

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 25 (1934)
Heft: 22

Artikel: Die neuesten Fortschritte im Transformatorenbau
Autor: Goldstein, I.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056584>

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: 20.02.2026

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 Suisse d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:

S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

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

XXVe Année

Nº 22

Vendredi, 26 Octobre 1934

Bericht über die Diskussionsversammlung des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)

abgehalten am Samstag, dem 7. April 1934, in Olten.

(Fortsetzung von Seite 556 und Schluss.)

Die neuesten Fortschritte im Transformatorenbau.

Referat von I. Goldstein, Zürich.

621.314.21

Es wird ein Ueberblick über die Fortschritte im Transformatorenbau während der letzten Jahre gegeben. Die im Kernbau gewonnenen Erkenntnisse werden unter dem Gesichtspunkt der Reduktion des Gewichtes und der Herabsetzung der zusätzlichen Eisenverluste behandelt. Anschliessend werden die Neuauflösungen im Wicklungsaufbau unter besonderer Berücksichtigung der Kurzschlussfestigkeit besprochen. Ausführlich wird das Sprungwellenproblem des Transformators behandelt. Im Zusammenhang damit werden die Auffassung über die Sprungwellenprobe und über die in Amerika entwickelte Stossprobe einer Kritik unterzogen.

Nach einer Zusammenfassung der Erkenntnisse und Fortschritte auf dem Gebiete der Kühlung der Transformatoren wird zum Schluss über die Spannungsregulierung unter Last berichtet, wobei einige Ausführungsarten der Reguliertransformatoren der AEG besprochen werden.

L'auteur donne un aperçu des progrès réalisés au cours des dernières années dans la construction des transformateurs. Les expériences faites dans la construction des noyaux ont conduit à une réduction du poids et des pertes supplémentaires dans le fer. Une description des perfectionnements apportés aux enroulements illustre le problème de la résistance aux courts-circuits. Suit une étude détaillée du problème des ondes à front raide et un examen critique des opinions relatives aux essais par onde à front raide et de la méthode d'essai dit de choc développée en Amérique. Après avoir donné un résumé des progrès réalisés dans le domaine du refroidissement des transformateurs, l'auteur traite le réglage de la tension en charge et décrit quelques transformateurs de réglage exécutés par l'AEG.

Im Transformatorenbau hat sich in den letzten Jahren manches geändert. Zwei Beweggründe waren für die Entwicklung entscheidend: Herabsetzung der Herstellungskosten einerseits, Erhöhung der Betriebssicherheit andererseits. Im ersten Moment scheinen sich diese beiden Ziele zu widersprechen. Durch die Einschaltung eines wichtigen Faktors, den ich als «technisches Können» bezeichnen möchte, lassen sich beide Ziele gleichzeitig verfolgen. Es musste gehen. Die Herabsetzung der Herstellungskosten war eine wirtschaftliche Notwendigkeit, die durch die Weltkrise immer in den Mittelpunkt aller Bestrebungen gestellt werden musste. Die Erhöhung der Betriebssicherheit, die immer wachsenden technischen Anforderungen an die Transformatoren, die in der Verschärfung der Prüfungsvorschriften ihren Niederschlag gefunden haben, haben die Bestrebungen zur Herabsetzung der Herstellungskosten stark beeinflusst. Es war das «technische Können», das schliesslich den richtigen Mittelweg ausfindig machte. In dieser bewegten Zeit sind neue Er-

kenntnisse gewonnen und ein technischer Fortschritt erzielt worden, über den ich hier berichten will.

1. Kernbau.

Am allerklarsten hat im Kernbau die Aufgabe der Verminderung des Gewichtes im Vordergrund gestanden. Die Erhöhung der Sättigung auf einen Bereich von 14 000 bis 15 000 Linien war nicht zu umgehen. Mit dieser Massnahme kann man unter der Voraussetzung, dass ein Kernmaterial günstiger Verlustziffern zur Verfügung steht, viel erreichen. Man vergrössert durch die Erhöhung der Sättigung die Spannung pro Windung und steckt auf diese Weise bei gleichem Kupferquerschnitt den Gewinn durch die Reduktion der Wickellänge, ohne sonst etwas dafür gemacht zu haben, mit ein. Mit der Erhöhung der Sättigung beginnen aber auch die Sorgen, indem nämlich im Kern zusätzliche Eisenverluste entstehen, die mit zunehmender Sättigung stark in Erscheinung treten. Hier musste die Forschung einsetzen. Eine richtige Bemessung und Unterteilung der Teilquerschnitte der

Schenkel und Jochen ist die Voraussetzung für eine gleichmässige Liniendichte im Kern, denn nur die gleichmässige Verteilung der Induktion sichert ein Minimum der Verluste. Die Ueberschreitung in einzelnen Teilen, auch wenn sie von Unterschreitungen in andern begleitet wird, endet mit einem Mehrverlust. Dieses Verhalten verschlimmert sich dadurch, dass die Verluste bei höheren Sättigungen mehr als quadratisch mit der Induktion zunehmen. Insbesondere muss beim Entwurf des Joches darauf geachtet werden, dass möglichst gute Anpassung an die Querschnittsunterteilung des Schenkels beibehalten wird. Jedem magnetischen Pfad, dessen Fluss gewissermassen vom Schenkel vorgeschrieben wird (Fig. 1) (bei Kernen mit magnetischem Rückschluss ist die Betrachtung noch komplizierter), wird im Jochteil je nach Querschnittsbemessung dieses Pfades eine andere Sättigung entsprechen. Sind in zwei benachbarten Paketen die Sättigungen verschieden, so tritt ein Querfluss von einem Paket zum anderen über. Diese Querflüsse verursachen Wirbelstromverluste in den ersten Blechen und verzerrn die Flussform in den Jochen, wodurch weitere Zusatzverluste entstehen. In diesem Zusammenhang sei noch bemerkt, dass genaue Untersuchungen die Unwirtschaftlichkeit

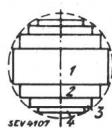


Fig. 1.
Schenkel. Joch.

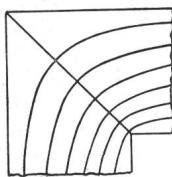
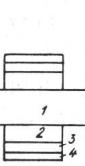


Fig. 2.
Flussverteilung.
im Joch.

der Jochverstärkung ergeben haben. Dies lässt sich aus der ungleichmässigen Flussverteilung im Joch ableiten (Fig. 2).

Bolzenlöcher ergeben Flussverdichtungen, die gleichfalls Mehrverluste bedingen. Die Anzahl der Bolzen ist daher auf ein Minimum zu beschränken. Man kann Transformatoren bis 500 kVA mit nur wenigen Bolzen bauen.

Unter den Massnahmen, die eine bessere Ausnutzung des aktiven Querschnittes bzw. eine Raumsparnis bringen, ist der Füllfaktor des verwendeten Bleches zu erwähnen. Die Schwankungen, denen der Füllfaktor rauher, unebener Bleche unterworfen ist, machen jede Vorausberechnung unsicher. Als unerwünschtes Resultat erhält man dann Ueberschreitungen der Eisenverluste, denn die Induktion wird, wenn das Gewicht infolge des schlechten Füllfaktors nicht eingehalten wird, höher als der vorausberechnete Wert. Man hat deshalb in Deutschland die Forderung der Einhaltung eines Mindestfüllfaktors für Transformatorenblech in den Entwurf für die neuen Blechnormen DIN 6400 aufgenommen.

Ein Umstand, der einer Erhöhung der Sättigung bei Transformatoren, die in Stern-Stern oder Stern-Zickzack gestaltet sind, im Wege steht, muss be-

sonders erwähnt werden. Es sind die Verluste, die durch die dritte Flussharmonische verursacht werden. Da bei Sternschaltung die Ströme gleichphasiger Harmonischen nicht fliessen können, erscheinen um so ausgeprägter die dritten Harmonischen in den Flusskurven. Dieser schädliche Fluss

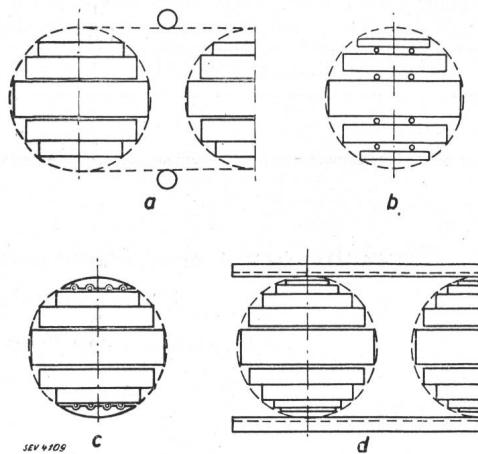


Fig. 3.
Kern- und Jochanordnungen.

schliesst sich von Joch zu Joch über die Kastenwände und verursacht Mehrverluste. Die Bekämpfung dieser Mehrverluste hat viel zu schaffen gegeben. Durch die Anordnung einer Δ -Wicklung ist die Existenz des Streuflusses, herrührend von der dritten Harmonischen, unterbunden. Bei Grosstransformatoren, die ja aus bekannten Gründen fast immer eine Δ -Wicklung haben, besteht keine Schwierigkeit. Bei mittleren und kleineren Transformatoren mit offenen Wicklungen müssen Kompensationswicklungen vorgesehen werden.

Eine zweckmässige Anordnung des inaktiven Eisens, besonders der Pressteile, hat für die wirtschaftliche Auslegung des Transformators eine

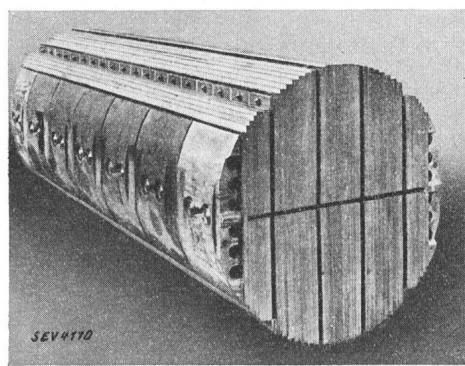


Fig. 4.
100 000-kVA-Transformator. Schenkel des Eisenkernes.

nicht zu unterschätzende Bedeutung. In Fig. 3 ist schematisch der Entwicklungsgang dargestellt. In Fig. 3a ist die Konstruktion mit aussenliegenden Pressbolzen angedeutet. Es handelt sich um Kerne mit getrenntem Joch. Bei hohen Spannungen ist das Vorhandensein der Bolzen im Raum zwischen Wicklung und Kasten unerwünscht. Man hat dann

die Pressbolzen in das Innere des aktiven Querschnittes verlegt (Fig. 3b). Eine bessere Ausnutzung des Querschnittes erhält man, wenn man die Pressbolzen durch die Schenkelpressplatten legt (Fig. 3c und Fig. 4). Und schliesslich bildet der geschichtete Kern (Fig. 3d), bei dem man bis 20 000 kVA die Längsbolzen überhaupt weglassen kann, eine noch vollkommenere Lösung. Dafür müssen die Jochpressplatten, von denen an der

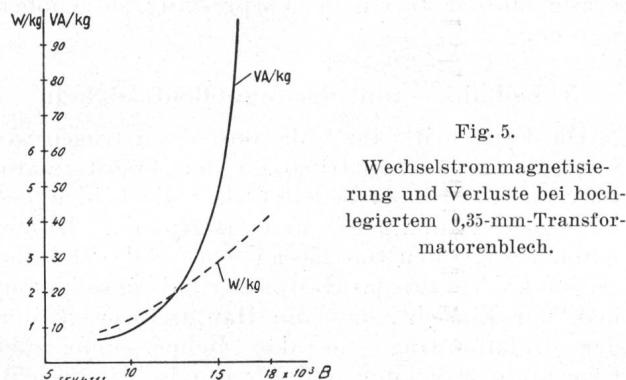


Fig. 5.
Wechselstrommagnetisierung und Verluste bei hochlegiertem 0,35-mm-Transformatorenblech.

oberen auch die Tragkonstruktion befestigt ist, um so stärker sein. Der geschichtete Kern ist magnetisch dem Kern mit stumpfem Stoss (getrenntem Joch) überlegen. Er hat geringeren Leerlaufstrom und im allgemeinen weniger Zusatzverluste. Man kann heute den grössten Transformator mit geschichtetem Kern ausführen. Bei der AEG und den SSW werden bereits Transformatoren von 100 000 kVA mit geschichteten Kernen ausgeführt. Den einen Nachteil hat der geschichtete Kern, nämlich den, dass eine Reparatur der Wicklung die Ausschichtung des oberen Joches erfordert.

Für die zukünftige Entwicklung ist die Klärung der Frage, ob und unter welchen Umständen eine Erhöhung der Sättigung über die heute üblichen

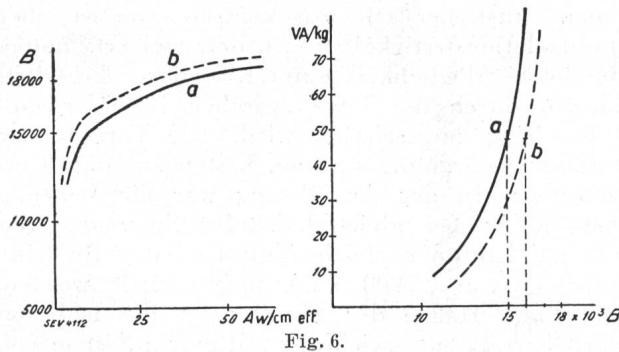


Fig. 6.
Blechsorte a Normale Magnetisierung.
» b Verbesserte Magnetisierung.

Werte von 14 000 bis 15 000 Linien hinaus zulässig ist, von grösster Bedeutung. Die Schwierigkeiten liegen nicht auf dem Gebiete der Verluste. Ein Blick auf Fig. 5 zeigt die Sachlage sehr klar. Der Anstieg der Voltamperekurve ist bedeutend steiler als derjenige der Wattkurve. Der hohe Leerlaufstrom ist jetzt die Klippe, die beseitigt werden muss. Man wird also neben geringen Verlusten eine bessere Magnetisierbarkeit verlangen müssen, ein

Wunsch, der heute schon im Bereich der Möglichkeit liegt. Die Krümmung der Magnetisierungskurve hat das eigenartige, dass eine geringe Verbesserung der Magnetisierung eine ganz bedeutende Verbesserung der Voltamperekurve zur Folge hat, was deutlich aus Fig. 6 hervorgeht: Wenn man für die VA/kg-Kurve der Blechsorte a 15 000 Linien zulässt, so würde die Kurve (b) bei 16 000 Linien in der Magnetisierung keine Verschlechterung bedeuten. Ich ziehe dabei auch die Oberwellen des Magnetisierungsstromes in Betracht; es ist ja speziell der Oberwellengehalt der Magnetisierungskurve, der bei verschiedenen Elektrizitätswerken nicht mit Unrecht zu Besorgnissen Veranlassungen gibt. Das Verhalten der Wechselstrom-Magnetisierungskurven verschiedener Blechsorten im Gebiet höherer Sättigung wird immer mehr Beachtung finden müssen.

2. Wicklungsaufbau.

Beim Wicklungsaufbau waren es hauptsächlich Bestrebungen zur Erhöhung der Sicherheit, die zu Neuausführungen führten. Die früher als Nieder-

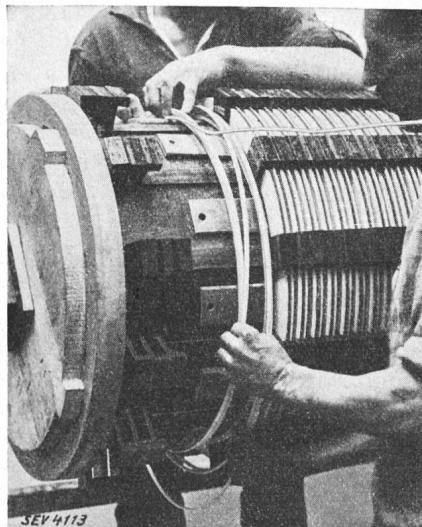


Fig. 7.
Gestürzte Wicklung auf der Wickelbank.

spannungsspulen verwendeten Zylinderspulen waren nicht genügend kurzschlussicher. Die Windungen konnten sich bei axialen dynamischen Kräften gegeneinander verschieben, und die Spulen zeigten bei Kurzschlussversuchen im Prüffeld Risse. Bei Hintereinanderschaltung solcher Spulen war die Sprungwellensicherheit nicht ausreichend, da Anfang und Ende der Wicklung räumlich aneinander zu liegen kamen. Bei Hochspannungswicklungen verwendete man Scheibenspulen bzw. Doppelspulen in Hintereinanderschaltung und bediente sich einer sehr kostspieligen Abstützung, der sogenannten druckfreien Abstützung, die aus einem Aufbau von aufeinanderliegenden, durch Rohre gehaltenen Abstützstücken bestanden hatte. Die Einführung der durchlaufenden, ohne jegliche Lötstellen ausgeführten Profildrahtwicklung schuf in jeder Be-

ziehung Abhilfe. Die neuen Wicklungsarten wurden unter dem Namen «gestürzte Wicklung» und in einer besonderen Ausführung für hohe Stromstärken unter dem Namen «Wendelwicklung» bekannt. Fig. 7 zeigt eine «gestürzte Wicklung» auf der Wickelbank. Abwechselnd muss immer eine Spule provisorisch gewickelt und dann die Reihenfolge der Windungen vertauscht werden. Nur dadurch erhält man den fortlaufenden Charakter der Wicklung. Die Vorteile dieser Wicklungsausführungen bestehen in der Möglichkeit, durch Distanzstücke, die schwäbenschwanzartig auf Leisten angeordnet sind, die Spulen so sicher abzustützen, wie es sonst nur bei einer Scheibenwicklung durchführbar ist.

Bei der «Wendelwicklung», die aus mehreren parallelen Drähten besteht, werden diese durch jeweilige Verschränkung in bezug auf das Streufeld symmetrisch gemacht, was die zusätzlichen Kupferverluste auf ein Minimum herabsetzt.

Aus wirtschaftlichen Gründen wird in den letzten Jahren die Isolation der Wicklung ohne Baumwolle ausgeführt. Man erkannte schon früher, dass nur die Papierschicht der Träger der Isolation ist, wogegen der Baumwolle höchstens die Rolle eines mechanischen Schutzes zugeschrieben werden kann. Die papierisierte Wicklung verlangt deshalb eine viel sorgfältigere Behandlung während der Fabrikation; die Feuchtigkeit muss durch Trocknung der Transformatoren vor dem Einbau in den Kasten ausgetrieben werden.

