Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 22 (1931)

Heft: 8

Artikel: Rückblick über die Entwicklung des Elektromaschinenbaues in den letzten Jahren

Autor: Dünner, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058576

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: 22.08.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A., Zurich 4
Stauffacherquai 36/38

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXIIe Année | N° 8 | Vendredi, 17 Avril 1931

Rückblick über die Entwicklung des Elektromaschinenbaues in den letzten Jahren.

Von *E. Dünner*, Professor
an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.

621.3(09)

Der Autor gibt einen Ueberblick über die Entwicklung und die sich geltend machenden Tendenzen im Elektromaschinenbau während der letzten Jahre. Er berührt auch den Schutz und die Prüfung der Maschinen, sowie die Neuerungen im Schalterbau.

L'auteur jette un coup d'œil rétrospectif sur le développement de la construction des machines électriques pendant ces dernières années et étudie les tendences qui s'y font sentir. Il mentionne également la protection et l'essai des machines, ainsi que les progrès réalisés dans la construction des interrupteurs.

Die Entwicklung in der Ausgestaltung der elektrischen Maschine hat auch in den letzten Jahren weitere, zum Teil recht ansehnliche Fortschritte zu verzeichnen [1]). Wiederum hat daran die schweizerische elektrotechnische Industrie einen lebhaften Anteil genommen; dank ihrer Qualitätsarbeit ist es ihr gelungen, unverändert die Konkurrenzfähigkeit mit dem starken Auslande zu wahren.

Wenn mit den folgenden Zeilen versucht wird, über die Neuerungen und die Fortschritte im Gebiete des Elektromaschinenbaues eine kurze Uebersicht zu geben, so ist sich der Verfasser wohl bewusst, dass seine Arbeit nur Stückwerk sein kann, indem aus der grossen Fülle der Neuerungen und Verbesserungen nur einige wenige, ihm bekannt gewordene und wichtig erscheinende herausgegriffen werden, während manch schätzenswerte Entwicklungstat mit Stillschweigen übergangen wird.

Die elektrische Maschine, die heute sowohl theoretisch wie praktisch nach allen Richtungen gründlich untersucht ist, kann naturgemäss kaum mehr umwälzende Neuerungen erfahren; die Anstrengungen der Elektrotechnik richten sich daher vorzugsweise darauf, unter Benützung aller uns durch Theorie, Versuch und namentlich Forschung verschafften Erkenntnisse die Maschine bis an die äusserste Grenze der Rentabilität auszunützen. Die mit steigender Ausnützung parallel gehende Zunahme der Grösse der Maschineneinheit setzt möglichst genaue Kenntnis der zum Bau derselben benützten Materialien voraus; die Materialuntersuchung, sowohl in mechanischer als auch in elektrischer Hinsicht, wie sie in den Forschungsstätten heute in weitgehendstem Masse durchgeführt wird, bildet den Grundstein der Weiterentwicklung. Trotzdem die Berechnungsgrundlagen der elektrischen Maschine mehr oder weniger Gemeingut jedes Elektroingenieurs geworden sind, bleibt der Entwurf einer nach heutigen Begriffen maximal ausgenützten Einheit, welche allen vom Käufer und von der Konkurrenz aufgezwungenen Bedingungen genügt, ein Kunststück, das neben einer gewissen Intuition eine grundlegende Beherrschung der elektrischen Erscheinungen voraussetzt.

Fast überall prägt sich die Entwicklung zur immer grösser werdenden Maschineneinheit aus; in den an die zweite Weltkraftkonferenz in Berlin 1930 eingesandten Fachberichten bildet deshalb die Frage der Leistungsgrenze der elektrischen Maschine eine Hauptrolle. Fast bei allen elektrischen Maschinengattungen konnte konstatiert werden, dass die von der Industrie heute herstellbaren grössten Einheiten infolge Mangel an genügend grossen Energiequellen nicht anwendbar sind. Die angeführten Fachberichte, zu der auch von Seiten der schweizerischen Industrie namhafte Beiträge geleistet wurden, bilden ein grundlegendes Dokument über den gegenwärtigen Stand der Elektroindustrie; es sei auch an dieser Stelle auf einige im Bulletin des SEV publizierte Arbeiten aufmerksam gemacht [2]).

Generatoren.

Die Entwicklung zu grösseren Einheiten hat sich, wenn auch etwas langsamer, weiter ausgeprägt; insbesondere kommen bei Turbogeneratoren bald nur noch grosse und grösste Einheiten zur Anwen-

[1]) Vergl. E. Dünner: Rückblick auf die Entwicklung des Elektromaschinenbaues im Jahre 1927. Bull. SEV 1928, Nr. 19, S. 609.

[2]) H. Rikli: Mechanischer Sicherheitsgrad grosser Turbogeneratoren. Bull. SEV 1930, Nr. 11, S. 357.
E. Hunziker: Grosse Dreiphasengeneratoren. Bull. SEV 1930, S. 445.
J. Kübler: Skizze über Fragen des Transformatorenbaues. Bull. SEV 1930, Nr. 14, S. 456.

dung. Das Hauptinteresse beansprucht hier die zweipolige Type für 3000 U/m, bei der die noch vor wenigen Jahren angegebene Grenzleistung von 40 000 kVA sprunghaft überschritten worden ist. Bereits sind mehrere derartige Maschinen für 45 000 kVA und mehr im Betrieb; es sei in diesem Zusammenhang auf die von der A.-G. Brown, Boveri & Cie. (B B C) für das Eisenwerk Witkowitz gelieferte Einheit für 48 000 kVA verwiesen, die im Bulletin des SEV 1930, Nr. 14, S. 446, genauer beschrieben ist. Der Rotor besitzt Kupferwicklung, die Umfangsgeschwindigkeit am Rotor beträgt beim Schleudern mit 1,25facher Normaltourenzahl 190 m/s. Die grosse Schwierigkeit beim Bau derartiger Maschinen liegt in der Beherrschung der grossen mechanischen Beanspruchungen, die in den Wickelkappen, am Rotorzackenfuss und namentlich in der zentralen Bohrung auftreten; Vorbedingung für ihren Bau ist einwandfrei vergüteter Stahl, der eine Streckgrenze wesentlich über 4000 kg/cm² besitzt. Parallel mit der Materialverbesserung mussten auch verbesserte Prüfmethoden entwickelt werden. Neben der seit Jahren allseitig verwendeten Ausspiegelung des Mantels der zentralen Bohrung tritt neuerdings die Bestimmung der bleibenden Dehnung in Abhängigkeit der Umdrehungszahl. Fig. 1 zeigt das Resultat einer derartigen Dehnungsmessung an einer Scheibe von 920 mm Durchmesser, ausgeführt durch die Maschinenfabrik Oerlikon (M F O); der Verlauf der Kurve zeigt, dass der Probekörper bis zu 3500 U/m als gut taxiert werden darf. Als Genauigkeit der

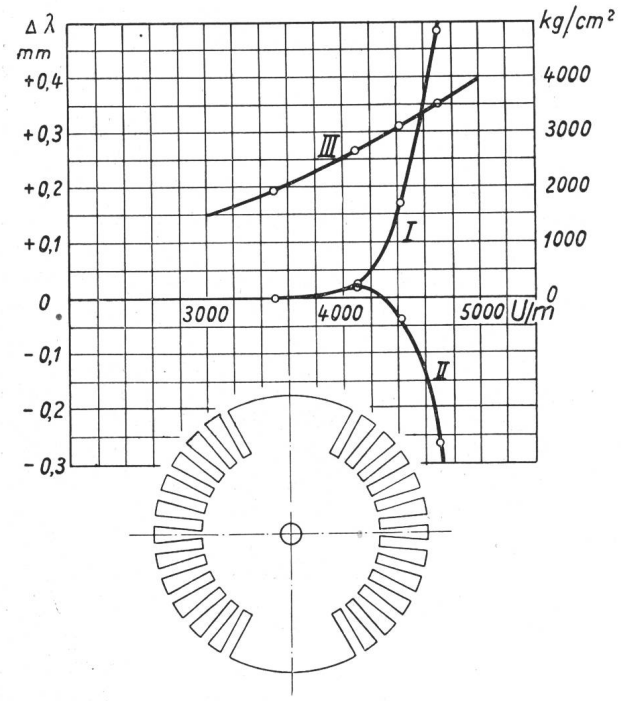

Fig. 1.
Dehnungsmessung an rotierender Scheibe von 920 mm Durchmesser.
Dehnungen und Spannungen in Funktion der Umdrehungszahl pro Minute.
I Bleibende Dehnungen im Durchmesser über Polhorn.
II Bleibende Dehnungen im Durchmesser über Neutrale.
III Randspannung im Bohrloch.

Methode wird Messung auf 1/2000 mm angegeben. Eine weitere Prüfung besteht in der Entnahme von Probestücken aus dem Ballen, sowohl in radialer wie tangentialer Richtung; ferner ist auch eine elektrische Prüfmethode entwickelt worden, die nach folgender Anordnung arbeitet (Fig. 2): Ein Gleichstrom von ca. 2000 A wird genau diametral durch den Ballen geschickt und unterbrochen. Dabei darf der Ausschlag eines ballistischen Galvanometers, das an einer in der Bohrung angeordneten Spule hoher Windungszahl liegt, bestimmte kleine Werte nicht übersteigen. Durch Drehung und Axialverschiebung der Stromanschlusspunkte wird so der ganze Ballen auf Unsymmetrien abgesucht.

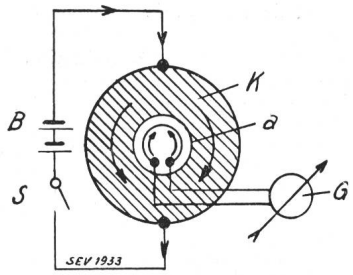

Fig. 2.
Elektromagnetische Prüfung von Induktorkörpern auf Schmiedefehler.

Immer mehr führt sich die Verwendung von Aluminium für die Erregerwicklung im Rotor ein; ihr leichteres Gewicht gestattet eine weitere Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit, die für einteiligen Rotor bis zu 210 m/s beim Schleudern zugelassen wird. Die damit zulässige Erhöhung des Rotordurchmessers auf nahezu 1100 mm erlaubt wiederum entsprechende Leistungssteigerung. Unter Berücksichtigung der erwähnten Neuerungen ist es möglich geworden, die Leistung der 3000tourigen Maschine ganz erheblich zu erhöhen. In diesem Zusammenhange sind zu erwähnen: Ein Generator für 72 000 kVA für die Stadt Paris, gebaut von den Ateliers de Constructions électriques de Jeumont; eine Einheit für 80 000 kVA, im Bau bei den Siemens-Schuckert-Werken, Berlin (S S W), für das Grosskraftwerk Schelle bei Antwerpen. Interessant ist die verbindliche Offerte der M F O für einen Turbogenerator für 102 500 kVA bei 3000 U/m und 15 kV Klemmenspannung, Totalgewicht 180 t. Die Randspannungen im Bohrloch werden zu 1800 kg/cm² errechnet, in den Kappen zu 2700, an der Basis der Zacken zu nur 980. Dabei beträgt der Rotordurchmesser 1080 mm; bei einer Lagerdistanz von 6400 mm liegt die erste kritische Umdrehungszahl bei 1750, die zweite bei 4500 U/m Bewähren sich diese grossen Einheiten, gegen welche auf der zweiten Weltkraftkonferenz Berlin 1930 von prominenter Seite gewarnt wurde, so dürfte die zweipolige Ausführung für Turbogeneratoren bei jeder Leistung die Norm werden. Sehr bescheiden nehmen sich dagegen die bei 3600 U/m erreichten Leistungen aus, für die die amerikanische Fachliteratur z. Z. 18 750 kVA als Maximum angibt.

Immer noch sind die grössten Einheiten für Turbogeneratoren bei kleineren Umdrehungszahlen anzutreffen; mehrere Einheiten für 100 000

kVA sind in den letzten drei Jahren fertiggestellt worden. Alle überragt die 160 000 kW-Maschine für 1500 U/m, welche sich nun seit zwei Jahren in der East River Station der N. Y. Edison Comp. in Betrieb befindet.

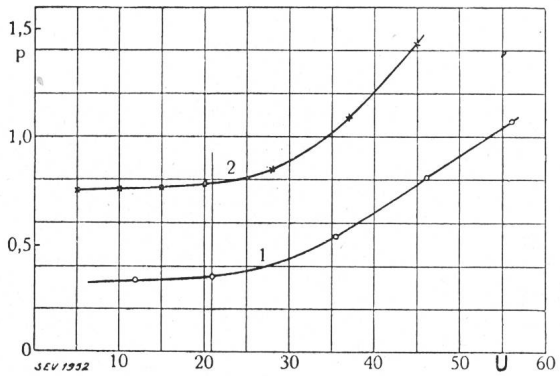

Fig. 3.
Verlauf der dielektrischen Verluste *(p)* in Abhängigkeit der Spannung *(U)* der 36000-V-Generatorwicklung (B B C).
1 = Maschine kalt. 2 = Maschine warm.

