

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 35 (1944)  
**Heft:** 22  
  
**Artikel:** Neue Bauweisen bei Transformatoren und Drosselspulen  
**Autor:** Meyerhans, A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1061610>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

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

gestellt werden. Die Grösse dieser Kondensatoren richtet sich nach der inneren Kapazität des Transformators. Da diese jedoch klein ist, Grössenordnung  $1/1000 \mu\text{F}$ , gewähren schon relativ kleine Kapazitäten einen guten Schutz.

b) Bei einem belasteten Transformator sind die übertragenen Spannungen klein, wenn die Belastung, worunter auch lange Leitungen und lange Kabel zu verstehen sind, *einen kleinen Wellenwiderstand hat*.

Eine Gefährdung von Maschinen wird durch die Erdkapazitäten der angeschlossenen Zuleitungen, z. B. der Sammelschiene, Stützer usw., die den Anstieg der übertragenen Spannung und damit die Gefahr von Windungsschlüssen stark herabsetzen, vermindert.

Daraus erklären sich die eingangs erwähnten günstigen Erfahrungen, die im allgemeinen mit Transformatoren zum Schutz der Maschinen gemacht wurden.

### Diskussion

**Vorsitzender:** Ich danke Herrn Dr. Wellauer verbindlichst für seinen Vortrag, der ohne viel Theorie uns einen Einblick in das Verhalten des Transformators gegen Ueberspannungen gab und gleichzeitig auch die Mittel erörterte, wie den Ueberspannungsgefahren begegnet werden kann.

Dr. H. Meyer, Ingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden, berichtet über die eingehenden Untersuchungen, die bei Brown, Boveri in den letzten Jahren über denselben Gegenstand gemacht wurden. Wir verzichten hier auf die Wiedergabe seines Votums, da darüber später im Bulletin des SEV ein eingehender Bericht erscheinen soll.

Prof. Dr. K. Kuhlmann erkundigt sich, ob zu den Versuchen ein Transformator mit Scheibenwicklung oder mit Zylinderwicklung benutzt wurde.

Dr. M. Wellauer, Referent: Sämtliche Messungen wurden an Transformatoren mit Zylinderspulen durchgeführt, da

Transformatoren mit Scheibenspulen bei uns relativ selten ausgeführt werden.

Prof. Dr. K. Kuhlmann fragt, ob die Unterspannungswicklung aussen oder am Kern lag.

Dr. M. Wellauer, Referent: Bei den gezeigten Messungen lag die Unterspannungswicklung zwischen Oberspannungsspule und dem Eisenkern. Die Verhältnisse werden aber prinzipiell nicht anders, wenn die Unterspannungswicklung aussen liegt. Natürlich wird auch die Stoßspannung von der Unterspannungs- auf die Oberspannungswicklung übertragen, wenn die Unterspannungswicklung angestossen wird. Liegt die Unterspannungswicklung aussen, so ändert sich das Kapazitätsverhältnis  $C'/C''$ . Im allgemeinen ist in diesem Falle die Erdkapazität  $C''$  der Unterspannungswicklung relativ klein und deshalb wird der kapazitive Anfangsstoss  $A$  auf die Unterspannungswicklung grösser sein als bei der normalen Anordnung.

W. Ringger, Ingenieur der Emil Haefely & Co. A.-G., Basel: Wir haben vernommen, aus was für Komponenten sich die auf die Unterspannungswicklung übertragene Ueberspannung zusammensetzt, wenn eine Stoßspannung auf die Meßspannungswicklung auftrifft. Es wäre interessant zu wissen, wie sich diese Komponenten mit der sich im ersten Moment einstellenden kapazitiven Spannungsverteilung in der Oberspannungswicklung verändern, und was für den Grenzfall einer praktisch schwingungsfreien Oberspannungswicklung auf der Unterspannungsseite zu erwarten ist.

Dr. M. Wellauer, Referent: Der kapazitiv übertragene Anfangsspannungsstoss ist unabhängig von der Anfangsspannungsverteilung in der angestossenen Wicklung. Im Zusammenhang mit der Frage der Stoßspannungsübertragung bei schwingungsarmen Wicklungen spielt die Erdung des Sternpunktes eine wesentliche Rolle. In Amerika sind die schwingungsarmen Transformatoren meistens mit geerdetem Sternpunkt im Betrieb. In diesem Falle ist keine Sternpunktschwingung vorhanden und da beim schwingungsarmen Transformator die Ausgleichsschwingungen klein sind, reduziert sich die übertragene Stoßspannung auf den kapazitiven Anfangsstoss.

Bei isoliertem Sternpunkt liegen die Verhältnisse weniger günstig, denn selbst bei relativ schwingungsarmen Anordnungen tritt immer noch eine hohe Sternpunktschwingung auf, die auf die Unterspannungswicklung übertragen wird.

Der Vorsitzende dankt den Diskussionsrednern für ihre Voten und Herrn Dr. Wellauer für die Beantwortung der Fragen. Er gibt das Wort Herrn A. Meyerhans.

## Neue Bauweisen bei Transformatoren und Drosselspulen

Vortrag, gehalten an der Transformatorentagung des SEV vom 13. Juli 1944 in Zürich,  
von A. Meyerhans, Baden

621.314.21  
621.318.42

Mit dem Wachsen von Spannung und Leistung der Transformatoren erreicht man allmählich die Grenzen der Ausführbarkeit der üblichen Bauweisen. Im folgenden werden zwei Wege beschrieben, auf denen wohl künftige Aufgaben gelöst werden können. Der eine besteht in der Anwendung kabelähnlicher Isolationen mit dem neuentwickelten Spreizflansch. Dadurch werden ohne Erhöhung der spezifischen Belastung der aktiven Teile grosse Materialersparnisse erzielt. Der andere Weg ist die Verwendung der radial geblechten Transformatorensäulen mit seitlichen Jochen, die unter anderem eine wesentliche Verkleinerung der Bauhöhen ergeben, so dass, wie ein Entwurf zeigt, eine Einphaseneinheit für eine 240-MVA-Gruppe von 400 kV bahnprofilgängig wird. Sowohl der Spreizflanschwickel als auch der radialgeblechte Kern haben sich bereits praktisch bewährt.

### I.

Bei einem so einfachen Gebilde, wie es der Transformator an sich darstellt, wird man kaum mehr sehr tiefgreifende Verbesserungen erwarten, sind doch die magnetischen und elektrischen Eigen-

En raison de l'augmentation de la tension et de la puissance des transformateurs, les limites de construction des types usuels sont peu à peu atteintes. Pour résoudre les problèmes futurs, l'auteur décrit deux nouvelles méthodes. La première consiste à utiliser des cylindres d'isolation à bride écartée qui permettent une grande économie de matière sans augmenter la charge spécifique des parties actives. La seconde méthode est de prévoir des noyaux à tôles radiales avec culasses latérales, ce qui réduit beaucoup la hauteur de la construction. Une unité monophasée d'un groupe de transformateurs de 240 MVA pour 400 kV de ce type peut être transportée complètement montée par chemin de fer, ainsi que le montre un projet de ce genre. Les cylindres d'isolation à bride écartée et les noyaux à tôles radiales ont déjà fait leurs preuves en pratique.

schaften von Eisenkern und Wicklung nun schon seit einigen Jahrzehnten praktisch genau bekannt.

Die Hersteller von Transformatorenblech konnten zwar in zähem Bemühen die Verlustziffer schrittweise verringern. Dies erleichterte beim

Grosskern die Kühlprobleme bedeutend und ent-  
hob den Konstrukteur der Sorge, neue, kompli-  
zierte Mittel zur Einhaltung der maximal zuläs-  
sigen Eisen-Erwärmung anwenden zu müssen. Die  
Flussdichte jedoch konnte mit Rücksicht auf die  
Sättigungs-Erscheinungen nicht mehr, oder wenigs-  
tens nicht mehr viel gesteigert werden. Ja, in den  
letzten Jahren war man bei der Wahl der Fluss-  
dichte eher zurückhaltend, eine Folge der zeitge-  
mässen Verlustbewertung.

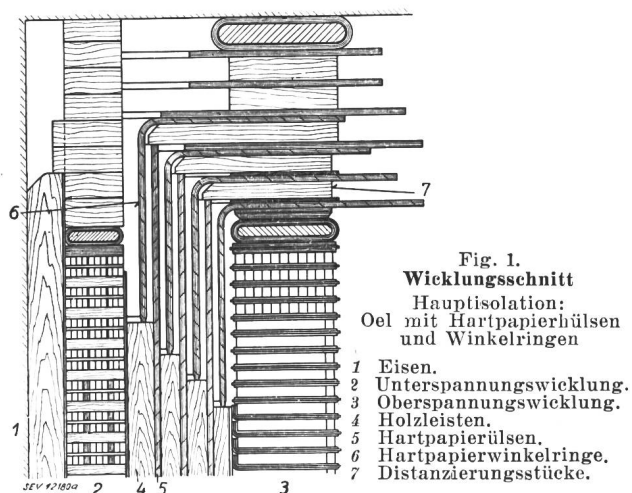
Die spezifische Drahtbelastung könnte bei reich-  
licher Unterteilung der Leiterquerschnitte und  
durch Forcierung des Kühlmittelstromes, wenn nur  
die Erwärmung zu beachten wäre, noch erheblich  
vergrössert werden. Auch hier setzt aber die heute  
übliche Verlustbewertung eine Grenze, so dass bei  
der Stromdichte sogar in manchen Fällen ein Ab-  
bau nötig wird.

So blieb die Isolation, bei der eine beträchtlich  
höhere «Belastung» noch möglich schien.

Beim kleinen Netztransformator mit Oberspan-  
nungen bis etwa 20 kV ist hier allerdings nicht  
mehr viel herauszuholen. Die bei diesem üblichen  
Wicklungsabstände sind für den natürlichen Kühl-  
mittelstrom nicht zu reichlich. An einen nennens-  
werten Abbau ist kaum zu denken. Es wäre auch  
im gesamten Materialaufwand beim kleinen Netz-  
transformator durch Einsparungen an der Isolation  
nicht mehr viel zu gewinnen.

Anders lagen die Dinge beim Grosstransformator  
mit Oberspannungen von 50...220 kV.

