

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 52 (1961)
Heft: 19

Artikel: Trocknung und Vakuumimprägnierung von Hochspannungstransformatoren
Autor: Goldstein, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916868>

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: 17.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV «Anwendung des Vakuums bei der Fabrikation von Hochspannungsmaterial»

vom 16. Mai 1961 in Zürich

An der Tagung über «Die Anwendung des Vakuums bei der Fabrikation von Hochspannungsmaterial», die zusammen mit dem Schweizerischen Verband für die Materialprüfungen der Technik (SVMT) und der Schweizerischen Gesellschaft für Vakuum-Physik und -Technik (SGV) organisiert wurde, nahmen rund 390 Personen teil. In den Übungssälen des Zürcher Kongresshauses wurden folgende Vorträge gehalten, die nachstehend vollumfänglich veröffentlicht werden:

1. Die Trocknung und Vakuumimprägnierung von Hochspannungstransformatoren
Referent: Dr. sc. techn. A. Goldstein, Baden
2. Die Aufbereitung und Regenerierung von Mineralölen unter besonderer Berücksichtigung der Transformatorenöle
Referent: Prof. Dr. P. Stoll, Zürich
3. Vakuumanwendung bei der Inbetriebnahme und Reparatur von Hochspannungstransformatoren
Referent: H. Hartmann, Baden
4. L'emploi du vide dans le séchage et le dégazage des câbles à haute tension
Referent: G. Martin, Cossonay-Gare
5. Vakuumimprägnierte Isolationen elektrischer Maschinen
Referent: J. Peter, Zürich

Wegen Unabkömmlichkeit des Präsidenten des SEV, Direktor H. Puppikofers, begrüßte Prof. H. Weber die Anwesenden und die Gäste. Besonderer Gruss galt

Dr. iur. H. R. Siegrist, Direktor des Eidg. Amtes für Energiewirtschaft, der in seiner neuen Eigenschaft zum ersten Male an einer Diskussionsversammlung des SEV teilnahm.

Den Tagesvorsitz übernahm Dr. W. Wanger, Direktor der AG Brown Boveri & Cie., Baden, der die Tagung mit folgenden Worten einleitete:

Die Idee zur Durchführung einer Diskussionsversammlung über ein Thema aus dem Gebiet des Vakuums stammt nicht von uns selber, sondern der Schweizerische Verband für die Materialprüfungen der Technik und die Schweizerische Gesellschaft für Vakuum-Physik und -Technik haben uns den Vorschlag gemacht, in diesem Jahr drei gemeinsame Tagungen über Vakuumprobleme durchzuführen, wobei jede der drei Vereinigungen die Vorbereitung und Organisation einer solchen Tagung übernehmen sollte. Wir stimmten dieser Anregung zu, wobei für den SEV natürlich irgend etwas aus der Elektrotechnik in Frage kam, wo ja das Vakuum sehr vielfältige Anwendungen findet. Wir haben dann als Thema unserer Tagung «Die Anwendung des Vakuums bei der Fabrikation von Hochspannungsmaterial» gewählt. Es ist dies ein ziemlich breites und doch in sich geschlossenes Gebiet, und wir hoffen, dass sich unsere Mitglieder dafür interessieren. Während wir sonst an unseren Diskussionsversammlungen gewöhnlich einen engen Ausschnitt aus der Elektrotechnik behandeln, befasst sich die heutige Tagung ausnahmsweise einmal mit ganz verschiedenartigem Material, wobei das Gemeinsame nur darin besteht, dass das Vakuum bei der Fabrikation eine wichtige Rolle spielt.

Die drei Vorträge des Vormittags beziehen sich alle auf Transformatoren, worauf dann am Nachmittag die Kabel und die Wicklungen rotierender Maschinen behandelt werden.

Trocknung und Vakuumimprägnierung von Hochspannungstransformatoren

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 16. Mai 1961 in Zürich,
von A. Goldstein, Baden

533.5 : 621.314.2.027.3

Die Isolation von Hochspannungstransformatoren ist hauptsächlich aus Öl, Papier und Transformerboard, d. h. Öl und Zellulose aufgebaut. Um diesen Stoffen ihre besten elektrischen Eigenschaften zu verleihen, ist eine sorgfältige Aufbereitung der fertig montierten Apparate erforderlich. Diese verfolgt vier Ziele, die Trocknung der Isolation, ihre anschliessende Ölimprägnierung und Entgasung und die mechanische Setzung der Wicklungen.

1. Einfluss der Feuchtigkeit auf die dielektrischen Eigenschaften der Transformatorenisolation

Die dielektrischen Eigenschaften eines Stoffes können im wesentlichen durch drei Kennziffern umschrieben werden, die Dielektrizitätskonstante ϵ , den Verlustwinkel δ und die Durchschlagsfeldstärke E_d bei kurzzeitiger Beanspruchung mit Wechselspannung von 50 Hz. Auf die Stossfestigkeit sei in diesem Zusam-

menhang nicht eingegangen, und das Phänomen des Wärmedurchschlages bedarf einer eingehenderen Behandlung. Mit steigender Trockenheit von Öl und Papier steigt deren Durchschlagsfeldstärke und der Verlustwinkel δ sinkt, während die Dielektrizitätskonstante sich weniger verändert. Die Güte einer Öl-Papier-Isolation steigt also mit ihrem Trocknungsgrad, wobei die Messung des Verlustfaktors $\operatorname{tg} \delta$ eine ausgezeichnete Kontrollmöglichkeit bietet.

Transformatoröl vermag bei 20 °C 40...50 g Wasser pro Tonne Öl zu lösen, bei höherem Wassergehalt entsteht eine Emulsion. Dies spiegelt sich in der Durchschlagfestigkeit bei 50 Hz deutlich wieder, die oberhalb 60 g/t Wassergehalt etwa 40 kV/cm nach Messungen von *Brinkmann* und *Beyer* beträgt, im Bereich 10...40 g/t zwischen 220 und 180 kV/cm liegt und durch Trocknung bis hinunter zu 1 g/t auf 330 kV/cm gesteigert werden kann [1]¹⁾. Der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ eines guten neuen Öles liegt bei Raumtemperatur im Bereich des gelösten Wassers unter 0,2 ‰, erreicht bei 60 g/t einen Wert von 5 ‰ und steigt mit noch höherem Wassergehalt rasch an. $\operatorname{tg} \delta$ ist temperaturabhängig und bleibt bei der höchsten in Transformatoren zulässigen Öltemperatur von 90 °C im allgemeinen unter 2,5 ‰ für trockenes Öl.

