

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 28 (1937)
Heft: 22

Artikel: Aus der Praxis der Werke : die Bedürfnisse der Werke
Autor: Hug, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059881>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

2. Vom Gesichtspunkt der Elektrizitätswerke.

Aus der Praxis der Werke. Die Bedürfnisse der Werke.

Von F. Hug, Baden.

Es werden die Eigenschaften der Regler für Wasserturbinen beschrieben und deren Wirkung beim Parallelbetrieb von grossen Generatoren. Hierauf wird die Methode begründet, nach der im grossen Netz der NOK, wo den oft sehr grossen Leistungsschwankungen grosse Schwungmassen gegenüberstehen, die Frequenz reguliert wird. Anschliessend wird die Leistungsregelung bei verschiedenen Netzkonfigurationen behandelt.

Die moderne Verbundwirtschaft grosser Elektrizitätsunternehmen, die sich zum Teil zu ganzen Landesversorgungen ausweitet, ermöglicht, besonders durch die neuzeitliche Selektivschutztechnik, über umfangreiche Fernleitungsnetze einen Energieaustausch zwischen Kraftwerken und Grossabnehmern, der heute eine beachtenswerte Stufe der Vollkommenheit erreicht hat. Es dürfte nicht verwundern, dass solche Errungenschaften neuen Problemen rufen, um eine technische und wirtschaftliche Beherrschung des Energieflusses zu erreichen. Wirk- und Blindleistungsverteilung bilden die beiden Brennpunkte, die eine Regelung von Frequenz, Leistung, Spannung und Leistungsfaktor bedingen. Das heutige Thema führt in das Gebiet der Wirkleistungsverteilung.

Die ausschlaggebende Bedeutung der Turbinenregulatoren für den Kraftwerkparallelbetrieb führt dazu, vorerst den charakteristischen Eigenschaften solcher Reguliereinrichtungen nachzugehen. Wird die Drehzahl einer Turbine bei allen Belastungen automatisch konstant gehalten, so spricht man von einer *astatischen* Regulierung. Die Charakteristik einer solchen Regulierung ist gekennzeichnet durch

L'auteur décrit les propriétés des régulateurs de turbines hydrauliques et leur fonctionnement lors de marche en parallèle de gros alternateurs. Il expose ensuite la méthode suivant laquelle les NOK règlent la fréquence dans leur grand réseau, où des variations souvent très importantes de la puissance ont à surmonter l'inertie de grosses masses tournantes. Pour terminer, l'auteur examine le réglage de la puissance pour différentes configurations de réseau.

Drehzahl und Last ein bestimmtes Abhängigkeitsverhältnis besteht. Die eindeutige, stetige Zuordnung einer bestimmten Drehzahl zu jeder Leistung der Maschinengruppe charakterisiert also einen solchen Regler. Im Maschinenbau ist es üblich, diesen Drehzahlabfall als *Ungleichförmigkeitsgrad* δ des Reglers zu bezeichnen. Man versteht darunter das Verhältnis der Drehzahldifferenz zwischen Leer- und Vollast der Turbine (n_o bzw. n_n) zur mittleren Drehzahl (n_m).

$$\delta = \frac{n_o - n_n}{n_m}$$

Setzt man mit Rücksicht auf den relativ kleinen Wert $n_o - n_n$ für die mittlere Drehzahl das arithmetische Mittel der Grenzdrehzahlen ein, also

$$n_m = \frac{n_o + n_n}{2}$$

so wird

$$\delta = 2 \cdot \frac{n_o - n_n}{n_o + n_n}$$

Dieser Wert variiert bei ausgeführten Reglern ungefähr zwischen $\delta = 0,005$ und $0,05$, d. h. zwischen $0,5$ und 5% , in seltenen Fällen oft bis zu 12% . Die astatische Regulierung besitzt also den Ungleichförmigkeitsgrad Null.

Die passiven Widerstände, wie hemmende Reibungen innerhalb des Reglergetriebes haben zur Folge, dass die Drehzahl vorerst um einen gewissen Betrag Δn über den dem reibungslosen Regler entsprechenden Wert n ansteigen, resp. unter diesen fallen muss, bevor der Regulator sozusagen die Geschwindigkeitsänderung empfindet. Er bleibt also innerhalb eines Drehzahlbereiches $2\Delta n$ unempfindlich.

Den Ausdruck

$$\frac{2 \cdot \Delta n}{n} = \varepsilon$$

bezeichnet man daher als den *Unempfindlichkeitsgrad* der Regelung. Die idealen Geschwindigkeitscharakteristiken müssen also unter dem Einflusse einer gewissen Unempfindlichkeit von einer Linie in eine schmale Fläche übergehen. In Fig. 2 kann ν als die in Leistungswerten ausgedrückte Unempfindlichkeit angesehen werden. Für das dynamische Verhalten eines solchen Reglers ist daher nicht

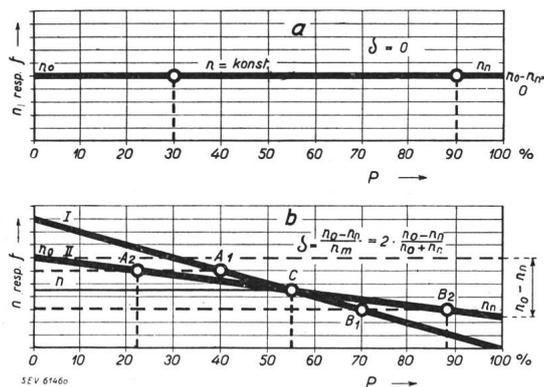


Fig. 1.

Regulatoren-Charakteristiken.

- a Astatische Charakteristik.
- b Statische Charakteristik.
- P Generatorleistung in %.
- n, resp. f Drehzahl, resp. Frequenz der Maschinengruppen.

eine horizontale, d. h. zur Abszisse der Leistungswerte parallellaufende Gerade (Fig. 1). Jeder Leistung ist die gleiche Drehzahl zugeordnet. Die Leistungsverteilung ist also unbestimmt. *Statisch* hingegen nennt man die Regulierung, wenn zwischen

mehr die ideale Drehzahlcharakteristik massgebend, sondern für die Auf- und Abwärtsbewegungen der Muffe zwei angenähert parallele Grenzcharakteristiken. Die relativ grosse Unempfindlichkeit älterer Regulatoren bot bei Kolbenmaschinen den Vorteil, dass die Schwankungen ihrer Winkelgeschwindigkeit keine periodischen Bewegungen der Reglermuffe hervorrief, was eintritt, sobald die Unemp-

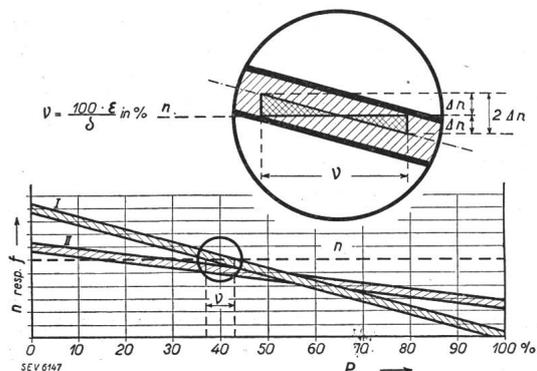


Fig. 2. Beziehung zwischen Ungleichförmigkeits- und Unempfindlichkeitsgrad.