Wie die Bestrebungen zur Herabsetzung der Herstellungskosten in Konflikt mit der Erhaltung der Betriebssicherheit kommen, konnte man an den Neuerungen, die man bei Kleintransformatoren mit Runddrahtspulen vornehmen wollte, sehen. Es zeigte sich hier nämlich, dass die Isolationsfrage auch mit der Kurzschlußsicherheit eng verbunden ist. Eine Spule, aus Runddraht gewickelt, ist, ohne dass ein Bindemittel zum Festhalten der Windungen verwendet wird, nicht kurzschlusssicher. Es treten Windungsdeformationen und Spulenauflockerungen auf, die unweigerlich zu einer Zerstörung der Wicklung führen. Als Bindemittel wird eine isolierende Paste, durch die der Draht beim Aufwickeln durchläuft, verwendet. Nach der Trocknung erhält die Spule eine steinartige Festigkeit.

Die noch wichtigen aber sonst schon bekannten Auffassungen über die Kurzschlußsicherheit seien nur noch kurz erwähnt. Die Auffassung, der Manteltransformator sei infolge seines flachen und kurzen Wicklungsaufbaues bezüglich der Kurzschlußsicherheit dem Kerntransformator bei gleicher Kurzschlußspannung überlegen, trifft für Kerntransformatoren mit kreisrunden Wicklungen nach den neuesten Ausführungen nicht mehr zu. Dass jede Unstetigkeit in der Ampèrewindungsverteilung der Wicklungen axiale Schubkräfte zur Folge hat, ist bekannt. Man wird deshalb Unsymmetrien in der Verteilung der Ampèrewindungen beider Wick-

lungen auf ein Minimum zu reduzieren suchen. Anzapfungen müssen aus der Mitte abgeschaltet werden, oder es sind besondere Schaltspulen mit mehrgängigen Wicklungsabteilungen, wie dies bei Reguliertransformatoren wohl die richtige Lösung darstellt, anzusehen.

Die Kurzschlussfestigkeit hängt von der richtigen Vorpressung der Wicklungen ab. Die aus der Rechnung ermittelten maximalen Kurzschlusskräfte müssen durch die Vorpressung aufgehoben werden.

3. Isolations- und Sprungwellenfestigkeit.

Die Fortschritte im Isolationsaufbau trugen wesentlich zur Wirtschaftlichkeit der Transformatoren bei. Wenn man bedenkt, dass die beiden Isolationsmaterialien Öl und Hartpapier Durchschlagsfestigkeiten von 250 kV/cm für das Öl und ca. 300 kV/cm für das Hartpapier haben, so kommt man zur Einsicht, dass die Hauptschwierigkeiten der Isolationsfrage in der Beherrschung der Kriechbeanspruchung und der Randfelder besteht.

Fig. 8 zeigt, wie bei der AEG durch eine Einfüllung der Wicklung mit Isolationszylindern und sogenannten Winkelringen eine gänzliche Abschirmung der Wicklungen voneinander und vom Joch

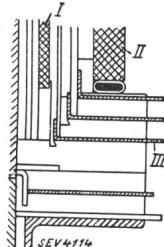


Fig. 8.
Hauptisolierung von Transformatoren.
Winkelringkonstruktion.

I Niederspannung.
II Hochspannung.
III Winkelring.

erzielt wurde. Ein weiterer Fortschritt besteht darin, dass man Zylinder und Winkelring aus einem Stück herstellt, was komplizierter ist, aber die Isolationsfestigkeit wesentlich steigert, indem die letzte Möglichkeit eines Kriechens der Gleitfunktion durch die Fuge zwischen Zylinder und Winkelring ausgeschaltet wird. Die Vorteile der Isolationsanordnung sind am besten aus Fig. 9 ersichtlich: In der Ausführung war die Leistung 9600 kVA; bei gleichbleibender Spannung von 125 kV kann der gleiche Transformator für eine Leistung von 25 000 kVA umgewickelt werden. Die linke Hälfte der Fig. 9 zeigt die Isolation der Oberspannungswicklung mit einem System von Winkelringen, die nach beiden Seiten von der doppelkonzentrischen Unterspannungswicklung abschirmen, rechts in der Fig. 9 ist zum Vergleich die ursprüngliche Ausführung dargestellt. Man sieht daraus, wie unwirtschaftlich vor zwölf Jahren noch konstruiert wurde.

Zum Fortschritt in der Isolation von Transformatoren trugen auch die aus der Kabelisoliertechnik übernommenen Methoden starker Papierbewicklung von Ableitungen, Nullpunktsverbindungen usw. bei. Schliesslich muss auch die Kaltölbe-

handlung durch Sprühverfahren im Vakuum erwähnt werden. Der bereits erwähnten Trocknung der Wicklung vor der abschliessenden Vakuumbehandlung des Transformatoren im Kessel muss

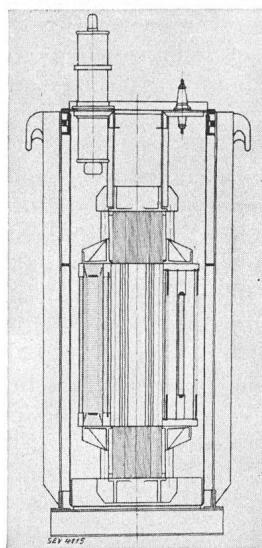


Fig. 9.

Vergleich zwischen alter und neuer Transformatorenisolation.

Rechts:

alte Isolation, Drehstr.-Transform.
9600 kVA, 6500/125 000 V, 50 Per.s.,
1922 geliefert.

Links:

Umwicklung nach neuer Isolation
für eine Leistung von 25 000 kVA,
6500/125 000 V, 50 Pers./s.

wegen der neuerdings aus verschiedenen Gründen weggefallenen Imprägnierung der Isolation besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Eine wesentliche Klärung der Sprungwellenbeanspruchung einer Transformatorenwicklung ergab sich aus den Arbeiten von K. W. Wagner und den experimentellen Untersuchungen in Amerika. Die

Wicklung ist ein schwingungsfähiges Gebilde und kann durch das Ersatzschema nach Fig. 10 dargestellt werden. Parallel zu den Wicklungsteilen liegen die gegenseitigen Kapazitäten C , und schliesslich hat jede Gruppe eine Kapazität gegen Erde C_0 . Wie verhält sich die Wicklung beim Auftreffen einer Wanderwelle? Man kommt zu einer befriedigenden Lösung des Problems, wenn man aus der Spannungsverteilung im Anfangs- und im Endzustand das Verhalten der Wicklung ableitet. Im ersten Moment reagiert die Wicklung als Kondensatorenkette auf die Wanderwelle und demzufolge ergibt sich eine aus der Theorie des Kettenleiters bekannte hyperbolische Verteilung der Spannung längs der Wicklung mit einer starken Beanspruchung der Anfangsteile. Am Schluss des Vorganges verhält sich die Wicklung als Drosselspule; die Spannungsverteilung ist linear. Fig. 11 zeigt dieses Verhalten für den im Nullpunkt geerdeten Transformator und für den mit isoliertem Nullpunkt, der ein bestimmtes Potential gegen Erde aufweist. Man kann das Verhalten der Wicklung zwischen Anfangs- und Endzustand sich nicht anders als durch eine Schwingung übergeleitet vorstellen. Man verfährt ja genau so bei quasistationären Ausgleichsvorgängen, wo der Übergang in den stationären Vorgang durch einen Schwingungsvorgang bewerkstelligt wird. In den Figuren sind die Ordinaten der schraffierten Flächen die Am-

plituden der Spannungen an jeder Stelle der Wicklung. Die gestrichelten Linien geben die andere Grenzlage der Spannungswerte in der zeitlichen Schwingung. Man hat also in jedem Punkt eine Schwingung nach einer Sinusfunktion. Diese raumzeitliche Schwingung kann durch die Zerlegung der örtlichen Amplitudenkurve (die Differenz der End- und Anfangswerte der Spannung) nach Fou-

rier in die einzelnen Harmonischen vollständig erfasst werden. Die Schwingungen wurden mit dem Kathodenstrahlenoszilloskop im Laboratorium der AEG aufgenommen und bestätigen diese Darstellung. Für das Eindringen der Welle in die Wicklung ergibt sich eine etwas andere Vorstellung, als es der Wanderwellentheorie auf Leitungen entsprechen würde. Durch die kapazitive Anfangsverteilung wird die Front der eindringenden Welle gleich auf die ganze Wicklung verteilt. Im weiteren Verlauf kommt eine Umformung der Wellenfront zustande, wobei die höchste Spannung gegen Erde ca. $\frac{1}{4}$ Wicklungslänge vom Anfang entfernt liegt. Eine Reflexion der Welle mit gleichem Vorzeichen kommt nur bei isoliertem Nullpunkt in Frage; es findet also im Transformator mit isoliertem Nullpunkt eine Verdoppelung der Spannung gegen Erde statt, was durch Überschläge an unzureichend dimensionierten Nullpunktsschaltern häufig zum Ausdruck kommt. Massgebend für die Beanspruchung der Windungsisolation ist der Spannungsgradient von Spule zu Spule. In dieser Beziehung weist wohl der Transformator mit iso-

lierter Neutralen im Nullpunkt ein günstigeres Verhalten auf als derjenige mit geerdetem Nullpunkt, indem bei diesem im Nullpunkt ein Spannungsgradient auftritt. Die Fig. 12 ist sehr aufschlussreich in bezug auf die praktische Anwendung. Kurve 2 zeigt nämlich, dass die Ausführung mit starker isolierten Eingangsspulen schlechte Spannungsverteilung aufweist. Durch die Verminderung der Windungskapazität in den besser isolierten Spulen wird die Isolationsbeanspruchung ver-

Fig. 10. Ersatzschema eines Transformatormodells. Es zeigt eine Wicklung mit Kapazitäten C und C_0 sowie einen Gleichstromkreis mit Kapazität C_g .

plituden der Spannungen an jeder Stelle der Wicklung. Die gestrichelten Linien geben die andere Grenzlage der Spannungswerte in der zeitlichen Schwingung. Man hat also in jedem Punkt eine Schwingung nach einer Sinusfunktion. Diese raumzeitliche Schwingung kann durch die Zerlegung der örtlichen Amplitudenkurve (die Differenz der End- und Anfangswerte der Spannung) nach Fou-

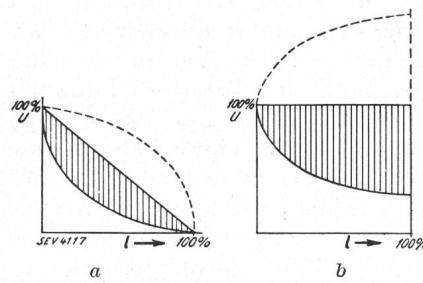


Fig. 11.
Spannungsverteilung längs einer Wicklung bei Stoßbeanspruchung.
a Nullpunkt geerdet,
b Nullpunkt isoliert,
l Wicklungslänge.

rier in die einzelnen Harmonischen vollständig erfasst werden. Die Schwingungen wurden mit dem Kathodenstrahlenoszilloskop im Laboratorium der AEG aufgenommen und bestätigen diese Darstellung. Für das Eindringen der Welle in die Wicklung ergibt sich eine etwas andere Vorstellung, als es der Wanderwellentheorie auf Leitungen entsprechen würde. Durch die kapazitive Anfangsverteilung wird die Front der eindringenden Welle gleich auf die ganze Wicklung verteilt. Im weiteren Verlauf kommt eine Umformung der Wellenfront zustande, wobei die höchste Spannung gegen Erde ca. $\frac{1}{4}$ Wicklungslänge vom Anfang entfernt liegt. Eine Reflexion der Welle mit gleichem Vorzeichen kommt nur bei isoliertem Nullpunkt in Frage; es findet also im Transformator mit isoliertem Nullpunkt eine Verdoppelung der Spannung gegen Erde statt, was durch Überschläge an unzureichend dimensionierten Nullpunktsschaltern häufig zum Ausdruck kommt. Massgebend für die Beanspruchung der Windungsisolation ist der Spannungsgradient von Spule zu Spule. In dieser Beziehung weist wohl der Transformator mit iso-

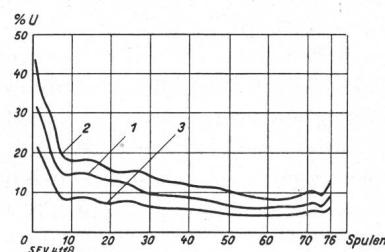


Fig. 12.
Spannungsgradienten längs einer 100-kV-Wicklung (Funkstreckenmessung)
1 Gleichmässige Spulenisolierung.
2 Drei Eingangsspulen besser isoliert.
3 Wirkung eines Sprungwellenringes

lierter Neutralen im Nullpunkt ein günstigeres Verhalten auf als derjenige mit geerdetem Nullpunkt, indem bei diesem im Nullpunkt ein Spannungsgradient auftritt. Die Fig. 12 ist sehr aufschlussreich in bezug auf die praktische Anwendung. Kurve 2 zeigt nämlich, dass die Ausführung mit starker isolierten Eingangsspulen schlechte Spannungsverteilung aufweist. Durch die Verminderung der Windungskapazität in den besser isolierten Spulen wird die Isolationsbeanspruchung ver-

grössert, und es ist fraglich, ob durch die Verbesserung der Isolation der Eingangswindungen überhaupt ein Gewinn resultiert. Bei den Ausführungen mit verstärkter Eingangsisolation werden die ersten normal isolierten Spulen mehr gefährdet als sonst. Eine günstige Wirkung hat, wie aus Kurve 3 hervorgeht, die Anordnung eines Kapazitätsringes, eines geschlitzten Metallringes, der durch seine grosse Oberfläche eine kapazitive Kopplung für die ersten Spulen darstellt und dadurch den Spannungsgradienten herabsetzt. Die Vermutung, dass innerhalb der ersten Spule die Beanspruchung der einzelnen Windungen bzw. der Lagen ein ähnliches Verhalten aufweise wie die Wicklung als Ganzes, bestätigt sich nicht. Man erhält vielmehr eine fast lineare Aufteilung auf die einzelnen Lagen. Die Kapazitätsverhältnisse der ganzen Wicklung finden in den einzelnen Spulen keine getreue Abbildung.

Nach diesen Versuchsergebnissen hat die verstärkte Isolation der Eingangswindungen keine Berechtigung; dagegen ist es zweckmässig, die ersten Spulen durch Einbandagieren gut zu isolieren, die Isolationsscheiben zwischen den ersten Scheiben, die sogenannten «Einzüge», stärker zu bemessen.

Es ist interessant, dass die Untersuchungen auf dem Gebiet der Sprungwellensicherheit in Amerika vor etwa fünf Jahren bei der GEC zu einer neuartigen Transformatortypen für hohe Spannungen (100 bis 220 kV), zum sogenannten «geschildeten» Transformator (non resonating transformer) führten. Man kann das Ersatzschema Fig. 13 für die Wicklung bei Stossbeanspruchung durch zusätzliche Kapazitäten günstiger gestalten. Beim Transformator mit nur schwach isoliertem Nullpunkt, eine Ausführungsart, die in Amerika aus besonderen Gründen vorherrscht, haben die unteren Wicklungsteile infolge der geringen Abstände vom Joch höhere Kapazitätsanteile gegen Erde als die oberen Wicklungsteile. Durch Einbau von Schildern, die isoliert von der Wicklung und verbunden mit der Oberspannungsklemme angeordnet werden, werden zusätzliche Kapazitäten (C_z in der Fig. 13) mit nach unten abnehmendem Betrag eingeschaltet. Das Ersatzschema Fig. 13 zeigt, dass bei entsprechender Bemessung der Zusatzkapazitäten die Anfangsverteilung der Spannung gleichmässig gestaltet werden kann. Wenn von der Oberspannungsklemme über das Schild jeweilen gleich viel kapazitiver Strom zugeführt wird, wie nach Erde abfließt, so wird in der Wicklung selbst immer der gleiche Strom fliessen und dadurch die Spannung ganz linear verlaufen. Daraus ergibt sich eine gleichmässige Spannungsverteilung schon zu Beginn des Stossvorganges. Man hat auf diese Weise

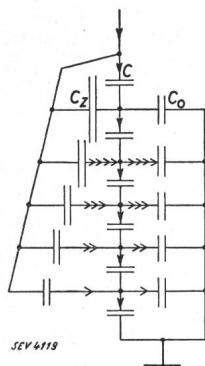


Fig. 13.
Ersatzschema eines
«geschildeten» Trans-
formators.

von der Wicklung und verbunden mit der Oberspannungsklemme angeordnet werden, werden zusätzliche Kapazitäten (C_z in der Fig. 13) mit nach unten abnehmendem Betrag eingeschaltet. Das Ersatzschema Fig. 13 zeigt, dass bei entsprechender Bemessung der Zusatzkapazitäten die Anfangsverteilung der Spannung gleichmässig gestaltet werden kann. Wenn von der Oberspannungsklemme über das Schild jeweilen gleich viel kapazitiver Strom zugeführt wird, wie nach Erde abfließt, so wird in der Wicklung selbst immer der gleiche Strom fliessen und dadurch die Spannung ganz linear verlaufen. Daraus ergibt sich eine gleichmässige Spannungsverteilung schon zu Beginn des Stossvorganges. Man hat auf diese Weise

gleichmässige Anfangs- und Endspannung; damit ist aber auch die Ursache für die Ausgleichsschwingungen beseitigt, daher der Name «non resonating transformer». Fig. 14 zeigt die konstruktive Ausführung eines geschildeten Transformators. Auch wenn man der geistigen Leistung dieser Konstruktion volle Anerkennung zollt, so steht sie doch so weit abseits von der europäischen Praxis, dass an ihre Einführung nicht zu denken ist.

Die Frage der Prüfung der Transformatoren auf Sprungwellenfestigkeit ist neuerdings durch eine Meinungsverschiedenheit deutscher und amerikanischer Auffassungen in ein interessantes Stadium getreten. Mit diesen Dingen wird sich wohl oder übel auch die europäische Praxis auseinander setzen müssen.

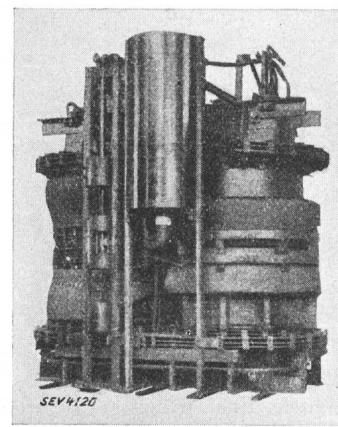


Fig. 14.

Geschirmter Transformator der General Electric Co., 29 000 kVA, 220 kV, Hochspannungsseite.

Fig. 15 zeigt die Schaltung einer Stossanlage. Diese Schaltung wird für prinzipielle Versuche verwendet. Die beiden Schaltungen Fig. 17 sind Schaltungen, die den Betriebsbedingungen bei nicht geerdetem Nullpunkt beim Auftreffen von Wanderwellen entsprechen, und zwar entspricht die Schaltung a dem Fall, wo eine Wanderwelle einphasig auftritt, während b die Schaltung für eine dreiphasige Wanderwelle darstellt. Im Falle a kann man sich die beiden nicht betroffenen Phasen über den Wellenwider-

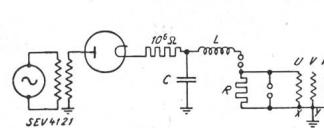


Fig. 15.
Stossprobe an einer Phase.