Fig. 1 zeigt einen typischen Wicklungsschnitt  
eines 150-kV-Transformators von etwa 25 000 kVA.  
Im verhältnismässig grossen Zwischenraum der



Wicklungen sind in regelmässigen Abständen Hart-  
papierhüllen angeordnet. An den Wicklungsenden  
sind zwischen die Hüllen Winkelringe aus Hart-  
papier eingeschoben, deren Flanschen als Quer-  
isolation gegen die Joche dienen. Das Ganze stellt  
eine Oelisolation mit Barrieren dar. Hüllen und  
Winkelringe sind mit Leisten aus imprägniertem  
Buchenholz, teilweise auch Preßspan oder Trans-  
formerboard, distanziert.

Die Dielektrizitätskonstante des Oeles beträgt  
etwa 2,2, diejenige des Hartpapiers etwa 4...4,5.

Die elektrische Beanspruchung verteilt sich im um-  
gekehrten Verhältnis zu den Dielektrizitätskonstan-  
ten. Die Oelstrecken übernehmen also doppelt so  
viel kV/cm wie die Hartpapierbarrieren. Die hö-  
here Durchschlagsfestigkeit des Hartpapiers ist  
damit bei der Isolationsprobe und natürlich auch  
im Betriebe nicht ausgenützt, solange die Oelstrek-  
ken standhalten. Erst wenn z. B. infolge Brücken-  
bildung die Oelstrecken durchschlagen, wird die  
Festigkeit des Hartpapiers auf die Probe gestellt.  
Die Barrieren wurden demnach üblicherweise auch  
so bemessen, dass sie allein kurzzeitig die ganze  
Prüfspannung ertragen konnten. Der Abstand zwi-  
schen den Wicklungen musste aber doch so berech-  
net werden, dass unter Berücksichtigung der Feld-  
form das Öl seiner Beanspruchung standhielt.

Zwischen den Wicklungen befand sich damit  
viel mehr Öl, als für die Kühlung erforderlich  
wäre. Je höher die Prüfspannung, desto «massge-  
bender» in des Wortes wahrster Bedeutung wurde  
dieser Wicklungsabstand aber für die Dimensionie-  
rung des ganzen Transformators mit Rücksicht auf  
die Streuspannung. Wir werden darauf noch zu-  
rückkommen.

Ein Blick auf die Höchstspannungs-Kabelisola-  
tion hat wohl manchen Konstrukteur veranlasst,

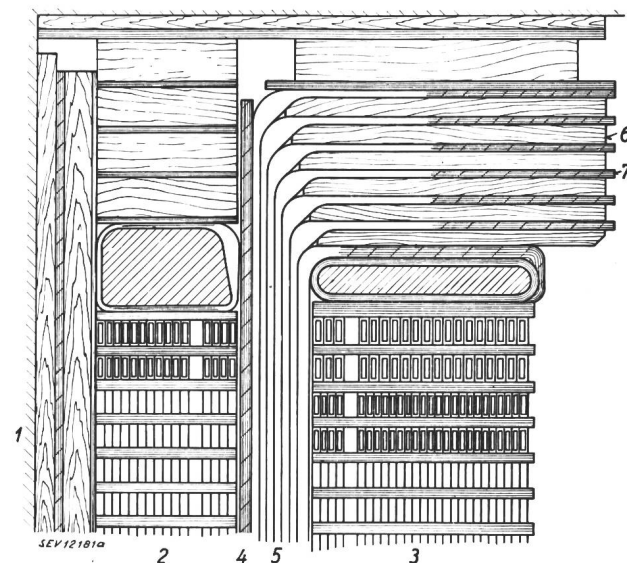


Fig. 2.  
Wicklungsschnitt  
Hauptisolation: Oelprägnierter Papierwickel mit  
Spreizflansch

eine Anwendung des oelgetränkten Papierses konse-  
quent als Hauptisolation auch beim Transformator  
in Erwägung zu ziehen, oder gar einen entspre-  
chenden Versuch zu wagen. Die Wahl einer geeig-  
neten Papiersorte, ferner das Aufbereiten der Iso-  
lation hätte in Anlehnung an die Erfahrungen bei  
Oelkabeln kaum Schwierigkeiten bereitet, sofern  
die teilweise ungünstigeren Verhältnisse beim Trans-  
formator durch entsprechend vorsichtige Bemessung  
des Wicklungsabstandes berücksichtigt worden wä-  
ren. Aber die Feldform an den Wicklungsenden liess

starke tangentiale Beanspruchungen und damit Gleitüberschläge um die Papierwickelenden herum erwarten. Platz für etwas ähnliches wie einen Kabelendverschluss war in der Transformatorenenddistanz nicht vorhanden. Es musste also zuerst eine praktische Anordnung gefunden werden, welche die Gleitentladungen an den Papierwickelenden verhindern konnte und sich dem konstruktiven Aufbau des Transformators gut anpasste.

Eine Lösung dieser Aufgabe stellt der

### Spreizflanschwickel

dar, welcher nun schon seit 1938 erfolgreich angewandt wird (Fig. 2).

Auf einer verhältnismässig dünnen Hartpapierhülle als Träger ist ausgewähltes Isolierpapier als so breites Band, wie der Papierwickel lang sein soll, aufgewickelt. Lichter Durchmesser und Wandstärke sind so bemessen, dass der Abstand zwischen Unter- und Oberspannungswicklung bis auf ein geringes Spiel ausgefüllt wird. Nach dem Aufbringen der Oberspannungswicklung wird das Papier in schmalen Streifen, die durch Einreissen am Zylinderende fortlaufend gebildet werden, um den Schutzring an der Wicklungsstirne radial nach aussen gelegt. Von Lage zu Lage werden die Einrisse entsprechend verschoben, so dass eine gute Ueberlappung der Papierstreifen entsteht. Von Zeit zu Zeit werden die Papierlagen durch aus Isoliermaterial, beispielsweise Transformerboard, herausgeschnittene Einlagestücke distanziert. Diese Spreizung, und das ist das Entscheidende, gibt nun dem Wickelende die erforderliche Festigkeit gegen Gleitüberschläge. Meistens wird alles Papier zu einem gespreizten Flansch umgerissen, der in achsialer Richtung ein mehrfaches der radialen Papierwickeldicke misst.

gleichbleibende, starke tangentiale Feldkomponente weitergetrieben, bis sie sich am Ende mit einer dann vom äusseren Rand des Oberspannungsschutzringes herkommenden Gleitentladung zum Ueberschlag vereinigt. Beim Spreizflansch, rechts, nimmt die tangential Komponente rasch ab, um in geringer Entfernung vom Unterspannungswicklungsende ganz zu verschwinden. Die kurze Auslaufstrecke der Gleitentladung kann nun von einem Schutzring oder dergleichen leicht überbrückt werden, da ja für die Unterspannungswicklung die restliche kleinere Enddistanz genügt. Die Anordnung ist dann ganz gleitfunkenfrei, um so mehr, als sich nun auch dem äusseren Rand des Oberspannungsschutzringes keine Entladung von der andern Seite nähert.

Die Form des Spreizflansches führt zu einer massiven Verdickung des Papierwickelendes. Da das Papier vom Schaft in den Flansch durchläuft, werden Fugen an der Uebergangsstelle vermieden, so dass die hohe Durchschlagsfestigkeit des ölgetränkten Papiers wirklich ausgenützt werden kann. Nur die im Vergleich zu Kabelleiter und Bleimantel inhomogene Wicklungsfläche macht es ratsam, die Isolierwandstärke grösser als beim Kabel zu wählen, damit nicht lokale Beanspruchungen an den Drahtkanten zu einer Beschädigung der Wickeloberfläche während der Spannungsprobe führen. Die Sicherheit gegen Durchschlag des Papierwickels auch bei kurzzeitigen Ueberspannungen und bei Stossbeanspruchung ist dementsprechend sehr gross.

Wie gründliche Versuche zeigten, ist bei richtiger Trocknung und Entgasung der Wickel der Verlustwinkel und der Temperaturkoeffizient genügend klein, um die Kippspannung so hoch zu halten, dass kein Wärmedurchschlag zu fürchten ist<sup>1)</sup>. Die gegenüber der Kabelisolation immerhin noch geringe Beanspruchung erlaubt übrigens, für extrem hohe Betriebsspannungen den Wickel mit einem oder mehreren ganz dünnen Oelkanälen zu unterteilen, so dass sich die Kippspannung verdoppelt oder vervielfacht.

Mit der Einführung des Spreizflanschwickels konnten wir den Abstand zwischen Oberspannungs- und Unterspannungswicklung mit einem Schlage auf weniger als die Hälfte reduzieren. Die daraus direkt resultierende Verringerung des Oelgewichtes, der Kosten für das feste Isoliermaterial und der Oelkasten-Abmessungen steht dabei an Bedeutung hinter den indirekten Wirkungen der Verringerung der Streufeldbreite weit zurück.

Die prozentuale Streuspannung kann beim Grosstransformator nur in engen Grenzen variiert werden. Die Rücksicht auf die Spannungsabfälle verbietet eine zu hohe, die Rücksicht auf die Abschaltleistung eine zu tiefe Kurzschlußspannung. Bei Parallelbetrieb ist eine genaue Anpassung an andere Einheiten erforderlich. So ist die Streuspannung, die ja beim Grosstransformator praktisch

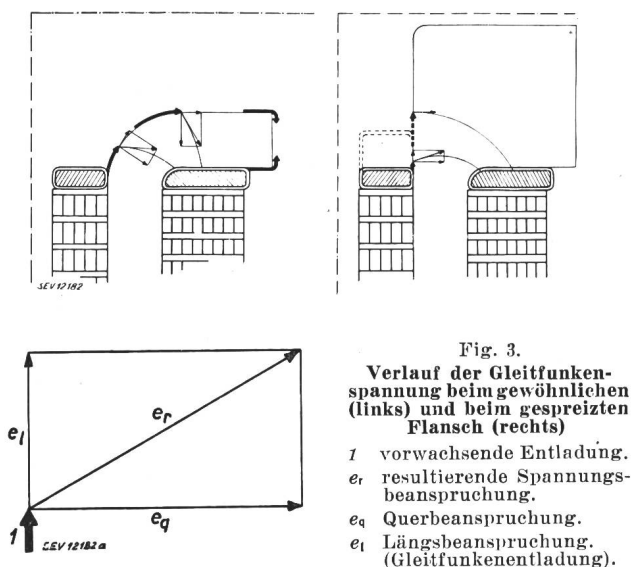


Fig. 3 zeigt den Unterschied der Gleitfunken-Spannung an der Spitze einer vorwachsenden Entladung bei einem Isolationsflansch ohne Spreizung und beim Spreizflansch. Am Rücken des Flansches links wird die vorwachsende Entladung durch eine

<sup>1)</sup> Siehe H. Hartmann: «Das Papier als Hochspannungs-Isoliermaterial.» Brown Boveri-Mitt. 1943, Nr. 9/10, S. 235. Ferner F. Beldi: «Aktuelle Isolationsprobleme im Maschinen- und Transformatorenbau.» Im gleichen Heft, S. 224.



der Kurzschlußspannung gleicht, dem Berechner meistens vorgeschrieben.