Die von derartigen Mammutmaschinen erreichten Wirkungsgrade sind sehr hoch; für eine

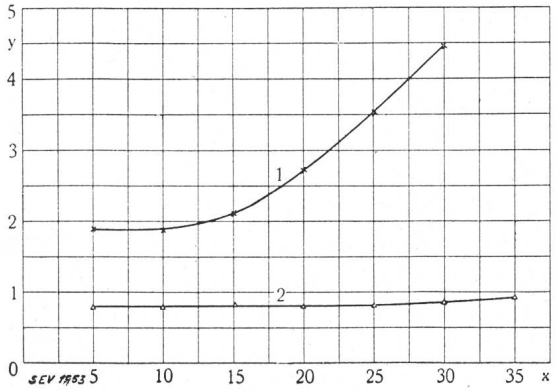

Fig. 4.
Dielektrische Verluste eines Generatorstabes in Funktion der Spannung. Temperatur 16° C. (B B C).
x = Angelegte Spannung in kV.
y = Verluste in W reduziert auf eine Feldstärke 10 kV/cm.
1 = Gewöhnliche Isolation.
2 = Verbesserte Isolation.

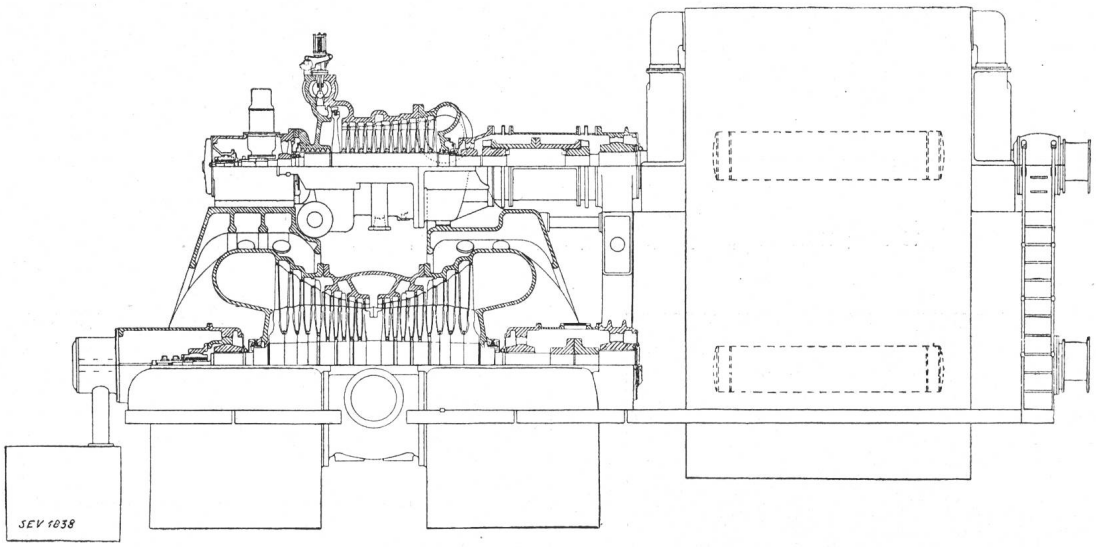

Fig. 5.
Doppelaggregat von Turbogeneratoren, 110 000 kW, jedes Aggregat macht 1800 U/m. (G E C).

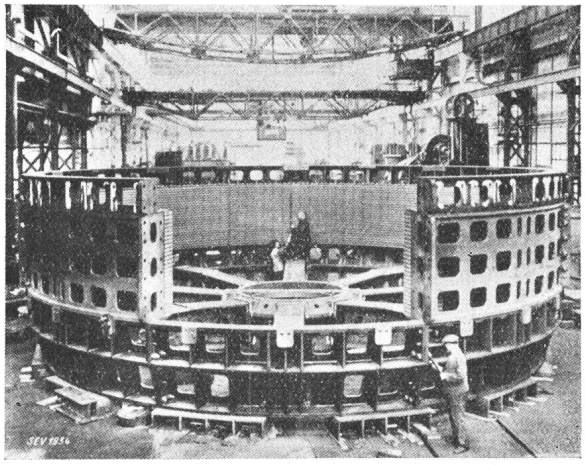

Fig. 6.
Aufbau des Statorkörpers der Generatoren für Ryburg-Schwörstadt. (B B C).

100 000 kVA-Type mit 1500 U/m wird für Vollast z. B. garantiert: 97,4 % bei $\cos\varphi = 1$ und 96,5 % bei $\cos\varphi = 0{,}75$. Den Verlusten und ihrer Aufteilung wird naturgemäss grösste Aufmerksamkeit geschenkt; neben der Reduktion der Eisenverluste durch Verwendung hochlegierter Bleche sind es namentlich die Ventilations- und Zusatzverluste, die durch passende Anordnung reduziert werden konnten. Indem die Kühlluft durch die Maschine durchgesogen wird, gelingt es, die im Lüfter entstehende Wärme von der Maschine fernzuhalten; die daraus resultierende kleinere Maschinentemperatur hat einen nennenswerten Gewinn an Wicklungsverlusten zur Folge. Oberingenieur Hunziker (B B C) berechnet in seinem Bericht für die Weltkraftkonferenz für eine 45 000 kVA-Maschine den so erzielten Gewinn zu 185 kW = 0,5 % der abgenommenen Leistung. Die Verringerung der Ven-

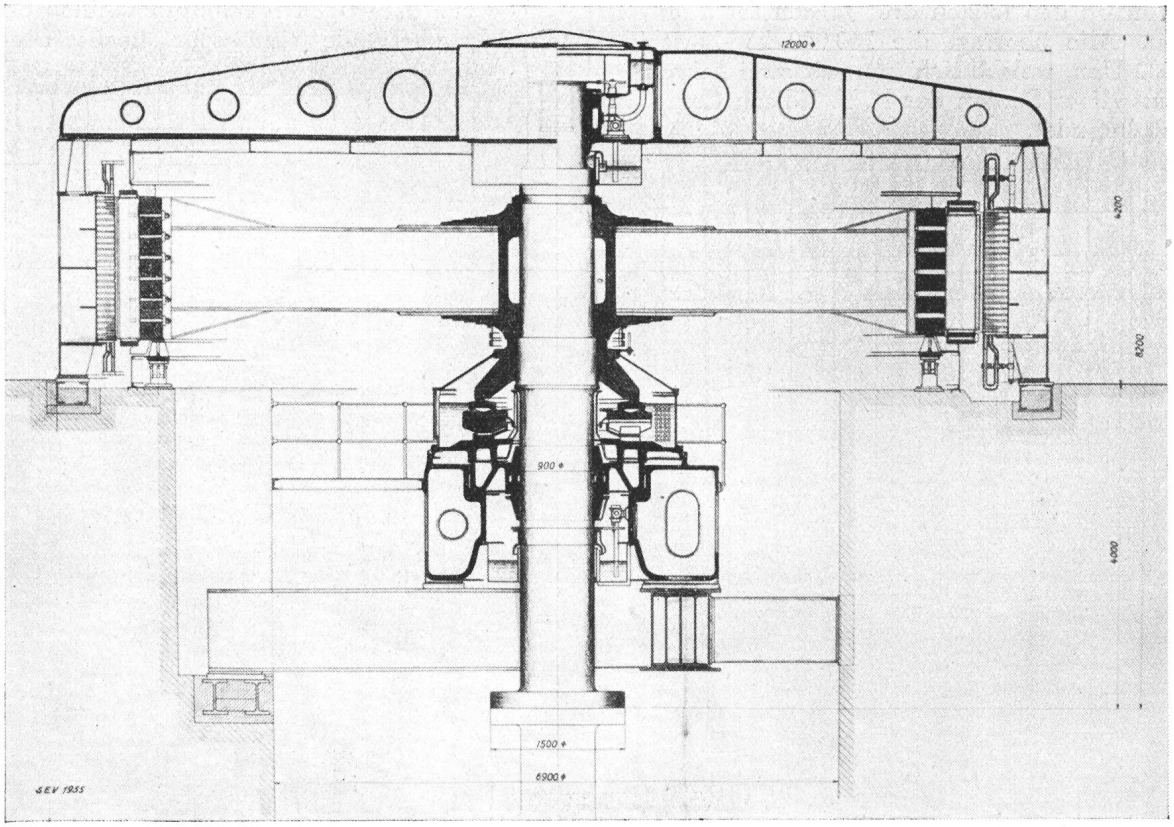

Fig. 7.
Generatoren für die Beauharnois Power Corp.
75 U/m; 44000 kVA, 25 p/s (rechts), resp. 47000 kVA, 60 p/s (links). (MFO).

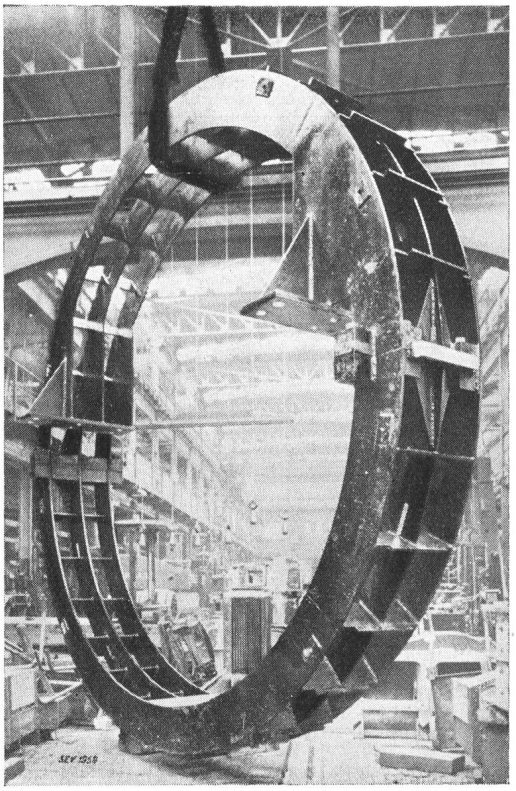

Fig. 8.
Geschweisste Innenstatorkonstruktion. (Sécheron).

tilationsverluste durch Anwendung von Wasserstoff als Kühlmittel hat in Europa noch keinen Eingang gefunden, im Gegensatz zu Amerika, wo dieses Kühlverfahren für Synchronmaschinen in steigendem Masse anzutreffen ist.

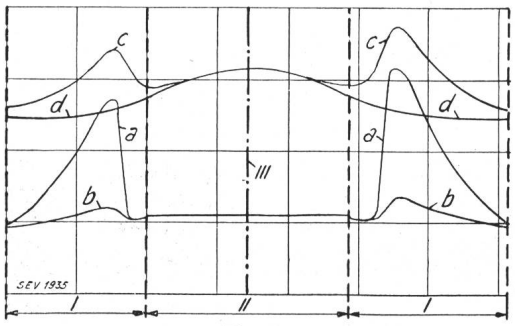

Fig. 9.
Verlustverteilung und Erwärmung über einer Statorspule. (Aufnahme MFO).
I = Wicklungskopf.
II = Eisenbreite.
III = Mitte Statoreisen.
a und *b* = Verluste.
c und *d* = Erwärmungen.
a und *c* = normale Stellung der Leiter in der Stirnverbindung.
b und *d* = korrigierte Stellung der Leiter in der Stirnverbindung.