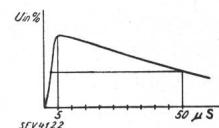


Fig. 16.
Stosswelle.

stand geerdet denken. Im Falle b ergibt sich eine scharfe Beanspruchung des Nullpunktes.

Es wurden auch Vergleichsversuche zwischen der Beanspruchung bei der Sprungwellenprobe nach den RET des VDE und der Stossprobe nach der Schaltung Fig. 15 bei einer Welle (Fig. 16) von 5 μs Wellenfront und 50 μs Wellenrücken gemacht. Unter Zugrundelegung gleicher Scheitelwerte ergibt die Sprungwellenprobe eine ca. vierfache Beanspruchung der Eingangswindungen. Es

ist daher verständlich, dass die Stossprobe mit einem Vielfachen der Amplitude der Nennspannung auszuführen ist.

Die Gründe der Befürworter der Sprungwellenprobe waren bereits Gegenstand von Veröffentlichungen.

Einiges von den Einwänden gegen die Stossprobe ist durch die letzten Vorkommnisse nicht mehr stichhaltig. So ist bekannt, dass in Amerika AIEE-Vorschriften in Vorbereitung sind, die auch eine Stückprüfung auf Stoss vorsehen, und dass bei dieser Prüfung die Transformatoren auch erregt werden. (In bestimmten Schaltungen kann man auch bei Stossprüfungen die Transformatoren mit normaler Spannung erregen.) Dass der Transfomator bei der Stossprüfung in einer betriebsmässigen Beanspruchung, die bei Ueberspannungen wirklich vorkommt, geprüft wird, ist besonders bemerkenswert. Die Amerikaner verwerfen die Sprungwellenprobe nach VDE, weil diese die hohe Beanspruchung gegen Erde nicht enthält. Dies wäre noch kein so grosses Unglück, weil man bei der Isolationsprobe Gelegenheit hat, diese Prüfung vorzunehmen. In einem Punkte müsste aber noch

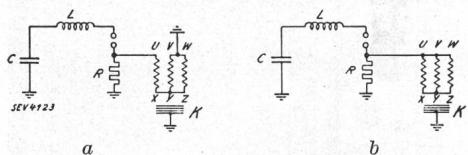


Fig. 17.

Stoßschaltungen. K Kern an Erde gelegt.

Klarheit geschaffen werden. Es ist von grösster Bedeutung für ein Prüfverfahren, ob die Fehler, die bei der Prüfung entstehen, auch mit Sicherheit kenntlich gemacht werden. In dieser Beziehung bleibt noch die Erfahrung abzuwarten. Solange diese noch fehlt, wäre es zu früh, der Sprungwellenprobe ihre Berechtigung abzusprechen. Wenn aber die Stossprobe in gleicher Weise Fehler aufdecken kann, wie dies die Sprungwellenprobe erfahrungsgemäss tut, so wäre es verfehlt, ihrer Einführung bei uns sich zu widersetzen; mindestens muss dieses Prüfverfahren studiert und in den Laboratorien ausprobiert werden.

4. Erwärmung und Kühlung.

Ich möchte zuerst die Oelkastenfrage behandeln. Man kann die Entwicklung auf diesem Gebiet im Grosstransformatorenbau in folgendem Satz zusammenfassen: Der Kasten grösster Oberfläche bei gleichem Oelvolumen ist letzten Endes der wirtschaftlichere. Er gestattet, die Grenze, bis zu welcher ölselbstgekühlte Transformatoren gebaut werden können, höher zu setzen; dazu kommt die günstigere Temperaturverteilung längs der Oberfläche. Durch diese Umstände hat der Röhrenkasten den Wettbewerb mit dem Wellblechkasten nicht nur bestanden, sondern ihn im Grosstransformatorenbau fast überall verdrängt. Fig. 18 zeigt einen

schematischen Vergleich der beiden Kastentypen. Der Wellblechkasten hat eine ungünstige Temperaturverteilung und ein Temperaturgefälle von ca. 30° C; der Röhrenkasten mit vier Reihen hat ein Gefälle von nur ca. 15° C. Die Wärmeabgabe des Röhrenkastens ist bei 55° C Uebertemperatur der

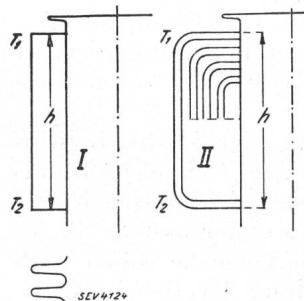


Fig. 18.

Wärmeableitung der Kastenoberfläche.
Links: Wellblechkasten (I);
rechts: Röhrenkasten (II).
 $h = 2,5$ bis 3 m.

- (I) $T_1 - T_2 = 25$ bis 30°
(II) $\begin{cases} T_1 - T_2 = 12 \text{ bis } 15^\circ \\ T_1 - T_2 = 5 \text{ bis } 6^\circ \end{cases}$
bei 55° Uebertemperatur im Oel oben:
(I) $K = 250 \text{ W/m}^2$
(II) $\begin{cases} K = 400 \\ K = 500 \end{cases} \text{ " ca.}$

obersten Oelschicht 400 W/m², beim Wellblechkasten nur 250. Eine weitere Verbesserung kann durch den künstlichen Oelumlauf (Einbau einer Pumpe) erzielt werden. Das Gefälle wird durch den Oelumlauf auf wenige Grade reduziert und die Wärmeübertragungskonstante auf ca. 500 W/m² erhöht.

Der Wellblechkasten ist im mittleren und Kleintransformatorenbau noch in Verwendung. Aber auch hier gibt es einige Grenzgebiete, wo seine Ueberlegenheit bestritten wird. Die Leistungsfähigkeit des Wellblechkastens kann durch eine günstigere Gestaltung der Wellen bzw. der Luftsäcken verbessert werden. Bei einem Verhältnis der Oelkanalbreite zur Luftsäckenbreite von ca. 1 : 4 wird die günstigste Kühlwirkung erreicht.

Ein äusserst wichtiger Faktor für die Wirkungsweise der Oelkühlung ist die Oelgeschwindigkeit. Aus Fig. 19 geht hervor, wie unter Zugrundelegung gleicher Leistung die Uebertemperatur des Oeles mit der zunehmenden Oelgeschwindigkeit fällt. Im umgekehrten Verhältnis nimmt die Wärmeübertragungskonstante zu.

Bei Oelselbstkühlung ist die sich durch den natürlichen Auftrieb des warmen Oels einstellende

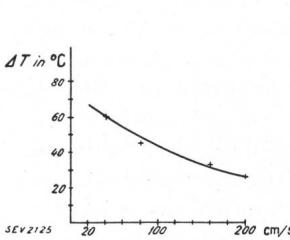


Fig. 19.
Oelübertemperatur
Abhängigkeit von der Oel-
geschwindigkeit.

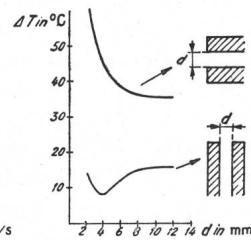


Fig. 20.
Wicklungsumübertemperatur
(über Oel) in Abhängig-
keit von der Kanalstärke.
Oben: Horizontale Spulen.
Unten: Vertikale Spulen.

Geschwindigkeit von grösster Bedeutung. Auf diesem Gebiet sind Messungen schwierig. Aus den Temperaturdifferenzen und Wärmeenergien lassen sich Geschwindigkeiten ermitteln, die in der Grösstenordnung von 1 cm/s liegen.

Für die Kühlung der Wicklung ist es wichtig, das Temperaturgefälle der mittleren Wicklungs-temperatur über die mittlere Oeltemperatur richtig zu bewerten. Die in den Vorschriften der meisten Länder festgesetzte Uebertemperatur der Wicklung ist nur 10°C höher als diejenige für das Oel. Diese Temperaturdifferenz von 10°C ist entschieden zu wenig. Deshalb muss man, um den Vorschriften zu genügen, mit der Oeltemperatur wesentlich tiefer bleiben, als es die Normen zulassen.

Versuche zur Untersuchung der Abkühlungsverhältnisse der Wicklung in einem Oelbade von normaler Uebertemperatur zeigten den grossen Unterschied in der Kühlung horizontaler und vertikaler Flächen der Wicklung. Die Versuche gaben auch Aufschluss über die Bedeutung der lichten Weite der Oelkanäle. Aus Fig. 20 geht hervor, dass die vertikalen Flächen eine bedeutend bessere Wärmeübertragung gewährleisten als die horizontalen. Unter Zugrundelegung einer spezifischen Belastung von 1000 W/m^2 und einer lichten Kanalweite von 5 mm ergibt sich bei vertikalen Flächen ein Temperaturgefälle von ca. 10° , bei horizontalen von mehr als 35° . Das Verhalten in Abhängigkeit von der lichten Weite der Kanäle ist interessant. Bei horizontalen Flächen bringt von einer bestimmten lichten Weite an die Vergrösserung des Kanales keine Vorteile mehr; bei Unterschreitung der lichten Weite tritt eine rapide Zunahme der Temperatur und eine Gefährdung der Wicklung ein. Bei vertikalen Flächen gibt es ein Optimum, das etwa bei 4 bis 5 mm liegt. Es ist also schädlich, wenn die Kühlkanäle von grösserer lichten Weite sind. Es ist aber gefährlich, wenn sie von kleinerer lichten Weite sind. Speziell bei den neuen Isolationsanordnungen ist eine strenge Werkstattkontrolle in dieser Beziehung sehr wichtig. Beim Oelumlauf, der ja in der Regel in vertikaler Richtung verläuft, verbessert sich die Wärmeübertragung an den vertikalen Flächen, nicht im gleichen Masse aber an den horizontalen. Die Verhältnisse sind kompliziert und die Angaben, die in der Literatur anzutreffen sind, etwa dass ein Gefälle von ca. 30° für natürliche Kühlung und von ca. 20° bei Oelumlauf anzusetzen ist, bedürfen von Fall zu Fall einer Nachrechnung und Richtigstellung nach den erwähnten Gesichtspunkten.

Jedenfalls sehen wir, dass die Kühlung der Wicklung und die Einhaltung der zulässigen Uebertemperatur mit der Kastenkühlung und der Oelübertemperatur direkt zusammenhängt. Die Herabsetzung der Oelübertemperatur ist in den meisten Fällen durch die Kühlung der Wicklung bedingt, und so kommen wir von selbst zur Frage der rationellen Kühlanlage. In dieser Beziehung ist eine grosse Wandlung eingetreten. Die Wasser-kühlalanlage, die sehr ausgiebig ist und mit welcher tiefe Oeltemperaturen leicht zu erreichen sind, wird immer mehr durch Pressluftkühlalanlagen verdrängt. Die Gründe der Verdrängung der Wasserkühlung in Transformatorenanlagen sind verschie-

dener Natur. Vielerorts steht Wasser nicht zur Verfügung; die Betriebssicherheit ist nicht immer befriedigend, man denke nur an das Einfrieren, an Wasserdichtigkeit, an Verstopfungen in den Rohren.

Die Bestrebungen, Pressluftkühlalanlagen zu bauen, führten bereits zu Erfolgen. Man unterscheidet bei diesen Anlagen Aussenkühlalanlagen und Eigenkühlalanlagen, die am Transformator angebaut werden. Für grössere Leistungen, 50 000 kVA und aufwärts, ist man auf Pressluftausenkühler angewiesen. Solche Kreisumlaufkühlalanlagen mit Aussenkühlern wurden für die 100 000 kVA-Transformatoren der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke ausgeführt. Das Oel wird durch die Röhrenküller mit Oelpumpe umgewälzt, und zugleich werden die mit Rippen versehenen Kühlrohre mit angesaugter

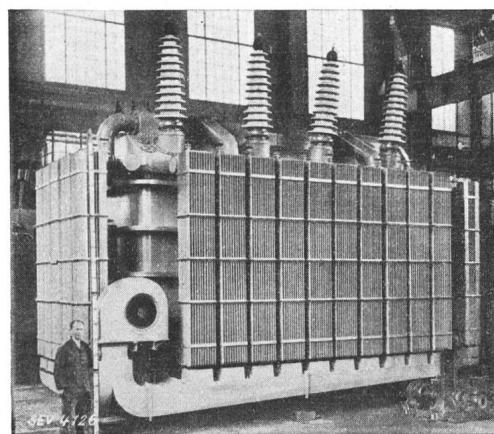


Fig. 21.
30 000-kVA-Transformator, 100 kV, mit Zusatz-Luftkühlung.

Luft gekühlt. Die Leistung eines Kühlers beträgt bei einer Raumabmessung von $2,8 \cdot 0,9 \cdot 0,6\text{ m}^3$ 75 kW bei einer Oelübertemperatur von 30 bis 35°C .

Eine sehr bemerkenswerte Anwendung der Pressluftkühlung bildet die sogenannte Pressluft-Düsenkühlung. Fig. 21 zeigt eine für einen 30 000-kVA-Transformator ausgeführte Anlage. In allen Fällen wird ein Windkanal angeordnet, der auch als Verteiler der Luft auf die einzelnen Radiatoren oder Röhrengruppen wirkt. Die Wirksamkeit dieser Anlagen ist noch nicht zur höchsten Entfaltung gekommen. Man erreicht eine Verbesserung in der Wärmeabfuhr durch diese Kühlung von 90 bis 100 %, was einer Leistungssteigerung von rund 45 % entspricht. Die Erhöhung der Luftmenge, die richtige Anordnung der Luftaustrittsquerschnitte (der Düsen) haben zur Verbesserung des Wirkungsgrades wesentlich beigetragen. Einige Einzelheiten können der Fig. 22 entnommen werden. Der Röhrenkasten ist für die Anwendung dieser Kühlung etwas ungünstiger als der Radiatorenkasten, weil beim Röhrenkasten mit grossen Luftverlusten gerechnet werden muss. Die Anordnung von schrägen gestellten Austrittskanälen, die der Luft die ge-

wünschte Richtung geben, hat die Wirkung wesentlich verbessert. Es wurden bei der AEG mit dieser Kühlung Transformatoren von der Leistung 30 000

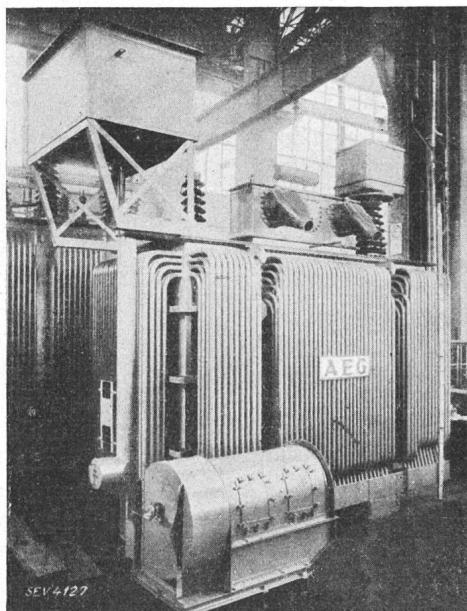


Fig. 22.
15 000-kVA-Transformer mit Zusatz-Luftkühlung.

kVA ausgeführt. Als Grenze wird die Leistung von rund 50 000 kVA angesehen. Die Leistungsfähigkeit dieser Anlagen scheint noch gesteigert werden zu können.

5. Reguliertransformatoren.

Die Regulierung unter Last hat zusehends eine grosse Bedeutung erlangt. Mindestens 50 % aller

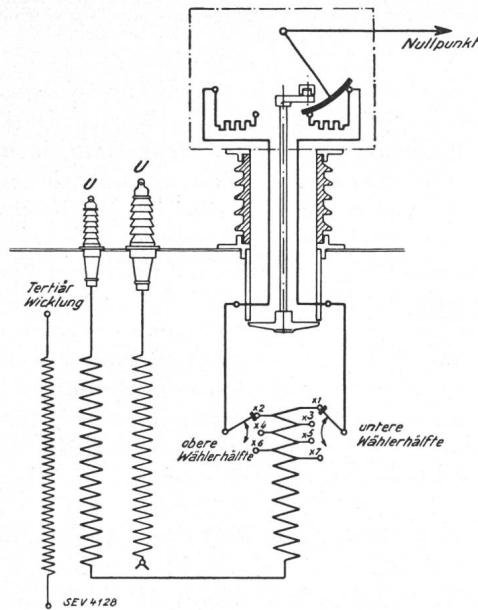


Fig. 23.
Schaltplan eines Reguliertransformators mit Nullpunktlastschalter für eine Phase.

Großtransformatoren, die in den letzten drei Jahren von der AEG geliefert wurden, sind mit Lastregulierung ausgerüstet. Von den vielen Spielarten

der Schaltungen sind in den folgenden Figuren einige dargestellt. Fig. 23 zeigt die Umschaltung im Nullpunkt. Wie alle Lastreguliereinrichtungen

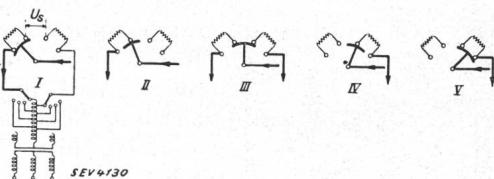
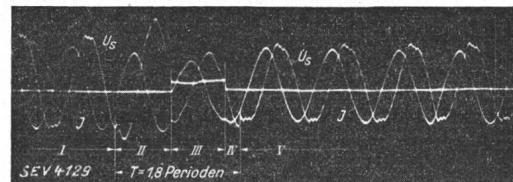


Fig. 24.
Ströme und Stufenspannung am Lastschalter.

besteht auch diese aus einem Stufenwähler und einem Lastschalter. Eine in der Zeichnung nicht dargestellte Antriebseinrichtung bewegt beide Teile (Stufenwähler und Lastschalter), wobei die Umschaltung auf die nächste Stufe im Stufenwähler stromlos vor sich geht, während die Stufenleistung durch den Lastschalter mit Schnellschaltung durch Federkraft geschaltet wird. Im Übergangsstadion von einer Stufe zur anderen wird für einen kurzen

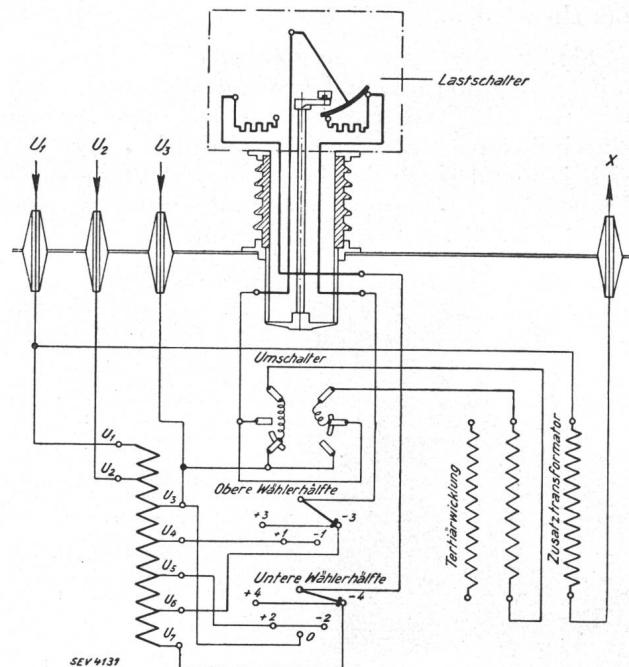


Fig. 25.
Schaltplan eines Regulieraggregates mit Lastschalter für eine Phase.

