

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 64 (1973)
Heft: 26

Artikel: Das Wachstum der Turbogeneratoren
Autor: Abegg, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915642>

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: 18.02.2026

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

Das Wachstum der Turbogeneratoren¹⁾

Von K. Abegg

621.313.322-81
(Übersetzung)

1. Einleitung

Seit *Charles Brown* im Jahre 1898 seinen ersten 6poligen Turbogenerator von 100 kVA bei der AG Brown, Boveri & Cie. (BBC) in Betrieb gesetzt hatte, sind die Einheitsleistungen dieser Maschinen innert 75 Jahren auf 1 300 000 bis 1 500 000 kVA, d. h. auf das 15 000fache angewachsen. Allein in den letzten 20 Jahren stiegen die Einheitsleistungen in Westeuropa von ca. 150 auf 600, in den USA gar auf 900 MVA (Fig. 1). Mit der Inbetriebsetzung der ersten 1500-MVA-Einheit durch das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk wird die «Lücke» bezüglich Einheitsleistungen zwischen den USA und Westeuropa geschlossen.

Angesichts solcher Wachstumsraten von 7...11 % pro Jahr stellt sich die heute viel diskutierte Frage, mit welchem Wachstum der Einheitsleistungen in Zukunft gerechnet werden muss. 1968 machte *R. R. Bennet* [1] ²⁾ eine Prognose auf 3000-MW-Einheiten im Jahr 1987 entsprechend einem zukünftigen Wachstum von 7 % p. a. In den letzten 10 Jahren betrug die max. Leistung angenähert 2,5 % der in den USA installierten. Ausgehend von der Prognose für das zukünftige Wachstum der installierten Leistung in den USA [2] resultiert ein etwas pessimistischerer Verlauf für die zukünftigen Einheitsleistungen, der gut mit der Prognose von *G. Hurlbert* [3] übereinstimmt (1984: 2000 MW; 1987: 2500 MW).

Für eine einigermaßen gesicherte Prognose scheinen 6 Einflussparameter wesentlich:

- die Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs und des Anteils an elektrischer Energie;
- die Tendenz zu Netz-Zusammenschlüssen und die resultierenden zukünftigen Netzgrößen;
- Gesamtwirkungsgrad und spezifische Kraftwerkskosten in Funktion der Einheitsleistung;
- Betriebssicherheit;
- Umweltprobleme;
- technische Entwicklung, Fabrikationskapazitäten, Transportmöglichkeiten.

Diese Einflussparameter wirken zum Teil beschleunigend, zum Teil dämpfend auf das zukünftige Wachstum der Einheitsleistungen. Eine Analyse dieser Faktoren führt zu weiterem, wenn auch nicht mehr zu derart stürmischem Wachstum wie in der unmittelbaren Vergangenheit. Einheitsleistungen von 1900...2000 MVA sind mit grosser Wahrscheinlichkeit noch in den 70er Jahren, solche von 2200...2500 MVA in den 80er Jahren zu erwarten. Prognosen für 1990 oder gar 2000 mit möglichen Leistungen von 3...5 GVA sind jedoch noch sehr unsicher.

Im folgenden sei ein allgemeiner Überblick gegeben über die Mittel, die auf der technischen und fabrikatorischen Seite

zur Verfügung stehen, um den Bedarf an Generatoren ständig steigender Einheitsleistungen zu decken und gleichzeitig eine bestmögliche Betriebssicherheit zu gewährleisten.

2. Technologische Probleme im Turbogeneratorenbau

Die technologischen Probleme, die in der Vergangenheit im Turbogeneratorenbau gelöst werden mussten und in Zukunft zu lösen sind, sind eng verknüpft mit der ständigen Steigerung der Einheitsleistungen, die zu einer zunehmend grösseren Ausnützung des verfügbaren Materials in mechanischer, elektrischer und thermischer Hinsicht zwingt [4]. Durch bessere Kenntnis sowohl der verwendeten Materialien als auch deren Beanspruchung in der Maschine muss gleichzeitig vermieden werden, dass die zulässigen Grenzen überschritten werden und Störungen im Betrieb entstehen. Nachstehend werden einige wichtige Probleme in diesem Zusammenhang diskutiert und daraus Möglichkeiten und Grenzen für das weitere Wachstum der Turbogeneratoren abgeleitet.

2.1 Die mechanische Ausnützung

Leistungssteigerungen durch höhere mechanische Ausnützung werden vor allem durch 2 Problemkreise begrenzt:

- die verfügbaren Materialqualitäten und zulässigen Beanspruchungen insbesondere der rotierenden Teile sowie
- die mechanische Stabilität der Maschine, wobei Generator + Turbine als Einheit beurteilt werden müssen.

Die heute erhältlichen Schmiedestahlqualitäten begrenzen die Aussendurchmesser 2poliger Rotoren auf ca. 1150 mm bei 60 Hz bzw. 1300 mm bei 50-Hz-Generatoren; die entsprechenden Werte bei 4poligen Rotoren liegen bei ca. 1900

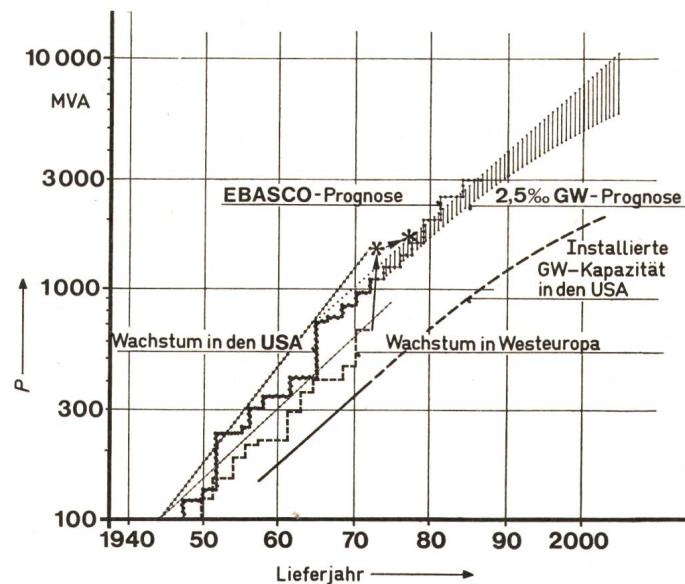


Fig. 1
Prognosen für die Einheitsleistungen von Turbogeneratoren
1970—1990 (2000)

¹⁾ Nach einem Vortrag, gehalten am 15. Februar 1973 an der Royal Society in London. (Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Volume A 275, p. 33-253, Nr. 1248 vom 30. 8. 73: A Discussion on recent advances in heavy electrical plant organized by J. S. Forrest, F.R.S.)

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

bzw. 2200 mm. Bei den Rotorkappen aus austenitischen Stählen werden heute Fliessgrenzen bis 120 kg/mm^2 erreicht, so dass bei zweckmässiger Dimensionierung der Rotorwicklung keine Durchmesserreduktion wegen den Rotorkappen in Kauf genommen werden muss: Rotor- und Kappenmaterial sind festigkeitsmässig aufeinander abgestimmt.

Obwohl in Zukunft durch faserverstärkte Kunststoffe für Rotorkappen Fortschritte zu erwarten sind und sich auch die Schmiedewerke bemühen, bei guten magnetischen Eigenschaften die Festigkeitswerte der Schmiedestücke weiter zu verbessern, kann in nächster Zeit kaum mit einem Durchbruch zu bedeutend grösseren Rotordurchmessern gerechnet werden. Von der mechanischen Seite bleibt daher zur Leistungssteigerung nur die Verlängerung des Rotorballens. Die dadurch resultierenden grösseren Rotordurchbiegungen wirken sich jedoch in verschiedenen Beziehungen negativ aus:

- grösserer Einfluss des magnetischen Zuges und Anregung höherer Schwingungseigenformen;
- grössere Unterschiede des Schwingungsverhaltens zwischen kaltem und warmem Zustand (thermische Instabilitäten);
- grössere Schwingungen von doppelter Drehfrequenz zufolge Anisotropie der Rotor-Biegesteifigkeit und der inneren Dämpfung;
- Gefahr von Instabilitäten durch das thermo-mechanische Verhalten der Rotorwicklung sowie den stärkeren Einfluss ihrer mechanischen Dämpfung.

Ausserdem muss bei langen Rotoren eine Vielzahl kritischer Drehzahlen im Betriebsbereich durchfahren werden, was entsprechend viele Wuchtebenen und zeitraubendes Wuchten zur Folge hat. Man trachtet daher danach, die Rotorballenlänge so kurz als möglich zu halten.

Bei 4poligen Rotoren stellt sich ein zusätzliches Problem: Schmiedestücke im Gewichtsbereich von 200...300 t in einwandfreier Qualität mit minimaler Ausschussquote herzustellen. Durch Fortschritte in der Giess- und Schmiedetechnik und entsprechende Grossinvestitionen ist man heute in der Lage, aus 500-t-Ingots Schmiedestücke von ca. 250 t herzustellen, die für 4polige Generatoren mit Einheitsleistungen von ca. 2000 MW verwendet werden können.

Für Rotoren, die nicht mehr als Monobloc geschmiedet werden können, besteht die Möglichkeit der Multibloc-Bauweise, sei es in Schrumpf- oder Schweißtechnik, sei es durch eine Kombination dieser beiden Verfahren. Brown Boveri hat kürzlich einen 4poligen Rotor von 210 t Fertiggewicht und einer totalen Länge von 20 m für einen 1333-MVA-Generator in Schrumpftechnik fertiggestellt, einem Verfahren, das sich seit mehr als 40 Jahren bei über 300 Multibloc-Rotoren bewährt hat [4]. Dieser Rotor, dessen 3 Ballenteile von 1750 mm Durchmesser von einem zentralen Schrumpfbolzen zusammengehalten werden, hat sich bezüglich Rundlauf und Laufruhe bis zur Schleuderdrehzahl von 2160 U./min sehr gut verhalten (Fig. 2).

2.2 Die elektromagnetische Ausnutzung

Die elektromagnetische Ausnutzung ist massgebend für die Dimensionierung des Statorblechkörpers, der Statorwicklung, der Rotorwicklung und ihrer Erregung sowie für das Betriebsverhalten im Netz, d. h. für die elektrische Stabilität der Maschine.

