 10, S. 581...586, 590.
[8] *Dreyer, W.:* The Thermal Power Plant as the Complement of Hydro-Electric Developments in Regions of Abundant Hydraulic Potential. Bericht zur Weltkraftkonferenz, Rio de Janeiro 1954.
[9] *Denk, E.:* Verfahren zur Bestimmung einer energiewirtschaftlichen Rangfolge mehrerer Wasserkraftprojekte innerhalb eines Verbundsystems. ÖZE Bd. 7(1954), Nr. 10, S. 390...396; Nr. 11, S. 422...425.
[10] *Noda, J.:* The Recent Study on the Joint Utilisation of Hydro and Thermal Electric Power in Japan. Bericht zur Weltkraftkonferenz, Rio de Janeiro 1954.
[11] *Bauer, L.:* Verfahren zur Ermittlung der Grundlagen für die Überlegungen hinsichtlich des wirtschaftlich richtigen, bedarfsgerechten Ausbaues von Ergänzungskraftwerken zu bestehenden Anlagen. ÖZE Bd. 8(1955), Nr. 1, S. 15...18; Nr. 2, S. 62...65; Nr. 3, S. 95...98; Nr. 4, S. 125...129; Nr. 5, S. 160...165, Nr. 6, S. 193...199.

Adresse des Autors:
A. Kroms, 12 Brainerd Rd., Boston 34, Mass., USA.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Eine automatische elektrische Karte erleichtert die Betriebsführung von Hochspannungsnetzen

621.316.318

[Nach *R. M. Jolly:* Automatic Electric Map Improves System Operation. Electr. Light & Power Bd. 33(1955), Nr. 6, S. 92...95]

Als Ergebnis einer langjährigen Entwicklung wurde von der Betriebsleitung der Elektrizitätsversorgung einer amerikanischen Stadt (San Antonio in Texas) ein neues Blindschema in Betrieb genommen. Dieses soll bei grosser Übersichtlichkeit besonders einfach der raschen Erweiterung der Netze angepasst werden können. Es besteht aus Kunststoffquadraten von einem Zoll Seitenlänge, welche auf einer Grundplatte aus Aluminium aufgesteckt sind.

Fig. 1 zeigt oben das blanke Grundelement. Es besitzt auf der Rückseite zwei angegossene Stifte. Diese passen in entsprechende vorgebohrte Löcher der Grundplatte und werden darin durch übergestürzte kurze Gummiröhrchen gehalten. Ausser diesem Grundelement werden vier Symbolelemente für Transformatoren, Leistungsschalter, Sammelschienen und Generatoren verwendet. Die erhabenen Symbole sind transparent und können einzeln von hinten beleuchtet werden. Die Steuerung der Lampen erfolgt über ein Fernmeldesystem. Das

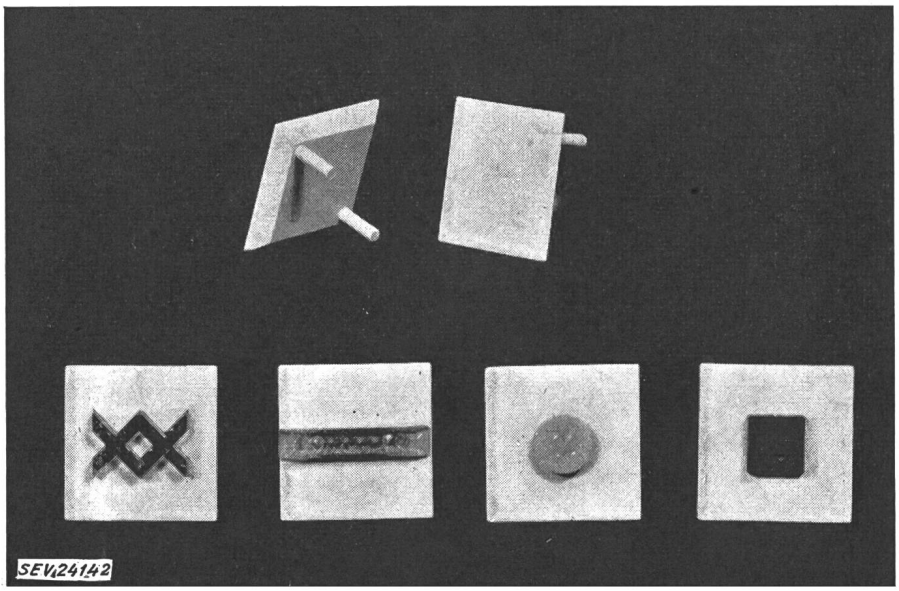


Fig. 1
Die aufsteckbaren Kunststoffquadrate des Blindschemas
oben: undurchsichtiges, glattes Grundelement
unten: Elemente mit transparenten Symbolen für Transformator, Sammelschiene, Generator und Leistungsschalter