Die grossen Maschinenleistungen erfordern entsprechend hohe Spannungen, einerseits, um die Ströme in der Maschine klein zu halten, anderer-

seits, um möglichst grosse Gebiete ohne Zwischenschaltung eines Transformators bedienen zu können. Die bisher übliche Grenzspannung von 15 bis 17 kV ist in letzter Zeit bei mehreren Einheiten wesentlich überschritten worden; die dabei gegenüber früher bedeutend verschärften Versuchsbedingungen haben der Isoliertechnik neue Probleme gestellt. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die von Parson gebaute Maschine für 33 000 V, 31 250 kVA, 3 000 U/m, deren Prüfspannung 67 000 V beträgt. Die drei Leiter pro Nute sind als konzentrische Rohre angeordnet. Für die Centrales Electriques de Flandres et du Brabant wurde von der Firma B B C ein Turbogenerator für 31 250 kVA bei 36 000 V Klemmenspannung und 72 000 V Prüfspannung fertiggestellt. Neben der bisher üblichen Prüfung auf Durchschlag tritt neu die Bestimmung der dielektrischen Verluste hinzu, sowie die Bedingung, dass der sogenannte Jonisationsknick oberhalb der Betriebsspannung (Phasenspannung) liegen muss. Fig. 3 zeigt den Verlauf der dielektrischen Verluste dieser Ankerwicklung in Abhängigkeit der Spannung; dabei sind die Verluste auf 1 dm^3 Isolationsvolumen und auf die Feldstärke 10 kV/cm reduziert. Neben diesen rigorosen Bedingungen elektrischer Art sind noch weitere mechanische Schwierigkeiten zu überwinden, die sich aus der ungleichen Wärmeausdehnung von Kupfer, Isolation und Eisen ergeben. Es hat sich gezeigt, dass der bisher verwendete Mikanit, der Schellack als Bindemittel benützte, diesen Anforderungen kaum mehr genügte; die Isoliertechnik hat neue Materialien gefunden, welche durch Verwendung asphalthaltiger Lacke namentlich in bezug auf Jonisation und Plastizität bedeutend bessere Verhältnisse zeigen. Ueber die erreichten Resultate orientiert Fig. 4, welche die dielektrischen Verluste in Abhängigkeit von der Spannung zeigt, gemessen an älterer und neuester Mikanitisolation.

Trotzdem die Verwendung rasch laufender Generatoren und grosser Einheiten wesentlich an Platz sparen lässt, so scheint auch dies jenseits des Ozeans nicht mehr zu genügen. Bei der sogenannten Compoundtype werden die mit Hoch- und Niederdruckturbine gekuppelten Generatoren über einander gestellt. In Fig. 5 ist eine derartige Ausführung skizziert; in den Werkstätten von Ford ist eine solche Gruppe mit total 125 000 kVA bei 1800 U/m in beiden Generatoren aufgestellt.

Auch der Bau der mit Wasserturbinen angetriebenen Generatoren zeigt in den letzten Jahren wiederum weitere Fortschritte. Die im Berichte von 1927 [1]) angeführten Generatoren für die Kraftwerke Oberhasli A.-G. sind in Grösse und Leistung heute durch die vier Generatoren des Kraftwerkes Ryburg-Schwörstadt wesentlich überholt. Die Leistung dieser durch die Firma BBC (Baden und Mannheim) gebauten Maschinen beträgt 32 500 kVA bei 75 U/m, die grössten bisher in Europa gebauten Einheiten. Fig. 6, welche den Aufbau des Statorkörpers während der Fabrikation darstellt, soll einen Eindruck über die gewaltigen Dimensionen dieser Maschinen geben, über die folgende Zahlen weiter orientieren. Auf der Welle mit 900 mm Durchmesser sitzt das mit Rücksicht auf den Transport sowohl achsial wie radial zweiteilige Polrad mit 9300 mm Aussendurchmesser; der grösste Durchmesser der Maschine beträgt 10 800 mm, die Totalhöhe der Maschine, inklusive Haupt- und Hilfserreger 9810 mm, Dimensionen, die für den Transport eine Aufteilung in mehrere Stücke verlangten. Vom Gesamtgewicht der Maschine von 550 t entfallen 250 t auf den Rotor. Im Bulletin des SEV 1930, Nr. 14, S. 454, ist die Maschine abgebildet.

Noch etwas grössere Dimensionen besitzen die in Fig. 7 dargestellten Generatoren, welche die M F O für die Beauharnois Power Corp. in Kanada in Auftrag erhalten hat. Die Figur zeigt in ihrer rechten Hälfte den Schnitt durch den Generator für 44 000 kVA bei 75 U/m und 25 p/s, in ihrer linken Seite den entsprechenden Generator für 47 000 kVA, 75 U/m, für 60 p/s. Das Totalgewicht einer derartigen Maschine beträgt 650 t, wovon 315 t auf den Rotor entfallen; sowohl Stator wie Rotor sind in geschweisster Konstruktion ausgeführt. Das Spurlager liegt zwischen Generator und Turbine und ist zweiteilig, so dass eine Lagerauswechslung erfolgen kann, ohne dass der Rotor herausgehoben werden muss.

In dem im Bau befindlichen Niederdruck-Kraftwerk am Dnieper bei Dnieprostroi werden vier Generatoren für 77 500 kVA bei 88,25 U/m aufgestellt, wovon die ersten zwei durch die General Electric Co. in Schenectady, die letzten zwei in Russland selbst hergestellt werden. Der Aussendurchmesser wird zu 12 m, das auf dem Traglager ruhende Gewicht zu 900 t angegeben.

Die im letzten Rückblick [1]) erwähnte Einführung der geschweissten Flußstahlkonstruktion hat sich in steigendem Masse durchgesetzt [3]); Modell- und Gewichtsersparnis rechtfertigen die Umstellung. Statorgehäuse, Lagerschilder, Tragbalken, auch Grundplatten sind in grosser Zahl in geschweisster Konstruktion anzutreffen; neu, für die Schweiz wenigstens, ist die Herstellung der Rotorsterne nach diesem Verfahren. Die durch die neue Konstruktionsart errechnete Gewichtsersparnis gegenüber der älteren, gegossenen Ausführung wird zu 10 bis 15 % des Gesamtgewichtes angegeben (Fig. 8).

Zu den Verlusten, deren rechnerische Erfassung auch heute noch grösste Schwierigkeiten bereitet, gehören die sogenannten Zusatzverluste, die ihren Sitz in den Stirnverbindungen und den sie umgebenden Teilen haben. In Fig. 9 sind die Verlustverhältnisse über die ganze Länge einer Halbspule für normale Stellung der Leiter und für korrigierte Stellung derselben in der Stirnverbindung angegeben, letztere Stellung korrigiert in dem Sinne, dass

[3]) Ch. Meyfarth: Die Elektroschweissung im modernen Elektromaschinenbau. Bull. SEV, 1930, Nr. 16, S. 533.

auch ausserhalb des Eisens stets die Breitseite des Leiters in die Hauptrichtung des Streufeldes gestellt wurde. *a* und *b* bedeuten die Verluste, *c* und *d* die Erwärmungen.

Mit steigender Maschinengrösse wachsen die Schwierigkeiten der Beherrschung von Kurzschlüssen; trotz grosser Streureaktanz der Ankerwicklung treten in den Stirnverbindungen leicht Stromkräfte bis zu 100 kg/cm Wickellänge auf. Durch Verwendung von Gitterwicklungen werden die gefährlichen Stosskräfte auf die Phasentrennungen lokalisiert. Die amerikanische Praxis sucht diesen grossen Kräften durch die sogenannten Zweiwicklungsgeneratoren zu steuern. In den Nuten sind zwei Wicklungen gelagert, wovon jede auf eine besondere Sammelschiene arbeitet, die von einander getrennt oder erst nach Vorschalten von genügend grosser Impedanz parallel geschaltet sind.

Mit der Zunahme des in einer Maschineneinheit angelegten Kapitals wächst auch die Notwendigkeit des Schutzes der betreffenden Maschine. Neben genügend starkem Bau, sowohl in mechanischer wie elektrischer Beziehung, ist in erster Linie eine möglichst rasch wirkende Entregung erforderlich. Man erreicht heute bis zu 6400 V/s. Durch Buchholz ist folgende, recht interessante Lösung eines

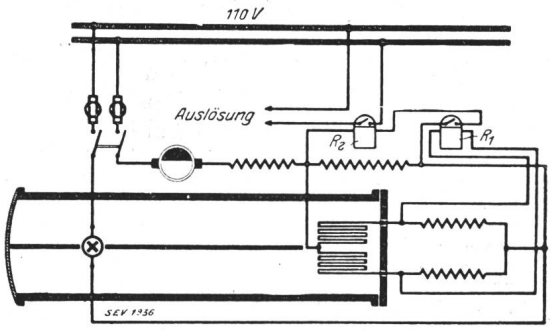

Fig. 10.
Buchholzschutz für Generatoren.

Generatorschutzes angegeben worden (Fig. 10). Ein kreisrundes Rohr ist durch eine Trennwand in zwei Kammern geteilt, von denen die eine als Vergleichskammer dient, während die andere durch einen Teil der Generatorabluft durchströmt wird. Der an einem Ende des Rohres abschliessende Hohlspiegel sammelt die von einer Wärmequelle ausgehenden Wärmestrahlen und wirft sie annähernd parallel durch die beiden Kammern auf einen, am anderen Rohrende angebrachten Empfänger. Dieser, ausgeführt in Form einer Messbrücke, hat die Aufgabe, die Unterschiede in der Wärmezustrahlung in die für die Betätigung eines Relais notwendigen elektrischen Ströme umzusetzen. Gelangen in die untere Kammer mit der Generatorabluft Rauchbestandteile, so wird dadurch die Wärmedurchstrahlung auch bei kleinsten Spuren von Rauch derart geschwächt, dass der zugehörige Empfangswiderstand kälter und kleiner wird, wodurch das Relais anspricht.

Mittel- und Hochfrequenzmaschinen finden Anwendung in der Radiotechnik, sowie zur Speisung von Induktionsschmelzöfen. Durch passende Ausbildung solcher Generatoren ist es möglich geworden, die Volumenausnützung weit über die der Generatoren von 50 p/s zu steigern. Bei einer 100 kW-Maschine, entworfen durch K. Schmidt, Berlin, wird für den Vergleichswert $C = D^2ln/\text{kW}$ die Zahl

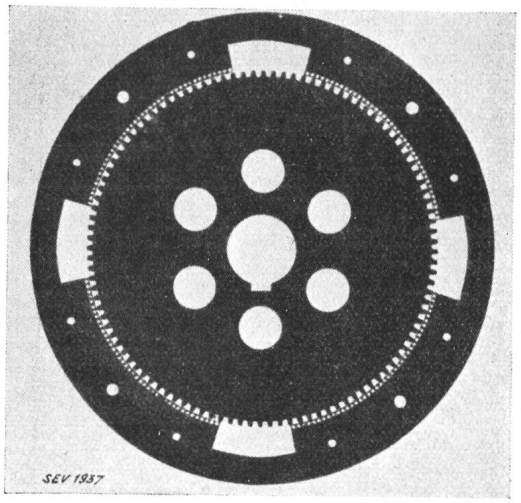

Fig. 11.
Rotor- und Statorblechschnitt einer Maschine für 8000 p/s. (Lorenz A.-G., Berlin.)

$1580 \cdot 10^3$ angegeben; Erreger- und Ankerwicklung sind auf dem Stator angeordnet, das Polrad ohne Wicklung wirkt nur mittels seiner Zacken zur Bildung der Variation des magnetischen Widerstandes. In Fig. 11 ist ein Stator- und Rotorblech-

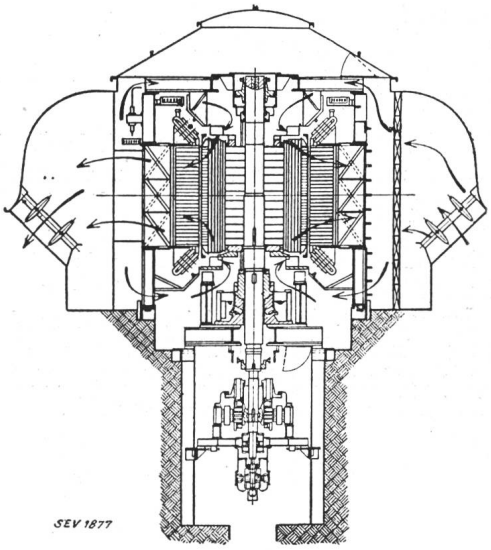

Fig. 12.
Freiluft-Synchron-Phasenschieber für vertikale Aufstellung. (G E C).

schnitt einer derartigen Maschine für 2 kW und 8000 p/s dargestellt; die Zackenzahl des Rotors beträgt 108; die Statornuten haben einen Durchmesser von 2,2 mm; der darin liegende Ankerdraht ist mit 20 A/mm² belastet, ohne die zulässige Er-

wärmung zu erreichen. Der Luftspalt ist zu 0,15 bis 0,2 mm angegeben.

Die gleichen Probleme wie die Generatoren zeigen die *Synchronkompensatoren*, die heute ebenfalls in stattlichen Einheiten hergestellt werden [4]). Da keine durchgehende Welle vorhanden ist, können beide Lager nach aussen abgeschlossen werden; die konstruktiven Schwierigkeiten der Abdichtung für Kühlung mit Wasserstoff sind dadurch bedeutend reduziert. In Amerika finden sich daher da und dort derartige Maschinen mit Umlaufskühlungen mit Wasserstoff aufgestellt; bei der General Electric Co. sollen im Jahre 1929 derart gekühlte Maschinen für über 75 000 kVA in Fabrikation gewesen sein. Häufig wird Aussenaufstellung für diese Maschinen gewählt; die Anordnung der 25 000 kVA Synchronkompensatoren mit Aussenaufstellung in der Toronto Leaside Transformatorenstation ist derart gewählt, dass der Kompensator vertikal gestellt ist und den unter ihm aufgestellten offenen Erreger schützt (Fig. 12).

