Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 46 (1955)

Heft: 21

Artikel: Die Entwicklung im Bau von Grossgeneratoren in der Schweiz in den vergangenen 50 Jahren

Autor: Puppikofer, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058173

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.12.2025

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

Die Entwicklung im Bau von Grossgeneratoren in der Schweiz in den vergangenen 50 Jahren

Von *H. Puppikofer*, Zürich

621.313.12 (494)

Am Beispiel des Baues von Grossgeneratoren versucht der Autor einen Überblick zu geben über die Entwicklung in den vergangenen 50 Jahren und über den heutigen Stand dieses wichtigen Gebietes der Elektrotechnik. In der Entwicklung der Grossgeneratoren spiegelt sich auch der fortschreitende Ausbau der schweizerischen Wasserkräfte, und dahinter steht der massgebende Einfluss der Eidgenössischen Technischen Hochschule, an der sich unsere Ingenieure das Rüstzeug für die erfolgreiche Durchführung dieser Arbeiten geholt haben.

L'auteur essaie de donner, par l'exemple de la construction des grands générateurs, un aperçu du développement pendant les 50 dernières années et de l'état actuel de l'important domaine de l'électrotechnique. Dans ce développement apparaît également l'aménagement progressif des forces hydrauliques suisses qui démontre l'influence de l'EPF où nos ingénieurs ont trouvé la formation nécessaire à la réalisation de ces travaux.

Einleitung

Bekanntlich besitzt die Schweiz keinerlei Naturschätze, wie Kohle, Eisen, Öl oder Uran. Dagegen verfügt sie dank ihrer Lage in den Alpen oder am Fusse dieses Gebirges über zahlreiche ausbauwürdige Wasserkräfte. Nachdem im Jahre 1891 [1][1]) unter Mitwirkung der Maschinenfabrik Oerlikon der Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeit der Energieübertragung über Hochspannungsleitungen erbracht worden war, setzte bald eine Entwicklung ein, die aus der Schweiz eines der Länder machte, welche den höchsten Verbrauch an elektrischer Energie pro Kopf der Bevölkerung aufweisen. Diese Entwicklung stellte die schweizerischen Ingenieure und die sie beschäftigenden Firmen immer wieder vor grosse Aufgaben, deren erfolgreiche Lösungen zum heutigen Stand unserer Maschinenindustrie geführt haben. Hier wird nun die Rolle unserer Eidgenössischen Technischen Hochschule ersichtlich, die sich in zweifacher Hinsicht bemerkbar machte. Sie hat in erster Linie diejenigen Männer, diejenigen Ingenieure ausgebildet, die zur Lösung dieser Aufgaben notwendig waren. Sie hat sich ferner immer wieder Dozenten zu verpflichten gewusst, die alle die Generationen von Ingenieuren ausbilden und für die Technik begeistern, und die ausserdem von ihren ehemaligen Schülern und von den Firmen als Berater zugezogen werden konnten.

Mit der zunehmenden Durchdringung der Technik durch die Wissenschaft wurde die systematische Forschung notwendig. Zu den Professuren kamen Laboratorien und Institute hinzu, die über ein reiches, dem neuesten Stande der Technik entsprechendes Instrumentarium verfügen müssen. Zwischen Hochschule und Industrie ergab sich von selbst eine natürliche Arbeitsteilung. Die Erforschung der Grundlagen blieb hauptsächlich das Anliegen der Hochschule, während von der Industrie eine zum Teil weitreichende, zweckgebundene Forschung betrieben wird, die nicht denkbar ist ohne ständigen Kontakt mit den Ergebnissen der reinen Wissenschaft. Fast das ganze heutige Instrumentarium der Industrie ist entweder an unserer Hochschule oder mit ihrer Hilfe entwickelt oder für die praktischen Erfordernisse ausgebaut worden. Es sei beispielsweise an den Kathodenstrahloszillographen, an die Einrichtungen für Strömungsuntersuchungen, für zerstörungsfreie Materialprüfungen, an den Spektrographen, an die Methoden der photoelastischen Untersuchungen usw. erinnert.

[1]) siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

Wegen ihrer Ausrüstung mit leistungsfähigen Prüfmaschinen wird die Eidgenössische Materialprüf- und Versuchsanstalt dauernd mit Aufträgen aus allen Industriezweigen beschäftigt.

Will man die Entwicklung in den vergangenen 50 Jahren darstellen, so eignet sich hiefür besonders gut das Betrachten eines Teilgebietes, das beim Ausbau der schweizerischen Wasserkräfte eine wesentliche Rolle gespielt hat. Wir glauben, dass der Bau von Grossgeneratoren in dieser Hinsicht besonders repräsentativ und ausserdem noch besonders reizvoll ist, weil hier neben elektrischen auch mechanische Probleme einen massgebenden Einfluss ausgeübt haben.

Der Verlauf der Entwicklung im Grossmaschinenbau war ein wesentlich anderer als beispielsweise bei der Schaltertechnik oder gar bei der Nachrichtentechnik. Bei der Schaltertechnik ergab und ergibt heute noch die Ausnützung der verschiedenen Lichtbogenlöschmittel Öl, Wasser, Druckluft und Drucköl zahlreiche Möglichkeiten, Schalter zu bauen. Bei der Nachrichtentechnik ergaben sich mit den elektronischen Geräten und den steigenden Frequenzen immer wieder neue ungeahnte Möglichkeiten, die heute noch überraschende Neuerungen erwarten lassen.

Bei den Grossmaschinen fanden die grossen Abklärungen über die grundlegende Gestaltung, zum Beispiel ob stillstehende oder umlaufende Erregerwicklung, ob Klauenpole, Erregerwicklung aussen oder innen usw. um die Jahrhundertwende statt. Seit Jahrzehnten besteht bei den Generatoren das Problem darin, auf Grund gesicherter theoretischer Erkenntnisse immer wachsende Leistungen bei extremen Drehzahlen und höchstem Wirkungsgrad herauszubringen. Vom Erfolg dieses technischen Kampfes hängt es ab, ob und zu welchen wirtschaftlichen Bedingungen wir die elektrische Energie beschaffen können, die ein jährlich um 10 % zunehmender Konsum von unseren Kraftwerken fordert. In derselben Front kämpfen die Fabrikanten der Primärmaschinen: der Wasser-, Dampf- und Gasturbinen und der Dieselmotoren, sowie diejenigen, die sich um die Beschaffung der Primärenergie selbst bemühen, sei es in Form von Wasser, Kohle, Öl oder Kernenergie.

Der Zusammenschluss der Kraftwerke brachte ganz neue Probleme, die für die Synchronmaschine erst in den letzten zwei Jahrzehnten durch den Ausbau der Theorie der Synchronmaschine im transienten Zustand gelöst wurden. Diese Untersuchun-

gen und ihre experimentellen Bestätigungen sind richtungweisend für den Entwurf der modernen Synchronmaschinen, die in einem Netzverband arbeiten müssen.

Die Grossgeneratoren gehören heute ausnahmslos zur Klasse der Synchronmaschinen. Die begrenzenden Hauptanforderungen sind grundsätzlich diejenigen, die an die Rotoren gestellt werden. Es handelt sich dabei um die Beanspruchung der mechanischen Teile sowie um die Abfuhr der in den Polspulen erzeugten Verlustwärme. Auch für eine ganz kurze Behandlung muss eine Trennung gemacht werden zwischen den

A) Grossgeneratoren für Antrieb durch Wasserturbinen;

B) Grossgeneratoren für Antrieb durch Dampfturbinen, d. h. Turbogeneratoren.

A) Grossgeneratoren für Antrieb durch Wasserturbinen

Fig. 1 zeigt den Verlauf der Entwicklung in bezug auf die Einheitsleistungen im Laufe der Jahre bei den drei schweizerischen Firmen, die Grossgeneratoren bauen.

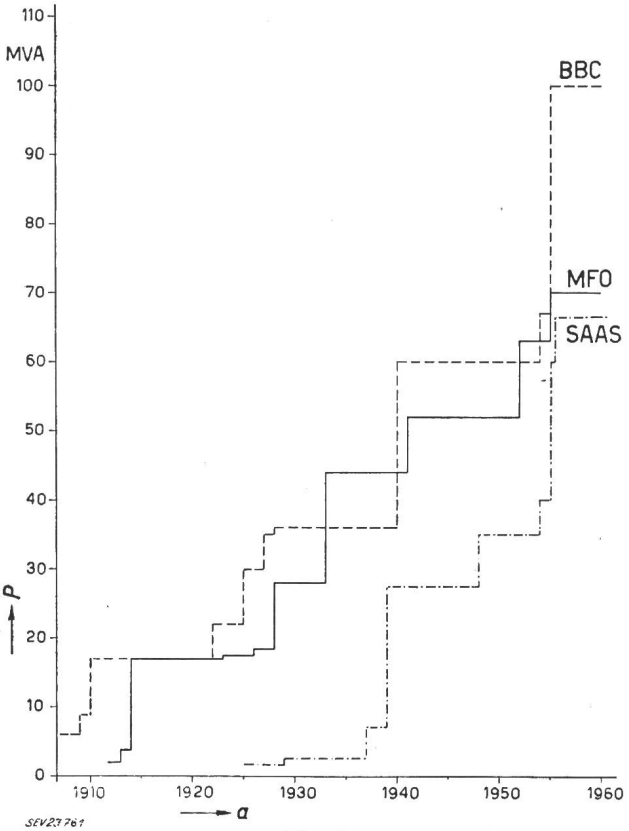


Fig. 1
Entwicklung der Einheitsleistungen P von Wasserkraftgeneratoren im Verlauf der Jahre 1910...1960

1. Die den Entwurf beeinflussenden äusseren Bedingungen

Für die Bemessung der Generatoren sind ausser Nennleistung, Nenndrehzahl und Kurzschlussverhältnis folgende von der Wasserturbine gestellte Forderungen massgebend:

a) das aus Regelungsgründen verlangte Schwungmoment (GD^2);

b) die Durchgangsdrehzahl der Gruppe.

Für die konstruktive Ausbildung kommen folgende Bedingungen hinzu, welche die Aufstellung im Kraftwerk betreffen:

c) Senkrechte oder waagrechte Anordnung der Welle;

d) Bau- und Kranhakenhöhen.

a) Am besten wird das in eine Maschine einzubauende *Schwungmoment* GD^2 durch die sog. Anlaufzeit t_a gekennzeichnet. Dies ist die Zeit, die erforderlich ist, um die Maschine unter Einsatz des Nenndrehmoments auf ihre Nenndrehzahl n zu bringen:

$$t_a = 2{,}74 \frac{GD^2}{S} \left(\frac{n}{1000}\right)^2$$

(S Scheinleistung in kVA)

Diese Anlaufzeit beträgt für Wasserkraftgeneratoren 4...13 s, wobei die kleineren Werte für Pelton- und Francis-Turbinen und die grösseren für

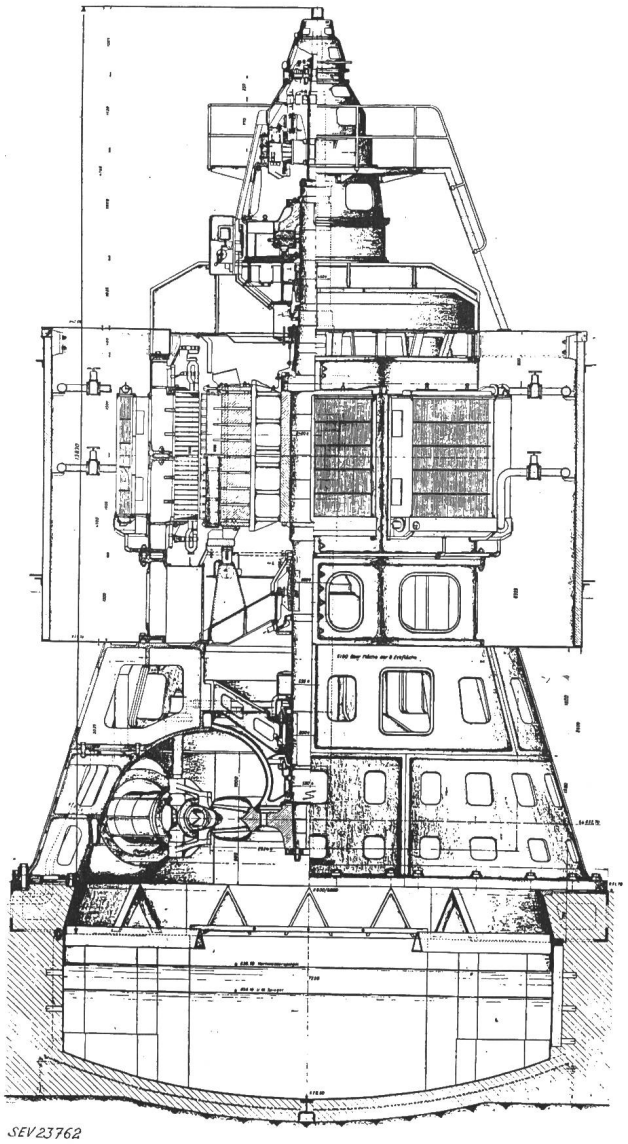


Fig. 2
Generator des Kraftwerkes Innertkirchen
47 500 kVA, 428 U./min, 50 Hz

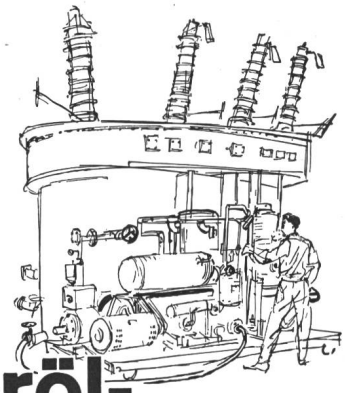
Kaplan-Turbinen gelten. Ein Generator wird dann am billigsten, wenn von ihm kein grösseres Schwungmoment verlangt wird, als sich bei der normalen Bemessung ergibt.