Zeitraum die Stufe über die Widerstände kurzgeschlossen. Innerhalb von zwei Perioden ist der ganze Schaltvorgang beendet. Fig. 24 veranschaulicht die einzelnen Stufen des Schaltvorganges:

- I. Direkter Stromdurchgang durch den Hauptkontakt.

- II. Stromdurchgang über den Stufenwiderstand links.
- III. Stromdurchgang über beide Widerstände.
- IV. Stromdurchgang über den Widerstand rechts.
- V. Direkter Stromdurchgang über den Hauptkontakt.

Diese Lastumschaltung nach System Jansen lässt sich in grosser Mannigfaltigkeit verwenden. Fig. 25 zeigt die Schaltung für ein Zusatzaggregat, bestehend aus Erregertransformator und Zusatztransformator. Die Wicklung an der Klemme x wird zusätzlich zu einer Netzspannung addiert oder subtrahiert. In dieser Wicklung selbst, die den Netzstrom führt, wird nicht direkt geschaltet. Der Lastschalter sitzt im Stromkreise der Erregerwicklung des Zusatztransformators. Durch eine Kommutatoreinrichtung, die auch durch den gemeinsamen Antrieb betätigt wird, können die Pole der Wicklung vertauscht werden.

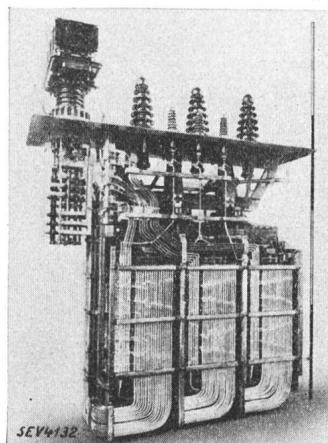


Fig. 26.
5-MVA-Leistungstransformator mit Nullpunktlastregler.

Fig. 26 zeigt einen ausgeführten Transformator mit Lastregulierung, und zwar mit Nullpunktsschalter, wo alle drei Lastschalter auf der gleichen Durchführung sitzen. Diese Vereinfachung lässt sich ja nur deshalb durchführen, weil Phase gegen Phase nur für geringe Spannung isoliert werden muss. Fig. 27 zeigt eine Ausführung mit drei Last-

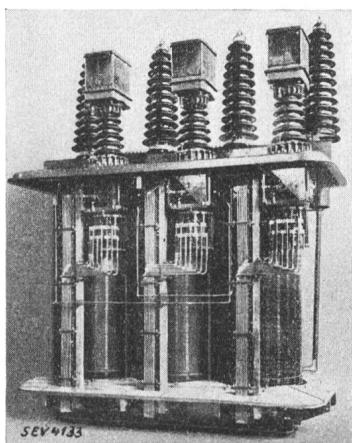


Fig. 27.
16-MVA-Leistungs-
transformator mit 3
Lastreglern.

reglern, wo drei Durchführungen nötig sind. Konstruktive Verbesserungen führten zu Stufenleistungen von 1000 V und 600 A, das heißt, der Einbau solcher Lastschalter ist in 100 kV-Hochspannungswicklungen direkt möglich.

Schliesslich sei noch bemerkt, dass auf diesem Gebiet eine wichtige Vereinfachung, die Kombina-

tion des Stufenwählers und Lastschalters in einem Organ, durchgeführt wurde und dass neuerdings auch Kleintransformatoren mit Lastumschaltern gebaut werden.

6. Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit.

Am Schluss meiner Ausführungen möchte ich über die Erfolge im Transformatorenbau einige allgemeine Bemerkungen machen. Eine Kurve (Fig. 28), welche die Gewichtsreduktion von Grosstransformatoren während der letzten zwölf Jahre darstellt, bringt die Erfolge deutlich zum Ausdruck. In erster Linie sind diese auf eine Verminderung der Isolationsabstände zurückzuführen. Diese Verminderung für 110 kV ist, wie aus der Kurve rechts hervorgeht, beträchtlich. Neben den Erfolgen in der Isolationstechnik sind es auch die Fortschritte im Kernbau und die richtige Wahl und Bemessung der Kühlanlagen, die für die Entwicklung von grosser Bedeutung waren. Im Kleintransformatorenbau verlief die Entwicklung ähnlich, wenn auch nicht so augenfällig. Ich habe vor weniger als zehn Jahren Transformatoren gesehen, die oberhalb des Kernes einen gleich hohen, freien

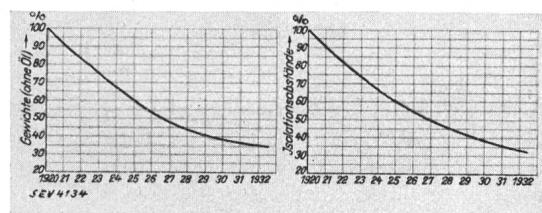


Fig. 28.
Entwicklung von Grosstransformatoren.
1920—1932.
Gewichtsreduktion von
Fortschritte der Isolations-
Grosstransformatoren
30 000 kVA, 110 kV.
technik an Transformatoren
für 110 kV.

Oelraum hatten; man sagte, dieser sei wegen der Kühlung nötig. Heute sind die Kästen der kleinen Transformatoren gerade so gross, dass sie den aktiven Teil aufnehmen können, und sie genügen auch den Vorschriften bezüglich der Erwärmung. Wird man vielleicht behaupten, die modernen Transformatoren seien weniger betriebssicher? Ich nehme mir heraus, zu sagen, dass das umgekehrte der Fall ist. Wie sollte es denn sonst anders sein, wenn die Prüfungsvorschriften immer verschärft wurden. Man hat die Sprungwellenprobe eingeführt, man hat die Prüfspannung bei der Isolationsprobe erhöht. Während man früher für die Serie 20 kV mit 40 kV Prüfspannung sich begnügte, beträgt heute die vorgeschriebene Prüfspannung nach den VDE-Regeln (RET) 50 kV. Es sind noch neue Prüfungen, die Kurzschlussprobe auf dynamische Festigkeit, die Prüfung mit Stoßspannungen von zehnfachem Betrage der Nennspannung hinzugekommen. Wenn trotzdem bedeutende Fortschritte bezüglich der Wirtschaftlichkeit möglich waren und noch möglich sind, so sind diese dem immer vorwärtsstrebenden Geist der Technik und Forschung zu verdanken.

Diskussion.

Der Vorsitzende dankt Herrn Dr. Goldstein bestens für sein interessantes Referat und eröffnet die Diskussion.

M. V. Rochat, Ateliers de Sécheron, Genève: Après l'exposé très complet de M. le Dr. Goldstein je voudrais reprendre deux points particuliers.

1^o Refroidissement des transformateurs à huile. Il était d'usage courant, il y a quelques décades, d'assurer le refroidissement des transformateurs à bain d'huile en utilisant des cuves à ondulations. Cette construction éminemment simple présente toutefois quelques points faibles:

a) Une cuve à ondulations est faite en tôle de 1 à 1,5 mm pour les petits transformateurs et en tôle de 2 à 3 mm pour les grandes unités. Ces cuves sont mécaniquement peu solides; ce défaut tend à s'accentuer avec le volume de la cuve. Les inétanchéités sont fréquentes et difficiles à éliminer.

b) Pour les unités importantes, il est sinon impossible, du moins très coûteux de construire des cuves à ondulations pouvant supporter un vide poussé. La cuisson du transformateur sous vide, dans sa propre cuve, devient alors un problème quasi-insoluble.

c) Enfin, le «rendement thermique» de la cuve à ondulations est nettement mauvais; s'il est acceptable pour les unités de 100 à 500 kVA, il baisse considérablement pour les unités de 2000 à 3000 kVA. Il sera donc nécessaire de choisir comme surface spécifique ($\text{cm}^2/\text{W} \cdot ^\circ\text{C}$) un nombre d'autant plus élevé que la cuve sera plus grande. Ce mauvais rendement des cuves à ondulations s'explique aisément si l'on considère le mouvement des particules d'huile et d'air à l'intérieur et à l'extérieur des ondulations. La circulation de l'huile à l'intérieur de la cuve est due à la convection; les molécules suivent des chemins absolument quelconques et quittent la paroi de la cuve avant d'avoir cédé à celle-ci un maximum de calories. Le refroidissement extérieur est assuré d'une part par le rayonnement et d'autre part par convection. Le rayonnement est proportionnel à la surface enveloppant la cuve. Toutes choses égales d'ailleurs, son importance tend à diminuer en raison inverse de la puissance du transformateur. Quant au refroidissement par convection, son efficacité diminue par le fait que le mouvement purement ascensionnel des particules d'air n'est pas assez tourbillonnaire.

Les constructeurs ont cherché à éviter la cuve à ondulations pour les unités de quelque importance, 2000 à 10 000 kVA, en employant des cuves ovales à radiateurs adossés. Cette disposition permet de construire des cuves relativement légères, mécaniquement très solides et capables de supporter un vide poussé. L'inconvénient de ce système réside toutefois dans les dimensions extérieures du transformateur, dimensions qui rendent souvent impossible le transport par chemin de fer du transformateur complet, prêt à prendre son service.

L'idée de souder les tubes directement dans la paroi de la cuve s'est alors imposée. Grâce à la soudure électrique, il est actuellement facile d'obtenir des soudures absolument étanches. Les cuves à tubes ainsi construites présentent une série d'avantages que nous allons énumérer rapidement:

a) Les dimensions en plan sont très réduites, d'où transport facile par chemin de fer du transformateur complet. Les cuves, le plus souvent rectangulaires, peuvent sans grands frais être construites pour résister à un vide poussé.

b) L'avantage essentiel de la cuve à tubes réside dans son excellent rendement thermique. On peut admettre qu'une telle cuve nécessite une surface spécifique ($\text{cm}^2/\text{W} \cdot ^\circ\text{C}$) deux à trois fois plus petite qu'une cuve à ondulations. Ce gain de surface permettra de construire une cuve légère et robuste.

L'excellence du rendement thermique de la cuve s'explique aisément: à l'intérieur le mouvement de l'huile est bien dirigé. L'huile chaude, au haut de la cuve, se précipite dans les tubes et y circule à une vitesse relativement grande.

A l'extérieur, le mouvement de l'air est absolument libre et devient le plus souvent tourbillonnaire; il en résulte une augmentation du coefficient de transmission calorifique tube-air. Ce phénomène est spécialement remarquable pour les transformateurs installés en plein air. Des essais récents ont montré qu'une vitesse du vent de 10 km à l'heure provoque une augmentation de 25 à 30 % de la quantité de chaleur que peut dissiper la cuve. La température de l'huile diminue d'autant.

La fig. 1 représente un transformateur de 2500 kVA 45/16 kV dont les pertes sont de 35 kW environ. Nous avons pu facilement faire des cuves pouvant dissiper 80 kW et plus.

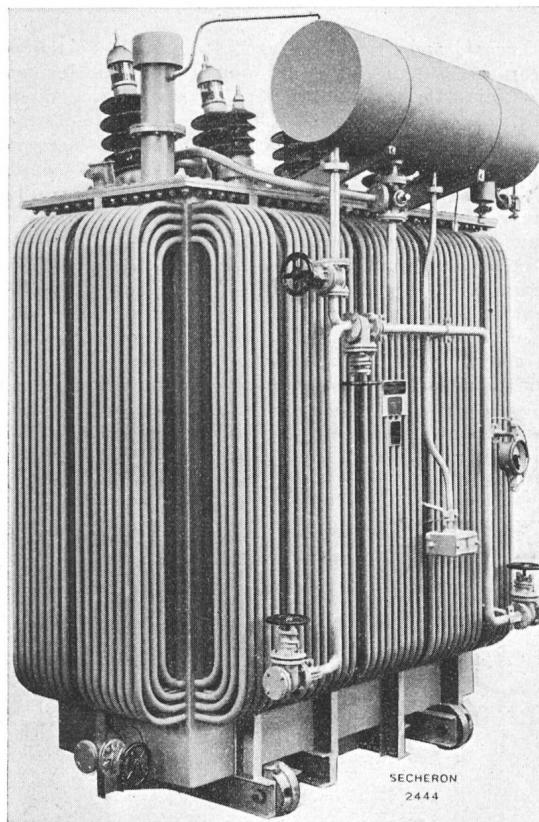


Fig. 1.
Transformateur 2500 kVA, 45/16 kV, 50 Pér./s avec cuve à tubes.

Pour les grandes unités de 10 000 kVA et plus, les cuves à radiateurs ou à tubes deviennent de plus en plus difficiles à construire. On a alors recours aux dispositions suivantes:

a) Refroidissement par circulation forcée de l'huile dans des appareils réfrigérants hydrauliques. Le défaut de ce système réside dans la pompe qui est souvent une cause d'ennuis. Quant au réfrigérant, il faut en surveiller soigneusement l'étanchéité.

b) La solution la meilleure à notre avis consiste à prévoir une batterie de radiateurs avec circulation naturelle ou artificielle de l'air. La circulation de l'huile est assurée soit par une pompe, soit par effet de thermosyphon. On peut enfin prévoir un by-pass qui permet une circulation naturelle de l'huile aux faibles charges et une circulation forcée à pleine charge (fig. 2). Cette solution réduit notablement les frais d'entretien d'une installation. La cuve du transformateur est simple et, en cas de révision, peut facilement être séparée de la batterie. Le principal inconvénient de ce système est la grande place occupée par la batterie.

Si nous voulons résumer les tendances qui semblent se préciser dans les moyens à employer pour assurer le refroidissement des transformateurs, nous établirons le tableau suivant:

Puissance du transformateur kVA	Modes de refroidissement
0 à 5 000	Cuves à tubes.
3 000 à 10 000	Batterie adossée avec circulation naturelle de l'huile et de l'air.
> 10 000	Batterie adossée. Circulation naturelle de l'huile et de l'air aux faibles charges. Circulation forcée de l'huile ou de l'air aux fortes charges.
> 3 000	Circulation forcée de l'huile dans des réfrigérants à eau.

2° *Transformateurs de réglage.* La S. A. des Ateliers de Sécheron a construit un grand nombre de transformateurs ou d'autotransformateurs de réglage dont voici quelques caractéristiques intéressantes: L'insérateur de prise est constitué par une batterie de contacteurs; il peut être complété suivant le cas par un graduateur qui prépare les couplages successifs. Tous ces appareils sont immergés dans l'huile. Le bac contenant les contacteurs est adossé à la cuve ou au couvercle du transformateur; le contrôle des contacts est facile et se fait rapidement après que l'on a abaissé ce bac. La révision du transformateur se fait sans difficulté et notamment sans défaire aucune des connexions reliant les prises de l'enroulement à l'insérateur. On peut sortir la partie active du transformateur sans toucher à l'insérateur. La commande, à main, à distance ou automatique, est toujours munie d'un accumulateur d'énergie qui garantit un fonctionnement absolument sûr. Un dispositif de blocage immobilise la commande de l'insérateur dès que l'intensité de passage dépasse environ 2 fois le courant normal. Il

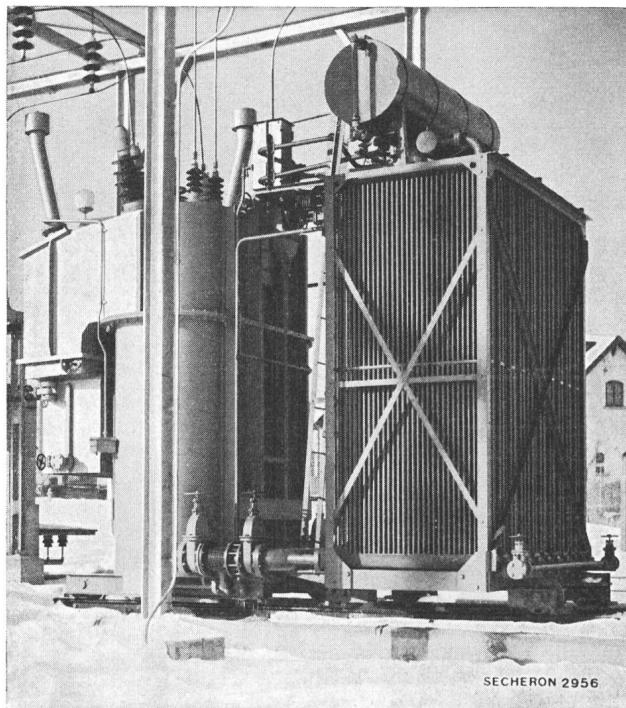


Fig. 2.
Transformateur de réglage 6000 kVA, 16 kV/47 750 ± 10 × 1,2 % kV, 50 Pér./s., avec batterie de refroidissement.

est pratiquement impossible de manœuvrer les appareils de réglage au moment d'un court-circuit (Fig. 2).

L'autotransformateur de la fig. 3 présente une particularité intéressante: le régulateur automatique est muni d'un volant de chasse qui, en cas de manque de tension au moteur ou sur le transformateur ramène l'insérateur au maxi-

mum de dévoltage. Quand la tension revient, elle sera momentanément trop faible; le régulateur se mettra immédiatement à corriger la tension dans le sens voulu.

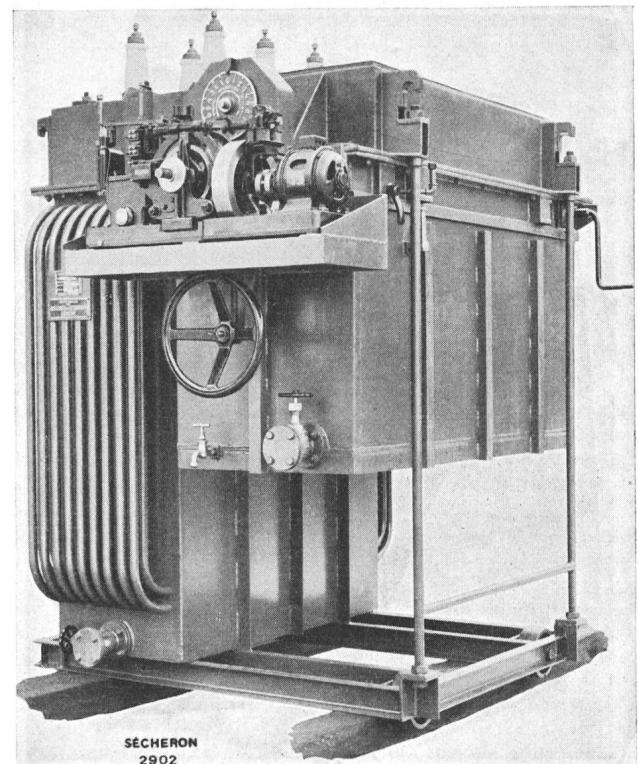


Fig. 3.
Autotransformateur de réglage, 3500 kVA, 8600 ± 8 × 112,5 V, 50 Per.s.