P Generatorleistung in %.
 n , resp. f Drehzahl, resp. Frequenz der Maschinengruppen.
 [Shaded area] Unempfindlichkeitsgebiet für Drehzahl und Leistung.
 n_0 normale Drehzahl.

findlichkeit des Reglers grösser ist als die Ungleichförmigkeit des Ganges der Maschine innerhalb eines Kolbenhubes. Dampf- und Wasserturbinen, die ein konstantes Antriebsmoment besitzen, weisen keine solchen Ungleichförmigkeiten ihres Ganges auf, denn die Drehmomentüberschwingungen von Pelton-turbinen beispielsweise fallen zufolge ihrer hohen Frequenz und relativ geringen Amplitude in Verbindung mit der Massenträgheit des rotierenden Systems ausser Wirkung. Für moderne Turbinenregulatoren kann schon aus diesem Grunde die Forderung kleinsten Unempfindlichkeitsgrades gestellt werden. Bei älteren Ausführungen betrug der Wert

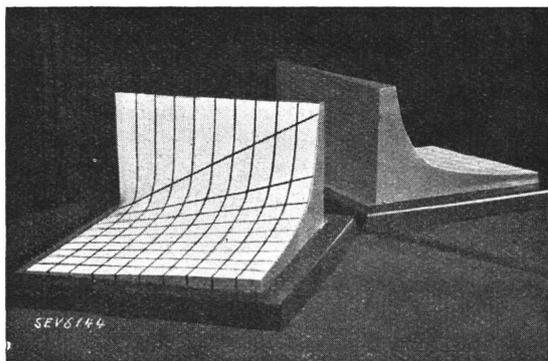


Fig. 3. Topographie des ν -Verlaufes $\nu = f(\epsilon, \delta)$.

für $\epsilon = 2 \dots 0,3 \%$, bei moderneren Reglern jedoch $0,01 \dots 0,005 \%$, oft bis auf technisch unmessbar kleine Werte hinuntersteigend. Berechnet man für verschiedene ϵ und δ die Grösse ν , so stellt

$$\nu = f(\epsilon, \delta)$$

in dreidimensionaler Darstellung einen durch eine Regelfläche begrenzten Körper dar, der in der vertikalen Koordinate das freie, vom Regulator beherrschte Spiel der Generatorleistungen darstellt (Fig. 3). Der negative Ergänzungskörper zu dieser Topographie würde gewissermassen die den verschiedenen Regulatoreinstellungen entsprechenden Stabilitätsgrade des Reglers versinnbildlichen.

Es sei nun das Verhalten eines statischen Turbinenregulators nach erfolgtem Parallelschalten des zugehörigen Generators auf ein Netz konstanter Frequenz betrachtet (Fig. 4). Ein solches Aggregat läuft vorerst leer mit (Punkt A). Die Erregungssteigerung, welche bei parallelarbeitenden Gleichstrommaschinen Lastzunahme mit Drehzahlensenkung und dadurch ein Ansprechen der automatischen Regulierorgane im Gefolge hat, führt bei Drehstromgeneratoren nur zur Bildung eines Ausgleichs-Blindstromes, der die gestörte elektromotorische Kraft entsprechend der konstanten Sammelschienenspannung kompensiert. Grundsätzlich muss also hier die Energiezufuhr durch künstliche Einwirkung auf

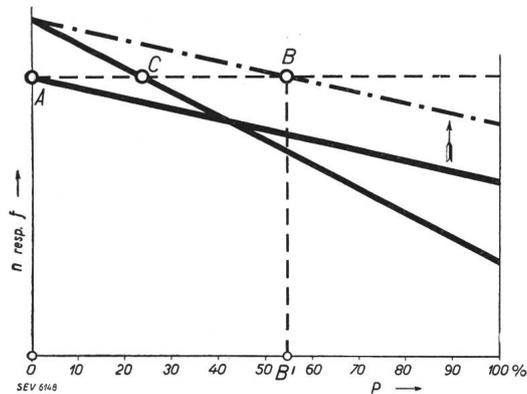


Fig. 4. Lastaufnahme nach dem Parallelschalten.

P Generatorleistung in %.
 n , resp. f Drehzahl, resp. Frequenz der Maschinengruppen.

den Regulator gesteigert werden, was einer Parallelverschiebung seiner geradlinigen Drehzahlcharakteristik im erhöhenden Sinne entspricht (Punkt B). Die Generatorleistung ist von Null bis B' angewachsen. Dem lastaufnehmenden Generator ist gleichzeitig eine entsprechende Mehrerregung zu erteilen. Bei Zuschaltung eines zweiten Maschinensatzes mit grösserem Ungleichförmigkeitsgrad, d. h. steilerer Drehzahlcharakteristik seines Regulators wird bei gleicher Parallelverschiebung der Kennlinie eine geringere Lastaufnahme resultieren (Punkt C). Verschieden grosse Maschineneinheiten, die sich zudem in ihrem Ungleichförmigkeitsgrade unterscheiden, werden sich also im Parallelbetriebe verschieden verhalten. Infolge des statischen Charakters der anderen Regulatoren müssen sich auch Lastveränderungen im Netz unvermeidlich in Frequenzabweichungen ausdrücken. Erfolgt eine Frequenzänderung des Netzes um Δf , dann ist aus den Reglerdiagrammen zu erkennen, dass die Maschinenleistungen um ΔP_1 bzw. ΔP_2 variieren müssen. Aus den Charakteristiken ist die Beziehung abzulesen (Fig. 5):

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_1}{\delta_1} : \frac{P_2}{\delta_2} = \text{konstant}$$

wo P_1 bzw. P_2 Vollast des Generators I bzw. II in kW, ΔP_1 bzw. ΔP_2 Laständerung des Generators I

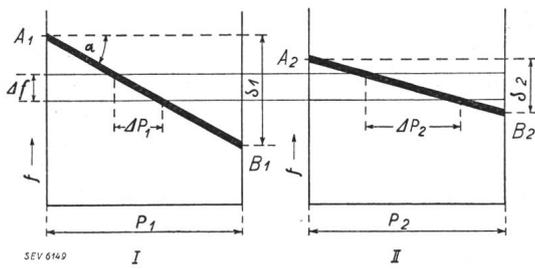


Fig. 5.

Lastverteilung beim Parallelbetrieb zweier Maschinengruppen I und II.

bzw. II in kW, δ_1 bzw. δ_2 Ungleichförmigkeitsgrade der Gruppe I bzw. II in % bedeuten. Den Quotienten $\frac{P}{\delta}$ definiert man als *Leistungszahl*.

$$L = \cotg \alpha$$

ist ein Mass für die Neigung der geradlinigen Reglercharakteristik. Allgemein gilt für einen beliebigen Verlauf der Charakteristiken

$$L = \frac{dP}{df}$$

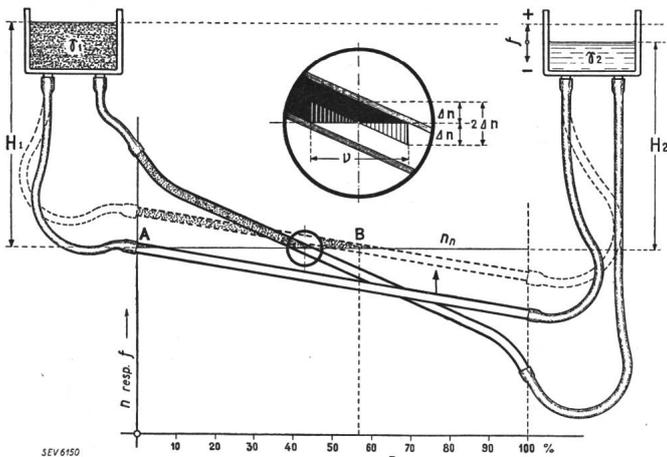


Fig. 6.