Isolierpapier verhält sich ähnlich. An raumfeuchten, mit Öl imprägnierten Proben von 4 mm Dicke wurden bei 50 Hz eine mittlere Durchschlagsfeldstärke von effektiv 75 kV/cm gemessen. An gut getrockneten Proben gleicher Dimension stieg die Durchschlagsfeldstärke auf effektiv 450 kV/cm, also auf das 6fache. Über den Verlauf des Verlustfaktors in Abhängigkeit vom auf das Trockengewicht bezogenen Wassergehalt orientiert Fig. 1. Kurve 2 wurde während der Trock-

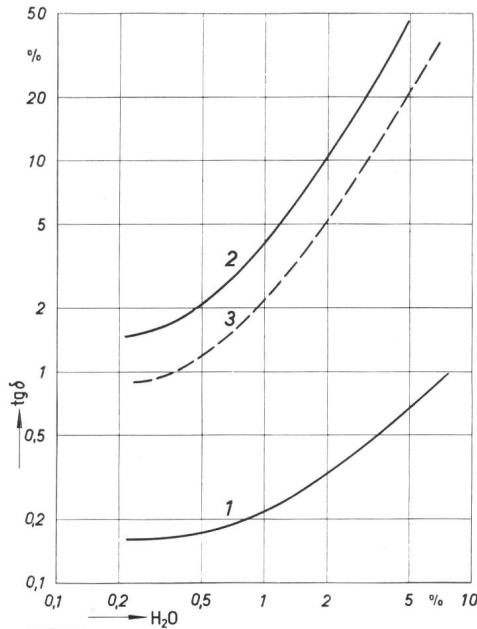


Fig. 1

Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ von Isolierpapier bei 50 Hz in Funktion des Wassergehaltes in Prozent des Trockengewichtes % H_2O
Kurve 1 bei 20 °C; 2 bei 110 °C; 3 bei 90 °C (interpoliert)

nung bei 110 °C und Kurve 1 bei Raumtemperatur 20 °C durch Wägung und Messung des Verlustfaktors an der gleichen mit Messbelägen versehenen zylindrischen Papierprobe gewonnen. Kurve 3 bezieht sich auf 90 °C, und ist aus den Kurven 1 und 2 interpoliert.

¹⁾ Siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

Diese Kurven zeigen den starken Anstieg des Verlustfaktors mit dem Wassergehalt sehr deutlich. Ausserdem ist ersichtlich, dass auch der Verlustfaktor des Papiers bei konstantem Wassergehalt in Funktion der Temperatur steigt.

Wird eine Wechselspannung an eine Platte aus Isoliermaterial gelegt, so entstehen in ihr dielektrische Verluste, welche sie je nach ihrer Kühlung mehr oder weniger erwärmen. Wegen der Temperaturabhängigkeit der Verlustziffer $\epsilon \operatorname{tg} \delta$ gibt es nach der bekannten Theorie des Wärmedurchschlages von *Dreyfuss* und *Berger* [2] eine höchstzulässige Spannung, oberhalb welcher das thermische Gleichgewicht zwischen erzeugter und abgeführter Wärme nicht mehr gegeben ist. Ein organisches Isoliermaterial fängt an zu verkohlen und schlägt schliesslich durch. Diese Kippspannung U_k hängt nur von $\epsilon \operatorname{tg} \delta$, deren Temperaturkoeffizienten σ und der Wärmeleitfähigkeit λ des Materials ab. Die Materialdicke hat keinen Einfluss, da sie bei gegebener an der Platte liegender Spannung die spezifischen Verluste pro cm^3 und die Wärmeabfuhr in gleicher Weise beeinflusst. Die Kippspannung einer beidseitig gekühlten Platte ist:

$$U_k = \text{konst.} \frac{\lambda}{\epsilon \operatorname{tg} \delta \cdot f \sigma} \quad [\text{kV}] \quad (1)$$

mit

$$(\epsilon \operatorname{tg} \delta)_\theta = (\epsilon \operatorname{tg} \delta)_{\theta_0} \cdot e^{\tau(\theta - \theta_0)} \quad (2)$$

wobei ϵ und $\operatorname{tg} \delta$ des Isoliermaterials bei der Temperatur des die Platte umgebenden Kühlmediums, z. B. des Öles, einzusetzen sind. U_k ist demnach ein sehr gutes Mass für die Beurteilung der Güte einer Isolation. Je besser sie getrocknet ist, um so niedriger sind $\operatorname{tg} \delta$ und σ , und umso höher ist die Kippspannung.

2. Trocknung der Isolation

Papier ist ein mehr oder weniger loses Gefüge aus Zellulosefasern, die 40...60 % des Papiervolumens ausfüllen. Die Feuchtigkeit liegt zwischen den Fasern, haftet an der Faseroberfläche und ist in die Fasern selbst eingelagert. Bei hoher Feuchtigkeit sind alle drei Arten der Bindung nebeneinander vorhanden, und werden beim Trocknen in der angegebenen Reihenfolge nacheinander abgebaut. Während das Wasser ausserhalb der Fasern relativ rasch und leicht entfernt werden kann, haftet das an die Zellulosemoleküle gebundene Wasser sehr stark und seine Ablösung grenzt hart an den Abbau der Zellulosemoleküle selbst, d. h. an die beginnende Verkohlung des Papiers.

Im Gleichgewichtszustand mit der Umgebung hängt der Wassergehalt in Papier oder Transformerboard einzig und allein vom Partialdruck des Wasserdampfes im umgebenden Gasgemisch, d. h. meistens der Luft, und der Temperatur ab. Dies wird beim Betrachten von Fig. 2 deutlich, auf welcher Gleichgewichtsgerechten der Feuchtigkeit mit verschiedenem Wassergehalt als Parameter bei variabler Temperatur und variablem Partialdruck des Wasserdampfes der Umgebung nach *Piper* dargestellt sind [3]. Mit sinkender Temperatur und mit steigendem Partialdruck steigt der Wassergehalt. Die gestrichelte Gerade A stellt den Wasserdampf-Partialdruck feuchtigkeitsgesättigter Luft in Funktion der Temperatur, d. h. bei 100 % relativer Feuchtigkeit dar. Geraden kleinerer relativer Feuchtigkeit würden parallel dazu verlaufen und sich

mit entsprechenden Geraden des Wassergehaltes im Papier decken. Das heisst aber, dass der Wassergehalt im Papier nur von der relativen Feuchtigkeit und nicht vom absoluten Wassergehalt der Umgebung abhängt [4].

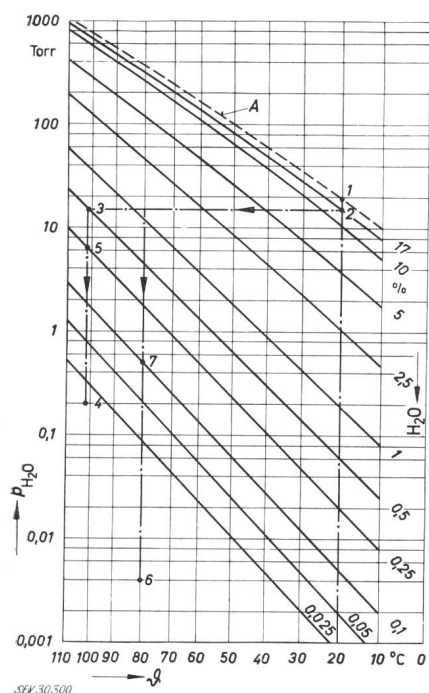


Fig. 2

Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen Papier oder Preßspan und umgebender Luft in Funktion der Temperatur θ

Parameter: Papierfeuchtigkeit in Prozent des Trockengewichtes

p_{H_2O} Wasserdampfdruck der Luft; Kurve A Dampfdruck von mit Wasser gesättigter Luft; ——— Trocknungsverlauf