Gleichstrommaschinen.

Die schwere, immer wachsende Konkurrenz durch die Gleichrichter zwingt den Hersteller der Gleichstrommaschine zu maximaler Ausnützung derselben. Deshalb prägt sich auch hier die Entwicklung zur grossen Einheit aus; die scharfe Ausnützung in elektrischer Richtung führt zur häufigen Anwendung der Kompensationswicklung, die mechanische Ausnützung zu Rotorkonstruktionen für 100 und mehr m/s Umfangsgeschwindigkeit. Das Kommutationsproblem wurde in den letzten Jahren nicht wesentlich weiter gefördert; nach wie vor regiert neben der Theorie die Erfahrung. Bei

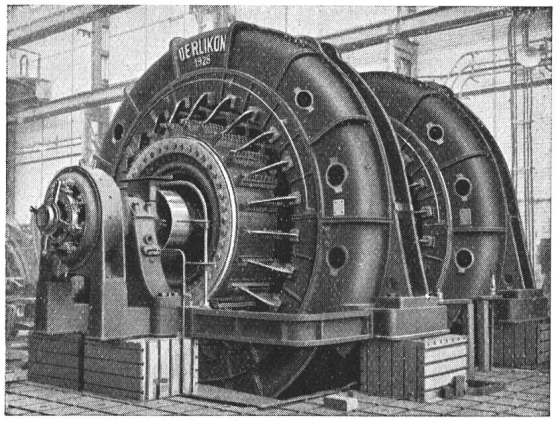

Fig. 13.
Gleichstromgenerator für 6000 kW. (M F O).

richtiger Berücksichtigung aller bei diesem Problem mitspielenden Grössen dürfte es heute möglich sein, die Gleichstrommaschine bis zur Erwärmungsgrenze funkenfrei auszunützen. Die Umstellung der Wasserkraftanlage am Rjukanfos auf Gleichstrom gab Gelegenheit zur Aufstellung einer Reihe sehr grosser Gleichstrommaschinen; in Fig. 13 ist eine von der M F O für diese Anlage geliefert Doppelmaschine für 6 000 kW Dauerleistung, 470 bis 540 V, 12 000 A und 250 U/s dargestellt.

Trotz steigender Schwierigkeiten wird immer versucht, auch die *Spannungsgrenze* der Gleichstrommaschine zu erhöhen. Für kleinere Leistungen kommen heute für Zwecke der Hochfrequenz Gleichstrom - Hochspannungsmaschinen auf den Markt; von der Genfer Firma Sécheron sind für diesen Zweck in den letzten Jahren mehrere solcher Maschinen für 10 000 V und mehr gebaut worden, bei denen, in vierpoliger Ausführung, die hohe Spannung mit einem Kollektor beherrscht wird. Die mittlere und maximale Lamellenspannung überschreitet die sonst als zulässig bekannten Grenzen von 25 resp. 45 V um mehr als das Doppelte, was nur durch entsprechende Reduktion des Strombelages möglich ist. Infolge der schwachen Ausnützung erträgt die Maschine direkte Kurzschlüsse ohne Beschädigung und, trotz der grossen Spannung am Kommutator, ohne Rundfeuer.

Mit der zunehmenden Anwendung der geschweissten Konstruktionen steigt auch der Bedarf an *Schweissgeneratoren*. Wenn sich auch der Schweisstransformator nun überall eingeführt hat, so wird doch noch mancherorts für die elektrische Schweissung Gleichstrom vorgezogen, der an die Geschicklichkeit und Uebung der Arbeiter unzweifelhaft geringere Anforderungen stellt. Von der Firma B B C ist eine Mehrfach-Schweiss-Umformeranlage entwickelt worden, die gestattet, mehrere Arbeitsplätze von einer Gruppe aus zu bedienen. Die Generatoren sind für ca. 40 V flach kompoundiert; die Regulierung der Spannung an den einzelnen Schweißstellen erfolgt durch einen Hauptstromregler mit Grob- und Feinregulierung in der Zuleitung zur Arbeitsstelle. Infolge der niedrigen Klemmenspannung erreicht der Wirkungsgrad zwischen Generatorklemme und Lichtbogen ca. 55 %.

Asynchronmotoren.

Auch im Gebiete dieser Maschinen sind in den letzten Jahren namhafte Fortschritte zu verzeichnen; sowohl in elektrischer wie mechanischer Hinsicht sind mannigfaltige Neuerungen entwickelt worden. Der kompensierte Kleinmotor mit Kommutator ist nahezu verschwunden, dagegen hat sich das Bestreben, den Kurzschlussankermotor in seiner Anwendung zu fördern, erfolgreich durchgesetzt. Die schon im letzten Berichte erwähnten Doppelnutmotoren bilden heute im Verein mit dem Motor mit Wirbelstromanker in sehr vielen Fällen einen willkommenen Ersatz für den kostspieligeren Motor mit gewickeltem Anker und Anlasser. Für viele Zwecke bedeutet eben der *Kurzschlussankermotor* eine wesentliche Vereinfachung, so dass seine Entwicklung einem technischen Bedürfnis entspricht. Man denke an die Aufzugsmotoren, an explosionssichere Motoren u. a. m. Die Rechnungsverfahren für beide geschilderten Motorarten sind heute durchgebildet, beide Ausführungen sind bei kleinsten und grössten Einheiten anzutreffen. Bei passender Dimensionierung des Rotors gelingt es,

[4]) Siehe Bull. SEV 1929, Nr. 17, S. 574.

mit dreifachem Anlaufstrom mindestens das doppelte Anzugsmoment zu entwickeln; bei Einschalten mit Sterndreieckschaltern kann jeder vernünftigen Bedingung über Anlaufstrom Genüge geleistet werden. Es kann in diesem Zusammenhang auf eine englische Veröffentlichung hingewiesen werden [5]), nach welcher 38,3 % aller Störungen an Drehstrommotoren auf den gewickelten Anker fallen, ohne dass dabei die Störungen am Anlasser eingeschlossen sind; Störungen an Kurzschlussankern treten quantitativ ganz zurück. Die Verschlechterung des Leistungsfaktors ist infolge der besondern Nutausbildung im Rotor gering und kann ohne weiteres in Kauf genommen werden; gegenüber der Ausführung mit gewickeltem Anker ist der Leistungsfaktor immer noch höher.

In konstruktiver Hinsicht ist eine weitgehende Anpassung an die Bedürfnisse der verschiedenen Industrien unverkennbar, indem der frühere Standpunkt des Beharrens auf den eigenen Serienkonstruktionen einem manchmal sehr weit gehendem Entgegenkommen gegenüber den Wünschen des Käufers Platz gemacht hat. Sehr grosse Verbreitung haben die Motoren mit *Rippengehäuse*, zwecks Vergrösserung der kühlenden Aussenoberfläche, gefunden (Fig. 14). In zahlreichen andern Varianten

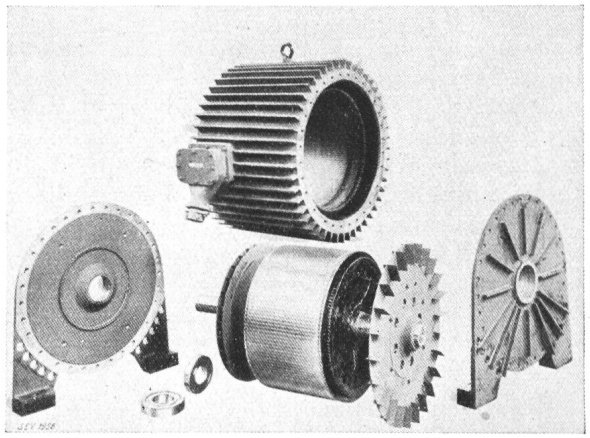

Fig. 14.
Drehstrommotor mit Rippengehäuse. (M F O).

wird die Abkühlungsfläche des geschlossenen Motors vergrössert, sei es durch Doppelmantel mit Aussenventilation, sei es durch Umlaufskühlung mit aussen liegenden Kühlrohren. Grosse Schwierigkeit bereitet immer noch das Problem des vollkommen geräuschlosen Motors, für den namentlich im Aufzugsbau absolutes Bedürfnis besteht.

Nach wie vor ist das Problem der *Phasenkompensation* im Vordergrund des Interesses, doch scheint auch hier eine gewisse Abklärung eingetreten zu sein. Für kleine und mittlere Motoren hat sich als geeignetes Mittel der Phasenkompensation der Anschluss eines parallel geschalteten statischen Kondensators erwiesen, auf welchen hier kurz etwas näher eingegangen werden soll [6]). Die Erfahrung lehrt, dass ölgetränktes, dünnes Papier überraschend hohe dielektrische Feldstärken auszuhalten vermag, bei sehr geringen dielektrischen Verlusten. Die Papierindustrie liefert zur Zeit homogenes Papier in Dicken unter 0,009 mm, das sehr saugfähig ist; in derartigen Schichten werden Durchbruchfeldstärken in der Grössenordnung bis 200 kV/mm und mehr gemessen, so dass vier solcher aufeinander gewickelten Lagen eine Minutenprüfspannung bis zu 3000 V aushalten; diese Anordnung ist bei einer Papierschichtdicke von knapp 0,04 mm für 500 V Betriebsspannung brauchbar. Die Fortschritte in der Papierfabrikation haben es ermöglicht, auf kleinem Raum mit geringem Materialaufwand grosse Kapazitäten zu erzeugen; ihre dielektrischen Verluste sind charakterisiert durch Verlustwinkel tg $\delta = 0{,}003$ und weniger, unter Berücksichtigung der Verluste in den Zuleitungen und Verbindungen = ca. 0,004. Die Massenherstellung der einzelnen Elemente auf maschinellem Wege hat dem Kondensator das ihm von früher her anhaftende Odium des grossen Preises genommen. Für Betriebsspannungen von 380 bis 500 V kann heute mit einem Preise unter Fr. 40.— für das BkVA gerechnet werden. Fig. 15 zeigt einen derarti-

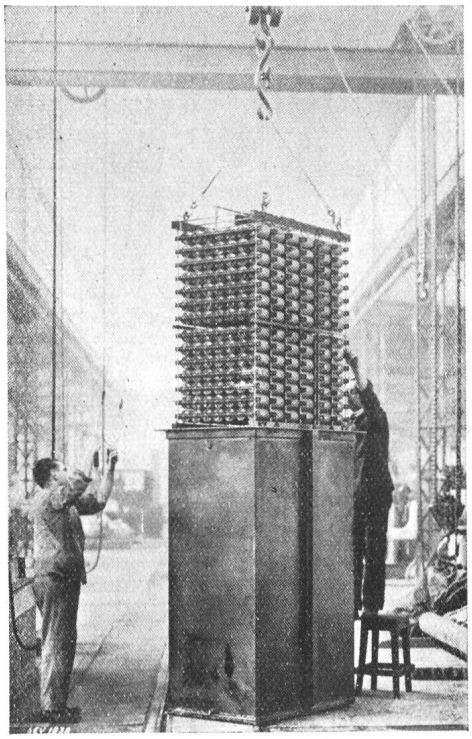

Fig. 15.
Drehstromkondensator für 250 B kVA, 2000 V, 50 p/s.
(Häfely, Basel.)

gen Drehstromkondensator für 250 kVA der Firma E. Häfely & Cie., Basel. Die kleinen Verluste und der Wegfall jeglicher Bedienung machen diese Kompensationsart bis zu grossen Leistungen un-

[5]) The technical record of the British engine, boiler and electrical insurance comp. Ltd. 1929.

[6]) Vergl. Bull. SEV 1930, Nr. 20, S. 653.

bedingt zur rationellsten. Die anfängliche Gepflogenheit der Aufteilung einer grossen Leistung in viele einzelne Elemente von ca. 10 BkVA wird mehr und mehr verlassen zugunsten grosser Einheiten. Die früher gehegten Befürchtungen bezüglich Strom- und Spannungsresonanzen haben sich als haltlos erwiesen, indem sozusagen keine davon herrührende Störungen bekannt geworden sind. Der Kondensator tritt neuerdings auch in Wettbewerb mit dem Synchronkompensator mit Leistungen von über 1000 kVA; der Mehrpreis der Anschaffung wird durch die viel kleineren Verluste und den Wegfall an Bedienungskosten und Fundamenten ausgeglichen. Die bisherige Anschauung über die Grenze der vorteilhaften Verwendung der einen oder anderen Art von Kompensation muss unbedingt zugunsten der statischen Kondensatoren nach oben verschoben werden, dies um so mehr, als sie für direkten Anschluss an Spannungen bis 20 000 V betriebssicher gebaut werden können.