Modell der Lastverteilung.

- P Generatorleistung in %.
- n , resp. f Drehzahl, resp. Frequenz.
- n_n normale Drehzahl (Frequenz).
- f Frequenz; + bedeutet höher, - bedeutet tiefer.

Die Verteilung der Gesamtlast eines Netzes auf die Generatoren erfolgt also im Verhältnis der Leistungszahlen der parallelarbeitenden Maschinensätze.

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P} = \frac{L_1}{\Sigma L}$$

oder

$$\Delta P_1 = \Delta P \frac{L_1}{\Sigma L}$$

Der Anteil der auf Maschine I entfallenden Laständerung ist gleich der Laständerung im Gesamt-

netz, multipliziert mit dem Quotienten der Leistungszahl dieser Maschine und der Summe der Leistungszahlen aller Maschinen des Netzes.

Der geringe Ungleichförmigkeitsgrad einer flach verlaufenden Regulatorcharakteristik hat somit

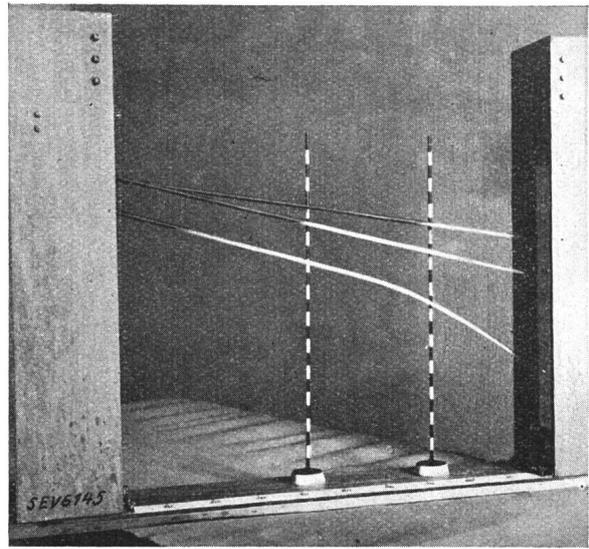


Fig. 7.

Photographie des Modells.

starken Anteil an der Uebernahme von Laststössen zur Folge.

Die Lastverteilung zwischen mehreren Maschinen oder Kraftwerken lässt sich sehr anschaulich an einem hydraulischen Modell verfolgen (Fig. 6). Glasröhren, die entsprechend den Reglercharakteristiken geformt sind, mögen zwei Flüssigkeiten ver-

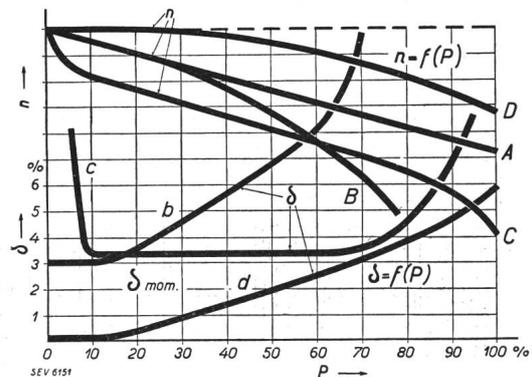


Fig. 8.

Drehzahlcharakteristiken und Ungleichförmigkeitsgrade.

- P Leistung in %.
- n Drehzahl.
- δ Ungleichförmigkeitsgrad.

schiedenen spezifischen Gewichtes enthalten, die je mit einem gemeinsamen Behälter kommunizieren. Die Teilchen gleichen spez. Gewichtes bilden eine Trennschicht parallel zur Oberfläche, also eine Horizontale, die der Normalfrequenz entsprechen möge. Die spezifisch leichtere, beispielsweise dunkel gefärbte Flüssigkeit entspräche der Maschinenlast, während die Lichtweite der Röhre den Unempfindlichkeitsgrad des Regulators veranschaulicht. Ausser der Form und Lage der Reglercharakteristiken kann auch der Einfluss der Netzfrequenz durch

sinngemäßes Heben und Senken des entsprechenden Behälters dargestellt werden (Fig 6 und 7).
 Seit Jahren betrachtete die Literatur bei Parallelbetriebsproblemen vorherrschend die geradlinige Charakteristik von Regulatoren. Erst die neuere Zeit führte zur Erkenntnis, dass sowohl äl-

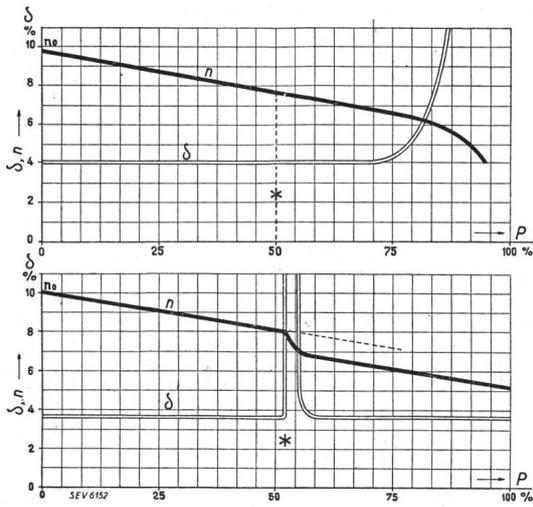


Fig. 9.
 Drehzahlcharakteristiken und Ungleichförmigkeitsgrade.
 P Leistung in %.
 n Drehzahl.
 δ Ungleichförmigkeitsgrad.
 * Düsenwechsel.

tere als auch neuere Konstruktionen gekrümmte Kurven aufweisen können. Ungleichförmigkeitsgrad und Leistungszahl werden alsdann mit der Maschinenlast veränderlich, also zu Momentanwerten. Einige Beispiele aus der Praxis sollen kurz darlegen, wie die Drehzahlen bei zunehmender Last abfallen können und welche Ungleichförmigkeitsgrade daraus resultieren (Fig. 8 und 9). Bei grösserer Anzahl Maschinen mit derartigen Kennlinien vermehren sich die Komplikationen in theoretischer und praktischer Hinsicht ausserordentlich, ganz besonders aber deren dynamisches Verhalten. Die ausschlaggebende Bedeutung der Drehzahlregler für den Kraftwerkbetrieb grosser Netzverbände verlangt jedoch, dass solche Regelorgane notwendigerweise umgebaut werden müssen, weil sonst eine geordnete Frequenz- und Leistungsregelung schwer zu erreichen sein dürfte.

Frequenzregulierung.