Punkt 1 Luftsättigung bei 20 °C; 2 raumfeuchtes Papier bei 80 % Luftfeuchtigkeit; 3 Klima des leeren Ofens bei Heisslufttrocknung; 4 Dampfdruck des leeren Ofens bei Vakuumtrocknung mit 10 Torr und 102 °C; 5 praktisch erreichbare Trocknung mit 10 Torr Gesamtdruck; 6 Dampfdruck des leeren Ofens bei Vakuumtrocknung mit 0,2 Torr und 80 °C; 7 praktisch erreichbare Trocknung mit 0,2 Torr Gesamtdruck

Als Ausgangspunkt zur Untersuchung des Trocknungsverlaufes sei ein relativ feuchter Tag mit einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Feuchtigkeit von 80 % gewählt. (Punkte 1 und 2 in Fig. 2). Dies ergibt einen Gleichgewichts-Wassergehalt von 17 % in der Isolation eines fertig montierten Transformators vor der Trocknung. Unterzieht man einen solchen Transformator z. B. einer Heisslufttrocknung bei normalem Druck und 102 °C, so verschiebt sich das Feuchtigkeitsgleichgewicht im Diagramm von Punkt 2 nach 3 und liegt bei 0,5 % Wassergehalt. Dieser Wert stellt die Grenze des Erreichbaren dar, wobei vorauszusetzen ist, dass der ganze Transformator auf die volle Heiztemperatur gebracht wird, und die heisse Luft alle Teile der Isolation so durchspült, dass der anfallende Wasserdampf tatsächlich von überall her abgeführt wird. Es besteht jedoch die Gefahr von lokalen Feuchtigkeitsnestern, die durch eine Überwachung des Verlustwinkels der ganzen Isolation während des Trocknungsvorganges nicht erfasst werden können.

Die gleichzeitige Anwendung von Temperatur und Vakuum bringt eine grosse Verbesserung. Senkt man z. B. den Druck von 760 auf 10 Torr, so sinkt der Dampfdruck im leeren Ofen proportional dazu von 15

auf 0,2 Torr. Dem würde bei 100 °C im Gleichgewicht eine Feuchtigkeit von nur noch 0,15 % im Papier entsprechen, Punkt 4. Bei noch stärkerem Vakuum, z. B. 0,2 Torr Gesamtdruck, ergäbe sich ein noch tieferer Gleichgewichtspunkt. Gleichzeitig darf die Temperatur reduziert werden, ohne die Trocknung zu beeinträchtigen, es ergibt sich Punkt 6 bei 80 °C. Es ist eine Illusion zu glauben, dass dieses Gleichgewicht tatsächlich praktisch erreicht werden kann. Die relative Feuchtigkeit im Vakuumofen bleibt in Anwesenheit von Papier höher als es der Aussenluft entspricht.

Der Gesamtdruck im Ofen ist die Summe des Gas- und des Dampfdruckes, wobei der Dampfdruck bei sinkendem Gesamtdruck immer mehr überwiegt. Der Anteil des Gasdruckes ist unterhalb 1 Torr vernachlässigbar klein. Die Verschiebung des Feuchtigkeitsgleichgewichtes durch die gleichzeitige Anwesenheit von Wärme und Vakuum ergibt eine sehr wesentliche Verbesserung der Trocknung. Es werden Trockenheiten entsprechend den Punkten 5 und 7 zwischen 0,25 % und 0,1 % Wassergehalt tatsächlich erreicht.

Man könnte bei hohem Vakuum mit noch niedrigeren Temperaturen trocknen. Die Verdampfungswärme von 539 kal/g Wasser ist jedoch in das Papier hinein zu bringen. Moser hat darauf hingewiesen, dass dadurch und infolge der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Papiers bei Papierisolationen grösserer Dicke im Innern bei scharfer Trocknung die Temperatur wesentlich niedriger werden kann als an der Oberfläche [6]. Bei Trockentemperaturen unterhalb 60 °C besteht deshalb sogar die Gefahr des Einfrierens der innersten Papierschichten. Ein einfacher Versuch diene zur Illustration. Ein Eimer Wasser wurde eine Nacht lang im unbeheizten und evakuierten Vakuumofen stehen gelassen. Am anderen Morgen war das Wasser nicht verdampft sondern gefroren.

Der Trocknungsgrad kann indirekt durch Messung des Verlustwinkels δ sehr gut überwacht werden. Zudem wird dabei eine elektrisch interessierende Grösse direkt erfasst. In Fig. 3 sind links Verläufe des Verlustfaktors während der Trocknung von Isolierpapier-

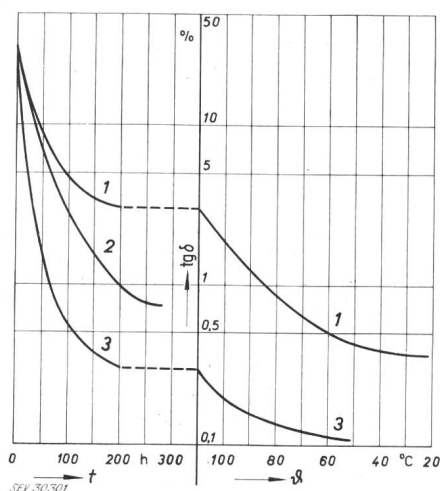


Fig. 3

Verlustfaktor $\tan \delta$ von Isolierpapier bei verschiedener Trocknung links in Funktion der Trockenzeit t bei 110 °C, rechts in Funktion der Temperatur θ während des Abkühlungsvorganges

1 Heisslufttrocknung bei normalem Luftdruck; 2 Vakuumtrocknung bei einem Druck von 8 Torr; 3 Hochvakuumtrocknung bei einem Druck von 0,2 Torr

wickeln bei 110 °C nach verschiedenen Verfahren gezeigt, rechts sieht man das Absinken des Verlustfaktors beim anschliessenden Abkühlen in Funktion der Temperatur. Die Kurve 1 stellt den Verlauf einer Heisslufttrocknung dar; diese Kurve wurde von Brown Boveri vor 18 Jahren veröffentlicht [5]. Die Kurven 2 und 3 illustrieren die seither erzielten Fortschritte. Kurve 2 entspricht einer Vakuumtrocknung bei 8 Torr, Kurve 3 einer Hochvakuumtrocknung bei 0,2 Torr. Der Verlustfaktor am Ende der Trocknung sank von 3 % über 0,7 % auf 0,3 % und von 0,38 % auf 0,11 % im kalten Zustand. Den Einfluss des kleineren Verlustfaktors auf die Kippspannung beidseitig gekühlter Isolierzylinder in Funktion der Temperatur zeigt Fig. 4. Im Bereich I liegen mit Heissluft und im Bereich II im Hochvakuum getrocknete Isolationen. Mit der Vakuumtrocknung werden im Mittel 3...4 mal höhere Kippspannungen erreicht.