SÉCHERON

La maison spécialisée en équipements pour centrales électriques

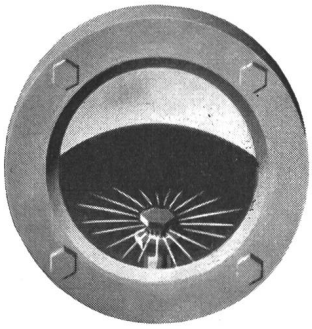
Notre programme de fabrication: Alternateurs et moteurs pour des puissances supérieures à 150 kW. Transformateurs mono- et triphasés pour toutes puissances et tensions. Tous équipements électriques pour la traction. Installations de redresseurs sans pompes, à vapeur de mercure et gaz rare. Régulateurs automatiques ultra-rapides pour les réglages les plus divers. Electrodes et appareils pour le soudage à l'arc. La production de Sécheron se caractérise par sa qualité.

Société Anonyme des Ateliers de Sécheron — Genève



Isolieröl-Aufbereitungs-Anlagen

Mit der Kaltbehandlung unter Hochvakuum in Micafil-Anlagen trocknen, entgasen und filtrieren Sie das Öl in einem Arbeitsgang ohne Oxydation und Brandgefahr.
Bei einfachster Wartung kann der Aufbereitungsverlauf jederzeit überwacht werden.



MICAFIL AG ZÜRICH / SCHWEIZ

MICAFIL

Elektroisolationen Durchführungen Resoformpreßteile Nepolinkondensatoren
Hochspannungsprüfgeräte Maschinen für Elektrowicklereien Hochvakuumpumpen

b) Die nächste Bestimmungsgrösse, die von der Art der gewählten Turbine herrührt und den Aufbau des Rotors entscheidend beeinflusst, ist die *Durchgangsdrehzahl,* welche die ganze Gruppe bei voller Beaufschlagung der Turbine und ohne Eingreifen der Drehzahlregelung annehmen würde. Bei den heutigen Pelton- oder Francis-Turbinen erreicht die Durchgangsdrehzahl das 1,7- bis 2,2-fache, bei Kaplan-Turbinen das 2,3- bis 3,5fache der Nenndrehzahl. Bis vor kurzem war es üblich, das Verhalten der Rotoren durch einen Schleuderversuch in einer sog. Schleudergrube in den Werkstätten des Herstellers nachzuprüfen. Die sog. *Kettenrotoren,* die aus Blechsegmenten erst am Aufstellungsort der Maschinen zusammengesetzt werden, können dagegen in der Fabrik nicht geschleudert werden.

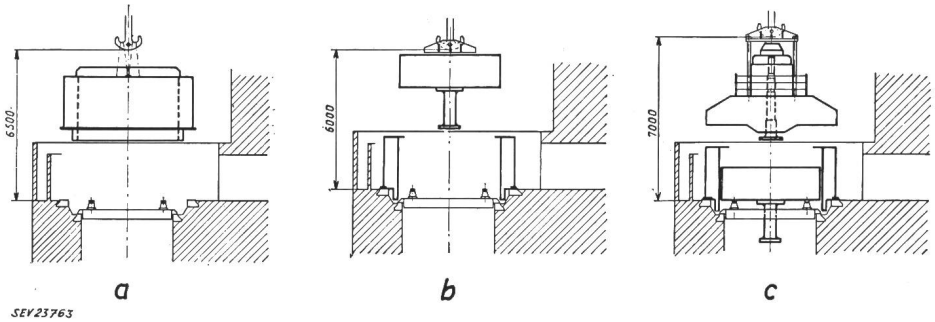


Fig. 3
Reduktion der Montagehöhen durch mehrteilige Welle
(Generator Isarco, Italien), siehe auch Fig. 14

c) Der Entscheid, ob die Welle der Energieerzeugungsgruppen *horizontal oder vertikal* anzuordnen sei, wird vom Kraftwerkbauer zusammen mit dem Turbinenbauer beim Entwurf der Gesamtdisposition des Maschinenhauses gefällt. Die heute üblichen Kavernenanlagen haben nun bezüglich Reduktion der Bau- und Montagehöhen besondere Forderungen gestellt. Trotzdem die Generatoren bei Ausführung mit vertikaler Welle 10...15 % teurer zu stehen kommen, zeigt es sich, dass heute ein beträchtlicher Teil der Grossanlagen in vertikaler Ausführung gebaut werden.

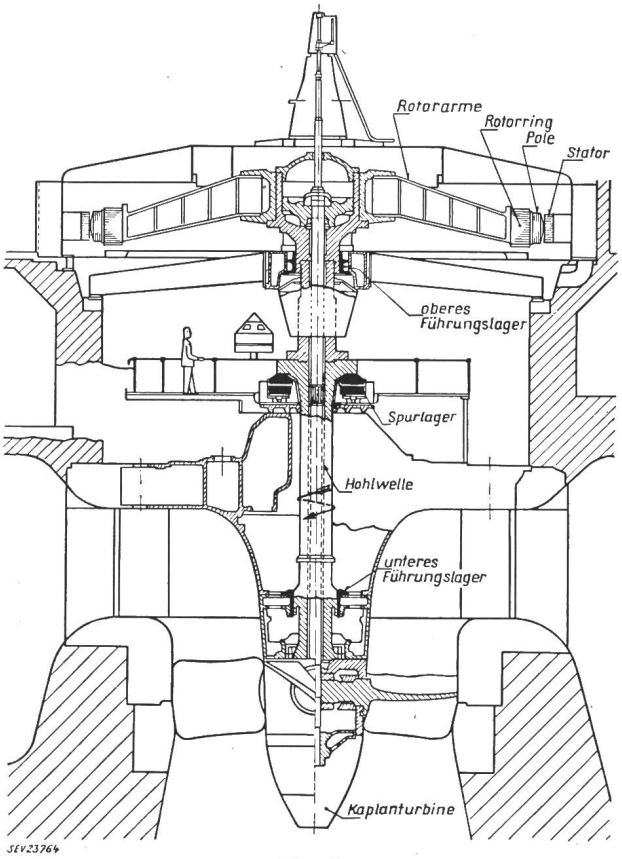


Fig. 4
Schematisierter Schnitt durch Generator in Schirmbauart
Kraftwerk Birsfelden, 28 600 kVA, 68 U./min

d) Bei einer Reihe von neuzeitlichen grossen Generatoren (z. B. Kraftwerke Oberhasli A.-G.) wurde, um Bauhöhe zu sparen, die Turbine direkt und fliegend auf die Generatorwelle aufgesetzt (Fig. 2). *Der obere Teil der Generatorwelle, der im oberen Führungs- und im Spurlager läuft, wurde oberhalb der Rotornabe an den unteren Wellenteil angeflanscht.* Der oberste Wellenteil ist die Welle der Erreger und der Hilfsmaschine und wird in der Regel über dem Spurlager auf die Hauptwelle angeflanscht. Bei einem andern Generatortyp von 25 000 kVA bei 210/250 U./min wurden sowohl der untere als auch der obere Wellenteil des Generators an die Rotornabe angeflanscht, so dass sich nach Fig. 3 für die verschiedenen Demontagemöglichkeiten keine grössere Kranhakenhöhe als 7 m ergab.

Eine der ältesten Bauarten für Vertikalgeneratoren, die Schirmbauart, wird bei kleineren Drehzahlen wieder häufiger angewendet, da sie besonders kleine Bauhöhen ergibt. Das Spurlager wird zwischen Wasserturbine und Generator angebracht, und beide Führungslager werden so weit als möglich auseinander und so nahe als möglich an die drehenden Teile herangeschoben. Das obere Führungslager kommt dabei unter das schirmförmig nach unten gebogene Polrad zu stehen. Fig. 4 zeigt den Schnitt durch einen Generator von 28 600 kVA, 68 U./min für das Kraftwerk Birsfelden. Das Spurlager ist auf dem Turbinendeckel aufgebaut. Sowohl der Rotor des Generators als auch das Turbinenrad sind fliegend angeordnet und die beiden Führungslager befinden sich ganz nahe bei den Rädern.

2. *Spurlager und Führungslager*

Ein wichtiger Teil der Generatorgruppen mit vertikaler Achse ist das Spurlager, das nicht nur das Gewicht aller umlaufenden Massen, sondern auch den mit der Belastung zunehmenden Wasserdruck aufnehmen muss. Alle schweizerischen Turbinenbauer und eine der generatorbauenden Firmen besitzen bewährte Konstruktionen. Das Spurlager sitzt oft im Tragbalken des Generators. Um auch wieder an Montagehöhe zu sparen, wird der Tragring des Spurlagers nach oben verlängert und mit dem Laufsitz für das obere Führungslager versehen. Das untere Führungslager ist zweiteilig und im unteren Führungsbalken eingebaut.

Seit 1945 werden auch in der Schweiz die meisten Führungslager der Vertikalmaschinen als selbstschmierende Lager mit automatischer Öl-

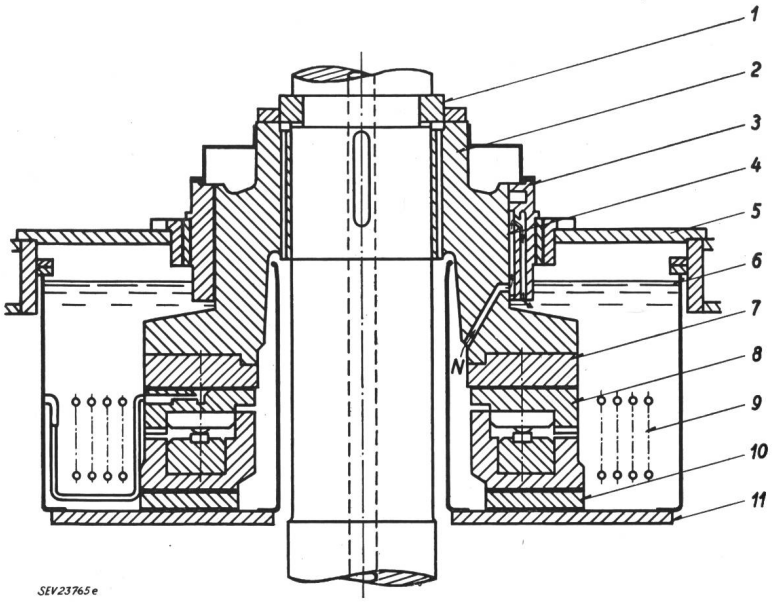


Fig. 5
Selbstschmierendes Führungslager in vereinfachter Darstellung

1 Tragring
2 Mitnehmer
3 Halslager
4 Schmiernute
5 Lagertragring
6 Spurlagergefäss
7 Laufring des Spurlagers
8 Lagersegment
9 Ölkühler
10 Isolierring
11 Tragkörper
N Fördernute

zirkulation ausgeführt. Fig. 5 zeigt das Beispiel einer solchen Selbstschmierung, angewendet auf das obere Führungslager, das durch Tieferlegen bis in das Gefäss des Spurlagers dessen Öl mitverwendet. Dieses wird durch entsprechende, schräg gelegte Nuten *N* durch das Halslager nach oben gepresst, durch eine obere Ringnute gesammelt und in das gemeinsame Bassin zurückgeleitet.

3. *Die Rotorbauarten*

Grundsätzlich besteht der Rotor aus einer Nabe mit Armen, auf welchen der die Pole tragende Kranz aufgeschrumpft ist. Mit dieser Bauart lässt sich ein weiter Leistungs- und Drehzahlbereich bewältigen. Die beim Entwurf der Befestigung der Pole auf dem Kranz sich ergebenden Beanspruchungen führen zur Wahl der Konstruktion. Hier ist auch der Weg der Entwicklung am deutlichsten zu sehen. Mit steigender Beanspruchung werden die Pole nicht mehr mit Schrauben, sondern mit Rechteck- oder mit Rund-Klauen am Kranz befestigt (Fig. 6). Ausgedehnte Festigkeitsuntersuchungen und auch photoelastische Versuche (Fig. 7) wurden zur Bestimmung der günstigsten Klauenformen durchgeführt. Die Klauen werden bei diesen Versuchen durch einen Meridianquerschnitt dargestellt. Die mit Zahlen versehenen Kurven sind Linien gleicher Hauptschubspannungen. Die maximale örtliche Beanspruchung des Klauenquerschnittes an irgend einem Punkte der Randlinie wird bei Berücksichtigung einer Konstanten durch diejenige Schubspannungskurve angegeben, welche die Randlinie an diesem Orte schneidet.

