

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 21 (1930)
Heft: 14

Artikel: Skizze über Fragen des Transformatorenbaues
Autor: Kübler, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061323>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 03.04.2026

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

Skizze über Fragen des Transformatorenbaues ¹⁾.

Von Oberingenieur J. Kübler, Baden.

621.314.22

Beim Bau von Grosstransformatoren treten einige ganz wichtige Fragen in den Vordergrund, z. B. für den Eisenkern die Vermeidung der Eisenkrankheiten, für die Wicklung die Festigkeit gegen Stromkräfte, die Isolierung für Höchstspannungen usw., für den Kasten und für den ganzen Transformator die Transportfähigkeit. Auch das Kühlproblem, die Grösse der Arbeitsmaschinen und die Prüffeldeinrichtungen spielen eine wichtige Rolle. Weitere wichtige Fragen stellen die Reguliertransformatoren und die Spannungswandler für Höchstspannungen an den Transformatorbauer.

Im Folgenden behandelt der Autor alle diese Probleme und untersucht, inwiefern sie die praktischen Grenzen im Grosstransformatorenbau bestimmen.

Dans la construction des transformateurs de grande puissance, des questions de première importance se présentent, comme p. ex. les maladies du fer dans le noyau, la déformation du bobinage sous l'effet des courants de court-circuit, puis la question d'isolement lors de tensions très élevées, etc., ainsi que les possibilités de transport de la cuve et du transformateur entier. Le problème du refroidissement, les dimensions des machines-outils et l'installation de la plateforme d'essai jouent également un rôle important. D'autres questions se posent au constructeur des transformateurs de réglage ou de ceux servant à la transformation de tensions très élevées.

L'auteur traite ces divers problèmes et recherche jusqu'à quel point ils fixent des limites pratiques à la construction des transformateurs de grande puissance.

Aus kleinen Anfängen wachsen sich die Elektrizitätsnetze zu immer grösseren Gebilden aus. Sie, die erst nationale Einstellung hatten, überschreiten die Landesgrenzen, werden zu internationalen Kupplungen. Mit ihrer Ausdehnung wächst ihr Gewicht in der nationalen und der internationalen Wirtschaft, wächst auch ihre Grösse in Erzeugung der elektrischen Energie und ihrem Absatz.

Kaum denkbar wäre diese Entwicklung ohne den Transformator. Durch seine Fähigkeit, die elektrische Energie von einer Spannungsform in eine andere umzuformen, gibt er erst die Möglichkeit, ausgedehnte Netze zu beherrschen. Von seiner Güte hängt die Kontinuität der Energieversorgung weitester Gebietsteile ab. Er verbindet die Netze, und doch wahrt er durch die Regulierfähigkeit seiner Spezialformen die gegenseitige Unabhängigkeit. Nur mit seiner Hilfe ist nationaler und internationaler Zusammenschluss der Elektrizitätsnetze möglich.

Es lohnt sich deshalb die Mühe, wichtige Gesichtspunkte, die seinen Bau bestimmen, neuerdings kurz zu streifen, und einzelne aus dem Allgemeinen herauszuheben. Der Spezialist wird wenig Neues finden. Diese Arbeit soll vielmehr der Kenntnis jener Gesichtspunkte eine breitere Grundlage geben. Dabei mögen bei den Transportfragen einige für die Schweiz und allgemein für Gebirgsgebiete interessante Punkte miterwähnt sein.

Am augenfälligsten an der Entwicklung des Transformators ist das ständige Wachsen seiner Grösse und seiner Spannungen, gefordert durch den zunehmenden Verbrauch elektrischer Energie, durch die sich immer weiter erstreckenden Netze, durch Herniederholung der weissen Kohle ins Flachland und nicht zuletzt durch das Aufsteigen der schwarzen Kohle im elektrischen Draht bis ins Gebirge. Die Frage nach den Grenzen dieses Wachstums ist naheliegend. Sie möge in dieser kleinen Arbeit etwas näher geprüft werden, und die Prüfung sich erstrecken auf den Bau von Eisenkern, Wicklung, Kasten und Kühlung im Hinblick auf Material, Herstellung, Isolation, Stromkräfte, magnetische Streuung in der Wicklung, zusätzliche Verluste, unter Berücksichtigung der Anzapfungen, der Prüffragen, des Transportes und der Montage.

Damit verbunden sollen weitere allgemeine Transformatorfragen gestreift werden, und anschliessend Charakteristisches über Mehrwicklungs- und Reguliertransformatoren und über Spannungswandler kurz gesagt werden.

Vorweg sei bemerkt, dass diese Skizze sich nur auf Oeltransformatoren erstreckt, und dass der Drehstromtransformator vorzugsweise berücksichtigt wird.

Es bestehen kaum zwingende technische Gründe, die hindern könnten, den Kern in beliebiger Grösse herzustellen. Die Umlaufspannung, die mit dem aktiven Eisenquerschnitt zunimmt, kann durch ausreichende Unterteilung in gegenseitig gut

¹⁾ Wiedergabe eines Berichtes für die Weltkraftkonferenz 1930, Berlin.

isolierte Blechpakete beherrscht werden. Die Kühlung bereitet keine Schwierigkeiten, wenn die heute allgemein gebräuchlichen Schlitze quer zu den Blechen angewendet werden. Erleichtert würde die Kühlung durch Minderung der Eisenverluste. Doch ist dies eine Materialfrage, die Frage über die Blechverlustziffer. Bei den Blechwerken besteht wohl die Tendenz, Bleche mit niedrigerer Verlustziffer herzustellen. In dieser Beziehung sind die amerikanischen Werke den europäischen weit voran, indem sie bereits Bleche von 1 Watt/kg/10 000 Gauß, 50 Per/s in erstklassiger Ausführung mit glatter Oberfläche anbieten. Es besteht der Wunsch, die europäischen Werke möchten wie vor dem Kriege in dieser Hinsicht wieder in erster Linie stehen.

Kaum näher braucht ausgeführt zu werden, wie wichtig für die Eisenkerne der Grosstransformatoren eine in allen Beziehungen sorgfältige Ausführung ist. Insbesondere können die Eisenkrankheiten nur durch sorgfältigste Ausführung der Bolzen-, Paket- und Stossfugenisolationen vermieden werden. Mit diesem Vorbehalt sind letztere aber auch absolut ausgeschlossen. Eine gewisse wirtschaftliche Begrenzung des beliebigen Grösserwerdens der Eisenkerne stellt sich durch die Bearbeitungsmaschinen ein, die Scheren, Stanzen, Hobelmaschinen usw., und ausserdem werden die Fabrikbauten und Krane eine gewisse Grenze vorschreiben. Es wäre wirtschaftlich kaum zu verantworten, für die Herstellung nur weniger solcher Grosstransformatoren abnormal grosse Anlagen zu erstellen, die nur zum Teil ausnützbar wären. Solche Spezialanlagen müssten sich im Preise des Fabrikates auswirken.

Man könnte sich vorstellen, dass ein weiterer Grund der Grössenbeschränkung der Eisengestelle im Transporte liegen möchte, wobei vor allem an den Drehstromtransformator zu denken ist. Doch tritt dieser Grund weniger in den Vordergrund, denn wenn der Transport des Eisengestelles eines dreisäuligen Transformators nicht möglich ist, so wird ein fünfsäuliger Kern mit zwar grösserem Gewicht, aber geringer Höhe gewählt, oder man transportiert eben in Teilen. In diesem Falle bietet der Kern mit getrennten Säulen und Jochen, also jene Ausführung, die von der Ineinanderschachtelung der Joch- und Säulenbleche absieht, eine für die Montage äusserst zweckmässige Anordnung.