2.2.1 Der Stator-Blechkörper

Durch den Fortschritt auf dem Gebiet der Herstellung hochwertiger Dynamobleche konnten die spezifischen Ma-

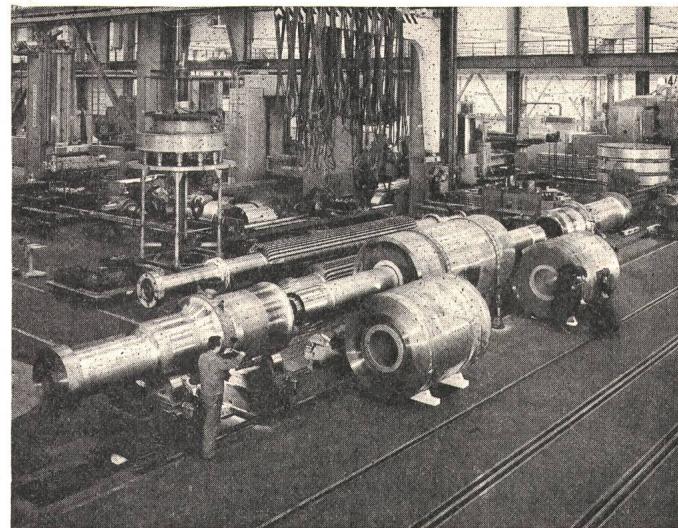


Fig. 2
Multibloc für einen
4poligen Generator 1333 MVA/1100 MW, 1800 U./min

bestehend aus einem Mittelballen, zwei Endballen und zwei Wellenenden, die durch einen zentralen Schrumpfbolzen zusammengehalten werden

gnetisierungsverluste in den letzten 20 Jahren um 30...40 % reduziert und dank besserer magnetischer Permeabilität die zulässigen Induktionen um ca. 10 % gesteigert werden [4]. Kornorientierte Bleche gestatten eine weitere Reduktion der Verlustziffer unter 1 W/kg sowie eine Verkleinerung des Blechkörper-Aussendurchmessers, was mit Rücksicht auf das Transportproblem erwünscht ist. Allerdings führen die resultierenden kleineren Jochhöhen zu grösseren doppelfrequenten Radialschwingungen des Blechkörpers, angeregt durch das umlaufende Magnetfeld. Der Blechkörper wird daher vor allem bei 2poligen Generatoren grosser Leistung auf Federelemente abgestützt, welche die auf das Fundament übertragenen Statorvibrationen auf ca. $1/10$ reduzieren (Fig. 3).

Mit steigenden Einheitsleistungen stellen nicht nur die Vorgänge im eigentlichen aktiven Teil der Energieumwandlung neue, zum Teil schwierige technologische Probleme, sondern leider auch eine Reihe parasitärer Nebeneffekte. Typisch für diese Problematik sind die Stirnraumprobleme hoch ausgenützter Turbogeneratoren mit ihren Auswirkungen auf die Stirnseiten des Blechkörpers, die Wicklungsköpfe der Statorwicklungen und deren Verschalungen. Mit wachsendem Strombelag [4] nehmen die komplizierten, dreidimensionalen Felder im Stirnraum erhebliche Werte an. Diese Felder durchdringen aktive und inaktive Teile und erzeugen in ihnen zusätzliche Verluste und Erwärmungen, besonders durch Feldkonzentrationen an Orten mit unstetigem Konturverlauf. Damit verbunden sind nicht nur schädliche Nebeneffekte im Nennbetrieb (Wirkungsgradverschlechterung, Wärmenester, Heisspunkte mit Eisenbrandgefahr), sondern auch bei abnormalen Betriebsbedingungen (untererregter Betrieb, Asynchronlauf). Konventionelle Pressplatten mit oder ohne Abschirmungen haben den Nachteil eines nicht stetigen Übergangs Luftspalt-Stirnraum mit den bekannten örtlichen Feldkonzentrationen und Wärmenestern. Für stark ausgenutzte Generatoren grosser Leistung wird daher mit Vorteil eine Spezialkonstruktion verwendet: konische, lamellierte Pressplatten aus verklebten Dynamoblechsegmenten (Fig. 4).

Umfangreiche Messungen an Generatoren bis 670 MVA zeigen, dass durch den damit erzielten stetigen Feldverlauf und die günstige Einführung des Stirnfeldes in den Blechkörper relativ kleine Verlustdichten in der Pressplatte und kleine Erwärmungen von wenigen 10 °C resultieren (Fig. 5).

2.2.2 Die Statorwicklung

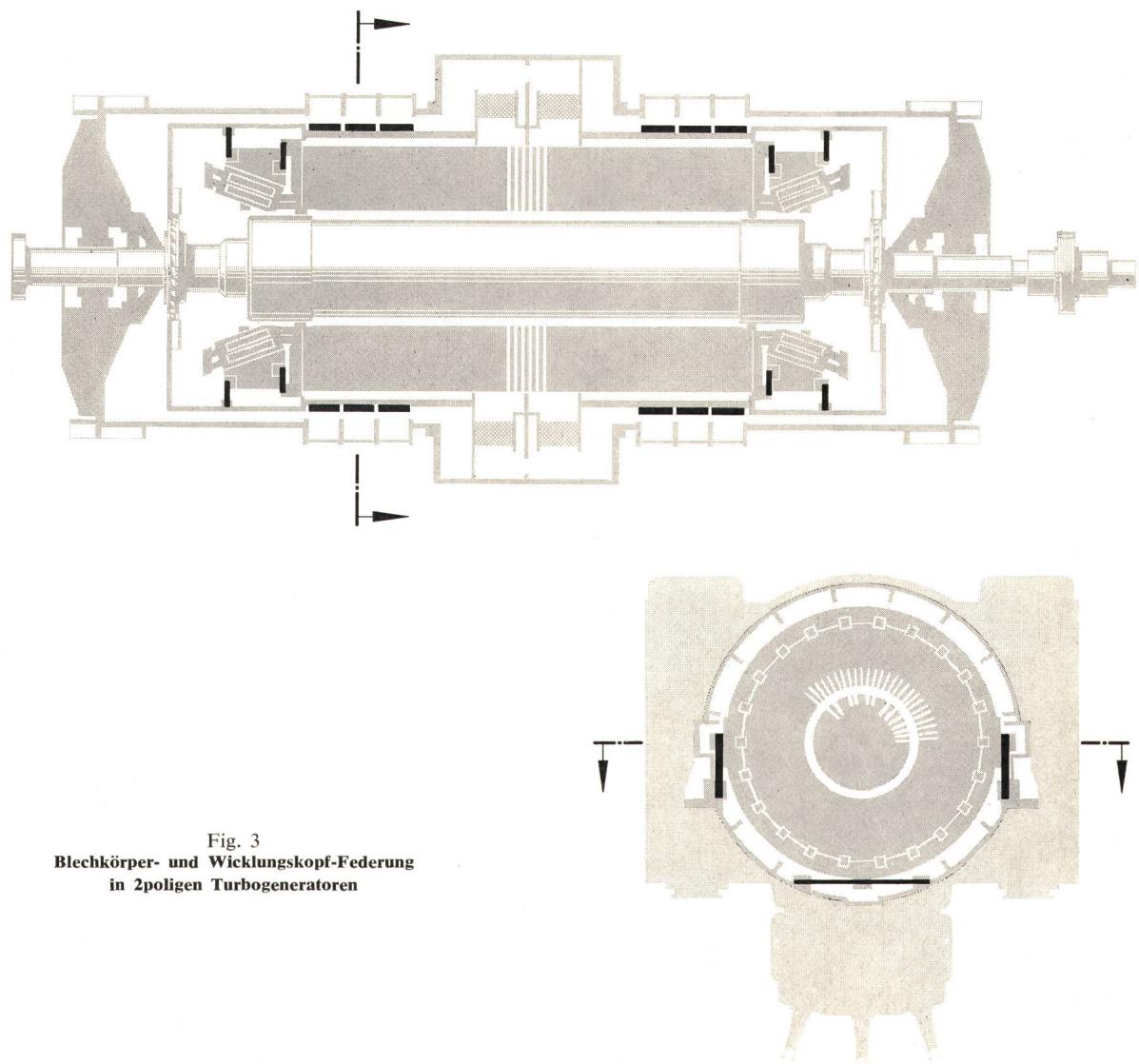
Mit zunehmenden Einheitsleistungen sind auch die Anforderungen an die Statorwicklungen bezüglich dielektrischer, thermomechanischer, Schwingungs- und Kurzschlussfestigkeit erheblich gestiegen.

Seit seiner Erfindung im Jahre 1912 hat sich der Röbelstab als einfaches, betriebssicheres Leiterelement mit minimalen Wirbelstromverlusten im Grossmaschinenbau immer mehr durchgesetzt (Fig. 6). Als besonderer Vorteil ist die einfache Kombinierbarkeit mit Kühlleitern für Flüssigkeitskühlung zu werten, welche eine Vielzahl von Ausführungsformen nach dem gleichen Fertigungsverfahren gestattet (Fig. 6). Der Röbelstab bildet damit ein bewährtes, betriebsicheres Bauelement auch für Generatoren im GW-Bereich.

Die konventionellen Isolationen der Vorkriegsjahre auf Schellack- und Asphalt-Basis führten im Zusammenhang mit der höheren thermischen Ausnützung der Generatoren bei verschiedenen Herstellern zu Störungen durch Kriecherscheinungen der Nutenisolierung und Bandverschiebungen

am Nutaustritt. Obwohl Brown Boveri dank einer speziellen Micafolium-Technik keine derartigen Schwierigkeiten hatte, wurde in den fünfziger Jahren ein Kunstharsz-Isolationssystem auf Samica/Glas-Epoxy-Basis entwickelt, das hervorragende dielektrische und thermomechanische Eigenschaften aufweist und sich in allen Grossmaschinen seit mehr als 15 Jahren gut bewährt hat. Durch Vakuumimprägnierung und Kalibrierung in besonderen Pressformen wird ein Isolationsverband erzielt, der sich in Nut- und Wickelkopfzone durch vorzügliche Homogenität, hohe Durchschlagfestigkeit und hervorragende thermomechanische Festigkeit bis zu Temperaturen der Klasse F (155 °C) auszeichnet. Die aussergewöhnliche Glimm- und Alterungsbeständigkeit lässt Betriebsspannungen bis 30 kV zu [5].