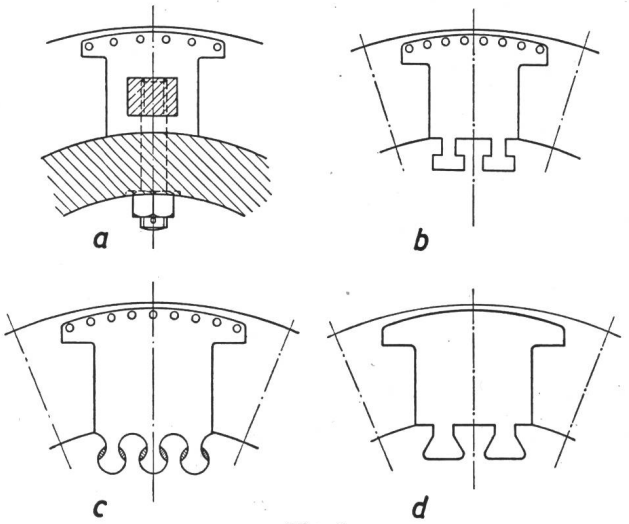
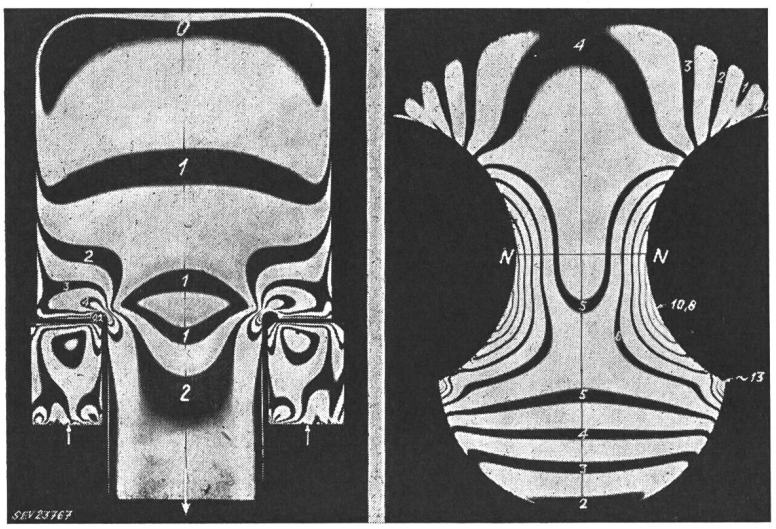


Fig. 6
Polbefestigungen mit Schrauben und Klauen
a Schrauben; *b* Rechteckklauen; *c* Rundklauen (Bauart MFO); *d* Schwalbenschwanzförmige Klauen (Bauart BBC)

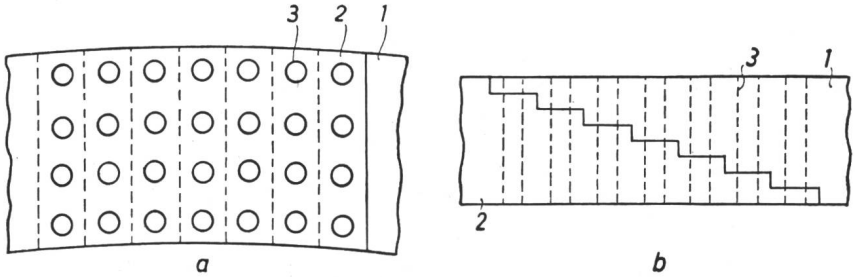


Eine zweite Begrenzung liegt in der Beanspruchung des Kranzes selbst, der seine eigene Fliehkraft und die der Pole aufnehmen muss. Die Kränze werden aus geschmiedeten Stahlringen oder aus Elektrostahlgussringen ausgeführt, die, solange es die Transportverhältnisse gestatten, einteilig sind. Wenn der äussere Kranzdurchmesser 4,2 m übersteigt, werden die Kränze mehrteilig ausgeführt, wobei der Verbindungsstelle besondere Auf-

Fig. 7
Photoelastische Versuche zur Bestimmung der günstigsten Form der Klauen für die Polbefestigung

merksamkeit zu schenken ist [2]. Die zu verbindenden Kranzteile werden treppenförmig abgestuft und durch eingepasste Bolzen untereinander verbunden. Das Detail der Verbindungsstelle ist auf den Skizzen Fig. 8*a* und 8*b* erläutert, während Fig. 8*c* die Bearbeitung eines solchen Kranzes zeigt.

Als neueste konstruktive Lösung hat sich für die grossen Durchmesser auch in der Schweiz der Kettenrotor eingeführt. Der Kranz wird im Maschinenhaus des Kraftwerkes aus gestanzten Blechsegmenten zusammengesetzt, die um eine bestimmte Teilung verscho-



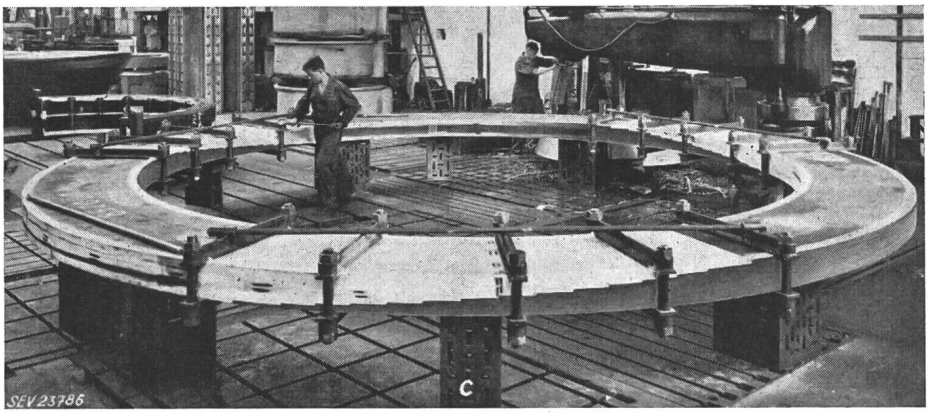


Fig. 8
Treppenförmig abgestufte Verbindungsstellen einer Kranzausführung
a Draufsicht der Verbindungsstelle mit Anordnung der Bolzen; *b* Seitenansicht; *c* Ausführung des Kranzes

ben, also überlappt aufeinandergestapelt werden (Fig. 9). Die fertigen Ringe werden gewärmt und in warmem Zustand mit dem Armsystem des Rotors verkeilt, so dass für die Nenndrehzahl ein fester Sitz garantiert ist. Wie eingangs erwähnt, kann bei Generatoren mit Kettenrotor kein Schleuderversuch in der Fabrik durchgeführt werden. Bei einer Abart des Kettenrotors, beim sog. Paketrotor, werden die Blechsegmente nicht einzeln, sondern als Pakete mit Pressbolzen zu Ringteilen zusammengesetzt. Fig. 10 zeigt das Zusammensetzen zweier vorpaketierter Ringhälften zu einem fertigen Kranz. Diese Vormontage kann bei Vorhandensein der entsprechenden Einrichtung eventuell doch eine Schleuderung in der Fabrik erlauben. Ein allgemeiner Nachteil des Kettenrotors besteht darin, dass eine achsiale Unterteilung nur in bescheidenem Masse möglich ist, wodurch das radiale Einführen von Kühlluft über die ganze Eisenlänge der Maschinen erschwert wird.

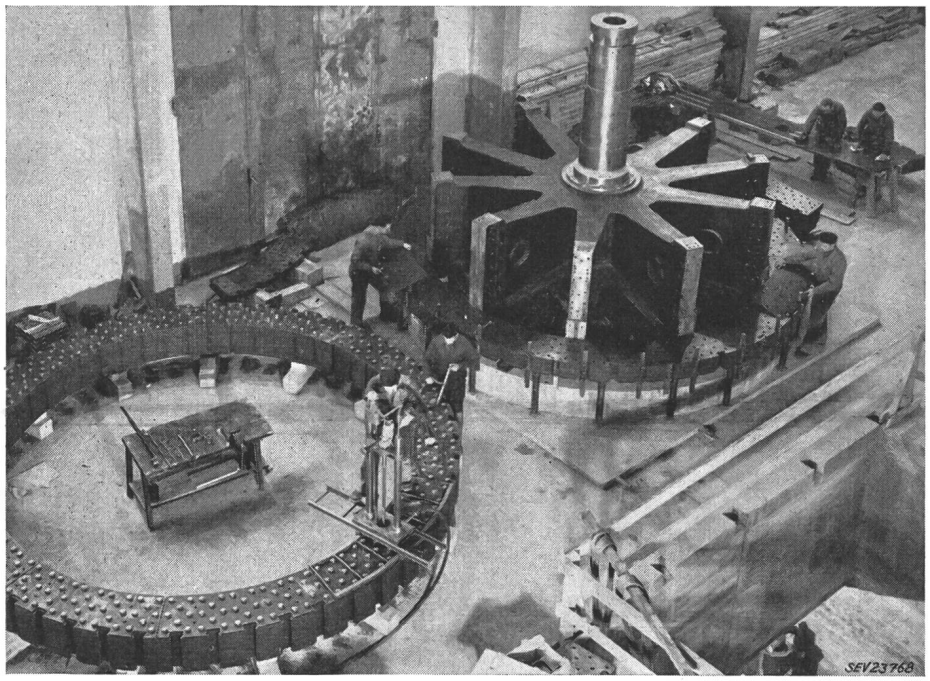


Fig. 9
Kettenrotor (Polrad mit geblechten Radkränzen)
Montage eines Generators 30 000 kVA, 115,4 U./min

Berechnet man auf Grund des heute erhältlichen Materials und seiner entsprechenden, maximal zulässigen Beanspruchungen, sowie für eine Durchgangsdrehzahl von 1,8mal Nenndrehzahl, für ein Kurzschlussverhältnis von 0,85 und unter Benützung einer Klauenkonstruktion die Grenzleistung für jede Drehzahl, so ergibt sich die vollausgezogene Kurve der Fig. 11. Die bei einer bestimmten Drehzahl maximal mögliche Leistung ist jedoch bei einer gegebenen Anlage nicht durch den Generator begrenzt, sondern durch die Verhältnisse des hydraulischen Teils. Die bisher durch die Antriebsmaschinen vom Generatorenbauer im ein-

zelnen Falle geforderten und beispielsweise von der MFO ausgeführten höchsten Leistungen sind durch Punkte mit den Jahreszahlen in Fig. 11 eingetragen. Die Möglichkeiten der Generatorenkonstruktionen sind also noch bei weitem nicht erschöpft.

Für den Drehzahlbereich zwischen 500 und 1500 U./min mussten bei sehr grossen Einheitsleistungen die bisher geschilderten Ringbauformen des Rotors verlassen werden. Als eine mögliche Ausführung ist die Bauart der Vollpol- oder Turbomaschinen anzusehen. Es wurde aber auch mit Erfolg ein anderer Weg beschritten durch konsequente Verbesserung einer altbekannten, als *Kammkonstruktion* bezeichneten Bauart. Der Rotor wird dabei aus leicht ineinander verzapften Stahlgußscheiben hoher Festigkeit zusammengesetzt (Fig. 12*a* und *b*). Aus diesen Scheiben werden aussen die Kämme ausgefräst. In die entstandenen Kammlücken werden die massiven Polschuhe mit T-förmigem Querschnitt eingesetzt und durch Rundkeile festgehalten (Fig. 12*c*), wobei die vorher aufgesetzten Polspulen ihrerseits durch die Polhörner gehalten werden.