Die genaue Einhaltung der Frequenz gehört wohl zu den wichtigsten Forderungen, die an einen modernen Kraftwerkbetrieb gestellt werden müssen. Sie hat im Verbundbetriebe grösserer Netze durch die Belieferung der verschiedensten Industrien vorerst erhöhte Bedeutung erfahren. Während man sich früher mit dem natürlichen Drehzahlabfall nach Massgabe der statischen Reglercharakteristik im Bereiche von ca. 1...5% begnügte, müssen heute ganz wesentlich schärfere Bedingungen erfüllt werden. Weil sich die ganze Lastverschiebung eines Kraftwerkbetriebes auf Grund der statischen Charakteristik im Rahmen dieses Frequenzbereiches abspielt, muss zur Aufrechterhaltung einer

praktisch konstanten Frequenz eine künstliche manuelle oder automatische Beeinflussung der Regler erwirkt werden. Die Frequenzhaltung muss also mindestens um eine Grössenordnung genauer sein als die eingestellte Statik der Reglercharakteristik, was einer Frequenzbandbreite von ca. 1...5% entspricht.

Wie gezeigt wurde, bildet die statische Turbinenregulierung das oberste Prinzip für den stabilen Parallellauf mehrerer Maschinen oder Kraftwerke. Jede Laständerung im Netz wirkt sich demnach auf alle Maschinen aus und lässt die Frequenz steigen oder fallen. So drückt sich beispielsweise eine Lastzunahme in einer Frequenzsenkung aus, die nur durch ein Parallelverschieben der Reglercharakteristik in erhöhendem Sinne rückgängig gemacht werden kann (Fig. 10). Diese Korrektur ist unter der Bezeichnung Drehzahlverstellvorrichtung bekannt. Sie besteht in einer meist stark verzögerten, feinen Nachregulierung der Turbinensteuerung und ist im allgemeinen als Wirkung der Längenänderung des Reguliergestänges (Pendel, Steuerventil oder Rückführgestänge) oder einer zusätzlichen Federkraft am Pendel aufzufassen. Diese Funktionen können automatisch auf mechanische, elektrische oder hydraulische Weise besorgt werden. Es ergibt sich dann eine eigentliche Isodromvorrichtung, welche den vorhandenen Ungleichförmigkeitsgrad auf Null kompensiert. Die statische Frequenzregelung hat somit im Beharrungszustande astatischen Charakter angenommen. Es ist hier leider nicht möglich, auf die verschiedenen automatisch wirkenden Nachregulierungen einzugehen. Erwähnenswert

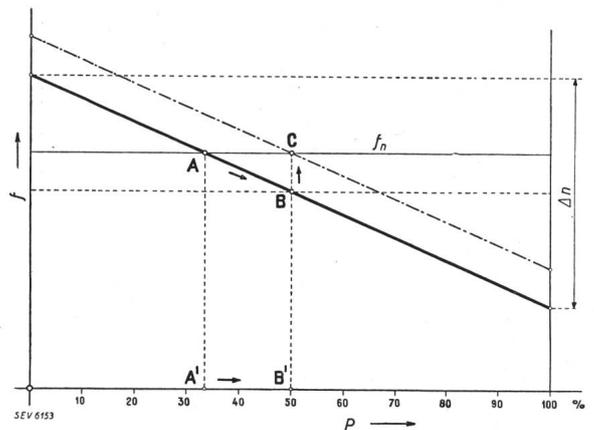


Fig. 10.
 Laständerung durch «Drehzahlverstellung».
 P Maschinenleistung in %.
 f Frequenz.
 f_n Normalfrequenz.
 Δn Drehzahlabfall.

sind immerhin die Impuls-Frequenzregler und solche mit stetiger, aperiodischer Nachwirkung, die Isodromregler.

Zufolge des astatischen Charakters einer derart geregelten «Frequenzmaschine» werden alle parallellaufenden Maschinen mit statischer Charakteristik an den Laständerungen des Netzes keinen Anteil nehmen. Der Frequenzsatz allein nimmt sämtliche Lastvariationen des Netzes auf und regelt diese aus. Aus diesem Grunde kann wohl nur eine

relativ grosse Maschinengruppe hiefür herangezogen werden. Die Grösse der Frequenzmaschine wird sich daher nach der Grösse der Netzleistung, Grösse der Lastschwankungen, der zulässigen Frequenzbandbreite und den Ungleichförmigkeitsgraden der parallellaufenden Regulatoren richten. Es dürfte interessieren, dass die Leistung der Frequenzmaschine bei üblichen Verhältnissen je nach den Eigenarten des Betriebes ca. 5...8% der gesamten Netzmaschinenleistung betragen kann. Wenn die Frequenzmaschine in ihrer Leistungsfähigkeit nicht

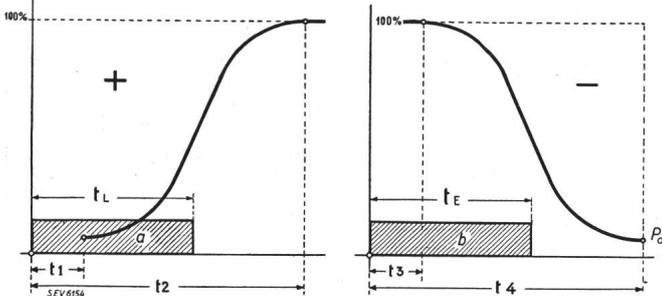


Fig. 11.

Verzögerungszeiten bei Drehzahlverstellung.

- + bedeutet Belastung, - bedeutet Entlastung.
- P_0 Leerlauf.
- a, b Drehzahlverstellung.
- t_L resp. t_E Impulsdauer der Ferndrehzahlverstellung.
- t_1 » t_3 Verzögerungszeit bei Lastanstieg, resp. -Abfall.
- t_2 » t_4 Totale Belastungs-, resp. Entlastungs-Dauer:

mehr ausreicht und mehrere Maschinen für die Frequenzhaltung herangezogen werden müssen, treten Schwierigkeiten auf. Während bei Handregulierung die Sache noch relativ gut zu lösen sein wird, wird das Problem bei automatischer Nachregelung erschwert, handelt es sich doch hierbei um den Parallelbetrieb astatisch geregelter Maschinengruppen. Die willkürlichen Ausgleichsleistungen zwischen solchen Gruppen müssen von einer besonderen Zusatzsteuerung richtiggestellt werden. Aus diesem Grunde wird man den Parallellauf mehrerer

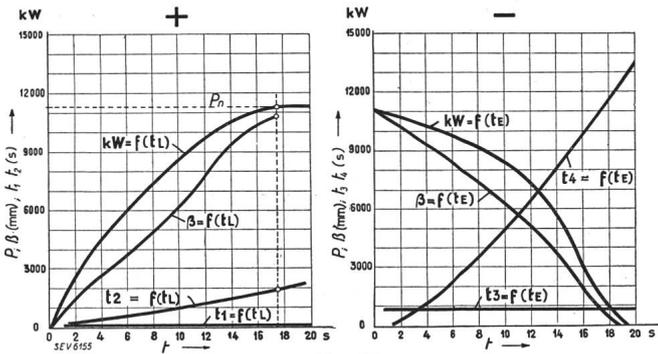


Fig. 12.

Verzögerungszeiten — Versuchsdiagramme.

- + bedeutet Belastung.
- bedeutet Entlastung.
- P_n Vollast.
- t Impulsdauer der Drehzahlverstellung.

astatischer Maschinenregler auf ein Kraftwerk, das frequenzhaltende Werk, beschränken müssen. Die Frequenzhaltung in grossen Netzgebieten lässt hier vorderhand bereits praktische Entwicklungsgrenzen erkennen.