Weit mehr Schwierigkeiten für die Steigerung der Leistung als das Eisengestell verursacht die Wicklung. Sie liegen nicht bei der Herstellung, denn auch hier wird die Grösse allein durch die Einrichtungen der Fabrik begrenzt und wiederum nicht etwa beim Transport, denn so grosse Dimensionen und Gewichte werden Wicklungen kaum je erreichen, dass nicht die heutigen Transporteinrichtungen genügen können, um zum mindesten die vollständig zusammengebaute Wicklung für eine Säule zu spedieren. Für grosse Leistungen und Spannungen kommen andere als zylindrische konzentrische Wicklungen kaum in Betracht; alle neuen Grosstransformatoren entsprechen dieser Forderung. Sie ist darin begründet, dass Scheiben- und nichtzylindrische Wicklungen von Grosstransformatoren nur mit schweren Hilfskonstruktionen mechanisch genügend fest zu bauen sind, um den Stromkräften zu widerstehen. Aber auch die Vergrösserung der konzentrischen Wicklung ist durch die Steigerung der Stromkräfte behindert. Da sind es zuerst die Radialkräfte, die nicht ohne weiteres zu beherrschen sind; sie wirken in gleicher Weise wie der Druck auf die zylindrische Wand eines Dampfkessels. Bei sonst gleicher Dimensionierung wächst also die Kupferbeanspruchung durch die Stromkräfte in gleichem Masse wie der Durchmesser der Wicklung. Sie wird mit zunehmendem Durchmesser bei den bisher gebräuchlichen Bemessungen bald so gesteigert sein, dass man an der Grenze der zulässigen Beanspruchungen des Kupfers ist. Weiches Elektrolytkupfer ist sehr duktil und fast unelastisch; eine spezifische Belastung von 600 kg/cm² (vgl. Hütte 1920, S. 494) dürfte vielleicht die obere Grenze bilden, auch unter Berücksichtigung, dass der maximale Stromstoss nur sehr kurze Zeit, selbst bei 16²/₃ Per/s nur etwa ¹/₅₀ s andauert. Mit einer einfachen zahlenmässigen Rechnung ist einigermassen ein Ueberblick zu gewinnen. Es seien Verhältnisse angenommen, wie sie sich für einen Grosstransformator sehr hoher Spannung mit zwei Wicklungen in einfach konzentrischer Anordnung etwa ergeben können:

Kurzschlussspannung des Transformators	12 %
Magnet. Flussdichte im Aktiveisen	13000 Gauss
Magnet. Flussdichte im Streukanal bei Nennstrom	1400 Gauss
Streukanalbreite	15 cm
Stromdichte im Kupferleiter	300 A/cm ²
Zulässige Zugspannung im Kupferleiter	600 kg/cm ²
Ausgenützte Säulenlänge	220 cm
Amperewindungen für 1 cm ausgenützte Säulenlänge	710 AW/cm
Innerer Radius der äusseren Wicklung	„r“ cm
Radiale Höhe der inneren Wicklung	6 cm
Abstand der inneren Wicklung vom Kern	4 cm

Vorausgesetzt ist, dass die *ganze* radiale Kupferhöhe h in cm gleichmässig trage.

Die nachfolgenden Berechnungen beziehen sich auf den *maximalen* Amplitudenwert des Kurzschlussstromes (Stosskurzschlussstrom).

$$\text{Stromdichte } 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{100 \%}{12 \%} \cdot 300 = 6250 \text{ A/cm}^2.$$

Dichte des magnet. Flusses im Streukanal:

$$1,8 \cdot 1400 \cdot \frac{100 \%}{12 \%} = 21\,000 \text{ Gauss.}$$

Radiale Stromkraft für 1 cm axiale reine Kupferlänge für den ganzen Umfang

$$\text{in Dyn } \frac{1}{2} \cdot \frac{21\,000 \cdot 6250 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h}{10}.$$

Die maximale Tangentialkraft ergibt sich demnach unter gleicher Voraussetzung:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{21\,000 \cdot 6250 \cdot r \cdot h}{10} \text{ Dyn.}$$

Die zulässige Zugkraft für 1 cm axiale Kupferlänge und für die axiale Kupferhöhe h errechnet sich zu: $981\,000 \cdot 1 \cdot h \cdot 600 \text{ Dyn.}$

Unter Gleichsetzung beider Werte findet sich:

$$r = 90 \text{ cm ca.}$$

und der Kernradius:

$$90 - (15 + 6 + 4) = 65 \text{ cm ca.,}$$

was ca. 9300 cm^2 aktiven Eisenquerschnitt und bei 13000 Gauss eine Umlaufspannung von 270 V ergibt.

Ohne Ueberschreitung der zulässigen Kupferbeanspruchung von 600 kg/cm^2 ist die maximal mögliche Leistung bei 50 Per/s demnach:

$$\frac{270 \text{ V/Wdg} \cdot 220 \text{ cm} \cdot 710 \text{ AW/cm} \cdot 3}{10^6} \sim 125 \text{ MVA.}$$

(Damit nicht unrichtige Schlüsse gezogen werden, sei ausdrücklich bemerkt, dass dieser Grenzwert nicht allgemeine Gültigkeit hat, sondern nur für die zugrunde gelegten Annahmen zutrifft.) Für andere Frequenzen sinkt oder steigt die Grenzleistung proportional.

Alle Grosstransformatoren werden zur Zeit schon aus Gründen des Schalter-schutzes mit grossen Kurzschlussspannungen gebaut. Wie man aus dem Resultat ersieht, wird trotzdem eine gewisse Höchstleistung für gegebene Kupferbeanspruchung verhältnismässig rasch erklommen. Nun darf aber gerade für die Grosstransformatoren mit einer gewissen Senkung der Betriebsspannung vor dem Transformator in allen Fällen gerechnet werden, so dass die Grenzleistung ohne Gefahr ganz allgemein noch entsprechend gesteigert werden kann.

Von Fall zu Fall wäre eine weitere Steigerung zu verantworten, wenn individuell die Senkung der zugeführten Spannung berücksichtigt würde. Allein dann wäre

der Transformator vollkommen dem Aufstellungsort angepasst, was recht unangenehm zum Ausdruck käme, wenn Veränderungen am Netze eintreten, sei es durch Vergrößerung von Kraftwerken oder aus anderen Ursachen, oder wenn eine Translokation vorzunehmen wäre.

Aus der Rechnung lassen sich weitere Schlüsse ziehen, wie es möglich ist, zu noch höheren Grenzleistungen zu kommen: In erster Linie wäre daran zu denken, die Kurzschlussspannung zu erhöhen. Man könnte aber auch die Streulinienichte z. B. durch doppelkonzentrische Anordnung oder mit andern Mitteln, oder die Stromdichte verringern, oder schliesslich das Kupfer der Wicklung müsste durch ein zugfesteres Material ersetzt werden.

Neben der Sprengkraft sind die axialen Verschiebungskräfte nicht zu vernachlässigen, im besondern dann, wenn Unsymmetrien, sei es durch Anzapfungen oder durch differenzierte Drahtisolationen usw., in der Wicklung bestehen. Je höher die Leistung, desto angebrachter ist es, auf Anzapfungen sorgfältig zu achten und für die allergrössten Leistungen vielleicht zweckmässigerweise allfällige Regulierung in getrennte Aggregate zu verlegen.

Eine weitere unangenehme Begleiterscheinung der Steigerung der Leistung sind die zusätzlichen Kupferverluste, jene Verluste, die durch Stromverdrängung im Leiter entstehen. Denn je grösser die Leistung ist, desto grösser sind die Leiterquerschnitte, gleiche Spannung vorausgesetzt, und desto eher entstehen unangenehme Stromverdrängungen. Dass diese Schwierigkeit allgemein empfunden wird, zeigt die erhebliche Zahl von Patentanmeldungen, die Vorschläge zur Lösung dieser Frage bringen. Leicht ist es nicht, dieser Schwierigkeit zu begegnen. Man wird die Leiter teilen und suchen, sie so anzuordnen, dass Teilleiter gleiche Streuflüsse umfassen. Doch bietet diese Lösung fabrikationstechnische Komplikationen. Oder man wird die Teilleiter so anordnen, dass Ausgleichströme weitgehendst gedrosselt werden, so dass deren Einfluss auf die Lastströme der Teilleiter zurücktritt. Die Schwierigkeiten in der Stromverteilung sind unter Umständen noch vermehrt durch Anzapfungen, welche die an sich sonst gute Aufteilung der Ströme zunichte machen können.