(M. Rochat montra un grand nombre de photographies de transformateurs Sécheron; par manque de place, nous devons nous abstenir de les reproduire ici toutes. — Réd.)

J. Kübler, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden: Gestatten Sie mir zu den interessanten Ausführungen des Herrn Vortragenden einige Ergänzungen aus der Praxis bei Brown Boveri.

Sie haben das Bild eines Kernes mit weitgehend ausgenütztem Kreisquerschnitt gesehen (S. 582). Ich führe hier ein weiteres Bild vor. Auch da ist der Kreisquerschnitt bis an die äußerste Grenze gefüllt. Beachten Sie, dass alle Kühlslitze *a* quer zu den Blechen liegen. Die Wärmeleitfähigkeit

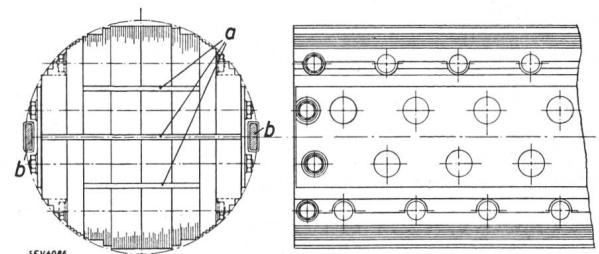


Fig. 1.
Kreisförmiger Kernquerschnitt, mit weitestgehender Ausnutzung der Kreisfläche.
a Kühlslitze, *b* Gestellpressbolzen.

keit quer zum Blech ist etwa $1/50$ bis $1/30$ derjenigen längs des Bleches. Es ist klar, dass unter diesen Umständen Querschlitz günstiger kühlen als Längsschlitz. Mit Querschlitten ist somit die Kreisfläche besser ausgenutzt. — Ein planges und warzenloses Blech wird einen besseren Füllfaktor ergeben als ein unebenes. Da der Pressdruck zur Herstel-

lung des Kernes bei unebenem Bleche sich auf einzelne Stellen konzentriert, entstehen dort leicht Beschädigungen der Blechisolation, die zu zusätzlichen Eisenverlusten führen können. Der Transformatorbauer wird deshalb ebenso sehr auf planes und warzenloses Blech als auf niedrige Verlustziffer halten. An der Weltkraftkonferenz 1930 habe ich den europäischen Blechwalzwerken die Forderung auf niedrige Blech mit tadelloser Oberfläche gestellt. Heute entsprechen eine Reihe von Werken dieser Forderung schon weitgehend; die tadellose Beschaffenheit der amerikanischen Bleche aber ist noch nicht erreicht. — Ich mache noch auf die Pressbolzen b, mit denen Joch und Säulen zusammengepresst werden, aufmerksam. Sie sind in die Kreisflächen gut eingepasst; sie bestehen aus hochwertigem Spezialstahl.

Zur guten Ausnutzung des Materials gehört es, die Induktion im Kerne so hoch zu treiben, als es Eisenverluste, Magnetisierungsstrom und dessen Oberharmonische zulassen. Die Kernkühlung ist dafür nicht mehr hinderlich. Noch vor wenigen Jahren hat man sich gefürchtet, über 13 500 Gauss zu gehen; heute geht man höher und sucht das Anwachsen des Magnetisierungsstromes und dessen Oberharmonischen durch Wahl eines geeigneten Eisenquerschnittes möglichst zu kompensieren.

Der geschachtelte Kern bietet zweifellos gegenüber dem gestossenen, besonders für kleine Transformatoren, ausschlaggebende Vorteile. Der geringe Magnetisierungsstrom und die verringerten Eisenverluste sind viel bedeutungsvoller als die Erleichterung der Zerlegung, die doch nur bei den äusserst seltenen Reparaturen und Wicklungsänderungen eine Rolle spielt. Eher lässt sich der gestossene Kern für grosse Einheiten rechtfertigen, und wir kommen in dieser Beziehung den Wünschen unserer Kundschaft ja voll entgegen.

Von Herrn Dr. Goldstein ist der kreisförmige Wicklungsquerschnitt, die Röhrenform, bereits voll gewürdigt worden. Aus den gleichen Gründen zogen auch wir diese Form, von einer kurzen Zwischenzeit abgesehen, von jeher vor. Während so die radiaen Stromsprengkräfte dem Kupfer zugemutet werden dürfen, müssen die axialen Sprengkräfte, die sich infolge der Anzapfungen nie ganz vermeiden lassen, von den Spulendistanzierungen und Endabstützungen übernommen werden. Dem Konstrukteur stehen in der Hauptsache für die Abstützungen organische Isolationsmaterialien zur Verfügung. Diese aber leiden unvermeidlich in der Wärme; sie sinken mit der Zeit zusammen. Soll also die Wicklung mit ihren axialen Abstützungen den Sprengkräften auf die Dauer gewachsen sein, ohne dass man automatische Nachpressung, z. B. mit Federn und unter Umständen mit Oelpuffer anwendet, so muss sie eine derartige Vorpressung erhalten, dass diese bis zum Alterstod der Isolation und

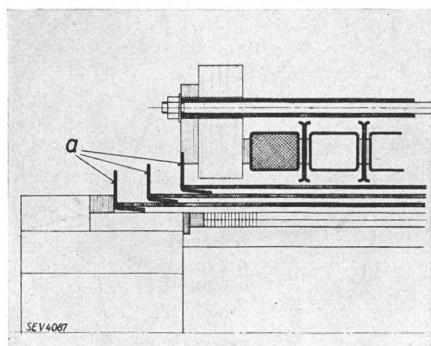


Fig. 2.

Auszug aus einer Werkstattzeichnung aus dem Jahre 1912, den Wicklungschnitt eines Transformators darstellend. Sie zeigt die Windungen aus Isolationsmaterial. a Winkelringe.

damit des Transformators wirksam bleibt. Es ist möglich, dass die Kunstarze hier die Lösung bringen; doch bedarf es bis zum allgemeinen Verzicht auf die automatische Nachpressung noch sorgfältig gesammelter Erfahrungen.

Herr Dr. Goldstein hat auf die vorzügliche Wirkung der Winkelringe als Endisolierung hingewiesen. Diese Winkelringe sind nicht neu; zuerst haben wir sie 1903 angewendet. Fig. 2 ist aus einer Werkstattzeichnung von 1912 herausgezeichnet. Es ist keine Frage, dass man damals schon die

wertvollen Eigenschaften dieser Ringe erkannt hat, aber insbesondere ihre Herstellung verursachte damals Schwierigkeiten, weshalb preisliche Vorteile ausblieben. Dank zum Teil wiederum der Kunstarze hat sich die Fabrikation nun weitgehend verbessert und ein neuzeitlicher Transformatorm für Hoch- und Höchstspannung wäre ohne diese Ringe nicht denkbar (Fig. 3).

Der Herr Vortragende hat zwei Kurven über den Fortschritt im Bau von Transformatoren seit 1920 gezeigt. Ich habe eine ähnliche Untersuchung gemacht, doch habe ich in unserer Praxis sowohl für die Distanzen als für die Gewichte in jenem Zeitabschnitt nicht eine Änderung von etwa 3 : 1, wie es die Kurven zeigen, sondern nur eine solche von 1,7 : 1 gefunden. Aber schon dieser Fortschritt, der sich in den Preisen stark auswirkt, darf füglich als ein gewaltiger bezeichnet werden.

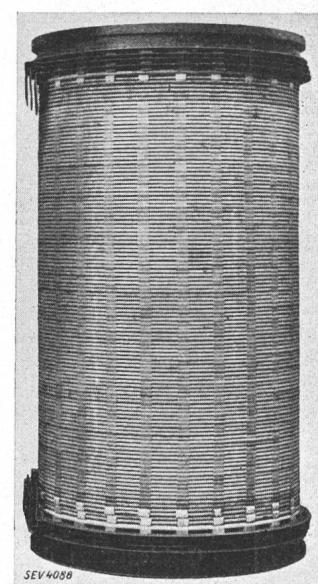


Fig. 3.
Neuzeitliche Oberspannungswicklung einer Säule eines 150-kV-Transformators.

ständen in den Schaltern ganz verlassen. Seine Voraussage, dass diese Vereinfachung keineswegs zu grösserer Zahl von Beschädigungen führe, hat sich voll bestätigt.

Die ursprünglich grosse und schwere Furcht vor Sprung- und Stoßwellen hat die Zeit selbst auf ein richtiges Mass zurückgeschraubt. Leider stehen auch heute noch in manchen Fällen Landesvorschriften und die Ansichten weltfremder Professoren einer zweckmässigen Bemessung der Drahtisolationen entgegen. Vorbildlich für die Isolierung der Windungen sind die schwedischen und englischen Vorschriften. Doch auch hier kann man im Abbau über das Ziel hinausschießen. Es ist davor zu warnen, auf jene niedrigen elektrischen Isolationsstärken zurückzugehen, die z. B. vor etwa 30 Jahren üblich waren. Eine gewisse bessere Isolation der Eingangswicklung ist nicht zu umgehen. Sie auf etwa 50 bis 60 % der Nennspannung für drei Sekunden Dauer zu bemessen, scheint richtig gegriffen zu sein. Daneben ist die Isolation der übrigen Windungen nicht allzu knapp zu halten. Zum Teil der Symmetrie halber und zum Teil aus elektrischen Gründen wird die Windungsisolation beim Nullpunkt bei vollisolierten Transformatoren annähernd gleich gehalten, wie diejenige der Eingangswicklungen. Ein nicht zu harter Übergang zwischen beiden Isolationsarten, der auf verschiedene Weise erreicht werden kann, ist zweckmässig.

Die schweizerischen Vorschriften verlangen die Sprungwellenprüfung. Obschon sie bei den Abnahmeprüfungen ausnahmslos «gut» verläuft, so hat sie bei Vorversuchen in der Fabrikation doch da und dort Fehler aufgedeckt, die Lehren und Erfahrungen sammeln liessen. Ich möchte sie aus diesem Grunde nicht missen. Was die Stoßspannungsprüfung bringen wird, liegt noch in der Zukunft.

Herr Dr. Goldstein hat vom Eindringen von Stoßwellen in Transformatorenwicklungen erzählt. Es freut mich, hier an seine Ausführungen anschliessend von Untersuchungen, die in unserem Forschungsinstitut gegenwärtig im Gange sind, einiges mitteilen zu können! Erst solche Versuche lassen den vollständigen Einblick in die Vorgänge bei Stoßwellen gewinnen. Von einem Stoßgenerator werden Rechteckwellen auf eine Transformatorenwicklung gegeben. Diese besteht aus 16 Doppelspulen, die praktisch gleich sind. Die Wicklung ist einpolig geerdet. Sie ist in Luft, also nicht in Öl. Mit dem Kathodenstrahlloszillographen wird der Ver-

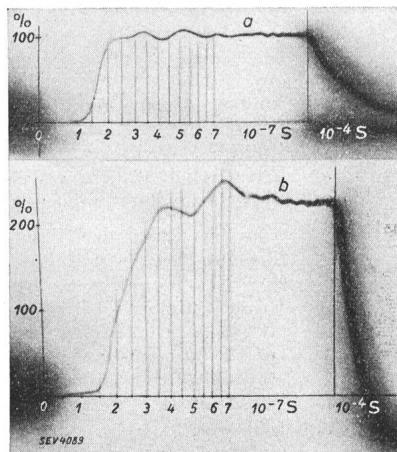


Fig. 4.
a Das Oszillogramm der vom Stoßgenerator gelieferten Rechteckwelle.

b Die an der Wicklung reflektierte Welle.

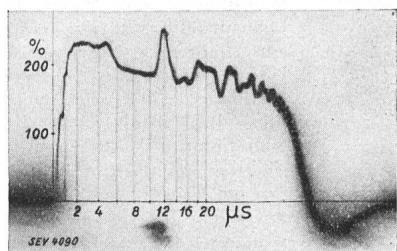


Fig. 5.
Oszillogramm der Spannung von der zweiten Doppelpule gegen Erde.

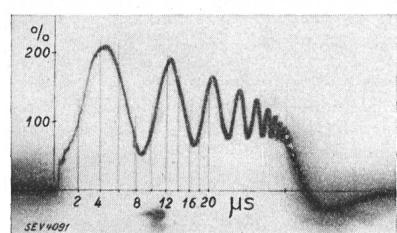


Fig. 6.
Oszillogramm von der achten Doppelpule nach Erde.

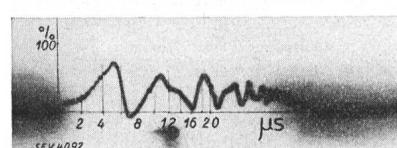


Fig. 7.
Oszillogramm der Spannung von der vierzehnten Doppelpule nach Erde.

lauf der Spannung gegen Erde, zwischen den Doppelpulsen und selbst zwischen den Windungen einer Doppelpule aufgenommen. Es werden Aufnahmen sowohl mit Endschuttringen, als auch ohne solche gemacht. Unter Endschuttringen sind geschlitzte, isolierte Metallringe zu verstehen, die an den Enden der Wicklung angeordnet und mit diesen verbunden sind. Sie dienen dazu, einmal die Feldverteilung am Wicklungsende zu verbessern und anderseits die Stoßwellenbeanspruchung der Windungsisolation abzuschwächen. Es dürfte rein geschichtlich interessieren, dass wir derartige Ringe aus voller Erkenntnis ihrer Wirkung schon seit 1910 anwenden.

Die Fig. 4, 5, 6 und 7 zeigen einige Originalaufnahmen, und zwar zeigt:

Fig. 4, Kurve a: das Oszillogramm der ursprünglichen Welle. Ihre Frontdauer beträgt weniger als $1/10 \mu\text{s}$. Der Zeitmaßstab ist in 10^{-7}s angegeben und verkürzt sich mit ablaufender Zeit. Von dort, wo die Kurve plötzlich stark absinkt, ist der Zeitmaßstab auf $1/1000$, d. h. auf 10^{-4}s verkürzt.

Kurve b: die an der Wicklung reflektierte Welle. Ihre Spannung ist auf praktisch den doppelten Wert gestiegen.

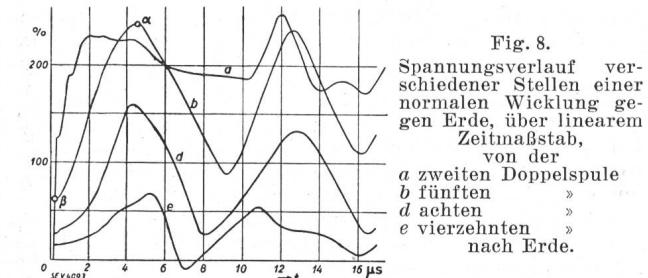


Fig. 8.
Spannungsverlauf verschiedener Stellen einer normalen Wicklung gegen Erde, über linearem Zeitmaßstab, von der
a zweiten Doppelpule
b fünften »
c achtten »
d zwölften »
e vierzehnten » nach Erde.

Fig. 5 gibt die Spannung von der zweiten Doppelpule gegen Erde. Der Zeitmaßstab, wie auch der für Fig. 6 und 7 ist in μs angegeben. Er verkürzt sich ebenfalls. Fig. 6 zeigt die Spannung von der achten Doppelpule zur Erde, Fig. 7 die Spannung von der vierzehnten Doppelpule zur Erde.

Nebenbei bemerkt: Der Kathodenstrahlloszillograph ist doch ein wunderbares, fast zauberhaftes Instrument. Wie

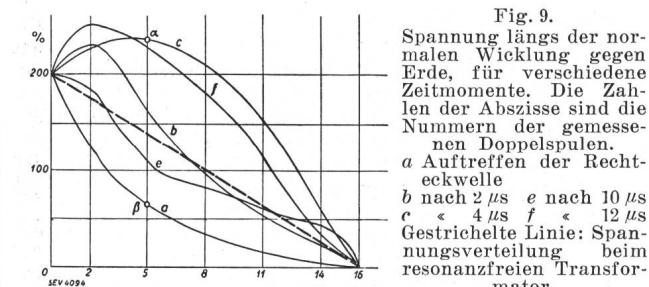


Fig. 9.
Spannung längs der normalen Wicklung gegen Erde, für verschiedene Zeitmomente. Die Zahlen der Abszisse sind die Nummern der gemessenen Doppelpulsen.
a Auftreffen der Rechteckwelle
b nach 2 μs e nach 10 μs
c « 4 μs f « 12 μs
Gestrichelte Linie: Spannungsverteilung beim resonanzfreien Transformatorm.

an diesen Oszillogrammen zu sehen ist, zeichnet er noch Vorgänge von 10^{-7}s deutlich und klar auf. Von der Kürze dieses Zeitabschnittes macht man sich erst einen Begriff, wenn man bedenkt, dass das in einer Sekunde 300 Millionen Meter enteilende Licht in dieser Zeit nur 30 m weit gelangt.

In Fig. 8 sind die Kurven aus den Oszillogrammen, mit Ausnahme der Ursprungswelle, in linearem Maßstabe zusammengezeichnet. Es ist zu beachten, dass die Stoßwelle

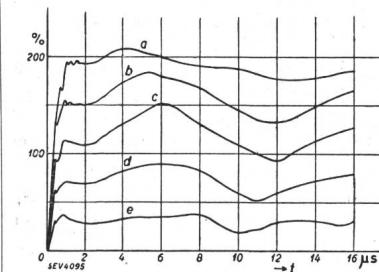


Fig. 10.
Spannungsverlauf einer Wicklung, deren Doppelpulsen mit entsprechend berechneten Kondensatoren nach Fig. 11 überbrückt sind, gegen Erde, von der
a zweiten Doppelpule
b fünften »
c achtten »
d zwölften »
e vierzehnten » nach Erde.

nicht als solche, sondern, wie Prof. K. W. Wagner schon 1912 berechnet und wie auch Herr Dr. Goldstein erwähnt hat, als eine der Eigenfrequenz der Wicklung entsprechende Wechselstromwelle die Wicklung durchwandert; jedoch ist diese Welle einem Teil der ursprünglichen Stoßwelle überlagert.