Für grosse Leistungen, oder dann, wenn gleichzeitig eine Regulierung der Umdrehungszahl in Frage kommt, kann auch die Phasenkompensation auf elektromagnetischer Grundlage in Konkurrenz zur erstgenannten treten. Neben der Ausbildung des Motors als Synchroninduktionsmotor, bei dem Tourenregulierung allerdings wegfällt, kommen in erster Linie die Lösungen mit Hintermaschinen, meist Drehstromerregermaschinen, in Betracht. Auf diesem Gebiete ist in den letzten Jahren ebenfalls sehr grosse Arbeit geleistet worden. An Stelle der eigenerregten Hintermaschine tritt immer mehr die fremderregte Maschine mit Kompensationswicklung, um den wechselstromseitig dem Netz entnommenen Strom auf den Magnetisierungsstrom zu reduzieren und dadurch die Schleifringe des Erregers zu entlasten. Viele Schaltungen umgehen die direkte Kupplung des Erregers mit der Hauptmaschine; nicht nur für die eigenerregte, sondern auch für die fremderregte Maschine gelingt es, mit separatem Antrieb stabilen Lauf zu erreichen. Die Vorteile des asynchronen Anlaufes bringen es mit

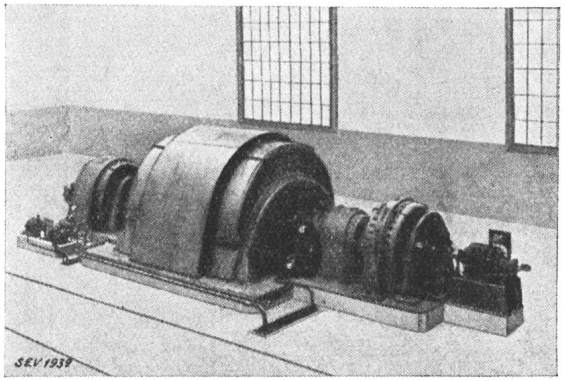

Fig. 16.
Asynchron-Phasenschieber 21 500 kVA. (A E G).

sich, dass an Stelle der Synchronkompensatoren auch für sehr grosse Leistungen kompensierte Asynchronmaschinen als Phasenschieber Anwendung finden. Fig. 16 und 17 zeigen Ansicht und Schaltungsschema einer derartigen Gruppe der AEG für 21 500 kVA, geliefert an die Berliner

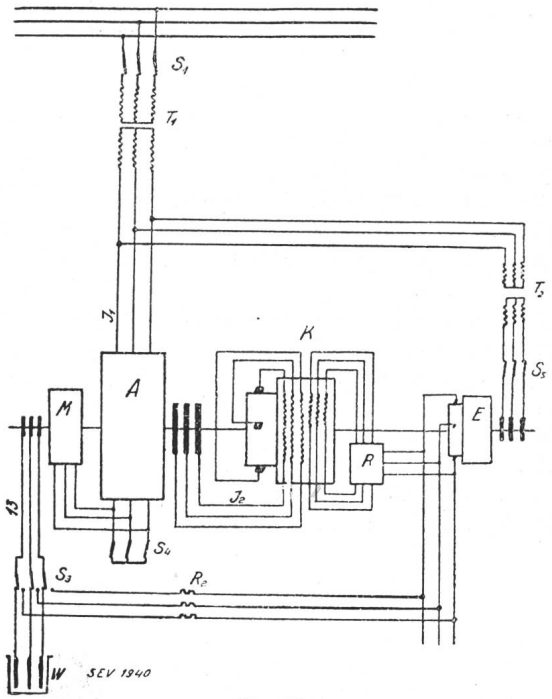

Fig. 17.
Schaltungsschema für den Phasenschieber Fig. 16.

Städtische Elektrizitätswerke A.-G. Die Hintermaschine ist eine Drehstromkollektor-Scherbiusmaschine mit Kompensations- und Wendepolwicklung. Für *Netzkupplungen* findet die Asynchronmaschine mit Drehstromerreger ebenfalls weitgehende Verwendung [7]); eine der grössten derartigen Kupplungen wurde von den SSW für Pfrombach geliefert. Die zu schiebende Leistung beträgt 15 000 kW, und zwar Einphasenstrom, 21 500 kVA, $\cos\varphi = 0{,}7$, $16\frac{2}{3}$ p/s, und Drehstrom, 17 500 kVA, $\cos\varphi = 0{,}8$, 50 p/s als Generator und 15 000 kW, $\cos\varphi = 1$ als Motor; die Umdrehungszahl dieser gewaltigen Gruppe ist zu 250 festgelegt.

Das ursprünglich als sehr einfach gedachte Problem des Leistungsaustausches zwischen Einphasen- und Drehstromnetzen und umgekehrt hat in der Praxis recht komplizierte Lösungen ergeben. Eine diesem Zwecke dienende Maschinenanlage soll im Zusammenhang mit dem Bau des Etzelwerkes [8]) im Unterwerk Seebach der SBB zur Aufstellung kommen, als Verbindung des Bahnnetzes mit dem 50-p/s-Netz der Nordostschweizerischen Kraftwerke (NOK). Die Anlage Seebach soll erlauben, eine konstante, zwischen 0 und Vollast beliebig einstellbare Leistung in beiden Richtungen, unabhängig oder in Abhängigkeit von den Frequenzschwankungen in beiden Netzen, zu übertragen; des weitern soll sowohl für die synchrone als auch für die asynchrone Maschine selbständiger Betrieb als Phasenschieber möglich sein u. a. m. Die Anlage wird ausgeführt durch BBC.

[7]) Vergl. Bull. SEV 1929, Nr. 10, S. 281.
[8]) Vergl. Bull. SEV 1929, Nr. 24, S. 805.

Induktionsregler.

Die fortschreitende Verknüpfung der Kraftwerke mit ihren zugehörigen Netzen rückt das Problem der Spannungsregulierung in den Vordergrund. Der Induktionsregler oder Drehtransformator, der dank seiner stetigen Regulierung das Problem am allgemeinsten löst, hat durch den einfachern Stufentransformator ernste Konkurrenz erhalten. Es ergibt sich daraus der Zwang, auch bei dieser Maschinengattung die Herstellungskosten bis zur äussersten Grenze zu reduzieren, teils durch stärkere elektrische Ausnützung, teils durch konstruktive Massnahmen. Die früher einzig bekannte 4polige Ausführung ist durch die 2polige Type ersetzt; unter Inkaufnahme eines nur wenige Prozent grösseren Leerlaufstromes gelang es so, die Typenleistung um 20 bis 30 % zu steigern. Die Verbilligung in konstruktiver Richtung wurde erreicht durch den Uebergang zur geschweissten Ausführung. Der Gewinn durch diese neuere Konstruktionsweise wird z. B. für eine Type mit interner Leistung von 300 kVA zu 30% errechnet. In Fig. 18

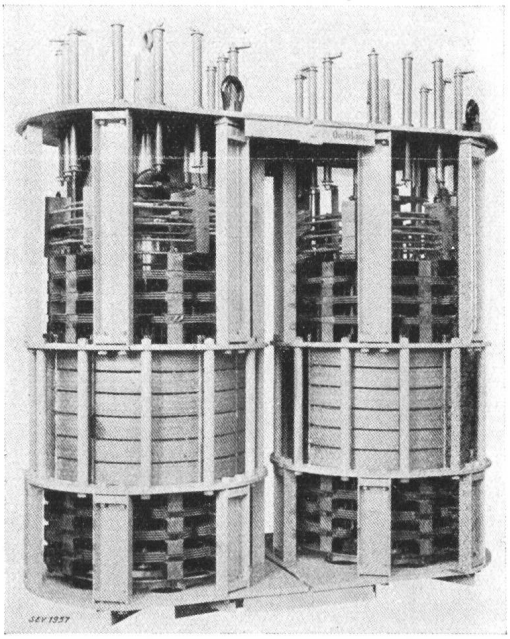

Fig. 18.
Doppelinduktionsregler. (M F O).

ist die nun von den meisten Firmen angenommene Ausführung in Walzeisenkonstruktion für einen Doppelregler dargestellt; für die Kühlung genügt normalerweise Aufstellung in Oel. Zum Schutz des Antriebsmechanismus bei Kurzschluss wird zwischen Antrieb und Rotor eine Rutschkupplung eingebaut; für Parallellauf mehrerer Regler tritt an Stelle der mechanischen Kupplung die elektrische. Von der MFO ist für die automatische Stabilisierung des Parallellaufes von Induktionsreglern folgende Schaltung entwickelt worden (Fig. 19): Die Rotorströme zweier Regler beschicken die Primärwicklungen der Stromwandler S_1 und S_2, deren Sekundärwicklungen einerseits über einstellbare Ohmsche Regulierwiderstände kurzgeschlossen, anderseits durch zwei sich kreuzende Verbindungsleitungen gegeneinander geschaltet sind. Bei gleichen Rotorströmen schliessen sich die Sekundär-

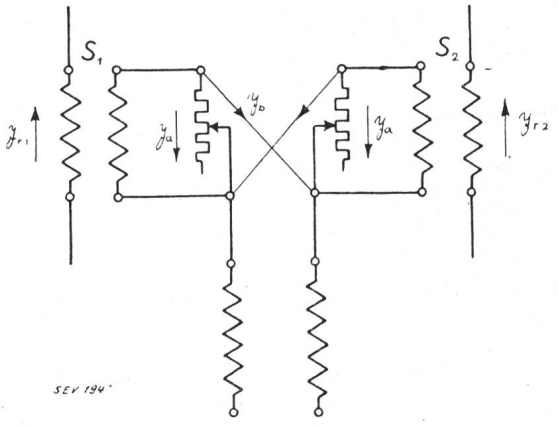

Fig. 19.
Parallellaufreglerschaltung für Induktionsregler.

ströme der Stromwandler über die gekreuzten Verbindungsleitungen; bei ungleichen Rotorströmen ruft der Ausgleichstrom der Regler in den Sekundärspulen der Stromwandler einen entsprechenden Differenzstrom hervor, der in den Kreis der Spannungsspulen der automatischen Spannungsregler abgedrängt wird und dadurch die gegenläufige Verstellung der Drehtransformatoren bis zum Verschwinden des Ausgleichstromes bewirkt.

Transformatoren.

Auch in diesem Gebiete des Elektromaschinenbaues prägt sich die Tendenz zu immer grösseren Einheiten unverändert aus, indem Transformatoren für 30 000 kVA und mehr keine Seltenheit bedeuten. Parallel dazu geht der Spannungsanstieg; der 220-kV-Transformator wird heute betriebssicher gebaut und hält Prüfspannungen über 500 kV. Für die Durchführungen solch hoher Spannungen stehen ölgefüllte Klemmen und Kondensatorklemmen zur Verfügung.

Der natürlich gekühlte Transformator erfreut sich steigender Beliebtheit; mit passender Ausbildung der Radiatoren sind Leistungen bis zu 40 000 kVA bei 60 p/s beherrscht worden. Neuerdings wird auch die Kombination von natürlicher und künstlicher Kühlung angewendet, indem die Abkühlung der Radiatoren durch Ventilatoren verstärkt wird; die vollständige Unabhängigkeit von Hilfsmotoren wird damit allerdings verlassen. Immerhin kann bei Versagen von Ventilator und Pumpenmotor die zulässige Belastbarkeit des Transformators bis zu 50 % angesetzt werden.

Als charakteristische Neuerungen sind erwähnenswert die *Mehrwicklungstransformatoren* und die unter Last arbeitenden *Stufenschalter*, beides Merkmale des modernen Transformators. Zu den grössten in unserm Lande gebauten Einheiten gehören die vier Transformatoren, welche im Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt zur Aufstellung gelangen. Es sind Vierwicklungstransformatoren; die an

die Generatoren angeschlossene Erregerwicklung, für 10 500 V, ist in Dreieck geschaltet und doppeltkonzentrisch. Die drei Oberspannungswicklungen sind für 48 kV, 116 kV und 145 kV, je mit Anzapfungen für ± 5 % und mit herausgeführtem Sternpunkt. Jede der vier Wicklungen ist für 35 000 kVA Dauerbelastung bemessen. Zur Kühlung dienen zwei getrennte Radiatorbatterien, denen Druckkühlluft von unten her aus besonderen Düsen zugeführt wird. Für 600 kW Verluste beträgt die Leistung des Ventilatormotors 20 kW; für die Abführung der Wärme, erzeugt durch die Eisenverluste und die Kupferverluste zweier Wicklungen, genügt für die Oelzirkulation der natürliche Auftrieb des warmen Oels; für die Verluste aller vier Wicklungen muss für die Oelzirkulation eine Umwälzpumpe eingeschaltet werden. Das Gewicht eines derartigen Transformators beträgt 210 t; zwei Einheiten wurden von der MFO, zwei Einheiten von BBC ausgeführt; die letzteren zeigen als interessante Erweiterung einen Zusatztransformator mit unter Last schaltbarem Stufenschalter. Fig. 20 zeigt die Gesamtansicht dieses Zusatztransformators mit Anzapfschalter.

