

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 48 (1957)
Heft: 11

Artikel: Die Entwicklung der elektrischen Maschinen
Autor: Dünner, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060605>

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: 03.04.2026

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)

Die Entwicklung der elektrischen Maschinen

Aus der Abschiedsvorlesung, gehalten am 1. März 1957 an der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich,
von E. Dünner, Zollikon

621.313.001.6

Die Kenntnis der Griechen von der Anziehungskraft des geriebenen Bernsteins auf leichte Gegenstände, eine rein elektrische Erscheinung, blieb Jahrhunderte unbeachtet. Erst im späten Mittelalter und anschliessend wurde diese sonderbare Erscheinung, die bei passender Anordnung sogar Funken ziehen liess und Schläge auf den Menschen gab, wieder aufgenommen. Der englische Hofarzt *Gilbert* als erster erkannte im Jahre 1600 diese Erscheinung als eine neue Naturkraft, «vis electrica». Es wurden in der Folge Maschinen mit rotierenden Glasplatten entwickelt, die ganz beachtenswerte Dimensionen aufwiesen. Sie erzeugten eine Funkenfolge und sind auch heute noch als sog. Elektriziermaschinen bekannt. Die von ihnen erzeugte Reibungselektrizität findet allerdings kaum mehr technische Verwendung; was wir heute brauchen, ist ein kontinuierlich fliessender Strom, nicht nur eine Funkenfolge.

Die Erfindung der elektrischen Maschine im heutigen Sinne wird je nach dem Lande und je nach der Deutung des Begriffes «Maschine» verschiedenen Personen zugeschrieben. In den USA gilt *Faraday* als ihr Erfinder; in England *Varley*, in Italien *Pacinotti*, in Deutschland *Siemens*, dem allerdings die Sonderstellung zukommt, dass er nicht die elektrische Maschine an sich, sondern die für die Technik brauchbare Maschine erfunden hat.

Das Geburtsjahr der elektrischen Maschine darf in die Zeit von 1830...1833 gelegt werden. Sie fusst auf den bekannten elektromagnetischen Zusammenhängen, wie sie durch das Kraftgesetz von *Biot-Savart* 1820 und das Induktionsgesetz von *Faraday-Henry* 1830 erfasst sind; Gesetze, die selber auf der Entdeckung des Zusammenwirkens zwischen Magnetismus und elektrischem Strom durch *Oersted* 1820 beruhen. Die ersten Elektromagneten stammen vom Engländer *Surgeon*, 1824; der Begriff der Selbstinduktion von *Henry*, 1835.

Die elektromagnetische Induktion als Spannungserzeugung kann vereinfacht als Schneiden von magnetischen Kraftlinien durch einen Leiter aufgefasst werden; diese Vorstellung war massgebend für den Entwurf der ersten Maschinen. So hat schon

vor 1832 der Italiener *Dal Negro* einen auf diesem Prinzip beruhenden Apparat mit translatorischer Bewegung gebaut. Zu gleicher Zeit hat ein ungenannter Engländer mit Zeichen *PM* eine dem gleichen Zwecke dienende Anordnung angegeben, die mit rotierender Bewegung arbeitete. Auf die vielen Vorschläge und Ausführungen ähnlicher Maschinen soll nicht weiter eingegangen werden; immerhin seien einige wichtige Punkte in der Erkenntnis der neuen Maschinenart aus dieser Zeit aufgeführt. So findet der wichtige Begriff der Ankerrückwirkung zum ersten Mal 1846 Erwähnung, ebenso erkennt man den remanenten Magnetismus; es gelingt sogar 1860, aus dem remanenten Magnetismus heraus ohne weitem Erregerstrom elektrische Spannung zu erzeugen.

Die bis über 1860 hinaus gebauten Maschinen hatten alle permanente Magnetpole, wodurch ihrer Leistungsfähigkeit naturgemäss enge Grenzen gesetzt waren. Vom Dänen *Soeren Hjort* stammt 1852 der Vorschlag, permanente Magnete durch eine zur Ankerwicklung parallel geschaltete Magnetwicklung zu verstärken, also die *Nebenschluss-schaltung*. Interessant ist auch die vom Engländer *Wilde* 1866 angegebene Lösung, mit einer kleinen Erregermaschine mit Permanentpolen die Hauptmaschine zu erregen, also das Prinzip der *Fremderregung* (Fig. 1).