Die prozentuale Streuspannung entspricht dem Verhältnis des Streuflusses zum Hauptflusse. Dieser Verhältniswert wäre bei den üblichen Wicklungsabständen der Oel-Barrieren-Isolation meistens weit grösser herausgekommen als erwünscht, hätte der Berechner nicht durch eine Vergrösserung des Eisenquerschnittes für die nötige Korrektur gesorgt. Damit musste aber besonders bei den ganz grossen Einheiten ein Missverhältnis zwischen dem Gewicht des Eisenkerns und demwicklungsgewicht in Kauf genommen werden. So erreichte z. B. bei einem im Jahre 1928 erstellten 36 000-kVA-Transformator von 11/252 kV das Gewicht des aktiven Eisens das sechsfache des Kupfergewichtes. Eine hinsichtlich des Gesamtaufwandes gesunde Verhältniszahl sollte etwa zwischen 2 und 3 liegen.

Mit dem Spreizflanschwickel kann dieses optimale Verhältnis auch bei Höchstspannungen angenähert oder ganz erreicht werden. Selbst bei verhältnismässig kleinen Einheitsleistungen ist die praktische Auswirkung der neuen Isolation bedeutend.

Als Beispiel diene die Gegenüberstellung zweier für die gleiche Anlage nach den genau gleichen Vorschriften gelieferten Transformatoren (Tab. I).

Vergleich eines 10 000-kVA-Transformators alter Isolationsart mit einem 20 000-kVA-Transformator neuer Isolationsart  
Dreiphasen-Oeltransformator mit Fremdlüftung

Tabelle 1.		
Baujahr	1931	1940
Isolation	alt	neu
Nennleistung	10 000 kVA	20 000 kVA
Uebersetzung	$\frac{144\,000}{6835 \pm 10 \cdot 85,5} \text{ V}$	
Eisenverluste	40 kW (31 kW <sup>1)</sup> )	33 kW
Kupferverluste	86 kW	152 kW
Gewicht ohne Oel	41 t	44 t
Oelgewicht	25,3 t	24 t
Gesamtgewicht	66,3 t	68 t

<sup>1)</sup> Umgerechnet auf die Blechqualität des neuen Transformators.

Der zweite hat aber die doppelte Leistung, jedoch die neue Isolation. Es sei speziell auf die Eisenverluste, auf das Gewicht und das Oelgewicht hin-

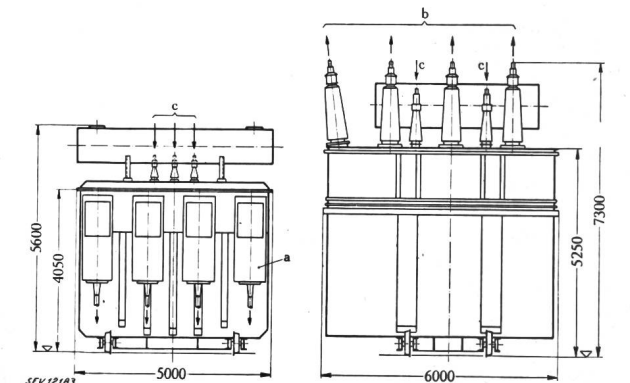


Fig. 4.  
Dimensionsvergleich eines 47 500-kVA-Transformators neuer Isolationsart (links) mit 150-kV-Kabelanschlüssen, mit einem 26 000-kVA-Transformator aus dem Jahre 1928 (rechts) mit 150-kV-Freiluftdurchführungen

gewiesen. Die doppelte Leistung konnte in die praktisch gleiche Grundfläche hineingerechnet werden.

Besonders markant sind auch die kleinen Dimensionen der in eine Felskaverne eingebauten neuen 47 500-kVA-Transformatoren des Kraftwerkes In-nertkirchen im Vergleich zu den 1928 gelieferten

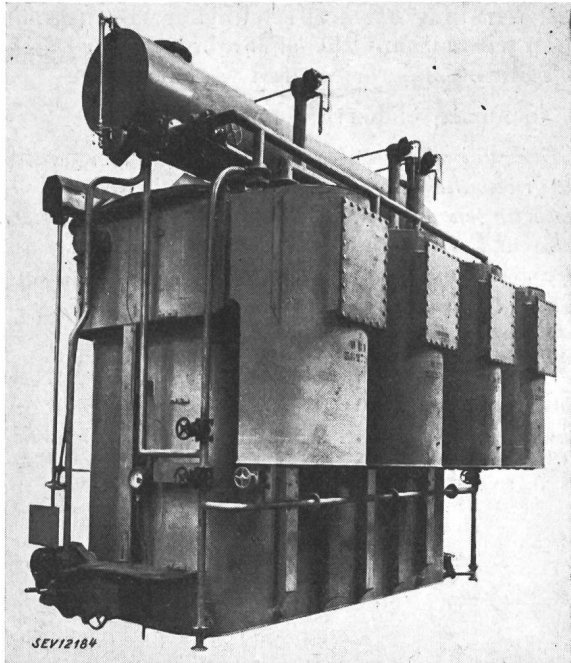


Fig. 5.  
47 500-kVA-Transformator mit 150-kV-Kabelanschlüssen

26 000-kVA-Freilufttransformatoren (Fig. 4). Das Gewicht der neuen Transformatoren, das Oel inbegriffen, beträgt 75% desjenigen der alten, bei 183% Leistung. Bemerkenswert ist ferner der direkte Anschluss der 150-kV-Oelkabel an den Transformator mit eingebauter Trennstrecke. Fig. 5 zeigt den neuen Transformator mit den 4 angebauten Kabelend-verschlussgehäusen.

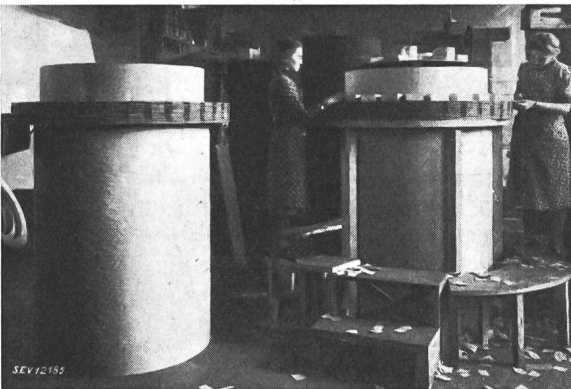


Fig. 6.  
Herstellung des ersten Spreizflansches an einem Papierwickel

In Fig. 6 sieht man das Umreissen des ersten Flansches an Papierwickeln. Beim Zusammenbau des aktiven Teiles in der Werkstätte kann die Zeit, die das Umreissen des zweiten Flansches um die aufgeschobene Oberspannungswicklung erfordert,

wieder eingebracht werden, da die Hauptisolation dann schon komplett ist. Für den ja glücklicherweise sehr seltenen Fall einer Reparatur gilt das gleiche.

Die Spreizflanschisolation in der dargestellten einfachen, sicheren Ausführung setzt natürlich eine einigermaßen stabile Wicklungslänge voraus. Die bei Wicklungen mit reichlicher Drahtisolation schon seit langem übliche Voralterung wird deshalb stets mit besonderer Sorgfalt vorgenommen.

Nochmals sei hervorgehoben:

*Die bei diesen Grosstransformatoren erzielten aussergewöhnlichen Materialersparnisse und Verbesserungen sind ohne Erhöhung der spezifischen Belastung der aktiven Materialien, vor allem durch eine zweckmässige Anordnung der Isolation erreicht worden.*

## II.

Die mächtige Entwicklung zu immer grösseren Einheitsleistungen und Uebertragungsspannungen konnte bis jetzt mit den klassischen Formen des

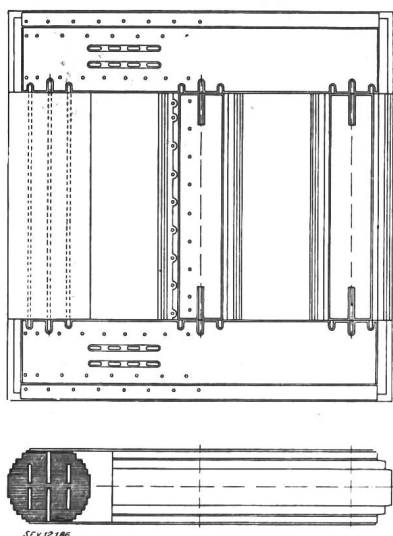


Fig. 7.

Dreischenkler Eisenkern eines grossen Transformators

Eisenkerns bewältigt werden. In Europa hat sich der dreischenkler Kerntyp mit stehenden Säulen allgemein durchgesetzt (Fig. 7). Da runde Spulen am besten den mechanischen Kräften beim Kurzschluss gewachsen sind, wurde der Säulenquerschnitt der Kreisform angepasst. Dies geschah durch mehr oder weniger feine Abstufung der Breite der planparallelen Bleche. Die Jochbleche müssen einigermaßen den Säulenblechbreiten entsprechen, wenn auch in gröberer Abstufung. Denn es ist anzustreben, dass die magnetischen Linien möglichst wenig aus den Blechebenen austreten, da Querflüsse erhebliche Wirbelstromverluste zur Folge haben.