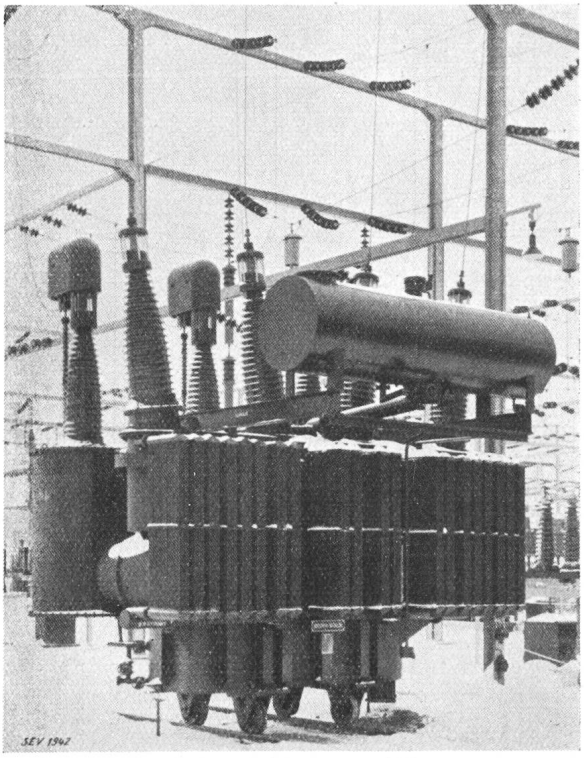

Fig. 20.
Zusatztransformator mit Anzapfschalter für das Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt. Durchgehende Leistung 32500 kVA, Spannung 145000 ± (8 · 2900) V. (BBC).

Wie stark sich diese Neuerung schon eingebürgert hat, illustriert die Mitteilung der General Electric Co., nach der ein Viertel aller ihrer Leistungstransformatoren mit Anzapfschaltern für Regulierung unter Last gebaut werden. Durch diese Reguliertransformatoren ist dem Drehtransformator ein erfolgreicher Konkurrent erwachsen, der namentlich für hohe Spannungen die billigere Lösung darstellt und der für das Zusammenschalten und -arbeiten verschiedener Netze ein unentbehrliches Hilfsmittel geworden ist.

Eine weitere interessante Neuerung im Transformatorenbau, die allerdings bis jetzt nur in Amerika zur Anwendung gelangt ist, bedeutet der schwingungsfreie Transformator *(nonresonating transformer)*, bei welchem die durch Resonanz hervorgerufenen hohen Ueberspannungen unterdrückt werden sollen. Die Resonanz bezieht sich auf den von Wanderwellen herstammenden kapazitiven Ladestrom, für den die Kapazität der Wicklung gegen Erde und ihre Induktivität leicht die erwähnte, zwischen den Windungen sehr hohe Spannungsdifferenzen erzeugende Erscheinung zur Folge hat. Der Ladestrom selbst steht im Zusammenhang mit der Steilheit der Wellen und mit deren Frequenz. Beim schwingungsfreien Transformator wird nun der durch die Kapazität gegen Erde bedingte Strom der Wicklung von aussen zugeführt. Dies erfolgt z. B. dadurch, dass neben den Spulen Metallschilder angebracht sind, die auf geeignetes Potential gebracht werden, d. h. die Spulen sind derart zwischen Metallbelegen und Erde gelagert, dass ihre Spannung im elektrischen Felde sich mit der induzierten Spannung deckt.

Als grösster Transformator kann zur Zeit wohl die im Januar d. J. bei den SSW durch die Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke in Auftrag gegebene Einheit für Drehstrom 100 000 kVA gelten. Die Spannungen sind 220/110/63,5 kV; die Kühlung erfolgt durch eine Pressluft-Umlaufkühlanlage mit vier Kühlerblöcken. Zur Anlage gehört ein Regeltransformator mit aufgebautem Lastschalter für 110 kV ± 10 %.

Wohl bei allen Konstrukteuren hat sich für hohe Spannungen die Bauart durchgesetzt, bei welcher die Distanz zwischen Wicklung und Joch durch Einlegen sogenannter Wicklungskragen wesentlich verkürzt wird. Die in den letzten zehn Jahren von fast allen Firmen übernommene Konstruktionsregel, die Wicklung durch kräftige Federn stets unter Druck zu halten, um damit Lockerwerden im Betrieb und Schwingungen bei Kurzschluss zu verhindern, ist durch eine Neukonstruktion der SSW durchbrochen worden, die an Stelle derartiger Pressvorrichtungen die *bakelisierte Wicklung* mit alleiniger Pressung durch das Joch benützt.

Die Bauhöhe grosser Transformatoren kann durch die Verwendung von fünf Schenkeln reduziert werden, von denen die drei inneren die übliche Bewicklung zeigen, die äusseren zwei frei sind; die Eisenquerschnitte des Joches und der Aussenschenkel betragen ca. 65 % der inneren Kerne. Die geringere Höhe gestattet in Grenzfällen noch den Transport ohne Aufteilung des Transformators.

Die Spannungen der *Prüftransformatoren* sind in den letzten Jahren wesentlich erhöht worden; Aggregate für 1—2 Millionen V sind schon in mehreren Ausführungen anzutreffen. Fig. 21 zeigt

einen derartigen Prüftransformator der AEG für 1000 kVA, 8400/1 000 000 V; die Totalverluste betragen 60 kW, die Kurzschlußspannung 7 %. Ueber die Dimensionen orientiert der auf dem Bilde sichtbare Maßstab. Die Büschelentladungen an der am Ende der Durchführung befindlichen Aluminiumkugel von 1 m Durchmesser konnten durch Aufsetzen von zwei kreuzweise auf der Kugeloberfläche augenieteten, messerscharfen, hochkant gestellten Blechstreifen von 10 mm Höhe bis zur Nennspannung fast vollständig unterdrückt werden. Die grosse Kapazität der Wicklungen wird durch Parallelschaltung einer Drosselspule zur Niedervoltwicklung kompensiert, wodurch reine Sinusform der Spannungskurve erzwungen wird. Erwähnt sei des weiteren ein von der Koch & Sterzel A.-G., Dresden, gebautes Prüftransformatoraggregat mit fünffacher Kaskade für $2 \cdot 10^6$ V und 1200 kVA, sodann der von der Firma Häfely, Basel, für das National Physical Laboratory in Teddington gelieferte dreifache Kaskadensatz mit Trockentransformatoren für $1{,}1 \cdot 10^6$ V, 500 kVA (Fig. 22).

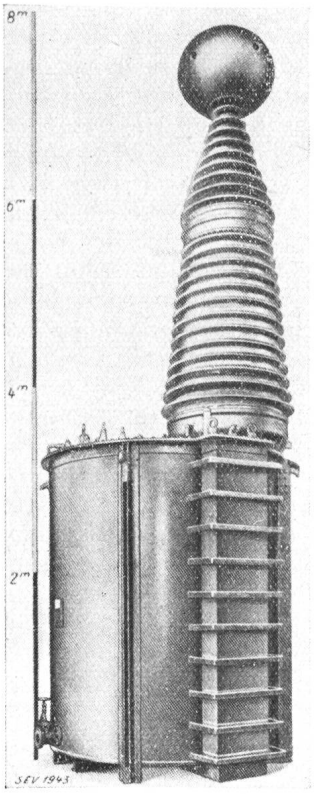

Fig. 21.
Prüftransformator für 1000 kVA, 1 000 000 V. (AEG.)

Eine weitere interessante Neuerung auf dem Gebiete des Transformatorbaues bildet der von der Firma BBC für hohe Spannungen entwickelte Isoliermantel - Spannungstransformator (Fig. 23). Die teuren Durchführungen sind vermieden, indem das zylindrische Oelgefäss selbst aus Isoliermaterial besteht, dessen eiserne Abschlusskappen 3 und 4 oben und unten die beiden Klemmen der einseitig geerdeten Primärwicklung 1 bilden. Diese erstreckt sich fast über die ganze Länge des Isoliermantels und ist mit der anschliessenden Sekundärwicklung nur auf einer der beiden Säulen untergebracht. Der Eisenkern ist auf halbes Potential der Primärwicklung gebracht; das Potential längs des Isoliermantels ist gesteuert, indem über den ganzen aktiven Teil isolierende Drahtringe 5 angebracht sind, die korrespondierend mit der Primärwicklung verbunden sind (Fig. 23). Die höchsten Spannungen werden bei den sogenannten *Stossprüfanlagen* erreicht; nach der in Fig. 24 ersichtlichen Schaltung kann die Spannung des Entladefunkens fast beliebig hoch getrieben werden, da beim Ueberschlage der Funkenstrecken «Z» schlagartig eine Serieschaltung der an den Kondensatoren liegenden Teilspannungen «e» auftritt. Zur Zeit sind derartige Ausführungen bis zu 5000 kV bekannt.

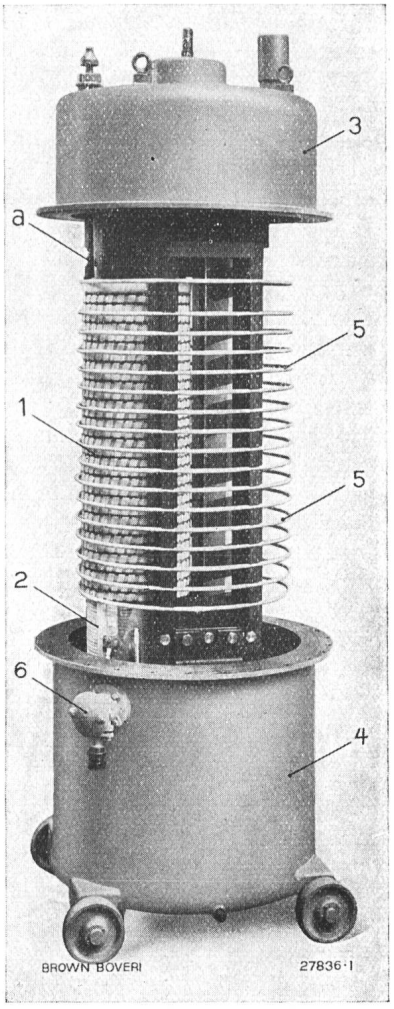

Fig. 23.
Isoliermantel-Spannungswandler für hohe Spannungen. Isoliermantel abgehoben. (B B C).

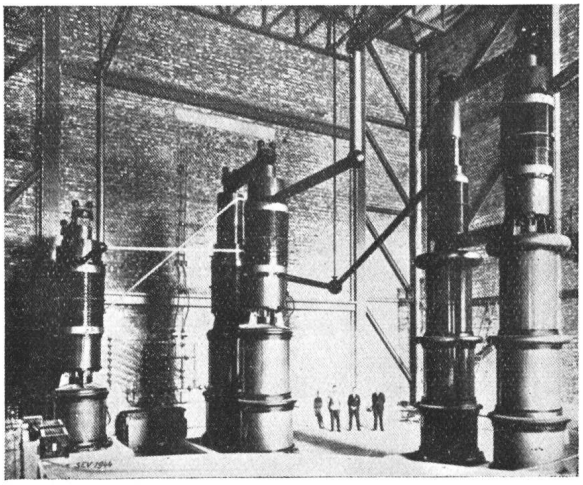

Fig. 22.
Prüftransformatorenanlage für 500 kVA, 1 100 000 V. (Häfely, Basel.)

Gleichrichter.

