

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

#### 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:** 04.02.2026

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

sie gegenüber den lufthaltigen Lackbandisolierungen verdoppelt wird. Die Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit wird durch Anordnung einer wasserundurchlässigen Schicht an der Oberfläche der Spule wesentlich erhöht. Die Spulen werden entweder separat oder direkt auf dem Eisenkern imprägniert.

### 6.3 Spulen für grosse Elektromagnete

Hier sind vor allem mechanische Festigkeit und Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit wichtig. Da die Leiter direkt mit Wasser gekühlt sind, werden keine hohen Betriebstemperaturen, jedoch grosse Temperaturdifferenzen erreicht. Die Hohlleiter werden maschinell vorerst umbändelt und erst dann zu Spulen ge-

wickelt. Die Fertigisierung der Spulen erfolgt von Hand. Die ganze Isolation wird in einem Arbeitsgang imprägniert.

### Literatur

- [1] Abegg, K., Ch. Caflisch und F. Knapp: Isolationen hoher Festigkeit für Generatoren grosser Leistung. Bull. Oerlikon -(1959)332, S. 8...21.
- [2] Meyer, H.: Die Verwendung von Kunstharzen bei Hochspannungswicklungen elektrischer Maschinen. ETZ-A 80(1959)20, S. 719...724.
- [3] Doljak, B., M. Moravec und O. Wohlfahrt: Micadur — eine neue Isolation für Statorwicklungen elektrischer Maschinen. Brown Boveri Mitt. 47(1960)5/6, S. 352...360.
- [4] Decaudaveine, P.-A.: Procédé moderne d'isolation des bobinages de machines tournantes. Le Thermalastic. Rev. Jeumont 53(1960)50, S. 103...109.
- [5] Abegg, K.: Aus der Technologie der Wasserkraftgeneratoren: Die Statorwicklungen. Bull. SEV 51(1960)8, S. 428...437.

### Adresse des Autors:

J. Peter, Ingenieur, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.

## Kurzreferate

**L. Erhart**, Ingenieur, Sprecher & Schuh AG., Aarau: Die Isolierreigenschaften von Papier-Öl isolierten Messwandlern für Hochspannung sind wie bei Transformatoren zum grossen Teil von ihrer Trocknung abhängig, wobei die verwendeten Baustoffe sowie ein geeigneter Schutz gegen die Alterung und gegen eindringende Feuchtigkeit ebenso einen massgebenden Einfluss ausüben.

Die bei Wandlern zu trocknende Papierisolation ist hinsichtlich der Vakuumtrocknung recht ungünstig, verglichen mit Barrierenislationen bei Transformatoren oder Trocknung des Isolieröls als Ölfilm. So handelt es sich bei Wandlern durchwegs um relativ dicke Papierwickel, in denen meistens Kondensatorbeläge oder Wicklungen eingebettet sind, welche den Diffusionsvorgängen unter Vakuum einen erheblichen Widerstand entgegensetzen.

Die Trocknung der Wandlerisolation unter Vakuum auf eine notwendige und gewünschte Restfeuchtigkeit stellt heute kein spezielles Problem mehr dar, die Beziehungen zwischen Trocknungszeit, Papierdicke, Temperatur, Enddruck und Pumpenleistung sind hinreichend bekannt. Im folgenden möchte ich jedoch auf die viel diskutierte Frage des notwendigen Enddruckes, d.h. der Restfeuchtigkeit bei der Vakuumtrocknung von Hochspannungs-Wandlern näher eingehen.

Aus Untersuchungen im Laboratorium über die Trocknung und die erzielten elektrischen Eigenschaften haben wir gefunden, dass ein Wassergehalt von etwa  $8 \cdot 10^{-2}$  Gew.% im Papier und etwa 5 ppm im Öl optimale elektrische Eigenschaften ergeben und zudem noch wirtschaftlich tragbar sind.

