

**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:** 10.01.2026

**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 Anziehungs-  
 kraft des geriebenen Bernsteins auf leichte Gegen-  
 stände, eine rein elektrische Erscheinung, blieb  
 Jahrhunderte unbeachtet. Erst im späten Mittel-  
 alter und anschliessend wurde diese sonderbare Er-  
 scheinung, die bei passender Anordnung sogar Fun-  
 ken 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 Glasplati-  
 ten entwickelt, die ganz beachtenswerte Dimensio-  
 nen aufwiesen. Sie erzeugten eine Funkenfolge und  
 sind auch heute noch als sog. Elektrisiermaschinen  
 bekannt. Die von ihnen erzeugte Reibungselektri-  
 zität findet allerdings kaum mehr technische Ver-  
 wendung; was wir heute brauchen, ist ein kon-  
 tinuierlich fliessender Strom, nicht nur eine Fun-  
 kenfolge.

Die Erfindung der elektrischen Maschine im heu-  
 tigen Sinne wird je nach dem Lande und je nach  
 der Deutung des Begriffes «Maschine» verschiede-  
 nen 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 Zusammenhän-  
 gen, wie sie durch das Kraftgesetz von *Biot-Savart*  
 1820 und das Induktionsgesetz von *Faraday-Henry*  
 1830 erfasst sind; Gesetze, die selber auf der Ent-  
 deckung des Zusammenwirkens zwischen Magnetis-  
 mus und elektrischem Strom durch *Oersted* 1820  
 beruhen. Die ersten Elektromagneten stammen vom  
 Engländer *Surgeon*, 1824; der Begriff der Selbst-  
 induction von *Henry*, 1835.

Die elektromagnetische Induktion als Span-  
 nungserzeugung kann vereinfacht als Schneiden von  
 magnetischen Kraftlinien durch einen Leiter auf-  
 gefasst 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 un-  
 genannter 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 Er-  
 kenntnis der neuen Maschinenart aus dieser Zeit  
 aufgeführt. So findet der wichtige Begriff der  
 Ankerrückwirkung zum ersten Mal 1846 Erwäh-  
 nung, ebenso erkennt man den remanenten Magne-  
 tismus; es gelingt sogar 1860, aus dem remanenten  
 Magnetismus heraus ohne weitern Erregerstrom  
 elektrische Spannung zu erzeugen.

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

Den entscheidenden Fortschritt in der Entwick-  
 lung der Gleichstrommaschine brachte die Ent-  
 deckung des Prinzips der Selbsterregung, d. h. der  
 Aufschaukung der Erregung aus dem remanenten  
 Magnetismus heraus. Diese eminent wichtige Ent-  
 deckung wird *W. Siemens* zugeschrieben, der sie am  
 15. Februar 1867 in einer Sitzung der Royal Society  
 in London vortrug. Anschliessend folgte ein Vor-  
 trag von *Wheatstone*, der darin ebenfalls das Prin-  
 zip 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 *Wheat-  
 stone*, ihre Wichtigkeit erkannte und sie auch be-  
 nutzte. 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 weitern technischen Durcharbeitung dieser Gleichstrommaschinen sind vielleicht noch die folgenden Verbesserungen zu erwähnen: Bei einer von *Pacinotti*, 1860, gebauten Maschine wurde

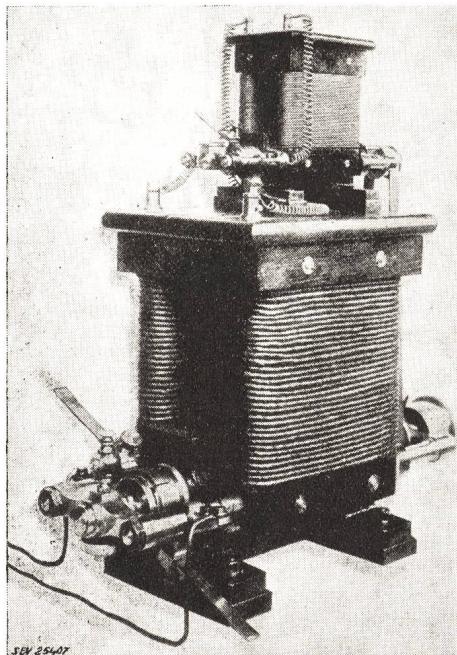


Fig. 1  
Gleichstrommaschine von *Wilde* mit aufgebauter  
Erregermaschine (1866)

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 Kupfergazebüsten durch Kohlen-Graphitbüsten 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 Drei-fachen 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 Stromwendedspannung  $u_{Lmed} = L(2 I_a / T_k)$  bestanden sie in kleiner Spannung, kleiner Ausnützung 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.