An Fig. 8 macht sich deutlich die Querkapazität geltend. Ich bezeichne damit die Kapazität von Doppelpule zu Doppelpule und von Windung zu Windung. Wäre sie nicht

vorhanden, so müsste bei der letzten Doppelspule die Spannung entsprechend den ca. 750 m Drahtlänge erst nach etwa 2,5 μ s in Erscheinung treten. In Wirklichkeit ist nur ganz wenig von einer Verzögerung sichtbar. Die erste Ausbreitung geht also quer zur Wicklung, der Querkapazität entlang. Man entnimmt ferner, dass die Eigenfrequenz ca. 120 000 Per./s beträgt. Sie ist hoch, weil die Wicklung in Luft ist.

Die Kurvenschar Fig. 9 zeigt den Spannungswert längs der Wicklung gegen Erde zu verschiedenen Zeiten. Sie bestätigt durch Messwerte die Erklärungen von Herrn Dr. Goldstein zu seiner Fig. 11, indem die obere und die untere Umhüllende jene von ihm gezeigten Schwinggrenzen sind. Die oberen und unteren Grenzwerte der Spannungen auf der Vertikalen über einer herausgegriffenen Doppelspule, z. B. die Punkte α und β der Doppelspule 5, finden sich wieder in Fig. 8 in den Punkten α und β der Kurve b.

Fig. 10 zeigt die analogen Spannungen zu Fig. 8, aber es sind die Doppelspulen mit Kondensatoren gemäß Fig. 11 überbrückt. Die Kapazitäten dieser Kondensatoren vergrössern die Querkapazität der Wicklung. Sie sind nach der Theorie von K. W. Wagner so berechnet, dass die

Amplituden der Eigenschwingung der Wicklung stark vermindert wird. Hier zeigt sich, weitaus deutlicher als bei Fig. 8, der Einfluss der Querkapazität, indem jetzt die Anfangsspannungen ungefähr proportional dem Abstande der Doppelspulen vom Erdungspunkte aus ansteigen. Die überlagerten Wechselstromwellen sind etwas länger ausgezogen als vorher, die Eigenfrequenz dieses Gebildes wurde also

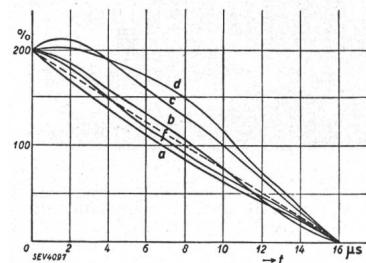


Fig. 11.
Schematische Darstellung der mit Kondensatoren überbrückten Doppelspulen.

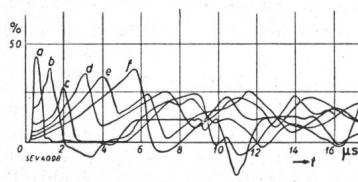


Fig. 12.
Spannung längs der Wicklung, deren Doppelspulen mit Kondensatoren überbrückt sind, gegen Erde, für verschiedene Zeitmomente, a beim Eintreffen der Welle, b nach 2 μ s, c nach 4 μ s, d nach 6 μ s, e nach 8 μ s, f nach 12 μ s.

durch die zugefügten Kapazitäten geändert. Sie beträgt ca. 90 000 Per./s.

Fig. 12 gibt wiederum den Spannungswert längs der Wicklung gegen Erde zu verschiedenen Zeiten für das Wicklungsgebilde nach Fig. 11. Es ist daraus zu entnehmen, dass die Spannung längs der Wicklung einmal weniger hoch ansteigt und auch gleichmässiger gegen den Erdpunkt abnimmt als nach Fig. 8. Wir nähern uns mit dieser Wicklung stark dem resonanzfreien Transformator, der nach der Definition des Herrn Vortragenden gekennzeichnet ist durch eine während des Bestehens der Stosswelle ganz gleichmässig längs der Wicklung nach Erde abfallende Spannung (gestrichelte Linie in Fig. 9). Dieses Ziel wird also hier nicht durch die in Fig. 13 des Vortrages gezeigte Art durch kompliziert zu isolierende Kapazitätsschilder erreicht, sondern durch die parallel an die Wicklung angeschlossenen Kondensatoren.

Fig. 13 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung an einigen Doppelspulen, diese jedoch ohne jene in Fig. 11 dargestellten Ueberbrückungskondensatoren. Man sieht, die erste Doppelspule ist die stärkst beanspruchte; die Beanspruchung sinkt nur für die mittleren Doppelspulen und steigt für die Endspulen wieder.

Diese Tatsache hat Herr Courvoisier bei der Untersuchung von Transformatoren auf Sprungwellbeanspruchung durch Messung mit Funkenstrecken festgestellt (Bull.

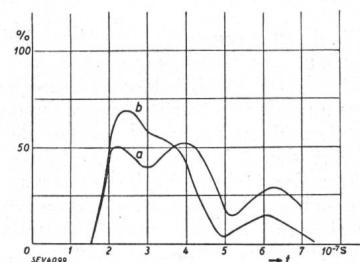


Fig. 14.
Spannung über die erste Doppelspule, a normale Ausführung, b nachdem der Abstand der Doppelpulenhälften von 5 auf 15 mm erhöht worden war.

SEV 1922, S. 442). Hier wie dort ist die maximale Spannung über die Anfangsspule etwa 50 % der Höhe der Stoss- bzw. der Sprungwellenspannung. Es zeigt sich die Ueber-einstimmung der Windungsbeanspruchung mit Sprungwellen und mit Stoßspannungen, eine Uebereinstimmung, die wir auch durch direkte, vergleichende Versuche mit dem Kathodenoszillographen festgestellt haben. In Fig. 14 zeigt Kurve a die Spannung über die erste normale Doppelspule und Kurve b über die gleiche Doppelspule, aber nachdem die Querkapazität durch Vergrösserung des Abstandes zwischen den Doppelpulenhälften reduziert worden ist. Die Spannung pro Doppelspule ist fast 40 % höher geworden. Die Kurven dieses Bildes und diejenigen der Fig. 15 und 16 sind wiederum in zehnfach vergrössertem Zeitmaßstab aufgezeichnet, also

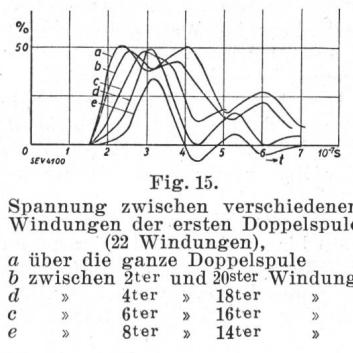


Fig. 15.
Spannung zwischen verschiedenen Windungen der ersten Doppelspule (22 Windungen), a über die ganze Doppelspule, b zwischen 2ter und 20ster Windung, c » 4ter » 18ter », d » 6ter » 16ter », e » 8ter » 14ter »

über einem solchen von 10^{-7} s. Diese Kurven ergeben einwandfrei, dass mit der Erhöhung der Isolation der Eingangswindungen, wenn diese gleichzeitig die Querkapazität reduziert, die Spulenspannung zunimmt und dass also die Verbesserung der Isolation durch die Zunahme der Spulenspannung mindestens zum Teil aufgehoben wird.

Die Kurvenschar in Fig. 15 stellt den zeitlichen Verlauf der Spannung innerhalb der ersten Doppelspule dar. Die Wicklung hatte für diese Aufnahmen keinen Endschutzzring. Die Messungen wurden dann mit Endschutzzring wiederholt

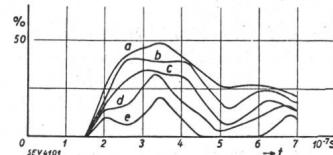


Fig. 16.
Wie Fig. 15, aber Wicklung mit dem Endschutzzring versehen.

und ergaben die Kurvenschar Fig. 16. Die Kurven sind zwischen den gleichen Windungen aufgenommen wie beim ersten Versuch. Zwischen Anfang und Ende der Doppelspule wurde die Spannung einerseits verflacht und in ihrem Maximum leicht abgesenkt, und anderseits hält dieses Maximum auch weniger lang an. Für die übrigen Windungen dagegen tritt eine beträchtliche Senkung der Spannung ein. Man erkennt daraus die vorteilhafte Wirkung des Endschutzzringes.

Es handelt sich hier um Modellversuche, welche selbstredend mit reduzierten Spannungswerten vorgenommen wurden. Vergleichsversuche haben erwiesen, dass alle Werte proportional sich ändern, wenn die Stoßspannung in ihrer Höhe verändert wird. Die Resultate sind deshalb bis zum Beginne von Ueberschlägen übertragbar.

Die Untersuchungen gelten also vorläufig für Wicklungen in Luft. Ist die Wicklung in Öl, so liegen die Verhältnisse ähnlich: Die Eigenfrequenz wird reduziert, die Spannungswelle auseinandergesogen, die Spannung pro Spule im mittleren Teil und gegen den Erdpunkt niedriger.

Wie verhält sich der vollisolierte Transformator? Auch bei diesem ist der Spannungsverlauf pro Spule kaum verändert. Am Sternpunkt aber wird die durchziehende Welle nochmals reflektiert. Die Spannung der Wicklung gegen Erde steigt theoretisch auf den vierfachen, praktisch infolge der Dämpfung aber höchstens auf den 3,5fachen Wert. Glücklicherweise ist der Stossfaktor des Oels sehr hoch, so dass die Wicklung diese Beanspruchung leicht erträgt. Dagegen ist die Neutralpunktsdurchführung für die entsprechenden Ueberschlagsspannungen vorzusehen. Beim vollisolierten Transformator ist leider die Lösung für die resonanzfreie Wicklung noch nicht gefunden.

Ich konnte hier nur einen kleinen Ausschnitt aus den erwähnten Versuchen geben. Die Versuche werden weiter ausgedehnt werden auf verschiedene Wicklungs- und Isolationsarten, auf den vollisolierten Transformator, auf Wicklungen unter Öl usw. Es wird sich wohl später Gelegenheit bieten, die wichtigsten weiteren Ergebnisse bekanntzugeben.

Anschliessend mag noch eine kurze Betrachtung über die Ausbreitung der Stosswellen innerhalb der Anlagen von Wert sein. Ich habe mir früher vorgestellt, dass eine solche Welle ähnlich wie ein Wellenberg im Wasser fortschreite und vom Reflexionspunkt aus zurückwandere, mit andern Worten, dass also der Spannungsberg der Stosswelle innerhalb der Anlage wandere. Dem ist meistens nicht so. Nehmen wir von der Stosswelle z. B. an, dass sie innerhalb $\frac{1}{2} \mu s$ ihren Maximalwert und innert 40 bis 50 μs ihren Halbwert erreiche, in dieser Zeit also auf die Hälfte gesunken sei.

In 1 μs wandert eine Welle etwa 300 m, und wenn wir die Station vom Eintrittspunkt bis zu einem Reflexionspunkt (Transformator) als 300 m lang annehmen, so wandert die Welle hin und zurück 600 m und braucht dazu 2 μs . Die Spannung sinkt in dieser Zeit am Anfang der Anlage nur entsprechend $\frac{50\% \cdot 2 \mu s}{40 \mu s} = 2,5\%$. Mithin lastet in diesen

$2 \mu s$ auf der ganzen Anlage eine Spannung von $100 + 97,5\% = 197,5\%$ des Maximalwertes der Stosswelle. Eine Anlage, deren Länge mit der angenommenen von 300 m vergleichbar ist, liegt demnach nicht nur stellenweise, sondern in ihrer ganzen Ausdehnung verhältnismässig längere Zeit unter annähernd doppelter Spannung. Es ist nun durchaus nicht so, dass, genügend hohe Spannung der einziehenden Welle vorausgesetzt, an der Reflexionsstelle der Ueberschlag stattfinde; er wird dort einsetzen, wo Stützer oder Durchführungen mit ungünstiger Stoßspannungscharakteristik sich vorfinden. Ueberschläge können sogar an verschiedenen schwachen Stellen gleichzeitig auftreten.

Ich komme jetzt nochmals auf die *Wicklungen* zurück. An der im Vortrag erwähnten gestürzten Wicklung ist besonders interessant der Uebergang zwischen den Spulen, der über dem Umhüllungskreis der Wicklung nicht vorsteht. Dieses Ziel wird aber erreicht, nicht weil es sich um eine gestürzte Wicklung handelt, sondern weil der äussere Uebergang von einer Spule zur nächsten in rückläufigem Sinne versetzt ist, so dass man den Auftrag einer Windung erspart. Diese Anordnung lässt sich natürlich auch bei Spulen mit gelöteten oder geschweissten Verbindungen treffen und ist schon recht alt. Auf alle Fälle sind Einzelspulen in sich mechanisch härter und fester zuwickeln als gestürzte Wicklungen, die infolge ihrer nachträglichen Umstellung losen werden müssen. Natürlich vermeidet die gestürzte Wicklung die Verbindungsstellen. Doch haben diese Stellen in meiner langen Praxis praktisch nie zu Anständen geführt.

Tränkung. Die beste Tränkung der Isoliermaterialien ist ein hochqualifiziertes Öl. Jede andere Tränkung steht ihr nach. Wenn wir die Transformatoren mit Lack behandeln, so handelt es sich nicht um eine Imprägnierung der Isolation, sondern um einen Oberflächenüberzug, dieser auch nicht zur Abhaltung der Feuchtigkeit, sondern vielmehr zum Schutz der Oberfläche.

Kühlung. Herr Rochat hat eine Reihe Bilder vorgeführt über die verschiedensten Kasten und Kühlarten. Ich möchte diese Reihen nicht erweitern, sondern nur kurz das Prinzipielle der verschiedenen Kühlarten berühren und Ihnen im Bilde ein besonders eindrucksvolles Beispiel zu einer der Bauarten vorführen.

Die vorteilhafteste Kühlung ist jedenfalls die Selbstkühlung, die bei kleinen Transformatoren selbstverständlich, bei grösseren bis zu sehr hohen Leistungen möglich ist. Sie bedarf keiner Wartung und hat keinerlei Betriebsspesen (kein Wasserverbrauch, kein Leistungsverbrauch für Pumpen oder Ventilatoren). Möglich ist diese Kühlung mit Wellblech-, Röhren- und Radiatorenkästen. Der Vorteil des Röhrenkastens, seine Robustheit, ist unbestritten. Aber sein Gewicht und damit sein Preis sind höher als für Wellblech- oder Radiatorenkästen. Der Vorteil des Radiatorenkastens liegt darin, dass er für höhere Leistungen als der Röhren-

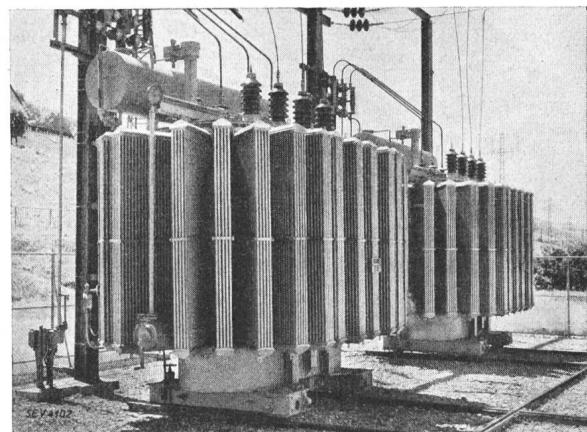


Fig. 17.
Drehstrom-Freilufttransformator mit natürlicher Kühlung,
10 000 kVA, 47 000/10 700 V, 50 Per./s.

und Wellblechkästen verwendbar ist und dass die Radiatoren sozusagen als Massenartikel herstellbar sind (Fig. 17). Gegenwärtig sind sogar Transformatoren für 20 000 kVA, 10/150 kV, 50 Per./s und natürlicher Luftkühlung in unseren Werkstätten in Arbeit.

Ein Transformator wird um so billiger, je stärker sein Aktivmaterial beansprucht wird. Aber diese allgemeine Regel gilt nur bedingt für den selbstgekühlten Transformator, denn je stärker die Beanspruchung des Materials, um so grösser die Verluste und damit die Kosten der Kühlung. Der Gewinn an Aktivmaterial wird deshalb zum grössten Teil kompensiert durch die Verteuerung der Kühlung. Wenn man die kapitalisierten Verluste in Anrechnung bringt, so ist bis zu gewissen Grenzen der im Material wenig beanspruchte Transformator weitaus billiger als der hoch beanspruchte. Man wird also kapitalisierte Verluste mitrechnen müssen, um den wirklich wirtschaftlichsten Transformator zu erzielen. Damit der Fabrikant in der Lage ist, diesen wirtschaftlichsten Transformator anzubieten, sollte er mit der Anfrage den Kapitalwert pro kW-Verluste erfahren dürfen.

Wo die Selbstkühlung nicht mehr ausreicht, wird zur kombinierten Selbst- und Gebläsekühlung gegriffen, die den Vorteil hat, dass bei kleinerer Belastung ohne Gebläse gearbeitet werden kann. Dort, wo der Ankaufspreis allein ausschlaggebend bleibt, ist die reine Gebläsekühlung mit Umlauf oder die Wasserkühlung, auch diese mit Oelumlauf, angebracht.

Es ist am Platze, noch kurz den selbstgekühlten Transformatoren zu berühren, der im Innern eines Gebäudes aufgestellt wird. Der Fabrikant hat seine Pflicht erfüllt, wenn nach SREM bei 40° C Aussentemperatur die Temperatur nicht über 90° C im Öl und nicht über 100° C in der Wicklung steigt. Nun muss aber der Erbauer der Zelle dafür sorgen, dass die Umgebungstemperatur des Transformatoren nicht höher als 40° C wird. Das ist für grosse, selbstgekühlte Transformatoren gar nicht so einfach. Pro kW Verluste ist ein Luftwechsel von mindestens 4 m³/min erforderlich. Die Zelle muss also recht gut gelüftet werden, sei es durch natürlichen Luftzug mit Kamin oder künstlich mit Ventilator. Dieser Sache wird manchmal erst zu spät genügend Aufmerksamkeit geschenkt und der Ersteller des Transformatoren kommt dann zu Unrecht in den Verdacht, einen Transformator geliefert zu haben, der zu heiss wird.

Reguliertransformatoren. Der Transformator mit Spannungsregulierung unter Last hat sich so rasch allgemein eingebürgert, dass heute die Mehrzahl aller Transformatoren mindestens auf einer Wicklung mit Regulierung versehen wird. Wenn das Problem der Anzapfungen mit vielleicht 5 bis 10 % Windungsänderung schon Vorsicht hinsichtlich Stromkräfte bedingt, so sind es die Regulierwicklungen mit 10 bis 20 % und mehr Windungsänderung in vermehrtem Masse. Herr Obering. Grob hat an dieser Stelle vor vier Jahren¹⁾ auf verschiedene Schaltungen hingewiesen und in der ETZ 1933, S. 719, hat H. Biermanns weitere Möglichkeiten angeführt.