Diese haben sich in den letzten Jahren definitiv in der Technik eingeführt. Für ihre Betriebstüchtigkeit spricht ihre steigende Verwendung in automatischen Anlagen. Die Berliner Stadt- und Ringbahnen haben nun seit zwei Jahren einwandfreien Betrieb allein mit Hilfe grosser Quecksilberdampfgleichrichter von 800 V und 2000 A durchgeführt. Auch die Resultate der Gleichrichteranlagen für die Untergrundbahnen in Paris befriedigen vollauf,

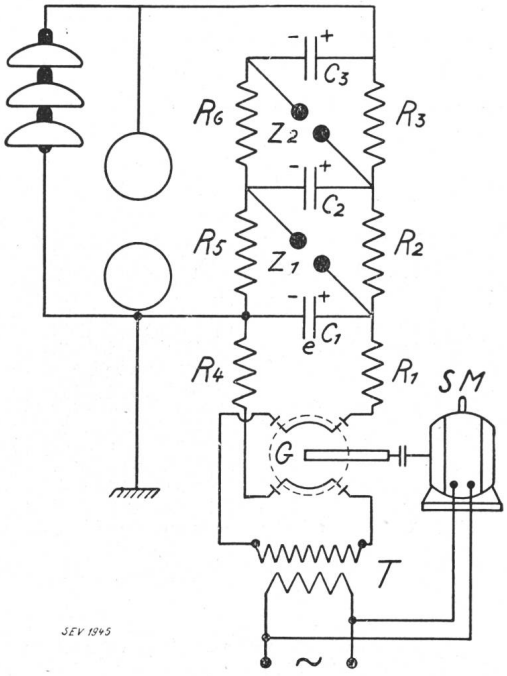

Fig. 24.
Stossprüfanlage für sehr hohe Spannungen.

so dass auch dort die Lieferung des Gleichstromes fast nur noch durch Gleichrichter erfolgt, indem in fünf weiteren Unterstationen 11 Gleichrichter mit einer Leistungsfähigkeit von zusammen 21 500 kW zur Aufstellung gelangt sind. Fig. 25 zeigt die Entwicklung der Gesamtleistung der Grossgleichrichter in den Jahren 1911 bis 1930.

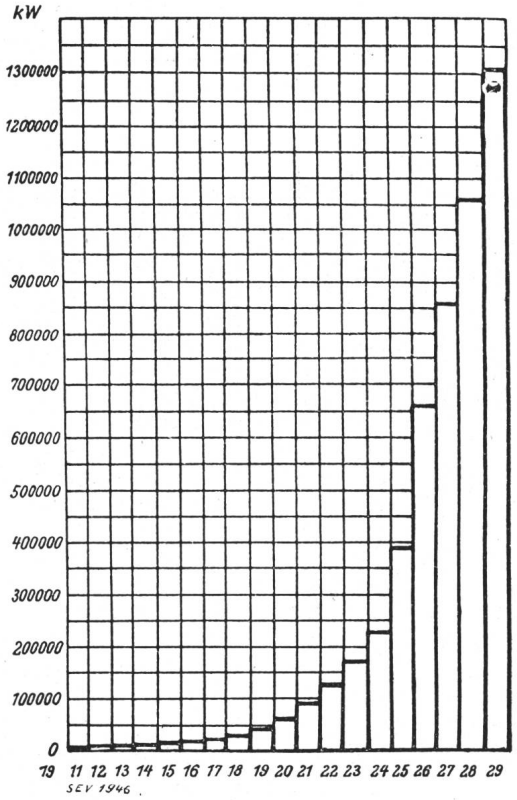

Fig. 25.
Entwicklung des Gesamtumsatzes von Grossgleichrichtern in den Jahren 1911 bis 1930.

Die schon im Bericht über das Jahr 1929 angegebene maximale Stromstärke einer Gleichrichtereinheit von 16 000 A ist bis jetzt noch nicht überschritten worden; es dürfte dafür auch kein grosses Bedürfnis bestehen. Dagegen wurde die Spannungsgrenze gegenüber früher wesentlich erhöht; es liegen Angaben über Gleichrichter vor, die probeweise mit 30 000 V belastet wurden. Für Radiostationen kommen Gleichrichtereinheiten für einige hundert kW und 10 000 bis 15 000 V in Betracht, die die teure Lösung mit Hochspannungsgeneratoren oder Röhrenumformeranlagen leicht verdrängen können.

Am schwierigen Problem der *Rückzündung* wird stets mit gutem Erfolge weitergearbeitet; als geeignetes Mittel zur Löschung der bei Rückzündung entstehenden Wechselstromlichtbogen haben sich Gitter vor der Anode erwiesen. Wird das Gitter negativ aufgeladen, so ist ein intermittierender Lichtbogen zwischen Anode und Kathode gesperrt, während der Gleichstromlichtbogen infolge des zu geringen elektrischen Feldes auf dem Gitter nicht zum Verlöschen gebracht wird. Die Wirksamkeit dieser Methode hängt mit möglichst kurzer Ansprechzeit des Relais zusammen, das die Gitter an die negative Spannung legt, beeinflusst durch den Kurzschlußstrom. Für einen derartigen Gleichrichter mit Ohmscher Belastung zeigt Fig. 26 das prinzipielle Schema, entwickelt durch BBC. Nach Angaben der nämlichen Firma besteht ein gutes Mittel zur Verhinderung der Rückzündung darin, dass vor die Anoden ein metallisches Gitter eingebaut wird. Es besteht aus konzentrischen, ineinandergeschobenen Zylindern, die durch Querrippen untereinander und mit der Anodenhülse verbunden sind, also deren Potential besitzen. Durch Anwendung solcher Gitter soll es möglich geworden sein, die Leistungsfähigkeit der Anoden bis zu 60 % zu erhöhen.

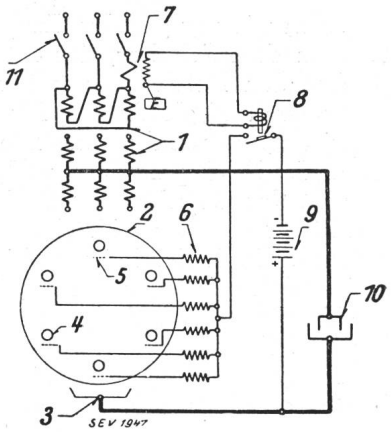

Fig. 26.
Schaltung zum Löschen von Rückzündungen mit gesteuerten Gittern.
1 Gleichrichtertransformator.
2 Gleichrichter.
3 Kathode.
4 Anoden.
5 Anodengitter.
6 Gittervorschaltwiderstände.
7 Stromwandler.
8 Rückzündungsrelais.
9 Gitterspannung (Batterie).
10 Belastungswiderstand.
11 Oelschalter des Transformators.

Ueber Versuche betreffend die *Umkehrbarkeit des Gleichrichters* orientieren einige Angaben im Januarheft der BBC-Mitteilungen 1931.

Parallel zum Eisengleichrichter hat sich in den letzten Jahren der Glasgleichrichter ebenfalls sehr stark entwickelt, liefert doch die Glasindustrie

heute für die Kolben glastechnische Kunstwerke. Mit Luft gekühlte Glaskolben nehmen bereits bis zu 500 A pro Einheit auf, bei interner Wasserkühlung noch mehr; durch zwei- und dreifache Knickung der Anodenarme lassen sich bis 3000 V betriebssicher beherrschen. Auf den Armen werden, da beim noch nicht erwärmten Apparat das Ansprechen der Anoden erschwert ist, meist sogenannte Zündbeläge aus Stanniol angebracht. Die Betriebsdauer solcher, auf sehr hohes Vakuum ausgepumpter Glaskolben ist sehr gross; es liegen bereits Ausführungen vor, die nach 50 000 Brennstunden immer noch einwandsfrei arbeiteten. Für Strassen- und kleinere Ueberlandbahnen dürfte der Glasgleichrichter wohl die richtige Lösung darstellen.

Nach wie vor gilt das Hauptinteresse im Apparatebau dem Schalter, der entsprechend den stets wachsenden Netzleistungen für grössere Abschaltleistungen und gleichzeitig für höhere Spannungen entwickelt werden muss. Die meist verwendete Form des Hochspannungs- und Hochleistungsschalters ist der Oelschalter, bei dem die Ausführung mit Löschkammer und Vielfachunterbrechung rivalisieren. Dank der bei verschiedenen Grossfirmen aufgestellten Anlagen für Schalterprüfung können die Vorgänge beim Unterbrechen eines Lichtbogens bis zu Schaltleistungen zu $1 \cdot 10^6$ kVA eingehend untersucht werden; mit gewisser Reserve darf man heute von einer Beherrschung des Schaltproblems sprechen. Als Schwäche des Oelschalters ist das Vorhandensein von Oel anzusprechen; da durch den Lichtbogen stets die Möglichkeit der Verdampfung von Oel vorliegt, ist auch stets die Gefahr einer Schalterexplosion vorhanden, gegen welche bis jetzt noch kein absolut wirkendes Mittel bekannt ist. Es ist daher leicht verständlich, dass trotz der Erfolge des Oelschalters allerorts grosse Anstrengungen gemacht werden, sich vom explosiven Oel frei zu machen; von mehreren Firmen sind in den letzten Jahren ölfreie Schalter auf den Markt gebracht worden, die im folgenden kurz beschrieben werden sollen.

Eine neue Wege beschreitende Lösung bildet der *Deïonschalter*, entwickelt nach Versuchen von Dr. Slepian durch die Westinghouse Electric & Mfg. Co. in Pittsburg [9]). Beim Durchgang eines Lichtbogens durch den Nullwert bildet sich an der Kathode eine dünne, ionenfreie Schicht, die nach den Untersuchungen von Slepian ca. 250 V Maximalwert bis zum Durchbruch auszuhalten vermag. Der lange, zwischen Anfang und Ende wohl immer viel höhere Spannung besitzende Lichtbogen wird nun in genügend viele Einzellichtbogen aufgeteilt, derart, dass auf den einzelnen Teilbogen eine Spannung von ca. 130 V effektiv fällt. Die Ionisationskammer wird gebildet durch 1,6 mm dicke Kupferplatten im Abstand 1,6 mm. Die Gleichmässigkeit der Aufteilung wird durch elektrostatisch wirkende Schirme erreicht; es sind dies Mikanitzylinder mit Stannioleinlagen. Der Lichtbogen entwickelt grosse Wärme; die Beschädigung der Kupferplatten wird vermieden, auf alle Fälle stark gemildert, durch folgende Vorkehrung: In die einzelnen Platten oder in die Kammer werden Spulen eingebaut,

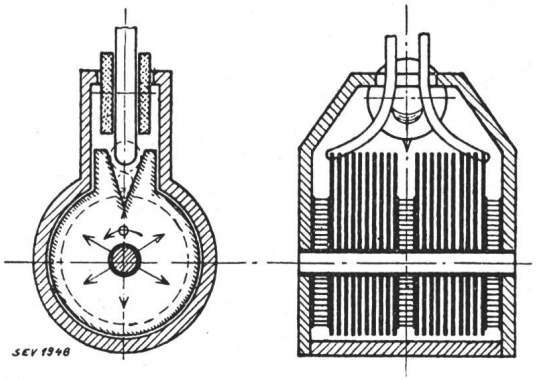

Fig. 27.
Schema des Deïon-Schalters.

welche gegeneinander gerichtete, radial verlaufende magnetische Felder erzeugen, durch die der Lichtbogen in sehr rasche Rotation zwischen den Kupferplatten gerät, wodurch die Zeit zur örtlich schädlichen Erwärmung zu kurz wird. Ueber den Aufbau eines derartigen Schalters orientiert Fig. 27. Der beim Oeffnen der Kontakte entstehende Lichtbogen wird durch die Wirkung eines den ganzen Plattensatz umfassenden Einblasmagneten schnell nach oben in die Entionisationskammer gedrängt. Dort geht er auf die Platten über und beginnt rasch zu rotieren; fast ausnahmslos erlöscht er beim ersten Nulldurchgang. Die Zeit zwischen Oeffnen und Verlöschen bestimmt sich in erster Linie durch die Zeit der Abdrängung in die Ionisationskammer; sie beträgt nach Versuchen höchstens 1 bis 2 Halbwellen.

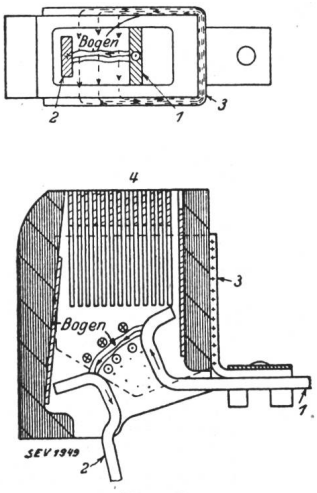

Fig. 28.
Deïon-Motorschalter.
1 fester Kontakt.
2 beweglicher Kontakt.
3 Eisenjoch.
4 Platten.