Den entscheidenden Fortschritt in der Entwicklung der Gleichstrommaschine brachte die Entdeckung des Prinzipes der Selbsterregung, d. h. der Aufschauklung der Erregung aus dem remanenten Magnetismus heraus. Diese eminent wichtige Entdeckung wird *W. Siemens* zugeschrieben, der sie am 15. Februar 1867 in einer Sitzung der Royal Society in London vortrug. Anschliessend folgte ein Vortrag von *Wheatstone*, der darin ebenfalls das Prinzip der Selbsterregung beschrieb; er hatte sich aber nach *Siemens* zum Vortrag angemeldet. Wenn auch die Priorität dieser Entdeckung nicht so eindeutig ist, so darf doch ihr Verdienst ohne Zweifel *Siemens* zugeschrieben werden, der, im Gegensatz zu *Wheatstone*, ihre Wichtigkeit erkannte und sie auch benützte. Mit der Selbsterregung war nun der Weg frei für den Bau elektrischer Maschinen von tech-

nischer Bedeutung, und damit auch ein grundlegender Schritt auf dem Wege zur Elektrotechnik von heute getan.

Aus der weitem technischen Durcharbeitung dieser Gleichstrommaschinen sind vielleicht noch die folgenden Verbesserungen zu erwähnen: Bei einer von *Pacinotti*, 1860, gebauten Maschine wurde

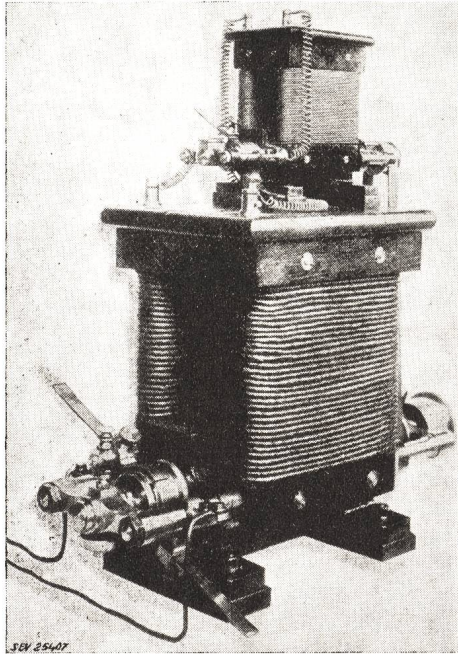


Fig. 1
Gleichstrommaschine von Wilde mit aufgebauter
Erregermaschine (1866)

wohl zum ersten Mal die Ankerwicklung in Nuten eingebettet (Fig. 2). Bekannt ist der *Ringanker* mit geschlossener Ankerwicklung von *Gramme*, 1871, eine Bauart, die der bisher verwendeten offenen Wicklung, wo jede Nutenspule getrennt arbeitete, weit überlegen war und erst eigentlich die Erzeugung technisch interessanter Spannungen gestattete. Der erste Vorschlag einer *Trommelwicklung* stammt von Prof. *Weber*, Göttingen. Er betraf allerdings nur eine kleine Laboratoriumsmaschine, die den grossen Vorteil dieser Bauart gegenüber der Ringwicklung kaum erkennen liess. Der Übergang zur Trommelwicklung wird daher meistens *Hefner-Alteneck* zugesprochen (1878).

Es folgte sodann die Erfassung des magnetischen Kreises und seine Durchrechnung durch die Brüder *Hopkinson*, 1886, was die Vorausberechnung der Magnetwicklungen gestattete. Die Berechnung der Ankerrückwirkung stammt von *Swineburne*, 1890. Die Einführung der Widerstandsverbindungen durch *Ganz*, Budapest, versprach grosse Verbesserungen in der Kommutation. Der Ersatz der bisher gebräuchlichen Kupfer- oder Kupfergazebürsten durch Kohlen-Graphitbürsten wird der Firma *Siemens* zugeschrieben. Nebenbei sei erwähnt, dass die Firma *Ganz* schon 1880 eine Gleichstrommaschine baute, an deren Ankerwicklung zwei Schleifringe für die Abnahme von Wechselstrom angeschlossen waren, der Vorläufer der heutigen Einankerumformer.

Die frühen Maschinen waren vornehmlich für den Betrieb von Bogenlampen und für galvanische Zwecke gebaut; ihre Spannung war gering. Sogar die erste elektrische Lokomotive von *Siemens* für die Gewerbeausstellung Berlin, 1879, arbeitete mit einer Spannung von nur 150 V. Trotz der geringen Spannung dieser ersten Dynamos bereitete die Kommutation grosse Schwierigkeiten und führte zu einem Materialaufwand, der heute bis zum Dreifachen unterboten wird. Gleichstrommaschinen für höhere Spannungen bildeten ein fast unlösbares Problem, das oft zu merkwürdigen Lösungen verleitete. So ist ein Vorschlag von *Thury* bekannt, zwischen den Lamellen Luft hinaus zu blasen, um so die Funken zu löschen. Erst die theoretische Durcharbeitung des Kommutationsproblems liess die Ursachen der Funkenbildung erkennen und Gegenmittel finden. Entsprechend dem Ausdruck der mittleren Stromwendespannung $u_{L,med} = L(2 I_a / T_k)$ bestanden sie in kleiner Spannung, kleiner Ausnutzung und kleiner Drehzahl; dazu kam als zweitklassiges Mittel die eventuelle Bürstenverschiebung. Nachdem diese Mittel erschöpft waren, folgte die Einführung der *Wende- oder Hilfspole*. Den ersten Hinweis auf sie findet man im deutschen Reichspatent 34465 von *Menges*, 1884, der darin gleichzeitig auch die Kompensationswicklung angab. Bis zu ihrer allgemeinen Anwendung verstrich aber noch mehr als ein Jahrzehnt; der illustrierte Gleichstrommaschinenkatalog der Maschinenfabrik Oerlikon (MFO) aus dem Jahre 1900 kannte sie z. B. noch nicht, trotzdem die Form der gezeigten Maschinen genau der heutigen entsprach.