Diese Zahlen, umgerechnet auf die Isolierstoffe eines 300-kV-Messwandlers, sind in Fig. 1 als Dreiecke dargestellt; die obere Kurve gibt die Adsorption für Papier, die untere die Adsorption für Öl an. Die bei den jeweiligen Dampfdrücken verbleibende Gesamtwassermenge beträgt dann etwa 80 g für 100 kg Papier und 250 kg Öl. Bemerkenswert ist, dass der Anteil des Wassers im Öl vernachlässigbar klein ist.

Der Dampfdruck kann an der Abszisse abgelesen werden, bedeutet aber, dass dieser Druck über die gesamte Isolation in der Endphase der Trocknung erreicht sein muss. Der effektiv gemessene Restdruck im Behälter muss jedoch aus technischen und wirtschaftlichen Gründen um rund eine 10er Potenz tiefer liegen, d.h. der Restdruck im Behälter muss bei etwa  $2 \cdot 10^{-2}$  Torr für das Papier liegen, beim Öl bei etwa  $10^{-1}$  Torr. Diese Werte ergeben bei der Serienfabrikation beste Resultate. Um die Restfeuchtigkeit des Wandlers noch weiter zu senken, sofern dies noch einen Sinn hat, muss vor allem die Papiertrocknung gesteigert werden, während ein tieferer Entgasungsdruck beim Öl bereits die Struktur beeinflusst und keine massgebenden Verbesserungen mehr bringt. Diese Reduktion der Restfeuchtigkeit hat nur einen Sinn, wenn ein zuverlässiger Luftabschluss mittels einem Stickstoffkissen oder einem anderen elastischen Körper den Zutritt der Luftfeuchtigkeit verhindert.

Bezüglich der Überwachung des Trocknungsvorganges haben sich bei Wandlern die Vakuummessung sowie die Druckanstiegs-

messung bestens bewährt. Nach der Imprägnierung kann mit der Bestimmung des Verlustfaktors eine weitere Kontrolle der Trocknung vorgenommen werden.

Bedeutungsvoll wie die Trocknung ist eine zuverlässige Imprägnierung, wobei besonders Gaseinschlüsse zu verhindern sind. Diesbezüglich ist die Trocknung und Füllung im eigenen Gehäuse sehr vorteilhaft. Mittels der schon seit Jahren eingeführten Messung der Glimmeinsatzspannung an Messwandlern, wird neben anderem die Isolation auch auf eventuelle Gaseinschlüsse kontrolliert.

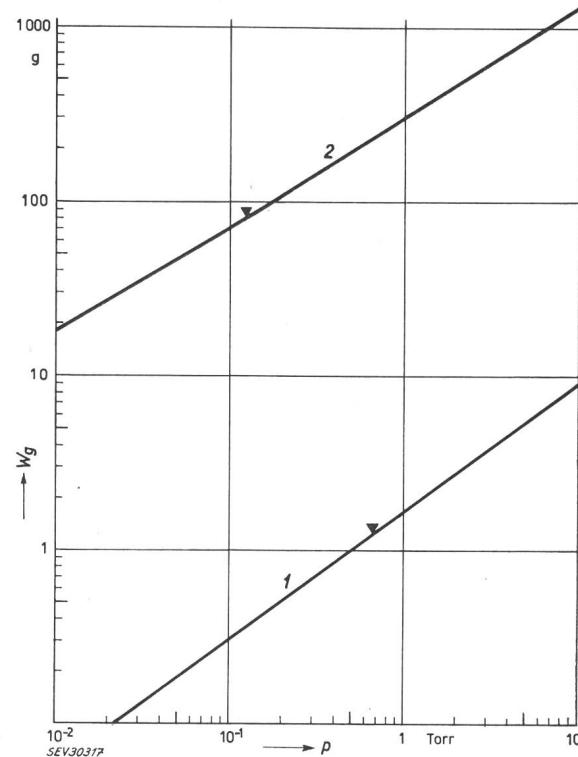


Fig. 1  
Wassergehalt  $W_g$  von Papier und Öl eines 300-kV-Stromwandlers in Funktion des Dampfdruckes  $p$   
Temperaturen: von Papier 80 °C, von Öl 30 °C;  
1 250 kg Öl; 2 100 kg Kabelpapier

Gesamthaft konnten durch den Bau von leistungsfähigen Vakuumpumpen und Aufklärung der physikalischen Zusammenhänge wertvolle Fortschritte im Messwandlerbau erzielt werden, die in einer rascheren und besseren Trocknung und guten Ausnutzung des Isoliermaterials ihren Niederschlag gefunden haben.