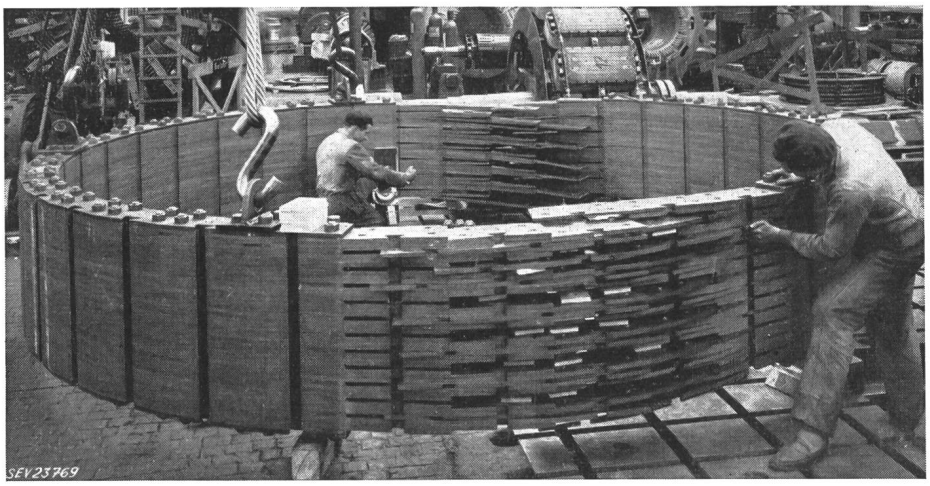


Fig. 10
Montage eines Paketrotors für Generator 32 000 kVA, 167 U./min
Rjukan (Norwegen)

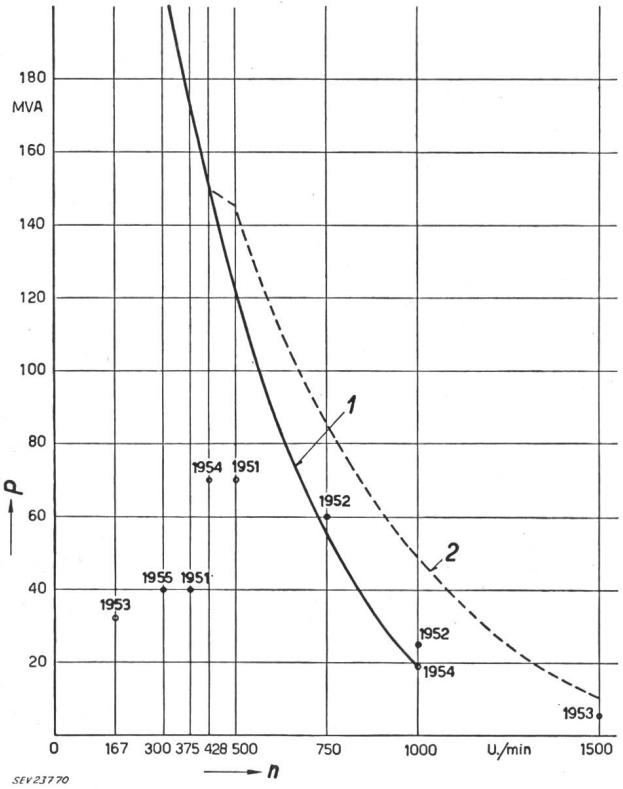


Fig. 11
Grenzleistungen *P* von Drehstromgeneratoren mit ausgeprägten Polen in Funktion der Drehzahl *n*
1 Klauenkonstruktion; 2 Kammkonstruktion
o Generator und Baujahr; ● Phasenschieber

Die Wellenstücke werden beidseitig mit Flanschen festgeschraubt. Wie Fig. 13 zeigt, erhält der fertige Rotor ein schönes, geschlossenes Aussehen, das an die Turbobauart erinnert. Die Fliehkraft der Stirnseiten der Polspulen wird auch hier durch Ringe aus unmagnetischem Stahl aufgenommen. Seitlich sind die Spulen durch keilförmige Zwischenstücke gegen das Ausbiegen gesichert.

4. *Die Statorbauarten*

Der ruhende Teil des Generators ist derjenige, der sich im Laufe der Jahre am wenigsten verändert hat: Er setzt sich bei vertikaler Welle zusammen aus dem Statorgehäuse mit dem geschichteten Blechkörper, dem oberen Tragbalken mit dem Spurlager und dem oberen Führungslager, dem unteren Führungsbalken mit Führungslager und den Verschalungen. Früh schon entstanden in Grauguss aus formsicherem Gefühl heraus Konstruktionen, die auch ästhetische Forderungen befriedigten. Heute werden alle diese Teile fast ausnahmslos aus Stahlblechen und Walzprofilen zusammengeschweisst. Es ergeben sich daraus gegenüber der früheren Gussbauart grosse Gewichtsersparnisse, Ersparnisse an Fracht- und Zollspesen sowie Ersparnisse durch Wegfall teurer Modelle. Von den Generatoren, die nach Fig. 2 gebaut wurden, mussten wegen kriegsbedingter Beschaffungsschwierigkeiten einzelne in Gussbauart ausgeführt werden, so dass ein genauer Vergleich möglich war. Das Gewicht der Schweisskonstruktion beträgt nur 75 % des Gewichts der Gussbauart. Ein typisches Beispiel der Schweisskonstruktion und der modernen Aufstellung der Generatoren, die im Maschinenhausboden versenkt werden, ist aus Fig. 14 ersichtlich. Während dort der obere Tragbalken als einfacher Balken ausgeführt ist, kann der Führungsbalken als ebenfalls geschweisster, vielarmiger Stern erscheinen. Mit der Einführung der elektrischen Schweissung mussten schweissgerechte Konstruktionen entwickelt werden und sich auch ein

neues Gefühl für die Schönheit technischer Schöpfungen heranbilden. Es scheint heute auch auf ästhetischem Gebiet eine gewisse Stabilität erreicht worden zu sein.

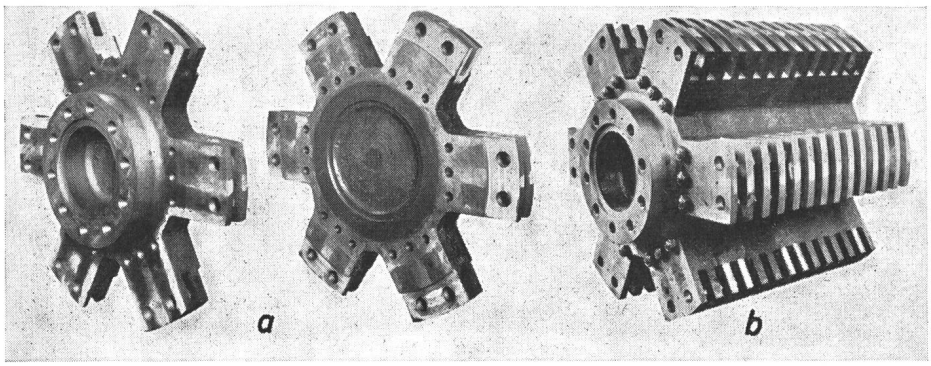
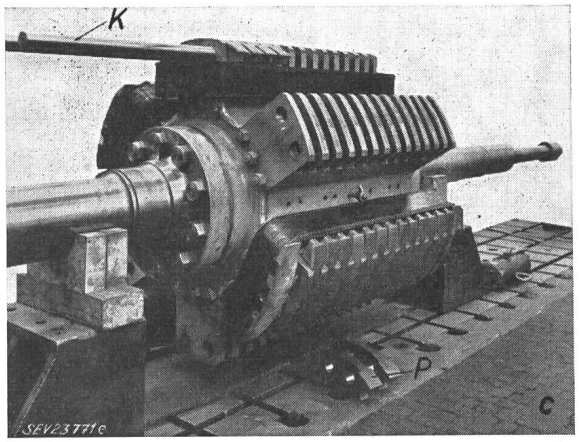


Fig. 12
Polrad in Kammkonstruktion
Detail aus Fig. 13
P Polhörner
K Rundkeil
a, b, c: Siehe Erklärung im Text



Das während Jahrzehnten für die Eisenkörper verwendete Dynamoblech wies spezifische Verluste von 3,0 bis 3,6 W/kg auf. Speziell für Transformatoren wurden von den Walzwerken immer verlustarmere Bleche zur Verfügung gestellt, die zur Zeit auf Werte unter 1 W/kg gelangt sind. Für den Generatorenbau verwendet man heute mehrheitlich besseres Blech bis hinunter zu 1,3 W/kg. Für die

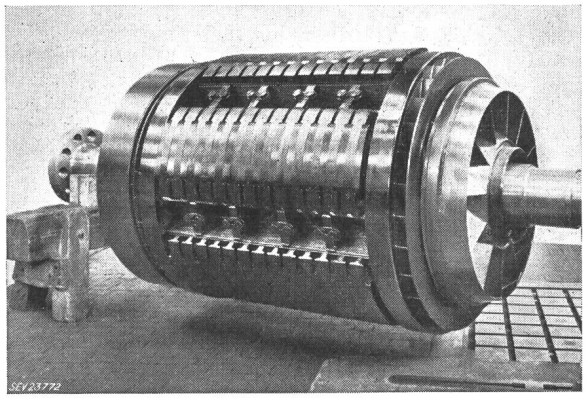


Fig. 13
Komplettes Polrad in Kammkonstruktion für Generator 15 000 kVA, 1000 U./min
Juliawerk (EW der Stadt Zürich)

Isolation der Bleche wird mehr und mehr zum Lakkieren übergegangen, wodurch sich gegenüber der Papierisolation bessere Füllfaktoren und eine bessere Wärmeleitung quer zur Schicht ergeben. Diese Bleche werden zu Paketen von 60...70 mm achsialer Breite gestapelt; dann folgt ein ringsum durchgehender Ventilationsschlitz von 10...15 mm Breite. Wichtig ist die genügende Pressung des vollen Blechkörpers sowie auch der langen Zähne. Zu diesem Zwecke werden zwischen den Pressplatten und dem dicken Endblech starke Pressfinger (*F* in Fig. 15 und 19) — bei grossen Leistungen meistens aus unmagnetischem Stahl — eingelegt, die in Fig. 19 sowie im oberen Teil der Fig. 15 zwischen

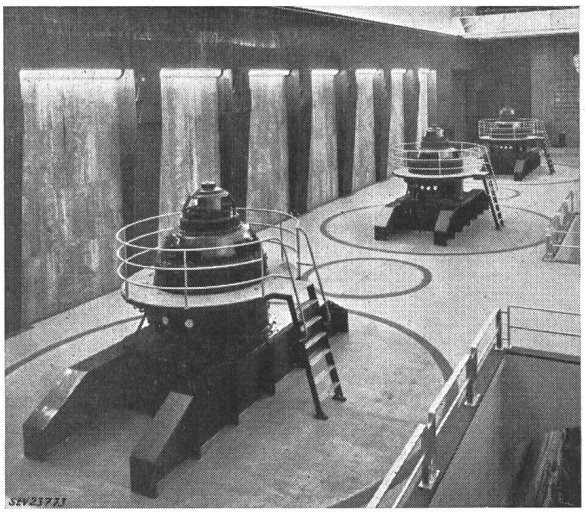


Fig. 14
Tragbalken der Generatoren in geschweisster Ausführung für das Maschinenhaus Isarco (Italien)
25 000 kVA, 210/250 U./min, 42/50 Hz

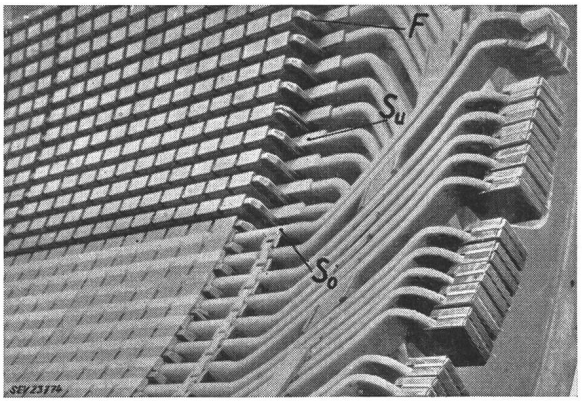


Fig. 15
Zweischichtwicklung mit zwei Stäben pro Nut während der Montage
F Pressfinger; S_u unterer Stab; S_o oberer Stab

den teilweise eingelegten Wicklungsstäben sichtbar sind.

5. *Die Statorwicklungen*

Mit der Erhältlichkeit besserer Isolationsmaterialien konnte die Generatorspannung höher gewählt werden. Schon im Jahre 1900 wurden Generatoren mit 15 000 V Klemmenspannung gebaut, 1910 wurden 17 600 V und 1930 die bis jetzt höchste Wicklungsspannung von 36 000 V erreicht. Da die elektrische Energie, die in durch Wasserkraft getriebenen Generatoren erzeugt wird, ohnehin für die Übertragung vom Erzeugungsort zum Konsumzentrum auf eine höhere Spannung auftransformiert werden muss, geht die heutige Tendenz dahin, als Generatorenspannung denjenigen Wert zu wählen, der beim Entwurf der Maschine die günstigsten Verhältnisse ergibt. Dieser Wert liegt meistens in der Grössenordnung von 10 000 bis 16 000 V.

Seit einigen Jahrzehnten werden Einheitsspulen mit gleichen Spulenköpfen mit zwei Spulenseiten pro Nut verwendet. Durch Schrittverkürzung konnten die höheren Harmonischen in der Spannungskurve und die Streu-Reaktanzen der Spulenköpfe herabgesetzt werden. Für grosse Maschinen werden heute allgemein Zweischichtwicklungen mit zwei Stäben pro Nut ausgeführt (Fig. 15). Zur Reduktion der zusätzlichen Kupferverluste wurden die Wicklungsstäbe in Teilleiter unterteilt, die nach verschiedenen Verfahren verseilt werden. Der 1914 eingeführte sog. Roebelstab wird heute fast allgemein verwendet. Die Teilleiter werden sorgfältig gegeneinander isoliert und mit einem temperaturbeständigen Lack zusammengeklebt.

Für die Isolation der ganzen Spulenstäbe wird seit der Einführung durch *E. Haefely*, Basel, um das Jahr 1910 Micafolium verwendet, das heiss aufgewickelt und hernach gepresst wird. Von Anbeginn an wurde Schellack als Bindemittel gebraucht. Mit steigender Spannung und zunehmender Stablänge wurden die Ansprüche bezüglich Verlustfaktoren und dauernder Klebefähigkeit grösser, und man führte ca. 1929 für diese Verhältnisse das Asphaltmicafolium ein, mit einem Asphaltlack als Bindemittel. Über die neuesten Tendenzen auf dem Gebiet der Statorisolation grosser Generatoren sei auf das Kapitel über die Turbogeneratoren verwiesen.