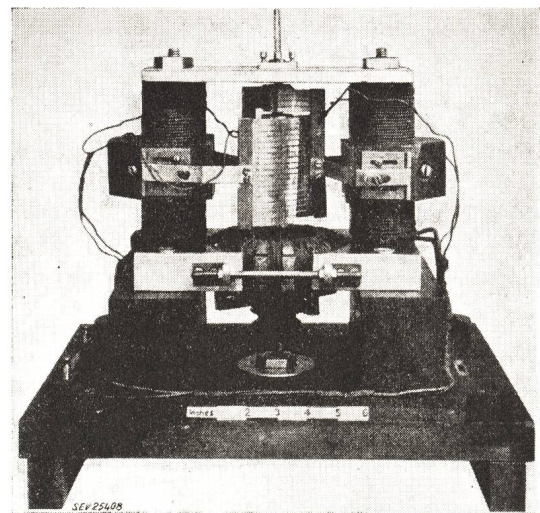


Fig. 2
Gleichstrommaschine von Pacinotti (1860)

Die wissenschaftliche Durcharbeitung des Kommutationsproblems darf wohl in erster Linie Prof. *Arnold*, Karlsruhe, zugesprochen werden, der in seinen beiden Büchern über die Gleichstrommaschine dieses Problem eingehend behandelte. Während in der ersten Auflage, 1902, noch die Kommutation ohne Wendepole beschrieben war, folgte in der 2. Auflage, 1906, deren ausführliche Berechnung. Sein dort niedergelegter Rechnungsweg

dürfte auch heute noch der gangbarste sein; er gestattet, wie durch Beispiele erhärtet ist, über die Güte der Kommutation ein brauchbares Urteil. Ein Versuch, das Kommutationsproblem als ein reines Schaltproblem zu behandeln, durchgeführt durch *Dreyfus* in seinem Buche «Die Kommutation grosser Gleichstrommaschinen», 1923, scheint sich, weil schon für einfache Fälle zu langwierig, nicht durchzusetzen.

Die Reduktion des Bürstenkurzschlußstromes, eine Hauptursache des Funkens, durch Einbau von Widerstandsverbindungen zwischen Wicklung und Lamellen, schon 1891 angegeben, wird trotz ihrer theoretischen Richtigkeit nur selten angetroffen. Aussichtsreicher scheint die Verwendung von Spaltkohlen; aus dem Sektor der Wechselstrom-Kommutatormotoren hört man Gutes darüber; auch Laboratoriumsversuche zeigen eine Verbesserung gegenüber Vollkohlen.

Der elektromagnetische Induktionsvorgang erzeugt eine Wechselspannung. Obwohl bis in die neunziger Jahre der Gleichstrom das Feld beherrschte, blieb es auf dem Sektor des Wechselstromes nicht ruhig. So wurde von der Firma *Ganz* in Budapest schon 1883 ein 36poliger Wechselstromgenerator für 180 PS gebaut. Im folgenden Jahre wurden von *Hopkinson* die Bedingungen für die Parallelschaltung, das Synchronisieren, festgelegt.

Als ältester Wechselstrommotor darf wohl der von *Elihu Thomson* 1883 gebaute Repulsionsmotor angesehen werden, der schon damals die Erweiterung in sich schloss, durch Kurzschliessen von Hilfsbürsten asynchronen Gang anzunehmen. Der Einphasenkommutatormotor erfuhr in den folgenden Jahrzehnten eine ungewöhnlich eingehende Behandlung und bildete einen Tummelplatz für die Patentierung neuer Schaltungen. So zeigt eine Zusammenstellung diesbezüglicher Patente bis 1912 fast 100 Nummern verschiedener Schaltmöglichkeiten, von denen sich kaum ein halbes Dutzend gehalten hat.