Alle Faktoren, die den Zustand des neuwertigen Messwandlers bestimmen, können heute als weitgehend bekannt gelten. Unser

Hauptaugenmerk hat sich deshalb in den letzten Jahren der intensiven Erforschung der Alterung der Isolierung und ihrer Alterungsverminderung zugewendet.

**V. Cogliatti**, Ingenieur, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich:  
Das Stichwort «fahrbare Ölaufbereitungsanlage» ist bereits mehrfach gefallen, und Prof. *P. Stoll* hat in seinem Vortrag die Grundlagen für eine solche Anlage besprochen. Als Ergänzung dazu möchte ich die kürzlich von der Maschinenfabrik Oerlikon angeschaffte, und von der Firma A. Pfeiffer, Wetzlar gebaute Ölaufbereitungsanlage vorstellen.

Im modernen Transformatorenbau werden Aktivteil und Öl hochwertig getrocknet und aufbereitet. Anderseits müssen Gross-einheiten in den meisten Fällen ohne Öl transportiert werden. Unsere Forderung ging nun von allem Anfang an dahin, beim Transport und der Montage am Aufstellungsort jede, auch die kleinste Qualitätseinbusse auszuschliessen.

Diese Forderung definierte bereits die beiden Hauptpunkte des Pflichtenheftes, nämlich:

- a) Der ohne Öl, mit Stickstoff-Füllung transportierte Transformato-  
r soll vorerst auf 0,01 Torr evakuiert werden können.

b) Das in Containern mitgelieferte Öl soll aus Sicherheitsgrün-  
den nochmals hochwertig aufbereitet und unter dem angegebenen  
Vakuum in den Transformator eingezogen werden.

Im Sinne einer Vergrösserung der Einsatzmöglichkeiten wurde ferner verlangt:

a) Das Öl im Betrieb gestandener oder stehender Transformatoren soll getrocknet und entgast werden können. Auf eine Ölregenerierung mit Hilfe von Fullereder wurde bewusst verzichtet, weil diese Behandlung in den seltensten Fällen in den Aufgabenbereich der Herstellerfirma fällt.

b) Feucht gewordene Aktiviteile bei Umbauten oder Reparaturen sollen auf dem Platz getrocknet werden können.

Fig. 1 zeigt den schematischen Aufbau der Aufbereitungsanlage. Sie besteht aus drei Hauptteilen:

a) Ölaufbereitungskreis mit Grobfilter, Förderpumpe, Perlonaufschwimmer, Durchflusserhitzer (30 kW), 2stufige Entgasungskolonne mit Raschig-Ring-Einsätzen. Der Kreis ist ausgelegt für einen stufenlos regelbaren Durchsatz von 0...7000 l/h. Beim Nenndurchsatz von 1400 l/h kann nichtaufbereitetes Rohöl im einmaligen Durchlauf auf folgende Werte gebracht werden:

- Restfeuchtigkeit 1 g/t
  - Restgasgehalt nach Henry 0,1 Torr

Diese Werte entsprechen einer hochwertigen Aufbereitung.

b) *Vakuumpumpsatz*, bestehend aus Drehschieber-Vorpumpe und einer Roots-Hauptpumpe. In Fig. 1 ist auch der Vakuum-Anschluss für den Transformator eingezeichnet. Beide Pumpen werden durch vorgeschaltete Kondensatoren entlastet und anfallende Kondensate in den Ölkreis zurückgeführt.