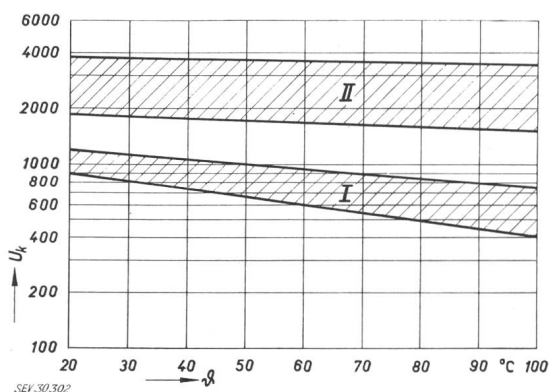


Fig. 4

Kippspannung U_k beidseitig gekühlter Isolierzylinder aus ölprägniertem Papier in Funktion der Temperatur θ I mit Heissluft getrocknet; II im Hochvakuum getrocknet

Die erreichten Werte liegen wesentlich über den Prüfspannungen und überschreiten die Betriebsspannungen um ein Mehrfaches.

Diese Resultate rechtfertigten die Ausrüstung der Trockenöfen mit Drehschieber- und Roots-Pumpen, deren Schema Fig. 5 zeigt. Grosse Querschnitte der Ofen-Absaugleitungen gewährleisten, dass die erforderlichen niedrigen Drücke in den Öfen erreicht werden.

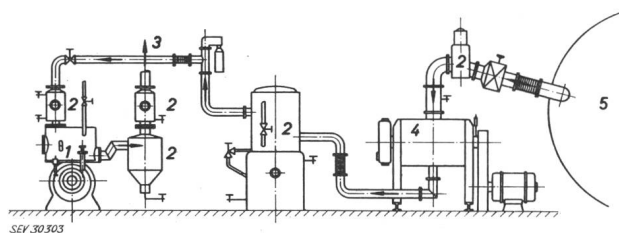


Fig. 5

Vakuumpumpenanlage der Trockenöfen

1 Drehschieber-Vorvakuum-Pumpen, $2 \times 350 \text{ m}^3/\text{h}$; 2 Kondensatoren zur Wasserabscheidung; 3 Luftabzug; 4 Roots-Hochvakuum-pumpe, $7000 \text{ m}^3/\text{h}$; 5 Ofen

Auf Fig. 6 sieht man Vakuum-Öfen von 6 m Durchmesser und 6 bzw. 7 m Länge mit horizontaler Beschickung, die ein rasches Laden und Entladen gestattet. Während der Einführung der Hochvakuumtrocknung ergab sich die Möglichkeit eines Vergleichs mit der Heisslufttrocknung in grossem Maßstab an

Hand der Behandlung von je 13 identischen Gross-transformatoren nach beiden Verfahren (Fig. 7). Er zeigte eindeutig, wie mit der Vakuumtrocknung bei 0,2 Torr Restdruck in der halben Zeit viel bessere Resultate erzielt wurden. Der Verlustfaktor am Ende der Trocknung wird im Mittel halb so gross.

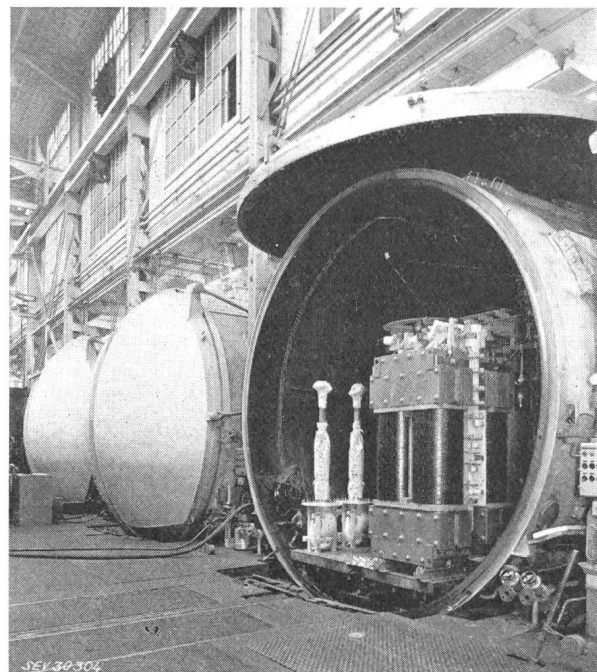


Fig. 6

Vakuum-Ofen-Anlage mit horizontaler Beschickung

Zur Beantwortung der Frage, ob mit einem noch höheren Vakuum die Trocknung weiter verbessert werden könne, wurden Versuche an Modellwickeln durchgeführt, deren Resultat in Fig. 8 dargestellt sind. Daraus ist ersichtlich, dass bei einem Vakuum

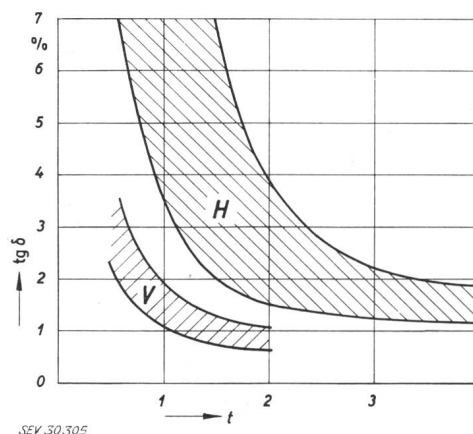


Fig. 7

Vergleich der Trocknung von je 13 Transformatoren gleichen Typs H Heissluft-Trocknung im eigenen Kasten; V Hochvakuum-Trocknung mit 0,2 Torr im Ofen; $\text{tg } \delta$ Verlustfaktor; t Zeit

von 1 Torr und weniger die erste Trockenperiode bis zu $\text{tg } \delta = 0,5 \%$ viel rascher vor sich geht als bei höherem Restdruck. Beim Übergang von 0,4 auf 0,04 Torr sinkt der Endwert des Verlustfaktors von $\text{tg } \delta = 0,3 \%$ auf $\text{tg } \delta = 0,2 \%$. Dieser Schritt rechtfertigt die grossen betriebsmässigen Schwierigkeiten zur weiteren

5fachen Reduktion des Restdruckes bei grossen Öfen jedoch nicht mehr.

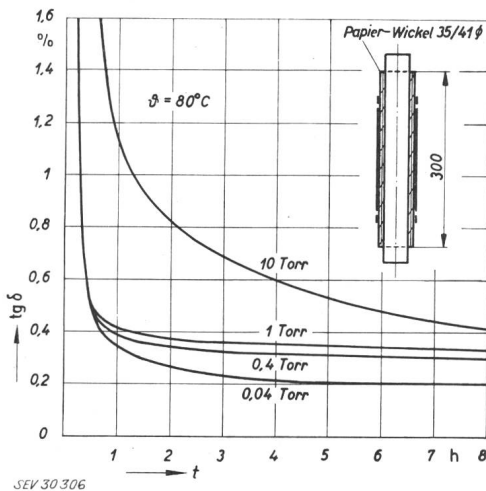


Fig. 8

Vakuum-Trocknung von Modellwickeln bei verschiedenen Drücken
 ϑ Temperatur
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 7

3. Ölprägnierung der Isolation

Anschliessend an die Trocknung ist der in seinen Kessel eingesetzte Transformator mit Öl zu imprägnieren. Öl hat eine Dielektrizitätskonstante von 2,2...2,5 und mit Öl getränktes Papier oder Transformatorboard eine solche von 3,5...4. Im Isolationsaufbau eingeschlossene Luftblasen, sei es in einem Papierzylinder, einer Hülse oder unter einer Kappe werden bei angelegter Spannung im umgekehrten Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten höher beansprucht als Öl oder Papier. Da zudem die elektrische Festigkeit der Luftfeinschlüsse eine Grössenordnung kleiner als diejenige ihrer Umgebung ist, besteht in ihnen die Gefahr des Glimmens und von Lichtbogenentladungen. Betrachten wir die Stossprüfung einer Spulenwicklung, die beispielsweise auf einem Isolierzylinder mit axialen Luftfeinschlüssen angeordnet ist. Die beim Stoss kurzzeitig auftretenden axialen Potentialdifferenzen können in den Hohlräumen Entladungen hervorrufen, welche mehrere Spulen überbrücken und dadurch einen Überschlag längs der Wicklung mit anschliessendem Defekt einleiten.