Wenn eine grosse Kurzschlussspannung recht willkommen ist, um die Stromkraftbeanspruchung zu mindern, so führen andererseits die mächtigen Streuflüsse zu weiteren unliebsamen Nebenwirkungen. Heute sind bei Grosstransformatoren Streuflüsse üblich, die an Grösse den Hauptfluss eines Transformators von mehreren tausend kVA übertreffen. Ohne weiteres ist der Weg dem Streufluss nicht vorgeschrieben. Wenn er auf Schmalflächen der Aktivbleche auftritt, ist er ungefährlich. Tritt er aber durch die Breitflächen ein, oder nimmt er seinen Weg durch grossmassige Konstruktionsteile und besonders, wenn sie ferromagnetisch sind, so entstehen starke Wirbelströme. Ihre unerwünschten Folgen sind: starke Zunahme der vom Strom abhängigen Verluste, also scheinbar weitere Erhöhung der Kupferverluste, dazu örtliche, nicht ohne weiteres ungefährliche Erwärmungen.

Dem Konstrukteur stehen auch hierfür einige gute Hilfsmittel zur Verfügung. In erster Linie wird er gefährdete Teile aus nicht magnetischem Material herstellen. Wo diese Massnahme nicht anwendbar ist oder nicht genügt, helfen Schutzwindungen aus gut leitendem Material, z. B. Kupfer, und im Notfalle bietet er den Streuflüssen mit Dynamoblechpaketen Nebenwege zu den gefährdeten Konstruktionsteilen. Ein Beispiel dafür bietet die Hilfssäule des Transformators nach Fig. 1. Oder er verwendet andere Wicklungsanordnungen, z. B. die doppelkonzentrische, bei denen die Streuflüsse in geringerem Masse aus dem Bereich der Wicklung heraustreten. Als Resultat dieser Ueberlegungen darf gesagt werden, dass dem erfahrenen Konstrukteur genügend Mittel zur Verfügung stehen, um sowohl der Erscheinung der Stromverdrängung im Leiter, als den Streustörungen in den Armaturteilen entgegenzutreten. Einer Steigerung der Grenzleistung steht in dieser Hinsicht nichts entgegen.

Mit der Wicklung in engem Zusammenhange steht die Frage der Zunahme der Betriebsspannung. Nachdem man die Prinzipien der Isolierung, wie sie beim Manteltransformator längst bekannt sind, d. i. die Trennung der Oelräume durch

feste Isolierschichten quer zu den elektrischen Feldlinien, auf dem Kerntransformator mit konzentrischen Wicklungen in erhöhtem Masse anwendet, steht auch der Spannungssteigerung bis 380 kV kein ernstliches Hindernis im Wege. Doch muss hier einschränkend bemerkt werden, dass sich nur wirkliche Grosstransformatoren, zu denen Transformatoren über 10 000 kVA zu rechnen sind, mit diesen Spannungen wirtschaftlich herstellen lassen. Wohl sind kleinere Transformatoren ebenfalls zu bauen, aber die Isolierung, zu der auch die Klemmenabstände zählen, erfordert so erhebliche Dimensionen an sich, dass der Preis mit sinkender Leistung nur noch unmerklich sinkt. Solche „kleine“ Transformatoren sind auch nicht wirtschaftlich hinsichtlich der konstanten Verluste, der Eisenverluste, die relativ mit abnehmender Leistung stark anwachsen. Klar ist, dass die Grösse der Leistung die für hohe Spannungen von vornherein hohen Kosten der Schaltanlage praktisch nicht beeinflusst, und dass deren Kosten um so mehr ins Gewicht fallen, je kleiner die von ihr beherrschte Leistung ist. Doch sei dies nur nebenbei bemerkt, da es nicht eigentlich zum Thema gehört.

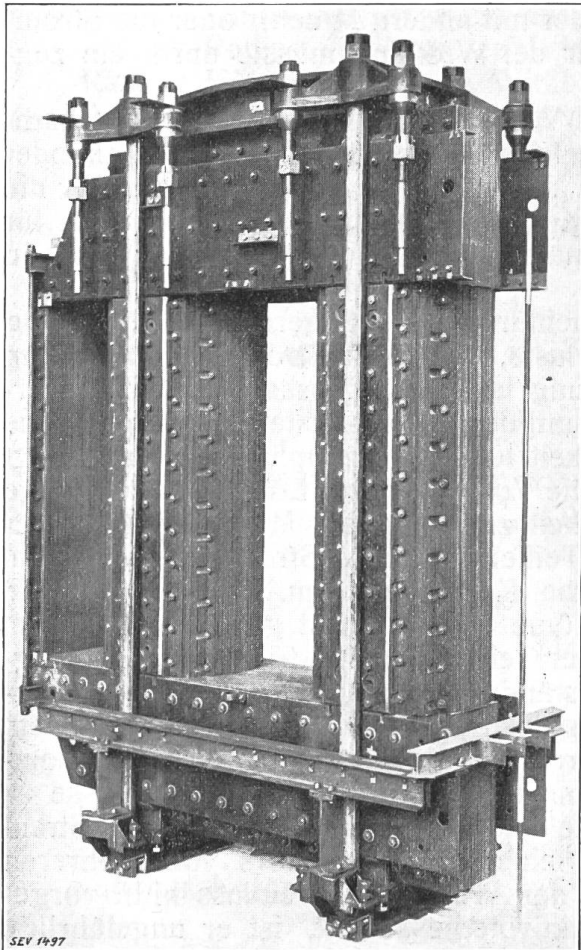


Fig. 1.

Einphasen-Wechselstrom-Transformator mit Ölumlauf und Wasserkühlung, 2×9000 kVA, $16 \frac{2}{3}$ Per/s, 15,5/66 kV und 15,5/132 kV. Mit Hilfssäule für Hauptflussdifferenz und z. T. für Streufluss.

Gegen die Erdung des Neutralpunktes wird angeführt, dass Erdschlüsse meist zu Kurzschlüssen und Abschaltungen, also Betriebsunterbrechungen führen. Nun leiten von 110 kV ab sowohl atmosphärische Entladungen als auch betriebsmässige Ueberspannungen nur noch ganz ausnahmsweise Erdschlüsse ein. Es entfällt somit ein Haupteinwand, der verhindern könnte, die beträchtlichen wirtschaftlichen Vorteile der Neutralpunktterdung, bedingt durch die geringer zu fordernde Isolation, auszunützen. Diese Vorteile zeigen sich einmal in den Baukosten und zum andern in den geringeren konstanten Verlusten der Transformatoren. Hierzu kommt, dass Transformatoren für geerdeten Neutral-

punkt bis zu grösseren Leistungen komplett bahntransportfähiger sind als normal isolierte Transformatoren.

Es dürfte nicht unnötig sein, die Frage zu streifen, ob das Gefahrmoment der Sprungwellen für wachsende Leistung und Spannung zunimmt. Da ist vor allem zu beachten, dass Spannungsstösse, selbst wenn sie direkt vor dem Transformator an den Durchführungen entstehen, in ihrer ersten Schärfe die Wicklung nicht erreichen. Die Durchführungen besitzen erhebliche Kapazität, so dass sie die kurzwelligsten Harmonischen des Spannungssprunges, die allein die Steilheit der Wellenstirn bedingen, schon stark herausziehen und zur Hauptsache nur langwelligere Harmonische auf die Wicklung durchlassen. Diese aber treten relativ langgestreckt in sie ein, und ihr Spannungswert verteilt sich auf eine grosse Länge, so dass eine übermässige Beanspruchung auch an den Anfangswindungen nicht eintritt. Eine Beschädigung ist um so weniger zu erwarten, als die Zeitdauer enorm kurz ist und die festen und flüssigen Isolationen für so kurze Zeiten beträchtlich höhere

Durchschlagsfestigkeiten aufweisen als für Zeiten, welche noch mit der Uhr messbar sind. So ist es verständlich, dass bei einem nach modernen Prinzipien in der Wicklung isolierten Transformator durch Spannungssprünge überhaupt keinerlei Beschädigungen weder der Eingangs- noch der übrigen Windungen je auftritt, wie dies die Praxis aus den letzten Jahren einwandfrei bewiesen hat.