Für Niederspannung bis ca. 600 V ist nach diesem Prinzip speziell für Motoren ein vereinfachter Schalter mit selbsttätiger Lichtbogenlöschung entwickelt worden (Fig. 28). Hier wird der Bogen nicht durch ein besonderes Einblasmagnetfeld beschleunigt; ebenso fällt die Rotation des Lichtbogens, weil nicht notwendig, weg. Die Platten sind daher rechteckig. Die Durchflutung des Lichtbogens selbst erzeugt ein in dem U-förmigen Eisenring verlaufendes Feld, durch welches der Bogen mit mässiger Geschwindigkeit zwischen die Platten

[9]) Vergl. Bull. SEV 1929, Nr. 18, S. 630.

hinaufgetrieben wird, wo er beim ersten Nulldurchgang verlöscht.

Für sehr hohe Spannungen ist der oben skizzierte Deïonschalter durch Slepian zum Deïonölschalter umgeändert worden; seine offizielle Bezeichnung lautet *Deïongitterschalter* (Fig. 29). Das Gitter ist eine enge Kammer, in die oben der feste Schalterpol hineinragt; der bewegliche Pol verschiebt sich in der Kammer nach der erweiterten Oeffnung zu. Ein Magnetfeld zwingt den Lichtbogen in diese enge Kammer hinein; da deren Oelinhalt nicht entweichen kann, verdampft das Oel sehr rasch. Der noch nicht entionisierte Oeldampf muss entweichen, und zwar wird er dabei durch den Lichtbogen hindurchgetrieben, dessen Bewegungsrichtung entgegen. Der Weg des Bogens wird dadurch sehr energisch entionisiert und verlöscht nach wenig Perioden. Trotzdem hier die Verdampfung des Oels bewusst eingeleitet wird, soll doch die total verdampfte Oelmenge viel kleiner als bei normalen Schaltern sein. Ausführliche Betriebsangaben fehlen allerdings zur Zeit noch.

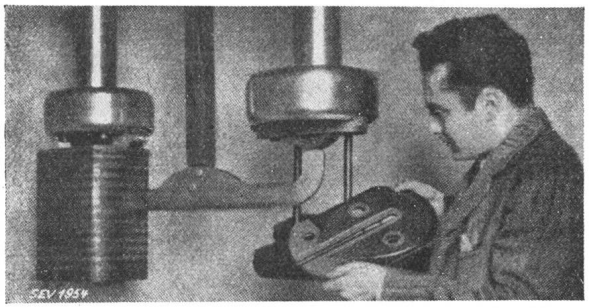

Fig. 29.
Deïon-Hochspannungs-Oelschalter.
Kontakte für 110 kV.

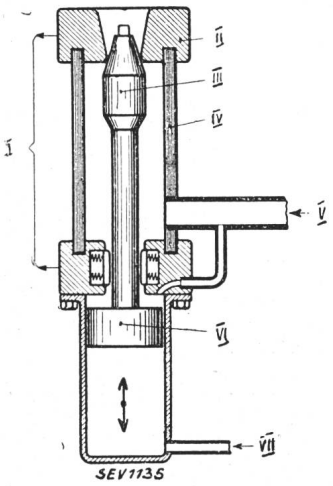

Fig. 30.
Pressluftschalter.
I Elektrischer Anschluss.
II Fester Kontakt.
III Beweglicher Kontakt.
IV Isolationsmaterial.
V Pressluftzufuhr zur Ausschaltung.
VI Kontaktantrieb.
VII Pressluftzufuhr zur Einschaltung.

Eine weitere Lösung des ölfreien Schalters bildet der von der AEG in den Handel gebrachte *Pressluftschalter*[9]), von dem Fig. 30 eine schematische Darstellung gibt, während Fig. 31 einen dreipoligen Schalter zeigt. Nach Vorschlägen von Prof. Ruppel wird der Lichtbogen durch Druckluft mit ca. 5 at weggeblasen; der Druck und die konstruktive Ausbildung der Blaskammer ist so gewählt, dass die Luftgeschwindigkeit diejenige der Ionen, die aus dem glühenden Metall austreten, um ein Mehrfaches überschreitet. Damit ist es möglich, auf mechanischem Wege die Fortbewegungsrichtung der Ionen zu bestimmen; die dazu notwendige Luftgeschwindigkeit beträgt bis zu 500 m/s, die sowohl kalt und beim Nulldurchgang des Lichtbogens erreicht werden. Nach Angabe der Herstellerin sollen sich auf diese Weise Abschaltleistungen bis zu 500 000 kVA betriebssicher beherrschen lassen; bekannt gegeben werden Ausführungen für Spannungen bis 100 kV. Das starke, knallartige Geräusch beim Unterbrechen des Bogens lässt sich mildern, wenn man die Pressluft in einen Kamin ausstösst.

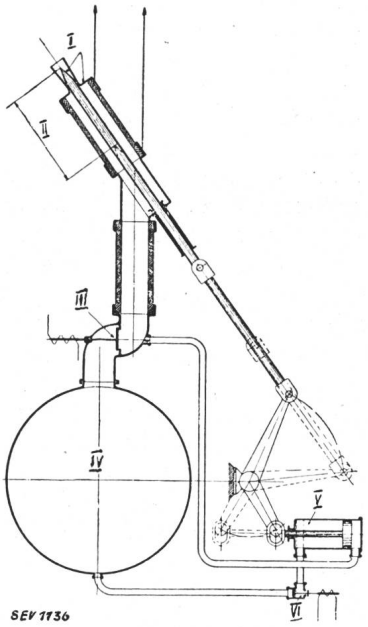

Fig. 31.
Schematische Darstellung des Pressluftschalters für 15 kV Betriebsspannung.
I Kontakt.
II Schalthub.
III Ausschaltventil.
IV Luftkessel.
V Schaltzylinder.
VI Einschaltventil.

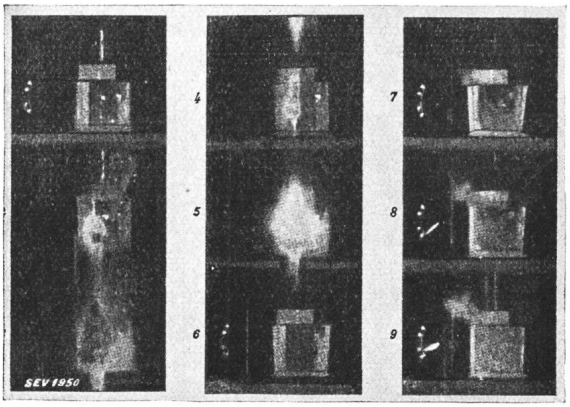

Fig. 32.
Zeitlupenaufnahme einer Lichtbogenlöschung bei Bersten der Expansionskammer aus Glas.

Die SSW bringen als ölfreie Lösung des Schalterproblems den sogenannten *Expansionsschalter* auf den Markt. Er fusst auf der Interpretation des Gesetzes vom Lichtbogen, das aussagt, dass ein

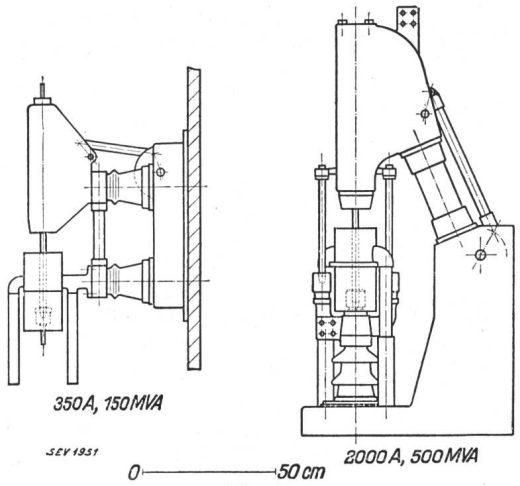

Fig. 33.
Expansionsschalter 10 kV, 350 A und 2000 A.

Bogen nur dann erloschen bleibt, wenn das Temperaturgefälle grösser ist als der Anstieg der wiederkehrenden Spannung. Praktisch ausgewertet bedeutet dies, dass das Medium, in welchem der Lichtbogen brennt, zur Zeit des Nulldurchganges desselben genügend stark abgekühlt werden muss, was am besten durch adiabatische Expansion erreicht wird. Diese Ueberlegung wird durch den in Fig. 32 sichtbaren Schaltvorgang erhärtet; hier ist das Glasgefäss der Explosionskammer infolge der glühenden Gase geborsten, der dadurch entstandene Druckabfall und die daraus resultierende Abkühlung der Gase bringen sofort den Lichtbogen zum Verlöschen. Die schematische Darstellung dieses neuen Schalters zeigt Fig. 33; er wird zur Zeit nur für mittlere Spannungen gebaut.

Neue graphische Methode für die Berechnung des Skineffekts im Nutenkupfer.

Von *P. Waldvogel*, dipl. Ing., Zürich.

537.311.62: 621.313.045.

Der Autor beschreibt eine neue praktische Methode für die Berechnungen des Skineffektes im Nutenkupfer, die sich durch Einfachheit auszeichnet, und vergleicht sie mit der analytischen Methode. In einem Zahlenbeispiel wird die praktische Anwendung dieser graphischen Methode gezeigt.

L'auteur décrit une nouvelle méthode graphique très simple de calcul de l'effet pelliculaire dans le cuivre des encoches et la compare à la méthode analytique. L'exposé se termine par un exemple numérique qui montre l'application pratique de cette méthode graphique.

I. Aufstellung der Grundgleichungen.

Fliesst ein Wechselstrom durch einen Kupferdraht, so verteilt er sich nicht gleichförmig über den Querschnitt. Die Stromdichte j ist also nicht nur Funktion der Zeit, sondern auch des Orts.

Wir betrachten den Fall, wo rechteckige Kupferstäbe sich in einer offenen Nute befinden. Die verschiedenen Schichten sind von unten nach oben mit den Indices 1, 2, 3 ... p ... m gekennzeichnet. Die Anzahl Stäbe pro Schicht spielt weiter keine Rolle; b bezeichnet die gesamte Kupferbreite [Fig. 1].

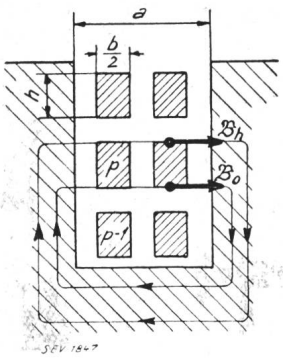

Fig. 1.

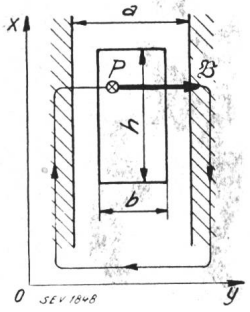

Fig. 2.

Wir wollen die Ueberlegungen für den p^{ten} Stab machen. Wir legen ein Achsensystem [Fig. 2], so dass oz parallel zum Stab wird. Dann werden offenbar die 3 Komponenten des Vektors j im Punkte P

$$j_x = o \qquad j_y = o \qquad j_z = j \qquad (1)$$

Ausserdem hängt j als Ortsfunktion betrachtet bloss von x ab.

Das erzeugte magnetische Feld $\mathfrak{H}$ im Punkte P ist sicher parallel zu oy, so dass die 3 Komponenten der Induktion $\mathfrak{B}$ im Punkte P

$$\mathfrak{B}_x = o \qquad \mathfrak{B}_y = \mathfrak{B} \qquad \mathfrak{B}_z = o \qquad (2)$$

sind. $\mathfrak{B}$ ist auch eine Funktion der Zeit t und des Ortes x.

Die 2 Grundgesetze des Magetismus und der Elektrodynamik lauten:

$$\mathfrak{B} = \gamma_o \mu \mathfrak{H} \qquad \text{und} \qquad \mathfrak{E} = j \varrho' \qquad (3)\ (4)$$

Wir wählen folgende Einheiten:

$\mathfrak{B}$ in Gauss, $\mathfrak{H}$ in A/cm, $\mathfrak{E}$ in V/cm, j in A/cm².

Dann hat man $\gamma_0 = 0{,}4 \cdot \pi$ zu setzen.

μ = magnetische Permeabilität des Kupfers = 1.
ϱ' = spezifischer Widerstand des Kupfers in Ω/cm $= \varrho \cdot 10^{-4}$ wenn
ϱ = spezifischer Widerstand des Kupfers in Ωmm²/m, wie es üblich ist.

Dann werden die 2 Gesetze des magnetischen Kreises und der Induktion für ruhende Leiter benützt:

$$\text{rot}\, \mathfrak{H} = j \qquad \text{rot}\, \mathfrak{E} \parallel -10^{-8} \cdot \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t} \qquad (5)\ (6)$$

Wir schreiben diese beiden Gleichungen für die Achsen oz und oy:

$$\frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial x} = j \qquad -\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial x} = -10^{-8} \cdot \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t} \qquad (7)\ (8)$$