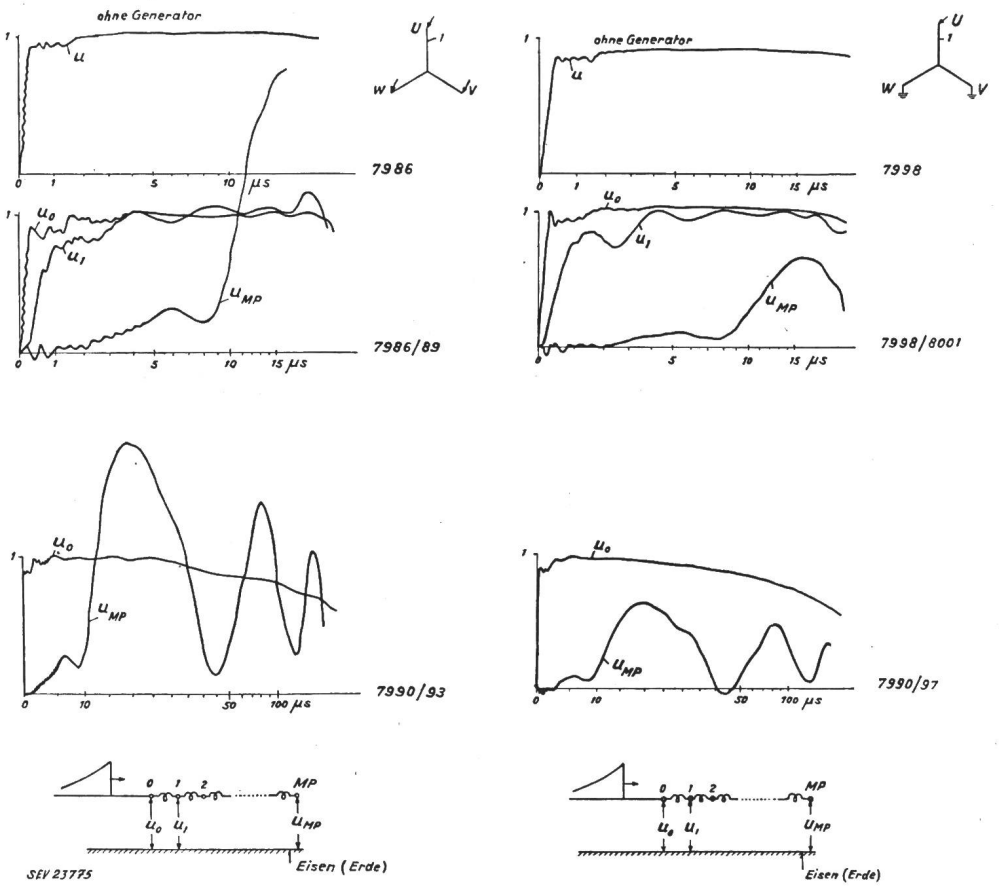


Fig. 16
Kathodenstrahloszillogramme von Stossversuchen an Maschinenwicklungen

Sehr wichtig ist die elektrische Verbindung der Staboberfläche mit dem Blechkörper zur funkenfreien Überleitung der Ladeströme. Bei kleineren Maschinen genügt ein Anstrich mit Graphitlack, bei grossen Maschinen wird am Schluss des Isoliervorganges eine durchgraphitierte Papierumhüllung auf die isolierten Stäbe aufgebügelt. Ausserhalb der Nut wird der ganze Spulenkopf mit einem halbleitenden Carborundumlack überzogen, zwecks Ableitung der Oberflächenladungen.

Vor dem Einbau in die Nuten werden die einzelnen Stäbe einer Spannungsprüfung und einer Verlustmessung unterzogen. Bei geschlossenen Spulen mit Serieleitern empfiehlt es sich ausserdem,

eine Windungsschlussprüfung mit Stoßspannung durchzuführen.

6. Das Verhalten der Statorwicklungen bei Beanspruchung durch Stoßspannungen und der Schutz gegen Überspannungen

Die atmosphärischen Überspannungen haben Stosscharakter. Stoßspannungen beanspruchen aber die Wicklungen von Maschinen nicht nur durch ihre Höhe gegen Erde, sondern auch durch ihre räumliche Verteilung längs der Wicklungen. In Fig. 16 sind Kathodenstrahloszillogramme von Stossversuchen wiedergegeben. In der linken Bildhälfte sind die Resultate von Versuchen dargestellt, bei denen ein Stoss der Form u_0 auf die drei Wicklungsenden U, V, W eines Dreiphasengenerators gegeben wurde. Auf der rechten Bildhälfte sind die Oszillogramme wiedergegeben für den Fall eines Stosses der Form u_0 auf die Klemme U_1, während die Klemmen V und W geerdet waren. In beiden Fällen wird im ersten Moment praktisch die gesamte Stoßspannung von der ersten Spule aufgenommen und die Nullpunktspannung zu einer kräftigen Schwingung angeregt. Beim dreiphasigen Stoss erreicht die Nullpunktspannung Scheitelwerte, die in der Grössenordnung des doppelten Scheitelwertes der ursprünglichen Stoßspannung liegen. In zahlreichen, unter anderem in der Schweiz durchgeführten Versuchen hat man festgestellt, dass die beim Schalten entstehenden Überspannungen bis zu Effektivwerten ansteigen können, die zwischen 2,5- und 4,5mal die Betriebspannung $(U_n/\sqrt{2})$ liegen. Auch Erdschlussüberspannungen liegen in dieser Grössenordnung.

Überall da, wo die Generatoren über Transformatoren auf das Netz arbeiten, sind sie von den atmosphärischen Überspannungen geschützt, und Erdschlüsse sind praktisch nicht zu befürchten. Es sind daher keine besonderen Schutzmassnahmen gegen Überspannungen zu ergreifen. Sind die Generatoren jedoch direkt an das Netz geschaltet, so empfiehlt es sich, an den Klemmen und am Nullpunkt Überspannungsableiter anzuschliessen, da die Wicklungsisolation für die Beanspruchung durch Überspannungen nicht bemessen werden kann, ohne dass es zu völlig unwirtschaftlichen Maschinen kommen würde.

7. Die Ventilation von Grossgeneratoren

Die Generatoren werden durchwegs selbstventilierend gebaut. Die Kaltluft wird häufig durch Kanäle im Fundament aus dem Freien angesaugt. Bei mittleren Maschinen wird die Warmluft direkt in den Maschinenraum ausgestossen. Bei grösseren Maschinen wird auch die Warmluft durch besondere Kanäle ins Freie geleitet. Man rechnet mit einer Kühllufterwärmung von 24...16 °C bei 2...3 m³/min Kühlluft pro kW Verluste. Diese Durchzugventilation hat den Nachteil, dass die enormen Luftmengen, die durch die Maschinen fliessen, auch beträchtliche Mengen von Fremdkörpern mit hineinnehmen und in den Wicklungen und anderswo ablagern. Besonders gefährlich sind die Abgase benachbarter chemischer Betriebe. Aber auch da, wo die Kraftwerke in abgelegenen Gegenden zur Aufstellung gelangen, wo nur reine Luft erwartet wird, kommt es vor, dass zu bestimmten Zeiten Blütenstaub und Mücken in grossen Mengen in die Maschinen gelangen. Solchermassen staubige oder verschmutzte Maschinen können sich um 10...15 °C höher erwärmen als im neuen Zustand, was eine rasche Alterung des Isoliermaterials zur Folge hat, wodurch der Isolationszustand bedenklich sinken kann.

Es empfiehlt sich daher, wo immer möglich zur Ventilation im geschlossenen Kreislauf überzugehen. Die von der Warmluft mitgeführte Wärme wird dann durch Wasserkühler abgeleitet. Die Temperaturschwankungen im Generator zwischen Tag und Nacht oder den verschiedenen Jahreszeiten werden kleiner, da die Wassertemperatur weniger schwankt als die Lufttemperatur. Wie schon aus Fig. 2 ersichtlich ist, hat sich der Anbau der Wasserkühler an die Aussenwand des Statorgehäuses als normale Konstruktion bei Vertikalmaschinen eingeführt.

Als weiterer Vorteil der geschlossenen Umlaufkühlung bietet sich die Möglichkeit, Wicklungsbrände als Folge von Lichtbögen sofort durch Einführen von Kohlensäure aus Druckflaschen zu löschen. Die Auslösung der Ventile kann automatisch durch Schutzrelais erfolgen. Ferner wird bei der Umlaufkühlung das Maschinengeräusch nicht mehr durch die Warmluft nach aussen getragen.

Die Vervollkommnung der Kühlung ist auch heute noch ein Hauptproblem des Generatorenbaues trotz der schon erreichten hohen Ausnützung. Es gilt, die Kühlluft in der notwendigen Menge an die Wärmequellen des Generators heranzubringen. Für Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen wird die radiale Kühlung bevorzugt, wobei beidseitig angebrachte Ventilatoren die Luft ansaugen und teils über die Wickelköpfe, teils durch die Pollücken längs der Eisenbreite und durch die Kühlschlitze der Eisenpakete in den Abluftkanal durchdrücken. Ein paralleler Luftstrom tritt in das Rotorinnere und wird durch die zwischen den Kranzringen angebrachten Ventilatorschaufeln ebenfalls durch die Statorschlitze in den Abluftkanal gestossen.

Die thermische Beanspruchung einer Maschine wird üblicherweise gekennzeichnet durch die pro cm² der Statorbohrungsfläche abzuführende Wärme. Sie ist proportional dem Produkt Strombelag mal Stromdichte im Kupfer. Für Grossgeneratoren bewegt sich dieser Wert zwischen 1100 und 2200 $A^2/cm \cdot mm^2$, wobei die kleineren Werte für Langsamläufer und breite Maschinen gelten.

8. Die Erreger- und Hilfsmaschinen

Um das Jahr 1920 herum fand allgemein der Übergang von der Zentralerregung auf die Einzelerregung der Generatoren statt. Jeder Generator, sei er noch so klein, besitzt heute seinen eigenen Erreger. Bei den grossen Einheiten, etwa von 20 000 kVA und darüber, wird zur Ermöglichung einer stabilen Regulierung bis auf den Wert null des Erregerstromes herunter ein Hilfserre-

ger angebracht. Bei angemessener Spannungsreserve des Erregersystems werden damit Erregungsgeschwindigkeiten von ca. 250 bis 500 V/s und mehr erreicht, auch ohne Spezialausführung der Erregermaschinen. Mit modernen Wärmesektor- und Öldruckreglern und allenfalls noch mit der zusätzlichen Beeinflussung durch die Änderungsgeschwindigkeit der Generatorspannung lässt sich die «Exciter Response» und damit die Reguliergeschwindigkeit weitgehend steigern [4; 5]. Ob damit bei Parallelbetrieb über lange Leitungen die Stabilität auch bei Störungen stets gewährleistet ist, muss fallweise untersucht werden. Eventuell muss der Hilfserreger als Verstärkermaschine ähnlich wie Amplidyne, Metadyne oder Kaskadenerreger ausgeführt werden. Um die dynamische Stabilität auch bei Erdschlüssen und zweipoligen Kurzschlüssen zu erhalten, ist es notwendig, eine vollständige Dämpferwicklung W_D [6] einzubauen (Fig. 17).

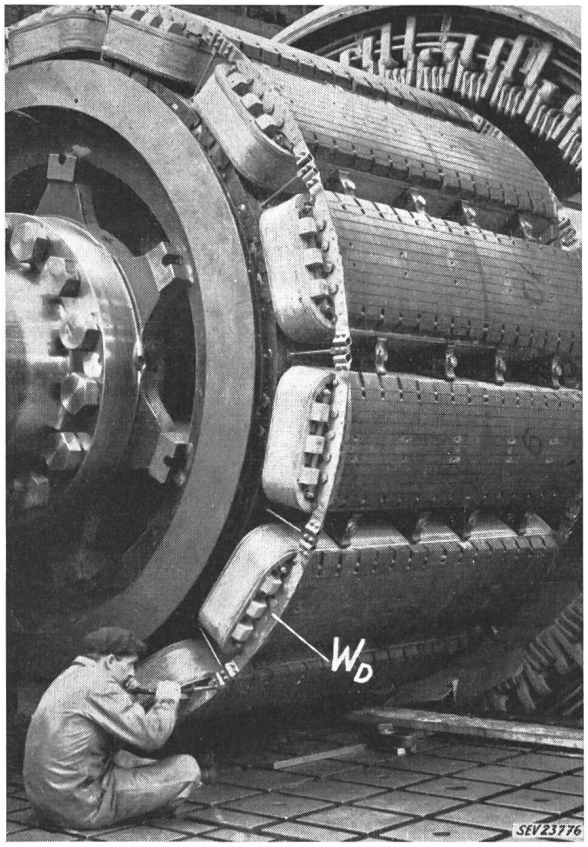


Fig. 17
Beispiel einer vollständigen Dämpferwicklung W_D am Rotor eines 63 000-kVA-Generators, 428 U./min, für das Kraftwerk Montpezat

Während vor Jahren noch viele Hilfseinrichtungen von der Welle des Generators mittels mechanischer Getriebe, wie Gestänge, Rädergetriebe oder Riemen angetrieben wurden, besteht heute die Tendenz, die Kraftübertragung soweit als möglich auf rein elektrischem Wege vorzunehmen. So wird der Zentrifugalpendel des Drehzahlreglers der Turbine durch einen Elektromotor, den sog. Pendelmotor angetrieben, der seinerseits von einem Dreiphasen-Pendelgenerator gespeist wird, der auf der Welle des Generators sitzt. Meist speist dieser nur den Pendelmotor und hat daher nur eine Leistung von 1 bis 3 kVA aufzubringen. Es werden zu diesem Zwecke verschiedene Anordnungen verwendet: Hat der Generator einen konstant erregten Hilfserreger, so kann dieser die Rolle des Pendelgenerators übernehmen, indem an seiner Ankerwicklung drei Schleifringe angebracht werden, die dann den Drehstrom zur Speisung des Pendelmotors liefern. Diese Anordnung spart eine besondere Maschine und vergrössert die Bauhöhe des Generator nur unmerklich; doch ist das Anwendungsgebiet dieser Anordnung auf Schnelläufer-Generatoren beschränkt, da sonst der Hilfserreger vielpolig ausgeführt werden müsste. Bei langsam laufenden Generatoren kommt daher ein besonderer Pendelgenerator in Frage. Er wird heute stets mit permanenten Magneten gebaut, so dass der Pendelmotor schon bei kleiner Drehzahl der Hauptwelle asynchron anläuft. Erst durch die Entdeckung der Aluminium-Nickel-Legierungen wurde ein Magnetstahl von hoher Stabilität gefunden, der sich im Maschinenbau bewährt hat. Versuche zeigen, dass der Pendelmotor schon bei ca. 17 % der Nenndrehzahl der Generatorwelle anläuft und sich bei ca. 50 % synchronisiert [7].