Die Kühlung des Grosskerns konnte mit der Einführung von Querschlitzen glatt bewältigt werden. Es ist nur noch dafür zu sorgen, dass eine den spezifischen Eisenverlusten angemessene Blechbreite zwischen den Kühlkanälen nicht überschrit-

ten wird, wonach sich die Zahl der Kühlschlitze richtet.

Zwingende fabrikatorische Schwierigkeiten stehen dem weiteren Wachstum des klassischen Eisenkerns ebenfalls nicht entgegen.

Es ist nur das *Transportproblem*, das Halt gebietet. Am meisten Schwierigkeiten bereitet es, die *Höhe* des Eisenkerns mit seinen Fuss- und Pressbalken und damit den Oelkasten in das Bahnprofil hineinzubringen. Man behalf sich lange Zeit mit einer mehr oder weniger weitgehenden Zerlegung des Transformators für den Transport. Je höher die Netzspannungen stiegen, desto umfangreicher wurden die damit verbundenen Arbeiten. Für die Prüfung in der Werkstätte des Herstellers musste der Transformator vollständig fertiggestellt werden und alle Isolationen, das Oel inbegriffen, gut getrocknet und entgast sein. Nach der Prüfung mussten an den Hochspannungsableitungen die dicken Papierisolationen aufgeschnitten und Verbindungsstellen abgelötet werden. Der Zusammenbau am Aufstellungsort erforderte oft Wochen. Bei diesen Arbeiten drang wieder Luft und Feuchtigkeit in alle Isolationen ein. Es brauchte also nochmals einen lästigen, umfangreichen Trocknungs- und Entgasungsprozess. Die Montageräume und Einrichtungen in den Anlagen wurden entsprechend gross und kostspielig.

Es fehlte nicht an Anstrengungen, diese zeitraubenden und nachteiligen Arbeiten durch profilgängige Konstruktionen auszuschalten. Man musste die Aufmerksamkeit vor allem der *Jochhöhe* zuwenden.

Beim klassischen Dreischenklerkern ist die Jochhöhe angenähert gleich dem Säulendurchmesser  $D$  (Fig. 8). Bei einer sehr grossen Einheit mit 1 m Säulendurchmesser nähmen also die beiden Joche allein schon volle 2 m von der maximal ausnutzbaren Profilhöhe von 4,3 m in Anspruch. Fuss und Pressbalken, Kastenboden und Kastendeckel,

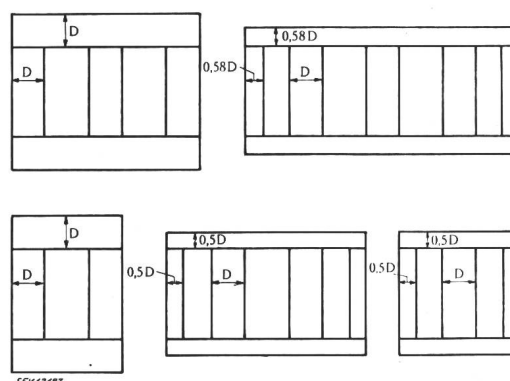


Fig. 8.

Vergleich der Jochhöhen verschiedener Kernbauarten

gegebenenfalls dazu ein Oelschützer, verlangen zusammen auch noch 0,5...0,8 m von der knappen Profilhöhe. Der Rest, also 1,5...1,8 m, würde entschieden nicht mehr als Säulenlänge für diese grosse Einheit genügen.

Die Abhilfe war denn auch der Fünfschenklerkern. Die richtige geometrische Aufteilung der

Flüsse verlangt in dessen Jochen bekanntlich nur einen  $\sqrt{3}$ mal kleineren Querschnitt als in den Säulen, also eine Jochhöhe von etwa  $0,58 D$ . Beim Einphasentransformator kann der Vierschenkeltyp oder der einsäulig bewickelte Manteltyp mit  $0,5 D$  als Jochhöhe gewählt werden.

Bei grössten Einheiten, im Bereich von 100 MVA, speziell bei Höchstspannungen, ist der Konstrukteur aber auch so noch sehr beengt. Die Verschachtelung der Säulen- und Jochbleche, wobei die Press-

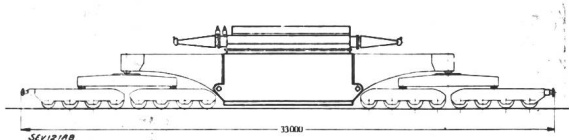
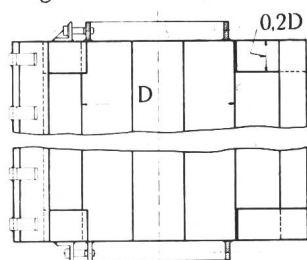


Fig. 9.

Wandertransformator mit einer Typenleistung von mehr als 140 MVA und 220 kV Oberspannung als Verbindungsbrücke zwischen den Laufgestellen des Transportwagens

balken wegfallen, kann die Schwierigkeiten nochmals mildern, so dass es auch im Brown-Boveri-Konzern gelang, dreiphasige 100-MVA-Wandertransformatoren für 220 kV Oberspannung mit Tertiärwicklung, mit einer tatsächlichen Typenleistung von mehr als 140 MVA zu bauen. Der Transformator bildet dabei in bekannter Weise die Verbindungsbrücke zwischen den Laufgestellen des Transportwagens (Fig. 9). Die Profilhöhe wird so voll ausgenutzt. Wenn nun aber einmal 400 kV und



dazu noch grössere Uebertragungsleistungen an der Reihe sind? Gibt es dann noch eine günstige Lösung? Wir glauben ja.

Wir setzen nun voraus, dass Typenleistungen von erheblich mehr als 150 MVA der Tragfähigkeit eines Bahnfahrzeuges entschieden zu viel zumuten würden. Der Dreiphasentransformator muss hier vernünftigerweise der Gruppe von 3 Einphasen-Einheiten weichen. Und da ergibt sich nun eine recht günstige Anwendungsmöglichkeit für eine im Grosstransformatorenbau neue Kernbauweise.

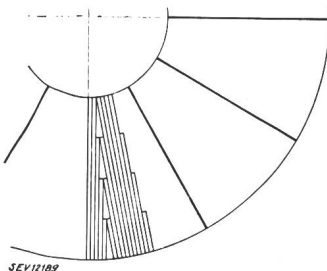
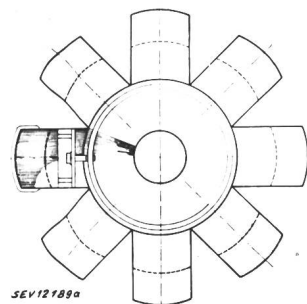


Fig. 10.  
Radialgeblechter Eisenkern  
mit Ringrückschluss

Wir kommen damit zum *radialgeblechten Kern mit Ringrückschluss* (Fig. 10).

Der Gedanke, Bleche in abgestufter Breite, zu Sektoren geordnet, radial zu stellen, so dass eine

wirklich runde Säule entsteht, und die Rückschlüsse seitlich, also an die Mantelfläche anzuschliessen bzw. einzuschachteln, ist schon vor 45 Jahren durch Patentanmeldungen von Berry bekanntgeworden. Aber es fehlte die Technologie des Radialkerns, so dass er keine Bedeutung erlangte. Nun hat ihm die Entwicklung der Elektroschweissung auf die Beine geholfen.

Da der magnetische Fluss nicht mehr durch die Stirnfläche der Säule läuft, darf dort ein geschlossener Eisenring an die aktiven Bleche geschweisst werden. Dann ist ein solider Zusammenhalt der Säulenbleche gewährleistet. Werden die Rückschlüsse zu U-förmigen Paketen zusammengefügt, so kann man ebenso ungestraft auf deren äusseren Begrenzungsflächen Verbindungsblasen aufschweissen. Dies erlaubt, wie das Bild zeigt, eine bequeme und materialsparende Anpressung der Rückschlussjochs an die Säule mittelst unmagnetischer Schrauben. Wir haben damit die Vorteile des gestossenen Eisenkerns. Es ist nur streng darauf zu achten, dass an den Begrenzungsflächen der Fensteröffnung keine Verbindung über die Blechschichten entsteht. Dann sind keine Schlüsse um Teile des magnetischen Flusses möglich.

Das Verhältnis des aktiven Querschnittes zur Kreisfläche, der Füllfaktor, ist etwa gleich gross wie bei den bisherigen Transformatoren.

Der Querschnitt der einzelnen Säulenbleche ist verschieden gross, die Flussübertrittsfläche zu den Jochblechen ist für alle Säulenbleche jedoch gleich. Dies hat allerdings einen ausgleichenden Querfluss von den breiten zu den schmalen Säulenblechen zur Folge. Da sich aber der Ausgleich in nur sehr dünnen Blechpaketen auswirkt, ergeben sich, wie Rechnung und Versuche zeigen, nur sehr geringfügige Wirbelstromverluste. Diese werden mehr als aufgewogen, da die radialgeblechte Säule dafür keine Einschnürungen durch Bolzenlöcher besitzt und die Rückschlussquerschnitte ganz gleichmässig den Säulenblechsektoren zugeordnet sind. Die Mantelfläche der Säule weist eine Menge kleiner, isolierender Spalten auf. Die Umlaufspannung des einzelnen Jochpaketes beträgt entsprechend der Zahl der Jochs auch nur ein Zwölftel bis ein Achtel der Windungsspannung. Bolzenschlüsse sind mit den Bolzen eliminiert.

Man sieht, es sprechen eine ganze Reihe von Gründen dafür, dass Eisenkrankheiten noch weniger als beim klassischen Kern zu befürchten sind.

Nun aber eine Hauptsache: Da der Flussübertritt von der Säule auf die Jochs sich auf eine Fläche mit dem grossen Kreisumfang als Basis verteilt, ist nur eine Jochhöhe von etwa dem 0,2fachen Säulendurchmesser erforderlich. Also bei einem Säulendurchmesser von 1 m sind gegenüber dem Vierschenkel- oder dem klassischen Mantelkern wieder 0,6 m für die aktive Säulenlänge gewonnen. Das ist nicht wenig.