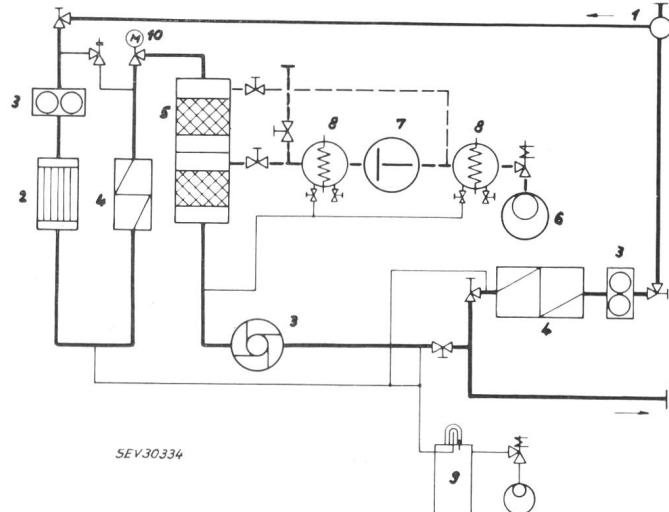


Fig. 1

**Vereinfachtes Schema der fahrbaren Öllaufbereitungsanlage**  
Durchsatz im Aufbereitungskreis stufenlos regelbar von 0...7000 l/h  
1 Grobfilter; 2 Feinfilter; 3 Förderpumpe; 4 Durchlauferhitzer;  
5 zweistufige Entgasungskolonne; 6 Vorpumpe; 7 Millitorrpumpe;  
8 Kondensator; 9 Restgasgehaltmessgerät; 10 Motorventil

c) Grosser Heizkreis mit Förderpumpe 15 000 l/h und Durchflusserhitzer (90 kW) für die Aufheizung eines Transformatormit Hilfe seines Öles.

Die ganze Anlage ist mit einer Stahlblechverkleidung versehen, welche auch eine Aufstellung im Freien zulässt (Fig. 2). Die Abmessungen betragen  $2 \times 3 \times 2,5$  m. Die Anlage lässt sich auf einem offenen, gewöhnlichen Bahnwagen oder auf einem Strassenchassis transportieren.

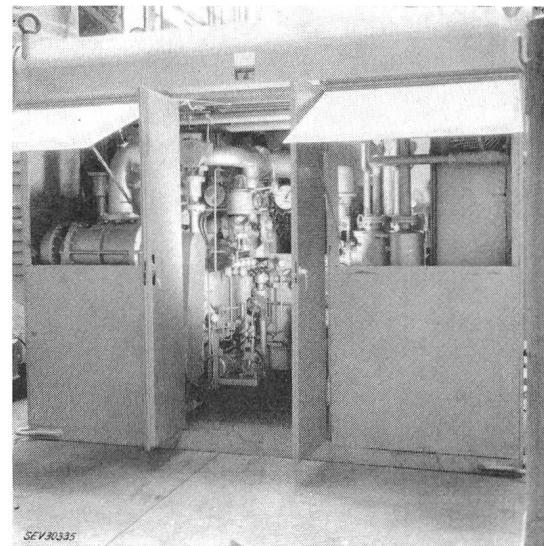


Fig. 2  
Gesamtansicht der fahrbaren Ölauftreibungsanlage  
Verschalungen und Eingangstüre geöffnet

Einem robusten, übersichtlichen und leicht bedienbaren Aufbau der Anlage wurde grösste Beachtung geschenkt.

Selbstverständlich ist auch eine ganze Reihe von Schutzeinrichtungen vorgesehen. Erwähnenswert ist der automatische Durchsatzregler im Aufbereitungskreis, der in der Entgasungskolonne ein bestimmtes, wählbares Vakuum konstant hält, indem er den Öldurchsatz entsprechend anpasst.

Die Prüfung der Aufbereitungsqualität erfolgt mit einem Restgasgehaltmessgerät nach dem Verfahren von Pirelli (Fig. 3). Die Einrichtung ist betriebsicher und einfach. Nach unserer Auffassung gibt bei Neuölen der Restgasgehalt am zuverlässigsten Aufschluss über die Güte der Aufbereitung.