Bei Betriebsspannung glimmende Luftfeinschlüsse führen zur langsamen Zerstörung der Isolation. Unter dem Einfluss der elektrischen Entladungen werden Wasserstoffatome aus den Kohlenwasserstoffmolekülen des Öles abgespalten. Die defekten Ölmoleküle vernetzen sich anschliessend zu einem hochmolekularen Netzwerk, dem harzartigen gelben X-Wachs. Seine Anwesenheit wird von einer lokalen Erhöhung der dielektrischen Verluste begleitet, die mit der Zeit einen Wärmedurchschlag herbeiführen kann.

Aus den beschriebenen Erscheinungen ist zu schliessen, dass Luftfeinschlüsse in mit Öl imprägnierten Isolationen im Bereiche des elektrischen Feldes unter allen Umständen zu vermeiden sind. Deshalb wird der Transformator sorgfältig während längerer Zeit auf ähnliche Drücke wie beim Trocknen evakuiert, bevor das Öl unter Aufrechterhaltung des Vakuums langsam eingezogen wird.

Für das Folgende sei zunächst angenommen, dass gereinigtes, getrocknetes und entgastes Öl zur Verfügung steht, und hierfür auf die Arbeit von Stoll verwiesen [7].

Transformatoröl vermag bei einem Druck von 736 Torr und einer Temperatur von 25 °C gerade 10 Volumenprozent an Luft zu lösen. Bei 100 °C sind es 11,1% [8], es besteht also nur eine geringe Temperaturabhängigkeit. Die gelöste Luftmenge ist nach dem Henryschen Gesetz dem Druck proportional. Aus diesem Verhalten hat Franklin wie folgt auf den maximal zulässigen Druck p_e beim Öleinziehen geschlossen, bei welchem noch alle Luft eines Einschlusses vom darin eindringenden Öl gelöst werden kann [9]. Ein Hohlraum V enthält beim Druck p_e die Luftmenge Vp_e , welche bei normalem Luftdruck p das Volumen Vp_e/p einnimmt. Das in diesen Hohlraum V eindringende entgaste Öl wird während des Einziehens im ungünstigsten Fall entsprechend dem Druck p_e mit Luft gesättigt und kann nach Brechung des Vakuums beim Luftdruck p das Luftvolumen

$$0,1 V \left(1 - \frac{p_e}{p}\right) \quad (3)$$

aufnehmen. Aus der Gleichsetzung beider Luftvolumina folgt für den zulässigen Druck:

$$p_e \leq 0,091 p \quad (4)$$

Dies ergibt einen relativ hohen zulässigen Druck von 69 Torr. Dabei ist aber nicht berücksichtigt, dass die Gasabsorption durch das Öl Zeit beansprucht. Martin und Thompson geben für ein entgastes Ölquantum von 100 cm³ mit 70 cm² freier Öloberfläche an, dass nach 6 h 9 Volumenprozent Luft im Öl gelöst sind [10]. Nach Messungen von H. Hartmann, BBC, mit 380 cm³ Öl und 6,1 cm² freier Luftoberfläche dauert die Luftaufnahme viel länger (Fig. 9). Bis zur Aufnahme von 3 % Luftvolumen vergehen 22 Tage. Zur Nachbildung

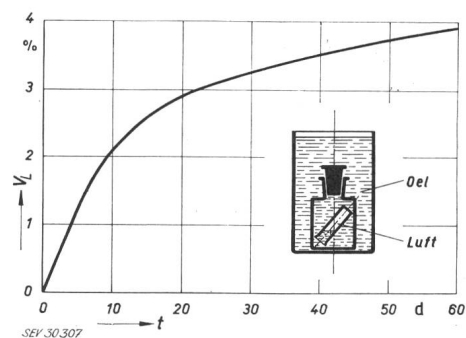


Fig. 9

Absorption einer Luftblase durch entgastes Öl bei Raumtemperatur
 Ölvolumen 380 cm³; freie Oberfläche 6,1 cm²

V_L in der Fläche von Öl absorbierte Luft in Volumenprozent
 d Tage

einer Gasblase wurde bei diesem Versuch ein umgestülptes mit Luft gefülltes Reagenzglas in eine fast geschlossene Flasche mit entgastem Öl gestellt. Die Absorptionszeit variiert demnach in sehr weiten Grenzen und ist noch nicht genau erforscht. Für die Praxis ergeben sich daraus folgende Konsequenzen: Einerseits sind die Isolationen so aufzubauen, dass Gaseinschlüsse leicht entweichen können, und andererseits ist gut entgastes Öl unter möglichst hohem Vakuum in den Transformator einzuziehen. Wenn auch beim Öleinziehen in elektrischen Anlagen mit Drücken bis zu 20 Torr durchaus gute Erfahrungen gemacht worden sind, so sind doch nach neuesten Erkenntnissen Drücke unter 1 Torr anzustreben.

4. Alterung von Öl-Papier-Isolationen

Das wichtigste Ziel einer jeden Isolationsaufbereitung ist ein gutes, sicheres Betriebsverhalten und eine lange Lebensdauer. Nach *Fabre* und *Pichon* [11] beschleunigen die Temperatur, sowie die Anwesenheit von Feuchtigkeit und Sauerstoff die Alterung von Papier im Öl. Diese bewirkt eine Depolymerisation der Zellulosemoleküle, die in erster Linie eine Abnahme der mechanischen Festigkeit zur Folge hat, während die elektrische Festigkeit nur wenig abnimmt.

Aber nicht nur die Zellulose, sondern auch das Öl altert. Die Ölalterung besteht in einer Oxydation, die von einer Versäuerung und einem Anstieg des Verlustwinkels begleitet ist, während die Durchschlagspannung nur wenig absinkt. In welchem Masse der Verlustwinkel ansteigen kann, wurde jedoch erst vor kurzem erkannt. Sowohl *Maurer* und *Wörner* [12] als auch *Potthoff* [13] haben vor wenigen Jahren darauf hingewiesen, dass insbesondere gealterte, gasfeste Öle mit hohem Aromatengehalt hohe Verlustfaktoren von $\text{tg } \delta = 100\%$ und mehr bei 90°C erreichen können. Solche Öle sind in der Schweiz nicht verwendet worden. Wir hielten es trotzdem für angezeigt, Ölkontrollen an Transformatoren im Betriebe auf breiter Basis durchzuführen und stellten in den allermeisten Fällen ein durchaus befriedigendes Alterungsverhalten der Transformatorenöle fest. Die Verlustfaktoren bei 90°C lagen nach 10...20 Betriebsjahren unter 20% , ja oft unter 10% . Besonders erfreulich ist es festzustellen, dass alle Transformatoren, die in den letzten Jahren mit der Vakuumtrocknung nach den neuesten Erkenntnissen aufbereitet wurden, auch eine sehr langsame Ölalterung zeigen.