Die bisher gewonnenen Einblicke in das Frequenzregulierungsproblem zeigen, dass die Frequenz-

haltung vor allem von der Ansprechempfindlichkeit der Turbinenregler abhängig ist. Nur im Rahmen dieser Empfindlichkeit kann ein automatischer Frequenzregler seine Aufgabe erfüllen. Ausserdem zeigen normale Drehzahlregler, die für die automatische Frequenzhaltung Verwendung finden sollen, häufig ein nachteiliges Verhalten gegenüber der Impulsgebung auf den Drehzahlverstellmotor. Fig. 11 veranschaulicht die vermutlich auftretenden Verzögerungszeiten. Die Versuchsaufnahme an einer Peltonturbine von 11 800 kW Leistung zeigt Fig. 12, woraus auch die Teilzeiten in Abhängigkeit verschieden langer Impulsgaben ersichtlich sind. Lässt man über dem Weg der Drehzahlverstellorgane, als Ursache, den Weg des Servomotors, als Wirkung, aufzeichnen, so wird eine nahezu geschlossene hysterisisartige Schleife — ein Charakteristikum des Reglers — zustandekommen (Fig. 13).

Soll nachträglich ein vorhandener normaler Regler mit einer empfindlichen elektro-automatischen Frequenzapparatur ausgerüstet werden, so sind die gezeigten Aufnahmen und ähnliche sehr wertvoll. Dabei kommen auch Unstimmigkeiten im

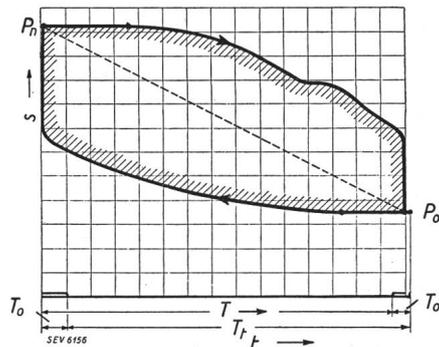


Fig. 13.

Diagramm Drehzahlverstellung Servomotorhub.

- P_n Vollast.
- P_0 Leerlauf.
- s Weg des Servomotors.
- T_0 Auslauf des Verstellmotors.
- T Einschaltdauer bei Entlastung.
- T_f Einschaltdauer bei Belastung.
- t Zeit, bzw. Weg der Drehzahlverstellung (31,2 mm/s).

Arbeiten der Regulierorgane, die beispielsweise beim aufeinanderfolgenden Einsetzen mehrerer Einlaufdüsen bei Peltonturbinen eintreten können, oder hydraulische Unstabilitäten von Francis- oder Propellerlaufrädern unbedingt zum Ausdruck (Fig. 9). Die automatische Frequenzregulierung kann in solchen Fällen oft Aufgaben schwierigster Natur gegenüberstehen.

Bei besonders heftigen Störungen können Auftrennungen von Netzen stattfinden. Ein Netzgebilde kann dabei oft in zwei, drei, bis vier unabhängige Netzgruppen zerfallen. Ausserordentlich wichtig ist dann, dass jedes Teilnetz seine Frequenz möglichst genau auf den richtigen Sollwert einstellt, besonders wenn die Wiederausanschaltung in Unterwerken ausgeführt werden muss, die ja in keiner Weise auf die Frequenz einzuwirken vermögen. Wenn jedoch solche Teilnetzgruppen zufolge der ihren Kraftwerken willkürlich zufallenden Last zu niedrige Frequenzen aufweisen, muss durch rasches

Abschalten von Verbraucher-Leitungen die nötige Entlastung herbeigeführt und die genaue Frequenzeinstellung vorgenommen werden. — Eine vor wenigen Tagen durch eine Fehlschaltung aufgetretene Störung mit Aufspaltung des Hauptbetriebes in zwei Teile, konnte dank der guten Frequenzhaltung von einem Unterwerk aus in zwei Minuten wieder flott gemacht werden.

Die absolute Bestimmung des Sollfrequenzwertes kann nur durch direkte Periodenzählung, bzw. Summierung erfolgen. Ein dauernder Periodenvergleich mit einem Normalvektor, z. B. dem Gange einer Präzisionsuhr oder den Pulsationen eines Quarz-«Frequenzgenerators», sei es auf mechanische, stroboskopische oder elektrische Weise, gestattet, den Frequenzmittelwert in der Grössenordnung von $\frac{1}{1000}$ bis $\frac{1}{2000}$ 0/0 genau zu halten. Die momentanen Frequenzabweichungen jedoch sind durch besondere Präzisions-Frequenzmesser zu kontrollieren.

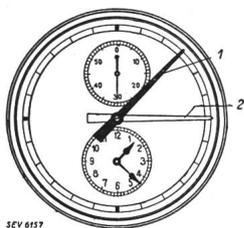


Fig. 14.

Periodenkontrolluhr.

- 1 Astronomische Zeit.
- 2 Netzzeit.

Eine Periodenkontrolluhr, die einen Synchronmotor als integrierendes Element enthält, der alle Frequenzen summiert und auf einen Sekundenzeiger überträgt, gestattet einen unmittelbaren Vergleich der Integralwerte von Zeit und Frequenz mit dem Gange dieser Uhr (Fig. 14). Ausser der allgemeinen Betriebsführung kann eine derart zeitgeregelte Frequenz den auf den Markt gebrachten Synchronmotoren für den Antrieb von Uhren, Zeitwerken, Registriergeräten usw. zugute kommen. Die Netzzeit entspricht nun der astronomischen Zeit. In grossen Netzbetrieben dürfte jedoch eine solche Zeitmessung zufolge der aus wirtschaftlichen oder betrieblichen Gründen nötigen periodischen Uebergabe der Frequenzhaltung an verwaltungsfremde, oft im Auslande liegende Werke unter Umständen gewissen Schwierigkeiten begegnen, es sei denn, dass jedes für die Frequenzhaltung vorgesehene Kraftwerk mit einer Periodenkontrolluhr ausgerüstet ist, nach welcher die Regelung von Hand oder automatisch vorgenommen werden muss. Es wäre auch denkbar, dass von einer Zentralstelle aus durch Fernübertragung die Zeitwerte dem Frequenzwerk übermittelt würden.

Infolge des synchronen Gleichlaufes der Werke einer Netzgruppe wurde in der Periodenkontrolluhr ein Mittel gefunden, den Parallelbetrieb mehrerer örtlich getrennter Frequenzregler zu sichern. Es möge beiläufig erwähnt werden, dass die in der Zeit auflaufenden Frequenzintegralwerte zu Regellecken verwendet werden können (Frequenz-Integralregelung), womit die oben angedeuteten Entwicklungsgrenzen einer umfassenden automatischen

Frequenzregelung weiter zurückverschoben werden. Bedürfnisse für eine gleichzeitige Aufteilung der Frequenzhaltung auf mehrere Werke liegen bei uns wohl heute noch nicht vor. Sie können jedoch bei sehr grossen Netzzusammenschlüssen aktuell wer-

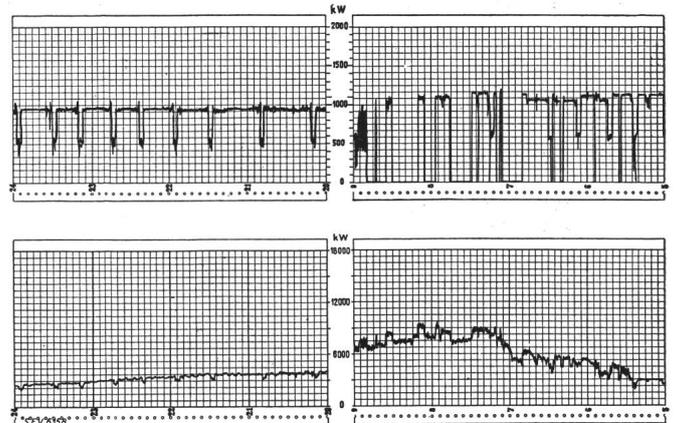


Fig. 15.