Vielleicht scheint der Aufwand zur Erfüllung der eingangs gestellten Forderungen sehr gross. Tatsächlich sind die einzule-

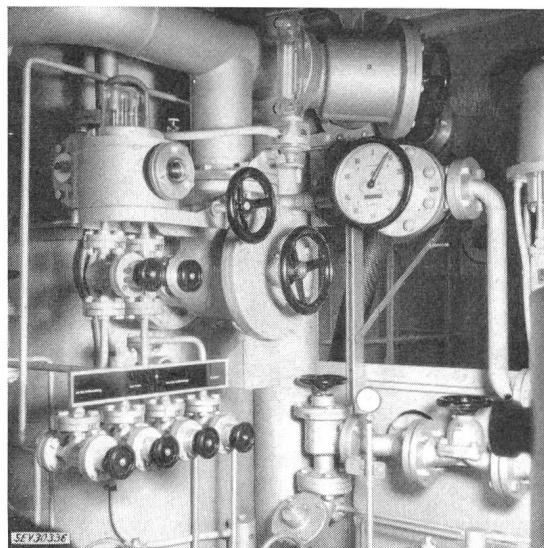


Fig. 3  
**Aufnahme aus dem Innern der Anlage**  
 oben links die Glaskuppel des Restgasgehalt-Messgerätes mit dem  
 (oben Mitte) dazugehörigen Kammerer-Vakuummeter

setzenden Mittel ganz beträchtlich; eine gute Ölaufbereitung ist jedoch nicht Selbstzweck. Sie gibt dem Transformator vermehrte Sicherheit und längere Lebensdauer und entspricht damit einer zusätzlichen Wertvermehrung.

**H. Hartmann, Oberingenieur, AG Brown, Boveri & Cie., Baden:** Als Befürworter der Vakuumanwendung möchte ich auf die Probleme der Vakuumanwendung eingehen, damit nicht der Eindruck entsteht, das Vakuum sei so ohne weitere Vorsicht anwendbar oder dass Enttäuschungen über ihre Wirksamkeit entstehen. Greifen wir zum Beispiel den Vorevakuiersprozess eines mit Öl zu imprägnierenden und zu füllenden Apparates heraus. Bei der praktischen Durchführung wird einem unbeabsichtigten Brechen des Vakuums bei diesem Prozess, das heisst vor dem Einziehen des Öles häufig keine oder zu wenig Beachtung geschenkt. Ein Brechen des Vakuums bei einem solchen Prozess bedingt aber die Wiederholung des ganzen Prozesses. Ich möchte darauf hinweisen, dass ein unbeabsichtigtes Brechen des Vakuums gerade bei kleineren Objekten wie Messwandlern vorkommen kann, wenn bei der Betätigung von Schiebern Undichtigkeiten auftreten oder beim Zuschalten langer Ölzuleitungen noch ein Schwall Luft zutritt. Es sind daher nur Spezialschieber zu verwenden oder diese in ein Ölbad als Flüssigkeitsvorlage zu setzen. Die Zuführungsleitungen sind auch mitzuevakuieren oder mit vorevakuiertem Öl zu füllen. Leistungsfähige Pumpen können ein gutes Vakuum aufrecht erhalten, selbst bei grossen Undichtigkeiten oder wenn ganze Perlenketten von Luftpblasen zutreten. Diese können sich beim aktiven Isolationsmaterial ansammeln. Um nicht der Täuschung zu unterliegen, dass trotzdem ein guter Evakuierungsprozess durchgeführt sei, ist bei abgestellter oder abgetrennter Vakuumpumpe zu kontrollieren, ob das Vakuum erhalten bleibt oder es ist eine Sichtkontrolle auf den Ölspiegel, welcher sich bald nach dem Einziehen beruhigen muss, empfehlenswert. Um die Gewissheit zu haben, dass ein durchgeföhrter Vakuumprozess auch wirklich die beabsichtigte Wirkung erzielt, ist also sehr sorgfältig zu arbeiten. Zur Sicherheit empfiehlt sich stets noch das altbekannte Verfahren, die Apparate nach der Ölfüllung vor dem Anlegen der Spannung bewusst etwas stehen zu lassen, damit allfällige Gasreste vom Öl aufgenommen werden, was nach den Erläuterungen von Dr. Goldstein wohl langsam verläuft, jedoch durchaus möglich ist. Der Faktor «Zeit» ist von grosser Wichtigkeit, indem schon das Eindringen von Öl quer zur Papierschichtung überaus langsam vor sich geht. Bei dickeren Schichten ist mit vielen Stunden zu rechnen, wie es sich mit elektrischen Messungen nachweisen liess.