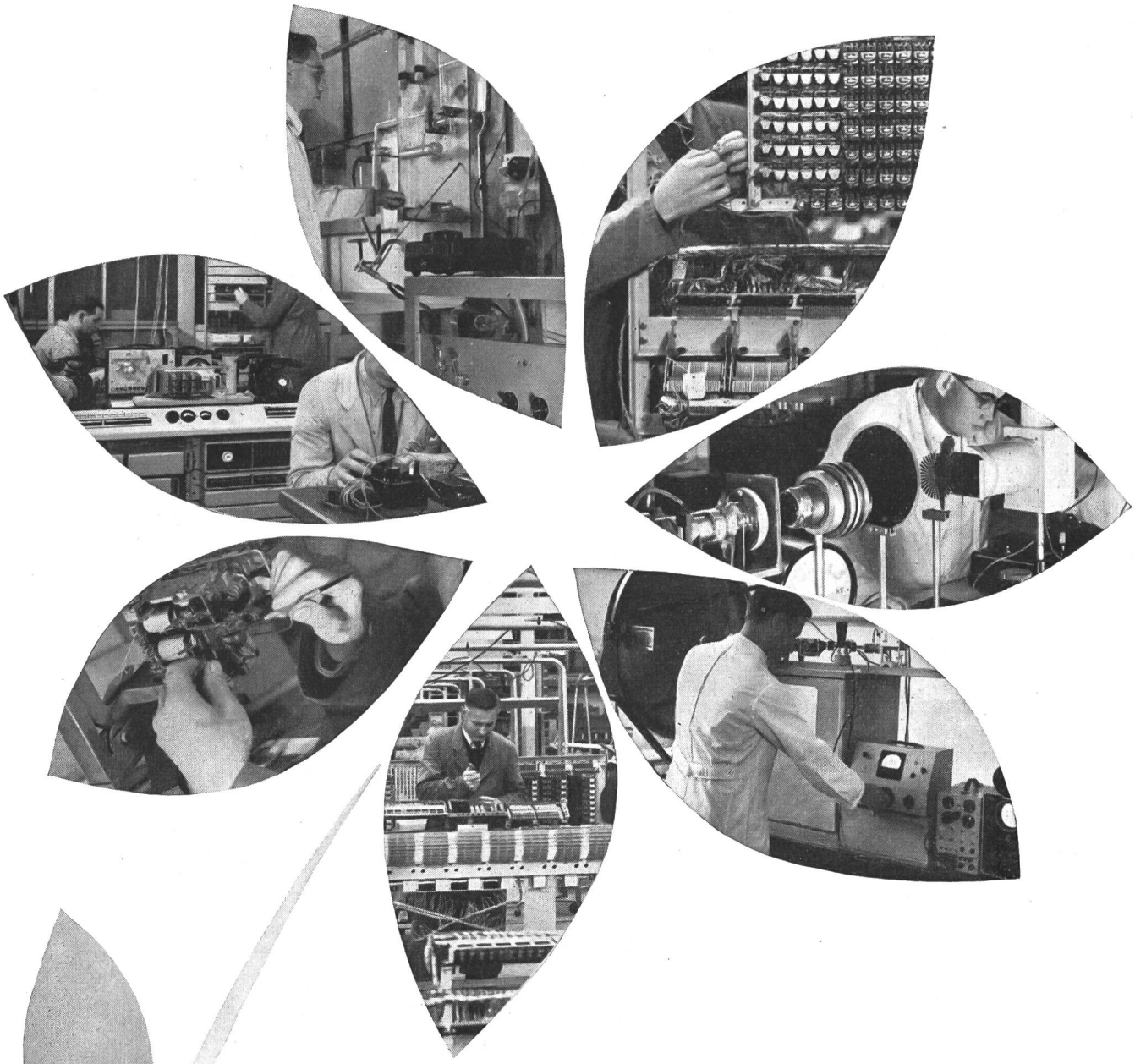
Bei grossen Langsamläufern besteht meist noch der Wunsch, Haupt- und Hilfserreger für eine höhere Drehzahl bauen zu können. Sie werden als besonderes Erregeraggregat durch einen Dreiphasenmotor angetrieben, den ein auf der Generatorwelle sitzender, etwas grösser bemessener Hilfsgenerator speist.

B) Die Turbogeneratoren

Mit dem Beginn des Baus von Dampfturbinen um die Jahrhundertwende hatten sich die Generatorenbauer mit der Konstruktion von Wechselstromgeneratoren für Drehzahlen von 3000 U./min und 3600 U./min zu befassen. Auch bei dieser Maschinengattung musste zuerst die Abklärung erfolgen, ob das Magnetsystem besser stillstehend oder rotierend gemacht werde. Nach einem ersten Vorschlag von *C. E. L. Brown* werden heute alle Turbomaschinen mit rotierender Magnetwicklung in einem zylindrischen Rotor gebaut. Die mit den Jahren zunehmende Ausnützung des Materials zeigen in Fig. 18 die Kurven des Gewichts pro kVA, das von ca. 4,5 im Jahre 1912 auf ca. 1 kg/kVA im Jahre 1954 gefallen ist. Starke Senkungen des Gewichts pro kVA ergaben sich 1933, als die MFO die direkte Kühlung, d. h. die Innenkühlung der Erregerwicklung, und 1945, als BBC die Kühlung mit Wasserstoff an Stelle von Luft einführte.

Das Problem des Durchganges ist bei den Turboeinheiten wesentlich verschieden von dem bei den hydroelektrischen Gruppen. Bei diesen kann die Schliesszeit des Schliessorgans nicht unter einen bestimmten Wert gehen, da das Medium Wasser inkompressibel ist und für die ganze Anlage gefährliche Druckstösse zu befürchten wären. Die Maschinen müssen daher für die ermittelte Durchgangsdrehzahl bemessen werden. Bei den Turbomaschinen kann die Schliesszeit, so kurz es die Antriebsverhältnisse erlauben, gewählt werden. Es ist daher überall üblich geworden, die Schliesseinrich-

Fortsetzung des allgemeinen Teils auf Seite 1015
Es folgen «Die Seiten des VSE»



100 Jahre Eidgenössische Technische Hochschule
25 Jahre Betriebswissenschaftliches Institut

Den Glückwunsch zum Jubiläum verbinden wir mit unserem Dank für die Leistungen zum Nutzen der Schweizerischen Wirtschaft.
Direktion und Personal der

ALBISWERK ZÜRICH A.G.

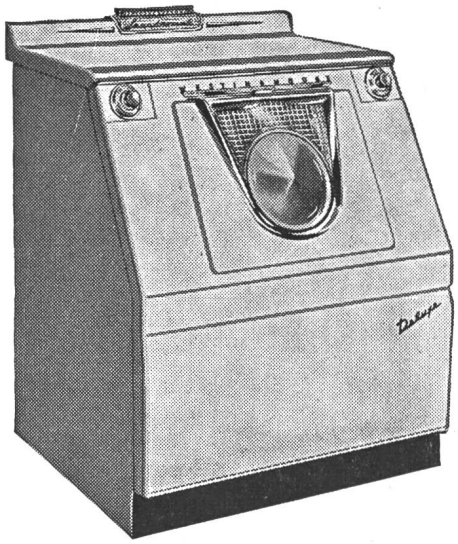
Interessant und gewinnbringend

ist der Verkauf des bewährten

Westinghouse

Waschautomaten mit oder ohne Heizung

Sie geniessen eine Verdienstmarge, die Ihren propagandistischen Aufwand rechtfertigt. Sie setzen sich für ein Produkt ein, welches unerreichte Vorteile bietet, wie:



1. Praktische Pultform, angenehme Höhe der Schauglastüre, kein Bücken zum Wäsche-Einfüllen. Die Türe kann jederzeit, auch bei vollem Wasserstand, geöffnet werden, ohne dass Wasser ausströmt. Westinghouse ist die bestgeschützte Maschine gegen kleine Kinder.
2. Eingebaute Wäschewaage, kombiniert mit der beliebten 3-Stufen-**Laugensparvorrichtung** für kleine oder grosse Wäschen.
3. Einfache und übersichtliche Einknopf-Bedienung, robuste Konstruktion, keine Störungen durch falsche Manipulationen möglich.
4. Im Gegensatz zu den meisten übrigen Waschmaschinen ist die Westinghouse mit einer sehr leistungsfähigen Schwinge ausgerüstet.
5. Die Arbeitsweise ist vollkommen automatisch. Jeder Waschvorgang kann auch individuell von Hand geschaltet und jeder Arbeitsprozess einzeln wiederholt, übersprungen oder unterbrochen werden.
6. Schräggestellte Grossraum-Trommel mit hitze- und laugenfester Emaillierung (Exklusivität).
7. Raffiniert aufgehängter und abgefederter Mechanismus, keine Abnützung der beweglichen Teile (Weltpatent). Die WESTINGHOUSE muss **nicht** verankert werden, sie benötigt auch **keinen** Betonsockel. Deshalb einfache und billige Installation und Verwendung der Maschine in Küche oder Badzimmer möglich.
8. Die WESTINGHOUSE mit Heizung ist an keinen Boiler gebunden. Die Betriebsspesen für Strom und Seifenmittel sind sehr niedrig.
9. Es können alle Stoff- und Gewebearten, also auch Wolle, Seide, Kunstfasern usw. einwandfrei und schonend gewaschen werden.
10. Zwanzigjährige Erfahrung im Automatenbau, deshalb grösste Betriebssicherheit, langjährige Garantie. WESTINGHOUSE ist die weitaus meistverkaufte automatische Waschmaschine.
11. Sie bedarf keiner Wartung und muss nicht gereinigt werden, dies geschieht automatisch.

Profitieren auch Sie davon, Ihren Kunden die Wohltat der Anschaffung eines Westinghouse Waschautomaten zugute kommen zu lassen, es lohnt sich. Verlangen Sie Angebot und unsere neuen Wiederverkaufsbedingungen.

Generalvertreter für die Schweiz:

W. SCHUTZ A.G., LAUSANNE

AV. RUCHONNET 3 TEL. (021) 22 50 75/76

Kühlschrank — Geschirrwaschautomat

Regionalagenten: AIGLE: Straggiotti & Cie. BASEL: Alfred Mutz Totentanz 9. BERN: Eisenhut-Gautschy H., Genfergasse 15. BIEL: Walter Baumann S. à r. l., 11, rue Centrale. CHUR: Willi E. & Sohn, Ottostrasse 25. FRIBOURG: Entreprises Electriques Fribourgeoises, 25, boulevard Pérolles. GENÈVE: Bornet S. A., 8, rue de Rive. LAUSANNE: Gétaz, Romang, Ecoffey S. A., Terreaux 21. LE LOCLE: J. Pisoli, représentant. LUGANO: Francesco Dozio, corso Pestalozzi. MARTIGNY-BOURG: René Rossa, installations sanitaires. MONTREUX: Société Romande d'Electricité. MORGES: L. Cauderay S. A. NYON: Tavelli & Bruno S. A., rue J.-Olivier; Baily Louis, 15, place Saint-Martin. OLTEN: K. Schwarzer, Handelshof. ORBE: Ramelet S. A., 3, rue Centrale. PORRENTRUY: Antoine Hertling & fils, rue de l'Eglise. STE-CROIX: Philippe Cuendet, l'Auberson. ST. GALLEN: P. A. Züllig. Katharinengasse 8. SIERRE: Crettol & Clivaz, Montana. SONCEBOZ: Althaus S. A., Manufacture d'Appareils Electriques. VEVEY: Société Romande d'Electricité. WINTERTHUR: K. Präg, Obertor 27. ZÜRICH, LUZERN, ZUG und SCHAFFHAUSEN: H. J. Morel AG., Beethovenstrasse 18, Zürich.