Lastdiagramme eines Elektroofens.

- Oben: Belastungsverlauf in der Speiseleitung.
- Unten: Belastungsverlauf im Unterwerk.

den, wobei die Lastschwankungen die Gesamtleistung des Frequenzwerkes übersteigen. Ein Eingehen auf diese Probleme fällt nicht in den Rahmen des Themas.

Aus diesen Darlegungen ist zu entnehmen, wie günstig sich eine gute Frequenzhaltung auf den Parallelbetrieb der Werke auswirkt. Ausserdem werden frequenzempfindliche Energiekonsumenten vor nachteiligen Wirkungen bewahrt. Die Aufgabe einer guten Frequenzhaltung wird einestheils erschwert durch die gleichzeitige Belieferung der verschiedensten Energieabnehmer, wie Textil- und Pa-

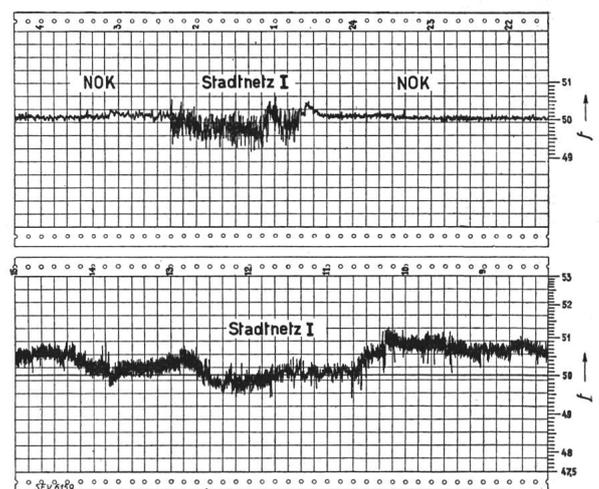


Fig. 16.

Frequenzdiagramme; Stadtnetz und Verbundbetrieb.

pierfabriken, Bahnen, Giessereien und Stahlwerke, von denen die letztgenannten oft mit ganz ansehnlichen Laststössen auf das Netz wirken, die bei kleineren Kraftwerken zu Betriebsunmöglichkeiten führen würden (Fig. 15). Solche Leistungsschwankungen werden von den meist mehrfach gespeisten

Hochspannungs-Grossabgabestellen anstandslos aufgenommen. Fig. 16 und 17 zeigen eine Gegenüberstellung der Frequenzdiagramme kleinerer städtischer Separatbetriebe mit demjenigen der Nordostschweizerischen Kraftwerke, die mit demselben Registrierapparat aufgenommen wurden. Das auffallend schmalere Frequenzband des Grossbetriebes ist ausser den empfindlichen Reguliereinrichtungen und deren Wartung, der bedeutenden kinetischen Energiereserve besonders der rasch umlaufenden Schwungmassen von Turbinen, Generatoren, Motoren und Transmissionsorganen zuzuschreiben. Die Reguliereinrichtungen werden daher durch den Energieinhalt der rotierenden Erzeuger- und Verbraucherlast vor den stark fluktuierenden Leistungen ganz wesentlich geschont. Hierbei spielt aber die Art der Netzkupplung (starre, elastische oder gleitende Kupplung) eine grundsätzliche Rolle.

Die vorübergehende Leistungsabgabe aus dem Arbeitsvorrat der umlaufenden Schwungmassen bei Kurzschlüssen verursacht z. B. im Netz der Nord-

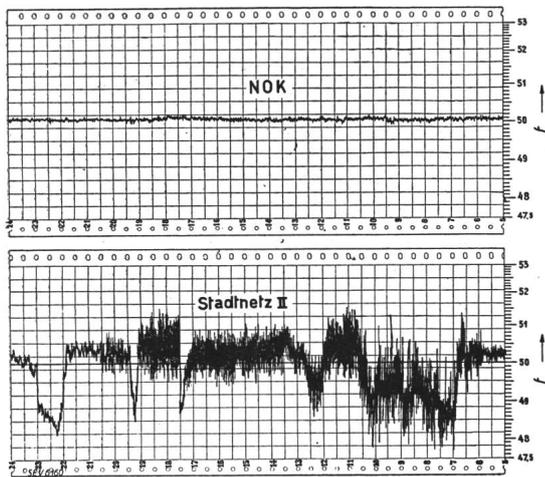


Fig. 17.

Frequenzdiagramme; Stadtnetz und Verbundbetrieb.

ostschweizerischen Kraftwerke nur einen kurzzeitigen Frequenzabfall von ca. 1 bis höchstens 3%. Bei einer angenommenen Kurzschlussdauer von 1 Sekunde werden hierbei ca. 150 000 kW der kinetischen Energie des Netzes entzogen.

Diese Massenwirkungen lassen andererseits erkennen, dass die Steuerung über den Fliehkraftregulator einmal verlassen werden könnte, um direkt von elektrischen Grössen (Vektorlage des Polrades, Leistung usw.) abgeleitet zu werden. Auch eine übergeordnete elektrische Störungsregulierung, die auf die Kraftmittelzufuhr der Maschinen einwirkt, muss ins Auge gefasst werden.

Leistungsregulierung.

Den Energiefluss eines Netzes seiner Grösse nach zu überwachen, ist die besondere Aufgabe der Leistungsregelung. Bei genauester Frequenzhaltung werden die weiteren parallellaufenden Maschinen, abgesehen von Einregelungsvorgängen bei Frequenzschwankungen, infolge ihrer statischen Charakteristik von der Lastvariation des Netzes nicht be-

rührt; sie geben also immer die gleiche Leistung ab. Im Hinblick auf den Einfluss eventueller Betriebsfrequenzschwankungen ist es wünschbar, die Neigung der Drehzahlabfallkurve steil, d. h. den Ungleichförmigkeitsgrad gross zu halten. Eine Leistungseinstellung kann über den Drehzahlverstellmotor geschehen, sei es von Hand oder durch automatische Einwirkung eines wattmetrischen Leistungsreglers. Um die Leistungsabgabe einer Maschinenengruppe frequenzunabhängig zu gestalten und auf bestimmte Quoten einzustellen, kann zweckmässig eine Hubbegrenzung am Regler Verwendung finden. Bei plötzlichen Entlastungen wird dann ein solches Aggregat gleichwohl normal ausreguliert.