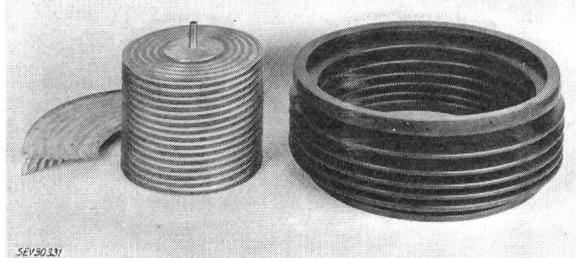


Fig. 1

Ausdehnungsmembranen für Öl

links: geschnittenes Segment einer Metallmembrane;  
Mitte: Metallmembran; rechts: Membran aus Spezialkautschuk

Während bei der Erstimpregnierung die Trägheit, mit der die Vorgänge ablaufen, als nachteilig empfunden wird, kommt uns diese Eigenschaft bei der Konservierung der Apparate, d. h. Aufrechterhaltung des gasfreien und trockenen Zustandes, z. T. entgegen. Durch die Art des Abschlusses des Ölbades eines elektrischen Apparates können wir die Wiederbegasung und -befeuchtung noch mehr verzögern oder ganz verhindern. Wo es mit Rücksicht auf die Grösse des Apparates möglich ist, erscheint der gasfreie und möglichst druckkonstante Abschluss als ideal. So zeigt Fig. 1 Möglichkeiten des gasfreien und druckkonstanten Abschlusses von Messwandlern. Die Membrankörper sind

dabei vollständig mit Öl gefüllt, so dass über dem Ölspiegel kein Gaskissen mehr ansteht, welches doch zunächst vom gashungrigen Ölbad absorbiert würde. Durch seine Formgebung ändert der Membrankörper sein Volumen, ohne einen nennenswerten Druckunterschied.

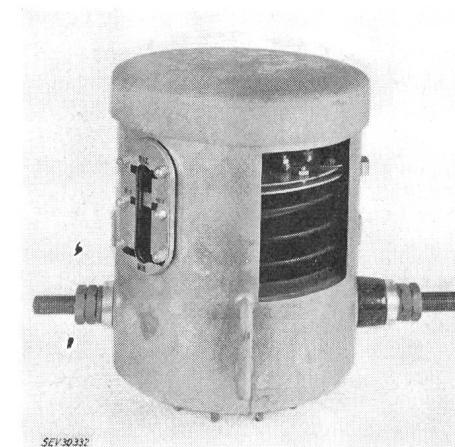


Fig. 2  
Kopf eines Messwandlers mit Membranabschluss  
(teilweise aufgeschnitten)  
Der Abschlussdeckel der Membran dient gleichzeitig als Ölstandanzeiger

Unter sinngemässer Anwendung der Diffusionskonstanten lässt sich erwägen, welches Material für den gasfreien und feuchtigkeitssicheren Abschluss einer bestimmten Wandlerbauart angemessen ist.

Fig. 2 zeigt die Detail-Aufnahme des Kopfes eines Messwandlers mit eingebauter Ausdehnungsmembran. Der Deckel der Membran dient gleichzeitig als Ölstandanzeiger.

Viele Kenntnisse, die man in steter Verbesserungsarbeit der Vakuumimpregniertechnik ölimprägnierter Apparate gewonnen hatte, konnte man auch bei den giessharz-impregnierten Apparaten anwenden. Ein Vorteil ist, dass die Vakuumtechnik nur bei der Herstellung des Giessharzwandlers angewendet zu werden braucht, während für die Aufrechterhaltung des einmal erreichten Zustandes keine weiteren Vorkehrungen mehr zu treffen sind.