Die Steilheit der Sprungwellen wird übrigens noch weiter stark herabgesetzt durch den sog. Schutzring (DRP. 262 251 von 1911), der an Ein- und an Ausgängen der Wicklungen angeordnet ist, etwa nach Fig. 2. Dieser Ring überträgt allfällig noch auftretende kurzweilige Harmonische der Sprungwelle quer zur Wicklung und flacht die die Windungen durchziehende steile Welle noch weiter ab. Uebrigens dürfte dieser Ring als erster Ansatz zum schwingungsfreien Transformator gelten. Mit wachsender Leistung nimmt die Windungslänge zu, wodurch logischerweise bei gleicher Wellensteilheit die Spannungsdifferenz zwischen zwei Windungen steigt. Die Zunahme ist aber sehr gering und die Gefahrzunahme demnach auch. Selbstverständlich, wenn die Betriebsspannung gesteigert wird, ist eine entsprechende Verstärkung der Windungsisolation nicht zu umgehen. Jeder Konstrukteur, der die Verantwortlichkeit nicht leicht nimmt, wird von sich aus unter Beachtung der Windungslänge so starke Drahtisolation vorsehen, dass sie für die betriebsmässigen Spannungssprünge volle Sicherheit bietet. Nachdem anfänglich die Forderungen für die Isolation der Eingangswindungen allzu hoch angesetzt und die übrigen Teile der Wicklung fast vernachlässigt worden waren, haben sich heute ausgeglichene Anforderungen herauskristallisiert.

Um nochmals kurz auf den schwingungsfreien Transformator zurückzukommen: Die gefundene Lösung ist äusserst bemerkenswert. Sie entspricht aber kaum einem allgemeinen Bedürfnis, denn die bisherigen Konstruktionsprinzipien genügen bei richtiger Anwendung vollkommen.

Ein nicht ganz unwichtiger Teil des Oeltransformators ist dessen Kasten. Von seiner richtigen Ausführung hängt nicht nur das ununterbrochene Arbeiten des Transformators in vielen Beziehungen ab, sondern ganze Anlagen sind sogar von seiner Festigkeit abhängig. Man denke nur an die grossen Oelmengen und was daraus entstehen könnte, wenn die Nähte nicht allen Anforderungen standhielten.

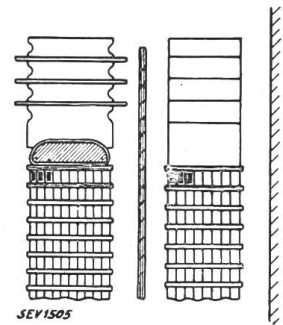


Fig. 2.
Schutzring, der Oberspannungswicklung vorgeschaltet.

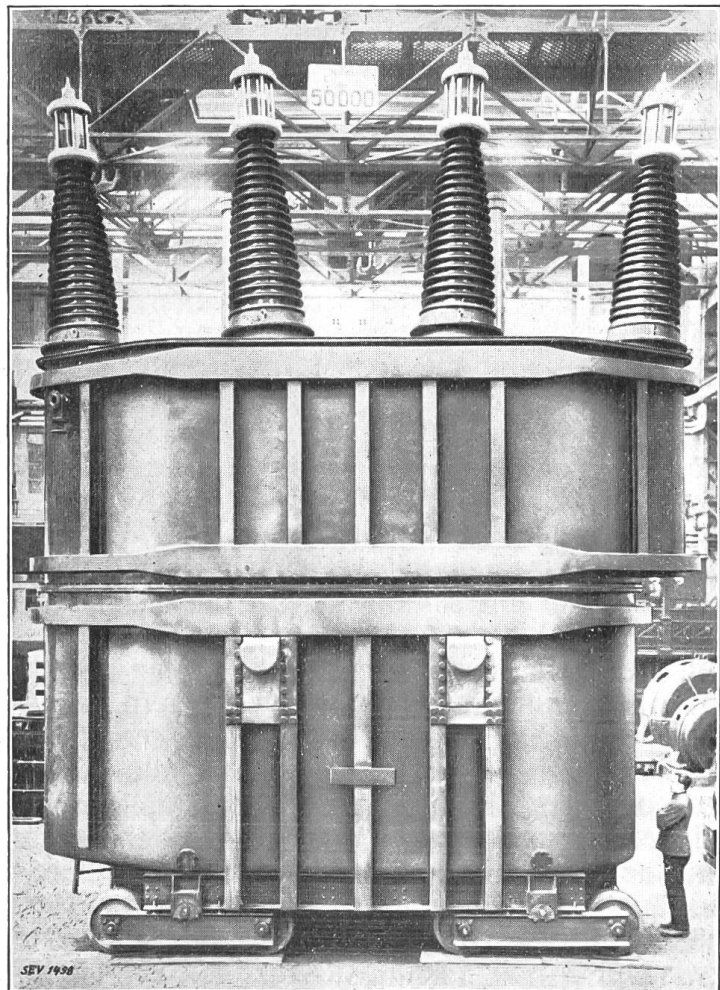


Fig. 3.
Drehstromtransformator für Freiluftaufstellung mit Oelumlaufl und Wasserkühlung, 36 000 kVA, 42 und 50 Per s, 11/252 kV. Geteilter Oelkasten. Oelkonservator abmontiert.

Die gesteigerte Leistung, die erhöhte Spannung vergrössern seine Dimensionen, sein Gewicht. Seine Gurtungen, seine Versteifungen, auch seine Wände müssen verstärkt werden. Schon für die heutigen Leistungen ist für gewisse Transporte eine Unterteilung in verschraubbare Stösse notwendig (Fig. 3). Vielleicht muss er sogar am Ort seiner Aufstellung aus transportfähigen, vorgearbeiteten Stücken verschweisst werden. Kürzlich sind im Gebirge der Schweiz grosse Kasten nach der zuletzt genannten Aufbauweise aufgestellt worden. Man darf füglich annehmen, dass die Kastenfabrikation mit dem Bedarf Schritt halten wird.

Von der Steigerung der Spannung in stärkster Abhängigkeit stehen die Durchführungen. Aus der Erfahrung heraus lässt sich behaupten, dass das Kondensatorprinzip in seiner bekannten Ausführung als Hartpapierrohr mit Metalleinlagen für die Höchstspannung sich vorläufig kaum eignet. Jedoch leistet es vorzügliche Dienste in der Kombination solcher Hartpapierrohre mit Oelkanälen, welche Lösung übrigens schon allgemein für die sog. Oeldurchführungen für hohe Spannungen in Verwendung ist. Für diese Durchführungen bedarf es eines Mantels aus Isolationsmaterial, meist keramischer Natur, als Gefäss für die Oelfüllung, dessen Oberteil für Spannungen bis 380 kV, soll er aus einem Stück bestehen, gigantische Formen annimmt; sind doch diese Stücke für 220 kV schon an 2 bis $2\frac{1}{2}$ m hoch, und sie dürften bei 380 kV etwa $3\frac{1}{2}$ m hoch werden. Die keramischen Fabriken sind kaum heute schon in der Lage, Stücke von diesem Ausmasse anzufertigen. Doch schreiten sie in der Entwicklung ihrer Produkte stets vorwärts, finden neue, weniger schwindende Mischungen, die die Herstellung grösserer Stücke erleichtern, so dass sie in nicht allzu ferner Zeit auch diese Schwierigkeit zu überwinden in der Lage sein werden. Und sollte Ihnen die Erreichung dieses Zieles noch einige Zeit versagt sein, so besteht immer noch die Möglichkeit, die ganze Höhe aus zwei Stücken, allerdings unter Einbusse manchen Vorteils, zusammenzusetzen. Das Unterteil des Isoliermantels ist kürzer und bietet geringere Schwierigkeit zur Herstellung. Häufig entfällt es ganz, und die Durchführung besitzt in diesem Falle nicht ihre getrennte Oelfüllung, sondern Transformator und Durchführung haben einen zusammenhängenden Oelraum.