Fortsetzung von Seite 998

Die Entwicklung im Bau von Grossgeneratoren in der Schweiz in den vergangenen 50 Jahren (Fortsetzung)

tungen der Dampfturbinen mit zusätzlichen Sicherheitsvorrichtungen zu versehen und die Turbogeneratoren nur für eine Durchgangsdrehzahl

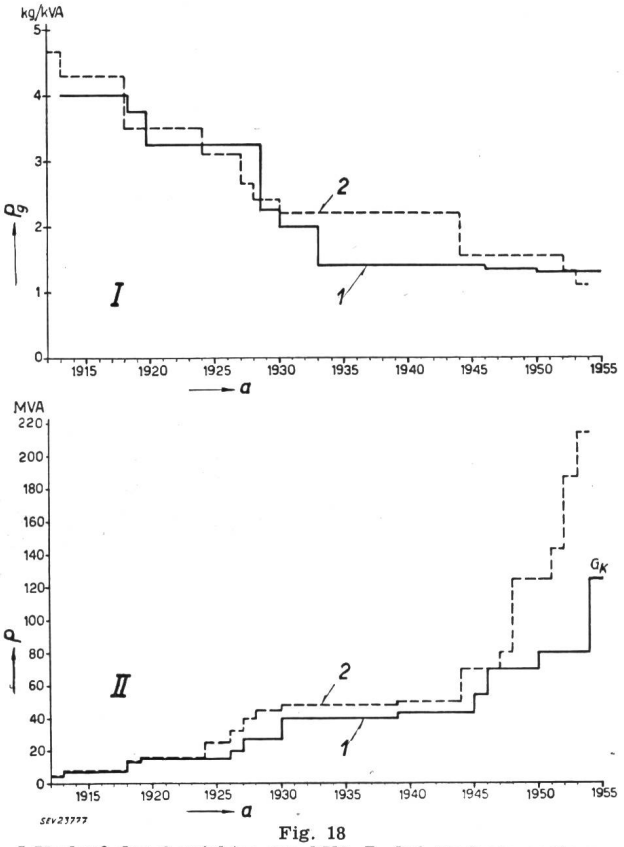


Fig. 18
I Verlauf des Gewichtes pro kVA P_g bei Turbogeneratoren
II Verlauf der jeweils grössten ausgeführten Einheitsleistungen *P* für die Jahre 1910...1955
a Bestelljahr; G_K als Kurzschluss-Generator ausgeführt
1 Kurven MFO; *2* Kurven BBC

von 120...125 % zu bemessen bzw. sie mit dieser Drehzahl während eines Schleuderversuchs von 2 min Dauer laufen zu lassen. Die Leistungen der zu einer bestimmten Zeit jeweils grössten von den schweizerischen Firmen ausgeführten Maschinen sind im unteren Teil der Fig. 18 eingetragen.

Die Einheitsleistung der Turbogruppen, die in Europa im Jahre 1940 noch in der Grössenordnung von 50 bis 70 000 kVA lag, ist zwischen 1945 und 1950 auf 100 000 bis 140 000 kVA angestiegen und hat heute den Wert von 200 000 kVA überschritten.

1. Die Konstruktion des Stators

Die Turbostatoren sind im Prinzip gleich wie bei den Maschinen mit ausgeprägten Polen und werden heute allgemein als Schweisskonstruktion ausgeführt. Bei grossen achsialen Eisenlängen wird die Kühlluft der mittleren Partien des Blechkörpers getrennt zu- und abgeführt. In Fig. 19 wird

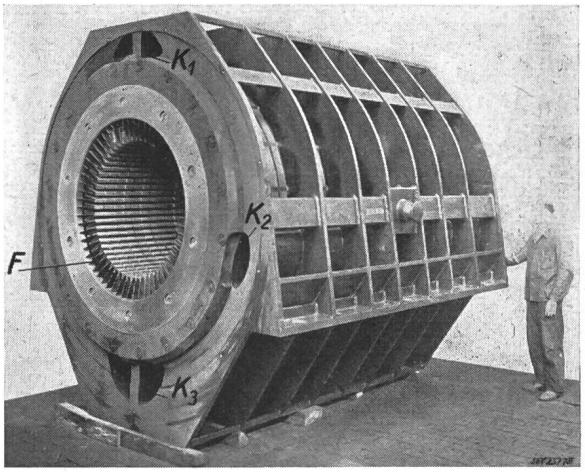


Fig. 19
Geschweisster Stator eines 60 000-kVA-Turbogenerators
Bezeichnungen siehe im Text

am Beispiel eines Generators für 60 000 kVA, 3000 U./min der geschweisste Stator gezeigt, bei welchem die mittlere Kammer drei besondere Luftzuführungskanäle K_1, K_2, K_3 besitzt, deren Öffnungen im Endflansch des Stators deutlich sichtbar sind.

Bei der Verwendung von Wasserstoff zur Kühlung muss das Gehäuse explosionssicher ausgeführt und müssen die Kühler in die Gehäusekanäle direkt eingebaut werden (Fig. 26).

2. Die Statorwicklung und ihre Isolation

Die Stäbe werden in offene Nuten gelegt. Die Spulenköpfe wurden zuerst konzentrisch in 3 und 2 Lagen, heute aber allgemein als Evolventen in 2 Lagen ausgeführt. Gegenüber den Maschinen mit ausgeprägten Polen für Antrieb durch Wasserturbinen wurden bei den Turbomaschinen die Eisenlängen mit steigender Leistung relativ gross. Zur Reduktion der dielektrischen Verluste wurde Asphaltlack als Bindemittel für die aus Micafolien hergestellte Isolation verwendet. Bei Maschinen mit stark variabler Last zeigten sich eigenartige

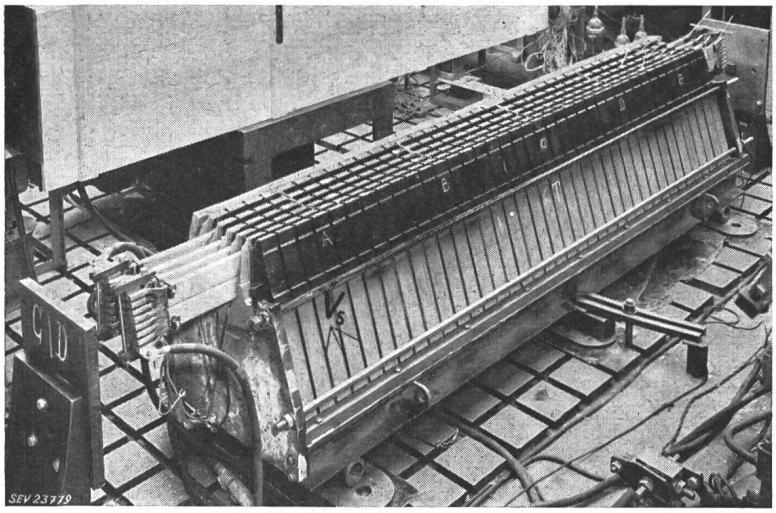


Fig. 20
Sektormodell eines Turbostators für Dauerversuche an Stabisolationen
Bezeichnungen siehe im Text

Schrumpferscheinungen [8]. Sorgfältige Versuche in einem Sektor eines Turbostators (Fig. 20) zeigten, dass nach relativ wenigen Erwärmungsspielen die Isolation der Nutenstäbe S_o und S_u aus Asphaltmicafolium in den Stator hineingezogen wurde, wo sie sich in den Ventilationsschlitzen V_s staute. Die

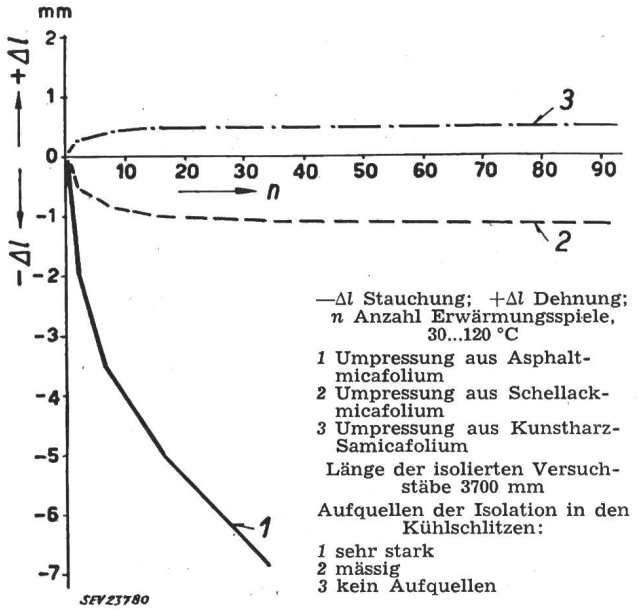


Fig. 21
Längenänderung der verschiedenen Isolationen in Funktion der Anzahl Erwärmungsspiele

Lösung dieses Problems ergab sich durch Verwendung eines neuen, mit Kunstharz geklebten Micafoliums [9] (Fig. 21). Ein Problem der nahen Zukunft bei den grössten Turboeinheiten ist die Heranführung des Kühlmediums bis an die Leiteroberfläche in ähnlicher Weise wie es für die Rotorwicklungen geschehen ist.

3. *Die Rotorkonstruktionen*

Die Wicklung ist in Nuten des Rotorzylinders gelegt. Die vorstehenden Spulenköpfe werden durch ringförmige Kappen gehalten. Diese wurden zuerst aus Bronze, bzw. magnetischem Stahl, seit ca. 1920 aber allgemein aus unmagnetischem Stahl hergestellt. Seit 1934 wendet die A.-G. Brown, Boveri & Cie. auch für die grössten Einheiten die mehrteilige Bauart an (Fig. 22), bei welcher die verschiedenen Rotorballen durch eine zentrale Welle zusammengehalten werden, die in die beiden Wellenenden eingeschraubt ist.

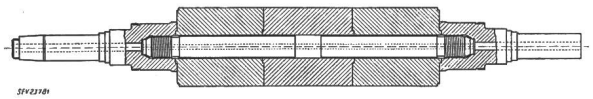


Fig. 22
Mehrteiliger Turborotor

Bei der Montage wird beim Anziehen die zentrale Welle durch die Bohrung mit Dampf aufgeheizt. Die Mehrteiligkeit der Rotoren hat den Vorteil, dass die einzelnen Stahlstücke entsprechend kleiner und damit auch besser giessbar, schmiedbar und kontrollierbar werden. Die MFO hat daher auch während der Kriegs- und ersten Nachkriegszeit ihre Rotoren mehrteilig ausgeführt, wobei die verschiedenen Ballen durch aussen am Umfang verteilte, warm eingezogene Klammern zusammengehalten waren. Als die Stahlwerke wieder in der Lage waren, ganze Rotoren beliebiger Grössen aus einem Stück einwandfrei herzustellen, ist die MFO wieder zur einteiligen, konstruktiv einfacheren Bauart zurückgekehrt.

4. *Die Rotorwicklungen*

Die Rotorwicklung besteht aus Flachkupfer. Die einzelnen Leiter werden allgemein durch Zwischenlagen aus kunstharzgetränktem Asbest oder Glasgewebe isoliert. Zur Isolation gegen die Nutenwandungen werden die Leiter in vorgeformte Isolierkanäle aus Asbest oder Glasgewebe mit Kunstharz eingelegt.

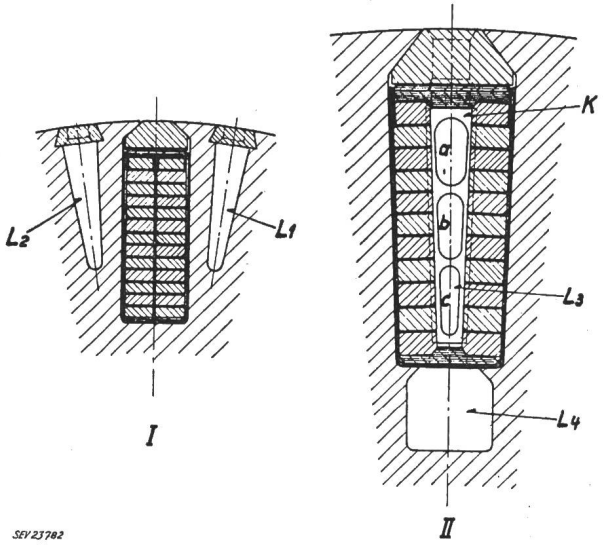


Fig. 23
Kühlung von MFO-Rotorwicklungen
I indirekte Kühlung
II direkte (Innen-)Kühlung
Bezeichnungen siehe im Text

Eines der Hauptprobleme des Turbogeneratorenbaues ist die Kühlung des Rotors. Wie die Entwicklung bei den Turborotoren der Maschinenfabrik Oerlikon vor sich gegangen ist, zeigt Fig. 23.

Die seit ca. 1930 von den meisten Firmen allgemein für grössere Leistungen und Luftkühlung benützte Bauart entsprach der Fig. 23-I. Die Rotornute ist mit den Leitern voll gefüllt. Seitlich sind in den Zähnen zwei weitere Nuten L_1 und L_2 ausgehobelt, in denen die Kühlluft zirkuliert. Die Verlustwärme der Wicklung muss durch die Nutenisolation und das Rotoreisen fliessen, bevor sie von der Kühlluft aufgenommen werden kann.