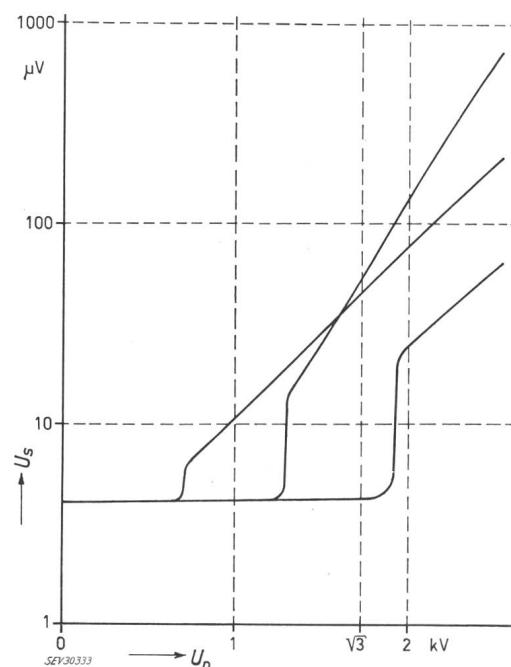


Fig. 3  
Radio-Störspannung  $U_s$  in  $\mu\text{V}$  als Vielfaches der Nennspannung  $U_n$  eines 72,5-kV-Giessharz-Spannungswandlers  
Dank der Vakuumanwendung übersteigt der Radiostörpegel den Umweltstörpegel erst bei höheren Spannungen

Die Anwendung des Vakuums hilft bei der Herstellung von Giessharz-Wandlern mit, blasenfreie Gusskörper zu erhalten. So wurden bei Brown Boveri von Anbeginn an die Hochspannungs-Giessharz-Wandler mit gutem Erfolg im Vakuum-Gussverfahren hergestellt.

Der durch die Anwendung des Vakuums mitbedingte Erfolg eines Gusses lässt sich durch die Aufnahme der Störspannung in Funktion der angelegten Spannung nachweisen. Aus Fig. 3 folgt, dass über den Umwelt-Störpegel hinaus die Wandler bei steigender Spannung störfrei bleiben bis zu Werten, die die Betriebsspannung wesentlich überschreiten können. Eine genaue elektrische Deutung der Kurven übersteigt den Rahmen der Vakuum-Tagung, sie lässt aber eindeutig den Schluss zu, dass die Vakuumtechnik auch hier mit Erfolg eingesetzt wird.

**Dr. G. Weissenberger, Kabelwerke Brugg AG, Brugg:** Bei der Herstellung der Höchstspannungsölkabel wird in Brugg die Feuchtigkeit in der Papierisolation im normalen Fabrikationsprozess weitgehend entfernt. Die vorgetrockneten Kabeladern werden unimprägniert in der Bleipresse ummantelt. Dadurch, dass zwischen dem Vortrocknen und dem Aufbringen des Bleimantels die Kabelisolation die Möglichkeit hat, in geringem Masse Feuchtigkeit aufzunehmen, ist eine Nachtrocknung erforderlich. Das umpresste Kabel wird daher direkt auf der Bobine im Trocknungssofen erwärmt und von den beiden Kabelenden her evakuiert.

Dank der Verwendung von Millitorr-Pumpen und rotierenden Ölluftpumpen als Vorpumpen, können Kabel von grossem Restfeuchtigkeitsgehalt mit vernünftigem Zeitaufwand getrocknet werden. Zweckmässigerweise werden solche Kabel mittels Trockenluft oder mit Gasen von hoher Diffusionsgeschwindigkeit behandelt.

Im allgemeinen ist die Trocknungsdauer von der vorhandenen Restfeuchtigkeit, der Kabellänge, dem Hohlleiterdurchmesser und von der Isolationsdicke abhängig. Bei Längen über 700 m ist der Druckabfall im Hohlleiter bis in die Mitte des Kabels sehr beträchtlich. Es ist daher verständlich, dass für die Beurteilung des Trocknungszustandes eines Kabels nicht das Vakuum an den Kabelenden, sondern dasjenige der Kabelmitte massgebend ist. Für die Messung wird deshalb die Saugleitung zu den Vakuumpumpen geschlossen, so dass ein Druckausgleich im Kabel eintritt. Beträgt der Druck nach einer Stunde weniger als 0,3 Torr, so erfolgt die Imprägnierung mit einem gut getrockneten und entgasten dünnflüssigen Kabelöl.