Es ist offensichtlich, dass im besonderen bei den Durchführungen für die allerhöchsten Spannungen beträchtlich zu sparen wäre, wenn die Vorteile der Erdung des Nullpunktes ausgenützt werden könnte.

Wenn die Durchführungshöhe an 3,5 m betragen muss, darf der Abstand der äusseren Stromanschlüsse nicht erheblich geringer sein. Vier Durchführungen in einer Ebene mit senkrechter Stellung verlangen z. B. in 3 m Abstand eine Gesamtlänge des Oelbehälters von vielleicht 11 m. Das ist eine enorme Länge, verglichen mit dem bis heute erstellten grössten Kasten. Ein schwaches Schrägstellen der Durchführungen würde wohl verbessern, aber der Gewinn an Länge ist recht bescheiden. Hilfe bringen würde dagegen, die Durchführung stark schräg zu stellen, vielleicht unter 30° gegen die Vertikale oder mit noch stärkerer Neigung. Vorausgehend wäre allerdings zu prüfen, ob das keramische Material die entstehenden Biegespannungen ertragen könnte. Oder es wäre zu überlegen, drei Durchführungen in eine Ebene und die vierte auf die andere Kastenseite zu stellen. Die Lösung schränkt jedoch den Raum für die Unterspannungsdurchführungen stark ein, was häufig nicht zugänglich ist, und zudem wird nun der Kasten extrem breit, wohl zwischen 3 und 4 m. Mit Ausbauten könnte sowohl am Behältergewicht als an Oelmenge gewonnen werden. Weniger Umstände macht das Anbringen der Durchführungen bei Einphasentransformatoren. Für die Anordnung der Durchführungen würde wiederum die Neutralpunktserdung über viele Schwierigkeiten weghelfen.

Ein kurzes Wort soll noch der Kühlungsrichtung gewidmet werden, obgleich sie weder durch die Spannung noch durch die Leistung ausser in den Abmessungen beeinflusst werden. Ihre Entwicklung berechtigt, sie nicht zu übergehen. Am naheliegendsten zur Ableitung der gewaltigen Wärmemengen ist Wasserkühlung in Verbindung mit Oelumlaufl. Sie bietet bis zu den allergrössten Kühlleistungen

keinerlei besondere Merkmale, ausser dass sie wohl unbestritten der stets niedrigen Kühlmitteltemperatur wegen die niedrigsten Durchschnittstemperaturen und damit die längste Lebensdauer des Isolationsmaterials und des Oeles gewährleistet. Recht häufig verursacht die Wasserbeschaffung, sei es in der Anlage oder für den Betrieb, so hohe Auslagen, dass diese Kühlart als unwirtschaftlich ausser Betracht fällt. Dann möchte man erst mit natürlicher Kühlung ein Ausreichen suchen, und dabei würde die Verwendung niedrigstwertiger Bleche durch geringste Kernverluste stark unterstützen. Allein diese Lösung des Kühlproblems müsste bei Grosstransformatoren zu extrem grossen Dimensionen der Kühler führen, so dass man zur künstlichen Bebläsung greifen muss. Sie lässt sich, in Kombination mit natürlicher Luftkühlung bis zu Teilleistungen ausreichend, mit oder ohne künstliche Oelzirkulation in recht mannigfaltigen Lösungen zur Anwendung bringen. Bald sind es künstlich angeblasene Wandrohre am Oelkasten, die mit abgestellter Bebläsung noch bis zu erheblichen Teilleistungen ausreichen. Bald werden sog. Radiatoren am Kasten angebracht oder in getrennten Batterien vereinigt, mit Bebläsung, mit künstlichem oder mit natürlichem Oelumlaufl, auch diese bis zu Teilleistungen ohne Bebläsung verwendbar. Fig. 4 zeigt eine Variante dieses Kühlsystems. Oder es sind, um mit bester Ausnützung der Oberfläche zu den geringsten Baukosten zu kommen, Radiatoren oder Rohrkühler, diese nach Art der Autokühler mit Querverlüftung, ganz unter Verzicht auf natürliche Kühlung, mit künstlicher Oelzirkulation vorgesehen.

Die Steigerung der Leistung wird für die Ausstattung der Versuchsstände der Fabriken erhöhte Anforderungen stellen. Vor allem die Messungen der Kupfer- und der Eisen-Charakteristika erfordern grosse Scheinleistungen der Maschinensätze. Ein 100 MVA Transformator mit 10% Kurzschlussspannung verlangt einen Generator von 10000 kVA. Ebenso stellen Sprungwellen- und Windungsproben beträchtliche Anforderungen an die Grösse der Maschinen. Wenn man bedenkt, dass Mammuttransformatoren, wie sie hier zur Besprechung vorliegen, doch selten zur Ausführung kommen werden, so möchte man verstehen, dass der Kapitaleinsatz für diese Prüfanlagen mit denjenigen für die grossen Bearbeitungsmaschinen usw. nicht unbeträchtlich erhöhte Herstellungskosten verursachen. Rein technische Schwierigkeiten für die Proberstände zur Prüfung dieser Grosstransformatoren sind allerdings nicht vorauszusehen.

Die Transportfrage ist bei Kern, Wicklung und Kasten schon kurz gestreift worden. Man ist heute in der Lage, Drehstromtransformatoren in geeigneter Bauweise mit abmontierten Durchführungen bis an die 60000 kVA und 220 kV bahntransportfähig herzustellen. Darüber hinaus oder bei Mehrwicklungstransformatoren, schon mit erheblich weniger Leistung, oder wenn es sich um Strassentransporte handelt, ist man gezwungen, in Teilen zu spedieren. Dies dürfte allgemein bei

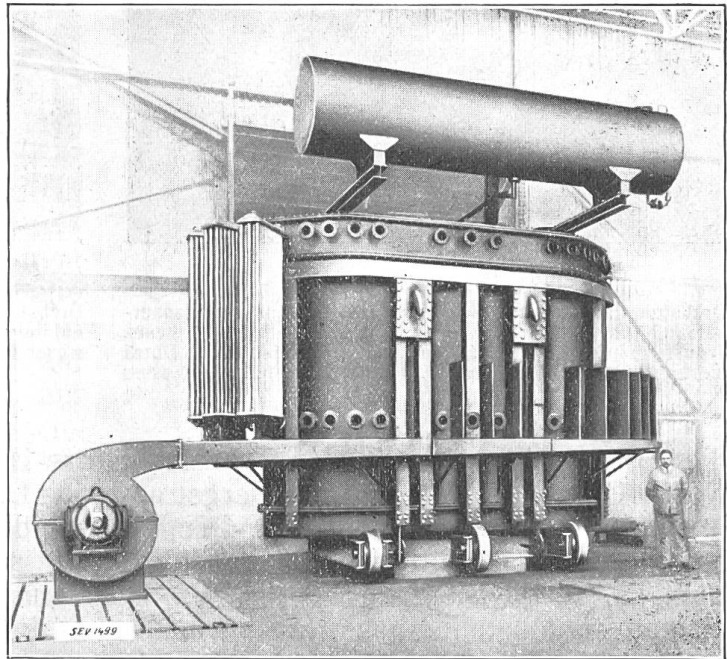


Fig. 4.

Oelkasten zu Drehstromtransformator für Freiluftaufstellung, 30000 kVA, 50 Per/s, 126/55/52,5/50 kV. Schwerkraftömlauf. Radiatoren für Gebläsekühlung nur teilweise anmontiert. Oelkasten dreigeteilt. Unterteil niedrig, sodass darin der Zusammenbau des Transformators möglich ist. Die Oberstösse werden darüber gestülpt.