Immerhin wurden einige ältere Transformatoren gefunden, deren Öl hohe Verlustwinkel aufwies. Bei Transformatoren mit fester Isolation stellt sich die Frage nach dem Verlustwinkel des Papierwickels und dem Zusammenhang mit dem Zustand des Öls. Zur Abklärung dieses Problems hatte auch *Stier* eingeladen [14]. Vom Verlustwinkel der Isolation und seinem Temperaturverlauf hängt nach Gl. (1) und (2) die Kippspannung ab, oder bei gegebener an der Isolation anliegender Spannung die höchste zulässige Öltemperatur.

Messungen an den Isolationen von Transformatoren mit stark gealterten Ölen haben ergeben, dass die Verlustfaktoren der Papierwickel tiefer als diejenigen der Öle lagen. Es wurden Verhältniszahlen Papier/Öl von $0,3...0,7$ und eine mit fortschreitender Ölalterung nach oben steigende Tendenz ermittelt.

In der Folge wurden stark gealterte Öle mit Verlustfaktoren $\text{tg } \delta$ über 100% bei 90°C von 150-kV-Transformatoren aus den Jahren 1941 und 1942 erneuert und zwar durch Füllung mit Neuöl, regeneriertem Öl oder durch Regeneration am Transformator selbst [15]. Aus den Kurven 1, 2 und 3 der Fig. 10 ist ersichtlich, wie die Verlustfaktoren der Isolationen nach dem Eingriff wieder gesunken sind, ohne jedoch nach Betriebszeiten bis zu 60 Wochen den stationären Zustand schon erreicht zu haben. Die Messungen wurden bei 60°C , der höchsten erreichbaren Öltemperatur durchgeführt. Zur Stabilisierung der Öle gegen die katalytische Wirkung der Oxydationsprodukte aus Altölresten in den Transformatoren ist eine Inhibierung empfehlenswert [15].

Die Resultate zeigen, dass es möglich ist, Transformatoren mit stark gealterten Ölen wieder voll betriebsfähig zu machen. Besser ist es natürlich, den Ölzustand periodisch, im Abstand mehrerer Jahre, zu überwachen und es gar nicht zu einer starken Ölalterung kommen zu lassen.

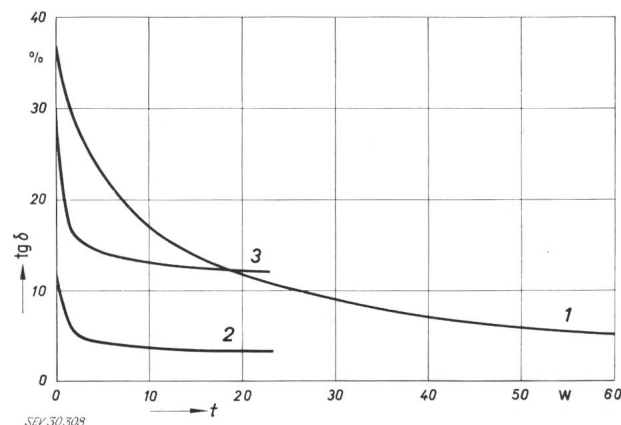


Fig. 10

Verbesserung des Verlustfaktors $\text{tg } \delta$ der Papierisolation von Transformatoren nach der Ölerneuerung gemessen bei einer Öltemperatur von $\vartheta = 60^\circ\text{C}$

1 Neuölfüllung; 2 Füllung mit regeneriertem Öl; 3 Regeneration des Öles am Transformator
t Zeit; w Wochen

5. Massnahmen zur Verbesserung des Alterungsverhaltens von Transformatoren

Der Erkenntnis, dass sehr hohe Verlustfaktoren in gealterten Transformatoren möglich sind, wurde durch eine entsprechende Erhöhung der Anzahl der Kühlkanäle im Papierwickel der festen Isolation Rechnung getragen. Damit konnte der auf einen beidseitig gekühlten Teilwickel entfallende Anteil der Betriebsspannung so weit reduziert werden, dass auch bei Verlustfaktoren von $\text{tg } \delta = 200\%$ keinerlei Wärmedurchschlagsgefahr besteht. Praktisch wird man auch mit Rücksicht auf die durch das Eindringen von Öl mit hohen Verlusten ebenfalls gefährdeten Hochspannungs-Kondensatordurchführungen den Verlustfaktor kaum so hoch ansteigen lassen.

Das Alterungsverhalten guter Öle in sorgfältig aufbereiteten Transformatoren mit einem Expansionsgefäß und einer Silikagel-Lufttrocknungsvorlage in «klassischer» Bauart ist gut und lässt Lebensdauern des Öles von 20 und mehr Jahren erwarten. Bei Revisionen oder Änderungen ist darauf zu achten, dass der ölige aktive Teil des Transformators nicht in Luft aufgeheizt wird, da dabei an der Oberfläche Öl oxydationsprodukte entstehen, die auf das Öl katalytisch wirken und die spätere Alterung beschleunigen. Deshalb ist entweder mit Stickstoff und Vakuum oder unter Vakuum mit im Transformator zirkulierendem Öl zu trocknen, welches in einer Aufbereitungsanlage erwärmt wird.

Durch die Wahl von Ölen mit einer geringen Alterung beim SEV- oder CEI-Alterungsversuch [16] wird die Lebensdauer ebenfalls günstig beeinflusst. Als Richtlinie kann angegeben werden, dass der Verlustfaktor nach dem Versuch kleiner als $\text{tg } \delta = 20\%$ bei 90°C sein soll. Wird ein solches Öl zusätzlich noch inhibiert, so steigt die Lebensdauer auf das drei- bis vierfache, mithin ist also dann eine ausgezeichnete Alterungsbeständigkeit zu erwarten.

Eine radikale und wirksame Massnahme zur Erhöhung der Lebensdauer des Öles und der Isolation stellt der vollständige Abschluss des Transformators gegen aussen dar, wobei Sauerstoff und Feuchtigkeit nicht mehr in ihn eindringen können. Die in Amerika übliche Anordnung eines Stickstoffkissens über dem Ölspiegel im Transformatorenkasten ohne Expansionsgefäss ist mit Druckschwankungen von 1,04...1,5 kg/cm² und entsprechenden Schwankungen der Gaslöslichkeit verbunden. Bei rascher Abkühlung nach langem Betrieb unter Vollast können Gasblasen aus dem Öl ausgeschieden werden und Durchschläge zur Folge haben [17; 18].