Obwohl die mechanischen Eigenschaften der modernen Kunstharszisolationen einen hervorragenden Stand erreicht haben, fordern die steigenden Anforderungen an Schwing- und Kurzschlussfestigkeit der Statorwicklungen bei zunehmenden Einheitsleistungen grösste Beachtung. In den letzten 20 Jahren ist der Strombelag um den Faktor 2,5 das Produkt Strombelag \times Stromdichte gar um den Faktor 10 gestiegen [4]. Dies hatte einen beträchtlichen Anstieg der doppelfrequenten Beanspruchungen der Wicklungsstäbe nicht nur in den Nuten, sondern ebenso sehr im Wickelkopf zur Folge. Durch Verbesserung der Verkeilmethoden der



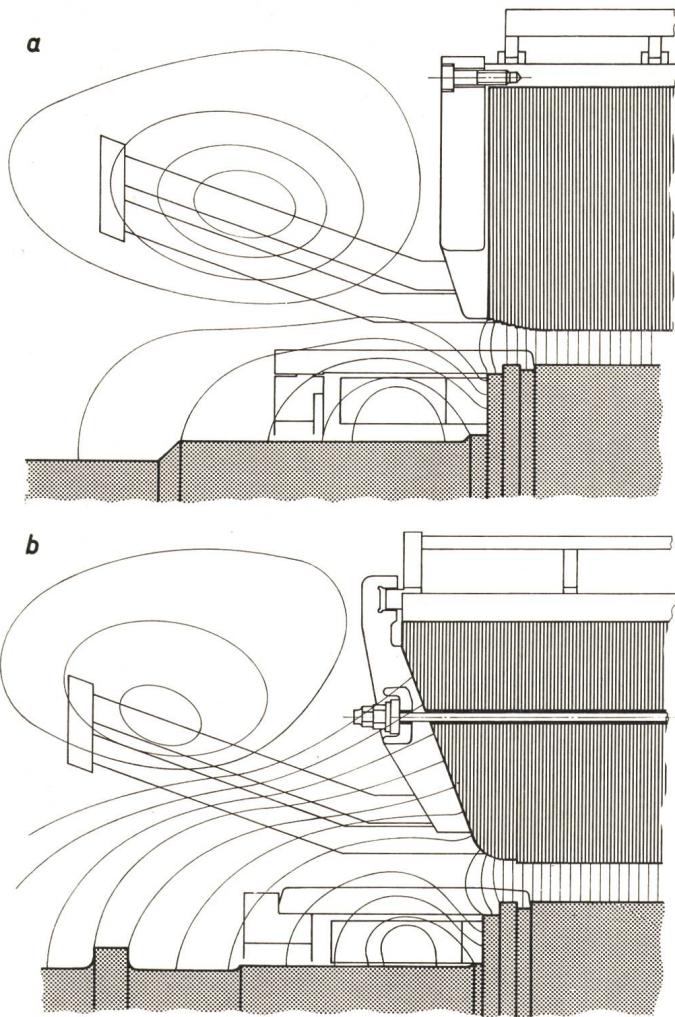


Fig. 4

Stirnraumfelder von Turbogeneratoren bei Nennlast, $\cos \varphi = 0,85$

a Blechkörper mit vollständig abschirmender Pressplatte

b Blechkörper mit konischer, lamellierter Pressplatte nach Darrieus

Stäbe in den Nuten, basierend auf Modellversuchen im Massstab 1 : 1 (Fig. 7), ist man in der Lage, weitere Steigerungen des Strombelages und die resultierenden Nutenkräfte zu beherrschen.

Die zunehmend stärkeren magnetischen Felder im Wickelkopfraum verursachen zusätzliche Verluste durch sog. Schlingströme in den Teilleitern sowie Schwingungerscheinungen, welche zu mechanischen Beschädigungen der Wickelköpfe führen können. Durch Verdrillen der Wickelköpfe um je 180° – ähnlich den Röbel-Verdrillungen um 360° oder 540° in der Nutenzone – können die Induktionswirkungen der 3 Störfelder (Eigenquerfeld, Fremdquerfeld, Radialfeld) im Wickelkopf kompensiert und die Gesamtverluste in den Statorstäben wesentlich reduziert werden [6] (Fig. 8). Die Kurzschluss- und Schwingungsfestigkeit der Wickelköpfe wird erreicht durch ein ausgeklügeltes Verkeilverfahren, welches axiale Dilatationen der Statorwicklung zulässt, den Wickelkopf jedoch in radialer und tangentialer Richtung sicher abstützt (Fig. 9). Kunstharzgetränkte Abstützelemente, die sich den Wicklungskonturen gut anpassen, bilden nach Polymerisation einen festen, vibrationssicheren Verband.

2.2.3 Die Rotorwicklung und deren Erregung

Während bei der Statorwicklung die dielektrischen Probleme im Vordergrund stehen, handelt es sich bei der Rotor-

wicklung vor allem um die Bewältigung der ausserordentlich hohen mechanischen Beanspruchungen in der Größenordnung bis 20 kg/mm^2 , denen das Wicklungskupfer und seine Isolation ausgesetzt sind. Durch silberlegiertes Kupfer und Isoliermaterialien auf Glas-Asbest-Epoxy-Basis sowie durch wirksame direkte Kühlverfahren konnten wesentliche Fort-

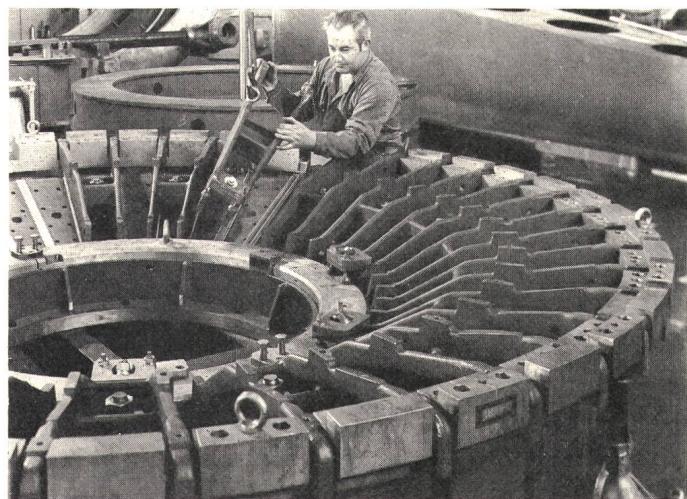


Fig. 5
Konische Pressplatte aus verklebten Dynamoblech-Segmenten mit stirnseitigen Pressankern

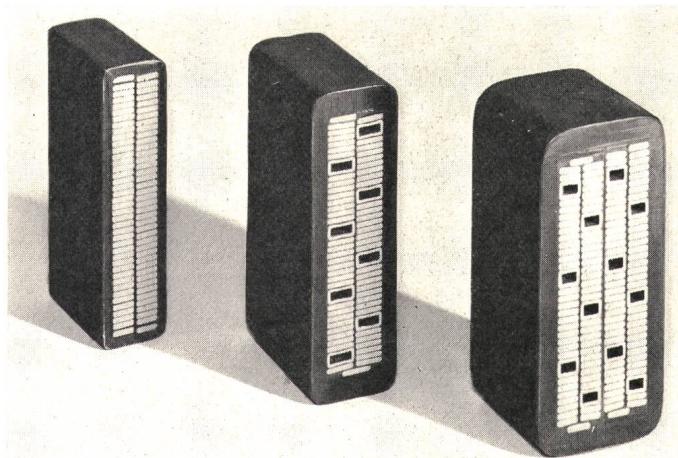


Fig. 6
Roebelstäbe für indirekte Gaskühlung und direkte Wasserkühlung

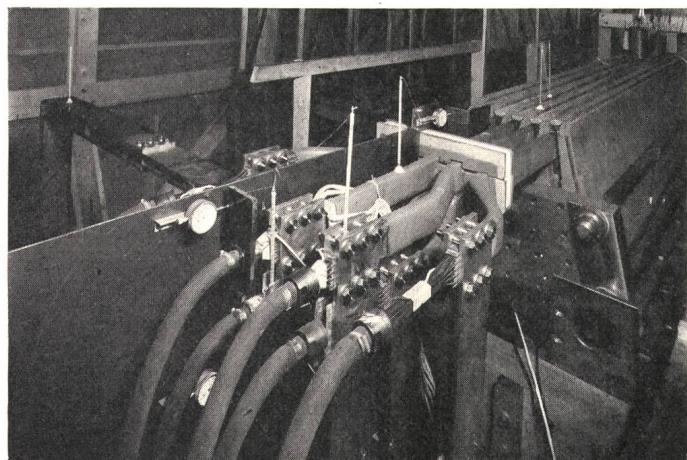


Fig. 7
Modell für die Prüfung von Statorstäben für Turbogeneratoren grösser als 1000 MW

schritte auf dem Gebiet der Kriechfestigkeit bei thermomechanischen Beanspruchungen durch Lastwechsel erzielt und die Voraussetzungen für weitere Leistungssteigerungen geschaffen werden.

Brown Boveri verwendet bei Gross-Turbogeneratoren durchgehende Dämpferwicklungen, welche die Erregerwicklungen bei Ausgleichsvorgängen im Zusammenhang mit Netzkurzschlüssen schützen und ein günstiges Verhalten des Rotors bei Schieflast gewährleisten (Fig. 10).

Besondere Beachtung muss bei zunehmenden Einheitsleistungen der Rotorerregung geschenkt werden, deren Leistungsbedarf im MW-Bereich liegt. Es stehen grundsätzlich zwei Systeme zur Verfügung: Erregung über rotierende oder stationäre Halbleitergleichrichter. Für Turbogeneratoren über 125 MW bevorzugt BBC die Erregung über stationäre Gleichrichter, sei es mit Speisung direkt ab Generatorklemmen, sei es ab Wechselstromerreger (Fig. 11). Bei normalen Netzverhältnissen mit Kurzschlussdauern bis 1,5 s wird die Standardlösung mit Erregung ab Generatorklemmen über stationäre Thyristoren und Schleifringe empfohlen. Diese Erregungsart hat die Vorteile hoher Regelgeschwindigkeit, kurzer Maschinenlänge, Geräuscharmut und geringen Wartungsaufwandes. In Netzen mit Kurzschlussdauern grösser als 1,5 s werden Generatoren mit autonomer Erregung ab Wechselstromerreger über stationäre Dioden verwendet, wobei grössere Maschinenlängen und eine reduzierte Dynamik in Kauf genommen werden müssen. Beide Erregungssysteme lassen sich für noch grössere Erregungsleistungen ausbauen, die über wassergekühlte Schleifringe mit Strömen von mehr als 10 kA betriebssicher und mit minimalem Wartungsaufwand dem Rotor zugeführt werden können. Durch Zwei-kanal-Regleraufbau wird den höheren Anforderungen an Betriebssicherheit Rechnung getragen.