Transformatoren mit Höchstleistungen erforderlich werden. Das Flachland hat übrigens bedeutende Vorteile gegenüber den Bergländern, wie z. B. der Schweiz, die mit ganz erheblichen Transportschwierigkeiten zu rechnen haben. Wohl liegen die Kraftwerke meist im Talboden, aber selten führt die Eisenbahn als Vollbahn so nahe daran vorbei, dass der Bau eines Anschlussgeleises wirtschaftlich wäre. Einen Einblick in diese Schwierigkeiten mögen Fig. 5 und 6 geben. Sie zeigen

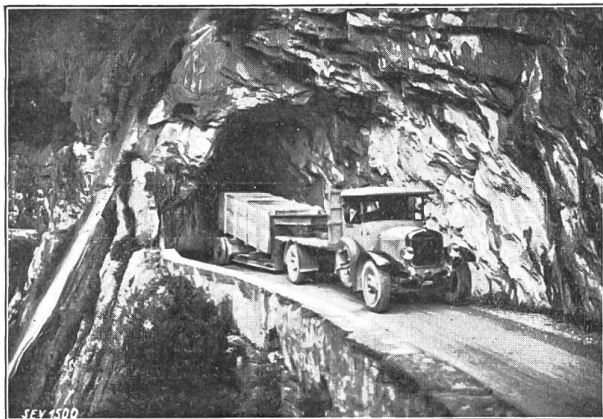


Fig. 5.

Drehstromtransformator für Oelumlauf und äussere Wasserkühlung, 28 000 kVA, 50 Per/s, 11/55 kV. Joch (10 t) dieses Transformators beim Transport auf Grimselstrasse. Durch diesen Tunnel musste der auf Fig. 6 dargestellte Oelkasten transportiert werden.

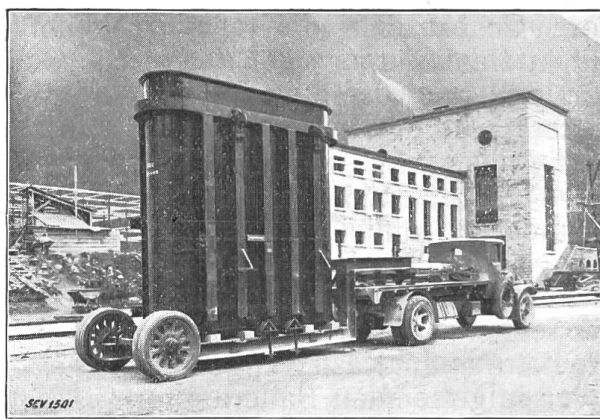


Fig. 6.

Drehstromtransformator für Oelumlauf und äussere Wasserkühlung, 28 000 kVA, 50 Per/s, 11/55 kV. Oelkasten auf Landtransportwagen verladen, bereit zur Abfahrt nach der Schaltanlage Handeck.

die Anfuhr eines 28 000 kVA-Transformators in das Kraftwerk Handeck der Kraftwerke Oberhasli A.-G. auf der Bergstrasse des Grimselpasses. Der Transport musste in getrennten Teilen geschehen. Der Bahnabladeplatz liegt am Ende der Meterspurbahn Interlaken-Meiringen. Die Strasse hat mehrere kurze Kehren und einige Tunnels, sowie Steigung bis $4\frac{1}{2}\%$. Die Strassenlänge vom Abladeplatz in Innerkirchen bis Maschinenhaus Handeck beträgt 14 km. Vorausgehend musste die Strasse verbreitert, die Kehren verbessert und die Tunnels erweitert werden. Damit der Verkehr, insbesondere der Autotransit, nicht gehindert war – ein Ausweichen war mit Ausnahme weniger Stellen ausgeschlossen – wurde nachts gefahren. Mit welcher Sorgfalt die Führung zu geschehen hatte, mag daraus ersehen werden, dass der Oelkasten bei der Durchfahrt durch die Tunnels, von denen einer zudem noch in einer Kurve lag, stellenweise nur ca. 100 mm Spiel aufwies.

Wenn das Abladen von in Teile zerlegten Transformatoren kaum besondere Einrichtungen erfordert, indem zumeist zum Zusammenbau doch eine Montagehalle mit Kran vorhanden ist, bieten ganze oder nur um Einzelteile reduzierte Transformatoren grössere Schwierigkeiten. Falls der Kasten als Ladebrücke des Bahnwagens ausgebildet ist, wird der ganze Transformator mit Hebewinden gehoben, die Drehgestelle ausgefahren und dann der Transformator auf seinen eigenen Rollen abgestellt. Häufig werden auch Lokomotivhebeböcke zum Ausheben des Transformators aus dem Grosslastbahnwagen benützt, wie Fig. 7 zeigt. Manchmal muss nur der Oelkasten in dieser Weise abgeladen werden.

Da die Feuchtigkeit für den Transformator grösstes Gift ist, so sind für den Transport weitgehendste Massnahmen zu treffen, damit deren Zutritt verhindert ist. Wenn mit Oel speditiert wird, so genügt gutes Decken, so dass der Transformator vor Regen und Schnee geschützt ist, vorausgesetzt, dass durch richtige Lüftung die Kondenswasserbildung verhindert wird. Oder der Transformatorkasten ist dicht zu schliessen und mit Entfeuchtern für die Atmungsluft zu versehen. Wenn das Oel entfernt wird, so wird häufig Füllung mit trockenem Gas (Kohlensäure oder Stickstoff) angewendet, wobei Vorkehrungen zu treffen sind, dass ständig automatisch

etwas Gas nachfließt, damit nicht an undichten Stellen feuchte Luft eintreten kann. Transformatoren, welche am Ort zusammenmontiert werden, und zu diesen zählen ziemlich ohne Ausnahme jene mit Grenzleistungen und Grenzspannungen, sind sorgfältig zu trocknen. Ein häufiges bewährtes Verfahren ist das Kochen des mit Oel gefüllten Transformators, fast ausschliesslich mit Vakuum, häufig mit Vakuum bis zu 90 % und mehr, vielfach auch mit nur 50 %. Ein anderes Verfahren ist die Trocknung des noch nicht gefüllten Transformators mit Heissluft. Je grösser die Leistung und insbesondere die Spannung ist, je mehr Isolationsmaterial der Transformator enthält, desto sorgfältiger hat die Trocknung zu geschehen, was wiederum für jene Mammuttransformatoren in Leistung und Spannung besonders zu beachten ist.

Ueber den Zusammenbau ganz oder teilweise zerlegt spedierter Transformatoren ist nicht viel zu sagen, obgleich auch diese Arbeit manchmal nicht ohne Schwierigkeiten abgeht. Man denke nur an den Zusammenbau in Freiluftstationen, in denen nicht selten die Montagehalle fehlt. Meist ist es erforderlich, schon beim Entwurf des Transformators auf die Montage in der Fabrik oder am Ort der Aufstellung Rücksicht zu nehmen. Ein Beispiel dafür gibt Fig. 3, wo

wegen mangelnder Kranhöhe der Kasten derart gebaut wurde, dass auf seinem Unterschuss der Transformator fertig zusammengebaut und dann die übrigen Kastenschüsse sozusagen darübergestülpt werden konnten.

Erwärmungsproben bei Grosstransformatoren werden fast immer am Aufstellungsort vorgenommen. Es ist angezeigt, für Höchstleistungen auf diesen Punkt noch kurz einzugehen. Die direkte Belastung erfordert Belastungswiderstände von gigantischem Ausmasse. Beträchtliche Mengen von Energie gehen dabei verloren und ein grosses Quantum von Kühlwasser muss vorhanden sein. Stehen zwei Transformatoren gleicher Grösse zur Verfügung, so können sie nach bekanntem Verfahren aufeinander belastet werden. Dagegen ist es im allgemeinen nicht zulässig, den Belastungsstrom eines Drehstromtransformators in der Weise zu erzielen, dass die Wicklungen mit ungleichen Anzapfungen auf den drei Säulen in Dreieck zusammengeschaltet werden, denn durch die unvermeidliche Jochstreuung entstehen zusätzliche Verluste, die zu Fehlmessungen führen.