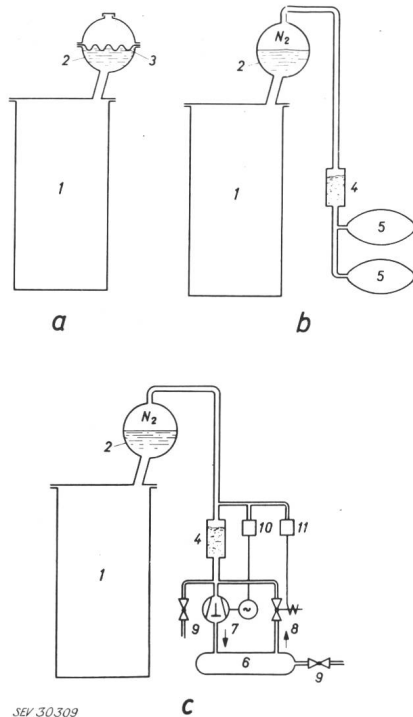


Fig. 11

Ölabschluss in Expansionsgefässen

a mit einer beweglichen Gummimembran auf der Öloberfläche
b mit Stickstoff und ausdehnbaren Gummibälgen für Stickstoff
c mit einer Stickstoffautomatik

1 Transformator; 2 Expansionsgefäss; 3 Gummimembran; 4 Silikageltrockenvorlage; 5 Gummibalg für Stickstoff; 6 Stickstoff-Druckbehälter; 7 Kompressor; 8 Magnetventil; 9 Absperrschieber; 10 Überdruck-Wächter; 11 Unterdruck-Wächter

Aus diesen Gründen sind nur Systeme mit einem Ölabschluss über das Expansionsgefäss und kleinen Druckschwankungen unter 0,1 kg/cm² zu empfehlen. Auf Fig. 11 sind einige Anordnungen gezeigt. Einen gasfreien Abschluss bietet der Einbau einer Gummiblase oder einer Gummihaut unmittelbar über dem Ölspiegel [17; 19], Bild 11a und 12. Hiemit wurde nach 9 Betriebsjahren ein chemisch sehr gutes Alterungsverhalten des Öles erreicht. Der gemessene Verlustfaktor von 9,4 % bei 100 °C liegt jedoch in der gleichen Grössenordnung wie bei Expansionsgefässen mit Luftzutritt und deutet auf eine Ölbeeinflussung hin. Entscheidend für den Erfolg ist die chemische Verträglichkeit von Öl und Gummi.

Beim Expansionsgefäss mit Stickstoff-Füllung wird die Schwankung des Ölspiegels nach Josse [20] von am Boden aufgestellten Gummibälgen aufgenommen (Fig. 11b). Die in die Stickstoffleitung eingebaute Silikagelvorlage 4 absorbiert einerseits allfällige Rest-

feuchtigkeit, andererseits zeigt sie durch ihre Verfärbung Undichtigkeiten, durch welche Feuchtigkeit von aussen eindringen könnte, an. Auf Fig. 13 ist ein mit diesem Ölabschluss ausgerüsteter Transformator für 380 kV gezeigt. Die Erfolge mit diesem besonders bei der Electricité de France eingeführten System sind gut.

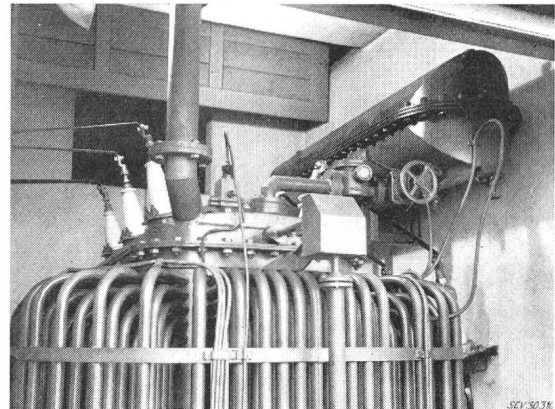


Fig. 12

Transformator der MFO mit einem Expansionsgefäss, in welchem der Ölspiegel durch eine Gummimembran abgeschlossen ist

Für den Druckausgleich kann auch eine Automatik nach Bild 11 c Verwendung finden. Verlässt der Überdruck im Expansionsgefäss die zulässigen Grenzen von 0,05...0,12 kg/cm², so wird entweder Stickstoff über das Ventil 8 zugeführt oder vom Kompressor 7 abgesogen

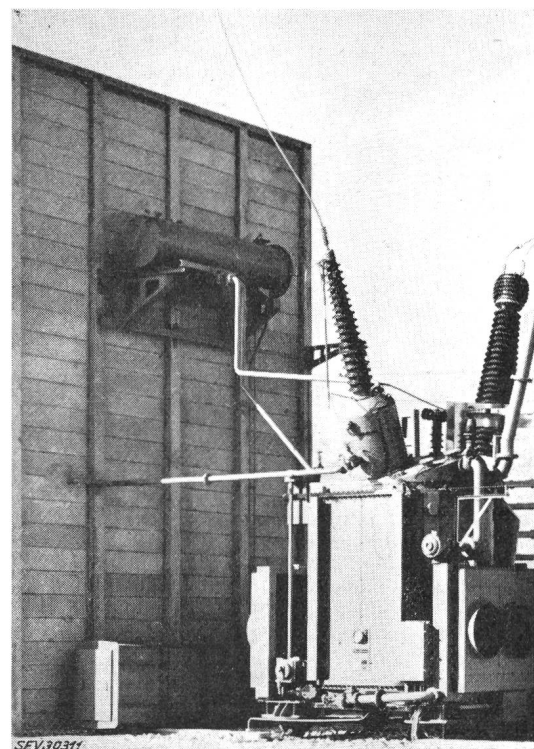


Fig. 13

Einphasen-Transformator der Cie Electro-Mécanique für 380 kV, 100 MVA, mit Expansionsgefäss mit Stickstoff über dem Ölspiegel und Gummibälgen

und in den Druckbehälter 6 zurück gepumpt. Die Silikagelvorlage erfüllt die gleiche Funktion wie beim System mit Gummibalg.

Alle drei beschriebenen Anordnungen bieten einen sehr guten Alterungsschutz.

6. Schlussfolgerungen

Die Einführung der Vakuumtechnik in die Trocknung von Transformatoren hat zu wesentlich besseren Trocknungen in kürzerer Zeit als vorher geführt. Restdrücke von 0,2 Torr im Ofen sind dabei eine untere, praktische Grenze.

Die Ölprägnierung unter Vakuum von weniger als 1 Torr ist für die einwandfreie Entgasung der Transformatorisolation von grosser Bedeutung. Die Gasaufnahme durch das Öl kann sehr lange dauern, so dass mit dem Aufsaugen von Luftblasen durch das Öl nicht sicher gerechnet werden darf.

Bei der Ölalterung können hin und wieder sehr grosse Verlustwinkel entstehen, die bei fester Isolation deren Kippspannung herabsetzen. Durch Ölwechsel oder -regeneration gelingt es, die Verluste auch in der Isolation wieder bis zur vollen Betriebstüchtigkeit zu reduzieren. Kühlschlitze in der Isolation machen diese gegen die Ölalterung unempfindlich.

Die Vakuumaufbereitung der Transformatoren hat die Alterungszeit des Öles im Betrieb wesentlich erhöht. Die Wahl alterungsfester Öle und deren zusätzliche Inhibierung führt darüber hinaus zu einer dreimal längeren Lebensdauer des Öles, die allen Bedürfnissen zu genügen vermag. Der Abschluss des Ölspiegels im Expansionsgefäss mit einer Gummimembran oder mit Stickstoff verhindert praktisch jede Öloxidation und Feuchtaufnahme.