Seinen vollen Siegeslauf begann der Wechselstrom erst mit der Kenntnis der Verkettungen zeitlich verschobener Phasen und der Ausnützung des darauf beruhenden Drehfeldes. Der erste Mehrphasenmotor mit Zweiphasenfeld wird *Ferraris* 1885 zugeschrieben. Von *Tesla* stammt von 1887 ein dreiphasiger Induktionsmotor; ihm wird ja auch die Angabe der dreiphasigen Verkettung zugeschrieben. 1888 zeigte *Ferraris* die Aufspaltung des Einphasenfeldes in zwei gegenläufige Drehfelder halber Amplitude.

In diese Zeit fällt auch der Beginn des Baues grosser Drehstromgeneratoren, deren erster 1890 von der Maschinenfabrik Oerlikon für die Übertragung Lauffen—Frankfurt erstellt wurde. Der Entwurf stammt vom damaligen Chef-Ingenieur *C. Brown*. In die gleiche Zeit fällt auch die Aufnahme der Fabrikation der Drehstrommotoren durch die europäischen Firmen.

Parallel zur konstruktiven Ausbildung der Wechselstrommaschinen ging deren theoretische Durcharbeitung und zwar recht bald unter Benützung von Vektordiagrammen. Besonders erwähnenswert ist

in diesem Zusammenhang die Aufstellung des Kreisdiagrammes des Induktionsmotors durch *Heyland* 1894, eine Pioniertat.

Auch die Entwicklung der Mehrphasen-Kommutator-Motoren beginnt in diesen Jahren. Ein erstes diesbezügliches Patent aus England trägt die Jahrzahl 1888; spätere Patente wurden von *Görges* ab 1891 genommen.

Mit dem Jahre 1890 darf die Entwicklung der elektrischen Maschine, soweit ihre prinzipiellen Fragen berücksichtigt werden, als abgeschlossen bezeichnet werden. Was zur Hauptsache seitdem folgt, ist die Ausarbeitung und Verbesserung nach den verschiedensten Richtungen.

Neben der gründlichen theoretischen Bearbeitung der verschiedenen Maschinenarten, der Vereinfachung der Fabrikation durch Massenherstellung, der Anpassung an den Verbrauch und die Verwendung, befasst sich der Elektromaschinenbau in erster Linie mit den folgenden Problemen: Erhöhung des Drehzahlbereiches, des Wirkungsgrades, der Ausnützung des aktiven Materials und des Leistungsbereiches.

Die Anpassung der *Drehzahl* des Motors an den durch die Arbeitsmaschine bestimmten günstigsten Wert ist eines der wichtigsten Probleme der Regelmotortechnik. Für die Regelung in weiten Grenzen beherrscht immer noch die 1891 angegebene Ward-Leonardschaltung das Feld. Dabei wird die Drehstrom-Gleichstrom-Umformung oft durch Anwendung gesteuerter Thyratrons durchgeführt. — Im allgemeinen besteht die Tendenz zu möglichst hohen Drehzahlen; die mit zweipoligen Induktionsmotoren erreichbaren 3000 U./min sind für viele Zwecke zu niedrig. Gebaut und benützt werden heute Motoren kleiner Leistung (100 W) für 120 000 U./min, mittlerer Leistung für 30 bis 50 000 U./min. Kugellager mit Öldunstschmierung, eventuell Luftlager, ermöglichen diese extremen Drehzahlen, erreicht durch entsprechend hohe Frequenz.

Die Erhöhung des *Wirkungsgrades* spielt besonders bei den grösseren Leistungen eine wichtige Rolle; es werden heute bei Grossgeneratoren Wirkungsgrade bis 98,5% erreicht. Eisen mit Verlustziffer 1,3 W/kg, in den USA auch orientierte Bleche, reduzieren die Eisenverluste; Gase, leichter als Luft, verkleinern die Ventilationsverluste. Schwer ist es den Zusatzverlusten, wie sie als Wirbelstromverluste durch die Streufelder in Eisenteilen entstehen, beizukommen.

Die *Ausnützung* der elektrischen Maschine kann am einfachsten durch die sog. Ausnützungsziffer, Gewicht durch Leistung, also kg/kVA oder kg/kW bzw. kg/PS ausgedrückt werden. Hier sind genügend statistische Unterlagen von den Herstellerfirmen bekannt gegeben worden, um sich ein deutliches Bild über das bisher Erreichte zu machen. Allerdings beruht die Verbesserung in der Ausnützung nur zum Teil auf geschickterer Disposition oder Berechnung, zu einem namhaften Teil aber auf Verstärkung der Ventilation und der Erhöhung der zulässigen Erwärmung. Das Gewicht pro PS z. B. eines 5-PS-Motors mit Käfiganker,

4 Pole, 50 Hz, veränderte sich im Laufe der Jahre gewaltig:

| | | | |
|------|------|------|---------|
| 1890 | 1910 | 1930 | 1950 |
| 31 | 22 | 13 | 8 kg/PS |

Ähnliche Gewichtsreduktionen zeigen auch grössere Maschinen.