Die mittlere Länge des Flussweges ist kleiner und damit das Eisengewicht günstig. Auch übernehmen die U-förmigen Rückschlussjochs rund-



herum höchst persönlich und zwanglos die Funktion der Wicklungsabstützung.

Es kommt noch hinzu, dass die zylindrische Form des ganzen Eisengestells eine sehr günstige Grundform des Oelkastens ergibt, eine zylindrische Büchse. Schwere Mantelversteifungen fallen dahin, ebenso leere Zwickelräume. Es ist also ein sehr ölarmer Transformator. Ja, genaue Berechnungen zeigten, dass drei Einphasentransformatoren dieser Bauweise bei grossen Leistungen nur sehr wenig teurer werden, als der entsprechende Dreiphasentransformator. (Die Gruppe von drei Einphasentransformatoren der klassischen Bauweise kostete in der Regel 20...30 % mehr als die Dreiphaseneinheit. Diese hat deshalb in Europa das Feld behauptet.)

Während grosse Einphasentransformatoren sich bei uns bisher am vorteilhaftesten mit zwei bewickelten Säulen bauen liessen, geht's beim Radialkern nun besser nur mit einer. Die Gruppe hat dann nicht mehr sechs, sondern nur noch drei bewickelte Säulen. Dies ist, neben dem geringen Aufwand an zusätzlichen Konstruktionsteilen, der Grund, warum die neue Gruppe bei hohen Spannungen sich so günstig stellt, besonders dann, wenn das Höchstspannungsnetz mit fest geerdetem Null-

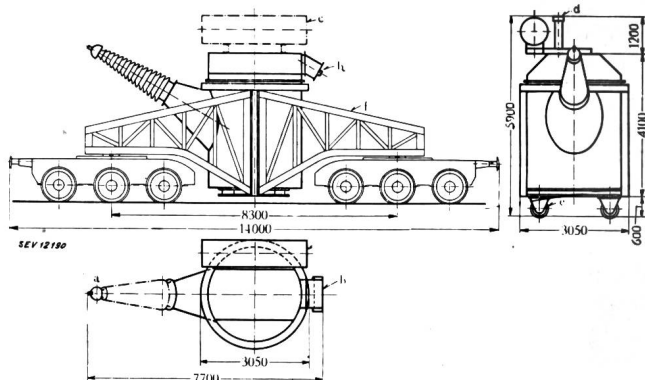


Fig. 11.

Radialgeblechter Einphasentransformator für eine dreiphasige 240-MVA-Gruppe mit 400 kV Oberspannung

punkt betrieben wird, so dass der Einphasentransformator nur *eine* grosse Durchführung braucht. Fig. 11 zeigt eine Einheit für eine 240-MVA-Gruppe für ein 400-kV-Netz, mit dem Transportwagen. (Diesmal erst ein Entwurf.)

Ist nun das Anwendungsgebiet der Radialkern-Gruppe nur die Mammut-Anlage? Wenn die Vorteile gegen die geringen Nachteile: etwas mehr Platzbedarf, in einigen Fällen auch ein wenig mehr Leerlaufverluste als beim Dreiphasentransformator, abgewogen werden, muss man zu einem andern Schluss kommen. Besonders bei Aufstellung im Freien wird die neue Konstruktion auch bei dreiphasigen Leistungen von etwa 30 MVA an interessant, abgesehen von einer Menge von *Spezialanwendungen*. Wird die Bereitstellung einer Reserve für nötig erachtet, so genügt dafür *eine* Einphaseneinheit, also ein Drittel der Leistung.

Nun einige Bilder von Ausführungen:

Zuerst in Fig. 12 eine *Drosselspule* von 25 MVA, Spannungsreihe 150 kV. Beim Transformator sieht

nur das Aufhängeorgan, das hier auch für die Pressung der Säulenabschnitte auf die Spalteinlagen dienen muss, etwas anders aus. Die gleiche Drosselspule in Ansicht sieht man in Fig. 13. Die Rückschlüsse sind hier in Holz gefasst und einzeln gegen die Wicklung isoliert.

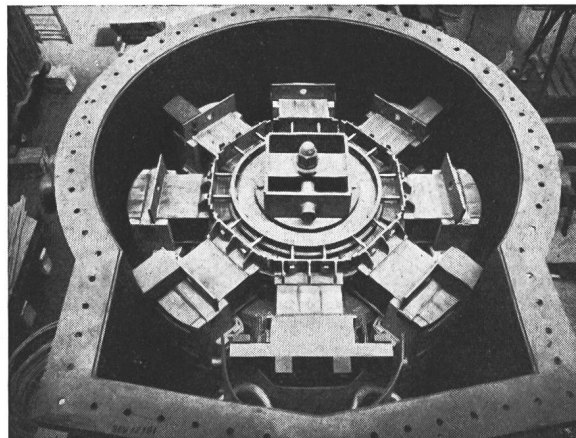


Fig. 12.

Einphasendrosselspule mit radialgeblechtem Kern und Ringrückschluss  
Typenleistung 25 MVA, Spannungsreihe 150 kV

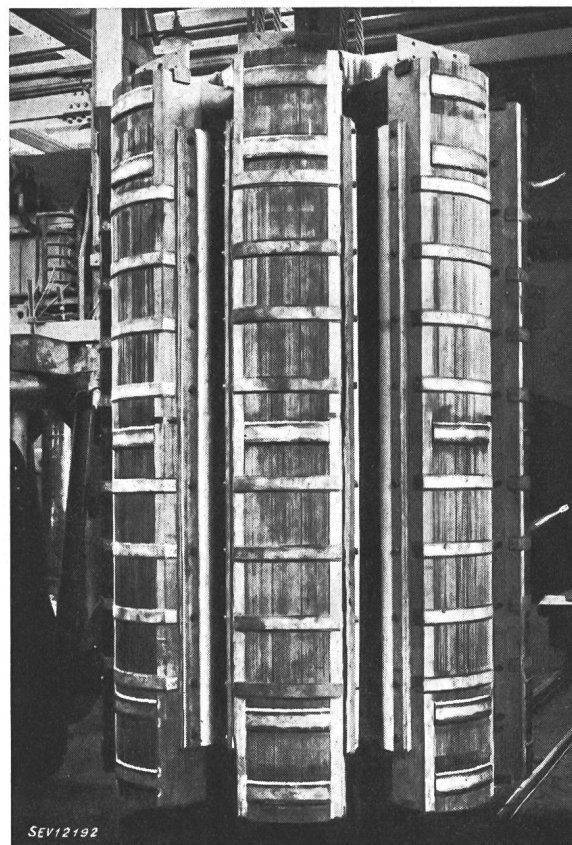


Fig. 13.

Aktiver Teil einer Einphasendrosselspule mit radialgeblechtem Kern und Ringrückschluss  
Typenleistung 25 MVA, Spannungsreihe 150 kV

In Fig. 14 sieht man den Eisenkern zu einem kleinen Triebwagentransformator von 410 kVA, 16 $\frac{2}{3}$  Hz, in seinem Oelkasten. Die runde Kasten-



form wird hier etwas verwischt durch die hinten sichtbare Erweiterung für die vielen Sekundär-durchführungen und die seitlichen, nach dem Fahrwind ausgerichteten Kühltaschen. Der Transformator wird unter dem Wagenboden aufgehängt und ist deshalb von besonders *niederer Bauart*. Dank

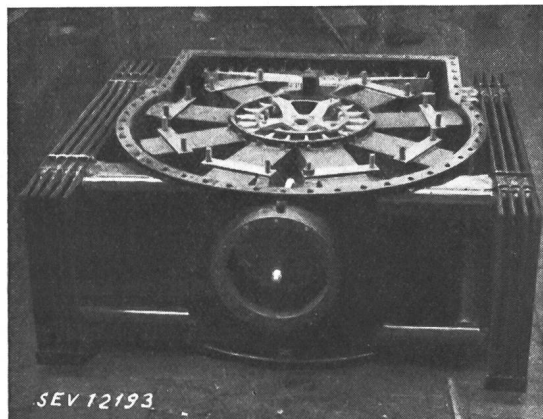


Fig. 14.  
Triebwagentransformator für 410 kVA,  $16\frac{2}{3}$  Hz.  
Flache Bauart für Anbringung unter dem Wagenboden

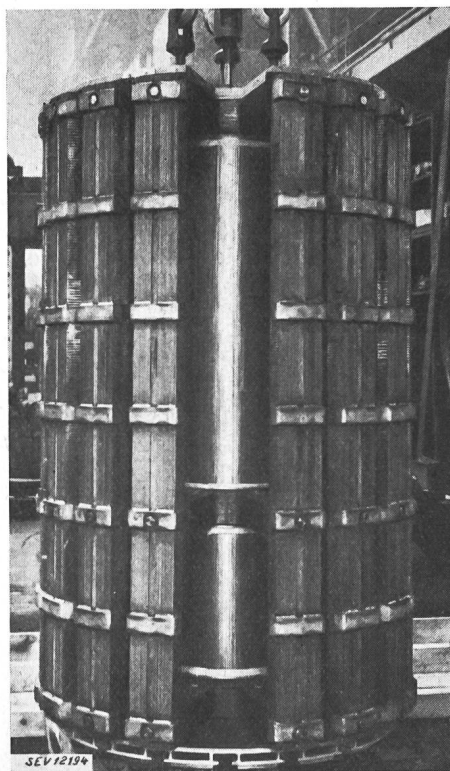


Fig. 15.  
Eisenkern eines grossen Lokomotivtransformators  
für 2700 kVA,  $16\frac{2}{3}$  Hz  
Radialgeblechter Kern mit quergeblechtem Zwischenjoch,  
für eine Wicklungsanordnung mit überspannungsseitiger  
Steuerung

der sehr geringen Jochhöhe konnte hier die für die Wicklung günstige *stehende Säule* beibehalten werden.