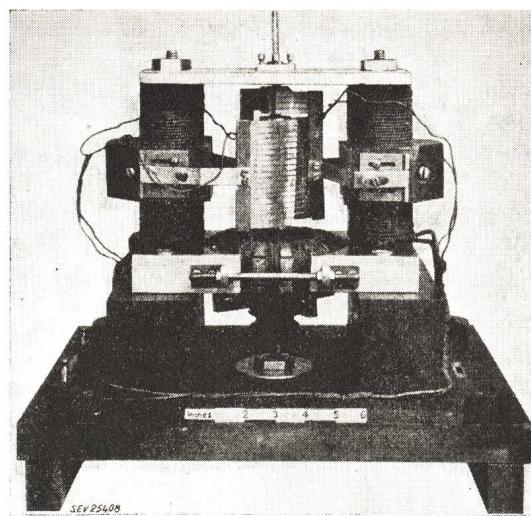


Fig. 2  
Gleichstrommaschine von *Pacinotti* (1860)

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 Regeltechnik. 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 Thyatronen 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 benutzt 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 Eigenarten 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 eindrücklichsten 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 Grande-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 Wettkampf 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.

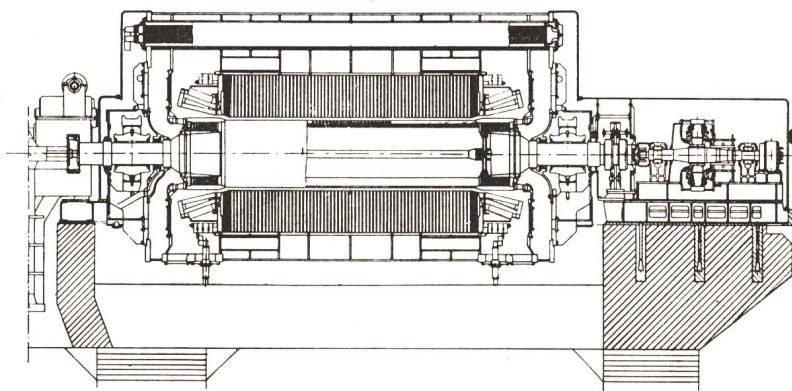


Fig. 3

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 Schleudererdrehzahl 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-

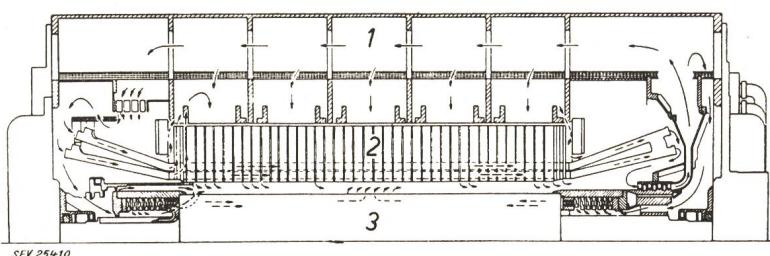


Fig. 4  
Wasserstoffgekühlter Turbogenerator mit  
Innenventilation  
1 Kühler; 2 Statorkörper; 3 Rotor

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.  $\frac{1}{10}$  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. aufgeföhrten Zahlen belegt:

Innerer Überdruck kg/cm <sup>2</sup>	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).

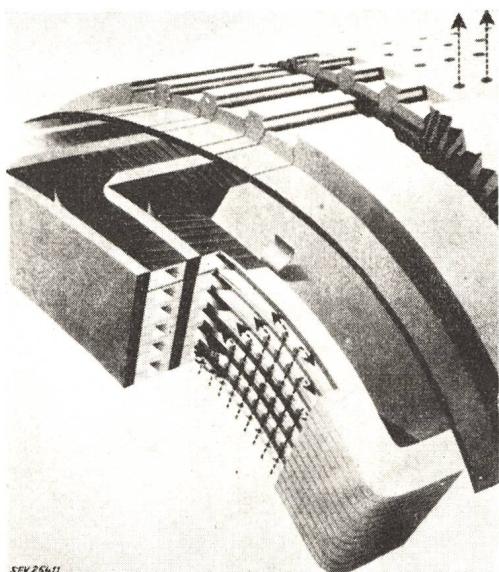


Fig. 5

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 Nutenisolierung 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/mm<sup>2</sup> 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 benutzt. 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 Statorkühlung Öl zu verwenden. Da auch die Konvektionszahl des in Frage kommenden Transformatorenöls mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt, wird man das Kühlmedium wie bei der innern Ventilation mit ca. 1 m/s durch das Leiterinnere treiben. Auch im