Sehr interessant ist ein Vergleich einiger Eigenschaften zweier Motoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG) für ca. 30 PS aus den Jahren 1900 und 1950:

| | 1900 | 1950 |
|--------------------------------|------|----------|
| Magn. Luftspaltinduktion . . . | 6250 | 7700 Gs |
| Strombelag | 180 | 380 A/cm |
| aktives Eisen | 360 | 120 kg |
| aktives Kupfer | 82 | 31 kg |
| Gewicht, total | 720 | 250 kg |
| Erwärmung | 50 | 80 °C |

Für Turbogeneratoren mit Luftkühlung für Leistungen von 40 000...50 000 kVA gelten etwa die folgenden Zahlen:

| | | |
|------|------|-------------|
| 1925 | 1935 | 1950 |
| 2,8 | 2,0 | 1,55 kg/kVA |

Wohl am eindrucklichsten ist die Erhöhung des Leistungsbereiches. Die grössten Leistungen finden sich im Gebiet der Synchronmaschinen, die heute mit ganz überwältigenden Zahlen aufwarten. Die mässigen Energiekonzentrationen in der Schweiz gestatten keine internationalen Grenzwerte in bezug auf die Leistung; immerhin bedeuten die für die Grand-Dixence bei der S. A. des Ateliers

gehören die von BBC 1927 für das Hell-Gate-Kraftwerk in New York gelieferten Generatoren von 100 MVA Leistung bei 1200 U./min und 88 MVA bei 1800 U./min. zu den Grossmaschinen. Die damals benützten Drehzahlen werden aber heute nicht mehr angewendet; solche Leistungen werden nun durchwegs mit Maschinen von 3600 U./min erzielt. War der damals erreichte Wirkungsgrad bei beiden Maschinen 96,7%, so beträgt er heute mit zweipoliger Ausführung 98,3%, was nahezu einer Halbierung der Verluste entspricht. Seit dem Kriegsende hat nun ein wahrer Wettlauf in der Steigerung der Leistung von zweipoligen Turbogeneratoren eingesetzt. Maschinen mit Leistungen von 100 bis 200 MVA sind im Betrieb, bis 300 MVA im Bau und noch grössere werden studiert; Optimisten reden schon von Leistungen über 400 MVA. So befindet sich bei BBC eine Maschineneinheit von 260 MVA Typenleistung im Bau; ihr Luftspalt beträgt 8,5 cm; der Rotordurchmesser 1150 mm und die aktive Eisenlänge 4000 mm. Ähnliche Ausführungen werden auch von andern Grossfirmen gemeldet.

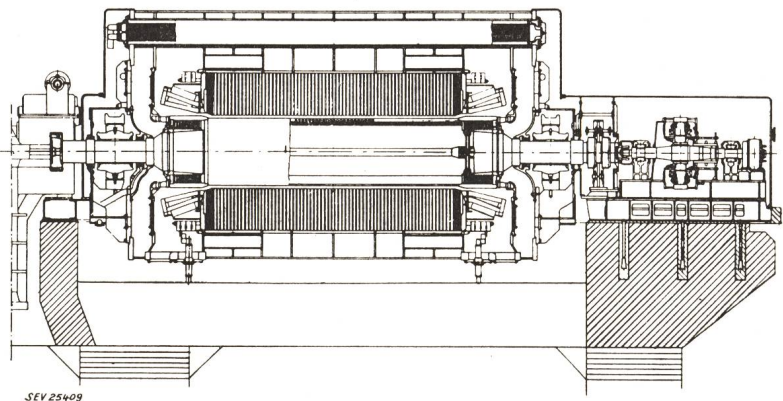


Fig. 3

Wasserstoffgekühlter Turbogenerator von Siemens

de Sécheron und bei der MFO im Bau befindlichen Generatoren für Einheitsleistungen von 80 000 kVA bei 500 U./min ganz beachtliche Einheiten. Der Polraddurchmesser von 3270 mm führt bei der Schleuderdrehzahl von 920 auf nahezu 160 m/s, was für die gewählte Klauenbefestigung wohl einen Grenzwert bedeutet, entwickelt doch dabei ein Pol die ansehnliche Zukraft von 5300 t.

Es ist klar, dass die Steigerung zu solchen grossen Leistungen nicht nur durch die Vergrösserung der Dimensionen erreicht werden kann, sondern dass auch neue Wege eingeschlagen werden müssen.