Es lassen sich folgende Netzbetriebsformen betrachten (Fig. 18):

1. Den einfachsten Fall bildet eine Maschine mit eigenem Verbrauchernetz. Die Leistungsregulierung geht bei annähernd konstanter Frequenz automatisch vor sich. Sofern ein isodromer Turbinenregler

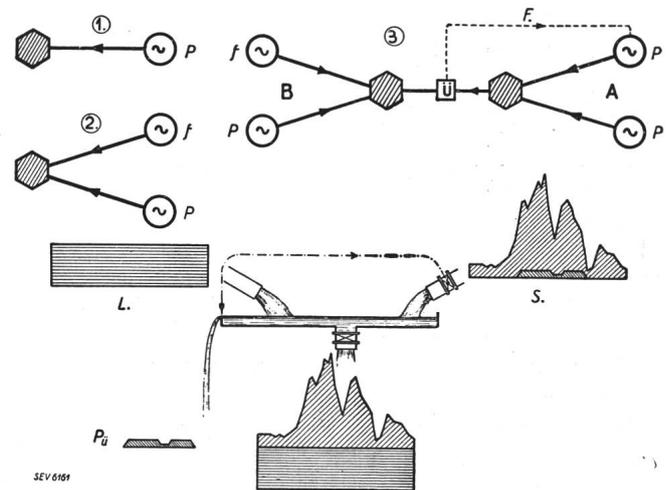


Fig. 18.

Netzbetriebsformen.

Netz A mit Leistungsregelung.
Netz B mit Frequenzregelung.

- P Leistung.
- f Frequenz.
- P₀ Uebergabeleistung.
- F Fernmessung.
- L Laufwerk.
- S Spitzenwerk.

vorhanden ist, kann die Frequenz lastunabhängig genau konstant gehalten werden.

2. Wird ein Netz von mehreren Werken gespeist, so wird die Frequenzhaltung meist einem bestimmten Kraftwerk bzw. Maschinenaggregat innerhalb des Werkes zugewiesen. Alle übrigen Maschinen oder Kraftwerke fahren auf Grund von Wattmeterangaben auf Leistung. Die Frequenzmaschinen haben alle im Netz auftretenden Laststösse zu decken und werden nach Frequenzkontrollapparaten reguliert, während die auf Leistung geregelten Werke, z. B. die Laufwerke, den Grundlastanteil des Belastungsdiagrammes liefern. Eine Fernmessung ist hierbei nicht erforderlich.

3. Die Kraftwerke versorgen ein Netz A und speisen ausserdem via Uebergabestelle Ü in das Netz B. Bei konstanter Last der Netzgruppe A wirkt sich jede Leistungsänderung ihrer Generatoren auf die Uebergabestelle Ü aus. Werden die

Maschinen in *A* mit Hilfe einer Fernmesseinrichtung nach dem Energieflusse der Uebergabestelle geregelt, so kann die Uebergabeleistung konstant oder nach einem beliebigen Fahrplan gehalten werden. Man erkennt, dass die Uebergabeleistung nur von einem Kraftwerk gesteuert werden kann, das der nicht frequenzhaltenden Netzgruppe angehört, gleichgültig ob Energie-Bezug oder -Abgabe vorgesehen sind. Besteht zwischen grossen Netzgebilden nur eine verhältnismässig schwache Kupplungsstelle zur Verschiebung kleiner Leistungen, so erheischt dies ganz besondere Vorsicht. Der betrachtete Fall einer Energieübergabe aus einem Netzbezirk in einen andern lässt sich an einem hydraulischen Modell versinnbildlichen.

Aus der Praxis des Werkbetriebes der Nordostschweizerischen Kraftwerke A.-G. möge das folgende Beispiel herausgegriffen werden (Fig. 19 und

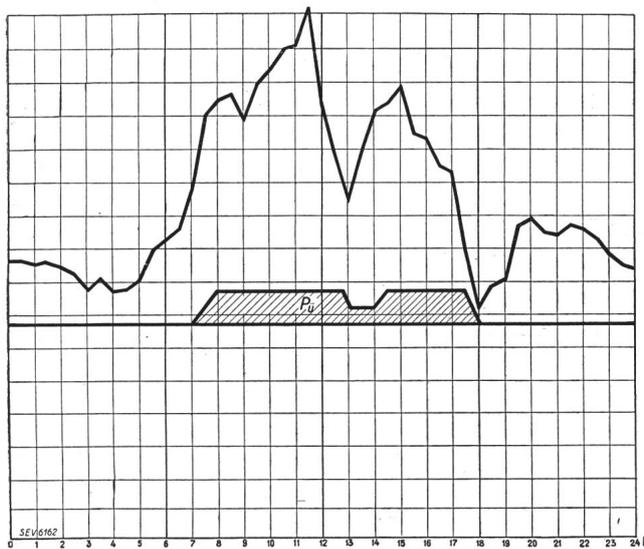


Fig. 19.
Gesamtbelastungsdiagramm der NOK.
 P_u Uebergabeleistung.

20). Das Belastungsdiagramm eines Wochentages (Netzgruppe *A*) wird gebildet aus dem Grundlastanteil der Laufwerke und dem Spitzenanteil der Akkumulierwerke. Man erkennt darin den Uebergabeleistungsbetrag an das Netz *B*, der mit Hilfe einer Hochfrequenzfernmesseinrichtung über eine 132 km lange Hochspannungsleitung manuell, gemäss vertraglichen Bestimmungen von einem der Werke in *A* einreguliert wird. Grundsätzlich wird auch in diesem Falle eine automatische Steuerung des Energieflusses möglich sein, wobei aus der Abweichung zwischen Ist-Wert und Soll-Wert der Regeleinfluss hergeleitet wird.

Die betrachtete einfache Kupplung nimmt kompliziertere Formen an, wenn mehrere Partner ihre Netze zusammenschliessen (Fig. 21). Obwohl zwischen dem Haupt- und Separatbetrieb des Partners *1* Synchronismus besteht, wird das Einlegen des Kuppelschalters zwischen *1* und *1'* sämtliche vertraglichen Energielieferungen stören, weil sich der Energiefluss augenblicklich auf Grund der physikalischen Konstanten des veränderten Netzgebildes nach den Naturgesetzen einstellen würde. Aus

dieser Betrachtung geht hervor, dass eine gewisse Auflösung vermaschter Systeme in grossen Netzkonfigurationen anzustreben ist, um einfache Kupplungen zu erhalten. Mehrfache Kupplungen zwischen verwaltungsfremden Netzen schliessen Ueberbestimmungen in sich, die nur durch teure, technische Hilfsmittel und organisatorische und vertragliche Massnahmen beherrscht werden können.

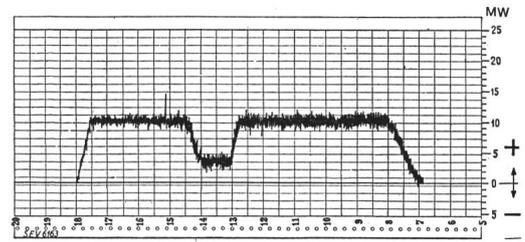


Fig. 20.
Uebergabeleistung (Handregulierung).
+ bedeutet Lieferung.
- bedeutet Bezug.

Forderungen von festgesetzten Leistungsbezügen an bestimmten Netzstellen nach bestimmten Programmen können unter Umständen Schwierigkeiten bereiten, weshalb bei vertraglichen Bestimmungen auf die vorhandenen technischen Möglichkeiten zum vorneherein Rücksicht zu nehmen ist.