Der Regulierschalter ist allgemein aus Stufenwähler und Lastschalter zusammengesetzt. Während früher der Schalter vom Transformator getrennt aufgestellt wurde, ist es heute Brauch, sie zusammenzubauen. Dabei kommt der Wähler ins Öl des Transformatoren oder in einen angebauten, vielleicht höchstens durch Wände vom Transformator getrennten Kasten, da er ja stromlos schaltet, während der Lastschalter, der die Stromunterbreche bewältigen muss, abgesehen bei Kleintransformatoren, immer in getrennte Oelfässer eingebaut oder in Luft angeordnet wird. Seine Kontakte müssen, obgleich in langen Zeiträumen, erneuert werden, da sie Abbrand erleiden. Das Isolieröl verschmutzt, es darf deshalb mit dem Transformatorenöl nicht in Zusammenhang stehen und ist ebenfalls der Erneuerung zu unterwerfen.

Bei den Herren Betriebsleitern bestand und besteht heute noch ein gewisses Bedenken gegen die Unterbringung des Wählers im Öl des Transformatoren. Wie wenig das Öl aber leidet, mag das Beispiel der grossen Gotthard-Lokomotiven der Bundesbahnen, der Ae 8/14 zeigen, bei der der Hochspannungsregulierschalter, der Wähler, im Öl des Transformatoren sitzt. Diese Lokomotiven, von denen je eine von MFO und von Brown Boveri geliefert wurde, haben heute^{*)} je ca. 300 000 km Weg gemacht, und da sie pro km im Mittel vier Schaltungen ausführen, ergeben sich weit über eine Million Schaltungen, ohne eine Revision im Innern des Transformatoren.

Zum Ueberschalten von Stufe zu Stufe haben wir von jehrer Widerstände vorgezogen. Herr Puppikofer hat vor ebenfalls vier Jahren an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass unter Umständen Ueberschalttdrosselpulen vorzuziehen sind, da bei Ausbleiben des Antriebsstromes ein Stehenbleiben auf dem Widerstande für längere Zeit ausgeschlossen, bei den Drosselpulen aber zulässig sei. Diesem Uebelstand ist mit dem Kraftspeicherantrieb, den man auf den ganzen Regulierschalter oder auch nur auf den Lastschalter wirken lässt, weitgehend abgeholfen.

Ein neues Problem ist aufgetaucht, es ist die Spannungsregelung gewisser Stellen der Niederspannungsverteilernetze. Nehmen wir beispielsweise an, aus einer Mittelspannungsleitung, die eine grössere Ortschaft mit elektrischer Energie versche, sei nahe beim Kraftwerk eine kleinere Ortschaft angeschlossen. Jene Leitung werde so reguliert, dass in der ersten Ortschaft die Spannung praktisch konstant gehalten sei. Dann wird die Sekundär-, die Verteilspannung der kleinen Ortschaft, stark mit dem Energiebezug des Hauptab-

nehmers schwanken. Es besteht also hier und ähnlich in vielen andern Fällen das Bedürfnis, automatisch die Gebrauchsspannung konstant zu halten oder nach Wunsch oder nach vorgezeichnetem Plan zu ändern, sie unabhängig zu machen von der Spannung der Speiseleitung. Dieses Bedürfnis der Regelung der Gebrauchsspannung befriedigt nun ein kleiner Regler, den Brown Boveri und insbesondere unser Herr Meyerhans in letzter Zeit entwickelte (Fig. 18). Dieser Regler wird als Drehstromregler speziell zur Rege-

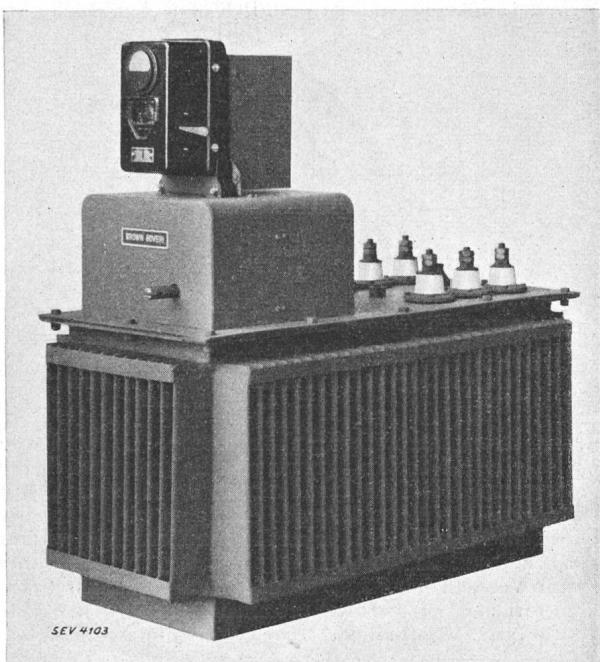


Fig. 18.
Brown-Boveri-Netzregler. Drehstrom, 200 kVA durchgehend,
435 bis 365/400 V, 50 Per./s, mit Antrieb und Relais.

lung der Spannung in 250- bis 400 V-Netzen hergestellt. Er besteht aus drei Einphasenreglern, die zusammengebaut in einem gemeinsamen Oelbad eine Drehstromgruppe bilden. Das Prinzip des Reglers zeigt Fig. 19:

Auf dem Kern eines Manteltransformators 1, dessen Mittlkern einen Querschlitz hat und der Länge nach durchbohrt ist, sitzen zwei im gleichen Sinne flach und weitläufig aufgewickelte Spiralspulen aus Bandkupfer 2, und zwar links

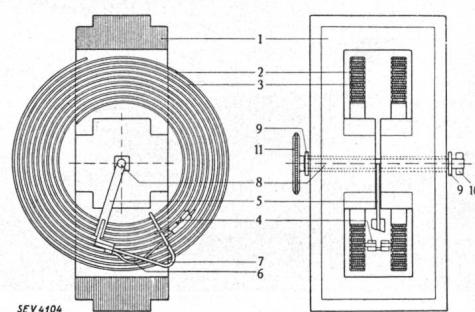


Fig. 19.
Prinzipbild des Reglers Fig. 18.
1 Kern
2 Regulierwicklung
3 Erregerwicklung
4 Stromabnehmer
5 Mitnehmerarm
6 Drehaxe
7

und rechts des Schlitzes angeordnet. Diese Spulen bilden die Regulierwicklung. Zwischen den beiden Spulen laufen auf den Schmalseiten der Kupferbänder die Spurkranzrollen des Stromabnehmers 4. Dieser wird von einer Axe 8 bewegt, die in der Durchbohrung der Säule sitzt und die einen Mitnehmerarm 5 trägt, der im Schlitz der Säule sich bewegt.

¹⁾ Siehe Bull. SEV 1931, Nr. 1, Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV über die Reguliertransformatoren.

^{*)} d. h. Mitte April 1934.

Federn pressen die Rollen auf die Windungen. Die beiden Spiralspulen sind angezapft und bei einer Anzapfung gleicher Windungszahl parallel geschaltet. Ueber dem Stromabnehmer ist die zweite Verbindung für die Parallelschaltung. Die beiden Spulen arbeiten also parallel. Zwischen den Bändern der Regulierwicklung sitzt die Erregerwicklung 3. Die Prinzipschaltung eines Einphasensystems zeigt Fig. 20. Der Stromabnehmer, der übrigens so gebaut ist, dass bei einem Kurzschluss kein Abheben, sondern ein um so stärkeres Andrücken der Rollen stattfindet, je grösser der Strom ist, arbeitet funkenlos und ist praktisch ohne Verschleiss, da

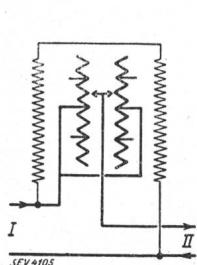


Fig. 20.
Prinzipschaltung des Spannungsänderung in
Reglers Fig. 19.

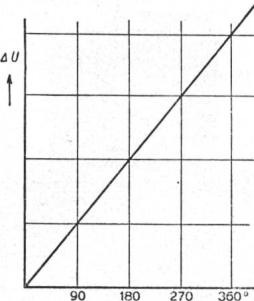


Fig. 21.
Spannungsänderung in
Abhängigkeit vom Ver-
stellwinkel.

ja keine Stromunterbrechungen stattfinden. Er wird von einem sehr empfindlichen Spannungsrelais gesteuert, dessen Spannungsempfindlichkeit im Minimum 0,3 % beträgt. Mit Rücksicht auf den Verschleiss des Antriebes wird man aber vielleicht auf 1 % einstellen. Diese Empfindlichkeit ist weitaus ausreichend, und da die Spannungsänderung fast geradlinig mit dem Verstellwinkel Fig. 21 und nicht wie beim Reguliertransformator mit Schalter plötzlich verläuft, so wird sie selbst für ganz empfindliche Augen vollständig unmerklich sein.

Diese Regler werden gegenwärtig bei 400 V für 100, 200 und 400 kVA Durchgangslast und für die Regelbereiche

$$\begin{aligned} &+5,5/-12, +8,5/-8,5 \text{ und} \\ &+12/-5,5 \% \text{ gebaut.} \end{aligned}$$

Transportfragen. Der Transformator bedarf der sorgfältigsten Trocknung. Jeder Tropfen Wasser, jede Spur von

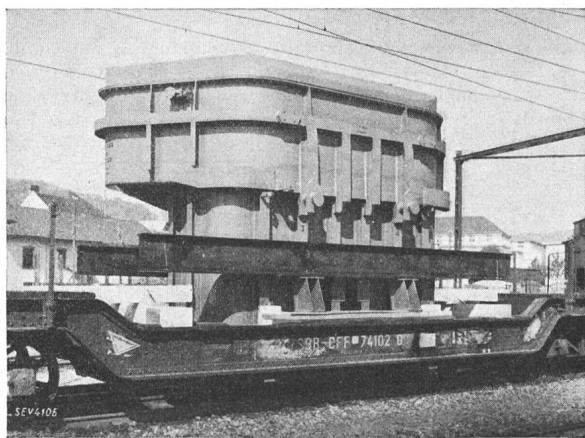


Fig. 22.
Drehstromtransformator mit Regulierung für Freiluftaufstellung, 10 000 kVA, 148 000/6600 + 10 × 82,5 Volt, 50 Per./s., mit Trockenluftfüllung, Regulierschalter und Klemmen abgebaut, fertig auf Bahnwagen verladen.

Feuchtigkeit ist Gift. Man wird es deshalb vermeiden, ihn feuchter Luft auszusetzen, auch während des Transportes. Das Bestreben des Konstrukteurs ist es nun, möglichst mit Öl zu spiedieren. Er sucht deshalb mit dem ölfüllten Transformator weder das zulässige Transportgewicht noch das Transportprofil zu überschreiten. Er passt die Form des Transformators dem Transportprofil weitgehend an.

Wenn das Öl die Transportfähigkeit behindert, so wird es getrennt spiediert. In diesem Falle werden alle Kastenöffnungen luftdicht geschlossen und ein trockenes Gas statt des Oles eingefüllt. Häufig setzt man das Gas unter Druck, um bei Abkühlung den Aussendruck nicht zu unterschreiten, da sonst die Gefahr des Ansaugens von Feuchtluft besteht. Aber dieses Verfahren bewährt sich nicht besonders, da bei kleinen Undichtheiten der Druck bald verschwunden ist. Neuerdings sorgt man dafür, dass, wenn sich Unterdruck bilden will, Trockengas nachfließt. Der Transformator Fig. 22 wurde so spiediert und ohne weitere Trocknung dem Betrieb übergeben. Er musste wegen des an den Bahntransport anschliessenden Landtransports mit niedrigstem Gewicht auf den Weg gebracht werden. Auf diese Weise ist es möglich, bis zu den höchsten Spannungen spiedieren zu können, ohne nachtrocknen zu müssen.

Röhrenkasten überschreiten in der Breite im allgemeinen bis zu hohen Leistungen das Bahnprofil nicht. Bei Radiatorenkästen werden, wenn nötig, die Anschlußstützen mit Ventilen versehen, die gestatten, den Transformatoren zwar ohne Radiatoren, aber doch mit Öl zu versenden, oder, falls er mit Trockengas spiedert wurde, ihn sofort nach Ankunft wieder zu füllen und die Radiatoren erst nachher anzubringen.

H. Schneider, Maschinenfabrik Oerlikon (MFO): Anschliessend an den Vortrag von Herrn Dr. Goldstein möchte ich über die Anschauungen, die sich bei der MFO im Laufe der letzten Jahre im Transformatorenbau herausgebildet haben, berichten.

Der Eisenkörper. Sollen die Joche stumpf aufgesetzt oder sollen sie eingeschachtelt werden? Die MFO baut ihre Transformatoren mit wenigen Ausnahmen mit stumpf aufgesetzten Jochen, und zwar aus folgenden Gründen: Genaue Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bezüglich Preis mit dem Verschachteln keine merklichen Vorteile erreichen lassen; es ist aber möglich, dass andere Firmen mit anderen Fabrikationsmethoden zu einem abweichenden Ergebnis kommen. In den Eisenverlusten zeigen beide Bauarten bei einwandfreier Fabrikation keine Unterschiede. Die Leerlaufströme sind besonders bei kleineren Leistungen für die geschachtelte Stoßfuge etwas kleiner, absolut einwandfreie Ausführung vorausgesetzt; da diese Differenz aber nicht sehr gross ist, kann man bei entsprechendem Entwurf des Transformatoren gleiche Leerlaufströme für die gestossene Ausführung erreichen wie für die geschachtelte. Die geschachtelte Ausführung erlaubt etwas geringere Bauhöhe des Transformatoren infolge Wegfalls der Presstraversen; in gewissen Fällen ist dies von Bedeutung, z. B. beim Bahntransport sehr grosser Transformatoren. Die Ausführung mit stumpf aufgesetzten Jochen hat aber den Vorteil denkbar einfachster Montage und Demontage, was von vielen Betrieben sehr geschätzt wird. Die Betriebssicherheit beider Ausführungen dürfte bei einwandfreier Herstellung gleichwertig sein. Es wurde allerdings schon bemerkt, dass bei sehr grossen Leistungen die gestossene Ausführung eher zu Eisenkrankheiten neige. Bei einwandfreier Herstellung trifft dies erfahrungsgemäss bestimmt nicht zu.

Zusammenfassend möchte ich sagen, dass wir zwischen den beiden Ausführungsarten keine entscheidenden technischen oder preislichen Differenzen gefunden haben. Da aber das leichte Montieren und Demontieren in vielen Fällen von Wichtigkeit ist und von vielen Betrieben geschätzt wird, blieben wir bei den stumpf aufgesetzten Jochen.

Das Problem der Kühlung der Eisenkörper hat eine wesentliche Erleichterung erfahren, seit hochlegierte Dynamobleche von 1,3 bis 1,1 W erhältlich sind und im Transformatorenbau fast allgemein verwendet werden. Wenn Kühlslitze erforderlich sind, so werden diese, wie Herr Kübler zeigte, senkrecht zur Blechrichtung angeordnet. In den Jochen, die meistens kleinere Sättigung haben, kann man bis zu grösseren Leistungen ohne Kühlslitze auskommen.

Sättigung. Es gibt Werke, besonders in Deutschland, die ausserordentlich tiefe Sättigungen verlangen, 12 000 bis 12 500 Linien. In der Schweiz wurde stets erheblich höher gegangen, in den Säulen mindestens bis 14 000 Linien. Die

Erfahrung lehrte uns, dass man bei der Wahl der Sättigung im allgemeinen zu ängstlich ist.

Isolation. Bei höheren Spannungen und der hierbei fast durchwegs angewendeten konzentrischen Wicklungsanordnung ist man mehr und mehr dazu übergegangen, zwischen Ober- und Unterspannung nicht nur einen, sondern mehrere dünne Isolierzylinder anzubringen und gegen beide Joche mit den sogenannten Isolierkragen abzuschirmen. Es konnte dadurch besonders bei höheren Spannungen erheblich an Material gespart werden. Solche Isolierkragen sind, wie schon Herr Kübler erwähnte, im Prinzip sehr alt.

Die Drahtisolation wird vielfach derart gewählt, dass die Eingangswindungen während weniger Sekunden die volle verkettete Spannung aushalten können, die normal isolierten Windungen etwa 50 bis 60 % davon. Damit hat man jedenfalls fast etwas über das Ziel hinausgeschossen. Wir haben viele grössere, ältere Transformatoren, die bedeutend schwächere Windungsisolation aufweisen, seit langer Zeit in anstandslosem Betrieb. Man darf den grossen Entladeverzug von festen Isoliermaterialien unter Oel bei den kurzzeitigen Ueberspannungsbeanspruchungen sicher etwas stärker in Betracht zu ziehen.

Sprungwellenprobe. Wir finden bei der Sprungwellenprobe nach SEV im Versuchskanal fast keine Defekte. Wenn aber ein solcher vorlag, hatte man stets den Eindruck, dass derselbe auch bei der 5-Minuten-Probe mit selbsterzeugter doppelter Spannung zum Vorschein gekommen wäre. Man kann sich allerdings, wie dies vielfach geschieht, auf den Standpunkt stellen: Nützt diese Probe nichts, so schadet sie auch nichts! Was allerdings wirtschaftlich nicht gerechtfertigt ist.

Dass man übrigens mit der Sprungwellenprobe nach SEV auch Schwierigkeiten haben kann, möge folgender Fall illustrieren: An einem ganz grossen Transfator war die Sprungwellenprobe mit 190 kV vorzunehmen. Jedesmal beim Ansprechen der Kugelfunkenstrecke schlügen die Stützisolatoren des Erdungswiderstandes über. Diese Isolatoren hatten aber eine Ueberschlagsspannung von 400 kV. Der über hochohmigen Widerstand geerdete Pol des Transfators ist also beim Ansprechen der Funkenstrecke nicht auf die 190 kV angestiegen, sondern hat darüber hinausgeschwungen bis auf ca. 400 kV. Durch Verkleinern des Erdungswiderstandes hätte man diese außerordentliche Ueberspannung wohl herabsetzen können, dann hätte die Probe aber soviel Energie benötigt, wie sie von einer normalen Sprungwellen-Versuchsanlage nicht geliefert werden kann. Es blieb schliesslich nichts anderes

übrig, als die Isolation des Erdungswiderstandes für eine Ueberschlagsspannung von ca. 480 kV weiter zu erhöhen, um die Ueberschläge zu vermeiden. Die Ueberspannungen bis 400 kV am nicht geprüften Pol mussten in Kauf genommen werden, bei der Sprungwellenprobe mit 190 kV.

Kurzschlussfestigkeit. Gute Erfahrungen wurden mit individuellem Pressen jeder Wicklung mit starken Druckfedern gemacht. Fig. 1 zeigt die prinzipielle Anordnung. Die Pressfedern werden in einem Eisenrohr geführt und pressen über einen Kolben und Stahlring auf die Wicklung. Das Innere des Führungsrohrs füllt sich durch ein kleines, oben angebrachtes Loch mit Oel. Wenn nun von der Wicklung her ein Stoß auftritt, kann das Oel im Rohr durch die kleine Öffnung nicht rasch genug entweichen, und da es inkompresibel ist, findet eine wirksame Entlastung der Federn statt.