Die Luftreibungsverluste wachsen mit der 3. Potenz der Umfangsgeschwindigkeit, und mit der Maschinengrösse wachsen auch die Ventilationsverluste. Für einen Turbogenerator mit 1 m Durch-

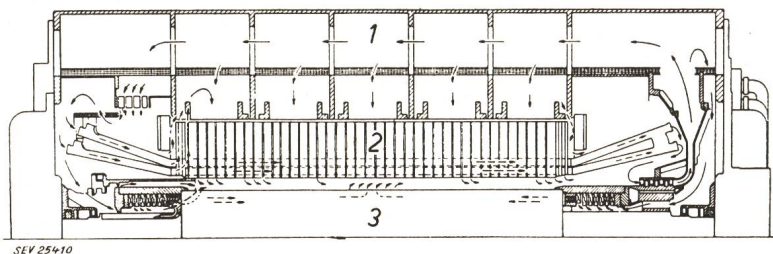


Fig. 4

Wasserstoffgekühlter Turbogenerator mit Innerventilation
1 Kühler; 2 Statorkörper; 3 Rotor

Zu den grössten Langsamläufern gehören die von der A.-G. Brown, Boveri & Cie. (BBC) nach Kanada offerierten Maschinen für 190 MVA bei 200 U./min; über die in Kuibyschew aufgestellten Generatoren für 200 MVA bei 83,3 U./min sind keine verlässlichen Mitteilungen erhältlich.

Ebenso auffällig sind die Leistungsfortschritte im Gebiete der Turbogeneratoren. Leistungsgemäss

messer und 5 m Länge errechnet sich der Verlust dieser beiden Anteile zu ca. 350 kW, d. h. ca. 30% der Gesamtverluste. Schon unbelastet zeigt eine solche Maschine eine ganz wesentliche Erwärmung. Hier muss die Kühlung mit einem leichteren Gas einsetzen; neben dem teuren Helium eignet sich am besten Wasserstoff, womit diese Verluste auf ca. 1/10 reduziert werden können. Beachtenswert ist

der grosse Einfluss des *Überdruckes* im Innern der Maschine. Der dadurch erreichbare Leistungsgewinn wird durch die folgenden, von der Westinghouse Co. aufgeführten Zahlen belegt:

| Innerer Überdruck kg/cm ² | Leistungsgewinn MVA |
|---|------------------------|
| 2 | 80 |
| 3 | 100 |
| 4 | 110 |

Leider nehmen mit steigendem Überdruck auch die auf dem Gas beruhenden Verluste wieder zu, so dass der Gewinn nicht im Wirkungsgrad, wohl aber im Materialaufwand und in den Dimensionen liegt (Fig. 3).

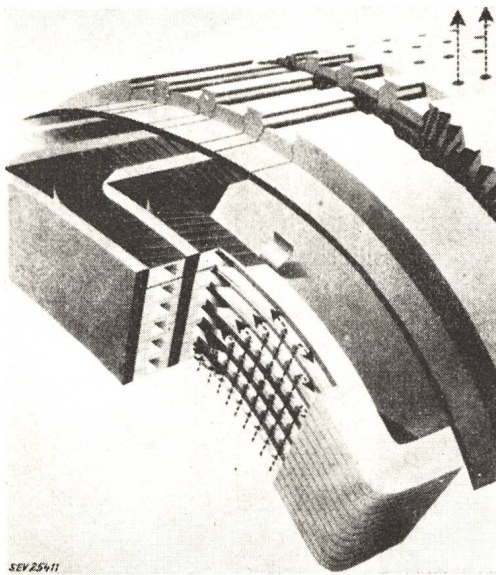


Fig. 5

Rotorwicklung mit Hohlleitern für Innenventilation

Der Übergang zur Kühlung mit Wasserstoff statt Luft genügt für solche grossen Einheiten nicht mehr. Der Temperaturabfall durch die reichlich dicke Nutenisolation von 4...5 mm kann vermieden werden, wenn das kühlende Gas direkt mit dem Kupfer in Berührung gebracht wird. Das führt zur Lösung, den Wasserstoff mit hoher Geschwindigkeit durch die ausgehöhlten Leiter zu treiben. Damit darf beispielsweise die Stromdichte im Leiter von 2,5 auf 3,5 A/mm² erhöht werden. Durch mehrstufige Achsialventilatoren oder aussen liegende Kompressoren wird dem Gas der nötige Druck, der 1000 mm Wassersäule übersteigen kann, gegeben. Da durch den Druck das notwendige Gasvolumen reduziert wird, sind die Ventilationsverluste tragbar. Diese als *innere Ventilation* bezeichnete Kühlung wurde zuerst für Rotor-, dann aber auch für Statorwicklungen benützt. Fig. 4 zeigt den Schnitt durch einen solchen Generator mit innerer Wasserstoffventilation; Fig. 5 bis 7 zeigen Details davon.