In Fig. 15 ist der Eisenkern eines grossen Lokomotivtransformators für Hochspannungssteuerung

dargestellt. Das untere Stockwerk nimmt die Regulierwicklung mit den vielen Anzapfungen auf, das obere Stockwerk die Hauptwicklungen ohne Anzapfungen. Der Ausschnitt vorn dient für die Herausführung der Ableitungen. Fig. 16 zeigt den gleichen Transformator fertig, mit angebaute Stufen-

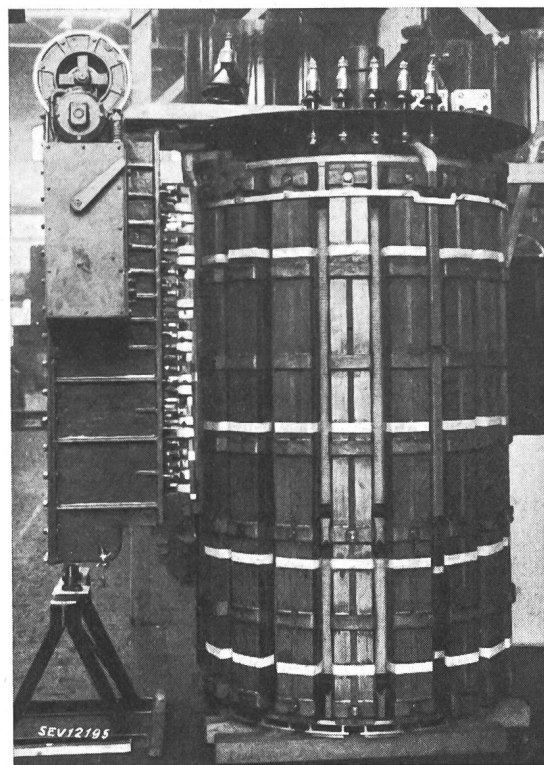


Fig. 16.  
Aktiver Teil eines grossen Lokomotivtransformators  
für 2700 kVA,  $16\frac{2}{3}$  Hz  
mit angebaute, überspannungsseitigem Stufenschalter

schalter, vor dem Einsetzen in den Oelkasten. Diese und die vorher gezeigte kleinere Konstruktion zeichnen sich durch eine für moderne Fahrzeuge sehr wertvolle Gewichtsreduktion und ein besonders

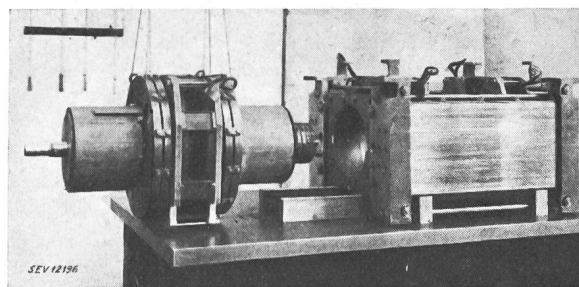


Fig. 17.  
Telle eines Triebwagentransformators mit radialgeblechtem  
Drehkern und stufenloser Stromabnahme auf den blanken  
Sekundärwindungen

geringes Oelgewicht aus. Da wir gerade bei den Bahntransformatoren sind, soll auch noch eine Konstruktion mit drehbarer radialgeblechter Säule und drehbarer blanker Sekundärwicklung für Stromabnahme mittelst Rollen, also für eine stu-

fenlose Regulierung der Spannung, erwähnt werden (Fig. 17).

In speziellen Fällen kann auch eine Ausführung mit zwei radialgeblechten Säulen und quergeblechten

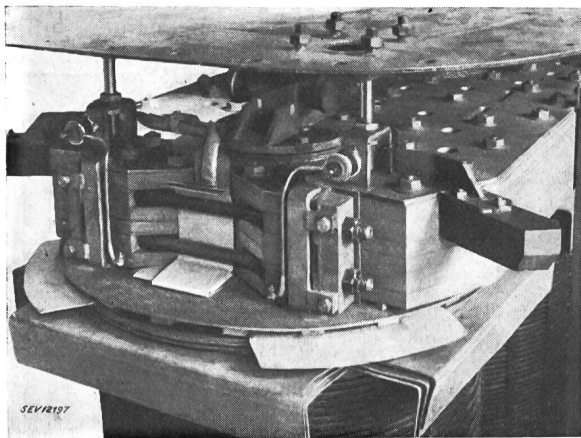


Fig. 18.

Jochpressung bei einem zwischengliedigen Eisenkern mit radialgeblechten Säulen und quergeblechten Jochen

ten Jochen von Nutzen sein (Fig. 18). Die Jochhöhe ist hier gleich gering wie beim Ringrückschluss. Für grosse Mutator-Anlagen beispielsweise kann diese Bauart passen. Die Anpressung der «Brillenjoch»-Hälften sieht man im Bilde gut.

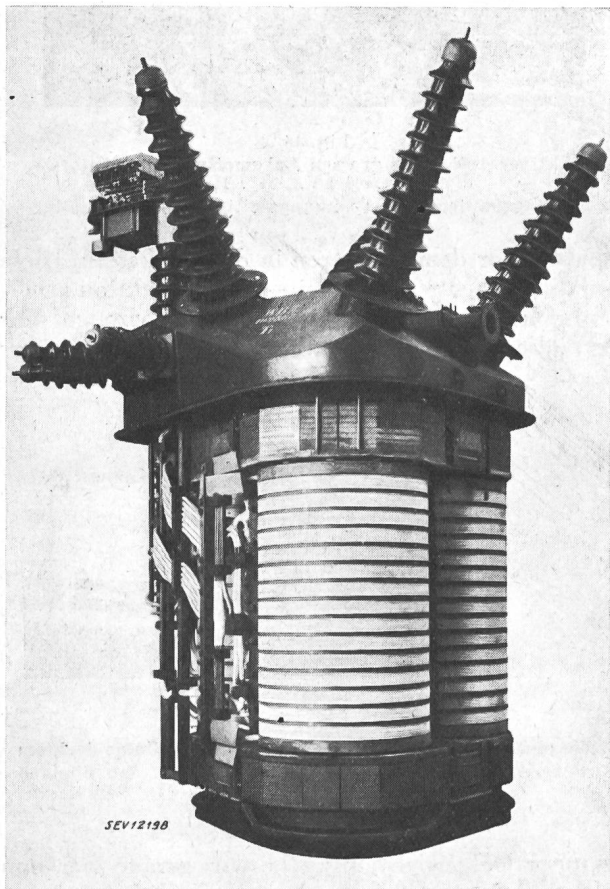


Fig. 19.

Transformator für 23 MVA, 150 kV Oberspannung mit drei radialgeblechten Säulen im Dreieck und quergeblechten Jochen

Eine dreiphasige Ausführung mit drei Säulen im Dreieck ist ebenfalls möglich (Fig. 19). Eine Einheit von 30 MVA hat seit langem schon ihre Betriebstüchtigkeit erwiesen. Auch die im Bilde dar-

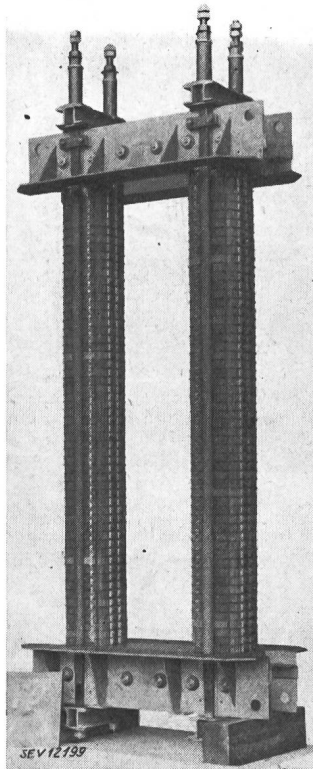


Fig. 20.

Eisenkern einer Drosselspule mit parallel geschichteten Blechen und einer Vielzahl von kleinen Luftspalten

gestellte Einheit von 23 MVA, 150 kV Oberspannung, ist, nachdem ein Geburtsfehler, der nicht die Radialblechung an sich betraf, behoben war, zu einem betriebssicheren Transformator gewor-

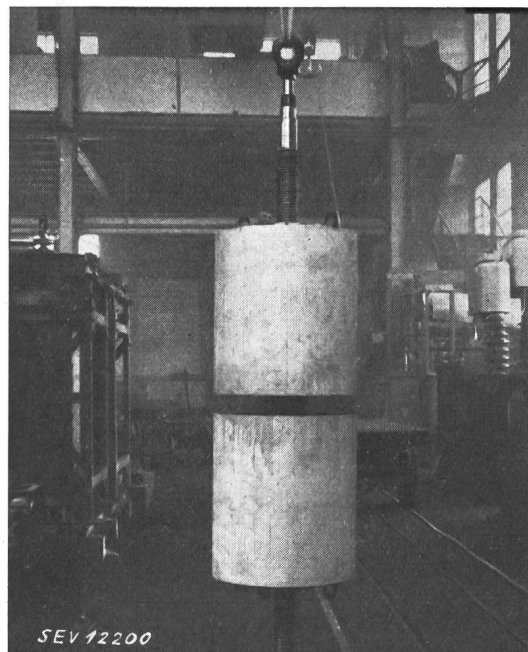


Fig. 21.

Verstellbare Säulenstummel mit radialer Blechung auf drehbarer Gewindespindel für eine Drosselspule mit stufenloser Regulierung

den. Die Jochplatten bestehen aus je drei Sektoren zu 120°, welche mit isolierten Stossfugen aneinander grenzen. Die Oelfüllung beträgt nur 8,5 t. Offenbar eine Markstein auf dem Wege zum ölarmen Transformator!

Bei der Dreiecksausführung entstehen leider fühlbare zusätzliche Verluste infolge der örtlichen Drehung des magnetischen Feldes im mittleren Teil der Joche. Auch aus diesem Grunde geben wir heute einer Aufteilung des Dreiphasentransformators den Vorzug.

Der radialgeblechte Kern hat noch seine ganz besonderen Anwendungsgebiete beim Reguliertrans-

bei grossem Regulierbereich eine starke Vergrösserung der Typenleistung nebst den andern Unannehmlichkeiten, welche eine grosse Zahl Anzapfungen zur Folge haben.