Aus diesen Darlegungen geht die unbedingte Notwendigkeit einer zentralen Betriebsleitung in grossen Kraftwerksunternehmungen hervor, die mit den nötigen Befugnissen ausgestattet ist. In technischer und wirtschaftlicher Hinsicht werden an eine solche Abteilung besondere Anforderungen gestellt, so die Frequenz- und Spannungsüberwachung,

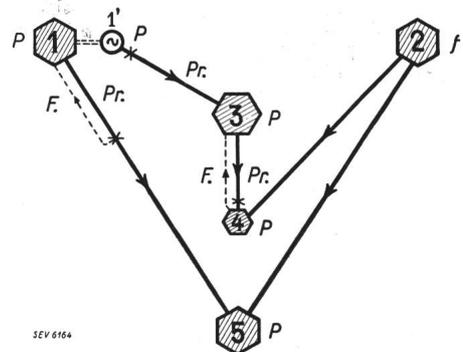


Fig. 21.
Einfache Kupplung mehrerer Netze.
P Leistungsregulierung. *Pr* Lieferung nach Programm.
f Frequenzregulierung. *F* Fernmessung.
 \times Uebergabestellen.

Wirk- und Blindlastverteilung, Selektiv-, Ueberstrom- und Ueberspannungsschutz, Erdschlusskontrolle, Netz- und Blindleistungskompensation, besonders aber die rationelle Ausnützung unserer Wasserkräfte.

Bereits sind es heute beachtenswerte Energiemengen, die in modernen Netzen nach den Orten des Verbrauches verschoben werden und so den gewaltigen Fluss menschlicher Arbeit unseres Landes aufrecht erhalten. Die technische Beherrschung solcher Energieschiebungen im normalen wie im gestörten Betriebe bleibt eine hohe Aufgabe, die

auch weiterhin den intensiven Bemühungen von Wissenschaft und Technik bedarf.

Der Vorsitzende verdankt das Referat bestens. Die Ausführungen des Herrn Hug werden besonders interessant, wenn man die von Herrn Darrieus dargelegten Prinzipien dahinterstellt. Es ist möglich, dass bei deren Anwendung sich besonders bei der letzten von Herrn Hug gezeigten Figur 21 wunderbare Lösungsmöglichkeiten ergeben. Der Satz

von Herrn Hug, dass angesichts der Massenwirkungen die Steuerung über den Fliehkraftregulator verlassen werden könnte, um direkt von elektrischen Grössen abgeleitet zu werden, ist besonders geeignet, die Diskussion zu beleben; der Sprechende hat nämlich das Gefühl, dass dies der Schwanengesang des Pendelreglers ist.

Zum letzten Satz von Herrn Hug wäre noch zu sagen, dass alle diese Probleme gar nicht mehr gefährlich und leicht zu lösen sind, wenn es einmal gelingt, die Störquellen in ganz kurzer Zeit aus dem Netz herauszuschneiden.

3. Referate von Fabrikanten.

Frequenz- und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden.

Von Rob. Keller, Baden.

Es wird zunächst das Grundsätzliche der Programmregulierung und der Frequenzhaltung besprochen, wobei auf die hierzu zur Verfügung stehenden Mittel hingewiesen wird, ferner auf die Schwierigkeiten, die in der Regulierfähigkeit der Turbine liegen. Dann wird die Regulier-Methode und -Einrichtung des Kraftwerkes Kembs beschrieben, wobei besonders die Apparatur für die Programmsteuerung zur Geltung kommt. Zum Schluss wird auf Mängel der Konstruktion und der Wirkungsweise der heutigen Turbinenregler hingewiesen und ein elektrischer, direkt die Frequenz erfassender Frequenzregler beschrieben.

L'auteur expose le principe du réglage selon un programme et du maintien de la fréquence en signalant les moyens dont on dispose à cet effet et les difficultés inhérentes au réglage des turbines. Il décrit ensuite la méthode et l'installation de réglage de l'usine de Kembs en s'arrêtant spécialement à l'équipement de réglage selon programme. Pour terminer, l'auteur expose les défauts de la construction et du fonctionnement des régulateurs actuels et décrit un régulateur de fréquence réagissant directement sur la fréquence.

Die einleitenden Referate dürften gezeigt haben, dass die Verwendung von zweckmässig ausgebildeten und automatisch funktionierenden Einrichtungen für die Erfüllung der gestellten Netzregulierungsbedingungen heute eine Notwendigkeit geworden ist. Trotzdem die modernen mechanischen Turbinenregler auf eine ausserordentlich hohe Stufe entwickelt sind, namentlich bezüglich Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Stabilität, können sie den im Zusammenhang mit dem gesamten Netzbetrieb gestellten Ansprüchen als reine Drehzahlregler nicht mehr

werk selbst gedeckt werden. Wird nun unter diesen Bedingungen ein weiteres Kraftwerk in irgendeinem Moment zugeschaltet, so nimmt dieses am Energieaustausch keinen Anteil; ein Eingreifen desselben mit Energielieferung erfolgt erst bei auftretenden Frequenzabweichungen. Uebergibt man dieser Maschine, bzw. dem Kraftwerk die Aufgabe der Frequenzhaltung, so hängt deren Wirksamkeit von seiner Leistungsfähigkeit und vom Verhältnis seiner Statik gegenüber derjenigen der Netzstatik, bzw. derjenigen der übrigen Werke ab. Anhand der

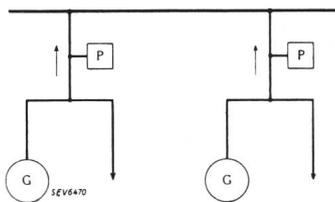


Fig. 1.
Parallel geschaltete
Kraftwerke mit
Separatabnehmern.

genügen. Aus den vorangegangenen Referaten ging hervor, dass die gestellten Bedingungen durch kombinierte Frequenz- und Leistungsregler erfüllt werden können. Die Einführung, bzw. die Kombination des Leistungsreglers mit den vorhandenen Turbinenreglern ist immer nötig, sobald die zu regulierende Leistung nicht mehr eindeutig durch die Turbinenöffnungen gegeben ist. Dies ist der Fall, wenn ein Generator, bzw. ein Kraftwerk ausser der an das Netz abgegebenen Energie noch separate Konsumentennetze speist (Fig. 1).

Wenn in jedem Kraftwerk durch irgendwelche Mittel dafür gesorgt wird, dass die Programmleistung konstant gehalten wird, so hat das zur Folge, dass die Leistungsvariationen der Konsumentennetze jeder Netzgruppe von dem zugehörigen Kraft-

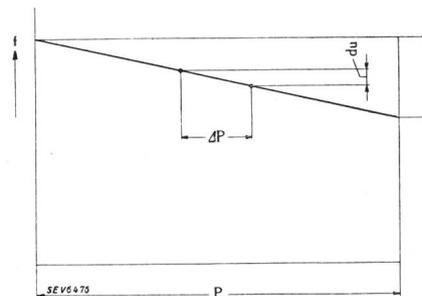


Fig. 2.
Diagramm der
Lastverteilung.

Fig. 2 seien diese Verhältnisse kurz erläutert.

P stellt die gesamte Netzleistung dar, ΔP die vom frequenzhaltenden Werk lieferbare Energie.

Dann ergibt sich folgende Beziehung:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{du}{u}; \quad d\omega = \Delta P \cdot \frac{u}{P}; \quad \Delta P = du \frac{P}{u}$$

Nimmt man z. B. an, dass das frequenzhaltende Werk eine auftretende Frequenzabweichung von 0,2% auszuregulieren habe und die Netzstatik $u = 3\%$ betrage, so ergibt sich $\Delta P = \frac{P}{15}$, d. h. die Netz-