Auch diese Verbesserungen scheinen für die Riesenmaschinen nicht mehr zu genügen. Der zurückzulegende lange Weg des Gases im Leiterinnern lässt mit steigender Länge die Wirksamkeit der Kühlung zurückgehen. Man rechnet bei einer Eisenlänge oder Weglänge im Kupfer von 3 m nur mit

80% der Wirksamkeit der Kühlung gegenüber 2 m. Bei der Rotorwicklung kann diesem Umstand durch achsiale Unterteilung der Frischgaszuführung Rechnung getragen werden, kaum aber bei der Statorwicklung. Es liegt daher der Vorschlag vor, an Stelle von Gas für die Statorwicklung Öl zu verwenden. Da auch die Konvektionszahl des in Frage kommenden Transformatoröls mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt, wird man das Kühlmedium wie bei der inneren Ventilation mit ca. 1 m/s durch das Leiterinnere treiben. Auch im

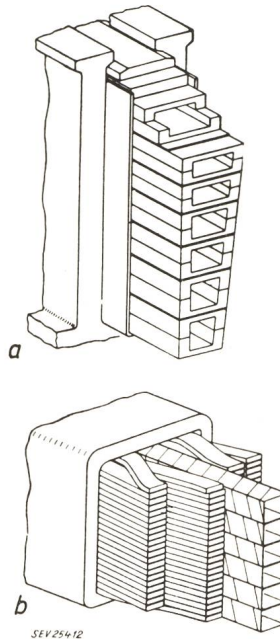


Fig. 6
Leiterausbildung für
Innenventilation
a für Rotorwicklung;
b für Statorwicklung

Statorblech werden Öffnungen für Kanäle ausgespart, durch die das Öl getrieben wird (Fig. 8). Es lassen sich auf diese Weise Stromdichten über 4 A/mm² erreichen. Der erwähnte 260-MVA-Typ von BBC ist für Ölkühlung im Stator vorgesehen. Ein von der General Electric Co. für Cleveland gebauter Typ für eine Leistung von 260 MVA mit

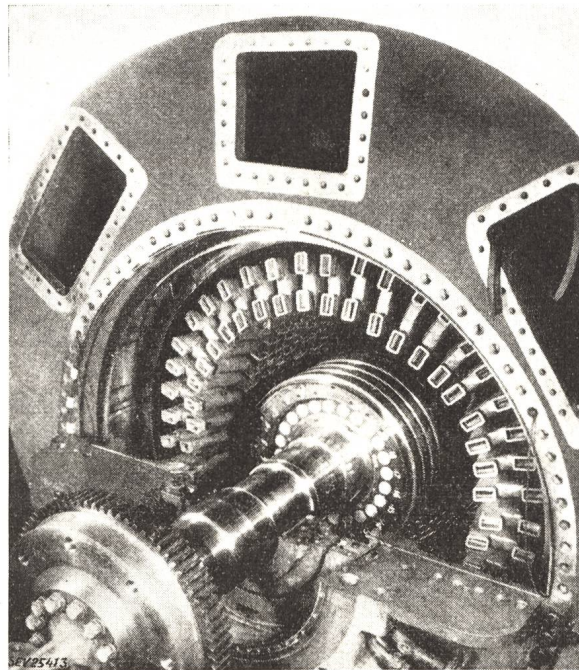


Fig. 7

Wicklungsköpfe einer Statorwicklung mit Innenventilation

Ölkühlung im Stator und Wasserstoffkühlung von 3 kg/cm² im Rotor soll sich durch verblüffend kleine Dimensionen auszeichnen.

Dass es nicht so leicht etwas Neues unter der Sonne gibt, zeigt die Fig. 9, die einen Entwurf des amerikanischen Ingenieurs *Fechheimer* aus dem Jahr 1927 darstellt. Diese Ausführung verwendet für die Kühlung des Stators Öl, für jene des Rotor-

Beherrschung der elektrischen Belange, daneben die Kenntnis der Isolationstechnik, der mechanischen Festigkeitslehre, der Materialkunde und der

