

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 25 (1934)

Heft: 3

Artikel: Die 8600 kVA-Frequenz-Umformergruppe im Unterwerk Seebach der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB)

Autor: Dudler, A. / Bossi, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060133>

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: 13.01.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich 4
Stauffacherquai 36/40

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXV. Jahrgang

Nº 3

Mittwoch, 31. Januar 1934

Die 8600 kVA-Frequenz-Umformergruppe im Unterwerk Seebach der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB).

Von A. Dudler, Chef der elektrischen Anlagen des Kreises III der SBB, Zürich, und
H. Bossi, Ingenieur der A.-G. Brown Boveri & Cie., Baden.

621.314.26 : 621.331.5 : 625.1(494)

Im Anschluss an den Artikel von R. Keller in der vorigen Nummer des Bulletin über das Problem der Netzkupplung und speziell der Entwicklung der rotierenden Umformer mit Kollektorkaskade wird die erste derartige Anlage in der Schweiz, die Frequenzumformergruppe im Unterwerk Seebach der SBB, behandelt.

Dans le dernier numéro du Bulletin, M. R. Keller a exposé le problème du couplage des réseaux et plus particulièrement le développement des convertisseurs rotatifs à collecteurs en cascade. Le présent article traite de la première installation de ce genre en Suisse, du groupe convertisseur de fréquence de la sous-station Seebach des CFF.

I. Energiewirtschaftliches des SBB-Bahnnetzes.

Die Energieversorgung der Schweizerischen Bundesbahnen stützt sich auf die bahneigenen hydraulischen Kraftwerke Ritom, Amsteg, Barberine und Vernayaz, zu denen sich die kleineren Werke Massaboden, Göschenen und Trient gesellen. Diese Anlagen weisen insgesamt einen Ausbau von 250 000 kW, bezogen auf die Turbinenwelle, auf. Die in diesen Kraftwerken für die elektrische Zugförderung verfügbare jährliche Energie beträgt unter Zugrundelegung der hydrologischen Verhältnisse des wasserarmen Jahres 1908/09 442 Millionen kWh.

Bis zur Inbetriebnahme der Umformergruppe Seebach auf 1. Januar 1932 bezogen die SBB von den Bernischen Kraftwerken, den Bündner Kraftwerken, dem Aargauischen Elektrizitätswerk und der S. A. Dynamo, Mailand, Zusatzenergie im ungefähr Umfang von 10 % der Selbsterzeugung.

Infolge des steigenden Energiebedarfes genügte diese aus den bahneigenen und bahnfremden Kraftwerken verfügbare Energiemenge nur bis zum Jahre 1932. Die mutmassliche weitere Steigerung wurde anhand der Prognose der Verkehrsentwicklung unter Berücksichtigung des Elektrifizierungsprogrammes bestimmt. Dabei wurde angenommen, dass der Verkehr im Jahre 1940 denjenigen von 1926 um 50 % übertreffe. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass der von 1926 ungefähr dem des Jahres 1913 entspricht.

Einlässliche Studien haben die SBB dazu geführt, für die Deckung des Mehrbedarfes die Errichtung des Etzelwerkes als gemeinschaftlichen Bau mit der Nordostschweizerischen Kraftwerke A.-G. (NOK) allen übrigen in Vergleich gezogenen Lösungen, wie Bau eines eigenen Werkes oder entsprechend ver-

mehrter Fremdbezug, vorzuziehen. Das Etzelwerk, mit einer ausgebauten Leistung von $2 \cdot 44\,000$ kW in je 3 Gruppen für Einphasen- und Drehstromenergie, wird in der Lage sein, eine Jahresenergie von 135 Millionen kWh zu erzeugen, wovon 55 % entsprechend ihrem Anteil am Aktienkapital der SBB für Traktionszwecke zur Verfügung stehen.

Da nach damaliger Voraussetzung die Inbetriebsetzung des Etzelwerkes nicht vor Oktober 1934 erfolgen konnte (inzwischen ist die Fertigstellung auf das Jahr 1937 verschoben worden), wurde zur Lieferung der fehlenden Energie bis zu diesem Zeitpunkt mit der NOK ein Zusatzvertrag zum Etzelwerkvertrag abgeschlossen. Es ist vorgesehen, im Maximum jährlich 30 Millionen kWh aus dem NOK-Netz zu beziehen, wovon 80 % auf die Winterzeit entfallen. Für den Bezug dieser Energie aus dem Drehstromnetz der NOK wurde die Aufstellung einer 6000-kW-Frequenzumformergruppe im Unterwerk Seebach durch die SBB beschlossen, die der Gegenstand der nachstehenden Ausführungen sein wird.

Die universelle Verwendbarkeit der Gruppe gestattet indessen auch in analoger Weise die Übertragung von Energie aus dem Einphasenbahnnetz ins Drehstrom-Industriennetz. Eine kurze Zusammenfassung der Vertragsbestimmungen über den Energieaustausch dürfte daher von allgemeinem Interesse sein:

1. Benötigen die SBB Energie von fremden Werken, so werden sie diese, sofern die Preise unter Berücksichtigung der Bezugsverhältnisse gleich oder niedriger sind als diejenigen der Offerte anderer Werke, bis zur Aufnahmefähigkeit der Umformeranlage von den NOK beziehen.

2. Verfügen die SBB über überschüssige Energie, nach Erfüllung ihrer bestehenden Verpflichtungen betreffend Abgabe über ihre Drehstromanlagen in den Kraftwerken Am-

steg und Vernayaz, so werden sie diese Ueberschüsse zuerst den NOK zum Bezug über die Umformeranlage Seebach anbieten, wobei bei gleichen Preisen der NOK gegenüber Dritten das Vorzugsrecht zusteht.

3. Die analogen Verpflichtungen nimmt die NOK gegenüber der SBB auf sich, sofern sie Energie benötigt oder über solche verfügt.

4. Im weitern verpflichten sich die Vertragspartner, bei Störungen in ihren Kraftwerken oder Verteilanlagen sich im Rahmen der verfügbaren Leistungen und Energiemengen gegenseitig auszuholen.

Die Aufstellung der Gruppe im bestehenden Unterwerk Seebach war gegeben durch den Umstand, dass sich dieses Unterwerk in einem Punkt des 60 kV-Einphasen-Netzes befindet, der über zwei Doppelleitungen sowohl mit der Kraftwerkgruppe Amsteg-Ritom, als auch mit den westschweizerischen Kraftwerken Vernayaz und Barberine in Verbindung steht. Ausserdem fiel ins Gewicht, dass dadurch in unmittelbarer Nähe des verkehrswichtigen Speisebezirkes von Zürich und in beträchtlicher Entfernung der Hauptkraftwerke ein weiterer Stützpunkt in der Energieversorgung der SBB geschaffen wurde, der bei Nichtverwendung der Umformergruppe zur Leistungssübertragung außerdem eine zweckdienliche Verwendung der Einphasenmaschine allein zur Spannungshaltung ermöglichte. Ueberdies erforderte die Nähe der 43-kV-Drehstromleitung Töss-Seebach nur geringe Kosten für den Anschluss der Umformergruppe an das NOK-Netz.

II. Beschreibung der Umformeranlage.

A. Betriebsanforderungen.

Die Umformergruppe dient dem Energieaustausch zwischen dem Einphasen-Wechselstrom-Bahnnetz der SBB, $16\frac{2}{3}$ Per./s und dem Dreiphasen-Wechselstrom-Industrie-Netz der NOK von 50 Per./s. Die Verschiedenheit der Frequenzen erforderte die Verwendung einer rotierenden Umformergruppe.

Um der Anforderung der Uebertragung einer nach Grösse und Richtung konstanten Leistung zu genügen, musste infolge der stark voneinander abweichenden Betriebsbedingungen und der im Verhältnis zur Umformerleistung sehr grossen Maschinenleistungen der beiden angeschlossenen Netze ein elastisches Kupplungsglied durch Synchron-Asynchronumformer mit Regulierkaskade gewählt werden. Das Bahnnetz mit grossen und rasch aufeinander folgenden Belastungsstößen weist Frequenzschwankungen bis $\pm 3\%$ auf, während die Frequenzschwankungen bei dem ausserordentlich ruhigen Betrieb des Industrienetzes maximal nur $\pm 1\%$ betragen.

Der Maschineneinsatz im SBB-Netz beziffert sich tagsüber auf über 100 000 kW, der von dem des Drehstromnetzes normalerweise übertroffen wird, da das Netz der NOK überdies mit weitern grossen Industriennetzen zusammenhängt.

Ergänzend sei bemerkt, dass, um bei starrer Kupplung (Synchron-Synchrongruppe oder Synchron-Asynchrongruppe ohne Regulierkaskade)

über die Umformergruppe eine konstante Leistung zu übertragen, die Turbinen des einen Netzes in Abhängigkeit der einzuhaltenden Kupplungsleistung beaufschlagen werden müssten. Eine solche Betriebsführung würde zu untragbaren Eingriffen in die Selbständigkeit der beiden Netze führen, die um so unerwünschter wären, als der Umformer nur zeitweilig in Betrieb stehen sollte. Durch die elastische Kupplung wurde somit beiden Netzen die volle Unabhängigkeit gewahrt und ein vollkommen freier Energieaustausch nach beiden Richtungen ohne Beeinflussung durch die in beiden Netzen vorkommenden Frequenzschwankungen ermöglicht.

Die im Abschnitt C beschriebenen Reguliereinrichtungen geben der Asynchronmaschine den Charakter eines Primärmotors, der jedoch im Gegensatz zu andern Primärmotoren den Vorteil aufweist, dass er, seinerseits angetrieben, als Generator arbeiten kann. Dadurch konnten an die Gruppe hinsichtlich Betriebsweise die nachstehend erwähnten, vielseitigen Ansprüche gestellt werden:

1. Uebertragung einer konstanten Leistung, einstellbar nach Grösse und Richtung bei gegebenem oder veränderlichem Leistungsfaktor unabhängig von den Frequenzschwankungen in beiden Netzen.

2. Uebertragung der Leistung in Abhängigkeit der Frequenz des einen oder andern Netzes.

3. Speisung eines selbständigen Einphasen-Bahnbezirkes.

4. Phasenschieberbetrieb der beiden Hauptmaschinen, einzeln oder beide gleichzeitig.

B. Aufbau und Grösse der Umformergruppe.

Die Umformergruppe besteht auf der Einphasen-Wechselstromseite aus der vierpoligen Synchronmaschine für $16\frac{2}{3}$ Per./s mit zugehörigem, fliegend aufgebauten Haupt- und Hilfserreger und auf der Dreiphasenseite aus einer 12poligen Asynchronmaschine für 50 Per./s mit starr gekuppelter Dreiphasen-Kollektormaschine (System Brown-Boveri-Scherbius), an deren äusserem Wellenende ein Frequenzwandler fliegend angebaut ist.

Die beiden Hauptmaschinen sind durch eine im Stillstand lösbare Bolzenkupplung mit herausnehmbarem Zwischenstück starr verbunden. Dies gestattet, bei gelöster Kupplung jede der beiden Hauptmaschinen als selbständigen Phasenschieber zu verwenden.

Maschinendaten.

Tabelle I.

	Einphasen-Synchronmaschine	Dreiphasen-Asynchronmaschine
Dauerleistung:		
als Generator an den Klemmen bei $\cos \varphi = 0,7$ übererregt kVA	8600	8600
als Motor an der Welle bei $\cos \varphi = 1$ kW	6700	6700
als Phasenschieber bei $\cos \varphi = 0$ übererregt kVA	7200	7000
bei $\cos \varphi = 0$ untererregt kVA	4000	7000
Betriebsspannung kV	10	8
Frequenz Per./s	$16\frac{2}{3} \pm 3\%$	$50 \pm 1\%$
Umdrehungszahl U/m	500 $\pm 3\%$	

In Fig. 1 ist die Einphasenseite der Gruppe zu sehen mit dem zwischen Erreger und Hauptmaschine eingebauten 10poligen Anwurftsmotor für das Anlassen der entkuppelten Einphasenseite bei Phasenschieberbetrieb. Fig. 2 stellt die Dreiphasen-

Phasenschieberbetrieb geschieht durch die Hauptasynchronmaschine.

Die hauptsächlichsten Maschinendaten sind in Tabelle I zusammengestellt.

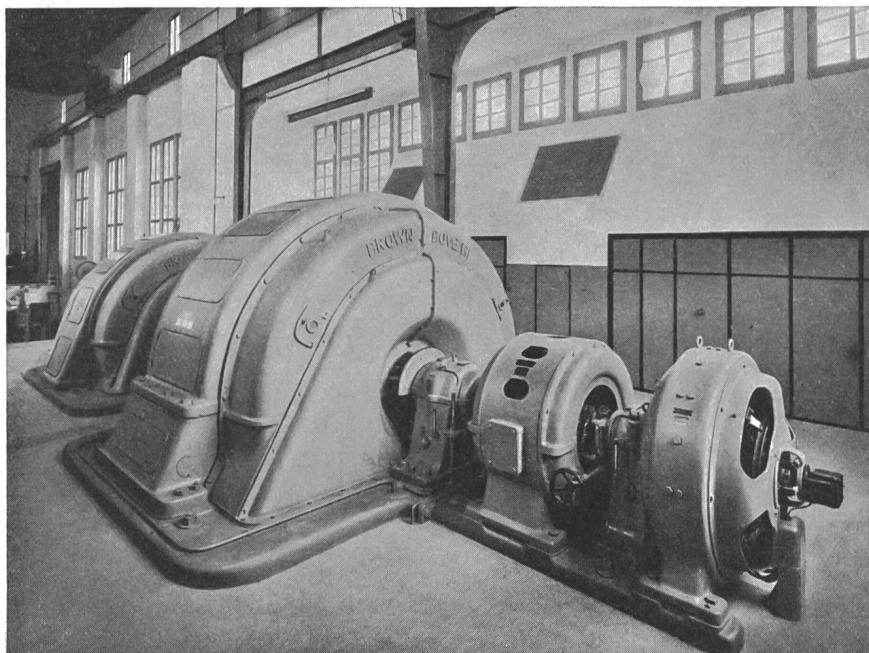


Fig. 1.

Ansicht der Frequenzumformergruppe von der Einphasenseite aus.

(Von links nach rechts: Drei-phasen-Asynchronmaschine, Ein-phasen-Synchronmaschine, Drei-phasen-Anwurftsmotor, Gleichstrom-Erregermaschine für Einphasemaschine). Im Hintergrund: Transformatoren-Montagehalle u. Werkstätte des Unterwerkes.

(Cliché: SBB-Nachrichtenblatt.)

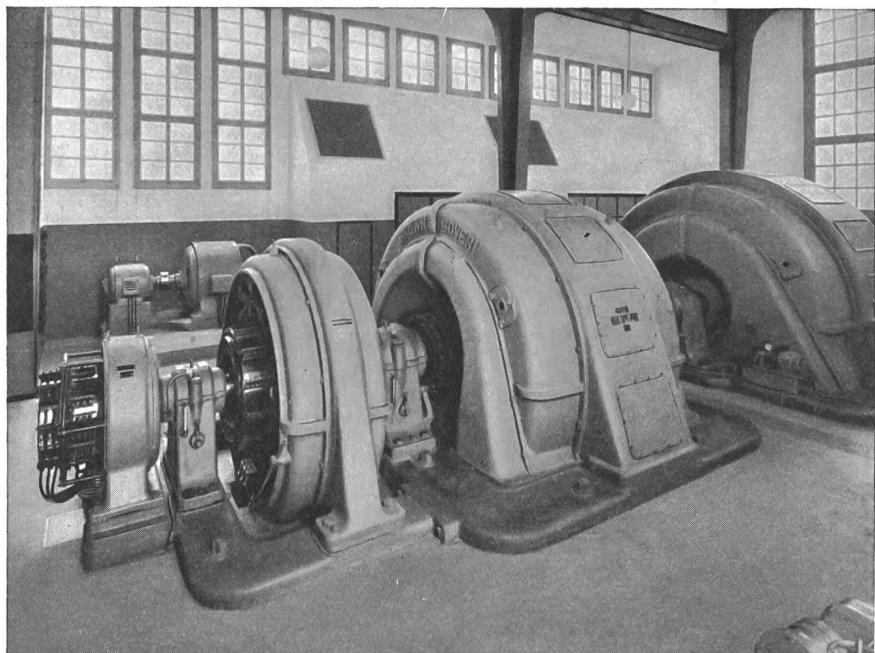


Fig. 2.

Ansicht der Frequenzumformergruppe von der Dreiphasenseite aus.

(Von links nach rechts Frequenzwandler, Scherbiusmaschine, Drei-phasen - Asynchronmaschine, Ein-phasen - Synchronmaschine). Im Hintergrund: Hilfserregergruppe.

(Cliché: SBB-Nachrichtenblatt.)

seite der Gruppe dar. Die Umformergruppe von total 15,0 m Länge besitzt 6 wassergekühlte Ringschmierlager, wovon die 2 Lager der Einphasemaschine zur Erleichterung des Anlaufens bei Phasenschieberbetrieb der entkuppelten Einphasenseite mit Drucköilentlastung ausgerüstet sind. Das Anlassen des ganzen Maschinensatzes im Umformerbetrieb oder der entkuppelten Dreiphasenseite im

Die Betriebsspannung der Einphasenmaschine wurde tiefer gewählt als die des Fahrleitungsnets (15 kV), um durch Zwischenschaltung eines Transformators die unmittelbaren Einflüsse von Kurzschlüssen und Ueberspannungen im Fahrleitungsnets nach Möglichkeit von der Maschine fernzuhalten. Aus dem gleichen Grunde wurde auch davon abgesehen, einen Autotransformator zu verwenden.

Auf der Dreiphasenseite erfolgt der Anschluss der Asynchronmaschine an das 43,5 kV-Netz ebenfalls über einen Transformator.

Die Schaltung der ganzen Umformeranlage ist aus Fig. 3 ersichtlich.

C. Wirkungsweise der Kollektorkaskade und prinzipielle Schaltung.

Die Drehzahl der Umformergruppe ist durch die der Synchronmaschine bestimmt, welche starr der Frequenz des Bahnnetzes folgt. Die Asynchronmaschine arbeitet infolgedessen mit einem veränderlichen Schlupf, der vom Verhältnis der Frequenzen der beiden Netze abhängt. Das durch die Asynchronmaschine ohne Kollektorkaskade auf die Welle der Synchronmaschine übertragene Drehmoment ist diesem Schlupf und der im Rotorkreis hervorgerufenen Schlupfspannung annähernd proportional und bestimmt die von der Umformergruppe übertragene Leistung. Es fliesst somit die Leistung stets vom Netz relativ höherer Frequenz zu dem niedrigeren Frequenz.

Die Kollektorkaskade soll der Asynchronmaschine ermöglichen, ein von den Frequenzabweichungen der beiden Netze unabhängiges Drehmoment an ihrer Welle abzugeben.

Zu diesem Zwecke wird in den Rotor der Asynchronmaschine eine Zusatzspannung eingeführt — gleicher Frequenz wie die Schlupfspannung —, die sich zu dieser addiert oder subtrahiert. Die Restspannung im Rotor bestimmt damit das Drehmoment an der Kupplung und die übertragene Leistung der Umformergruppe. Die prinzipielle Schaltung der Asynchronmaschine mit Kollektorkaskade ist im bereits erwähnten Schema Fig. 3 enthalten.

Die oben angeführte Zusatzspannung wird den Schleifringen der Asynchronmaschine durch die *Dreiphasen-Kollektormaschine* (BBC-Scherbiusmaschine) zugeführt. Es ist dies eine vom Stator aus erregte Dreiphasen-Kollektormaschine mit Wendepolen, die an ihren Bürsten eine Spannung gleicher Frequenz wie der im Stator fliessende Erregerstrom liefert. Eine vom Ankerstrom durchflossene Reihenschlusswicklung garantiert stabilen Lauf bei veränderlichem Schlupf. Den Erregerstrom mit Schlupffrequenz erzeugt der *Frequenzwandler*, der fliegend auf der Welle der Scherbiusmaschine aufgebaut ist. Dessen Anker dreht somit mit der Frequenz des Bahnnetzes. Seine Schleifringe jedoch sind über einen Hilfstransformator an das Industriennetz angeschlossen, so dass an den um 120° elektrisch versetzten Kollektorbürsten eine Dreiphasenspannung gleichen Effektivwertes wie die Schleifringsspannung und gleicher Frequenz wie die Schlupffrequenz erzeugt wird.

Um die Grösse der Zusatzspannung und dadurch die Leistungsübertragung der Umformergruppe beliebig und stetig verändern zu können, ist zwischen Hilfstransformator und Frequenzwandler ein *Doppelinduktionsregler* eingeschaltet. Gegenläufiges Verdrehen der beiden Rotoren des Doppelinduktionsreglers erlaubt, die an der Sekundärseite ab-

gegebene Spannung kontinuierlich von einem Maximalwert in der einen Richtung über Null zu einem entgegengesetzt gerichteten Maximalwert zu verändern.

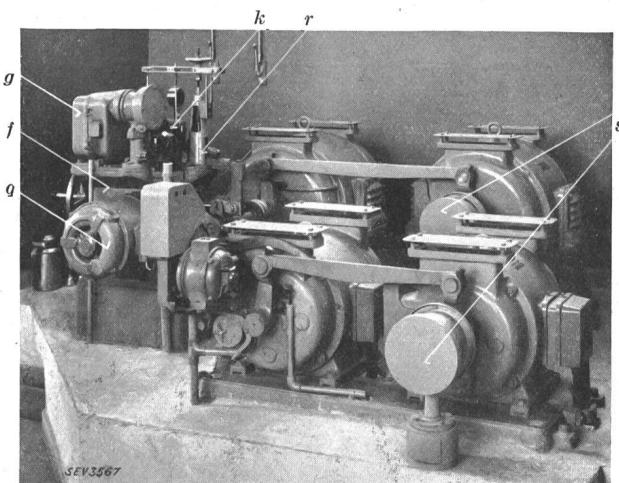


Fig. 4.
Ansicht der Doppel-Induktionsregler.

- f Oeldruck-Servomotor.
- k Steuerventil von f.
- r Automatische Rückführung von f.
- g Antriebsmotor der Oeldruckpumpe.
- q Nulleistungsregler.
- s Geberapparate für die Stellungsanzeige im Schaltstand.

Die direkte Erregung der Scherbiusmaschine vom Frequenzwandler aus würde zu grosse Leistung und damit zu grosse Frequenzwandler und Doppelinduktionsregler erfordern. Um diese Leistung zu reduzieren, wird deshalb die Scherbiusmaschine nicht direkt, sondern vom Frequenzwandler aus über eine *Dreiphasen-Hilfserregermaschine* erregt. Dadurch können auch die Verluste in der Regulierkaskade wesentlich verkleinert werden.

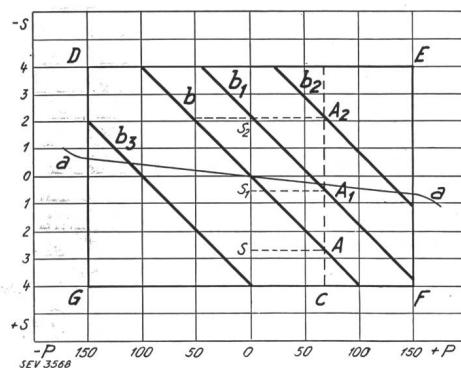


Fig. 5.
Natürliche Charakteristiken der Umformergruppe.

- a Ohne Kollektorkaskade.
- b bis b₃ Mit Kollektorkaskade.
- P Leistung an der Kupplung der Umformergruppe in Prozenten der Nennleistung,
- + P bei Leistungsübertragung von NOK nach SBB (Asynchronmaschine arbeitet motorisch).
- P bei Leistungsübertragung von SBB nach NOK (Asynchronmaschine arbeitet generatorisch).

$$s = 1 - \frac{f_b}{f_i} \cdot k$$

wobei s Schlupf in % der Drehzahl der Umformergruppe,
 f_b die Bahnfrequenz,
 f_i die Industriefrequenz und
 k das Verhältnis der Polzahlen der Hauptmaschinen bedeuten.

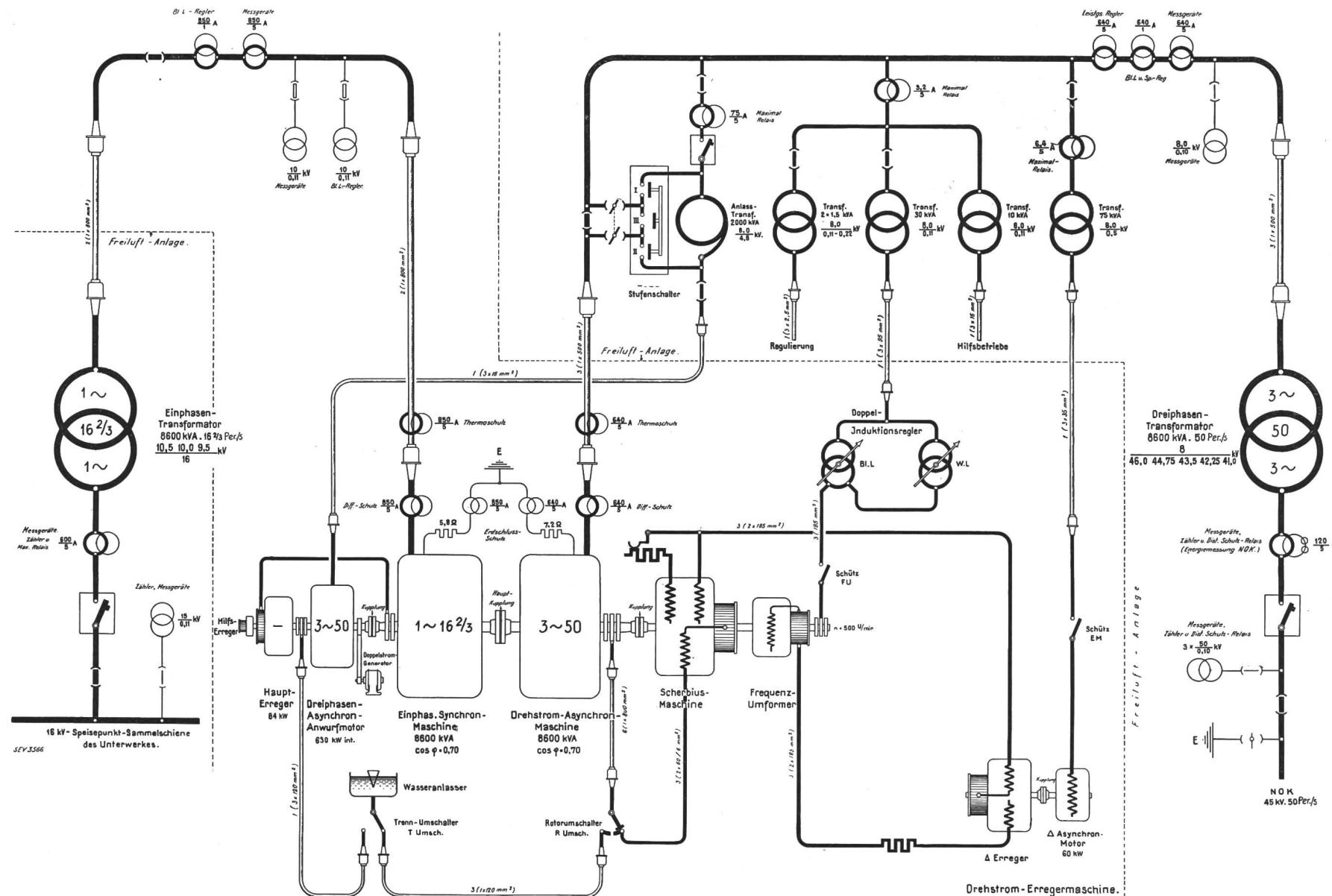


Fig. 3.
Schaltungsschema der Umformergruppe.

Der Aufbau dieser Hilfsregermaschine deckt sich mit dem der Dreiphasen-Kollektormaschine. Sie wird durch einen Motor separat angetrieben.

Die Wirkung der Regulierung mit Kollektorkaskade sei anhand der Fig. 5 kurz erläutert. Kurve *a* stellt die Leistung an der Kupplung der Asynchronmaschine in Funktion ihres Schlupfes dar, bei abgeschalteter Kollektorkaskade. Man sieht deutlich das starre Verhalten einer solchen Netzkupplung, die schon bei einem Schlupf von ca. 1 % im Gebiete der Kippgrenze der beiden Hauptmaschinen arbeitet. Kurve *b* zeigt dasselbe, jedoch bei zugeschalteter Kollektorkaskade und ohne von aussen eingeführte Zusatzspannung (Stellung 0 am festgestellten Doppel-Induktionsregler). Die grössere Steilheit der Kurve, die durch die charakteristischen Größen der Kollektorkaskade ein für allemal gegeben ist, ist hauptsächlich eine Folge des Einflusses der Kompondwicklungen der Scherbiusmaschinen. Obwohl die Umformergruppe elastischer arbeitet als nach Kurve *a*, ist auch bei Kurve *b* noch jedem Schlupf eine bestimmte Leistung zugeordnet. Erst durch die Verstellung der Doppel-Induktionsregler kann durch Veränderung der über die Erregerkreise in den Rotor der Asynchronmaschine eingeführten Zusatzspannung die Kurve *b* kontinuierlich nach *b*₁, *b*₂ oder *b*₃ innerhalb des Regulierbereiches *D*, *E*, *F*, *G* verschoben werden. Dieses Rechteck, das durch den maximalen

zu verschieben, dass deren Schnittpunkt mit der Abszisse des entsprechenden Schlupfwertes stets auf der Senkrechten konstanter Leistung *c* liegt.

Diese Steuerung des Doppel-Induktionsreglers, die in Fig. 6 vereinfacht dargestellt ist, erfolgt durch den *Nulleistungsregler* oder Ventilregler *g* in Abhängigkeit der von der Asynchronmaschine aufgenommenen Leistung. Da die für die Verstel-

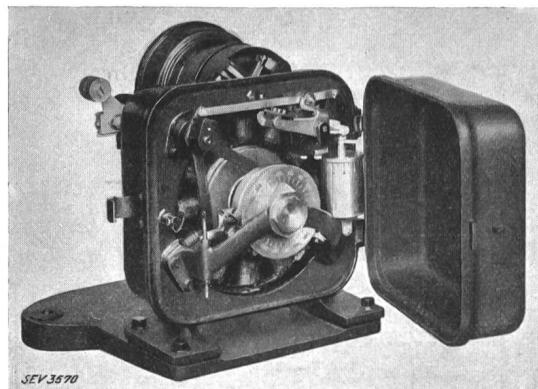


Fig. 7.
Ansicht des Nulleistungsreglers.

lung des Doppel-Induktionsreglers *h* erforderlichen Kräfte für den Ventilregler jedoch zu gross wären, ist der Oeldruck-Servomotor *f* mit automatischer Rückführung dazwischen geschaltet. Auf dessen Steuerventil *k* werden die Drehbewegungen des Ventilreglers durch ein Exzenter als Hubbewegungen übertragen.

Der Ventilregler, dessen Ansicht Fig. 7 zeigt, ist nach dem Ferraris-Prinzip gebaut und besitzt zwei um 90° elektrisch versetzte Wicklungen. Die eine, die Spannungswicklung, liegt über einem Spannungswandler an der verketteten Spannung *R*—*T* in der Zuleitung zur Asynchronmaschine. Die Stromwicklung wird durch einen Stromwandler in Phase *S* gespeist. Der Regler ist im Gleichgewicht, wenn die zur Spannung *R*—*T* senkrecht stehende Wirkkomponente des Stromes in der Phase *S* null ist. Ist sie grösser als null, so erzeugt sie ein Drehmoment an der beweglichen Trommel *T*, die das Steuerventil so lange betätigt, bis die aufgenommene Leistung der Asynchronmaschine wieder null ist.

Damit der Ventilregler auf eine beliebige konstante Leistung reguliert, wird mit Hilfe einer Hilfsspannung in seiner Stromwicklung ein zweiter Wirkstrom erzeugt, der zum obigen gleich oder entgegengesetzt gerichtet ist und von null bis zu einem maximalen Wert variiert werden kann. Der Ventilregler reguliert dann nicht mehr auf Leistungsaufnahme null der Asynchronmaschine, sondern auf diejenige Leistung, bei der die Summe der beiden Wattströme null ist. Weil auf den Regler keine Gegenfederkraft wirkt, kann er jede dadurch bedingte Lage einnehmen. Die Grösse der Hilfsspannung bestimmt somit die übertragene Leistung und ist ihr proportional.

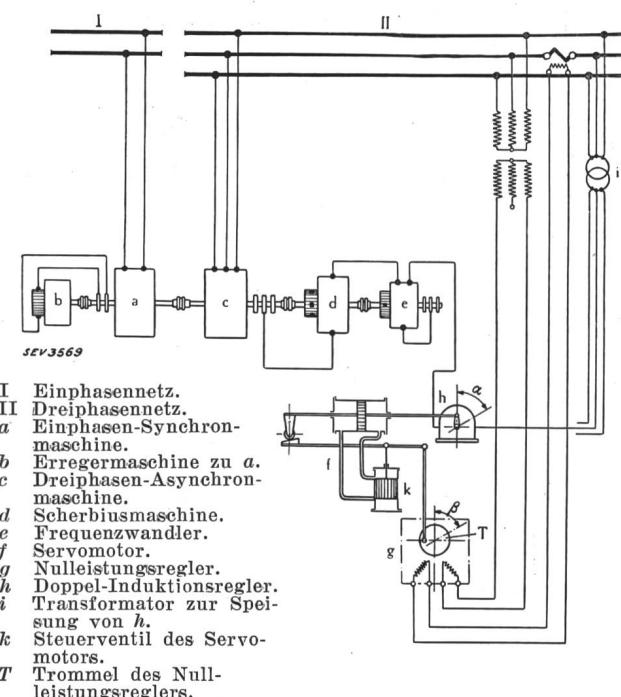


Fig. 6.

Vereinfachtes Schaltbild der Steuerung der Kollektorkaskade.

Schlupf (im vorliegenden Falle ± 4 %) bei maximaler Leistung gegeben ist, bestimmt die Grösse der Kollektorkaskade.

Aufgabe der automatischen Regulierung auf konstante Leistung ist somit, die natürliche Charakteristik *b* bei jedem Schlupfwert so nach *b*₁ oder *b*₂

Um die erforderliche, nach Richtung und Grösse veränderliche Hilfsspannung bei genügend feiner Abstufung zu erhalten, werden zwei als Potentiometer geschaltete Widerstände gemäss Fig. 8 verwendet, an die über einen Spannungswandler *a* die Phasenspannung *S* der Zuleitung zur Asynchronmaschine angelegt wird.

Vorerst würde jede Spannungsschwankung im Drehstromnetz auf das Reguliersystem übertragen und dadurch entsprechende Leistungsschwankungen hervorrufen. Zur Vermeidung dieses unerwünschten Einflusses hält der Spannungsregler *e*

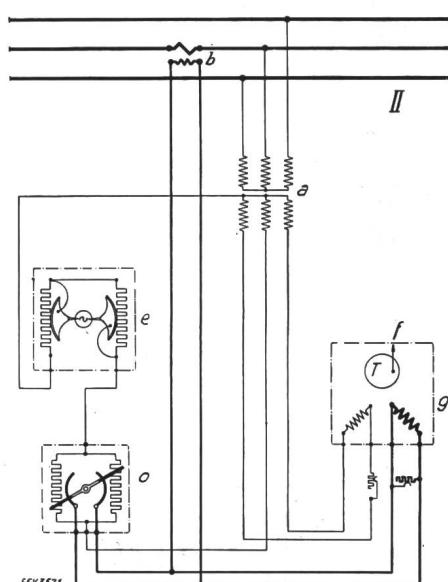


Fig. 8.
Schaltbild des Nulleistungsreglers.

- II Dreiphasennetz.
- g* Nulleistungsregler.
- o* Spannungsteiler (Potentiometer).
- e* Automatischer Spannungsregler.
- T* Trommel des Nulleistungsreglers.
- a* Zum Steuerventil des Servomotors.
- b* Spannungswandler zur Speisung von *o* und *g*.
- f* Stromwandler zur Speisung von *g*.

die dem Potentiometer zugeführte Spannung konstant.

Durch Wahl lamellierten Eisens in den magnetischen Kreisen der Kollektorkaskade zur Verkleinerung der Zeitkonstante und durch Verwendung empfindlicher und rasch wirkender Regulierorgane kann der Sollwert der Umformerleistung mit grosser Genauigkeit eingehalten werden.

D. Die automatische Leistungsregulierung in Abhängigkeit der Frequenz.

Der Mittelstellung des Potentiometers entspricht Spannung null und somit Leistung null der Umformergruppe. Verstellung des Potentiometers nach der einen Seite hat motorischen, nach der anderen Seite generatorischen Betrieb der Asynchronmaschine zur Folge. Man kann also durch entsprechende Steuerung des Potentiometers dem Umformer jede beliebige Charakteristik geben.

Wird die Spannung am Potentiometer konstant gehalten, so entspricht dies einer konstanten Leistung der Umformergruppe gemäss der Geraden *c* in Fig. 9, wo die Leistung in Abhängigkeit der Bahnfrequenz dargestellt ist. Durch Verstellung

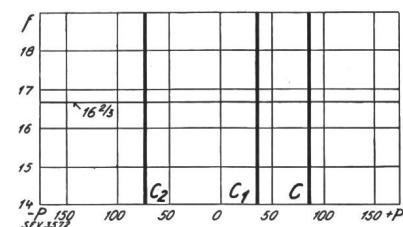


Fig. 9.
Charakteristiken konstanter Leistung.
P Leistung.
f Frequenz des Bahnnetzes.
c, *c₁*, *c₂* Charakteristiken verschiedener Leistung.

des Potentiometers kann diese Kurve beliebig nach *c₁*, *c₂* oder bis zur Nennleistung in beiden Richtungen verschoben werden. Ein solcher Betrieb entspricht demjenigen einer Turbine mit Handsteuerung, mit der die Beaufschlagung eingestellt wird. Die auf diese Weise regulierte Asynchronmaschine mit Kollektorkaskade wird also die gleichen Nach-

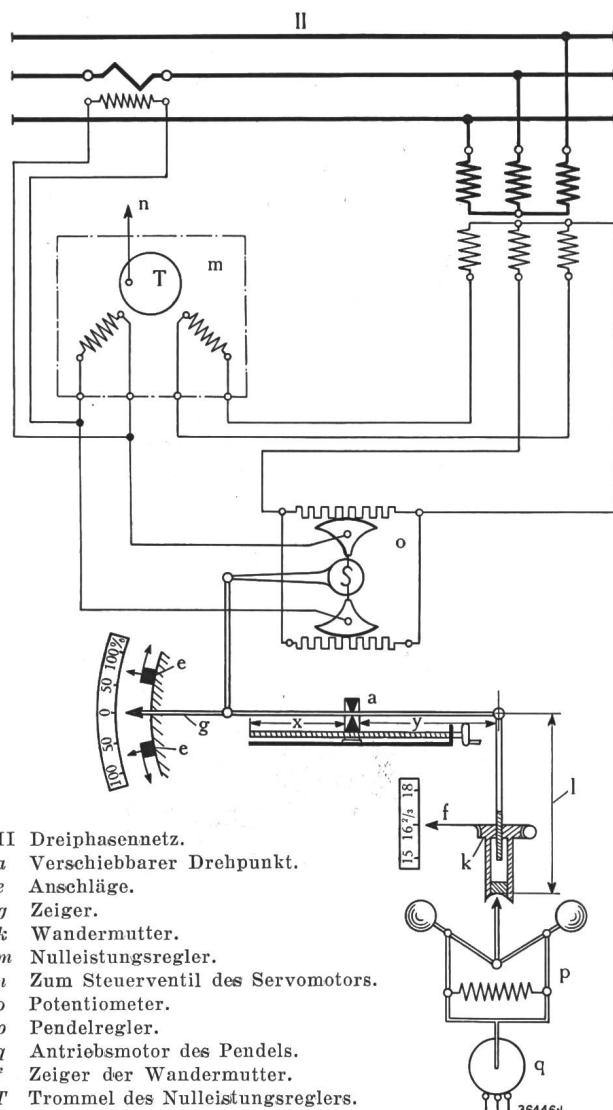


Fig. 10.
Grundsätzliche Schaltung der automatischen Potentiometerregulierung.

teile wie eine handgesteuerte Turbine aufweisen und bei plötzlicher Entlastung der Synchronmaschine ihre Drehzahl sofort zu steigern suchen. Die Grösse dieser Drehzahlsteigerung kann jedoch durch geeignete Wahl der Sättigungsverhältnisse in den Maschinen der Kollektorkaskade auf einen zulässigen Wert gebracht werden.

Es liegt nahe, der Asynchronmaschine mit Kollektorkaskade aus Rücksicht auf den Parallelbetrieb mit den übrigen Bahngeneratoren des SBB-Netzes eine Charakteristik zu geben, die derjenigen einer Turbine mit automatischer Steuerung entspricht. Zu diesem Zwecke wird das Potentiometer in Abhängigkeit der Bahnfrequenz gesteuert. Die grundsätzliche Schaltung dieser automatischen Steuerung des Potentiometers ist in Fig. 10 dargestellt.

Ueber eine veränderliche Hebelübersetzung $x-y$ werden die Ausschläge des Fliehkraftreglers p auf das Potentiometer o proportional übertragen. Der Regler wird durch einen Motor q angetrieben, der mit einer Geschwindigkeit dreht, die stets der Frequenz des Bahnnetzes bzw. der Drehzahl der Umformergruppe proportional ist. Unter dem Einfluss des Fliehkraftreglers wird somit das Potentiometer bei sinkender Frequenz nach der einen Richtung im Sinne motorischen Arbeitens der Asynchronmaschine, bei steigender Frequenz nach der andern Richtung im Sinne generatorischen Arbeitens aus-

liebig eingestellt werden. Es entspricht dies der Verstellung der Leerlaufdrehzahl bei einem normalen Turbinenregler.

Die Grösse des Ausschlages am Potentiometer ist gegeben durch das Verhältnis der Hebelarme x und y . Die Uebersetzung bestimmt somit die prozen-

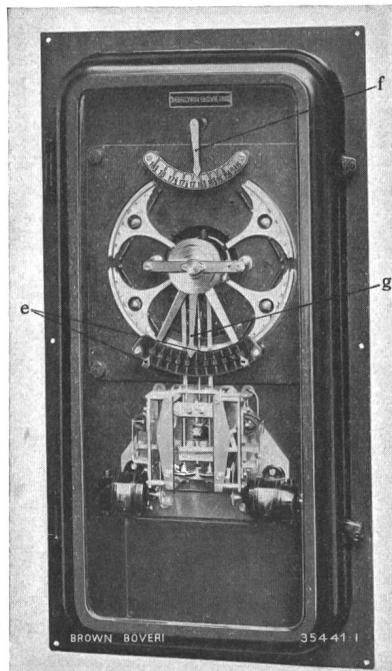


Fig. 11.
Automatisches Potentiometer.
Ansicht von vorne.

schlagen. Bei einer ganz bestimmten, durch den Zeiger f angegebenen Frequenz aber wird die Leistung der Umformergruppe null sein.

Mit Hilfe der Wandermutter k am Fliehkraftregler kann diese Leerlauffrequenz innerhalb der vertraglich verlangten $\pm 5\%$ der Nennfrequenz be-

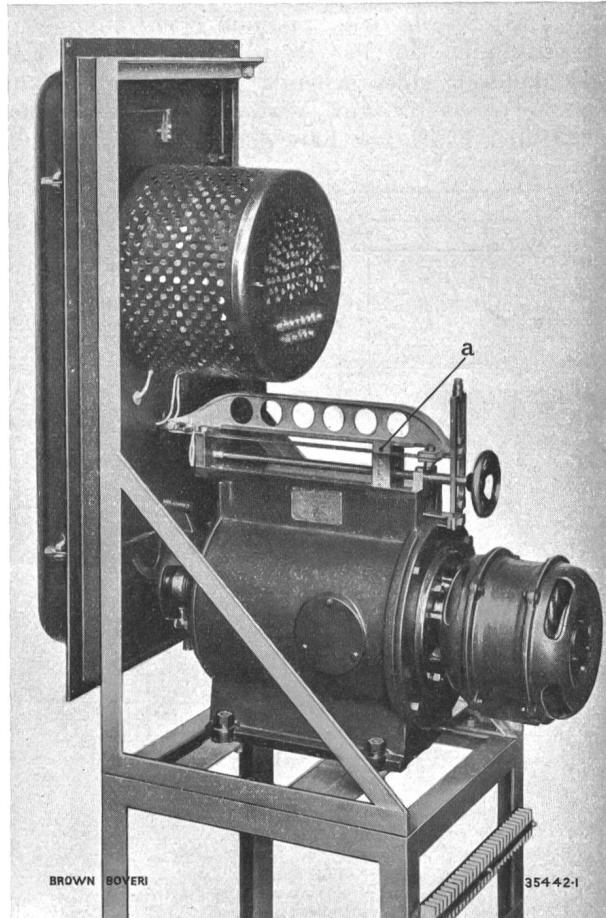


Fig. 12.
Ansicht des Potentiometers mit dem Pendelregler.

tuale Leistungsänderung in Abhängigkeit der Frequenzänderung, d. h. die *Statik* der Regulierung. Sie kann mit Hilfe der Wandermutter a , die auch in Fig. 12 zu sehen ist, innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen von 2 bis 5 % beliebig eingestellt werden.

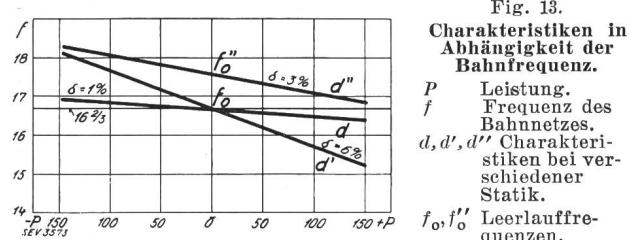
Die durch das Potentiometer eingestellte Leistung kann mit Hilfe des Zeigers g abgelesen werden.

Die mit dieser Einrichtung zu erreichenden Charakteristiken in Abhängigkeit der Frequenz sind in Fig. 13 dargestellt. Die Neigung der Geraden entspricht der Statik, f_0 ist der Frequenz-Nullpunkt.

Würden sich entsprechend den Frequenzänderungen die Bewegungen des Pendelreglers beliebig auswirken können, so würde das Potentiometer eine Leistungssteigerung hervorrufen, die zu einer Ueberlastung der Gruppe führen könnte. Zu diesem Zwecke ist der Ausschlag des Hebels durch Anschläge e mechanisch begrenzt. Diese *Leistungsbegrenzung* entspricht der Oeffnungsbegrenzung einer

Turbine. Sie ist nichts anderes als ein Festhalten des Potentiometers, indem der Hebel g unter dem Einfluss des Pendelreglers an der Begrenzung anliegt und somit das Potentiometer auf konstante Leistung (Fig. 9) reguliert.

Zur Erfüllung der unter Abschnitt II A aufgeführten Betriebsanforderungen können diese drei



Möglichkeiten, die in Fig. 9 und 13 ausgedrückt sind, beliebig miteinander kombiniert werden. Die sich daraus ergebenden Hauptbetriebsfälle seien in Fig. 14 dargestellt.

Betriebsfall 1 in der Zusammenstellung entspricht der normalen Parallelarbeit der Umformergruppe (rechts) mit den Generatoren des Bahnnetzes (links), wobei das Verhältnis der Statik der Umformergruppe zur Statik des Bahnnetzes die

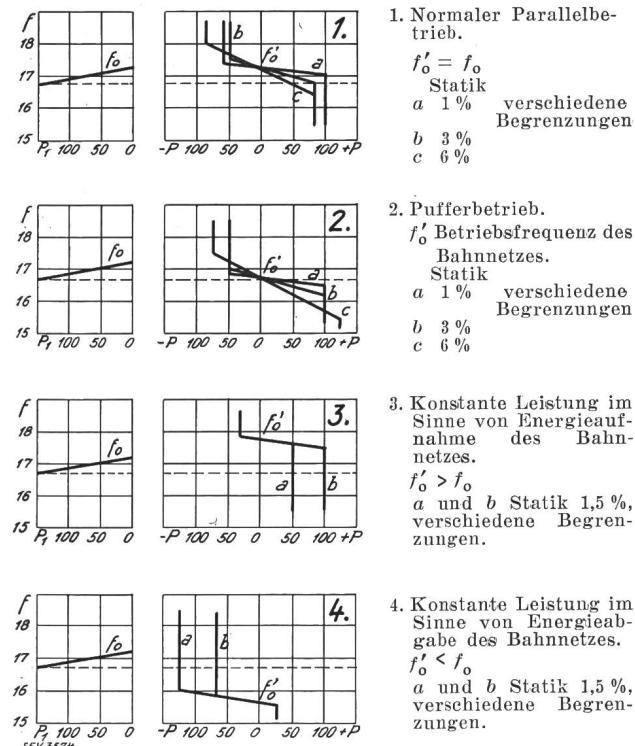


Fig. 14.
Betriebscharakteristiken.

Links: Angenommene mittlere Betriebscharakteristik der Bahnnetzgeneratoren.
Rechts: Betriebscharakteristiken der Umformergruppe.

- f Frequenz des Bahnnetzes.
- f_0 Leistungsnnullpunkt des Bahnnetzes.
- f'_0 Leistungsnnullpunkt der Umformergruppe.
- P_1 Leistung der Bahnnetzgeneratoren.
- P Leistung der Umformergruppe.
- $+P$ bei Energieaufnahme des Bahnnetzes.
- $-P$ bei Energieabgabe des Bahnnetzes.

Spitzenübernahme der Umformergruppe bestimmt.

Bei Betriebsfall 2 ist der Frequenz-Nullpunkt des Fliehkraftreglers auf Betriebsfrequenz des Bahnnetzes eingestellt, so dass die Umformergruppe bei Unterschreitung oder Ueberschreitung dieser Frequenz Leistung ins Bahnnetz abgibt oder diesem entnimmt. Dieser Betriebsfall entspricht einem Pufferbetrieb im Ausgleich zwischen den beiden Netzen. Die Grösse der Leistungsstosse hängt von der eingestellten Statik der Umformergruppe ab.

Die Fälle 3 und 4 stellen die Uebertragung konstanter Leistung dar: 3 im Sinne einer Energieübertragung aus dem Netz der NOK ins Netz der SBB, 4 aus dem Netz der SBB ins Netz der NOK, wobei im Falle 3 bei Ueberschreitung, im Falle 4 bei Unterschreitung der Frequenz f_0 die Leistung abnimmt und allenfalls die Energierichtung umkehrt. Die Einstellung des Frequenz-Nullpunktes ist dabei so zu wählen, dass innerhalb der Grenzen normaler Betriebsfrequenz das Pendel dauernd an der Begrenzung anliegt, wodurch die übertragene Leistung konstant bleibt.

Es ist klar, dass die Umformergruppe bei Regulierung in Abhängigkeit der Bahnfrequenz ohne weiteres auch zur Speisung eines selbständigen Einphasen-Bahnbezirkes herangezogen werden kann. Dieser Fall entspricht demjenigen einer normalen Turbine und wurde deshalb in der obigen Zusammenstellung nicht weiter aufgeführt. Desgleichen wurde auch der Betrieb in Abhängigkeit der Industriefrequenz nicht zur Darstellung gebracht, da er analog demjenigen der Bahnfrequenz ist.

Bei allen Betriebsfällen kann je nach den Netzen zur Verfügung stehenden überschüssigen Leistung die Leistungsbegrenzung für Bezug oder Abgabe von 0—150 % der Nennleistung der Umformergruppe eingestellt werden.

Um dem im Schaltstand aufgestellten Pendelregler die der Frequenz im einen oder anderen Netze proportionale Drehzahl zu geben, wird er durch einen Motor g in Fig. 10 angetrieben, der bei Betrieb in Abhängigkeit der Industriefrequenz über einen Hilfstransformator an das Industriennetz angeschlossen ist. Um diesen Motor auch bei Betrieb in Abhängigkeit der Bahnfrequenz verwenden zu können, wird er für diesen Fall von einem Hilfsgenerator mit 50 Per./s gespeist, der von der Welle der Umformergruppe aus angetrieben ist und somit den Pendelmotor mit einer veränderlichen Frequenz speist, die der Frequenz des Bahnnetzes proportional ist. Der zusammengebaute Apparat ist in Fig. 11 und 12 zu sehen.

E. Steuerung, Mess- und Schutzeinrichtungen.

1. Steuerung.

Infolge der mannigfachen Schaltvorgänge für die Bedienung einer derartigen Umformergruppe musste dem Aufbau der Steuerung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dabei waren folgende Grundsätze massgebend:

Von der vollautomatischen Steuerung wurde Umgang genommen, um dem Personal die Möglichkeit zu geben, jede Schalthandlung sowohl in bezug auf die Richtigkeit der Reihenfolge als auch der Schaltung selbst, fortlaufend zu kontrollieren. Die Steuerung musste jedoch so disponiert sein, dass Fehlschaltungen vermieden werden. Die Wahl fiel auf eine Steuerung durch einen Anlasskontroller im Schaltpult. Jeder Stellung dieses Kontrollers sind bestimmte Schaltbefehle zugeordnet. Jeder ausgeführte Schaltbefehl oder Schaltvorgang wird durch entsprechende Signallampen rückgemeldet, worauf Uebergang auf die nächste Kontrollerstellung erfolgt. Eine entsprechende Verriegelung ver-

Stufenschalter geht auf Stellung «Betrieb», überbrückt den Anlasstransformator und legt die Asynchronmaschine an volle Spannung.

5. Anlasswalze auf Stellung IV:
Rotorumschalter schaltet den Rotorkreis der Asynchronmaschine vom Wasseranlasser auf die Kollektorkaskade um, wobei gleichzeitig der Schütz in der Zuleitung zum Frequenzwandler geschlossen wird.
6. Synchronisieren der Einphasenmaschine durch Verstellung des Frequenz-Nullpunktes am Pendelregler und Parallelschaltung mit dem Einphasennetz durch Einschalten des 15 kV-Oelschalters von Hand.
7. Einstellung auf die gewünschte Betriebsweise mit einem Walzenschalter, mit dem die folgenden vier Betriebsarten gewählt werden können:
Stellung JF Betrieb in Abhängigkeit von der Industriefrequenz.

Feld I.

Einphasenfeld.

1. Umschalter für Spannungsregulierung.
2. Synchronisierschalter.
3. Magnetfeldschalter.
- 3a. Magnetregulator.
4. Spannungsregler.

Feld II.

Regulierfeld.

5. Rückmeldelampen (Anlassbedingungen).
6. Rückmeldelampen (Hilfsspannungen).
7. Lampenschalter.
8. Druckknopfschalter zur Ferneinstellung des Pendels:
B für Begrenzung des Energiebezuges;
F zur Verstellung der Leerlauffrequenz;
A zur Begrenzung der Energieabgabe.

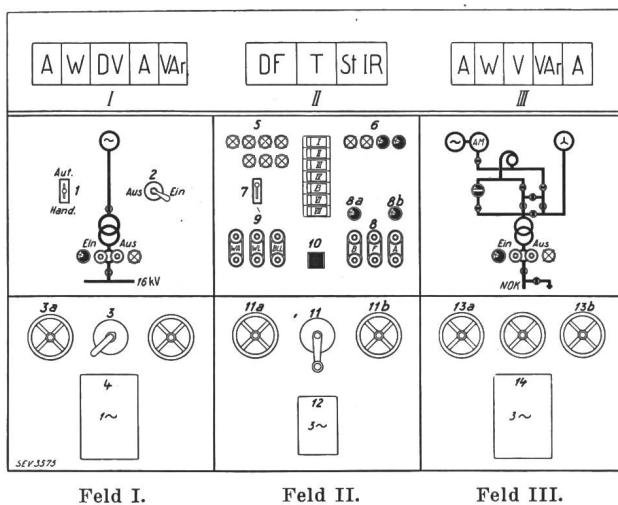


Fig. 15.
Bedienungsschema des Schaltpultes.
Schaltzustand: «Anlassbereit».

8a, 8b. Rückmeldelampen (Begrenzungsanzeige).

9. Druckknopfschalter zur Fernsteuerung des Wasseranlassers und der Doppel-Induktionsregler.
10. Stellungsanzeiger und Rückmeldelampen der Anlasswalze.
I—IV Anlassen.
B Betrieb.
VI—VII Abstellen.
11. Kurbel zur Betätigung der Anlasswalze.
- 11a. Uebergangswiderstand.
- 11b. Handpotentiometer.
12. Spannungsregler.

Feld III.

Dreiphasenfeld.

- 13a und 13b. Walzenschalter zur Wahl der Leistungs- u. Spannungsregulierung.
14. Regler für Phasenschieberbetrieb.

hindert, dass bei zu frühem Uebergang Fehlschaltungen entstehen, und gibt auch den folgenden Schaltbefehl optisch erst frei, wenn die Zulassungsbedingungen für den Uebergang erfüllt sind.

Um die Wirkungsweise der Steuerung zu veranschaulichen, wird nachstehend der an Hand der Fig. 3 leicht zu verfolgende *Anlassvorgang* des Umformers bei Gruppenbetrieb erläutert:

1. Nachdem mit Hilfe der entsprechenden Signallampen die Erfüllung der Anlassbedingungen festgestellt worden ist (Anlasswalze auf Stellung 0), wird der 45 kV-Drehstromschalter von Hand eingeschaltet:
8 kV-Schaltanlage steht unter Spannung.
2. Anlasswalze auf Stellung I:
Stufenschalter geht auf Stellung «Anlauf», wodurch die Asynchronmaschine über den Anlasstransformator reduzierte Spannung erhält. Die Umformergruppe bricht los. Gleichzeitig läuft die Dreiphasen-Hilfserregergruppe an.
3. Anlasswalze auf Stellung II:
Hochfahren der Gruppe durch automatisches Kurzschließen des Wasseranlassers.
4. Anlasswalze auf Stellung III, nachdem die Umformergruppe die Leerlaufdrehzahl erreicht hat:

Stellung HP Betrieb mit Handpotentiometer.

Stellung BF Betrieb in Abhängigkeit von der Bahnfrequenz.

Stellung O Betrieb der Umformergruppe als Phasenschieber.

Der mit Stellung HP bezeichnete Betrieb mit Handpotentiometer dient lediglich zur Reserve bei Ausfall des Pendelreglers und erlaubt nur, mit konstanter Leistung zu fahren.

8. Einstellung der Umformerleistung durch den Pendelregler.
9. Mit Hilfe eines weiteren Walzenschalters wird für die Asynchronmaschine eine der drei nachfolgenden Regulierarten gewählt:
Sp. R. Automatische Spannungsregulierung.
H. R. Handregulierung.
Bl. R. Phasenschieberbetrieb.
10. Einstellung der Spannung der Einphasenmaschine von Hand oder automatisch mit Hilfe eines Schnellreglers.

Damit ist der Anlassvorgang beendet.

Der Uebergang von einer Betriebsart auf eine andere kann auch während des Betriebes erfolgen,

indem die Leistung des Umformers langsam auf 0 gebracht und nachher mit Hilfe der oben erwähnten Walze der neue Betrieb eingestellt wird. Das Zurückfahren auf Leistung 0 geschieht in einfacher Weise durch einen Widerstand, mit dem die Spannung am Potentiometer langsam auf 0 reduziert wird. Nach erfolgter Umschaltung auf den neuen Betrieb wird der Übergangswiderstand wieder kurzgeschlossen und die gewünschte Leistung eingestellt.

Das Abstellen erfolgt in analoger Weise:

1. Nachdem die Umformerleistung auf die erwähnte Art auf 0 gebracht wurde, die Gruppe also leer läuft, wird die Anlasswalze auf Stellung VI gedreht:

Die beiden Hauptölschalter werden dadurch ausgelöst und schalten die Gruppe beidseitig ab. Gleichzeitig lösen auch der Magnetfeldschalter, der Schütz des Frequenzwandlers und derjenige des Antriebsmotors der Erregermaschine aus.

für die Regulierkaskade enthalten. Von hier aus können durch Druckknöpfe sowohl die Einstellung des Frequenznullpunktes und der Leistungsbegrenzung am Pendelregler, als auch die Steuerung der Doppelinduktionsregler und des Wasseranlassers erfolgen.

Das Schaltpult selbst und seine Disposition im Schaltstand ist aus Fig. 16 ersichtlich.

2. Messeinrichtungen.

Für die beiden Hauptmaschinen sind in den äussern Feldern des Schaltpulses die üblichen Messinstrumente eingebaut. Über dem mittleren Schaltpultfeld ist neben einem Doppel-Frequenzmesser und einem Touren-Anzeigegerät ein Instrument für die Stellungsanzeige der Doppel-Induktionsregler vorhanden.

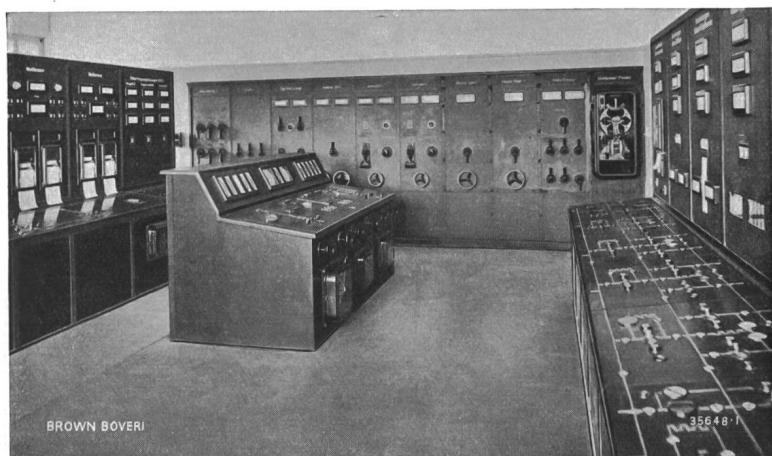


Fig. 16.

Ansicht des Schaltstandes.

In der Mitte: Schaltpult zur Steuerung der Umformergruppe.
Links: Schaltfelder mit Synchronisierungseinrichtung, Gefahrmelder und Registrierinstrumenten.
Rechts im Hintergrund: Pendelregler.

2. Anlasswalze auf Stellung VII:

Rotorumschalter schaltet auf den Wasseranlasser um, der automatisch in seine Anlaufstellung läuft.

Die Rückmeldelampe für Stellung VII erlischt, sobald auch alle übrigen Apparate sich wieder in ihren Anlaufstellungen befinden.

3. Anlasswalze auf Stellung 0:

Das Aufleuchten der Kontrolllampen im mittleren Schaltpultfeld meldet die erneute Anlassbereitschaft der Gruppe.

Für den Phasenschieberbetrieb der entkuppelten Asynchronmaschine geschieht das Anlassen in gleicher Weise, während die entkupplte Einphasenmaschine mit Hilfe des bereits früher erwähnten Anwurfmotors, dessen Drehzahl mit dem Wasseranlasser reguliert wird, synchronisiert wird. Zu diesem Zwecke wird der Anwurfmotor durch einen besonderen Oelschalter dauernd an reduzierte Spannung des Anlasstransformators gelegt.

Sämtliche Steuerapparate befinden sich in einem dreifeldrigen Schaltpult, dessen Bedienungsschema Fig. 15 zeigt.

Apparate und Messinstrumente in Feld I des Schaltpulses gehören zur Einphasenseite der Umformergruppe. Feld III enthält diejenigen der Dreiphasenseite. Im mittleren Feld sind die eigentlichen Steuerapparate für die Gruppe und speziell

In den Schalttafeln hinter dem Schaltpult sind Synchronisierungseinrichtung, je ein Registrierinstrument für Wirk- und Blindleistung der Einphasen- und der Dreiphasenmaschine, sowie zwei weitere Registrierinstrumente für beide Frequenzen und Spannungen untergebracht.

3. Schutzeinrichtungen.

Die Schutzeinrichtungen sind in Tabelle II zusammengestellt:

Die Gefahrmelder sind im Schaltfeld in Figur 16 zu sehen und sind für die Ein- und Dreiphasenseite zu Gruppen zusammengefasst.

F. Bauliches.

Das Unterwerk Seebach der SBB, das zur Speisung der um Zürich liegenden elektrifizierten Linien dient, ist im Jahre 1926 dem Betrieb übergeben worden. Wie bereits erwähnt, ist dieses Freiluft-Unterwerk eines der grössten der für die Versorgung des elektrisch betriebenen Bahnnetzes der SBB dienenden Unterwerke. Die über je zwei 60-kV-Leitungen von den Unterwerken Brugg und Stein am Rhein ankommende Energie wird über 5 Transformatoren von je 3000 kVA Dauerleistung auf 15 kV

Schutzeinrichtungen.

Tabelle II.

Schutzeinrichtungen	Schützt gegen	Wirkt auf	Rückmeldung
<i>I. Dreiphasenseite.</i>			
Distanzrelais auf der 43,5-kV-Dreiphasenseite	Kurzschlüsse und Doppelkurzschlüsse auf der Freileitung NOK 43,5 kV (selektive Abschaltung) und im Stromkreis der Asynchronmaschine (Momentauslösung)	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Fallklappen an den Relais und Rückmeldelampen der beiden Hauptschalter
Differentialschutz der Asynchronmaschine	Eisenschluss in der Asynchronmaschine	Hauptschalter und Kohlensäurebrandschutz d. Asynchronmaschine, Hauptschalter und Magnetfeldschalter der Synchronmaschine	Gefahrmelder «Brand-schutz» und Rückmelde-lampen der beiden Haupt-schalter
Widerstand im Nullpunkt der Statorwicklung der Asynchronmaschine mit Erdenschlussrelais	Erdschluss innerhalb der Asynchronmaschine und zugehöriger Unterspannungsschaltanlage	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Gefahrmelder «Erdschluss» und Rückmeldelampe des Hauptschalters
Thermischer Schutz in Abhängigkeit des Statorstromes der Asynchronmaschine	Ueberlastung bzw. Ueberschreitung der Grenztemperatur	Alarmvorrichtung	Gefahrmelder «Statortempe-ratur»
Maximalspannungsrelais im Rotorkreis der Asynchronmaschine	Selbsterregung	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Gefahrmelder «Maximalspannungsrelais», Rück-meldelampe des Haupt-schalters und Fallklappen am Relais
Maximalspannungsrelais an den Klemmen der Asynchronmaschine	Drehzahlerhöhung d. Asynchronmaschine, Ueberspannungen bei plötzlich. Abschaltung im Drehstromnetz und Entlastung der Umformergruppe	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Gefahrmelder «Maximalspannungsrelais» u. Rück-meldelampe des Haupt-schalters
Maximalstromrelais im Stromkreis des Antriebsmotors der Erregermaschine	Kurzschluss und Ueberlastung des Antriebsmotors der Erregermaschine	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Fallklappen an den Relais, Gefahrmelder «Maximal-stromrelais - Regulierkrei-se» und Rückmeldelampe des Hauptschalters
Maximalstromrelais im Stromkreis des Transformatoren zur Speisung des Doppel-Induktionsreglers und der Transformatoren für die Hilfsbetriebe	Kurzschluss in den Regulierstromkreisen, in den Transformatoren, Frequenzwandler, Doppelinduktionsregler und Erregermaschine	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Fallklappen an den Relais, Gefahrmelder «Maximal-stromrelais - Regulierkrei-se» und Rückmeldelampe des Hauptschalters
Thermostat im Wasseran-lasser	zu grosse Erwärmung des Elektrolyten im Wasser-anlasser	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Gefahrmelder «Anlasser-temperatur» und Rück-meldelampe des Haupt-schalters
Buchholzschutz im Dreiphasentransformator	innere Defekte	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Gefahrmelder «Buchholz-schutz» und Rückmelde-lampe des Hauptschalters
Thermostat im Dreiphasen-transformator	Ueberlastung	Alarmvorrichtung	Gefahrmelder «Transforma-tortemperatur»
<i>II. Einphasenseite.</i>			
Maximalstromrelais der Synchronmaschine	Kurzschluss auf Einphasenseite	Hauptschalter und Magnetfeldschalter der Synchronmaschine	Fallklappen an den Relais und Rückmeldelampe des Hauptschalters
Differentialschutz der Synchronmaschine	Eisenschluss in der Synchronmaschine	Hauptschalter, Kohlensäurebrandschutz und Magnetfeldschalter der Synchronmaschine, Hauptschalter der Asynchronmaschine	Gefahrmelder «Brand-schutz» und Rückmelde-lampen der beiden Haupt-schalter

Tabelle II (Fortsetzung)

Schutzeinrichtungen	Schützt gegen	Wirkt auf	Rückmeldung
Widerstand im Mittelpunkt der Statorwicklung der Synchronmaschine mit Erdschlussrelais	Erdschluss innerhalb der Einphasenmaschine und zugehöriger Unterspannungsschaltanlage	Hauptschalter und Magnetfeldschalter der Synchronmaschine	Gefahrmelder «Erdschluss» und Rückmeldelampe des Hauptschalters
Thermischer Schutz in Abhängigkeit des Statorstromes der Synchronmaschine	Ueberlastung	Alarvmvorrichtung	Gefahrmelder «Statortemperatur»
Buchholzschutz im Einphasentransformator	innere Defekte	Hauptschalter und Magnetfeldschalter d. Einphasenmaschine	Gefahrmelder «Buchholzschutz» und Rückmeldelampe des Hauptschalters
Thermostat im Einphasentransformator	Ueberlastung	Alarvmvorrichtung	Gefahrmelder «Transformatortemperatur»

III. Gemeinsames.

Thermostaten der Maschinellager	Ueberschreitung der zulässigen Oeltemperaturen der Lager	Alarvmvorrichtung	Gefahrmelder «Lagertemperatur»
Thermostaten in den Wicklungen der Hauptmaschinen (Asynchron-, Synchron- und Scherbiusmaschine)	Uebertemperatur an den Wicklungen	Anzeigegeräte mit Temperaturangabe	—
Zentrifugalschalter	Drehzahlüberschreitung	Hauptschalter der Asynchronmaschine	Gefahrmelder «Drehzahl» und Rückmeldelampe des Hauptschalters
Notdruckknopfschalter im Maschinensaal	—	beide Hauptschalter und Magnetfeldschalter der Einphasenmaschine	Rückmeldelampen der beiden Hauptschalter

transformiert und über 6 Speisepunkte den Fahrleitungen zugeführt.

Die Maschinen und Apparate der neu zu erstellenden Umformeranlage wurden, wie auch aus Fig. 17 ersichtlich, wie folgt in die bestehende Anlage eingegliedert:

- Die ankommende 43,5 kV-Dreiphasenleitung der NOK mit den zugehörigen Apparaten und dem 8600 kVA-Transformer von 43,5/8 kV in ein freies Feld der 60 kV-Einphasenanlage.
- Die 8 kV-Dreiphasen-Schaltanlage als Freiluftanlage unmittelbar neben das Maschinenhaus.
- Die eigentliche Umformergruppe mit zugehörigen Maschinen und Apparaten, sowie die 10 kV-Einphasen-Schaltanlage in einen Neubau, der zur Verwendung der vorhandenen Krananlage als Verlängerung der Transformatoren-Montagehalle und Werkstätte des Unterwerkes erstellt wurde.
- Der 8600 kVA-Einphasen-Transformer von 10/16 kV mit seiner Oberspannungsschaltanlage in ein freies Feld der Einphasen 15 kV-Freiluftanlage.
- Die Steuer-, Mess- und Kontrollapparate in den bisherigen Schaltstand und den darunter liegenden Kabelverteilraum.

Die dem Umformerbetrieb dienenden Felder des Schaltstandes sind in Fig. 17 durch Schraffur gekennzeichnet.

Ueber den Bau der neuen Maschinenhalle sei folgendes erwähnt.

Wegen des schlechten Baugrundes, bestehend aus lehmiger, schlammiger Moräne von sehr ungleicher Zusammensetzung und Tragfähigkeit, durfte die spezifische Bodenpressung nicht über 1,5 kg/cm² gewählt werden. Das Maschinenfunda-

ment besteht aus einer untern durchgehenden Platte von 18,2 · 17,5 m Grundfläche bei einer minimalen Stärke von 2 bis 1,7 m und den zwischen den einzelnen Maschinen liegenden Fundamentaufbauten, welche nach Möglichkeit durch den Maschinenhausboden mit durchlaufender Armierung wieder verbunden sind. Infolge der steifen und biegungsfesten Verbindung der einzelnen Fundamentteile wirkt der ganze Maschinenhausunterbau als ein starrer Körper. Für dessen Berechnung waren folgende Belastungen massgebend:

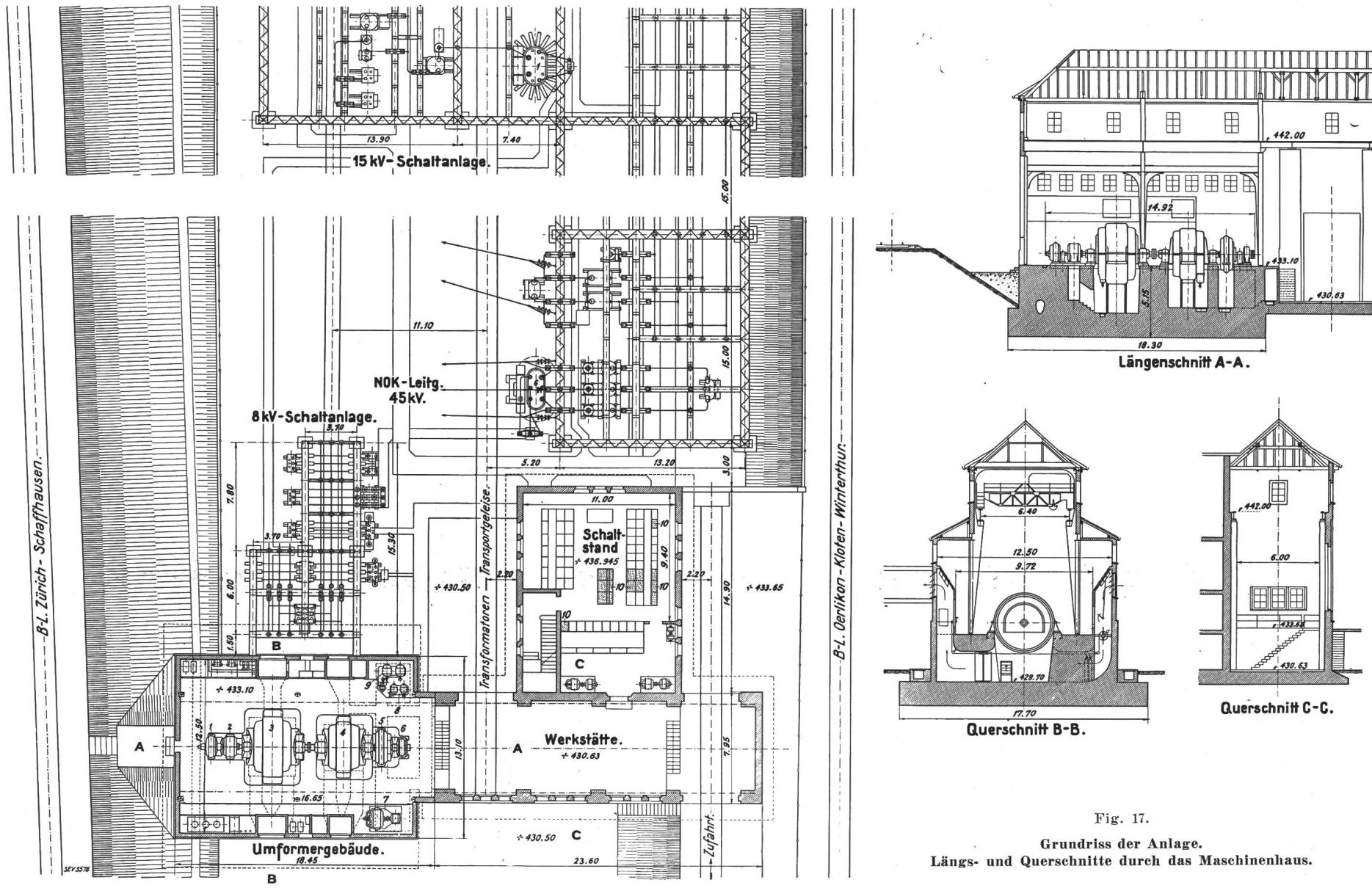
Ruhende Maschinenlasten . . .	416 t
200 % dynamischer Zuschlag . .	832 t
Hochbau mit Zusatzlasten . . .	488 t
total	1736 t

Angaben über Material und Armierung.

Tabelle III.

Konstruktionsteile	Beton m ³	Eisen- Gewicht t	Eisen	
			kg/m ³	in %
Untere Fundamentplatte . . .	549	42,7	78	1,0
Fundamentaufbauten . . .	555	31,0	55,8	0,72
	1104	73,7	66,7	0,85

Für den Beton wurde eine Mischung von 240 kg Zement auf 1000 l Kies-Sandgemisch bei einer maximalen Korngrösse von 50 mm vorgeschrieben.



Zur Vermeidung der baulichen Schwierigkeiten infolge des schlechten Baugrundes wurde der Maschinenhausboden so weit nach oben verlegt, als es der Abstand nach der bestehenden Kranbahn mit Rücksicht auf die Montageverhältnisse zuließ. Immerhin war es nötig, zur Vermeidung von Rutschungen

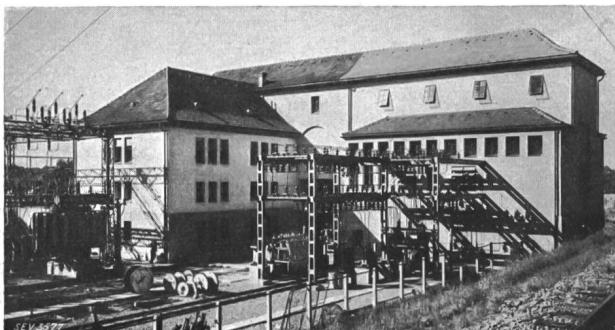


Fig. 18.
Ansicht der Gebäulehren des Unterwerkes mit den Drehstromfreiluftanlagen.

Links: 43,5 kV-Anlage.
Rechts: 8 kV-Anlage.

schungen die ganze Baugrube mit einer Lärmenwand einzufassen.

Der Hochbau wurde als Stahlskelettbau mit Schlackensteinmauerung aufgeführt. Zur Fernhaltung schädlicher Einflüsse, herrührend vom pulsierenden Feld der Einphasenmaschine, wurde der Hochbau vom Fundament durch isolierende Zwischenlagen getrennt.

Wie aus den Querschnitten Fig. 17 ersichtlich ist, wurde die durch die Spannweite des Werkstattkrans bestimmte Gebäudebreite zur Unterbringung der Hilfsmaschinen und Apparate der Umformergruppe und zur Erhaltung der nötigen Fundamentmasse durch beidseitige Anbauten erweitert.

III. Abnahmeversuche und Betriebsergebnisse.

Mit der Umformergruppe in Seebach wurde am 1. Januar 1932 programmgemäß der ordentliche Betrieb aufgenommen. Sie weist bis 1. August 1933 im Gruppenbetrieb 9400 Betriebsstunden auf. Die entkuppelte Einphasenseite der Gruppe arbeitete außerdem während 430 Betriebsstunden als Phasenschieber.

Sowohl bei den Abnahmever suchen als auch im seitherigen Betrieb hat sich die Gruppe bewährt und entsprach den vertraglich gestellten Anforderungen.

A. Leistung und Erwärmung.

Die Leistungsabgabe der Umformergruppe nach beiden Richtungen entspricht dem vertraglichen Wert von 6700 kW an der Kupplung, wobei kurzzeitige Ueberlastungen von 50 % bei allen betriebsmäßig vorkommenden Frequenzschwankungen ertragen werden.

Die Erwärmungen der Hauptmaschinen wurden bei der Dauerleistung von 8600 kVA und $\cos \varphi = 0,7$ übererregt als Generator nach der Widerstands-

methode gemessen und sind, wie aus Tabelle IV ersichtlich, wesentlich unterschritten worden.

Garantierte und gemessene Erwärmungen der Hauptmaschinen.

Tabelle IV.

	Einphasen-Synchron-Maschine		Dreiphasen-Asynchron-Maschine	
	garantiert °C	gemessen °C	garantiert °C	gemessen °C
Statorwicklung (Widerstandsmes- sung)	80	61,5	80	59,5
Rotorwicklung (Widerstandsmes- sung)	60	45,5	80	50
Stator-Eisen, aussen am Eisenkörper (Thermometer- messung)	—	32,0	—	36,5

Die Erwärmung der Scherbiusmaschine wurde bei einem betriebsmäßig möglichst konstant gehaltenen Schlupf von 1 %, einem der Nennleistung entsprechenden Strom von 1750 A, und einem Erregerstrom von 230 A gemessen. Die Temperaturen betragen:

Erwärmung der Scherbiusmaschine. Tabelle V.

	garantiert °C	gemessen °C
Statorwicklung (mit Widerstands- element)	80	57
Rotorwicklung (nach Widerstands- methode)	80	44
Kollektor (m. Thermometer), nach Stillstand	60	34

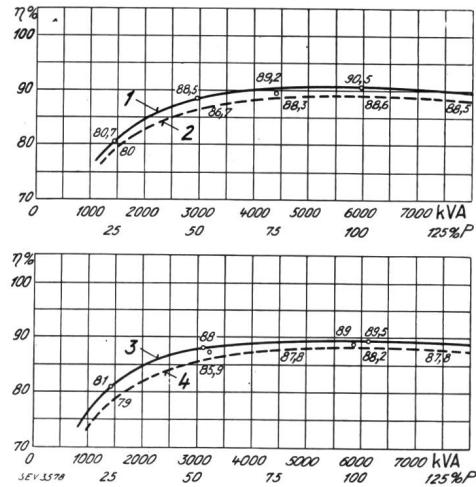


Fig. 19.
Wirkungsgradkurven der Frequenzumformergruppe mit Reguliereinrichtung bei Energieübertragung von NÖK nach SBB.

P Leistung an Klemmen der Einphasenmaschine (Nennleistung = 6000 kW).

Kurven 1 und 2 aufgenommen bei Schlupf 0.

Kurven 3 und 4 bei Schlupf 4 %.

Die ausgezogenen Kurven sind gemessene Werte, die gestrichelten Kurven die garantierten Werte.

Die Wirkungsgrade verstehen sich bei $\cos \varphi = 1$ der Einphasenmaschine und $\cos \varphi = 0,7$ der Dreiphasenmaschine.

B. Wirkungsgrade.

Die Bestimmung der Wirkungsgrade der ganzen Umformergruppe, einschliesslich Regulierausrüstung, jedoch ausschliesslich der beiden Haupttransformatoren, erfolgte nach der Methode der direkten Messung. Die Resultate für Energieüber-

jeder Regulierart der eingestellte Sollwert der Leistung eingehalten wird.

Zu diesem Behufe und um die Zweckmässigkeit der verschiedenen Regulierarten bei bestimmten Störungen zu prüfen, wurden bei den Abnahmeproben eine Reihe von Regulierversuchen durchgeführt, deren Resultate nachfolgend zusammengestellt und erläutert sind.

Bei allen Versuchen wurden mit den erwähnten Registrierinstrumenten im Schaltstand die Leistungen der beiden Hauptmaschinen sowie die Frequenzen und Spannungen der beiden Netze aufgenommen und deren Registrierstreifen in dieser Reihenfolge in den Figuren zusammengestellt.

In Figur 20 sind die Registrierstreifen zusammengestellt bei Regulierung auf konstante Leistung mit Hilfe der drei verschiedenen Regulierarten. Von 02.00 bis 08.10 wurde in Abhängigkeit der Bahnfrequenz nach Charakteristik 3 der Figur 14 gefahren. Der entsprechende Abschnitt von 08.20 bis 09.10 zeigt dasselbe bei Betrieb in Abhängigkeit der Industriefrequenz. Um gleiche Richtung der Uebertragung zu erhalten, muss in diesem Falle die Einstellung am Pendel reziprok zu vorher, d. h. nach Charakteristik 4 derselben Figur erfolgen. Ab 09.10 wird mit Handpotentiometer reguliert.

Die Registrierstreifen zeigen die Gleichwertigkeit in der Genauigkeit der Regulierung bei den verschiedenen Betriebsweisen.

Ausgedehntere Versuche, die gleichzeitig das Verhalten der Umformergruppe bei künstlich vergrösserten Frequenzschwankungen zu überprüfen gestatten sollten, sind in Fig. 21 zusammengestellt. Die interessierenden Hauptdaten der verschiedenen Versuche sind in Tabelle VI zu finden.

In Figur 22 ist ein Teil eines Registrierstreifens des normalen Winterbetriebes mit 4000 kW aufgenommener Leistung der Asynchronmaschine wiedergegeben, wobei der reproduzierte Abschnitt der Zeit der grössten Betriebsdichte im Bahnenetz von 19.00—22.00 entspricht.

Aus allen Registrierstreifen ist ersichtlich, dass die Ansprechgenauigkeit der Regulierapparatur, die zu + 270 kW garantiert ist, überall eingehalten wurde, und zwar unabhängig von der Art der Regulierung.

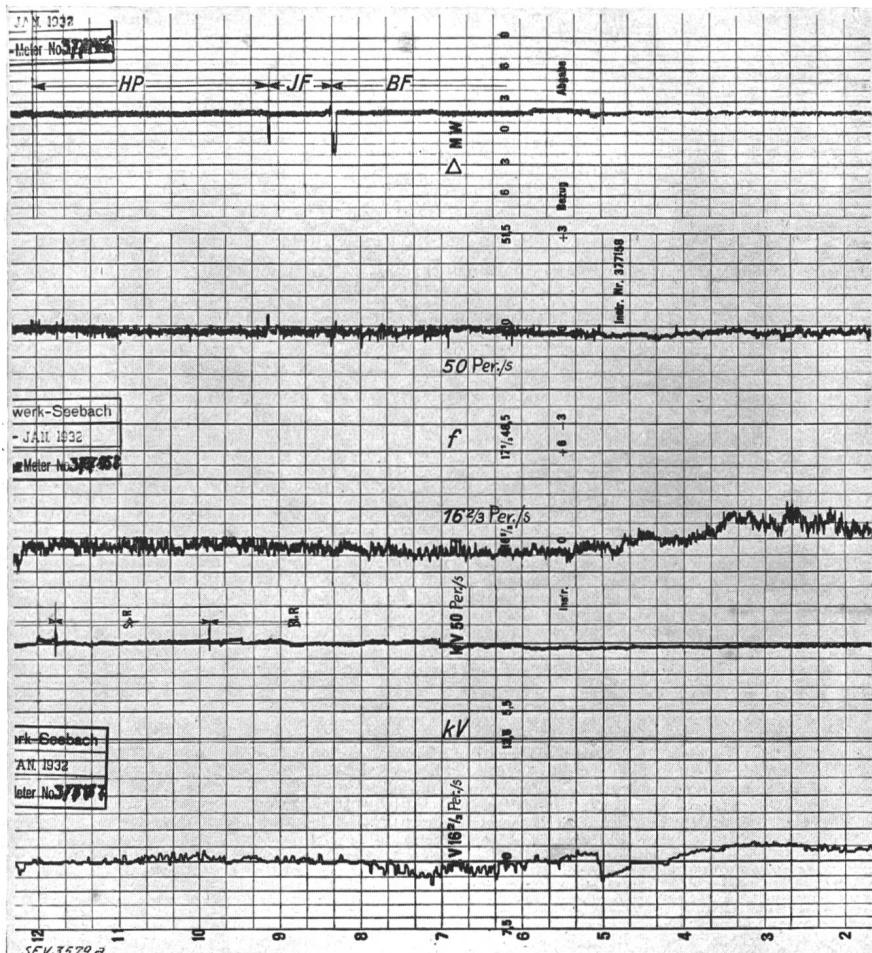


Fig. 20.
Betriebsdiagramme.

Uebertragung konstanter Leistung bei verschiedenen Regulierarten.

HP Mit Handpotentiometer.

JF Regulierung in Abhängigkeit der Industriefrequenz.

BF Regulierung in Abhängigkeit der Bahnfrequenz.

tragung vom NOK-Netz ins SBB-Netz sind in Fig. 19 zusammengestellt und ergaben gute Uebereinstimmung mit den nach der Einzelverlustmethode ermittelten Resultaten der Hauptmaschinen.

Für die umgekehrte Energierichtung liegen die Werte der erreichten Wirkungsgrade um 0,5 bis 1 % höher.

Die separat bestimmten Wirkungsgrade der beiden Haupttransformatoren betragen bei einer Nennleistung von 8600 kVA:

$$\cos \varphi = 1 \quad \cos \varphi = 0,7$$

Einphasentransformator . . .	98,8 %	98,1 %
Dreiphasentransformator . . .	99 %	98,4 %

C. Regulierversuche.

Ein Mass für die Güte der automatischen Leistungsregulierung ist die Genauigkeit, mit der bei

Interesse halber sei in Figur 23 noch der Versuch einer Handregulierung der Umformergruppe gezeigt. Diese Handsteuerung erfolgt durch einen kleinen Steuermotor, mit dem mit Hilfe einer Magnetkupplung vom Schaltstand aus der Nullei-

bis 19.30 nur gelang, die Richtung der Energie einigermassen zu bestimmen, jedoch nicht auf konstante Leistung zu regulieren, trotzdem die Frequenzschwankungen in beiden Netzen relativ klein waren. Von 15.30—16.10 war die Gruppe sich selbst

Tabelle VI.

Versuchs-Nr.	Zeit	Asynchronmaschine		Walzenschalterstellung	Einstellung am Pendel				entspricht in Fig. 14 Regulierung nach Charakteristik		
		Leistung MW			Statik %	Frequenz-Nullpunkt	Begrenzung				
		generat. torisch	motorisch				generat. torisch	motorisch			
Uebertragung konstanter Leistung bei verschiedenen Regulierarten.											
1	10.00 — 10.20	0,1	—	BF	1,5	17,1	0	20	3		
2	10.25 — 10.43	—	3,1	BF	1,5	17,1	20	37	3a		
3	10.44 — 11.04	—	7,1	BF	1,5	17 $\frac{2}{3}$	20	70	3b		
4	11.08 — 11.25	7,2	—	BF	1,5	15,6	80	20	4a		
5	11.26 — 11.43	3,2	—	BF	1,5	15,6	40	17	4b		
6	11.46 — 12.04	—	3,8	HP	Pendel ausser Betrieb				—		
7	12.06 — 12.31	—	4,4	JF	1,5	48,9	12	42	4		
Pufferbetrieb in Abhangigkeit der Bahnfrequenz.											
12	16.30 — 17.00	variiert		BF	3	16 $\frac{2}{3}$	25	70	~ 2c		
13	17.00 — 17.20	variiert		BF	1,5	16 $\frac{2}{3}$	25	70	~ 2b		
14	17.20 — 17.55	variiert		BF	1,0	16 $\frac{2}{3}$	25	70	2a		
Speisung eines selbständigen Bahnbezirkes.											
15	18.06 — 19.10	—	0,5 — 5,1	BF	2,0	16 $\frac{2}{3}$	20	90	(2)		
Pufferbetrieb in Abhangigkeit der Industriefrequenz.											
16	20.51 — 21.45	variiert von 2 bis 3		JF	1,0	50	70	40	(2) spiegelbildlich		

Bemerkungen:

Die Versuche 1 bis 7 verfolgten besonders den Zweck, die Einstellmöglichkeiten bei Uebertragung auf konstante Leistung mit den verschiedenen Regulierarten im ganzen Regulierbereich zu überprüfen.

Die Versuche 8 und 9 dienten der Kontrolle der Endstellungen des Handpotentiometers und der Möglichkeit, stufenweise die Leistung bis auf den Nennwert einzustellen.

Bei Versuch 10 wurde die maximal einstellbare Leistung mit Hilfe des Pendelreglers, welche 150 % der Nennleistung beträgt, eingestellt. Diese Ueberlastung wird kurzzeitig von der Umformergruppe und sämtlichen Apparaten ertragen.

stungsregler verstellt werden kann, was einer Fernbetätigung des Steuerventils des Oeldruck-Servomotors entspricht. Normalerweise dient diese Einrichtung zur Verstellung der Drehzahl der Umformergruppe beim Synchronisieren ohne Pendelregler. Sie kann aber, wie aus diesem Versuch ersichtlich ist, dazu verwendet werden, bei eventuellem Ausfall der Regulierapparatur die Umformergruppe von Hand zu steuern. Der Registrierstreifen der Dreiphasenleistung zeigt, wie es auch den grössten Bemühungen des Bedienungspersonals von 16.10

Um den Versuch 15 durchzuführen, wurden die Fahrleitungsstrecken Oerlikon—Schaffhausen und Oerlikon—Kloten—Effretikon vom übrigen Bahnnetz abgetrennt. Der Registrierstreifen der Wirkleistung zeigt den typischen Verlauf der Bahnbelastung. Die Frequenz wurde entsprechend der eingestellten Statik gehalten. Die von Hand regulierte Spannung genügt vollkommen für den Betrieb.

Es ist noch zu erwähnen, dass bei Versuch 11 die Kontrolle des Schlupfreisels erfolgte, indem künstlich der für das Ansprechen des Relais notwendige Schlupf von —6 % und +4,5 % erzeugt wurde. Das Relais sprach jedesmal richtig an.

überlassen, wobei die Leistungsübertragung nach der natürlichen Charakteristik erfolgte, wie sie in Figur 5 als Kurve b dargestellt ist. Vergleichsweise zeigt der Registrierstreifen bis 13.50 den automatischen Betrieb der Umformergruppe mit konstanter Leistung.

D. Verhalten bei Störungen.

Es lag auf der Hand, das Verhalten der Umformergruppe bei Kurzschlüssen im Bahnnetz zu un-

tersuchen, um so mehr, als beide Vertragspartner sich über die Folgen eines solchen klar sein wollten. Die Registrierstreifen Fig. 24 und 25 zeigen

Figur 24 zeigt das Verhalten der Umformergruppe bei einem Kurzschluss, bei dem der Oelschalter der Synchronmaschine ausgeschaltet hat.

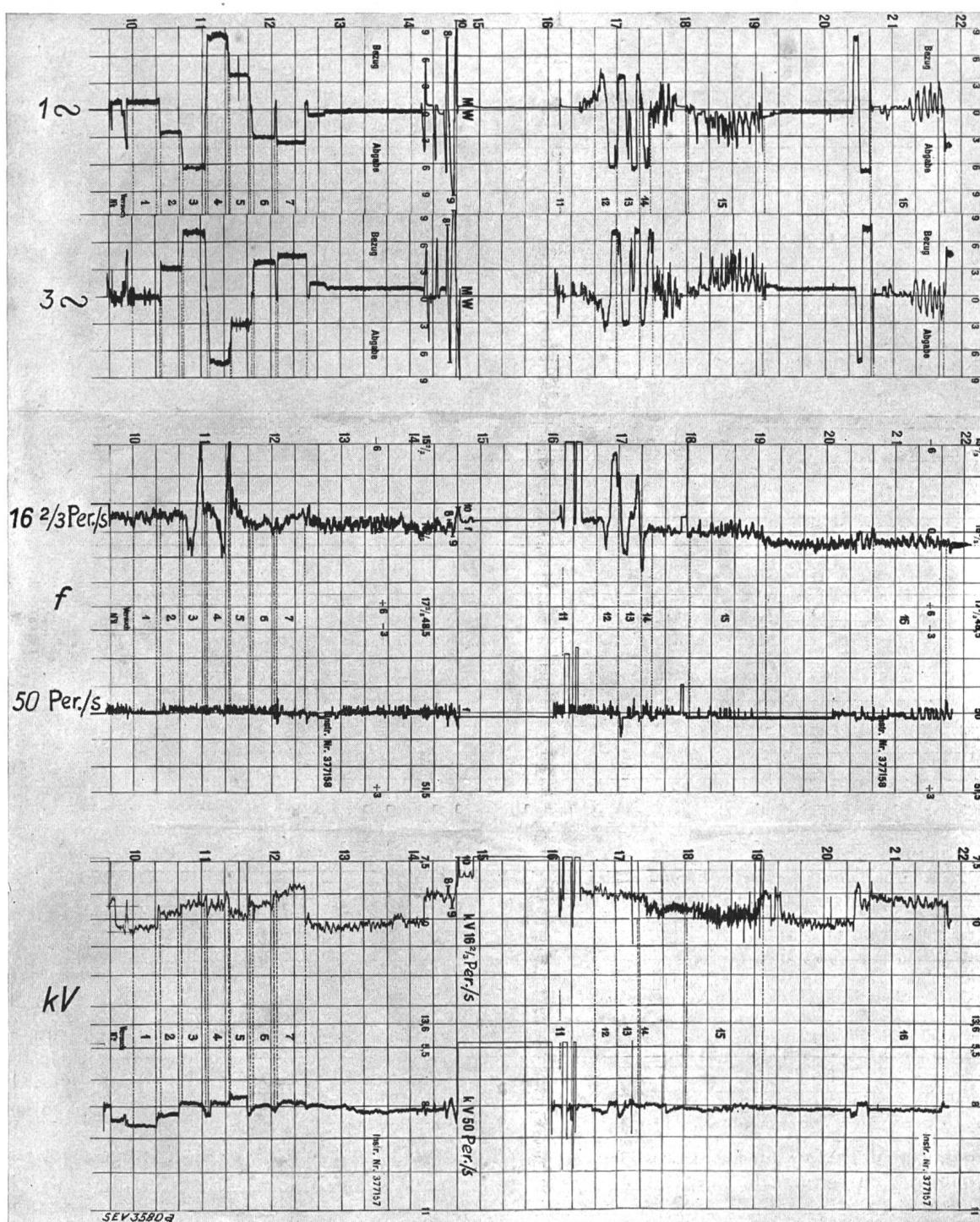


Fig. 21.
Betriebsdiagramme.

solche Versuche, die bei erhöhter Vorschubgeschwindigkeit des Registrierstreifens aufgenommen wurden. Die Geschwindigkeit des Papiervorschubes betrug 5 mm/s.

Diagramm I gibt den Leistungsstoss der Synchronmaschine, Diagramm II denjenigen der Asynchronmaschine und die Art, wie der Kurzschluss auf die Dreiphasenseite übertragen wird. Dia-

gramm III zeigt die Beschleunigung der Gruppe bis zum Moment, wo die am Pendelregler eingestellte Leerlauffrequenz erreicht wird.

Ein ähnlicher Kurzschlussversuch, jedoch in der Nähe der Unterstation Seebach, der keine Auslösung der Maschinenschalter bewirkte, sondern

MW

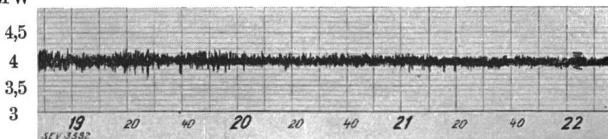


Fig. 22.
Registraturstreifen.

Wirkleistung der Asynchronmaschine während des normalen Winterbetriebes mit dauernd 4000 kW.
(Man beachte, dass der Zeitmaßstab doppelt, der Leistungsmaßstab 4,5mal so gross ist als bei Fig. 20, 21 und 23.)

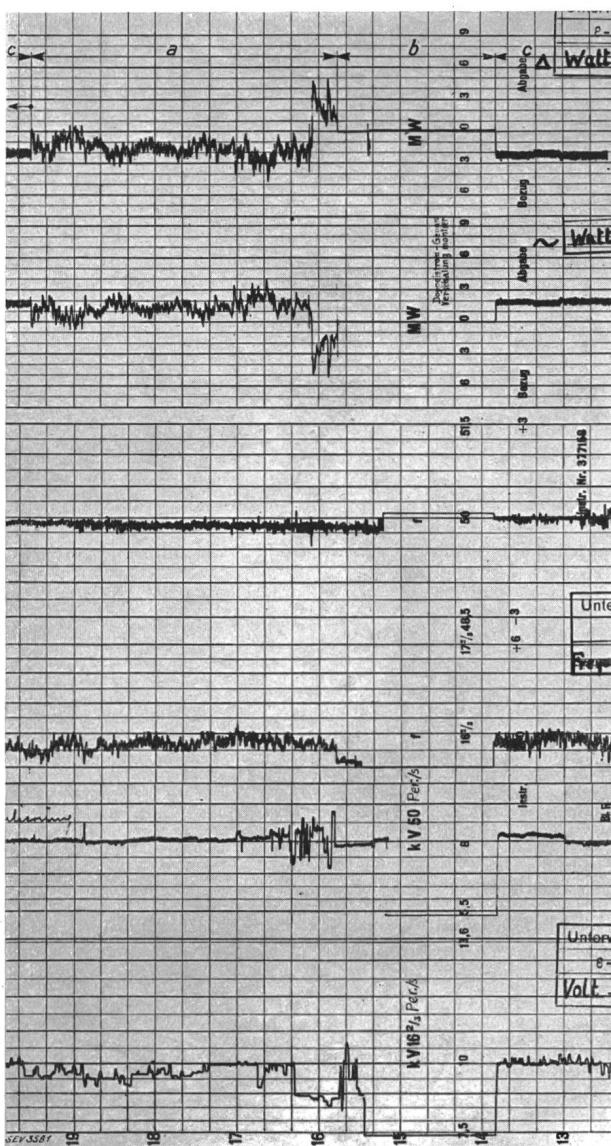


Fig. 23.
Betriebsdiagramme.

Versuch mit Handregulierung der Umformergruppe.
a Handregulierung, b Gruppe steht still, c automatische Regulierung auf konstante Leistung.

nur des Schalters einer abgehenden Leitung, ist in Figur 25 dargestellt. Diagramm I der Synchronmaschine zeigt wiederum den Verlauf der Einphasenleistung. Aus Diagramm II und III ist diesmal zu ersehen, wie gering der Einfluss auf das Dreiphasennetz war. Die Umformergruppe blieb im

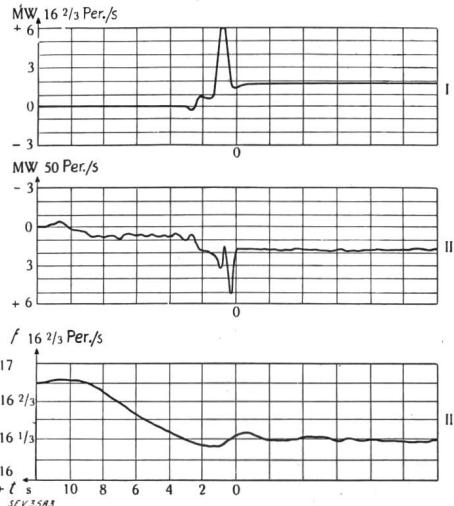


Fig. 24.
Registrierung eines Kurzschlussversuches, bei dem der Schalter der Einphasenmaschine zur Auslösung kam.
Aufgenommen bei erhöhtem Papiervorschub von 5 mm/s.

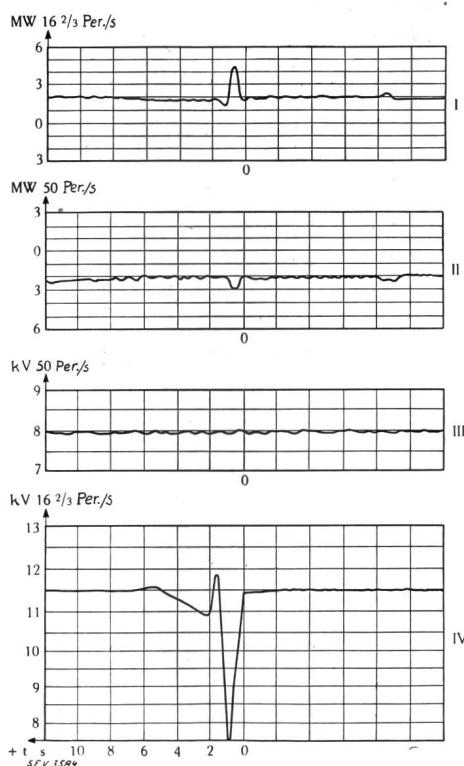


Fig. 25.
Registrierung eines Kurzschlussversuches, bei dem die Einphasenmaschine im Betrieb blieb.
Aufgenommen bei erhöhtem Papiervorschub von 5 mm/s.

Betrieb, so dass absolut keine Sicherheitsmassnahmen getroffen werden mussten.

Diese beiden Versuche zeigen die grosse Stabilität des ganzen Umformers, wenn er mit der beschriebenen Reguliereinrichtung versehen ist.