Mit dem radialgeblechten Kern ist nun die grosse Drosselspule mit veränderlichem Luftspalt, also ohne Wicklungsanzapfungen, möglich geworden. Da hier die seitlichen Streulinien an den Spalträndern überall nur noch durch die Schmalseiten der Bleche austreten, sind zusätzliche Wirbelstromverluste ganz vermieden. Der Spalt kann beliebig gross werden. Die an den Luftspalt grenzende Stirnfläche darf in diesem Falle natürlich keine

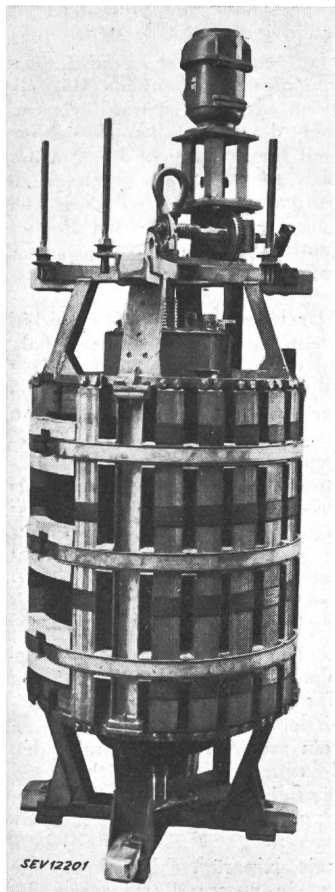


Fig. 22.

Eisenkern mit verstellbaren radialgeblechten Säulenstummeln mit Ringrückschluss, Spindel-Lagerung und Antrieb, für eine Löschspule mit stufenloser Regulierung

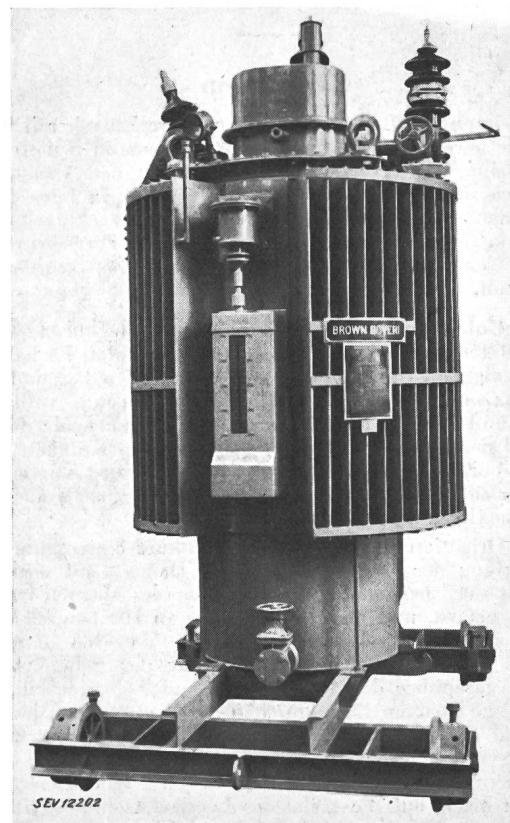


Fig. 23.

Löschspule mit stufenloser Stromregulierung, mit angebaute mechanischem Stellanzeiger

formator mit verschiebbarer Wicklung und bei der Regulierdrosselspule mit veränderlichem Luftspalt. Wir wollen diese noch kurz betrachten.

Beim bekannten, parallel geschichteten grossen Drosselspulenkern (Fig. 20) musste der Luftspalt immer in eine sehr grosse Zahl kleiner Spalte aufgeteilt werden. Die seitlichen Streulinien durchsetzen ja die Randflächen der Säulenpakete teilweise quer und verursachen um so grössere Wirbelstromverluste, je grösser der Spalt ist. Seine Dicke liegt meistens unter 10 mm. Regulieren konnte man bei der Vielzahl der Spalte nicht die Spaltdicke, sondern nur die Flussdichte. Dies geschah durch Veränderung der Windungszahl mit Hilfe von Anzapfungen an der Wicklung. Für eine Verkleinerung des Spulenstromes auf  $1/n$  muss die Windungszahl auf das  $\sqrt{n}$ -fache erhöht werden. Dies bedeutet

Schweissnaht erhalten. Eine starke Spindel mit unmagnetischem Mittelstück, Rechts- und Linksgewinde an den Enden, besorgt die Verstellung der Säulenstummel (Fig. 21). Eine kraftschlüssige Führung auf den Gewinden verhindert zu starke Vibrationen. Der Ringrückschlusskörper ist mit einem starren, die Spindellager tragenden Rahmen derart verbunden, dass die Säulenstummel sich mit geringem Spiel in den Querjochen achsial bewegen können (Fig. 22).

Eine grössere Anzahl solcher Drosselspulen als *Löschspulen* mit Leistungen bis über 5000 kVA und einer Stromregelung bis 1 : 10 sind bereits seit längerer Zeit im Betrieb. Luftspalte von beinahe 1 m sind dabei anstandslos erreicht worden. Bei der Gestaltung der Wicklung ist allerdings der grossen Seitenstreuung sorgsam Rechnung zu tragen. Der



Radialkern zeigt gerade in diesem Falle seine Unempfindlichkeit gegen Streufelder, seine Ausgeglichenheit hinsichtlich der magnetischen Kräfte. Er stellt hier wirklich eine runde Lösung dar. Nicht nur für den Oelkasten! — Der an den stufenlos regelbaren Löschspulen angebaute mechanische Stellungsanzeiger gestattet, den eingestellten Spulenstrom abzulesen (Fig. 23). Eine Steuerung des Motorantriebes, so dass der Luftspalt sich selbsttätig dem jeweiligen Netzzustand anpasst, ist auch schon verwirklicht worden.

Dieser kurze Rundgang um einige Konstruktionen zeigte wohl, dass auch im Transformatorenbau noch Raum ist für neue Gestaltung.

### Diskussion

**Vorsitzender:** Ich danke Herrn Meyerhans herzlich für den sehr anregenden Vortrag, mit dem er uns in neueste Fortschritte im Transformatorenbau eingeweiht hat. Von seinen Anfängen an gerechnet hat der Transformator 90 Jahre hinter sich. Man sollte deshalb meinen, er sei ein ausgeklügeltes Ding. Trotzdem sind, wie wir gesehen haben, noch Fortschritte und Neuerungen möglich. So war der Vortrag ausserordentlich interessant.

**Dr. Goldstein, Zürich:** Ich habe die Ausführungen des Herrn Referenten mit grossem Interesse verfolgt. Es hat sich nun gezeigt, dass man etwas Neues geschaffen hat und dass hier, das muss ich sagen, wirklich Pionierleistung vollbracht wurde, und zwar in einer ganz andern Richtung, als dies im Ausland der Fall war. Dort hat man auch im Kernbau eifrig herumlaboriert, speziell an der Verbesserung der Kurvenform des Leerlaufstromes sowohl des dreischenkigen, als auch des fünfschenkigen Transformators.

Zur Orientierung will ich nur ganz kurz einiges über die Entwicklung der letzten 10 Jahre in Deutschland mitteilen. Man hat sich speziell mit dem Problem des Magnetisierungsstromes befasst, und man hat die höheren Harmonischen des Magnetisierungsstromes eliminieren wollen. Man hat gefunden, dass es durch eine richtige Bemessung der Schenkelquerschnitte gegenüber den Hauptjochen und Nebenjochen möglich ist, die höheren Harmonischen aus dem Magnetisierungsstrom zu eliminieren. Diese Entwicklung ist gewissermassen an uns vorübergegangen, und es würde mich interessieren, von Herrn Meyerhans zu hören, wie sich nun dieser neue Kern in bezug auf die Höhe des Leerlaufstromes stellt. Wie steht dieser Transformator im Vergleich zum 5-Schenkel-Transformatortyp, ich meine die geschichteten Transformatoren, bei welchen man die Höhe des Leerlaufstromes auf einen ganz geringen Prozentsatz reduzieren konnte, etwa 2...3 %.

Es würde mich interessieren, was nun der radial geblechte Transformator für einen prozentualen Leerlaufstrom hat. Ferner würde es mich auch interessieren zu erfahren, wie es sich mit dem Gehalt der höheren Harmonischen verhält.

Ich möchte gleich bemerken, dass dieser speziellen Frage der höheren Harmonischen vielleicht zuviel Bedeutung beigemessen wurde, die man hier vielleicht gar nicht empfindet. Es wird allerdings behauptet, das haben Sie in der Literatur gelesen, dass speziell eine Elimination der höheren Harmonischen des Leerlaufstromes für die gute Kompensation des Erdschlusslichtbogenstromes nötig ist. Dass sich beim Einphasen-Transformator — bei dem Typ, über den Herr Meyerhans sich am meisten verbreitete — keine Schwierigkeiten ergeben, das leuchtet mir ein. Wie sich aber bei den Konstruktionen mit drei Säulen das Problem gestaltet, das kann man ohne genaue Versuche und ohne genaue Analyse nicht beurteilen. Ich wäre Herrn Meyerhans sehr dankbar, wenn er speziell über diese Frage Auskunft erteilen würde.

Ferner wird es mich noch interessieren zu wissen, ob bei diesem Aufbau des Einkerntyps bezüglich der Isolation der Oberspannungswicklung, die ja nun umgeben wird von Eisen, nicht grosse Schwierigkeiten auftreten.

Prof. Dr. K. Kuhlmann, Eidg. Techn. Hochschule, Zürich, stellt die Frage nach der Steuerung der elektrischen Felder und der Gleitentladungen.

**A. Meyerhans, Referent:** Vor einigen Jahren ertönte in Deutschland der Ruf: Oberwellenfreie Transformatoren, schwingungsfreie Transformatoren!

Die oberwellenfreien Transformatoren waren grössere Einheiten mit Hilfswicklungen um Teile des magnetischen Flusses, speziell im Joch. Hochgesättigte Teile des Eisengestelles mussten Oberwellen mit entsprechender Phasenlage liefern, die diejenigen der andern Teile kompensierten.

Dies konnte für eine bestimmte Induzierung schon gelingen; aber wenn man daran denkt, dass die Betriebsspannung in den modernen Netzen ja auch jeweils um einen sehr erheblichen Prozentsatz steigen und fallen kann, so dürfte diese Kompensation doch nicht mehr bei allen Betriebsfällen stimmen.

Es ist weiter nicht zu vergessen, dass jede Komplizierung im Transformator auch wieder einen Nachteil darstellt.