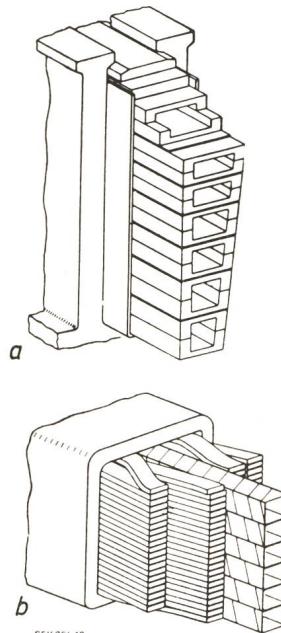


Fig. 6  
Leiterausbildung für  
Innenventilation  
a für Rotorwicklung;  
b für Statorwicklung

Statorblech werden Öffnungen für Kanäle ausgespart, durch die das Öl getrieben wird (Fig. 8). Es lassen sich auf diese Weise Stromdichten über 4 A/mm<sup>2</sup> erreichen. Der erwähnte 260-MVA-Typ von BBC ist für Öl Kühlung im Stator vorgesehen. Ein von der General Electric Co. für Cleveland gebauter Typ für eine Leistung von 260 MVA mit

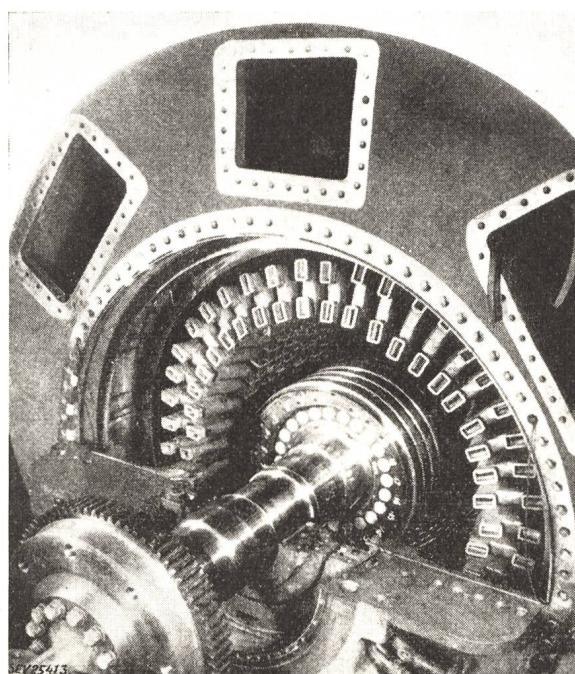


Fig. 7  
Wicklungsköpfe einer Statorwicklung mit Innenventilation

Ölkühlung im Stator und Wasserstoffkühlung von 3 kg/cm<sup>2</sup> 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-

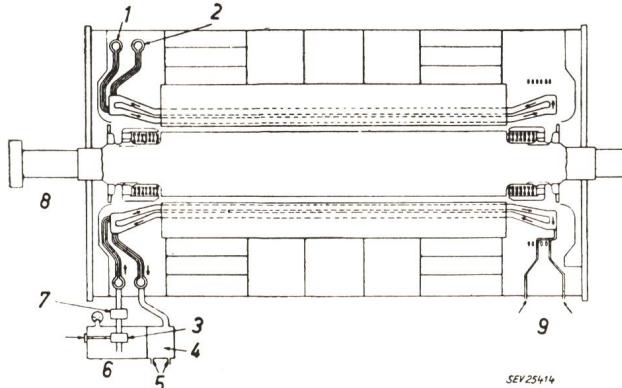


Fig. 8

Schnitt durch einen Turbogenerator mit ölgekühlter Statorwicklung

1 Einlass; 2 Ablass; 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/mm<sup>2</sup> 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