2.2.4 Die elektrische Stabilität

Massgebend für die statische Stabilität ist das Kurzschlussverhältnis der Generatoren. Während in den USA bisher Kurzschlussverhältnisse in der Größenordnung von 0,5...0,6 üblich waren, verwendete man in Europa zum Teil wesentlich kleinere Werte von 0,35...0,4 ohne Stabilitätschwierigkeiten. Durch weitere Netzzusammenschlüsse und die Verwendung schneller Reguliersysteme für Turbinen und Generatoren werden in Zukunft auch bei noch grösseren Einheitsleistungen Kurzschlussverhältnisse in der Größenordnung von 0,4, d. h. Synchronreaktanzen von ca. 250 %, möglich

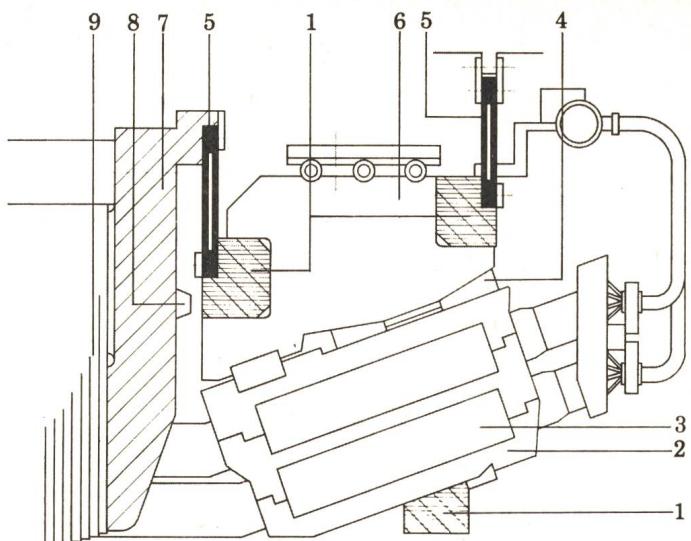


Fig. 9

Prinzip der flexiblen Wicklungskopfabstützung

- | | |
|----------------------------------|--------------------|
| 1 Abstützringe | 6 Abstützwinkel |
| 2 Zuglaschen und Distanzstücke | 7 Pressplatte |
| 3 Wicklungskopf | 8 axialem Anschlag |
| 4 Nachspannkeile mit Spannbolzen | 9 Blechkörper |
| 5 Federblätter | |

sein. Eine schlechtere Ausnutzung der Generatoren aus Gründen der statischen Stabilität ist nur in Ausnahmefällen bei extremen Übertragungsdistanzen notwendig.

Mit steigender Ausnutzung der Turbogeneratoren ist eine Zunahme der subtransienten und transienten Reaktanzen verbunden, welche vor allem die dynamische Stabilität beeinflussen. Man rechnet mit transienten Werten in der Größenordnung von 40...50 % bei 4poligen 2000-MVA-Einheiten, während bei den bisherigen 2poligen Generatoren im Leistungsbereich von 300...600 MVA Werte von ca. 30 % üblich sind. Diese höheren Werte werden in Zukunft im dynamischen Verhalten der Maschinen kaum zu Schwierigkeiten Anlass geben, da raschwirkende Thyristor-Erregungssysteme mit zusätzlicher Beeinflussung durch die Polrad-Winkeländerungen (Schlupf, Beschleunigung) den negativen Einfluss steigender Maschinenreaktanzen kompensieren. Eine wesentliche Verbesserung dürfte der Durchbruch zu supraleitenden Maschinen im GVA-Bereich bringen, bei denen die Synchronreaktanzen ca. fünfmal kleiner sind und die transienten Reaktanzen wieder die üblichen Werte von 30...40 % der Generatoren im MVA-Bereich erreichen.

2.3 Die thermische Ausnutzung

Obwohl Grossgeneratoren mit Wirkungsgraden gegen 99 % durch weitere Reduktion der Verluste nicht mehr wesentlich zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der ganzen Turbogruppe beitragen können, wird auch in Zukunft der Kampf gegen die Verluste unvermindert weitergehen. 1 Verlustprozent bedeutet bei einem 2000-MW-Generator immerhin die ansehnliche Verlustleistung von 20 000 kW, welche die Maschine in schädlicher Weise für Material und Betriebssicherheit aufheizen kann und durch geeignete Kühlverfahren weggeführt werden muss.

Erst die Kenntnis der Verluste nach Ort und Grösse und die Fortschritte auf dem Gebiet der Kühltechnik, die vom Gas über Flüssigkeiten zur Kryotechnik den Weg in die Zukunft weist, lieferten die Grundlagen für den eklatanten An-

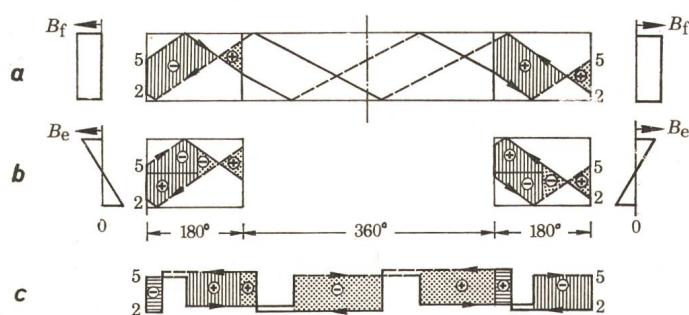


Fig. 8
Roebelstab mit 360° Verdrillung im Nutenteil und 180° Verdrillung im Wickelkopf

- a Kompensation des Fremdquerfeldes B_f
- b Kompensation des Eigenfeldes B_e
- c Kompensation des Radialfeldes

stieg der Einheitsleistungen bzw. der spezifischen Leistungen pro Gewichtseinheit (Fig. 12). Durch Verlustoptimierung und den gezielten Übergang von der Gaskühlung auf die 1000mal wirksamere Flüssigkeitskühlung war es möglich, die spezifische Leistung in den vergangenen 20 Jahren zu verdoppeln. Die Flüssigkeitskühlung wird ein weiteres Wachstum um 50 % in den nächsten 10...15 Jahren gestatten. Obwohl damit gerechnet werden darf, dass mit der praktischen Erfahrung bei grossen, flüssigkeitsgekühlten Generatoren die Grenzleistungen weiter erhöht werden können, fragt man sich schon heute, wie nach voller Ausnützung der wirksamsten Kühlflüssigkeiten die Einheitsleistungen weiter gesteigert werden können. Es stehen dazu zwei Wege offen: Erhöhung der Temperaturen im kritischen Engpass, dem Rotor, oder Tiefkühlung.

Temperaturerhöhung kommt aus verschiedenen Gründen für Grenzleistungsmaschinen nicht in Frage: Schwierigkeit der Herstellung von Isolationssystemen für hohe Spannungen und sehr hohe Temperaturen bei ausreichender mechanischer Festigkeit, thermische Stabilität der Rotoren, vor allem aber rascher Anstieg der Ohmschen Kupferverluste mit steigender Temperatur. Es bleibt daher nur der Weg zu tieferen Temperaturen. Dabei zeigt es sich, dass die Kosten von Kühlaggregaten für Rotorverluste von mehr als 5000 kW derart hoch sind, dass nur eine einzige Lösung Erfolg verspricht: Der Durchbruch zum supraleitenden Rotor ohne Ohmsche Verluste. Welche spezifischen Leistungen mit supraleitenden Rotoren erzielt werden können, hängt wesentlich von der zukünftigen Entwicklung auf den Gebieten der Kryotechnik, der Supraleitung und der Materialien für extrem tiefe Temperaturen ab. Untersuchungen zeigen, dass

die spezifischen Leistungen angenähert dem bisherigen Trend folgen; wesentlich bessere Werte sind zurzeit unter Berücksichtigung der mechanischen Probleme (Sprödbruchverhalten bei tiefen Temperaturen) mit den verfügbaren Materialien kaum zu erreichen. Auch die optimistischen Prognosen einer substantiellen Senkung der spezifischen Generatorkosten bei supraleitenden Maschinen kann man nicht unterstützen: Angesichts der noch zu lösenden technologischen Probleme darf man von einem grossen Erfolg sprechen, wenn die bis Ende dieses Jahrhunderts benötigte elektrische Energie mit betriebssicheren Kryogeneratoren erzeugt wer-

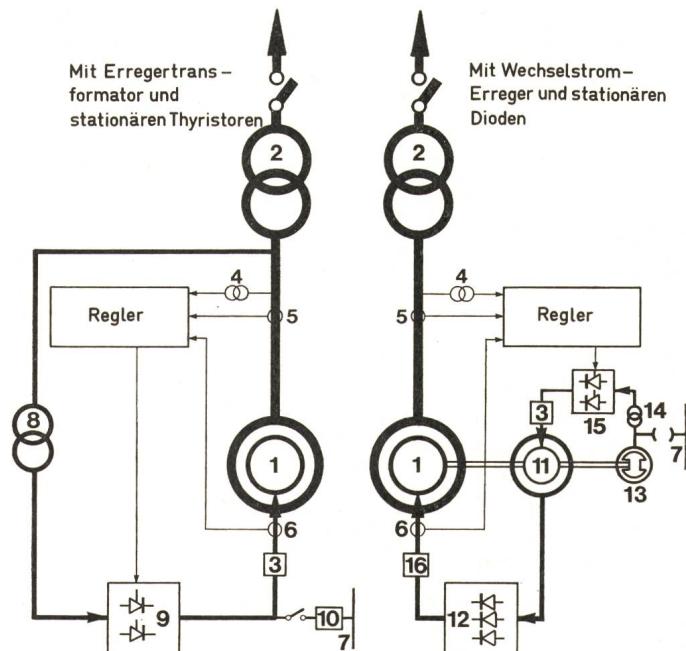


Fig. 11
Erregersysteme für grosse Turbogeneratoren

- 1 Turbogenerator
- 2 Haupttransformator
- 3 Entregungs- und Überspannungsschutz
- 4 Spannungsinput
- 5 Strominput
- 6 Erregerstrominput
- 7 Hilfsnetz
- 8 Erregertransformator
- 9 Thyristorgleichrichter
- 10 Erregungsvorrichtung zum Anfahren
- 11 Wechselstrom-Hauptreger
- 12 Diodengleichrichter
- 13 Permanentpol-Hilfsreger
- 14 Hauptregerfeld-Transformator
- 15 Thyristorgleichrichter für Hauptregerfeld
- 16 Überspannungsschutz

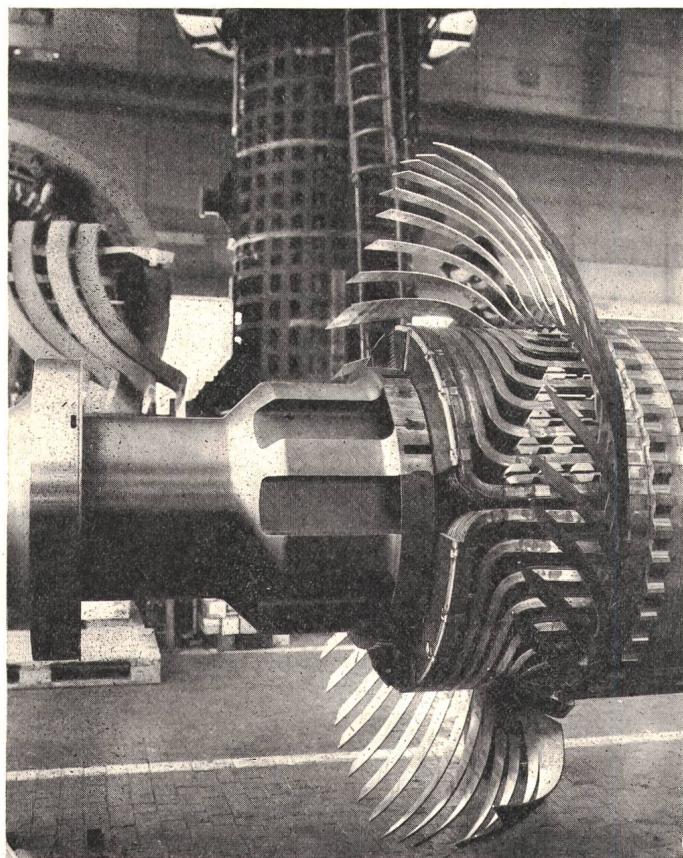


Fig. 10
Dämpferwicklung für Turbogeneratoren

den kann, deren spezifische Kosten vorerst in der Größenordnung der flüssigkeitsgekühlten Maschinen liegen.

Fig. 13 zeigt die Verlustverteilung in Prozent der Generator-Gesamtverluste in 2poligen 50-Hz-Generatoren von 1200 MVA/1000 MW bei verschiedenen Rotorkühlverfahren. Durch den Übergang von H_2 - auf H_2O -Kühlung der Rotorwicklung können bei kleinerer Erwärmung und ausglichenerer Temperaturverteilung über 20 % mehr Rotorverluste abgeführt werden. Die konventionelle Wasserkühlung der Statorwicklung ist ohne weiteres in der Lage, den von 24 % bei H_2 -Kühlung auf beinahe den doppelten Wert bei supraleitenden Rotoren ansteigenden Verlustanteil aufzunehmen. Trotz steigender Ausnützung nimmt der Verlustanteil im Statorblechkörper von 9 % bei Gaskühlung über

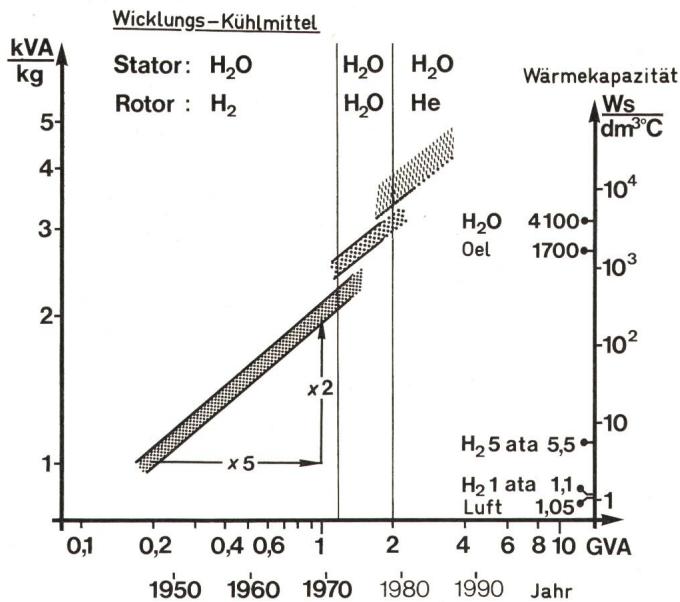


Fig. 12
Wachstum der spezifischen Einheitsleistung (kVA/kg)
von 2poligen Turbogeneratoren (60 Hz)

8 % bei Rotorwasserkühlung auf 7 % bei supraleitenden Rotorwicklungen ab. Deutlich ist der Anstieg des Verlustanteiles in den Wicklungskopfräumen zu erkennen, der von je 6 % über 7 % auf je 15 % ansteigt, eine Beweis für die Zunahme der technologischen Probleme im Stirnraum bei steigenden Einheitsleistungen. Während die Ventilationsverluste bei der wasserstoffgekühlten Maschine immerhin einen Anteil von 14 % erreichen, verschwinden sie praktisch bei Generatoren der BBC-Bauart mit Wasserkühlung des Rotors. Die Reduktion der aktiven Maschinenlänge um ca. 20 % bei Flüssigkeitskühlung bzw. ca. 70 % bei supraleitenden Rotorwicklungen entspricht der Forderung nach kurzen Rotoren im Interesse einer guten Laufruhe.

In Fig. 14 ist die Verlustverteilung bei 4poligen 50-Hz-Generatoren von 1600 MVA/1400 MW bei Wasserstoff-, Wasser- und Helium-Rotorwicklungskühlung dargestellt.

Die Verlustverteilung in den flüssigkeitsgekühlten 2poligen BBC-Generatoren zeigt, dass 3 Intensitätsstufen zu unterscheiden sind:

- die Stator- und Rotorwicklung mit ca. 70 % Verlustanteil;
- der Statorblechkörper und die Stirnräume mit ca. 20 % und
- die Oberflächen- und Lagerverluste mit ca. 10 %.

Diese 3 Zonen werden mit den bestgeeigneten Kühlmitteln gekühlt:

- direkte Wasserkühlung der Wicklungen;
- direkte Ölökühlung des Statorblechkörpers und der stirnseitigen Pressplatten; direkte Wasserkühlung und Stickstoff als inertes Gas in den Wickelkopfpartien im Stirnraum;
- Wasserkühlung der Innenseite eines Glas-Epoxy-Luftspaltzylinders, welcher den Rotorraum vom Statorraum trennt und damit gestattet, den Rotor mit kleinstmöglichen Ventilationsverlusten laufen zu lassen [7]. Die Lager weisen die übliche direkte Kühlung auf.

Der erste BBC-Generator von 330 MVA, 3000 U./min, mit direkter Rotorwasserkühlung wurde 1970 im Skaerbaekvaerket in Dänemark in Betrieb gesetzt (Fig. 15, 16). Die wesentlichsten Vorteile dieser flüssigkeitsgekühlten Generatoren sind [7]:

- Elimination des Wasserstoffes mit all seinen Komplikationen in technischer und fabrikatorischer Hinsicht sowie im Betrieb;

- einfacheres Statorgehäuse mit reduziertem Aussendurchmesser und entsprechend besserer Transportfähigkeit;
- vorzügliche Laufruhe des Rotors im Normalbetrieb und bei transienten Vorgängen (Lastschwankungen, Schnellanlauf). Prototypversuche zeigten, dass auch grosse Leckwassermengen die Laufruhe nicht beeinflussen;

- kein Einfluss eventueller Rotorleckagen auf den Stator dank des Rotorzylinders, daher kein sofortiges Abschalten der Maschine im Falle unerwarteter Kühlwasserleckagen im Betrieb notwendig;

- leichte Zugänglichkeit der aktiven Statorteile auch im Betrieb.

Versuche mit wasserstoff-, öl- und wassergekühlten Statorblechkörpern beweisen die Überlegenheit der Ölökühlung. Die erste BBC-Maschine von 254 MVA, 3000 U./min mit Stator-Ölkühlung steht seit mehr als 10 Jahren in der Amer-Zentrale in Holland in Betrieb (Fig. 17). Öl als Kühlmedium des Blechkörpers weist eine Reihe wesentlicher Vorteile gegenüber Wasserstoff bzw. Wasser auf:

- Wärme Kapazität in der Größenordnung von Wasser, d. h. 3 Zehnerpotenzen besser als Wasserstoff;

- elektrisch isolierend und - im Gegensatz zu Wasser - in direktem Kontakt mit dem Dynamoblech; vorzügliche Kühlwirkung in den gebleichten Pressplatten und in den Statorzähnen;

- ausgezeichnetes Dämpfungsmittel im Falle eventueller Blechvibrationen.

Der Betrieb mit dem Generator Amer hat gezeigt, dass die Ölleckmengen minim sind und dank des Luftspaltzylinders keinen Einfluss auf das Betriebsverhalten der Maschine haben. Wir verfügen damit für den Bau betriebssicherer Blechkörper in Generatoren des GW-Bereiches über ein

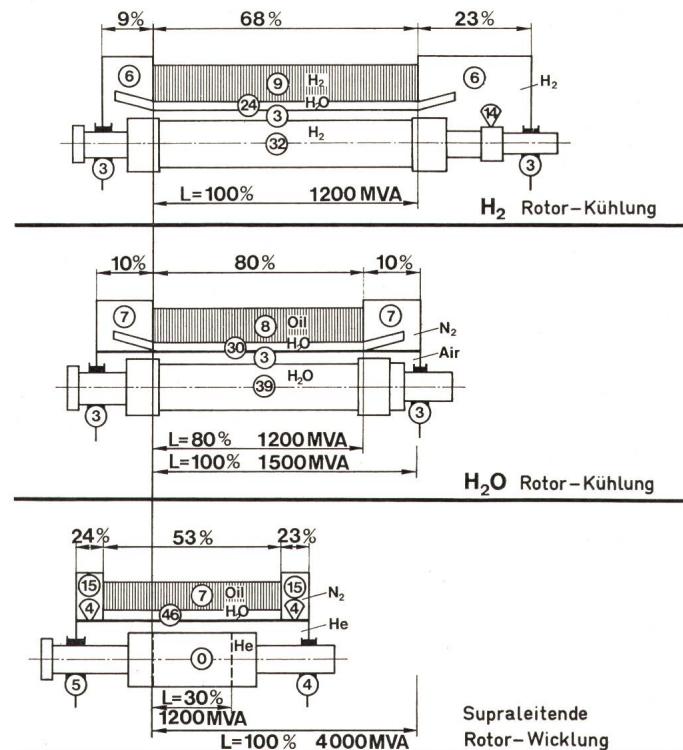


Fig. 13
Hauptdimensionen und prozentuale Verlustverteilung in 2-poligen 1200-MVA-Turbogeneratoren, 50 Hz, mit Wasserstoff- und Wasser-Rotorkühlung bzw. supraleitender Rotorwicklung

H ₂ -Rotorkühlung:	3 % Oberflächenverluste
32 % Rotorkupferverluste	2 × 6 % Stirnraumverluste
24 % Statorkupferverluste	14 % Ventilationsverluste
9 % Statoreisenverluste	2 × 3 % Lagerverluste

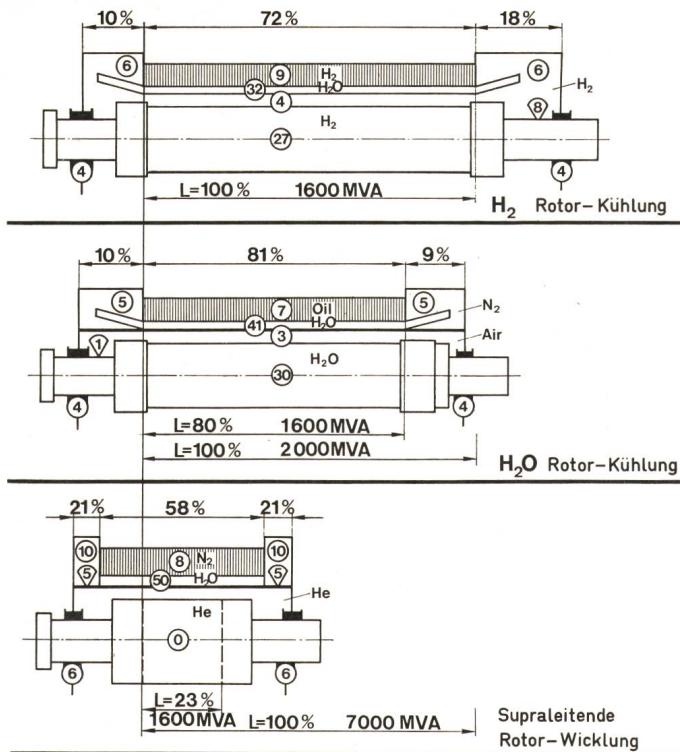


Fig. 14

Hauptdimensionen und prozentuale Verlustverteilung in 4poligen 1600-MVA-Turbogeneratoren, 50 Hz, mit Wasserstoff- und Wasser-Rotorkühlung bzw. supraleitender Rotorwicklung

Konstruktionselement, das sich auch im Transformatorbau bis zu den grössten Leistungen seit Jahrzehnten bewährt hat.

Der Grundsatz, optimale Kühlmittel für jeden Maschinenteil zu verwenden, führt langfristig zum supraleitenden Kryogenerator mit Heliumkühlung der Rotorwicklung. Supraleitung gestattet, die heutigen Induktionsgrenzen von 2...2,5 T im Rotoreisen zu sprengen und auf die ferromagnetischen Eigenschaften des Stahles zu verzichten. Dadurch können bei praktisch unveränderten Reaktanzen und elektrischen Stabilitätsverhältnissen Strombelag und Leistungsdichte bedeutend erhöht werden. In Weiterentwicklung des Konzeptes Flüssigkeitskühlung werden daher Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, die wirtschaftlichen Aspekte von Generatoren mit supraleitenden Rotorwicklungen abzuschätzen und die technologischen Voraussetzungen für langfristig eventuell benötigte Maschinen dieser Art zu schaffen.

Fig. 18 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Kryogenerators mit supraleitender Rotorwicklung. Der Rotor stellt einen rotierenden Kryostaten dar, dessen Wicklung aus NbTi durch flüssiges Helium auf 4...5 K supraleitend gehalten wird. Der kalte Rotorraum wird durch einen hoch evakuierten Raum mit zusätzlichem Strahlungsschild in radialer Richtung sowie durch Verbindungsstücke mit hohem thermischem Widerstand zu den Wellen in axialer Richtung thermisch isoliert. Die Rotoroberfläche ist als Dämpfungszyylinder ausgebildet, welcher die Rotorwicklung vor transienten Vorgängen im Stator schützt. Die Dimensionierung dieses Zylinders unter Berücksichtigung der kombinierten Beanspruchung durch Fliehkräfte sowie die Radial- und Tangentialkräfte im Kurzschluss stellt dabei besondere Probleme.

Die Statorwicklung liegt vollständig im Luftspalt der Maschine und ist direkt wassergekühlt. Da sie sowohl in radia-

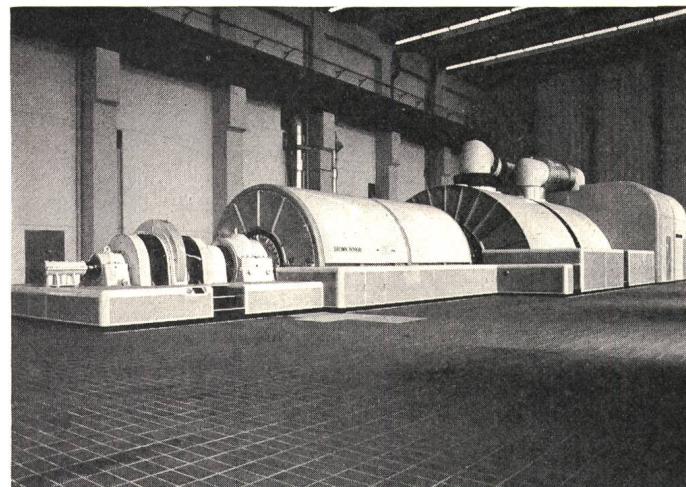


Fig. 15

330 MVA, 18 kV, 3000 U./min



Fig. 16
Turbogenerator-Rotor
mit wassergekühlter Feld- und Dämpfer-Wicklung

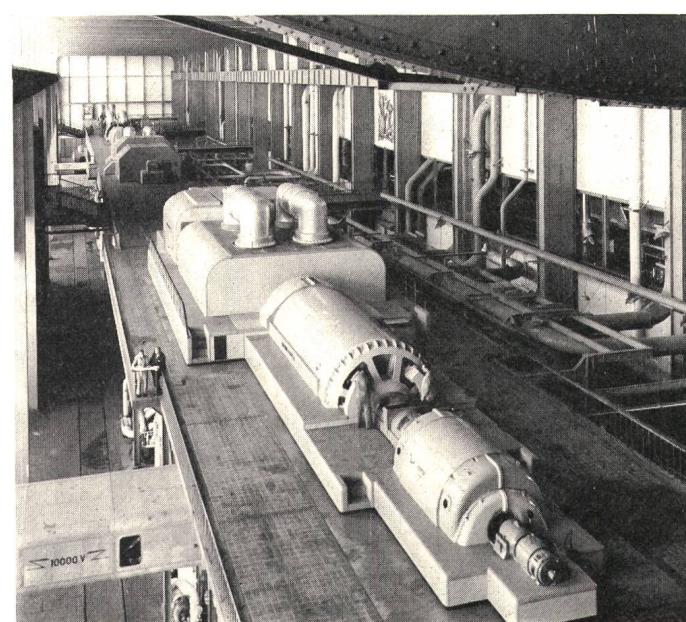


Fig. 17

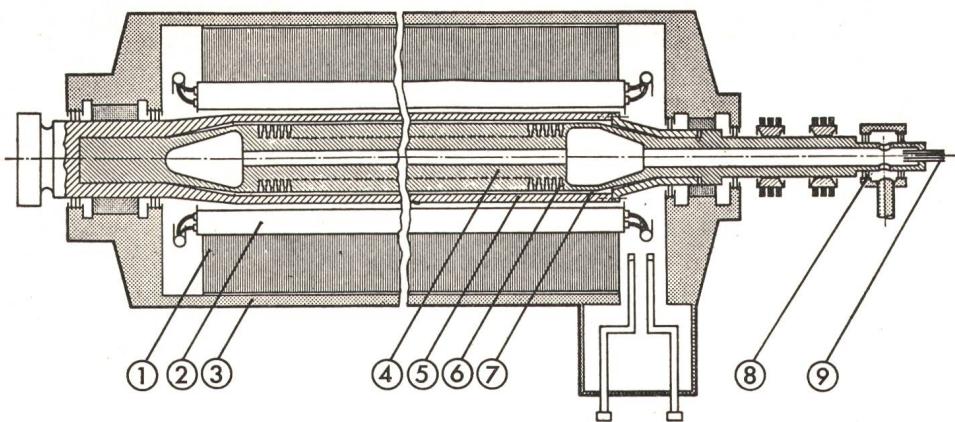


Fig. 18
Grundsätzlicher Aufbau eines Kryogenerators mit supraleitender Rotorwicklung

1 Abschirmung aus lamelliertem Dynamoblech
2 wassergekühlter Statorwicklungskörper
3 Statorgehäuse
4 Innenrotor
5 Dämpferzylinder (= Außenrotor)
6 supraleitende Rotorwicklung
7 thermische Rotorisolation (Vakuum)
8 Vakuum-Dichtung
9 Heliumübertrager

als auch in tangentialer Richtung vom Fluss durchflutet wird, müssen besondere Massnahmen zur Reduktion der Zu- satzverluste getroffen werden. Auch der Statorwicklungskörper verlangt hohe Anforderungen bezüglich Kurzschluss- festigkeit der verwendeten nichtmetallischen Werkstoffe.

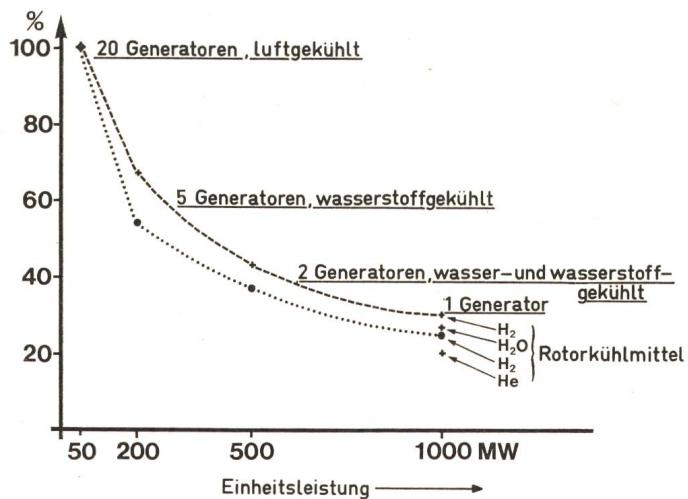


Fig. 19
Materialbedarf (+) und Fertigungszeiten (-) für eine totale Leistung von 1000 MW

Ein besonderes Problem stellt die Abschirmung der starken Magnetfelder nach aussen:

- maximale Leistung pro Volumeneinheit wird durch einen magnetischen Rückschluss aus lamelliertem Dynamoblech erzielt;
- minimales Gewicht pro Volumeneinheit resultiert durch gut leitende, z. B. Kupferabschirmungen; die Leistung pro Volumeneinheit sinkt jedoch auf etwa zwei Drittel.

Die bisherigen Studien zeigen, dass die Lösung der zurzeit noch offenen technischen Fragen in den nächsten Jahren grundsätzlich möglich ist. Wo jedoch die Leistungsgrenze für den Übergang von der Flüssigkeitskühlung zur Kryomaschine liegt, wird erst die Zukunft zeigen, wobei sowohl die Weiterentwicklung der Flüssigkeitskühlung als auch die Fortschritte auf dem Gebiet der Supraleiter und der Kryotechnik von ausschlaggebender Bedeutung sein werden.

2.4 Fertigungs- und Transport-Probleme

Fig. 19 zeigt den Verlauf des Bedarfes an Material und Fertigungsstunden für die Erzeugung von 1000 MW mit 20 Einheiten zu 50 MW, 5 à 200 MW, 2 à 500 MW und einem Generator von 1000 MW. Die Kurven beweisen, dass mit zunehmenden Einheitsleistungen die heute immer kategorischer gestellten Forderungen nach bestmöglichlicher Ausnützung der verfügbaren Rohstoffe und Facharbeitskräfte in eindrücklicher Weise erfüllt werden. Wie schon erwähnt, sind jedoch die Kosteneinsparungen bedeutend kleiner, müssen doch mit zunehmender Ausnützung immer höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Materials und der menschlichen und maschinellen Arbeit gestellt werden, abgesehen vom rasch steigenden finanziellen Engagement der Hersteller für Forschung und Entwicklung sowie die notwendigen Fertigungseinrichtungen.

Entwicklung und Fabrikation von Grossgeneratoren mit ständig steigenden Einheitsleistungen verlangen daher

- Motivation zu präziser Arbeit und vollen persönlichen Einsatz aller am Produktionsablauf Beteiligten;
- ein ausgeklügeltes Qualitätskontrollsystem, das Fehler und fabrikatorische Störungen beim Rohmaterial und dessen Verar-

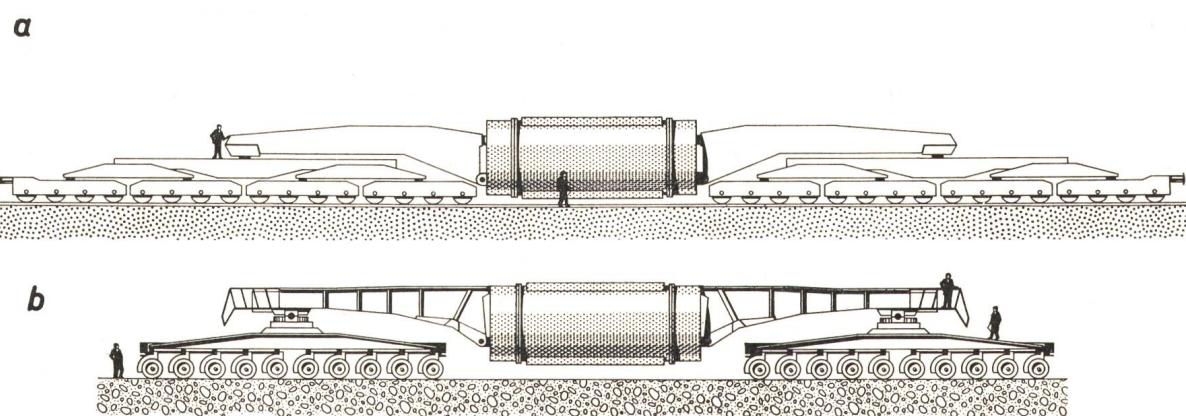


Fig. 20
Transport von Turbogeneratoren

a Schnabelwagen für 420 t Bahntransport b Spezialfahrzeug für 600 t Strassentransport

beitung sowie bei Montage und Inbetriebsetzung mit grosser Sicherheit ausschliesst.

Leider kann die Erfahrung, welche für das Ausarbeiten der notwendigen Kontrollsysteme unerlässlich ist, nur zum kleinsten Teil durch rein theoretische Überlegungen oder anhand von Modellversuchen erarbeitet werden. Prototypversuche im Maßstab 1 : 1 für Neuentwicklungen sind unerlässlich. Wir sind daher unseren aufgeschlossenen Kunden, die uns immer wieder gestatten, neue, in die Zukunft weisende Konstruktionen in Prototypmaschinen zu erproben, zu grossem Dank verpflichtet; sie leisten damit nicht nur der Industrie sondern der gesamten Öffentlichkeit grosse Dienste im Hinblick auf die sichere Deckung des zukünftigen Energiebedarfes.

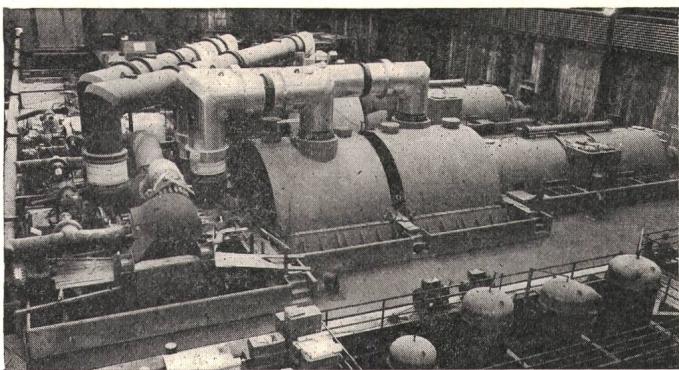


Fig. 21
Cross-Compound Turbogruppe Cumberland der TVA, 1300 MW, 60 Hz

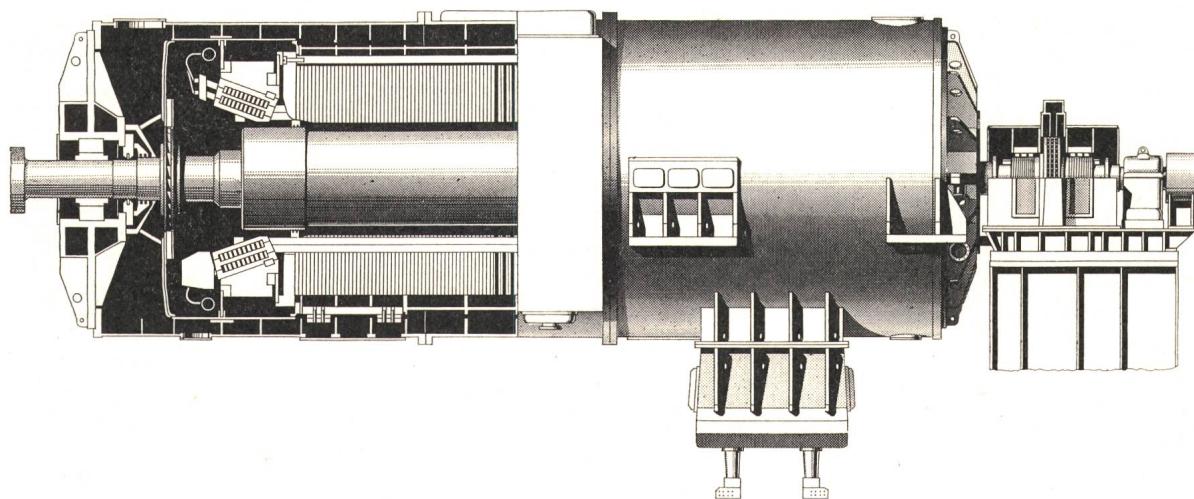


Fig. 22
Zweipoliger Turbogenerator 722 MVA, 22 kV, 3600 U./min
Statorwicklung wassergekühlt, Rotorwicklung wasserstoffgekühlt

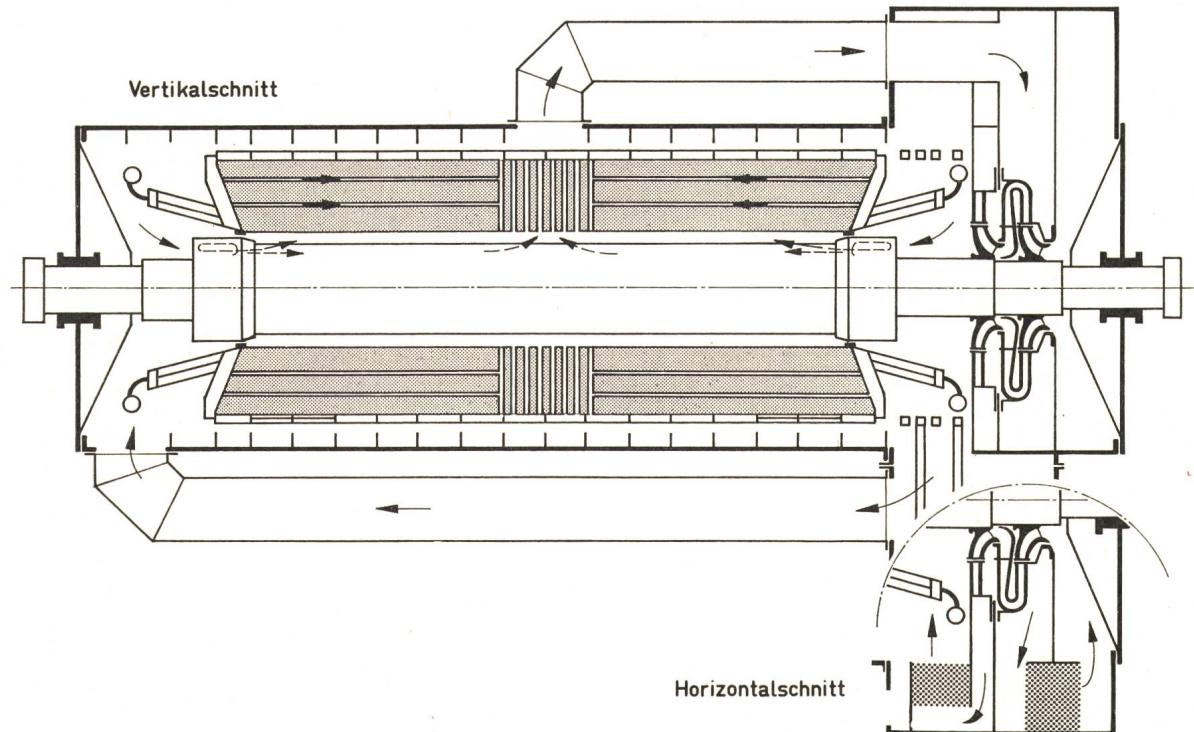


Fig. 23
Zweipoliger Turbogenerator 1200 MVA, 27 kV, 3000 U./min
Statorwicklung wassergekühlt, Rotorwicklung mit Wasserstoff-Supercharged-Kühlung durch ein zweistufiges Radialgebläse

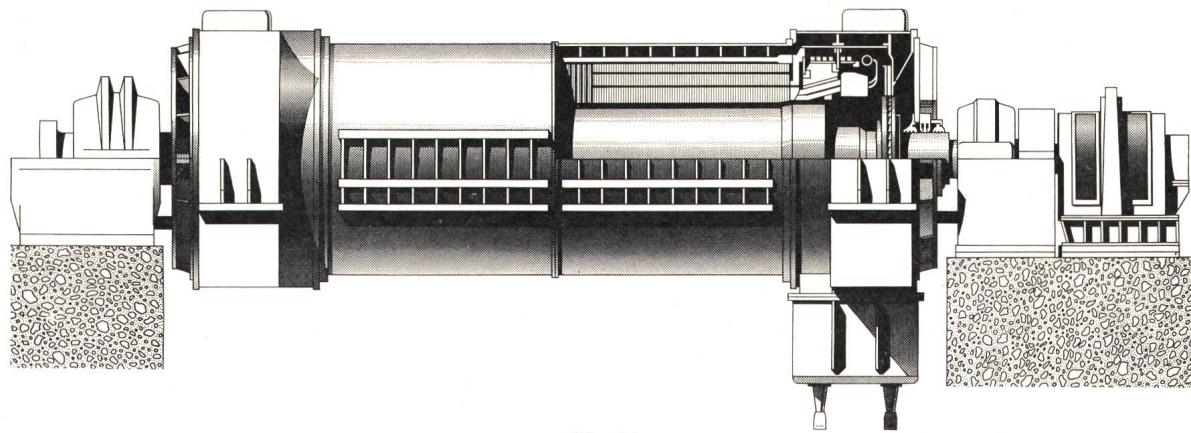


Fig. 24
Vierpoliger Turbogenerator 1333 MVA, 26 kV, 1800 U./min
 Statorwicklung wassergekühlt, Rotorwicklung wasserstoffgekühlt

Der Transport der zunehmend grösseren und schwereren Generatorteile stellt auch immer höhere Anforderungen an die Transportmittel sowohl in den Fabriken des Herstellers und im Kraftwerk als auch bei den Transportunternehmen. Die Transportkapazität für Bahntransporte liegt gegenwärtig in Europa bei ca. 420 t und maximalen Aussendurchmessern von 4,2 m, welche den Transport von 4poligen Generatoren bis 1700 MVA zulässt (Fig. 20). In den USA ist ein Tieflader für Strassentransporte mit Nutzlasten bis 600 t verfügbar. Das Transportproblem stellt wohl eine wichtige Randbedingung für den Bau grosser Turbogeneratoren dar, ist jedoch nur bedingt wachstumshemmend, da Ausweichsmöglichkeiten bestehen, durch

- Fabrikation an Wasserstrassen mit Transport auf Roll-on/Roll-off-Schiffen zum Kraftwerk;
- mehrteilige Bauweise der Generatorstatoren, wie sie z. B. bei 16 2/3-Hz-Bahngeneratoren üblich ist;
- Montage und Prüfung des Generators im Kraftwerk wie bei Grossturbinen.

3. Neueste BBC-Entwicklungen und -Ausführungen

Die grössten Turbogeneratoren, die Brown Boveri liefert hat, sind die 722-MVA/650-MW-Einheiten, 3600 U./min, für die Crosscompoundgruppen im Kraftwerk Cumberland der Tennessee Valley Authority in den USA (Fig. 21). Die erste Turbogruppe erreichte am 17. Juni 1972 die höchste, je produzierte Leistung von 1350 MW. Die zweite Gruppe wurde anfangs 1973 in Betrieb gesetzt. Der Generator ist konventionell wasserstoffgekühlt mit direkter Wasserkühlung der Statorwicklung (Fig. 22). Für die American Electric Power und mehrere europäische Kraftwerke sind weitere 24 Generatoren gleicher Leistung in Fabrikation und Montage.

Für wasserstoffgekühlte 2polige Generatoren im Leistungsbereich von 800...1200 MVA wurde eine Supercharged-Kühlung mit Zweistufengebläse auf der Erregungsseite entwickelt (Fig. 23). Durch Gas-Zu- und Ableitungen

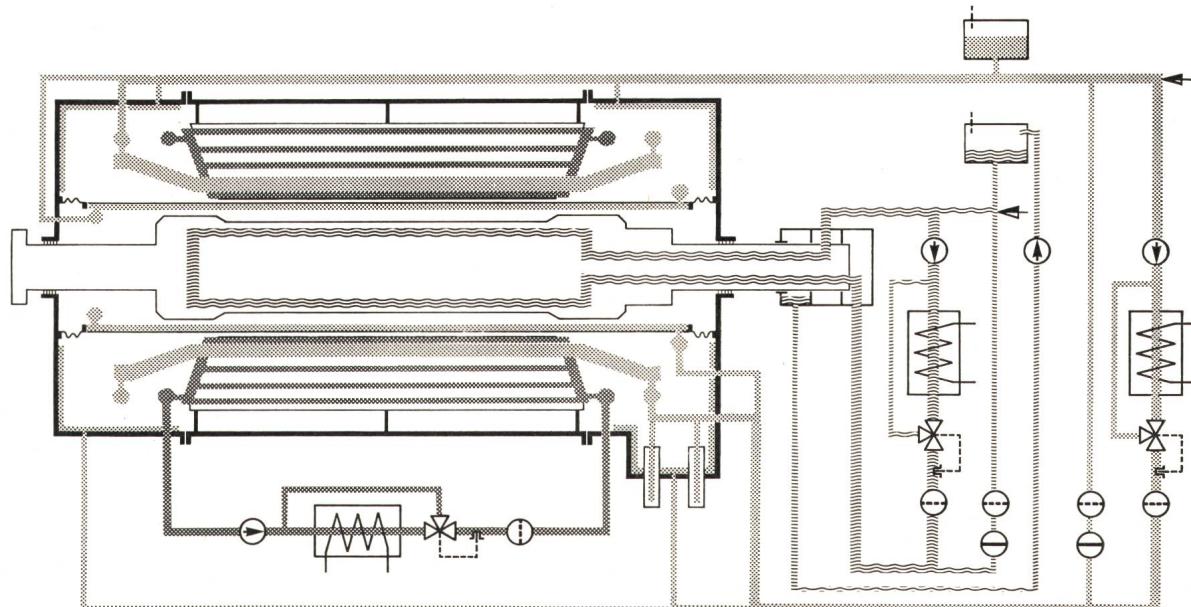


Fig. 25
Kühlungsprinzip eines vollständig flüssigkeitgekühlten Turbogenerators
 Stator- und Rotorwicklung wassergekühlt, Blechkörper ölgekühlt

- | | | |
|---------------|-------------------------|--|
| ● Pumpe | ■ Kühler | ■ Ölkühlungssystem für Blechkörper |
| ● Filter | ● Temperaturregulierung | ■ Wasserkühlungssystem für Rotor |
| ● Deionisator | ← Kondensataufbereitung | ■ Wasserkühlungssystem für Statorwicklung
Luftspaltzylinder und Verschalung |

ausserhalb des Gehäuses konnte der Aktivteil bezüglich Transportbedingungen optimal gestaltet und durch strömungstechnisch einwandfreie Auslegung des Gebläses die Ventilationsverluste verkleinert werden.

Der erste 4polige Turbogenerator von 1333 MVA/1100 MW bei 1800 U./min für das Kraftwerk Cook der AEP am Michigansee ist fertiggestellt (Fig. 24). Auch dieser Generator ist wasserstoffgekühlt mit direkter Wasserkühlung der Statorwicklung, eine Konstruktion, die bei 4poligen 60-Hz-Maschinen bis mindestens 1500 MVA verwendet werden kann.

Für 2polige Generatoren grösser 1000 MVA und 4polige Maschinen grösser 1200 MVA wird heute zunehmend vollständige Flüssigkeitskühlung ohne Wasserstoff verwendet. Fig. 25 zeigt das Kühlungsprinzip eines 2poligen Generators mit vollständiger Flüssigkeitskühlung. Deutlich sichtbar sind der Luftspaltzylinder, welcher den Rotorraum vom Stator trennt, die Wasserzuleitungen zur Statorwicklung, die Ölzuleitungen zu den konischen lamellierten Pressplatten und dem Blechkörper. Der Rotor, dessen Wicklung direkt mit Wasser gekühlt wird, läuft in Luft von 0,5 ata. Der Stator ist mit einem inerten Gas (Stickstoff) gefüllt. Mit Generatoren dieser Bauart können Einheitsleistungen von ca. 1700 MVA, 60 Hz und 2000 MVA, 50 Hz, erreicht werden, so dass Cross-Compoundleistungen bis 3,4 und 4 GVA realisierbar sind [8].

Auch die 4poligen vollständig flüssigkeitsgekühlten Generatoren werden nach dem gleichen Prinzip wie die 2poligen

Maschinen gebaut und ermöglichen Leistungen bis ca. 3 GVA pro Einheit. Der bisher grösste 4polige Generator, eine 1635-MVA-Maschine für das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk, wird nach diesem Prinzip hergestellt.

Weitere Leistungssteigerungen sind sowohl bei 2poligen als auch bei 4poligen Generatoren mit zunehmender Erfahrung im Betrieb und entsprechender Weiterentwicklung zu erwarten. Die flüssigkeitsgekühlten Maschinen werden damit die notwendige Zeit für die Entwicklung und Erprobung der nächsten Generatoren-Generation verschaffen: der Kryomaschinen mit supraleitenden Rotorwicklungen.

Literatur

- [1] *R. R. Bennet*: Station sizes; where are we heading? Ebasco News 21(1968)6, p. 6...12.
- [2a] *A. Kroms*: Zu den Prognosen des Energiebedarfes. Ihre Zwecke und Glaubwürdigkeit. Bull. SEV 62(1971)10, S. 508...515.
- [2b] *A. Kroms*: Tagesprobleme der amerikanischen Energieversorgung. Bull. SEV. 62(1971)21, S. 1029...1038.
- [3] *J. Papamarcos*: Large turbine-generators: Straining at the leash. Power Engineering 76(1972)9, p. 28...33.
- [4] *K. Abegg* und *P. Rauhut*: Elektrische Grossmaschinen gestern, heute und morgen. Bull. SEV 62(1971)18, S. 865...874.
- [5] *R. Schuler*: Isolationssysteme für rotierende Hochspannungsmaschinen. Brown Boveri Mitt. 57(1970)1, S. 15...24.
- [6] *H. Vögele*: Massnahmen zur Verringerung der Schlingstromverluste in den Ankerwicklungen von Turbogeneratoren. Brown Boveri Mitt. 57(1970)1, S. 32...40.
- [7] *R. R. Noser* und *H. Pohl*: Cooling large turbogenerators without hydrogen. Trans. IEEE PAS 90(1971)5, p. 2101...2107.
- [8] *N. Krick, H. Wälchli* et *H. Hiebler*: Conception moderne des grands turbo-alternateurs à 4 poles. Rapport CIGRE N° 11-16, 1972.

Adresse des Autors:

K. Abegg, technischer Direktor, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.