Nicht einfach ist, wenn die Temperatur des Kühlmittels schwankt, die Bestimmung seiner relativ zum Transformator richtigen Temperatur. Dies gilt besonders für Transformatoren mit Luftkühlung, gleichgültig, ob diese durch den natürlichen Zug oder durch künstliche Beblasung vor sich geht. Die gewaltigen Massen des Grosstransformators folgen den Aenderungen der Temperatur in zeitlich grossem Abstand. Allein sorgfältig vorbereitete Versuche werden zu einigermaßen fehlerfreien Resultaten führen. Zudem darf die Eigentümlichkeit nicht übersehen werden, dass bei natürlichem Oelumlaufl verschiedene Kühlmitteltemperaturen erheblich verschiedene Uebertemperaturen ergeben, welche Erscheinung in erster Linie auf die mit der Temperatur stark ändernde Viskosität des Oeles zurückzuführen ist. Die Feststellung der Uebertemperatur sollte demnach mit einer konstanten Kühlmitteltemperatur vorgenommen werden können, die verhältnismässig hoch sein sollte, 20^oC z. B. Selbstverständlich ist es, speziell bei luftgekühlten Transformatoren, ausgeschlossen, diese Forderung zu erfüllen. Man ersieht aus diesen Feststellungen,

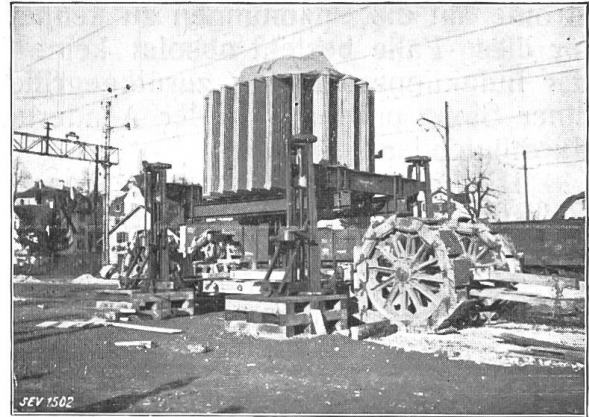


Fig. 7.

Einphasenwechselstrom-Oel-Transformator für Freiluftaufstellung mit natürlicher Kühlung mit Rohrradiatoren, 3000 kVA, 16 $\frac{2}{3}$ Per/s, 68/17 kV; Ueberlastbar bis 2750 kVA, 1 $\frac{1}{2}$ Std. oder bis 4500 kVA, 1 $\frac{1}{2}$ Std. Umladen vom Bahnwagen auf den Landtransportwagen mit Lokomotiv-Hebeböcken.

dass die genaue Messung der Temperatur Schwierigkeiten bietet, deren Ueberwindung fast unmöglich ist.

Im Anschluss an die allgemeinen Erörterungen seien noch einige weitere Fragen des Transformators berührt. Eine solche Frage ist die Berechnung der Kurzschlussspannungen bei Mehrwicklungstransformatoren. Eigentlich kann man bei diesen Transformatoren nur von Kurzschlussspannungen sprechen, wenn man nur je zwei Wicklungen im Auge behält. Man verlangt aber, auch für die Fälle, wo mehr als zwei Wicklungen gleichzeitig Strom führen, den Einfluss der Belastungsströme auf die Spannungen zu kennen. Zur Berechnung der Spannungsänderung für diese Fälle besteht absolut keine Schwierigkeit, wenn auf jenes Grundprinzip der Induktionsspannung zurückgegriffen wird, das besagt, dass die Spannung in einer Spule proportional der Aenderung der geometrischen Summe aller die Spule durchflutenden Flüsse ist.

Hier mag ferner die Frage der Aenderung des Magnetflusses im Kern mit der Belastung berührt werden, die mit der Frage nach den Kernverlusten bei Belastung zusammenhängt. Auch diese Frage ist von dem vorerwähnten Grundprinzip beherrscht. Ist die primäre Wicklung aussen, dann umfasst sie nicht nur den Kernfluss, sondern auch alle Streuflüsse. Ist demnach die Belastung nachteilig, so ist der Kernfluss kleiner, ist sie aber voreilend, so ist er grösser als der Primärspannung entspricht. Je nachdem sind also auch die Kernverluste bei Belastung kleiner oder grösser als bei Leerlauf. Durch die Belastung aber nicht geändert werden die Kernverluste, wenn die primäre Wicklung zunächst am Kerne liegt, weil sie dann nur den Kernfluss umfasst.

Es ist klar, dass die Mehrwicklungstransformatoren dem Konstrukteur eine Reihe besonderer Aufgaben stellen. Man denke nur an die Wicklungsabstützungen, an die Anzapfungen, die vielleicht zwischen den Wicklungen herauszuführen sind, an die Anordnung der Durchführungen in ausreichenden Abständen. Wenn sich gar noch Spannungsregulierung dazu gesellt, so gibt es manch angestregtes Kopferbrechen, bis eine befriedigende Lösung vorliegt.

Gerade die Spannungsregulierung ist durch den weitgehenden Zusammenschluss der Werke allgemein zu einem ganz wichtigen Gebiet geworden. Sie beherrscht den Parallelbetrieb der Werke, die Blind- und Wirklastverteilung zwischen ihnen, und die Unabhängigkeit der Spannung jedes Werkes von demjenigen des andern. Sie erlaubt im eigenen Netz das Angleichen der Verbraucherspannung an einen gewünschten Wert trotz des Spannungsabfalles der Uebertragung und bietet allein die Mittel, an ideale Spannungsverhältnisse heranzukommen. Die mannigfaltigsten Ausführungsformen und Schaltungen liegen vor. Bald ist diese Regulierung den Haupttransformatoren übertragen, bald in getrennte Reguliergruppen verlegt, bald liegen diese Reguliergruppen direkt im Stromkreis der anzupassenden Spannung, bald ist das eigentliche Regulieraggregat über Spannungs- und Stromtransformatoren von der Hauptspannung abgetrennt, damit günstigere Verhältnisse für die Regulierung selbst erzielt werden, und wobei dann zweckmässig die Regulierung mit dem Spannungstransformator vereinigt wird. Höchstanforderungen betreffend Betriebssicherheit müssen sowohl an Transformator, als an den Laststufenschalter gestellt werden. Für den Konstrukteur ist zu beachten, dass beim häufig verwendeten Reguliertransformator in Autowicklungsschaltung der Kurzschlussstrom in verschwindender Weise von der Kurzschlussspannung des Transformators selbst abhängt. Er ist vielmehr fast allein durch die Kurzschlussimpedanz des Netzes bestimmt, mit der er in Reihe liegt. Diese Eigentümlichkeit kann dazu führen, dass der Transformator, dessen Bau mit keinen Mitteln genügend fest gestaltet werden kann, mit Kurzschlussdrosselspulen geschützt werden muss. Der Reguliertransformator hat sich übrigens fast schon in seiner heutigen Gestaltung während langen Jahren im Betrieb bewährt, ist doch z. B. von den Beznau-Löntschwerken im Jahre 1912 im Löntschwerk bei Glarus (Schweiz) ein Drehstrom-Haupttransformator von 5250 kVA als Kuppeltransformator der 50000- und der 25000 V-Netze in Betrieb genommen

wornden, dessen 25 000 V-Wicklungen mit $\pm 12\%$ unter Last mit Fernbetätigung schaltbaren Regulierstufen versehen war. Dieser Transformator, von der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden, gebaut, hat seinen Dienst ohne jegliche Anstände erfüllt bis vor kurzer Zeit, wo er ausser Betrieb gesetzt wurde, weil das Netz von 25 000 V auf 50 000 und 150 000 V umgestellt worden ist. Ein Beispiel eines neuzeitlichen Drehstromtransformators, der eine unter Last zu betätigende Regulier-

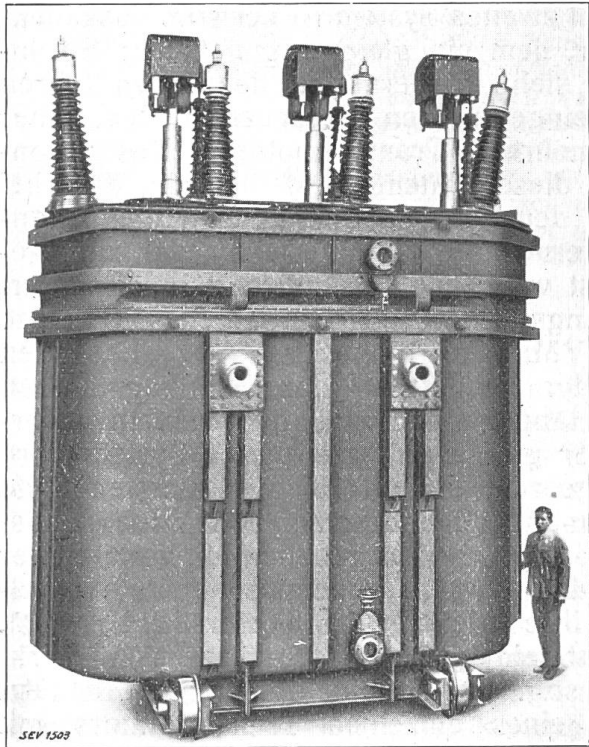


Fig. 8.