Literatur

- [1] Brinkmann, K. und M. Beyer: Über die Hochvakuum-Trocknung und -Entgasung von Isolierölen für Höchstspannungskabel. ETZ-A 81(1960)20/21, S. 744...749.
- [2] Berger, K.: Der Wärmedurchschlag fester Isolierstoffe. Brown Boveri Mitt. 13(1926)5, S. 115...121.

- [3] Piper, J. D.: Moisture Equilibrium between Gas Space and Fibrous Materials in Enclosed Electric Equipment. Trans. AIEE 65(1946)Dezember, S. 791...797.
- [4] Grimm, G. O.: Luftfeuchtigkeit und Faserstoffe. Bull. SEV 51(1960)25, S. 1289...1292.
- [5] Hartmann, H.: Das Papier als Hochspannungs-Isoliermaterial. Brown Boveri Mitt. 30(1943)9/10, S. 235...239.
- [6] Moser, H. P.: Trocknung und Entgasung der in Hochspannungs-Leistungstransformatoren verwendeten Isolierstoffe. ETZ-A 81(1960)2, S. 41...46.
- [7] Stoll, P.: Die Aufbereitung und Regenerierung von Mineralölen unter besonderer Berücksichtigung der Transformatorenöle. Bull. BEV 52(1961)19, S. 764...770.
- [8] Kaufman, R. B., E. J. Shimanski und K. W. MacFayden: Gas and Moisture Equilibrium in Transformer Oil. Trans. AIEE I, Commun. & Electronics, 74(1955)19, S. 312...318.
- [9] Franklin, E. B.: The Solution of Gas in Oil During Transformer Filling. Proc. IEE A, 102(1955)6, S. 829...832.
- [10] Martin, R. G. und C. N. Thompson: A Vacuum Pre-Treatment Apparatus for Filtering, Dehydrating and Degassing Oil. Brit. J. Appl. Phys. 2(1951)8, S. 222...226.
- [11] Fabre, J. und A. Pichon: Processus et agents de dégradation du papier dans l'huile. Application aux transformateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 18. Session 1960, Bd. 2, Rapp. 137.
- [12] Maurer L. und Th. Wörner: Untersuchungen an Betriebsölen aus Wanderttransformatoren für 220 kV. ETZ-A 77(1956)24, S. 885...888.
- [13] Potthoff, K.: Dielektrische Verluste in Transformatorölen. ETZ-A 78(1957)24, S. 881...883.
- [14] Stier, F.: Lebensdauer von Transformatoren mit fester Isolierung. ETZ-A 81(1960)1, S. 12...14.
- [15] Stoll, P. und R. Schmid: Neue Erkenntnisse über die Eigenschaften der Mineralöle im Hinblick auf die Pflege von Transformatorenölen. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. 26(1960)12, S. 455...477.
- [16] SEV 0124.1960: Regeln für Transformator- und Schalteröl. 5. Aufl. Zürich: Schweiz. Elektrotechn. Verein 1960.
- [17] Degnan, W. J., G. G. Doucette und R. J. Ringlee: An Improved Method of Oil Preservation and its Effect on Gas Evolution. Trans. AIEE III, Power App. & Syst., 77(1958)38, S. 657...662.
- [18] Chadwick, A. T., D. H. Ryder und A. E. Brierley: Oil Preservation Systems; Factors Affecting Ionization in Large Transformers. Trans. AIEE III, Power App. & Syst., 79(1960)47, S. 92...96.
- [19] Anonym: Betriebsverhalten eines Transformators mit abgeschlossenem Ölkonservator. Bull. Oerlikon -(1960)340, S. 77...78.
- [20] Josse, H. und Y. Enault: La mise sous azote des transformateurs: intérêt et réalisations. Rev. gén. Electr. 67(1958), S. 247...258.

Adresse des Autors:

A. Goldstein, Dr. sc. techn., AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Aufbereitung und Regenerierung von Mineralölen unter besonderer Berücksichtigung der Transformatorenöle

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 16. Mai 1961 in Zürich,
von P. Stoll, Zürich

533.5 : 621.315.615.2.004.6

Vorerst wird der Einfluss des Wasser- und Gasgehaltes auf die dielektrischen Eigenschaften der Isolieröle diskutiert. Damit kann die Notwendigkeit einer Isolierölaufbereitung in klassischer Weise durch Filtern, Vakuumentrocknung und Entgasung eingehend begründet werden. Der grösste Teil der Ausführungen wird der Regeneration von gealterten Ölen mit Hilfe von Fuller-Erde-Filtern gewidmet, wobei gezeigt wird, dass praktisch alle regenerierten, mit 0,3% Ditert.-Butyl-p.-Kresol inhibierten Öle sehr gute mit nicht inhibierten Neuölen vergleichbare Alterungseigenschaften aufweisen. Schliesslich wird die technische Ausführung einer fahrbaren Aufbereitungs- und Regenerier-Anlage für einen Durchsatz von 3000 l/h Öl beschrieben.

L'auteur s'occupe tout d'abord de l'influence de la teneur en eau et en gaz sur les propriétés diélectriques des huiles isolantes, ce qui justifie la nécessité d'une préparation de ces huiles par les moyens classiques du filtrage, séchage sous vide et dégazage. La majeure partie de l'exposé est consacrée à la régénération d'huiles usées, à l'aide de filtres de terre à foulon. Pratiquement, toutes les huiles régénérées, inhibées avec 0,3% de ditert.-butyl-p.-crésol, présentent de très bonnes propriétés de vieillissement, comparables à celles d'huiles fraîches non inhibées. Pour terminer, l'auteur décrit l'exécution technique d'une installation mobile de préparation et de régénération, pour un débit d'huile de 3000 l/h.

1. Einleitung

Zur Zeit scheint die thermische Grenze im Transformatorbau durch die Isolation des aktiven Teiles, z. B. Papier, gegeben zu sein. Man könnte von der Ölseite aus gesehen heute schon höhere Betriebstemperaturen zulassen, wenn spezielle Massnahmen ergriffen würden. Daraus darf aber nicht der Schluss gezogen werden, dass eine Ölpflege nicht mehr so wichtig ist. Sobald Sauerstoff im Öl vorhanden ist, wird eine Ölalterung im Betrieb stattfinden, die je nach Umständen mehr oder weniger schnell verlaufen kann. Durch die unaufhörliche Entwicklung im Öltransformatorenbau

nach höheren Spannungen und Leistungen drängt sich eine umfassende Ölkontrolle und -Pflege auf. In neueren Arbeiten, besonders von Fabre und Pichon [1]¹⁾ wird gezeigt, dass ein engerer Zusammenhang besteht zwischen dem Wassergehalt des Öles und dem der Papierisolation in einem Mischdielektrikum, wobei die Temperatur als Parameter in die Zusammenhänge eingeht. Der Feuchtigkeitsgehalt der Papierisolation ist aber ein entscheidender Faktor und wirkt sich indirekt auch schwerwiegend auf die dielektrischen Eigenschaften des Komplexes: Papier — Öl bzw.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.