Die Federn haben den Zweck, die Wicklungen stets unter Druck zu halten, da bei jahrelangem Erwärmen und Erkalten ein gewisses Schwinden des vielen Isoliermaterials stets möglich ist, auch wenn man noch so gut vorgepresst hat; die Kurzschlußtöße, die nur von kurzer Dauer sind, werden von dem Oelkatarakt aufgenommen.

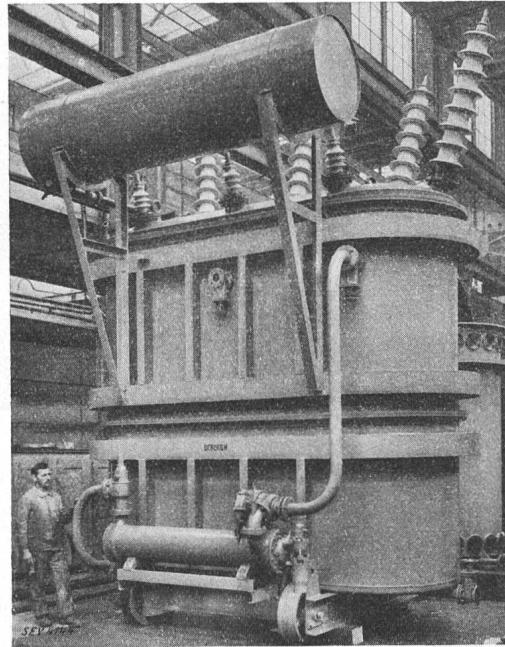


Fig. 2.
Transformator mit angebauter Oelumlauf-Wasserkühlung.

Die richtige Anordnung von Anzapfungen ist für die Kurzschlussfestigkeit von grösster Wichtigkeit. Solange die Anzapfungen in mässigen Grenzen liegen, können sie an beiden Säulenenden oder in der Säulenmitte angeordnet werden. Sobald der Bereich grösser wird, ziehen wir vor, die Anzapfungen in eine besondere Regulierspule, die meistens zu innerst am Kern angebracht wird, zu verlegen, was besonders bei Reguliertransformatoren mit Lastschaltern in Frage kommt. Es können dann die Anzapfwindungen auch

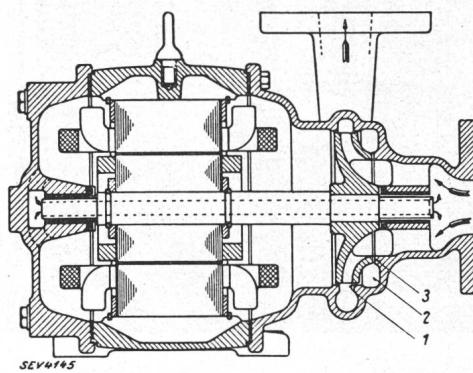


Fig. 3.
Oelpumpe zu Fig. 2.

ohne weiteres reversiert werden, ohne dass man grosse Streuungen oder grosse Kurzschlusskräfte zu befürchten braucht.

Kühlung. Durch feine Unterteilung der Wicklung und gut dimensionierte Kühlkanäle kann man ohne weiteres sehr hohe zulässige Kupferbeanspruchungen erreichen, ca. 5 bis 6 A/mm². Diese Möglichkeiten lassen sich aber meistens aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht ausnützen. Der

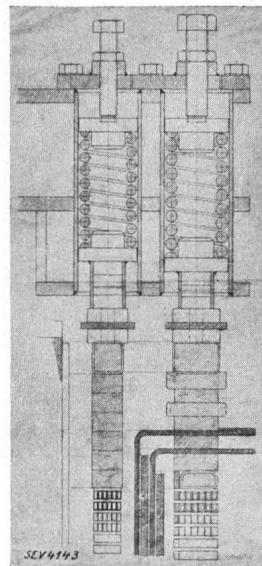


Fig. 1.

Wicklungspressung mit Druckfedern und Oelkatarakt.

teurere Transformator mit kleineren Verlusten ist vielfach der wirtschaftlichere.

Herr Dr. Goldstein hat für natürliche Oelkühlung die Wärmeabgabe für Wellblech- und Röhrenkessel miteinander verglichen. Wir haben ungefähr die gleichen Wärmeabgabe-

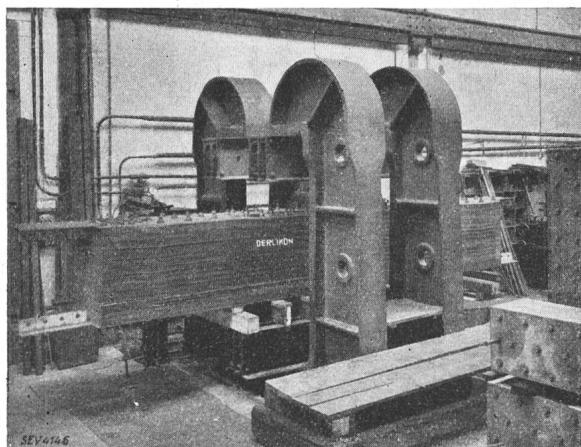


Fig. 4.
Pressen eines Transformator-Joches mit hydraulischer Presse
für 500 t Pressdruck.

zahlen feststellen können. Dagegen hat sich gezeigt, auch Herr Kübler wies darauf hin, dass bei guter Einrichtung die Wellblechoberfläche viel billiger wird als die Röhrenoberfläche, so dass der Wellblechkessel meistens erheblich billiger wird, obwohl er eine um ca. 50 % grössere spezifische Kühlfläche erfordert als der Röhrenkessel.

Bei der bekannten Oelumlauf-Wasserkühlung baut die MFO Transformator, Kühlagggregat und Signaleinrichtung

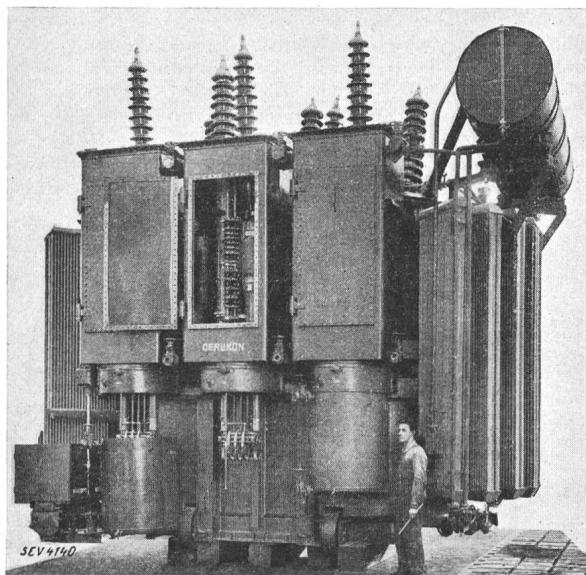


Fig. 5.
Stufentransformator, 10 000 kVA, 135 000 V \pm 3,7 %/62 575 V \pm 10 · 1275 V, 50 Per./s., Stufenschalter mit Ueberschalttdrosselspule auf der 62-kV-Seite.

seit jeher zu einer Einheit zusammen. An Ort und Stelle braucht man nur das Kühlwasser und die Signalleitungen anzuschliessen. Fig. 2 zeigt einen solchen Zusammenbau. Bei dieser Gelegenheit möchte ich auf die originelle Oelpumpe hinweisen, die in Fig. 2 und, im Detail, in Fig. 3 ersichtlich ist. Das Pumpengehäuse ist mit dem Lagerschild

vereinigt; der Motor läuft im Oel. Dadurch fallen die Stopfbüchsen weg.

In vielen Fällen ist Kühlwasser nicht vorhanden oder aus anderen Gründen nicht zulässig. Man geht dann, falls

natürliche Kühlung nicht mehr ausreicht, zur Pressluftkühlung über, womit z. B. die Transformatoren in Ryburg-Schwörstadt ausgerüstet sind²⁾.

Aus Fig. 4 mag noch hervorgehen, welch mächtige Einrichtungen der Bau grosser Transformatoren erfordert.

H. Puppikofer, Maschinenfabrik Oerlikon (MFO): Ich möchte mich kurz zur Frage der Stufenschalter äussern, nachdem ich Gelegenheit hatte, auf diese Frage vor vier Jahren an einer Diskussionsversammlung des SEV näher einzutreten³⁾. Unsere Erfahrungen lehrten, dass das System mit als Spannungsteiler arbeitendem induktivem Ueberschaltwiderstand bis zu Nennspannungen von 100 kV und Einheitsleistungen von 30 000 kVA anwendbar ist. Fig. 5 zeigt z. B. einen Stufentransformator von 10 000 kVA Leistung, der auf der 62 kV-Seite mit einem solchen Stufenschalter reguliert wird. Der

Stufenschalter hat in strengen Zeiten bis zu 2000 Schaltungen pro Tag gemacht⁴⁾. Das erwähnte Schaltsystem mit Spannungssteiler hat den Vorteil, dass bei eventuellem Steckenbleiben

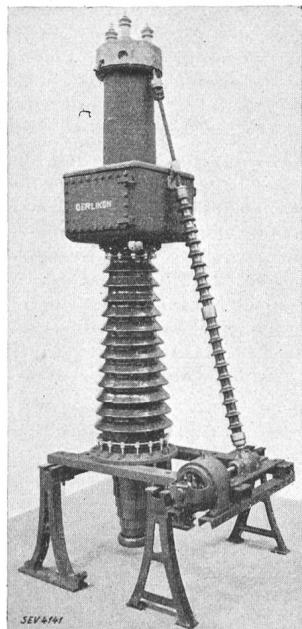


Fig. 6.
Pol eines Stufenschalters für
150 kV mit Ohmschem Ueber-
schaltwiderstand.

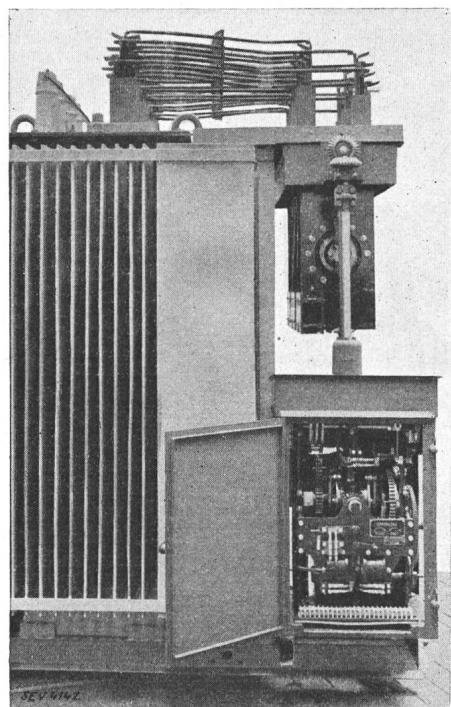


Fig. 7.
Reguliertransformator mit Plattenstufenschalter
(rechts oben).

²⁾ Siehe Bilder und Beschreibung in Bull. SEV 1931, Nr. 4, S. 78.

³⁾ Bull. SEV 1931, Nr. 1, S. 2 und S. 12.

⁴⁾ Ueber Schalthäufigkeit von Stufenschaltern siehe AEG-Mitt. 1934, Heft 2, S. 48/49.

des Stufenschalters weder dieser noch der Transformator Schaden nehmen kann; es ist also kein Kraftspeicherantrieb nötig. Bei hohen Nennspannungen über 100 kV führt aber dieses Schaltsystem zu teuren Konstruktionen und es musste daher zugunsten der Ohmschen Ueberschaltwiderstände verlassen werden. Fig. 6 zeigt einen Pol eines Stufenschalters für 150 kV, bei dem nicht nur der Lastschalter, sondern auch der Wähler von Erde isoliert aufgestellt wurde, und zwar beide auf der Transformatorordurchführung. Dadurch konnte der Oelinhalt pro Pol auf 350 Liter, d. h. auf ca. $\frac{1}{7}$ reduziert werden. Der Wähler sitzt im viereckigen Kasten und ist infolge der besonders hohen Prüfspannung (= Nennspannung zwischen den einzelnen Stufen) als Käfig ausgeführt. Die Schwierigkeiten preislicher Natur, mit denen die Schweizer Firmen auf dem Weltmarkt zu kämpfen haben, zwangen uns, auch für kleine Nennspannungen, bis zu 60 kV, und mässige Ströme, bis 400 A, zum Ohmschen Ueberschaltwiderstand

überzugehen. Fig. 7 zeigt den neuen Plattenstufenschalter (rechts oben) mit seinem Kraftspeicherantrieb (rechts unten). Seinen Namen hat er von der Konstruktion des Wählers, der pro Pol aus zwei Platten aus Hartpapier besteht, wie sie bei Regulierwiderständen üblich sind. Zwischen den Platten sind das Getriebe und die zwei Lastschalter untergebracht, während der Ueberschaltwiderstand links unten am Stufenschalter sichtbar ist.

(Herr Puppikofer erläuterte an Hand von Bildern und Schemata den Kraftspeicherantrieb der MFO und eine Reihe von automatischen Reglern zur Steuerung der Stufenschalter; aus Raumangst muss die Wiedergabe dieser Ausführungen unterbleiben. — Red.)

Der Vorsitzende dankt den Herren Diskussionsrednern bestens für ihre wertvolle Mitwirkung.

Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

Empfangsstörungen durch Zündanlagen von Verbrennungsmotoren.

621.396.823

Es ist bekannt, dass die Zündanlagen von Verbrennungsmotoren die Ursache von Radiostörungen sind, besonders im Kurzwellengebiet. Daneben wurden aber auch im Gebiete der längeren Wellen Störungen beobachtet, deren Ursache ebenfalls in der Zündanlage vermutet wurde, aber nicht einwandfrei nachgewiesen werden konnte. Zur eindeutigen Klärung dieser Fragen wurden die an den Zündleitungen auftretenden Spannungsschwingungen mit dem Kathodenstrahlzosillographen aufgenommen. Der Motor besaß Magnetzündung mit einem Schleifkohlenverteiler. Das sozusagen «normale» Oszillogramm zeigte folgenden Verlauf: Nach der Zündspitze (Zusammenbruch der Spannung) brennt eine lichtbogenähnliche Entladung bis zum Ende der Energielieferung durch den Zünder, d. h. ca. $\frac{3}{1000}$ s lang. Beim Erlöschen des Lichtbogens gibt es noch eine durch die elektrischen Konstanten der Zündanordnung gegebene stark gedämpfte Schwingung. Neben diesem einfachen Zündverlauf können nach der Zündspitze die verschiedensten Entladungsformen auftreten, ohne dass an dem äusseren Verhalten des Motors etwas geändert wird. So reist die Entladung oft mehrfach ab, zündet wieder usw. Diese «Rückzündungen» erfolgen in den verschiedensten Abständen und die Spannung zeigt jedesmal die abklingenden Wellenzüge des Einschwingens. Die Wellenzüge pflanzen sich als Wandlerwellen auf den Zündleitungen fort; sie sind die Ursachen

der Kurzwellenstörungen ($f = 2 \cdot 10^7$ bis 10^8 Per./s, $\lambda = 3$ bis 15 m). Die Wiederkehr der Kurzwellenzüge (Gruppenfrequenz) liegt beim Auftreten von «Rückzündungen» im Gebiete der längeren Wellen, da ihr Zeitabstand 1 bis $10 \mu\text{s}$ beträgt ($\lambda = 300$ bis 3000 m). Beim Fehlen der «Rückzündungen» ist die Gruppenfrequenz bloss einige Hundert Per./s; zur Störung im interessierenden Wellenbereich kämen also nur hochzählige Oberwellen in Frage, deren Amplitude dann verschwindend gering ist. Wenn aber zu folge der zufälligen Verhältnisse am Motor und an den Kerzen Rückzündungen auftreten, mit einer Gruppenfrequenz, entsprechend der zu empfangenden Wellenlänge, so sind Langwellenstörungen möglich. Dies bestätigt auch die bekannte Tatsache, dass bei Flugmotoren je nach dem Kerzensatz Langwellenstörungen aufraten oder nicht. — Flugzeugmotoren verwenden statt einem Schleifkohlenverteiler einen Ueberschlagsverteiler. Diese Verteilerfunkentstörung ist eine zusätzliche Ursache für häufiges Unterbrechen und Wiederzünden des Kerzenlichtbogens; so kann schon das Aufladen der Zündleitung in verschiedenen Stößen erfolgen, jeder wieder von einem Kurzwellenzug gefolgt. Auch der Abstand dieser Ladestöße entspricht einer Langwellenstörung. Die geschilderte stossweise Ladung der Zündkerze mit Kabel tritt nicht häufig auf und ist von den zufälligen Verhältnissen am Motor abhängig; dies erklärt die Unreproduzierbarkeit von Langwellenstörungen bei solchen Zündanlagen. — (H. Viehmann, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Bd. 43, Nr. 3, S. 85.)

H. M.

Wirtschaftliche Mitteilungen.— Communications de nature économique.

Absatzmöglichkeit für Kühltruhen.

621.57 : 659(73)

Nach A. Friedrich¹⁾ sollen in den USA heute ca. 5,5 Millionen Haushaltkühltruhen im Betriebe sein, d. h. ca. ein Kühltruhe auf 24 Einwohner. Wenn wir es in der Schweiz auf eine ebenso grosse Verbreitung des Haushaltkühltruhen bringen, so entspricht das im ganzen für die Schweiz ca. 167 000 Kühltruhen, die pro Jahr ca. 70 Millionen kWh an Tagesenergie verbrauchen würden, wenn sie nach dem Kompressionsprinzip gebaut sind, oder ca. $250 \cdot 10^6$ kWh Nachtenergie, wenn sie nach dem Absorptionsprinzip funktionieren.

O. Gt.

Abgabe von Gratisenergie in Milwaukee (USA).

659(73)

Die «Electrical World» vom 29. September 1934 meldet, dass die Milwaukee Electric Railway & Light Co., um den

¹⁾ ETZ, 27. Sept. 1934, S. 960.

Verbrauch elektrischer Energie zu stimulieren, allen ihren Kleinabonnenten während zwei Monaten (Mai und Juni) alle Energie, die sie über den März-Konsum hinaus mehr verbraucht haben, gratis abgegeben hat. Die im ganzen abgegebene Energie soll 6,6 Millionen kWh betragen haben. Leider sagt «Electrical World» nicht, welchen Einfluss diese Vergünstigung auf den Konsum in den folgenden Monaten gehabt hat, während welcher wieder alle Energie bezahlt werden musste.

O. Gt.

110 Akkumulator-Strassenfahrzeuge im Kanton Zürich.

31(494) : 629.113.65

Das Statistische Bureau des Kantons Zürich veröffentlichte im September d. J. eine Publikation «Die Motorfahrzeuge im Kanton Zürich Ende 1933», der wir folgende Tabelle entnehmen: