Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 18

Artikel: Elektrische Grossmaschinen gestern, heute und morgen

Autor: Abegg, K. / Rauhut, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915850

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: 09.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Elektrische Grossmaschinen gestern, heute und morgen [1])

Von *K. Abegg* und *P. Rauhut*, Baden

621.313.12:62—181.2

Die Entwicklung von elektrischen Grossmaschinen wird am Beispiel des Turbogenerators dargestellt. Der ständige Anstieg des Bedarfs an elektrischer Energie macht den Bau von immer grösseren Einheiten entsprechend einer Verdoppelung der Leistung nach je 10 Jahren nötig. Dies ist nur durch eine dauernde Weiterentwicklung möglich, die den stetigen Zwang zur Auffindung neuer Methoden auferlegt und immer wieder zu Pionierleistungen führt. Einen wesentlichen Beitrag zur Leistungssteigerung durch bessere Ausnutzung der Generatoren lieferten die Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Kühlung. Durch Übergang vom Kühlmittel Luft auf Wasserstoff und neuerdings auf Wasser konnten die Voraussetzungen zur Herstellung von Grossgeneratoren geschaffen werden, deren Leistung sich auch in den nächsten Jahren laufend vergrössern wird.

Le développement des grandes machines électriques est démontré à l'exemple du turbo-alternateur. L'accroissement continu de la demande d'énergie électrique nécessite la construction d'unités toujours plus grandes, correspondant à un dédoublement de la puissance au cours de chaque décade. De tels progrès ne peuvent toutefois être réalisés que par des développements continus, impliquant l'obligation de rechercher des méthodes inédites afin de réaliser sans cesse des performances de pionniers. Une contribution sensible à l'accroissement de la puissance par une utilisation plus efficace des générateurs est fournie par les travaux de développement dans le domaine du refroidissement. En substituant à l'air à titre d'agent réfrigérant de l'hydrogène, et même récemment de l'eau, on est parvenu à établir les conditions indispensables à la fabrication de grands générateurs dont la puissance pourra également augmenter au cours des années prochaines.

Das Problem im Grossmaschinenbau besteht in der Notwendigkeit, immer grössere Leistungen aus einem bestimmten Maschinenvolumen herauszuholen. Eine Möglichkeit ist ohne Zweifel die Erhöhung der Drehzahl bis an die mechanisch zulässigen Grenzen; hier sind jedoch Limiten durch die Netzfrequenzen gesetzt: 3000 U./min für 50-Hz-Netze (Europa) beziehungsweise 3600 U./min für 60-Hz-Netze (USA). Weitere Leistungssteigerungen für Synchronmaschinen sind möglich:

a) Durch Vergrösserung von Durchmesser und Länge des Rotors bis zu den mechanisch zulässigen Grenzwerten (Materialbeanspruchung, Laufruhe);
b) Durch Erzeugung eines möglichst starken Hauptfeldes mit minimalen Wicklungsvolumen im Rotor;
c) Durch Steigerung von Spannungen und Strömen im Stator bei möglichst geringem Raumbedarf.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass diesen Möglichkeiten im Grossmaschinenbau immer grösste Beachtung geschenkt wurde. Zur Beurteilung des Fortschrittes auf diesem Gebiet bieten sich folgende Kenngrössen an:

a) Luftspaltinduktion B_δ als Mass für die magnetische Ausnützung;
b) Strombelag A in Ampère pro cm Bohrungsumfang als Mass für die Ankerrückwirkung;
c) Stromdichte S in Ampère pro mm² Leiterquerschnitt als Mass für die Ausnützung der Wicklungen in Stator und Rotor;
d) Produkt AS des Stators als Mass für die thermische Ausnützung des Wicklungsraumes;
e) Ausnützungsziffer c;
f) Leistungsgewicht g_L in kp/kVA.

Der Bau elektrischer Grossmaschinen steht in engem Zusammenhang mit dem Bedarf an elektrischer Energie. Dass dabei die Synchronmaschine eine ganz besondere Rolle spielt, kommt nicht von ungefähr: Sie ist die einzige Maschine, welche in einfacher Weise die Lieferung von Wirk- und Blindleistung gestattet und damit allen Belastungsarten der Netze, den Ohmschen, induktiven und kapazitiven Belastungen, Rechnung tragen kann. Es ist daher nicht verwunderlich, dass ihre Entwicklung eng mit der Produktion elektrischer Energie, mit dem Kraftwerkbau, verknüpft ist. In Fig. 1 ist die Entwicklung der Erzeugung elektrischer Energie darstellt. Das Aufkommen der Elektrizität um die Jahrhundertwende hatte zunächst einen wahren Hunger nach diesem neuen, komfortablen Energieträger ausgelöst. Ab etwa 1920 stabilisierte sich der jährliche Anstieg des gesamten Energiebedarfes der Welt auf rund 7 % entsprechend einer Verdoppelung in 10 Jahren. Diesem permanenten Anstieg des Energiebedarfes muss die total installierte Leistung der Versorgungsnetze angepasst werden. Grundsätzlich kann dieser Ausbau durch Aufstellung weiterer Generatoren gleicher Grösse in ausbaufähigen Kraftwerken erfolgen, ein Vorgehen, das in bestimmten Perioden auch tatsächlich angewandt wird. Da jedoch diese Praxis auf die Dauer zu grossem Aufwand führen würde, ergibt sich die Notwendigkeit, die Kapazitätserweiterungen durch weniger Einheiten von grösserer Leistung zu erreichen. Es hat sich nämlich gezeigt, dass für den wirtschaftlichen Betrieb der Netze die Einheitsleistungen in den Kraftwerken in einem angemessenen Verhältnis zur Netzkapazität bleiben müssen, was dazu zwingt, die Einheitsleistungen der Generatoren angenähert proportional dem Energiebedarf zu steigern. Dass die Planung diese Erkenntnis tatsächlich berücksichtigt, geht aus der Prognose der EBASCO [2]) für die nächsten 15 Jahre hervor: Auch sie prophezeit eine Verdoppelung der Einheitsleistungen in 10

[1]) Vortrag, gehalten von K. Abegg am 2. Mai 1970 anlässlich der Frühjahrstagung der Schweiz. Physikalischen Gesellschaft in Luzern.
[2]) EBASCO = Ebasco Services, Inc., USA

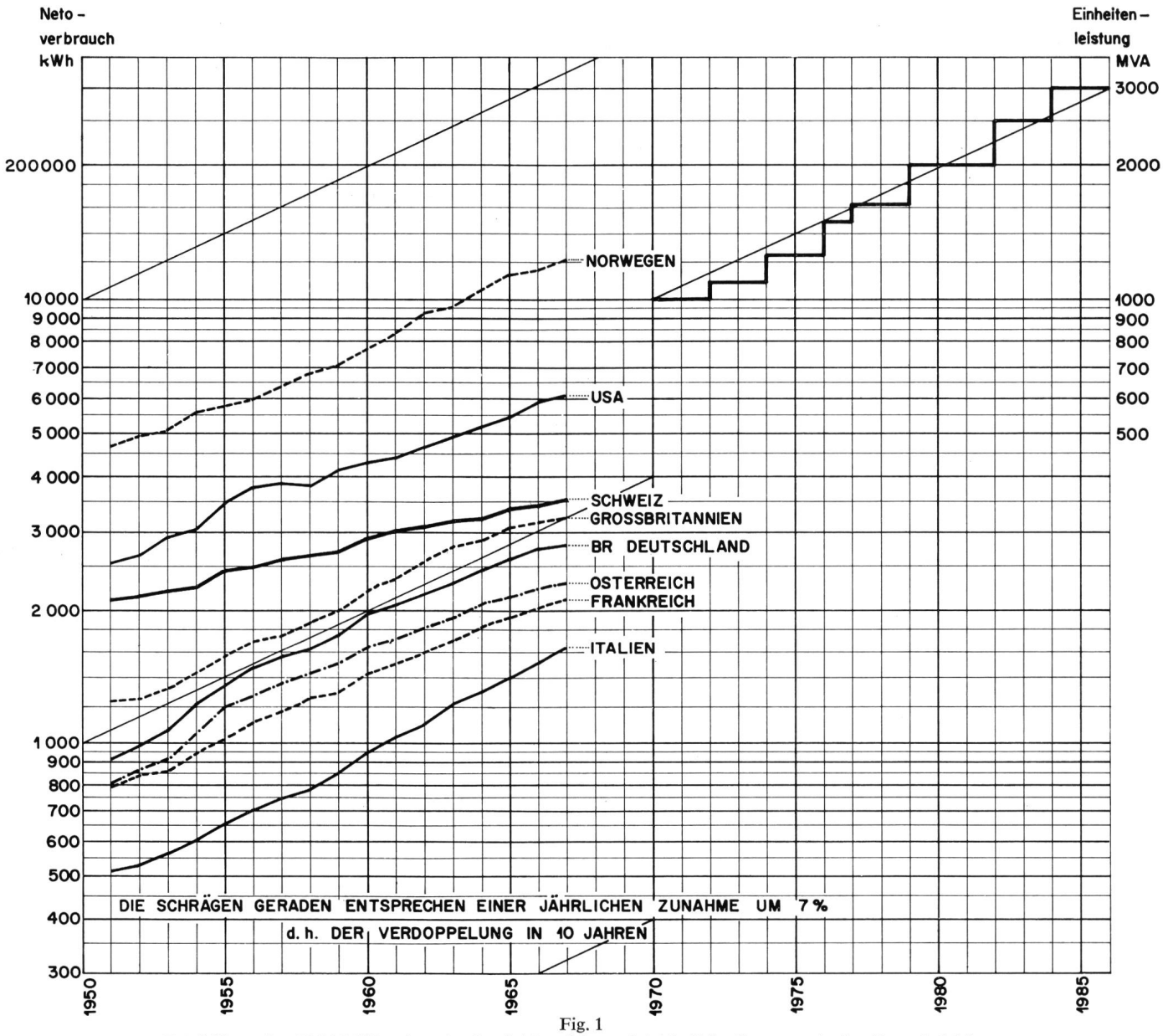


Fig. 1

Entwicklung des Elektrizitätsverbrauchs der letzten Jahre und der in Zukunft zu erwartenden Generatorleistungen

Skala links: Nettoverbrauch elektrischer Energie für Haushalt, Gewerbe, Landwirtschaft, Industrie und Bahnen von 1951 bis 1967 pro Einwohner.

Skala rechts: Entwicklung des Bedarfes an grössten Einheitsleistungen von Generatoren in den Jahren 1970 bis 1980 gemäss Prognose der EBASCO, USA

Jahren (Fig. 1). Die statistischen Unterlagen von Brown Boveri bestätigen, dass die Entwicklung der Turbogeneratoren und ihrer Einheitsleistungen im erwähnten Sinne erfolgte (Fig. 2). Die Kurve *P* veranschaulicht den Bau von Turbogeneratoren grösster Leistung. Abgesehen von der Stagnation während der Wirtschaftskrise der dreissiger Jahre und im Zweiten Weltkrieg übertrifft der Anstieg der Einheitsleistungen sogar die Verdoppelung in 10 Jahren, da es gelang, in wesentlichem Ausmass auch an der Deckung des Energiebedarfes in den USA mitzuwirken. Dass dabei die Entwicklung diesem Trend Rechnung tragen musste, zeigt Kurve *c* für die Ausnutzungsziffer, die seit Ende des Krieges sprungweise ziemlich genau dem Anstieg der Einheitsleistungen folgen konnte. Im Verlauf der Ausnützungskurve ist deutlich eine Sättigung bei den luftgekühlten Maschinen im Leistungsbereich 70...80 MVA nach dem letzten Krieg zu erkennen; die notwendige Leistungssteigerung in den Nachkriegsjahren und die entsprechende Verbesserung der Ausnützung konnten nur dank intensiver Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der Kühlung erreicht werden, was durch den sprungweisen Anstieg der Ausnützungsziffer beim Übergang zur Wasserstoffkühlung klar zum Ausdruck kommt. Parallel zu dieser Entwicklung ging selbstverständlich eine substantielle Reduktion des Leistungsgewichtes g_L auf angenähert ⅛ während der letzten 60 Jahre.

Am Beispiel des Turbogenerators, welcher eine immer grössere Rolle in der Deckung des Energiebedarfes spielt und die eklatantesten Entwicklungsresultate aufweist, wird im folgenden versucht, die konstruktiven und technologischen Entwicklungsstufen herauszuschälen, Entwicklungsstufen, welche gestattet haben, der ständigen Forderung nach Leistungssteigerung Folge zu leisten und — so ist zu hoffen — auch in Zukunft Folge leisten zu können. Vor allem die folgenden Gebiete und deren planmässige Förderung haben dazu beigetragen, dass bis heute der nach wie vor steigende Leistungsbedarf gedeckt werden konnte:

a) Kenntnis der Funktionsweise und der inneren Zusammenhänge der Maschine sowie ihres Verhaltens im Netzbetrieb;

b) Fortschritte auf dem Gebiet der Metallurgie sowie die Kenntnis neuer Werkstoffe und deren zulässiger Beanspruchung in der Maschine;

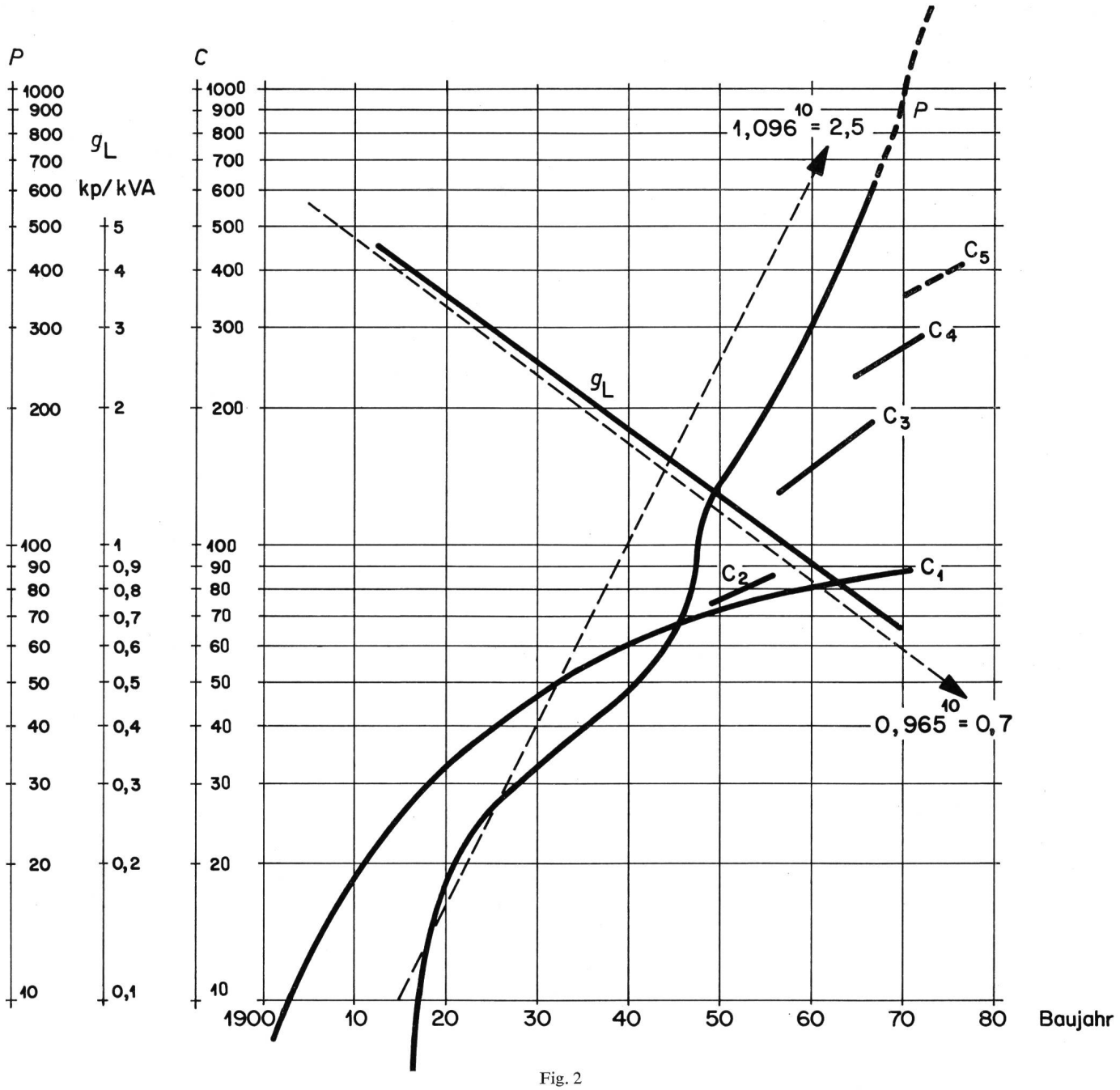


Fig. 2

Entwicklung der Turbogeneratoren bei Brown Boveri

C Ausnutzungsziffer, beginnt mit dem ersten zweipoligen Turbogenerator der Welt. Der stufenweise Anstieg der Ausnutzungsziffer zeigt, dass das Problem der Steigerung der Leistung pro aktives Volumen durch etappenweisen Übergang auf immer wirksamere Kühlungsart gelöst werden konnte

P jeweilige Leistung des grössten gebauten Generators
C_1 Ausnutzungsziffer bei Luftkühlung
C_2 Ausnutzungsziffer bei H_2 indirekt 0,035...1 atü
C_3 Ausnutzungsziffer für Rotor direkt H_2, 2 atü, Stator direkt H_2O
C_4 Ausnutzungsziffer für Rotor direkt H_2, 3 atü, Stator direkt H_2O
C_5 Ausnutzungsziffer für vollständige H_2O-Kühlung
g_L Leistungsgewicht

c) Das komplexe Gebiet der Wicklungstechnik mit ihren Verflechtungen mit der Hochspannungstechnik, mit der Chemie und der Verfahrenstechnik;

d) Verlustforschung, die ermöglichte, Entstehungsorte und Grösse der in der Maschine entstehenden Verluste zu ermitteln und Wege zu deren Verminderung zu finden;

e) Das Gebiet der Kühlung, deren Intensivierung ganz wesentlich zur Steigerung der Maschinenausnützung beiträgt.