Ferner hat man vielleicht zu wenig daran gedacht, dass gerade beim grossen Transformator der prozentuale Magnetisierungsstrom kleiner ist als beim kleinen Netztransformator, also bei gleicher Sättigung auch die Oberwellen. Besonders die grössten Transformatoren mit ihren vielleicht 3 % Magnetisierungsstrom zählen eigentlich gar nicht im Vergleich zu den vielen kleinen Netztransformatoren mit ihrer doch viel grösseren Gesamtleistung und grösserem prozentualen Magnetisierungsstrom. So ist es eigentlich wenig interessant, diese komplizierten Ausgleichs dort zu machen, wo man verhältnismässig am wenigsten herausholen kann.

Nun die Frage von Herrn Dr. Goldstein, wie sich speziell der radial geblechte Kern hinsichtlich der Oberwellen verhält. Dazu ist folgendes zu sagen: Der radial geblechte Kern hat keine Einschürungen. Diejenigen Oberwellen, die von den hohen Sättigungen an den eingegengten Stellen herrühren, entfallen also.

Im übrigen würde ich es heute vorziehen, durch eine Beschränkung bei der Sättigungswahl die Oberwellen nochmals zu verkleinern, wenn schon die erhebliche Verminderung des Magnetisierungsstromes als Folge des kleinen Eisenquerschnittes bei Transformatoren mit Spreizflanschisolation noch nicht genügen sollte. Man ist ja heute auch in der Schweiz dazugekommen, die Eisenverluste so zu bewerten, dass man veranlasst wird, bescheidene Sättigungen zu wählen.

Die Frage nach dem prozentualen Wert des Magnetisierungsstromes einer radial geblechten Einheit lässt sich nicht so leicht mit einer exakten Ziffer beantworten, denn bei Transformatoren sind immer verschiedene Nebenprobleme noch zu beachten. Zum Beispiel kann ein grosser Regulierbereich den Konstrukteur zwingen, den Eisenquerschnitt erheblich zu ändern. Es darf aber vielleicht für beispielsweise eine 30-MVA-Einheit ein Durchschnittswert von etwas weniger als 3 % genannt werden.

Beim einphasigen Kern mit Ringrückschluss kann die Oberspannungswicklung, wenn sie aussen liegt, gegen die Rückschlussjochs auch mit einem Papierwickel mit nach innen gekehrten Spreizflanschen isoliert werden. Die äussere Mantelfläche dieses Papierwickels kann leitend gemacht werden, so dass hinsichtlich der Kanten der Rückschlussjochs keine Schwierigkeiten entstehen. Statt dessen kann aber auch eine Unterspannungsregulierung, oder gar ein Teil der Unterspannungs-Stammwicklung, an der äusseren Mantelfläche des Papierwickels angeordnet werden.

Und nun die Frage von Herrn Prof. Dr. Kuhlmann über die Steuerung des Feldes am Ende der Transformatoren-Hauptisolation. Man hat ja schon seit langem versucht, durch entsprechende Formung der Schutzringe das Feld am Wicklungsende so zu gestalten, dass keine Gleitfunken sich bilden. Aber es gibt zwischen Wicklungsenden und Jochen verhältnismässig wenig Platz für grosse Abrundungsradien. Das ist teurer Raum.

Zudem ist bei der bisherigen Isolation, wo man mit Oel und Barrieren arbeitet, die Sachlage nicht mehr klar, wenn Teilentladungen durch eine Oelstrecke entstehen, indem sich an einzelnen Barrieren in diesem Falle doch noch Gleitentladungen entwickeln könnten. Die Verhältnisse sind hier ziemlich komplex, so dass nur ein genügend grosser radialer Wicklungsabstand uns vor Ueberraschungen sichert.



Bei der neuen Spreizflanschisolation ist die Sache eindeutiger, da sie fugenlos aus dem Zwischenraum der Wicklungen herauswächst und sich derart verbreitert, dass auch bei kleinem Schutzringradius kein Raum mehr ist für Teilentladungen.

Der Vorsitzende dankt den Herren Diskussionsrednern für ihre Beiträge, besonders dem Referenten, Herrn Meyers, für die Beantwortung der Fragen, und gibt hierauf das Wort Herrn Rochat, dann Herrn Wacker. (Der Vortrag Rochat erscheint später.)

## Betriebserfahrungen über Transformatoren mit Aluminiumwicklungen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 13. Juli 1944 in Zürich,

von W. Wacker, St. Gallen

621.314.21.045:621.315.53

*Die Ergebnisse einer umfassenden Rundfrage bei mehreren Elektrizitätswerken, Fabrikanten und Reparaturfirmen betr. Erfahrungen über Transformatoren mit Aluminiumwicklungen werden mitgeteilt, und es wird kurz auf ihre Technologie, Konstruktion, Verhalten im Kurzschluss und Wirtschaftlichkeit eingegangen. Auf Grund dieser Umfrage darf gesagt werden, dass sich der Aluminiumtransformator durchaus bewährte, und dass keine Störungen bekannt wurden, die auf die Verwendung von Aluminium zurückgeführt werden müssten. Dies gilt namentlich auch für die während des Krieges 1914/18 gebauten und zum Teil heute noch im Betrieb stehenden Aluminiumtransformatoren. Eine Zurückhaltung in der Bestellung solcher Apparate erscheint ungerechtfertigt.*

*L'auteur communique les résultats d'une enquête détaillée auprès d'entreprises électriques, de fabricants et d'ateliers de réparation, à propos des expériences faites avec les transformateurs à bobinages en aluminium. Il donne quelques brèves explications sur la technologie, la construction, le comportement en cas de court-circuit et le rendement économique de ces transformateurs. D'une manière générale, ceux-ci se sont bien comportés et les bobinages en aluminium n'ont donné lieu à aucune perturbation. Un certain nombre de ces transformateurs avaient été construits durant la guerre de 1914—1918 et sont encore actuellement en service. Les transformateurs de ce genre peuvent donc être recommandés sans crainte.*

Im folgenden sollen über die bisherigen Betriebserfahrungen über Transformatoren mit Aluminiumwicklungen, im folgenden mit Al-Transformatoren bezeichnet, einige Angaben gemacht werden, soweit dies im Rahmen der Möglichkeit liegt. Um eine breitere Grundlage für diese Mitteilungen zu erhalten, wurden 11 Elektrizitätswerke (Ueberland- und städtische Werke) sowie 7 Hersteller- und Reparaturfirmen von Transformatoren um die Bekanntgabe ihrer Erfahrungen ersucht. Für die grosse Unterstützung, die vom Sekretariat des SEV und von den an der Umfrage beteiligten Elektrizitätswerken und Firmen bei den Erhebungen gewährt wurde, soll an dieser Stelle bestens gedankt werden.

Die Ergebnisse der Umfrage erstrecken sich über ca. 300 Al-Transformatoren, welche bei den angefragten Elektrizitätswerken seit kürzerer oder längerer Zeit im Betrieb stehen und über mehr als 2300 solcher Apparate, die von den Herstellerfirmen während des jetzigen Krieges gebaut und abgeliefert wurden. Hiezu kommen noch Angaben, die mehr als 100 Al-Transformatoren betreffen, welche aus dem letzten Weltkrieg stammen.

In bezug auf die Ausführungsart der erwähnten Transformatoren handelt es sich zum weitaus grössten Teil um solche in Oel für Innenraum- und Freiluftaufstellung mit und ohne unter Last schaltbaren Stufenschaltern, deren Schalthäufigkeit in Einzelfällen bis 12 000 Schaltungen pro Jahr betragen kann, sowie um einige vereinzelte Lufttransformatoren. Mit Ausnahme von einigen Lokomotivtransformatoren ist ausschliesslich von Dreiphasentransformatoren für 50 Hz die Rede. Deren Leistungen liegen zwischen 8 und 22 000 kVA, die Oberspannungen zwischen 9 und 73 kV und die Unterspannungen zwischen 220 V und 10 kV.

Bei den im Laufe des gegenwärtigen Krieges gebauten Al-Transformatoren beträgt die Betriebs- und Beobachtungszeit einige Monate bis höchstens 4 Jahre, während sich bei denjenigen, die im letz-

ten Kriege gebaut wurden, die Betriebsdauer bis auf 25 Jahre ausdehnte.

Einmütig gaben alle befragten Elektrizitätswerke und Firmen der Auffassung Ausdruck, dass die Betriebs- und damit die Beobachtungsdauer für die im Laufe des jetzigen Krieges gebauten Al-Transformatoren zu kurz sei, um ein endgültiges Urteil über das Betriebsverhalten dieser Apparate abgeben zu können.

Uebereinstimmend teilten alle in die Umfrage einbezogenen Unternehmungen mit, dass bis jetzt noch keine einzige Störung bei den Al-Transformatoren neueren Herstellungsdatums auf die Verwendung von Aluminium als Wicklungsmaterial zurückzuführen war. In bezug auf die aus dem letzten Krieg stammenden Al-Transformatoren wurde ausnahmslos bestätigt, dass keine davon zu Klagen im Betrieb Anlass gegeben hätten. Sofern diese in Herstellungs- oder Reparaturwerkstätten zurückkehrten, war es, um sie für eine andere Spannung umzubauen, oder um deren Leistung durch Umbau auf eine Cu-Wicklung etwas zu erhöhen.

Trotzdem die generellen Angaben über das Betriebsverhalten zu einem sehr befriedigenden Resultat gelangen, soll im folgenden auf einige Detailfragen kurz eingetreten werden. Zunächst sei der Vergleich der physikalischen und technologischen Haupteigenschaften von Cu und Al in Erinnerung gerufen.

So beträgt bekanntlich der elektrische Widerstand von Al ca. das 1,6...1,65fache desjenigen von Cu, d. h. ein leitwertgleicher Leiter muss in Al den 1,6...1,65fachen Querschnitt oder die 1,265...1,283fachen linearen Dimensionen aufweisen, wie der entsprechende Cu-Leiter.

Die spezifische Wärme für Al beträgt das 2,34fache, die Wärmeleitfähigkeit das 0,53fache des Cu. Diese Zahlen im Zusammenhang mit den wirksam gekühlten Wicklungsflächen erlauben einen Vergleich der Al- mit der Cu-Wicklung in bezug auf das thermische Verhalten.