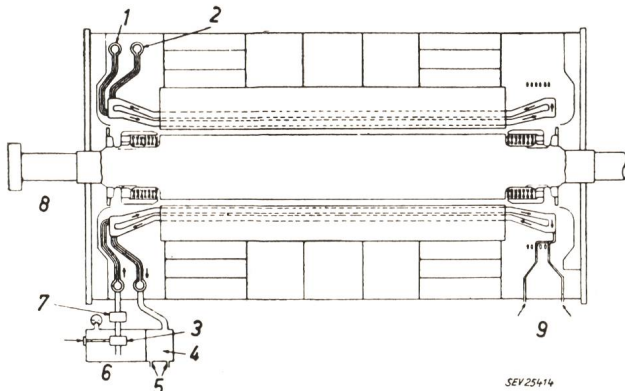


Fig. 8

Schnitt durch einen Turbogenerator mit ölgekühlter Statorwicklung

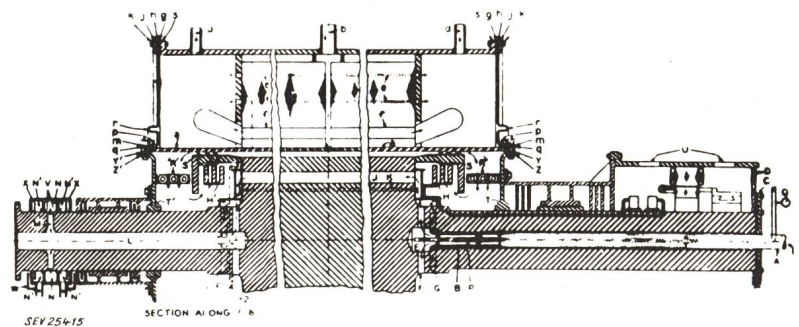
1 Einlass; 2 Ablas; 3 Pumpe; 4 Kühler; 5 Wasserleitungsverbindungen; 6 Reservoir; 7 Filter; 8 Turbinenende; 9 elektrische Verbindungen

innern Wasser und für die Oberfläche des Rotors Wasserstoff.

Es ist leicht verständlich, dass dem Entwurf von solchen grossen Maschinen viele und grosse Schwierigkeiten entgegenstehen. Dabei sind es weniger die elektrischen Probleme als jene der thermischen und der mechanischen, die Schwierigkeiten schaffen. Die grossen Umfangsgeschwindigkeiten, die beim Schleudern 210 m/s übersteigen, führen zu Zug- und Schubspannungen, die nur wenig unter 50 kg/mm² liegen, also bis über 80% an die Streckgrenze des Stahles führen. Da solche Beanspruchungen nur bei vollkommen homogenem Material zugelassen werden können, rückt die Materialprüfung an erste Stelle.

Fig. 9

Schnitt durch mit Öl, Wasser und Wasserstoff gekühltem Turbogenerator nach *Fechheimer* aus dem Jahre 1927



Die 100-Hz-Schwingungen des Rotorkörpers infolge des ungleichen Trägheitsmomentes über der Nutung und über dem Polhorn sucht man durch Einfräsungen zu reduzieren (Fig. 10). Sehr unangenehm ist die ungleiche Wärmedehnung von Kupfer und Eisen, die für 100 °C Temperaturänderung ca. 0,6 mm/m Eisenlänge ausmacht. Nur die

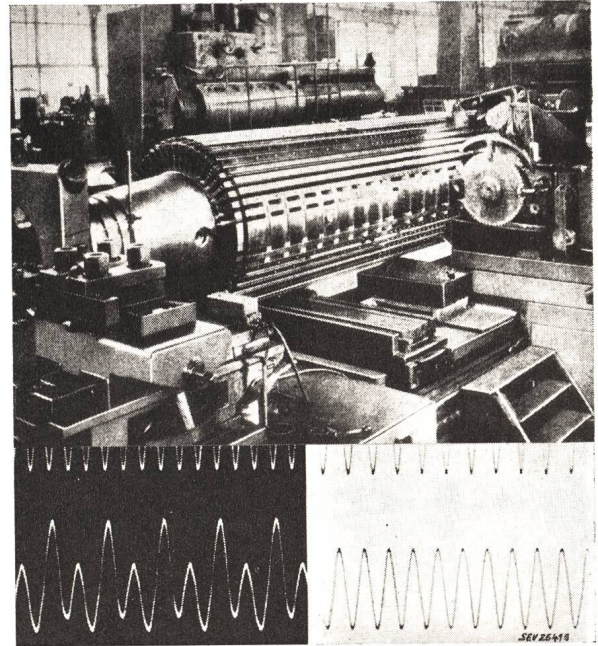


Fig. 10

Ausfräsen des Polhorns bei einem Turbogenerator-Rotor

Werkstättenfertigung, lassen im Bau solcher Grenzmaschinen gutes Gelingen erhoffen.

Gross ist immer noch die Zahl der Probleme im Bau wirklich erstklassiger Maschinen. Probleme, die den Rahmen der reinen Elektrotechnik weit sprengen. Ihre Beherrschung setzt eine umfassende

Hochschulbildung voraus. Es ist daher sehr zu wünschen, dass sich immer genügend tüchtige Studierende dem Studium des Elektromaschinenbaues zuwenden, um den hohen Stand der schweizerischen Industrie auch auf diesem Gebiet zu wahren.

Adresse des Autors:

Prof. E. Dünner, Guggenstrasse 8, Zollikon (ZH).