Um den Rahmen dieses Überblickes nicht zu sprengen, wird davon abgesehen, auf alle diese Einflussparameter des Grossmaschinenbaues im einzelnen einzugehen. In Fig. 3 sind die wichtigsten Entwicklungsstufen [1][3]) dargestellt.

Wie schon erwähnt, ringt der Ingenieur im Turbogeneratorenbau dauernd um höhere zulässige Festigkeitswerte des Materials, insbesondere für die rotierenden Teile. Mit den Rotorkörpern aus Kohlenstoffstahl waren Rotorumfangsgeschwindigkeiten von ca. 60 m/s möglich. 1925 verwendete man erstmals legierte, vergütete Schmiedestähle, deren Qualität inzwischen derart verbessert werden konnte, dass heute Rotoren mit Umfangsgeschwindigkeiten in der Grössenordnung von 200 m/s gebaut werden können. Da es in den dreissiger Jahren schwierig war, zuverlässig durchgeschmiedete Rotorkörper zu erhalten, ging man 1932 dazu über, Rotoren aus kleineren Schmiedestücken zusammenzusetzen, wobei die einzelnen Rotorballen durch eine zentrale Schrumpfwelle zusammengehalten werden. Diese fertigungstechnisch sehr anspruchsvolle Lösung hat sich bei einer Vielzahl von Turborotoren bewährt.

[3]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

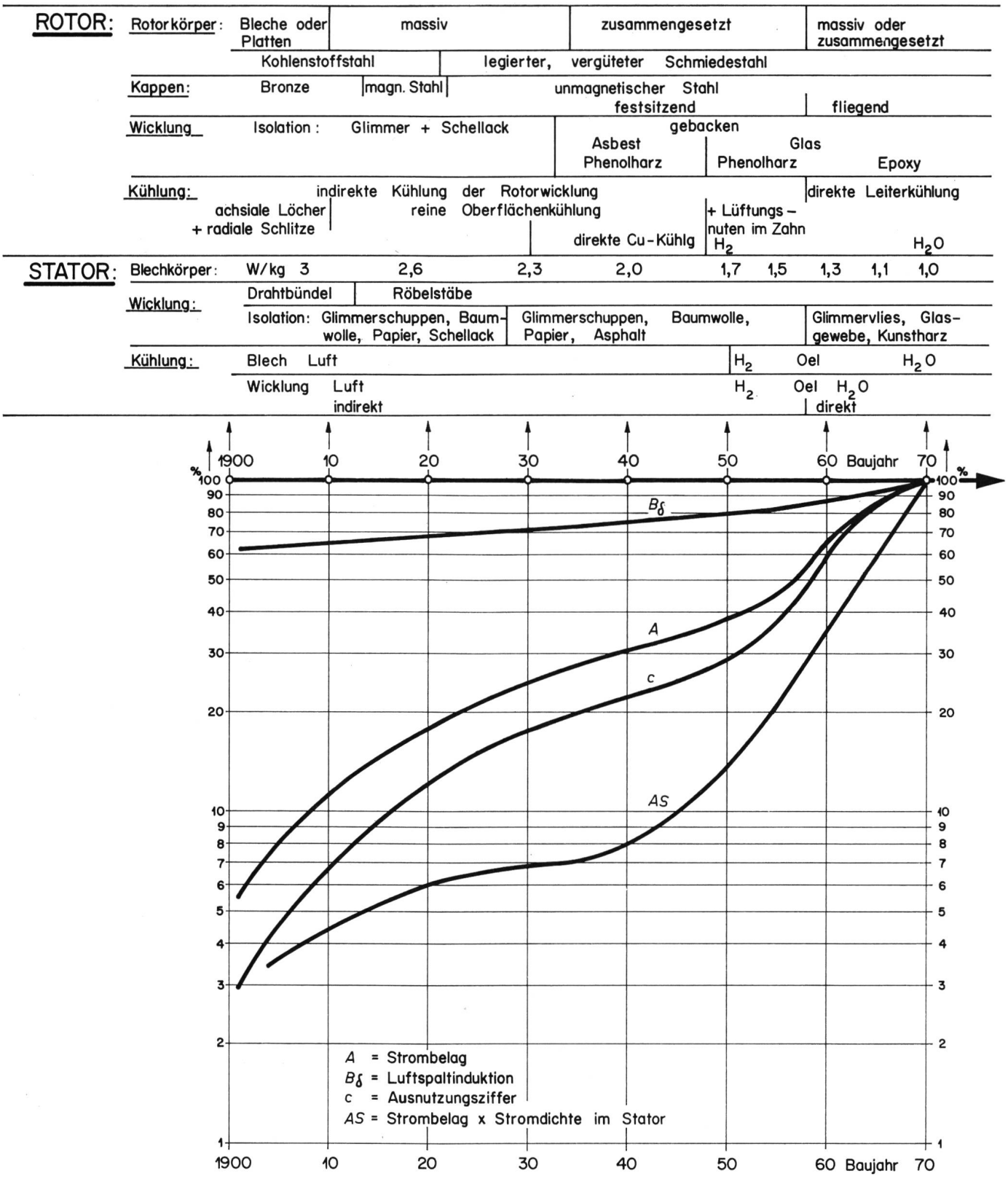


Fig. 3
Entwicklungsstufen im Turbogeneratorenbau

Noch stärker beansprucht als die Rotorkörper sind die Rotorkappen, welche die Wicklungsköpfe halten. Zunächst wurden diese Kappenringe aus Bronze, später aus magnetischem Stahl hergestellt. 1921 kam man einen erheblichen Schritt weiter durch den Übergang auf austenitischen, unmagnetischen Stahl mit einer Streckgrenze von 100 kp/mm² und ausgezeichneten Dehnungseigenschaften, die bei diesem mehrfach asymmetrisch beanspruchten Konstruktionselement besonders wichtig sind. Diese komplexen Beanspruchungsverhältnisse konnten Ende der fünfziger Jahre durch fliegenden Anbau der Kappen am Rotorballen wesentlich verbessert werden. Die Rotorkappen werden mit Bajonettverschluss direkt am Rotorballen befestigt, wodurch sie von zusätzlichen Biegebeanspruchungen durch die Wellenenden befreit sind. Direkt im Zusammenhang mit dieser konstruktiven Weiterentwicklung steht eine deutliche Verbesserung der Laufruhe und deren Stabilität im Betrieb.

Beim Dynamoblech für den Blechkörper des Stators gelang es im Laufe der Jahre, die spezifischen Magnetisierungsverluste stetig auf angenähert 1/3 der ursprünglichen

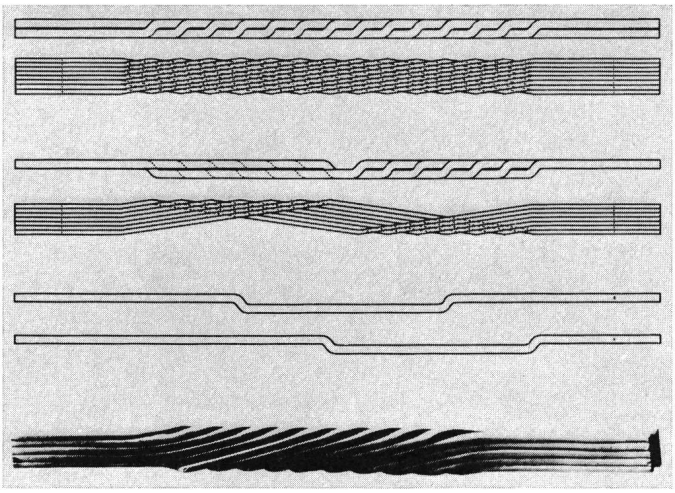


Fig. 4
Röbelstab für die Statorwicklung und sein Aufbau

Werte zu verkleinern. Leider war es aber bisher nicht möglich, die magnetische Permeabilität in gleichem Masse zu verbessern, was deutlich im relativ bescheidenen Anstieg der Luftspaltinduktion B_δ von nur ca. 30 % seit dem letzten Krieg zum Ausdruck kommt.

Umfangreiche Entwicklungsarbeiten wurden auf dem Gebiet der Wicklungs- und Isolationstechnik geleistet. Schon kurz nach Aufnahme des Generatorbaues stiess man auf ein Hindernis, welches die Leistungssteigerung der Maschinen empfindlich behinderte: die Fieldschen Wirbelströme in den massiven Leitern der Statorwicklung, welche vom Nutenquerfeld erzeugt werden und den Strom im Leiter gegen den Luftspalt verdrängen. 1912 gelang dem Mannheimer Ingenieur *Ludwig Röbel* eine bahnbrechende Erfindung zur Überwindung dieser Schwierigkeit (Fig. 4). Durch Aufteilen des massiven Kupferleiters in eine Vielzahl parallelgeschalteter und gegeneinander isolierter Teilleiter, die in zwei benachbarten Schichten flachkant aufeinanderliegen und derart miteinander verflochten sind, dass jeder Teilleiter längs der Nut vom Querfeld gleich beeinflusst wird, war es möglich, einen sog. Kunststab zu schaffen, der auch heute noch bei den modernen Grossgeneratoren mit Erfolg verwendet wird.

Besonders schwierige Probleme stellten im Grossmaschinenbau seit jeher die Isolationen, die nicht nur gute dielektrische Eigenschaften aufweisen, sondern darüber hinaus eine genügende thermomechanische Festigkeit haben müssen, um bis zu den höchsten Betriebstemperaturen den Wärmedilatationen zwischen Kupfer und Eisen standhalten zu können. Sind es im Stator die hohen Betriebsspannungen, die heute gegen 30 kV erreichen, so sind es im Rotor die hohen Fliehkräfte, welche dem Isolationstechniker Kopfzerbrechen bereiten. Ein entscheidender Durchbruch (Fig. 3) konnte auf dem Isolationsgebiet erst nach dem Krieg erzielt werden, nachdem neue Materialien, wie Samica und Romica, besonders geschlichtete Glasbänder und lösungsmittelfreie, thermoelastische Kunstharze auf Polyester- und Epoxy-Basis zur Verfügung standen. Nach vollständig neuen Verfahren werden heute vakuumimprägnierte Statorisolationen hergestellt, die bis 155 °C praktisch keine Alterungserscheinungen zeigen und gegen Öl, Wasser und andere Kühlmittel resistent sind. Auch bei den Rotorwicklungen konnte durch Tränkung mit Phenol- und später mit Epoxy-Harzen sowie durch Ausbacken der Wicklung bei drehendem Rotor ein Wicklungsverband erzielt werden, dessen mechanische Widerstandsfähigkeit und thermische Stabilität erst den Bau moderner Grenzleistungsrotoren gestatten.

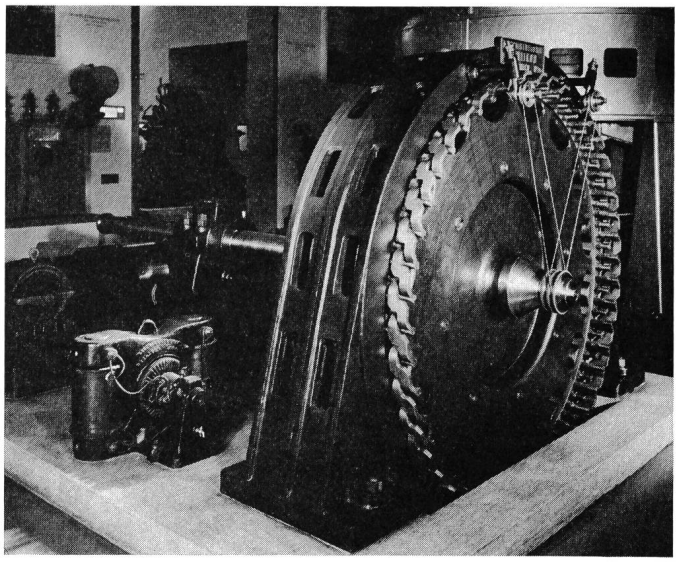
Wohl der wichtigste Fortschritt im Turbogeneratorenbau wurde jedoch auf dem Gebiet der Kühlung (Fig. 3) erzielt. Nur der Einsatz immer wirkungsvollerer Kühlverfahren erlaubte es, mit dem Energiebedarf Schritt zu halten und die erforderlichen Leistungen in ständig stärker ausgenützten Maschinen zu erzeugen. Während eines halben Jahrhunderts hat sich der Elektromaschinenbauer mit Luftkühlung befasst, wobei alle Kunstgriffe zur Verbesserung der indirekten Kühlung angewandt wurden. Erst nach dem Krieg ging man in Europa zur Wasserstoffkühlung über [2] und erst in den fünfziger Jahren zur direkten Leiterkühlung. 1960 jedoch ist gewissermassen die «Kühlungslawine» losgebrochen: Der direkten H_2-Kühlung der Rotorwicklung folgte die direkte Flüssigkeitskühlung der Statorwicklung [3], und heute werden Generatoren mit Wasserkühlung in Stator und Rotor [4] gebaut. Dies sind Maschinen, die den Weg zum Kryogenerator der Zukunft ebnen werden.

Zur Illustration der vorstehenden Ausführungen sei das bisher Gesagte an einigen konkreten Beispielen besprochen:

Zum Durchbruch kam das Prinzip des dreiphasigen Synchrongenerators durch die erste Verwirklichung einer Leistungsübertragung über 175 km zur internationalen elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt am Main im Jahre 1891. Den Generator von 210 kVA, 40 Hz, 150 U./min, das heisst eine Maschine mit 32 Polen, baute die MFO (Fig. 5).

Charles Brown, ein MFO-Ingenieur und späterer Mitgründer von Brown Boveri, Baden, kam auf die Idee, den Rotor aus vollen, runden Blechen aufzubauen, die in Nuten die Erregerwicklung tragen. Er konstruierte 1898 einen 6poligen Versuchsgenerator von 100 kVA, 600 V, 50 Hz, bei 1000 U./min für die Badener Werkstätten, der bis 1958 als Stromquelle diente (Fig. 6).

In Weiterentwicklung dieser Maschine schuf er den eigentlichen Turborotor aus massivem Eisen, den ersten 2poligen Turbogenerator der Welt, für das Elektrizitätswerk der Stadt Chur. In seiner schlanken Form mit den beiden



Deutsches Museum, München

Fig. 5
Drehstromgenerator 210 kVA, für die Ausstellung in Frankfurt a. M. im Jahre 1891

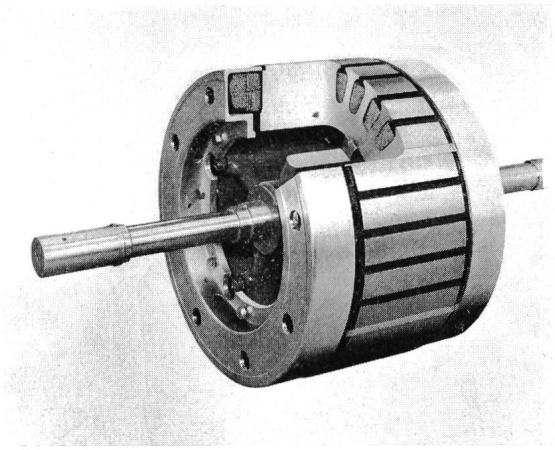


Fig. 6
Erster sechspoliger Turbogenerator der Welt 1898, 100 kVA

Kappen über den Wickelköpfen hat dieser erste Turborotor (Fig. 7) eine frappante Ähnlichkeit mit modernen Rotoren grösster Leistung. Die Maschine hatte folgende Daten: Leistung 250 kVA, 3 Phasen, 65 Hz, 2000 V, 3900 U./min.

Ihre Kenngrössen sind:

Luftspaltinduktion	B_δ	= 6200 Gs
Strombelag	A	= 123 A/cm
Stromdichte Stator	S	= 2 A/mm²
	AS	= 246
Ausnützungsziffer	c	= 8

Einen axonometrischen Schnitt durch einen modernen luftgekühlten Turbogenerator von 35 MVA bei 3000 U./min zeigt Fig. 8. Man erkennt die kegelförmig angeordneten Wickelköpfe mit den Wicklungsableitungen zu den Statordurchführungen, den Statorblechkörper mit den radialen Kühlschlitzen und das geschweisste Statorgehäuse, welches auf einer massiven Grundplatte steht. Die Maschine wird durch in geschlossenem Kreislauf umgewälzte Luft gekühlt. Ventilatoren auf beiden Seiten des Rotors pressen die Kühlluft durch den Rotor, in den Luftspalt sowie durch das Gehäuse in die Statormitte und anschliessend durch den Statorblechkörper und die Wasserkühler auf beiden Seiten der Maschine, welche die erwärmte Luft rückkühlen, so dass sie um die Wicklungsverschalungen herum wieder den Ventilatoren zugeführt werden kann.

Während man in den USA bei den 3600tourigen Turbogeneratoren schon vor dem Krieg bei ca. 40 MW auf Wasserstoffkühlung überging, wurde dies bei den 3000tourigen Maschinen in Europa erst nach dem Krieg notwendig.

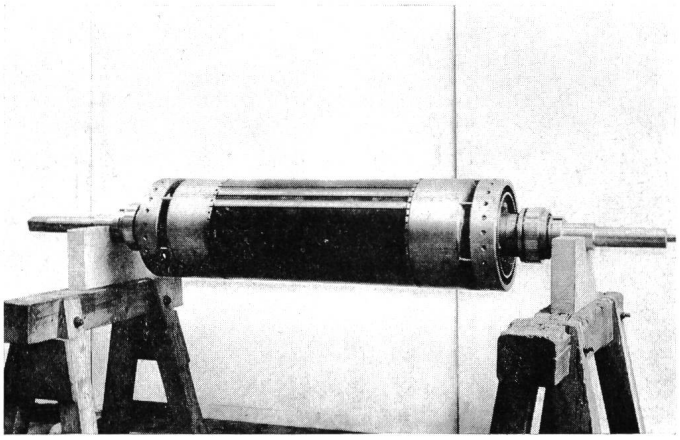


Fig. 7
Rotor zum ersten zweipoligen Turbogenerator der Welt 1901, 250 kVA

Brown Boveri nahm 1947 den Bau wasserstoffgekühlter Turbogeneratoren auf und lieferte 1952 den ersten H_2-gekühlten Generator in Europa, eine 80-MVA-Einheit für das Kraftwerk Kyndby in Dänemark, das später durch weitere zwei Maschinen gleicher Art erweitert wurde. Damit begann auch in Europa die Ära der Wasserstoffkühlung, wobei vor allem von zwei Eigenschaften des Wasserstoffes profitiert wurde:

a) Kleines spezifisches Gewicht von ca. 1/9 der Luft, wodurch eine wesentliche Reduktion der Reibungsverluste erzielt werden konnte;

b) 1½mal grössere Wärmeübergangszahl (bei 0,035 atü) und 6,7fache Wärmeleitzahl, wodurch schon bei indirekter Wicklungskühlung eine Verkleinerung der Wicklungstemperaturen erreicht wurde.

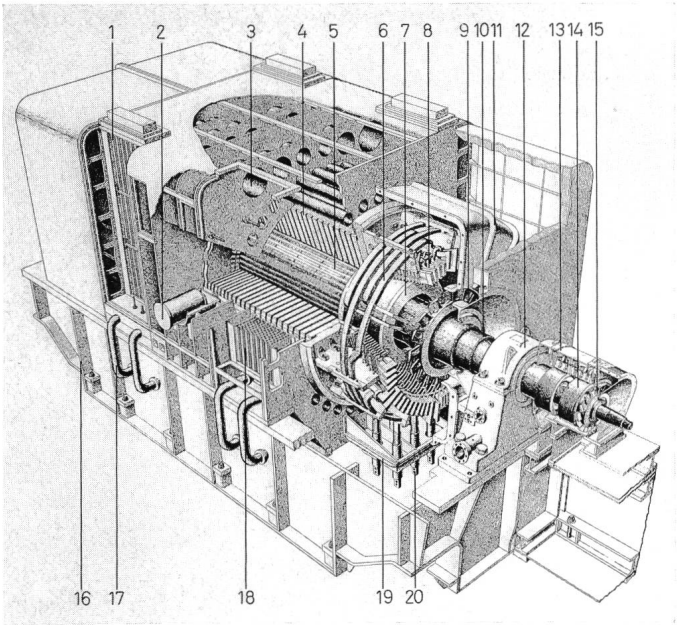


Fig. 8
Axonometrischer Schnitt eines luftgekühlten Turbogenerators 35 MVA, 50 Hz

1 Kühler; *2* Aufhängenocken; *3* Rohr für Kühlluft; *4* Stator-Blechpaket; *5* Rotor; *6* Wicklungsableitungen; *7* Rotorkappe; *8* Stator-Wicklungskopf; *9* Hauptventilator; *10* Luftabschlussring; *11* Wicklungsverschalung; *12* Lagerbock; *13* Bürstenbrücke; *14* Schleifring; *15* Schleifring-Ventilator; *16* Grundrahmen; *17* Kühlwasser-Zuleitung; *18* Kühler; *19* Klemmenplatte; *20* Klemmen

Allerdings mussten diese Vorteile durch einige konstruktive Komplikationen erkauft werden:

a) Schwereres Gehäuse, welches eventuellen Knallgasexplosionen mit Drücken bis ca. 6 kp/cm² standhält;

b) Relativ kompliziertes Wellendichtungssystem, welches den Wasserstoffraum der Maschine gegen die Welle und die Umgebung abdichtet.

Während man anfänglich nur mit Wasserstoff von 0,035 atü Überdruck arbeitete, um das Eindringen von Luft in die Maschine sicher zu vermeiden, wurde später der Wasserstoffdruck erhöht, da damit eine substantielle Verbesserung des Wärmeüberganges möglich ist. So sind heute Wasserstoffdrücke von 3...4 atü keine Seltenheit mehr.

Trotz diesen Massnahmen erwies sich schon bald die indirekt gekühlte Rotorwicklung als Engpass für die weitere Leistungssteigerung. Man ging daher erstmals im Rotor zur direkten Kühlung über, indem man Hohlleiter einführte, durch die das Kühlgas gepresst wird (Fig. 9). Der Wasserstoff tritt auf beiden Seiten des Rotors bei den Wickelköpfen in die Hohlleiter ein und verlässt diese wieder in der Rotormitte. Grundsätzlich sind 2 Gasströme zu unterscheiden:

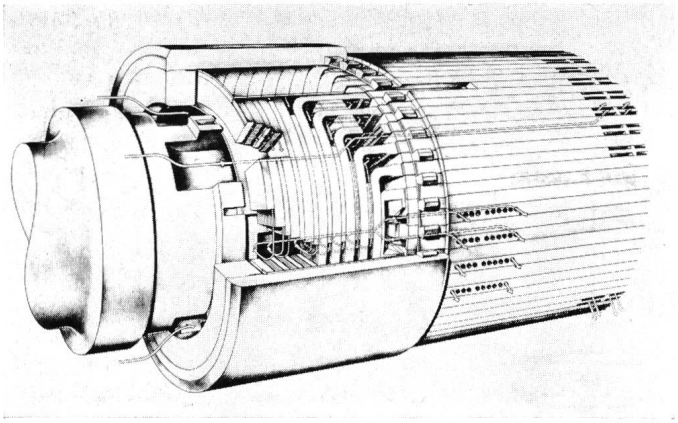


Fig. 9
Gasführung im Rotor eines Dreiphasengenerators 400 MVA, 50 Hz

a) Nutengas, welches die Hohlleiter in den Nuten kühlt;
b) Kopfgas, welches die Leiter in den Wicklungsköpfen kühlt.

Oben in Fig. 9, direkt unter der Rotorkappe, ist die Dämpferwicklung sichtbar, die aus Flachkupfer besteht und über der Erregerwicklung angeordnet ist; auch die Bajonettbefestigung der Kappe am Rotorballen ist deutlich zu erkennen.

Die Dämpferwicklung, ein in sich geschlossener Kupferkäfig unmittelbar unter den Nutenkeilen des Rotors, dämpft bei Schieflast im Stator, d.h. bei ungleichen Phasenströmen in der Statorwicklung, die inverse Ankerrückwirkung, deren Durchflutung mit doppelter Netzfrequenz in Gegendrehrichtung relativ zum Rotor umläuft. Dadurch wird verhindert, dass die Erregerwicklung bei Schieflast in unzulässiger Weise durch doppelfrequente Dämpfungsströme zusätzlich erhitzt wird. Besonders wichtig sind diese Dämpferwicklungen bei Einphasen-Bahngeneratoren, bei denen dauernd ein Inversfeld von gleicher Grösse wie das synchron rotierende Lastfeld abgedämpft werden muss. Fig. 10 zeigt den Rotor eines 50-MVA-Einphasenturbogenerators während der Dämpferwicklungs-Montage, wobei die in diesem Fall 2 Wicklungsebenen der Dämpferwicklung im Bereich der Wicklungsköpfe sehr gut zu erkennen sind.

Wie bereits erwähnt, tritt das Kühlgas bei direkter Leiterkühlung auf beiden Seiten des Rotors unter den Kappen achsial in die Hohlleiter in den Rotornuten ein und verlässt diese in der Mitte des Rotors. Fig. 11 veranschaulicht

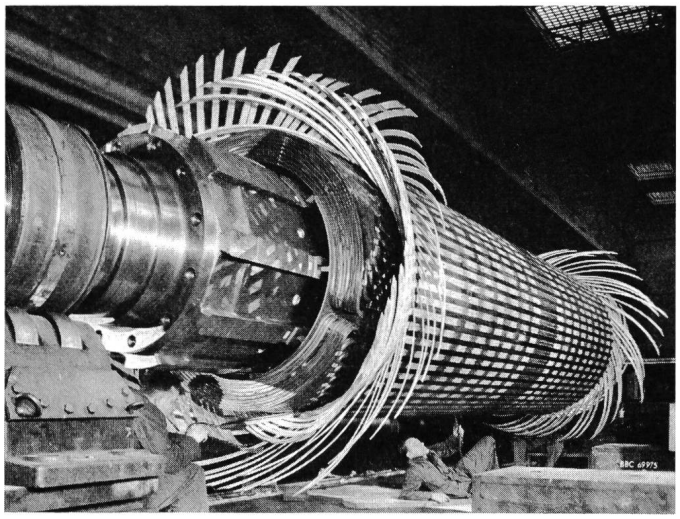


Fig. 10
Einbau der Dämpferwicklung eines Einphasengenerators 50 MVA, 16⅔ Hz, 1000 U./min.

den Gasaustritt aus den Hohlleitern. Durch Vergrösserung der Gasgeschwindigkeit in den Hohlleitern und Steigerung des Gasdruckes auf 4 atü ist es möglich, 4mal mehr Rotorverluste als bei indirekter Kühlung abzuführen und damit trotz weiterer Leistungssteigerung die Rotortemperaturen in den zulässigen Grenzen zu halten.

Mit diesen konstruktiven Verbesserungen zur Rotorkühlung verschob sich der Engpass unversehens in den Stator: Die Erwärmung der Statorwicklung erreichte kritische Werte, so dass man schon bald gezwungen war, auch im Stator zur direkten Leiterkühlung überzugehen. Weil jedoch die Platzverhältnisse bei den Statorwicklungen noch prekärer als im Rotor sind, entschloss man sich, Flüssigkeitskühlung anzuwenden: zuerst Öl, später mineralfreies Wasser mit einer Leitfähigkeit von weniger als 1 µS/cm. Der Vorteil der Flüssigkeitskühlung liegt vor allem in der hohen Wärmekapazität

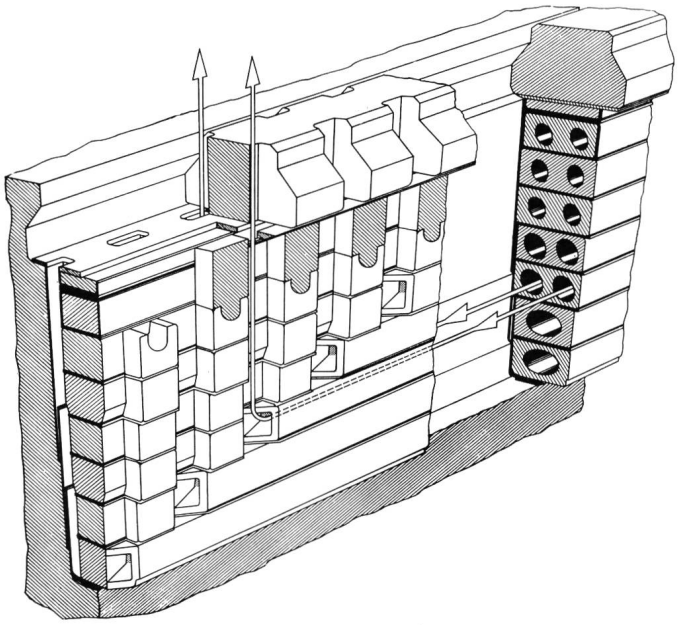


Fig. 11
Gasführung in den Rotornuten

der Kühlflüssigkeit sowie in den besseren Wärmeübergangsverhältnissen. Verglichen mit Wasserstoff von 5 atü resultiert bei normalen Durchflussgeschwindigkeiten bei Öl eine 15mal grössere Wärmekapazität und eine Erhöhung der Wärmeübergangszahl auf das 1,5fache; bei Wasser steigen die entsprechenden Werte sogar auf 40 bzw 4.

Die Flüssigkeitskühlung liess sich bei den Statorwicklungen relativ einfach einführen, indem einige der Kupfer-Teilleiter durch Hohlleiter gleicher Breite ersetzt wurden, die auf beiden Seiten in Armaturen aus nichtmagnetischem Material zusammengefasst werden und über Teflonschläuche mit Ringleitungen für die Wasserzu- und -abfuhr verbunden sind. In Fig. 12 sind die Kühlwasseranschlüsse einer wassergekühlten Statorwicklung zu sehen; gut zu erkennen sind auch die kräftigen Abstützringe aus Glasepoxy, die notwendig sind, damit im Kurzschlussfall die Wicklung die grossen Stromkräfte ohne Schaden aushält. In Fig. 13 sind die wichtigsten Kühlströme nochmals dargestellt:

a) Wasserstoff-Kühlströme durch den Rotor, welche in der Statormitte durch radiale Schlitze im Blechkörper den Wasserstoffkühlern zugeführt werden;
b) Achsiale Wasserstoff-Führung zur Kühlung des Statorblechkörpers;
c) Wassergekühlte Statorwicklung.

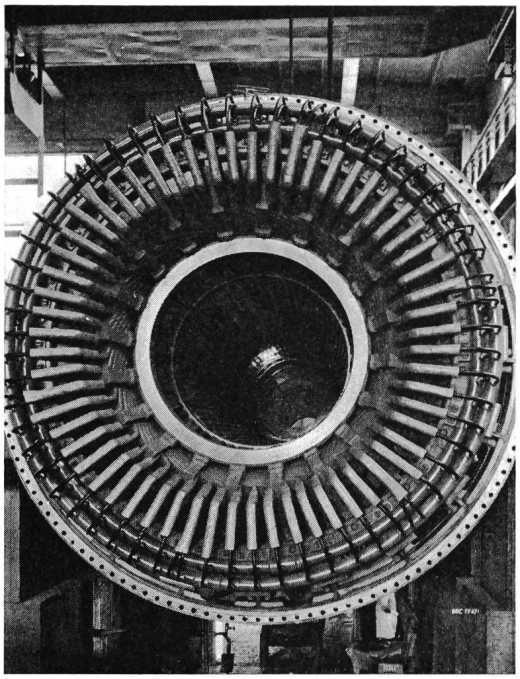


Fig. 12
Statorwicklungskopf
Zwischen der Wicklung und der Ringleitung fliesst das Kühlwasser durch Teflonschläuche

Einen modernen Grossgenerator der soeben beschriebenen Kühlart zeigt Fig. 14. Der axonometrische Schnitt lässt im Rotor die Austritte für das Nutgas in der Ballenmitte und für das Kopfgas auf beiden Seiten des Ballens gut erkennen. Auch die achsialen Kühlkanäle im Blechkörper und die Wasserzu- und -ableitungen zur Statorwicklung sind gut sichtbar. Fig. 15 zeigt denselben Generator bei der Rotormontage im Prüffeld des Werkes Birr. Die Gas-Austrittsöffnungen des Rotors sind zur Verhinderung des Eindringens von Fremdkörpern sorgfältig durch Bänder und Klebestreifen abgedeckt.

Die guten Betriebserfahrungen mit direkter Rotor-Wasserstoff-Kühlung und direkter Statorwicklungs-Wasserkühlung gestatten BBC zurzeit den Bau der bisher grössten Turbogeneratoren für 2 amerikanische Kraftwerkgesellschaften nach diesem bewährten Prinzip:

a) 4poliger Generator für 1333 MVA bei 1800 U./min;
b) Zwölf 2polige Generatoren für je 722 MVA bei 3600 U./min für sechs 1300-MW-Cross-Compound-Gruppen.

Der 4polige Generator [5] ist für ein Atomkraftwerk der American Electric Power bestimmt. Aus Fig. 16 geht hervor,

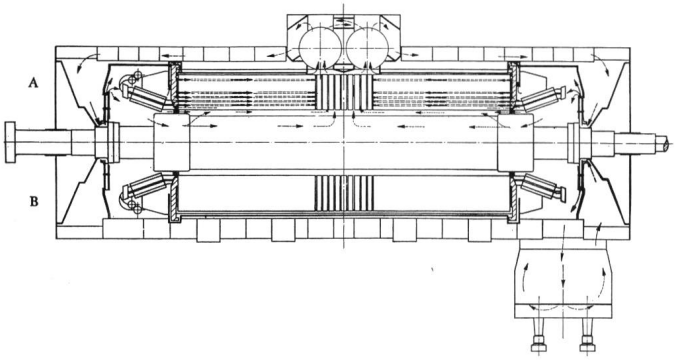


Fig. 13
Längsschnitt durch einen Turbogenerator 490 MVA, 50 Hz
Die Pfeile deuten die Strömungsrichtung des Wasserstoffes an. Die Statorwicklung ist direkt durch Wasser gekühlt

dass dieser Generator grundsätzlich dem soeben geschilderten konventionellen Aufbau entspricht. Nur seine Dimensionen sind weniger konventionell; mit einem Gewicht von 690 t, einem Rotordurchmesser von 1,75 m und einer Eisenlänge von 8 m schlägt er alle bisherigen Rekorde. Die Maschinendaten lauten:

1333 MVA, 60 Hz, 1800 U./min, $\cos \varphi = 0{,}85$, 26 kV

Bezogen auf die Abmessungen bzw. das Gewicht ergeben sich folgende Werte:

Ausnützungsziffer $c = 300$
Leistungsgewicht $g_L = 0{,}52$ kp/kVA

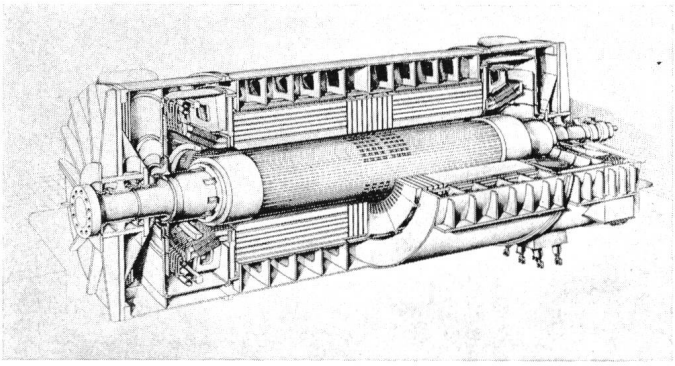


Fig. 14
Axonometrischer Schnitt durch einen Turbogenerator 400 MVA, 50 Hz
Kühlung konventionell mit Wasser für die Hohlleiter der Statorwicklung, sonst mit Wasserstoff

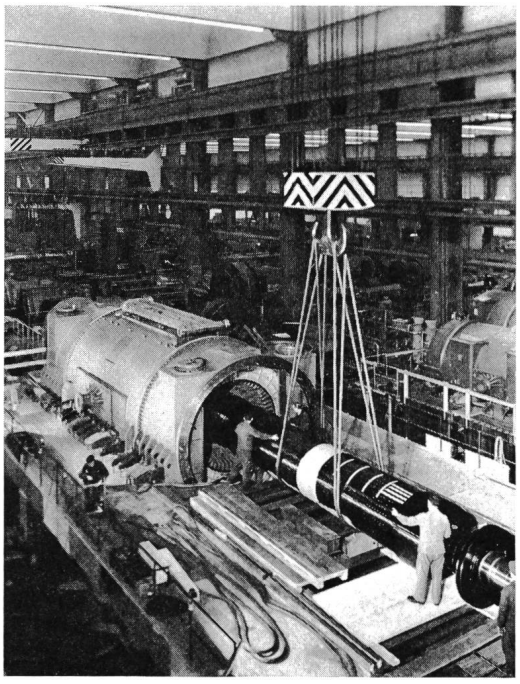


Fig. 15
Turbogenerator 400 MVA bei der Montage

Der Rotor (Fig. 17) hat ein Schmiedegewicht von mehr als 200 t. Da Schmiedestücke dieser Grösse nicht als Monoblock hergestellt werden können, wurde der Rotor aus 3 Ballenstücken und 2 Flanschwellen zusammengesetzt, welche durch eine zentrale Welle mit einer Schrumpfkraft von 6000 t zusammengehalten werden. Das Problem bei diesen sog. halbtourigen Maschinen liegt weniger auf der technischen Seite, sondern eher in der Bearbeitung und im Transport der schweren Stücke. Auch die Prüfung solcher grossen Rotoren bei 120 % Nenndrehzahl verlangt ausserordentliche Investi-

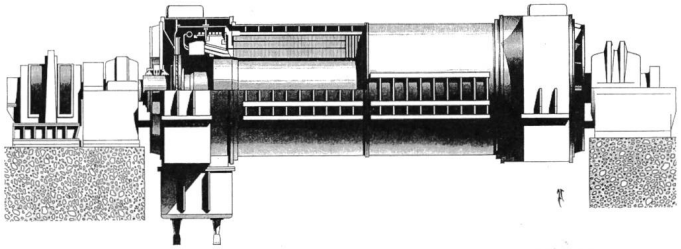


Fig. 16
Teilschnitt durch den Turbogenerator 1333 MVA, 60 Hz, 1800 U./min
In Aufbau und Kühlung entspricht dieser Generator den konventionellen zweipoligen Maschinen

tionen im Herstellerwerk. Eine Vorstellung über die Dimensionen vermittelt auch Fig. 18, die das Gehäuse beim Ausmessen der Bohrung zeigt.

Obwohl mit der direkten Wasserstoffkühlung im Rotor und der direkten Wasserkühlung der Statorwicklung die Nachfrage nach ständig grösseren Einheitsleistungen bis jetzt befriedigt werden konnte, zeigt sich heute bei 2poligen Maschinen für 3600 U./min erneut ein Engpass im Rotor bei Leistungen über 800 MW. Es ist das Verdienst des leider allzu früh verstorbenen Altmeisters im Elektromaschinenbau, Prof. Dr. *Eugen Wiedemann,* diese Entwicklung vorausgesehen zu haben. Schon zu Beginn der sechziger Jahre wurden von ihm die ersten Entwicklungsarbeiten für Rotorwicklungen mit direkter Wasserkühlung eingeleitet, vorerst auf dem Gebiet der Wasserkraftgeneratoren. So konnte Brown Boveri 1966 die ersten Hydrogeneratoren von 86 MVA mit direkter Wasserkühlung im Stator und im Rotor [6] in Betrieb setzen, denen im letzten Jahr Einheiten von je 190 MVA im norwegischen Kraftwerk Tonstad folgten. Fig. 19 zeigt einen axonometrischen Schnitt zu einem der 4 Generatoren für Tonstad mit den wassergekühlten Polspulen des Polrades, dem hier ebenfalls wassergekühlten Stator-Blechkörper und der wassergekühlten Statorwicklung. Deutlich sind auch die Verschalungen des Rotors zu erkennen, wodurch die Luftreibungsverluste des Polrades wesentlich reduziert werden konnten.

Die Entwicklungsarbeiten und die Betriebserfahrungen der wassergekühlten Schenkelpolmaschinen haben sich in der Zwischenzeit auch bei den Turbogeneratoren sehr positiv ausgewirkt. In Fig. 20 ist das Kühlschema eines solchen Turbogenerators dargestellt, bei dem der grösste Teil der Verluste vom Entstehungsort durch Wasser weggeführt wird.

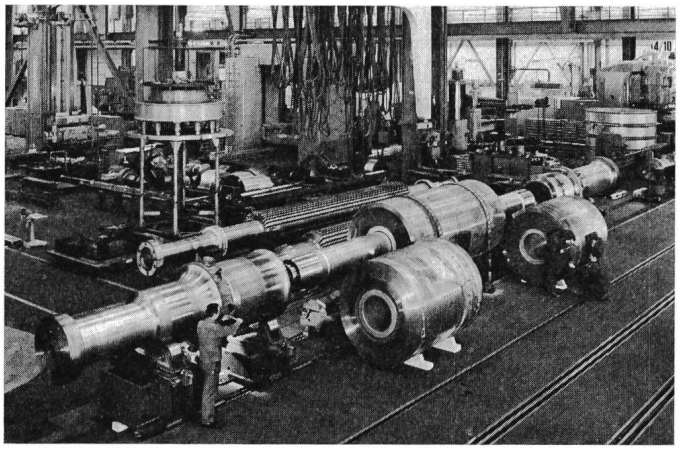


Fig. 17
Zusammensetzen des vierpoligen Rotors zum Turbogenerator 1333 MVA, der Fig. 16

Man kann daher auf den Wasserstoff mit seinen komplizierenden Auswirkungen verzichten. Der Rotorraum ist durch einen Zylinder aus Glas-Epoxyd vom Stator getrennt, so dass er durch eine Pumpe auf ca. 0,3...0,5 ata evakuiert werden kann. Dadurch ist es möglich, auch bei 3600tourigen Maschinen die Reibungsverluste in der Grössenordnung der

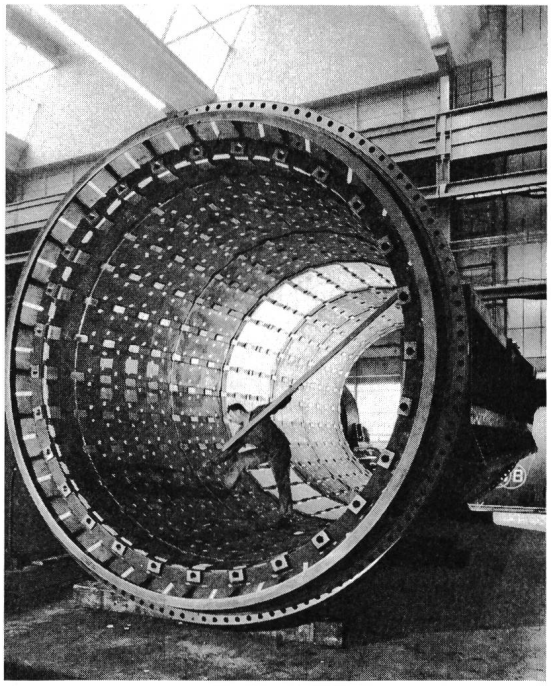


Fig. 18
Gehäuse zum Turbogenerator 1333 MVA der Fig. 16

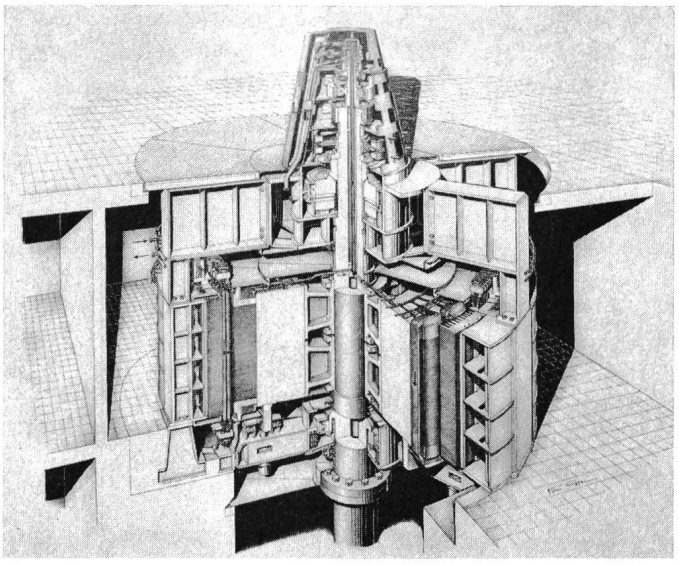


Fig. 19
Axonometrischer Schnitt durch einen Wasserkraftgenerator 190 MVA, 50 Hz, 375/600 U./min

wasserstoffgekühlten Maschinen zu halten. Das Rotorkühlwasser wird in 2 konzentrischen Rohren aus nichtmagnetischem, rostfreiem Stahl durch das Wellenende je 2 diametral gegenüberliegenden Wasserkammern zugeführt, von wo aus das Kühlmittel über hochdruckfeste Isolierschläuche der Rotorwicklung zufliesst und von ihr wieder abgeleitet wird. Der Stator ist mit einem inerten Gas, z. B. Stickstoff, gefüllt. Sowohl der Statorblechkörper als auch die Statorwicklung sind wassergekühlt; aber auch die Verluste in den andern

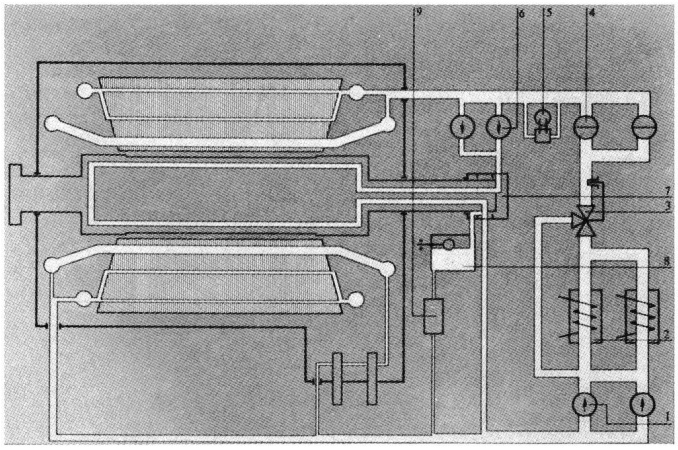


Fig. 20
Kühlwasserkreislauf eines wassergekühlten Turbogenerators
1 Hauptpumpe; *2* Wasser-Rückkühler; *3* Temperatur-Regulierung; *4* Filter; *5* Leitfähigkeitsmesser; *6* Zusatzpumpe; *7* Rotorwasser-Anschlusskopf; *8* Leckagetank; *9* Wasseraufbereitung

Maschinenteilen wie Pressplatten, Wicklungsverschalungen usw. werden direkt durch Wasser abgeführt. Fig. 21 zeigt den ersten in Stator und Rotor wassergekühlten Turbogenerator von BBC auf dem Prüfstand. Durch eine grosse Anzahl Meßstellen, deren Daten elektronisch gespeichert wurden, war es möglich, alle Verlustkomponenten einzeln kalorimetrisch zu messen. Aus diesen Messungen konnten wertvolle Informationen für die Dimensionierung noch grösserer Maschinen gewonnen werden.

Der zuletzt geschilderte in Stator und Rotor wassergekühlte Prototyp öffnet den Weg in den Gigawattbereich: etwa 1,5 GVA bei 3600 U./min, etwa 2 GVA bei 3000 U./min bzw. etwa 2,5 GVA bei 1800 U./min liegen heute im Bereich des Möglichen, so dass — mindestens auf dem Gebiet der Turbogeneratoren — die Zukunft bis 1980/85 gesichert erscheint. Was aber dann? Diese Frage kann und darf nicht mit Bestimmtheit beantwortet werden. Selbstverständlich wird der Energiehunger weiter anhalten; ob er aber auch in ferner Zukunft durch immer grössere mechanisch/elektrische Energiewandler gedeckt werden muss, hängt weitgehend vom Fortschritt in der Physik ab. Wird es in nächster Zukunft gelingen, neue Energieumwandlungsverfahren zu entwickeln, die nicht nur das Grössen-, sondern gleichzeitig das Verteilproblem lösen, indem jeder Verbraucher die benötigten Energien einfach und billig selbst erzeugen kann? Vorderhand sieht es noch nicht so aus. Wir sind daher gezwungen, uns heute schon mit der übernächsten Maschinengeneration zu befassen: dem Kryogenerator, der eine konsequente Weiterentwicklung des wassergekühlten Generators ist. Im MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA) wurde ein 80-kVA-Versuchsgenerator mit rotierender, supraleitender Erregerwicklung gebaut, der wertvolle Unterlagen für den Bau einer grösseren Maschine von einigen MW lieferte. Die Skizze in Fig. 22 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines solchen Generators. Die supraleitende Erregerwicklung (*1*) wird von einem rotierenden, zylindrischen Körper getragen, der kraftschlüssig das Drehmoment der Wicklung weiterleitet und gleichzeitig einen thermischen Widerstand (*2*) zwischen Welle und Erregerwicklung darstellt. Ein mitrotierender Dämpfungszylinder (*4*) schützt die supraleitende Erregerwicklung vor schädlichen Auswirkungen der Ankerrückwirkung. Die Erregerwicklung wird mit flüssigem Helium gekühlt. Ein stillstehender Luftspaltzylinder (*7*) — ähnlich dem Luftspaltzylinder in den wassergekühlten Turbogeneratoren — bildet den Kryostat, welcher evakuiert (*3*) werden kann und derart die Erregerwicklung gegen Eindringen von Wärme schützt. Die wassergekühlte Statorwicklung (*8*) bildet einen geschlossenen, festen Körper und ist von einem Blechkörper (*9*) umschlossen, welcher das Ausstreuen der starken Felder verhindert. Supraleitende Maschinen dieser Art werden die Ausnützung des Turbogenerators nochmals wesentlich steigern und Einheitsleistungen von 5 und mehr Gigawatt zulassen, da mit supraleitenden Erregerwicklungen die 10 000-Gauss-Grenze der Luftspaltinduktion gesprengt werden kann und eine Stromdichte von 50...150 A/mm² möglich wird. Bis es aber so weit sein wird, muss noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden.

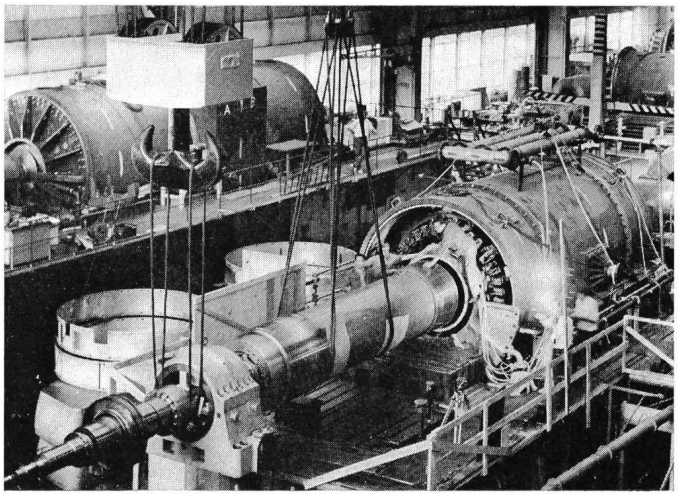


Fig. 21
Wassergekühlter Turbogenerator 300 MVA, 50 Hz

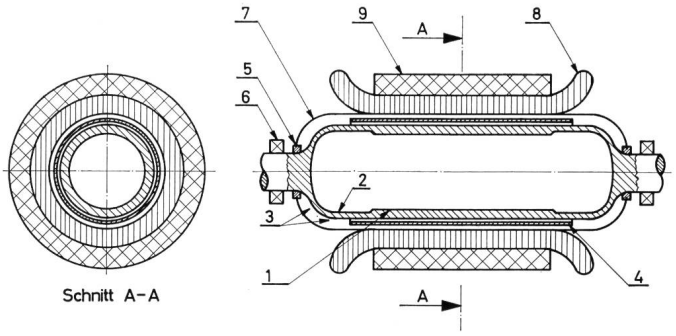


Fig. 22
Entwurf eines Generators mit supraleitender Erregerwicklung
Bezeichnungen siehe im Text

Literatur

[1] *E. Wiedemann:* Entwicklung und Stand des Turbogeneratorbaues. Brown Boveri Mitt. 37(1950)10, S. 395...400.
[2] *E. Wiedemann:* Wasserstoffkühlung für Turbogeneratoren. Brown Boveri Mitt. 41(1954)3/4, S. 79...93.
[3] *E. Wiedemann:* Grenzleistungs-Turbogeneratoren. Brown Boveri Mitt. 45(1958)1, S. 3...13.
[4] *E. Wiedemann:* Grossturbogeneratoren mit ausschliesslicher Wasserkühlung. Brown Boveri Mitt. 53(1966)9, S. 501...512.
[5] *N. Krick* und *H. Hiebler:* Generatoren für Atomkraftwerke. Brown Boveri Mitt. 57(1970)5, S. 208...222.
[6] *E. Wiedemann:* Wasserkraftgeneratoren mit Flüssigkeitskühlung in Stator und Rotor. Brown Boveri Mitt. 51(1964)5, S. 267...273.

Adressen der Autoren:
K. Abegg, Direktor, und Dr. *P. Rauhut,* AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.