Drehstromtransformator mit künstlichem Oelumlaufl und Wasserkühlung mit Regulierung unter Last, 20 000 kVA, 50 Per/s, 150/47,85 $\pm 3 \times 1,7/8$ kV.
 λ λ Δ

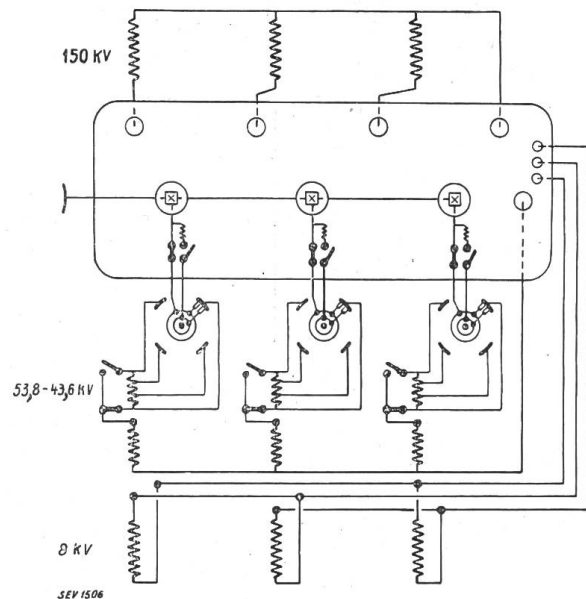


Fig. 9.

Schalt-schema für den in Fig. 8 abgebildeten Transformator.

wicklung besitzt, zeigt Fig. 8. Die Schaltung ist in Fig. 9 dargestellt. Der Regulierschalter dieses Transformators ist nach Art eines Zellschalters gebaut, mit Hilfschalter für die Stromunterbrechung, so dass die Hauptbürsten vollständig stromlos an den Kontakten auf und ab laufen. Die Abbrennschalter sind als Oelschalter ausgebildet und ebenso wie die Uebergangswiderstände bzw. Drosselspulen, ausserhalb des Transformatorkastens angeordnet. An einem gleichen Schalter sind gegen $1,5 \cdot 10^6$ Schaltungen vorgenommen worden, ohne dass sich, abgesehen von den Abbrennkontakten, Abnutzung bemerkbar gemacht hat.

Seinen Zweck erfüllt der Reguliertransformator erst ideal, wenn er automatisch arbeitet. Im allgemeinen wird die Automatik so gebaut, dass sie eine gewünschte Spannung hält. Wenn aber Kraftwerke über den Reguliertransformator parallel arbeiten, so ist sie für die Regulierung des $\cos \varphi$ oder des Blindstromes vorzusehen. Es ist zweckmässig, die Automatik nicht zu fein einzustellen, damit sie nicht bei jeder kleinsten Schwankung spielt und sich dabei unnötigerweise abnützt.

Ein besonderes Problem für die Höchstspannungen ist die Spannungsmessung. Einfach und billig ist die Verwendung der Kondensatordurchführung als Vorschaltkapazität. Allein für gar viele Fälle genügt weder die Leistung noch die Genauigkeit. In den letzten Jahren sind andere neuartige Spannungswandlersysteme auf den Markt gekommen, die sehr hohen Anforderungen entsprechen. Alle diese

Systeme haben gemeinsam, dass sie einphasig sind und zwischen Neutralpunkt bzw. zwischen Erde und Aussenleiter angeschlossen werden. Eines dieser Systeme beruht darauf, dass ein praktisch kapazitäts- und induktionsfreier Metallwiderstand

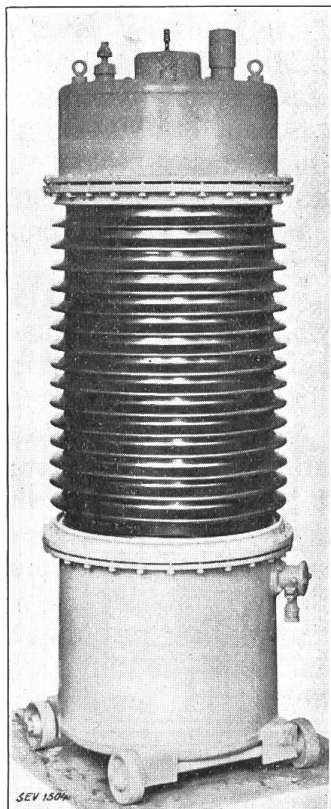


Fig. 10.

Isoliermantelspannungswandler
150 kV, 50 Per/s. Genauigkeit
entsprechend der schweiz. Sys-
temprüfung bzw. Klasse E des
V D E.

in einem Oelgefäß aus keramischem Material, einem Stützisolator ähnlicher Form, eingebaut und mit Hilfe eines Stromwandlers die durchfließende Stromstärke als Abbild der Spannung gemessen wird. Die Stromwandlerseite wird geerdet, die andere am Aussenleiter angeschlossen. Ein zweites System ist der sog. Kaskadenspannungswandler, dem ein gleichartig gebauter Stromwandler zur Seite steht. Er beruht auf den in den Jahren 1915 und 1919 eingetragenen Dessauerpatenten, einer Reihenschaltung mehrerer Transformatoren. Das besondere Kennzeichen dieser Patente besteht darin, dass bei den Gliedern mit den höheren Spannungen die Sekundärwicklungen, Kerne und Armaturteile spannungssteuert sind. Meist wird jede Kaskade des in dieser Art gebauten Spannungswandlers in ein eigenes Gehäuse aus keramischem Material eingesetzt. Alle Kaskaden werden aufeinander gebaut, so dass sie von aussen entweder einer Hängeisolatorreihe oder einem mehrfachen Stützisolator gleichen. Auch dieses System wird auf einer Seite geerdet und auf dieser untersten Stufe wird die Messspannung abgenommen. Das Widerstandssystem und das Kaskadensystem arbeiten mit vorzüglicher Genauigkeit sowohl bezüglich Uebersetzung als Winkelfehler, jedoch ist ihre Leistungsabgabe ziemlich begrenzt.

Inzwischen ist ein neues System auf den Markt gekommen, das sog. Isoliermantelsystem. Es benützt das alte Prinzip eines einzelnen Transformators mit Primär- und Sekundärwicklung für die ganze Spannung, bringt den Transformator aber gleich, wie dies bei den einzelnen Transformatoren des Kaskadenspannungswandlers geschieht, in einem Gefäß aus Isoliermaterial unter. Das neuartige an diesen Spannungswandlern ist einerseits die Verwendung eines ebenfalls recht alten Prinzips, nämlich das Isolieren und an Spannung legen des Kerns, andererseits die Steuerung der Spannungsverteilung an der Oberfläche des Isoliermantels. Die sekundäre Wicklung ist vom Kerne isoliert und sitzt auf der Erdpolseite der Oberspannungswicklung. Der Hut des Isoliermantels bildet den zweiten Pol der Oberspannung. Dieser Spannungswandler besitzt nebst höchster Genauigkeit in Uebersetzung und Winkel durch nur einmalige Transformation recht hohe Belastbarkeit.

Fig. 10 gibt eine Ansicht dieses Spannungswandlers.