Im Jahre 1933 ist die Maschinenfabrik Oerlikon zur sog. Innenkühlung der Rotorwicklung übergegangen (Fig. 23-II). Das Kühlmedium wird nun direkt an den nackten Leiter, d. h. an die Wärmequelle selbst herangeführt. Durch isolierte Keile *K* mit den Durchgangsöffnungen *a*, *b* und *c* werden die nackten Leiter der Rotorwicklung an die isolierten Nutenwände angepresst. Dadurch entsteht in der Mitte zwischen den beiden Leiterstapeln ein

Kanal L_3, in welchen von den beiden Enden des Rotors her Kühlluft hineingepresst wird. Durch einen am Nutengrund ausgesparten weiteren Kanal L_4 wird dem mittleren Teil des Kanals L_3 getrennt Kühlluft zugeführt.

Durch diese vor 22 Jahren mit Erfolg eingeführte Kühlungsart wurde ein wesentlicher Teil des später bei der Einführung der Wasserstoffventilation mit Innenkühlung erzielten Fortschritts vorweggenommen.

Eine ähnlich wirkende Bauart der Rotornuten hat *O. Hess* [10] angegeben. Sie ist in Fig. 24 dargestellt. Der am Nutengrund sich befindende Kanal dient auch hier dazu, bei langen Maschinen die Luft direkt zu den mittleren Rotorpartien zu führen. Hess erwähnt, dass bei dieser Lösung das durchfliessende Medium 75 bis 80 % der erzeugten Wärme abzuführen vermöge.

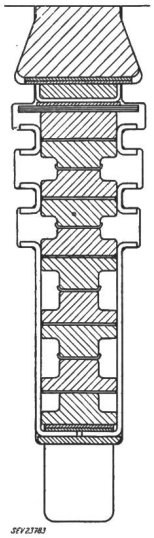


Fig. 24
Rotornuten von BBC-Turbomaschinen mit Wasserstoffkühlung

Um den Kriecheffekt der Rotorwicklungen zu verhindern, der bei Maschinen mit stark variabler Last auftreten kann, muss entweder die Rotorwicklungstemperatur tief gehalten oder als Material hiefür die mechanisch wesentlich stärkere Kupfer-Silber-Legierung verwendet werden.

5. *Die Ventilation*

Es werden heute allgemein die Turbogeneratoren jeder Grösse mit Eigenventilation gebaut. Beidseitig des Rotors sind Ventilatoren angebaut, die je nach dem Erbauer des Generators der Achsial- oder Radialbauart angehören. Wie bei den durch Wasserkraft getriebenen Generatoren wurde lange die Durchzugventilation benützt, eventuell unter Verwendung von Luftfiltern in der Frischluftzuführung. Bei den grösseren Maschinen und bei Wasserstoffkühlung wird die geschlossene Zirkulation angewendet, und die Kühler werden in den Mantel des Statorgehäuses eingebaut.

6. *Die Kühlung mit Wasserstoff*

Der Hauptvorteil, welcher in der Verwendung von Wasserstoff zur Kühlung von Maschinen liegt, ist bekanntlich sein geringes spezifisches Gewicht, welches die Ventilationsverluste auf ca. 10 % des Wertes bei Luft reduziert. Die mit Wasserstoff gekühlten Maschinen müssen jedoch möglichst dicht und ihre Gehäuse so stark bemessen sein, dass sie einer Explosion eines Luft-Wasserstoffgemisches standhalten können. Die Bildung eines explosiven Gemisches wird dadurch vermieden, dass vor der Füllung mit Wasserstoff eine Füllung mit Kohlensäure zum Vertreiben der Luft erfolgt und dadurch, dass während des Betriebes ständig ein gewisser, kleiner Überdruck des Wasserstoffs von ca. 350 mm Wassersäule gegenüber der umliegenden Atmosphäre eingehalten wird. Ein weiterer Vorteil solcher Maschinen ist die Möglichkeit der Überlastung durch Erhöhung des Wasserstoffdruckes auf 1...2 kg/cm².

Eine gewisse konstruktive Komplikation dieser Generatoren liegt in der Notwendigkeit, die Welle möglichst gasdicht aus dem Gehäuse herauszuführen.

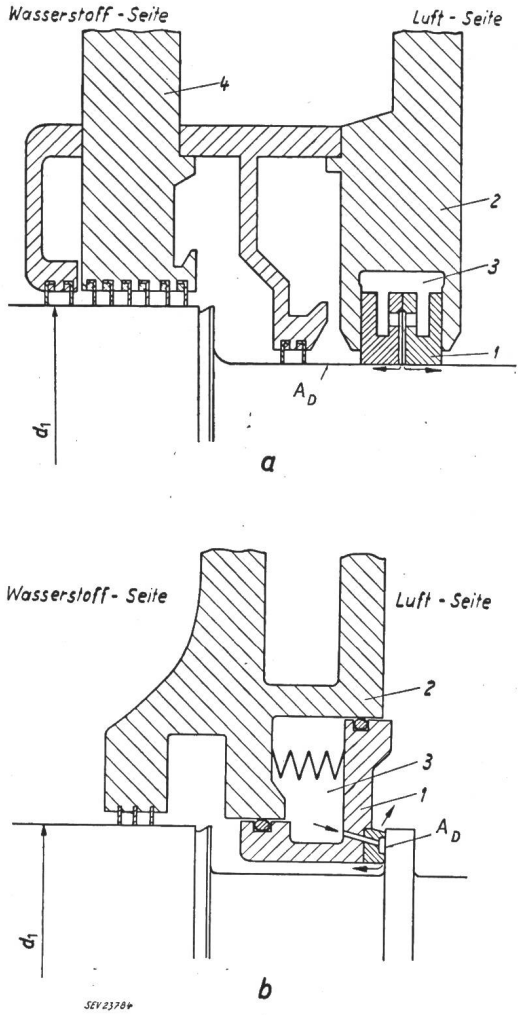


Fig. 25
Grundsätzliche Arten der Wellendichtungen bei wasserstoffgekühlten Turbogeneratoren
a Dichtungsfläche zylindrisch
b Dichtungsfläche ebener Scheibenring
A_D Dichtungsfläche
d_1 Durchmesser der Generatorwelle

Seit einigen Jahren werden auch in der Schweiz beide möglichen Arten von Wellendichtungen angewendet. Das rein Grundsätzliche ihrer Ausführungen ist in Fig. 25 dargestellt. Bei beiden Dichtungsarten wird an einer mit möglichst kleinem Spiel zwischen ruhendem und laufendem Teil ausgeführten Stelle ein durch eine starke Ölströmung erzeugter Ölvorhang gelegt. Bei der Lösung, die in Fig. 25*a* gezeigt ist, wird als Dichtungsstelle eine zylindrische Fläche A_D der Generatorwelle selbst benützt und bei der in Fig. 25*b* dargestellten Lösung liegt die Dichtungsfläche A_D in einer zur Welle senkrechten Ebene. Bei der Lösung nach Fig. 25*a* werden die Bewegungen der Welle senkrecht zu ihrer

Achse durch das Gleiten des Stückes *1* im Gehäuseteil *3* zugelassen. Bei der Lösung nach Fig. 25*b* sind die achsialen Bewegungen der Achse ermöglicht durch Gleiten des Teils *1* im Gehäuseteil *4*. BBC benützt eine konstruktive Lösung nach dem Prinzip der Fig. 25*a*, die MFO eine konstruktive Ausführung nach dem Prinzip der Fig. 25*b*.

In Fig. 26 sind bei einem 80 000-kVA-Turbogenerator mit Wasserstoffkühlung die an jedem Ende des Statorgehäuses eingebauten zwei Kühler K_1, K_2 ersichtlich.

Die Erregung

Bei kleinen und mittleren Maschinen werden die Erreger in der Regel fliegend angebaut. Bei grösseren Leistungen wird eine zweilagerige Erregermaschine über eine Zahnrad- oder eine ähnlich wirkende Kupplung angetrieben. Bei den grössten Einheiten wird oft die Erregung durch eine getrennte Erregerumformergruppe geliefert.

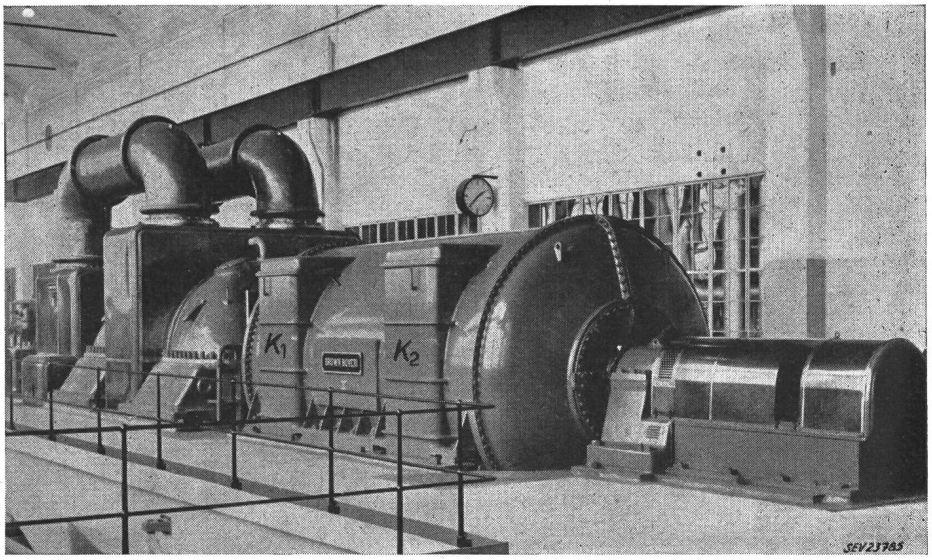


Fig. 26
80 000-kVA-Turbogenerator mit Wasserstoffkühlung
Bezeichnungen siehe im Text

C) Die wirtschaftliche Bedeutung des Grossgeneratorenbaus für die Schweiz

Je grösser die Maschinen, um so mehr sind sie materialintensiv, d. h. um so grösser wird der Anteil, den der Preis des hiefür notwendigen Materials im Aufbau des Gesamtpreises einnimmt. Nun besitzt die Schweiz weder Kupfer- noch Eisengruben, und die Dynamobleche werden in den grossen ausländischen Walzwerken hergestellt. Man kann schätzen, dass die drei schweizerischen Firmen, die Grossgeneratoren herstellen, jährlich solche Objekte im Totalbetrag von ca. 80 bis 100 Millionen Franken abliefern. Es werden hiefür ca. 3500 Betriebsangehörige beschäftigt sein, und zwar vom Ingenieur, Konstrukteur bis zum Hilfsarbeiter gerechnet. Man sieht daraus, dass grosse Beträge an Löhnen und Salären in der Schweiz bleiben und zur Stärkung unserer Volkswirtschaft beitragen. Das schweizerische Interesse beschränkt sich aber nicht nur auf diese materielle Seite. Seit der Einführung der elektrischen Hochspannungsübertragung ist der Name schweizerischer Firmen mit dem Bau von Generatoren verbunden gewesen. Glücklicherweise hat die Schweiz doch einen Rohstoff aufzuweisen: das Wasser ihrer Berge. Beim Ausbau der schweizerischen Wasserkräfte haben unsere Generatorenbauer sich einen Ruf verdient, der weit über unsere Grenzen drang und namhafte Bestellungen aus dem Ausland einbrachte. Es ist unsere Aufgabe sowie die Aufgabe aller kommenden Generationen, diese Stellung immer wieder neu zu erkämpfen.

Literatur

[1] *Müller, K. E.:* 50 Jahre Drehstrom-Kraftübertragung. Bull. Oerlikon Bd. —(1941), Nr. 231, S. 1437...1443; Nr. 232, S. 1445...1452.
[2] siehe Bull. Oerlikon Bd. —(1948), Nr. 271, S. 1836, Fig. 12.
[3] *Wellauer, M.:* Eine neue Anordnung zur Prüfung der Windungsisolation von Maschinenspulen. Bull. Oerlikon Bd. —(1944), Nr. 251, S. 1624...1626.
[4] *Bolleter, H.:* Einrichtungen zur Verbesserung der Spannungsregelung von Synchrongeneratoren. Bull. Oerlikon Bd. —(1954), Nr. 307, S. 96...102.
[5] *Spiess, H.:* Dispositifs nouveaux pour l'augmentation de la vitesse de réglage des alternateurs synchrones. Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 3, Rapp. 331, 15 S.
[6] *Laible, Th.:* Influence de différentes constructions d'amortisseurs et des pôles massifs sur les constantes des alternateurs à pôles saillants. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, Bd. 2, Rapp. 111, 15 S.
[7] *Seefeld, F.:* Pendelgeneratoren. Bull. Oerlikon Bd. —(1952), Nr. 291, S. 7...11.
[8] *Abegg, K.:* L'effet de creeping de l'isolation statorique des machines électriques et les moyens d'y remédier. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 2, Rapp. 140, 18 S.
[9] siehe [8] CIGRE 1954, Rapp. 140, S. 14, Fig. 12.
[10] *Hess, O.:* La construction de turbo-alternateurs de grande puissance. Conférence des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 2, Rapp. 128, 9 S.

Adresse des Autors:
H. Puppikofer, Direktor der Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.