Die nach diesem Verfahren hergestellten Kabel ergeben Verlustfaktoren in der Größenordnung von etwa  $25 \cdot 10^{-4}$  bei einer Leitertemperatur von 80 °C. Dadurch, dass die Ölkabel ständig unter Druck stehen, ist der Zutritt von Luft und Feuchtigkeit ins Kabelinnere nicht möglich. Die Alterungerscheinungen dieser Kabel sind daher von untergeordneter Bedeutung, was auch die wiederholten Verlustmessungen des SEV an den Höchstspannungskabeln in den Kraftwerken Oberhasli bestätigt haben.

Diese im Jahre 1942 gelieferten 150-kV-Kabel übertragen 50 MVA vom Maschinenhaus Innertkirchen nach der Freiluftstation (Kabellänge im Mittel 350 m).

Im Pflichtenheft aus dem Jahre 1941 sind folgende Hauptdaten festgelegt:

Kupferquerschnitt . . . . .	150 mm <sup>2</sup>
Isolationsstärke . . . . .	18,5 mm
Kapazität . . . . .	0,185 μF/km
Max. Beanspruchung der Leiterisolation . .	8 kV/mm

Nach den Messungen im Jahre 1942 betrug der Verlustfaktor bei Betriebsspannung  $\approx 30 \cdot 10^{-4}$  bei einer Kabeltemperatur von 15 °C. Die späteren Messungen des SEV im Jahre 1954, ergaben bei einer Kabeltemperatur von 13 °C, für den Verlustfaktor bei der Betriebsspannung  $\approx 27 \cdot 10^{-4}$ .

Wesentlich kürzere Imprägnierungszeiten lassen sich nach dem neuen Vorschlag von Pirelli erreichen. Das Ziel dieses Verfahrens ist, die auf der Kabeltrommel aufgewickelte Kabelader im gleichen Kessel zu trocknen und anschliessend zu imprägnieren. Die Kabeltrommel und der Imprägnerkessel werden zweckmässigerweise aus rostfreiem Stahl hergestellt, um die Verschmutzung des Isolieröls zu vermeiden. Über ein Kühlslangensystem wird das Isolieröl nach dem Imprägnierprozess auf Raumtemperatur abgekühlt. Damit Lufteinschlüsse oder Feuchtigkeit das imprägnierte Kabeldielektrikum nicht verschlechtern können, wird das Kabel durch eine mit Isolieröl gefüllte Schleuse unmittelbar der Bleipresse zugeführt. Mit dieser Hochvakuumtrocknung werden Verlustfaktoren von  $20 \cdot 10^{-4}$  erreicht. Dieses Verfahren, das sicherlich grosse Vorteile bietet, hat jedoch den Nachteil, dass beim kontinuierlichen Bleimantelumpressen nicht eingegriffen werden kann, wenn sich beispielsweise beim Abwickelvorgang die imprägnierte Kabelader am Bobinenflansch verklemmt.

Man darf sich jedoch nicht zur Ansicht verleiten lassen, dass «nur» der Trocknungsvorgang allein für die Güte der Kabelisolierung massgebend sei. Durch Wahl und Verarbeitung der Isolierpapiere, die Art der Halbleiterabschirmung, die Behandlung der Isolieröle, wird der Verlustfaktor des fertigen Kabels massgebend beeinflusst.

Aus welchem Grunde der Kabeltechniker dem Verlustfaktor grosse Beachtung schenkt, hängt damit zusammen, dass die dielektrischen Verluste mit dem Quadrat der Spannung anwachsen. Z. B. betragen diese Verluste bei den 150-kV-Ölkabeln etwa 8 % der Kupferverluste, wenn man der Berechnung den Verlustfaktor von  $50 \cdot 10^{-4}$  zu Grunde legt. Bis 220 kV ist dieser Wert nach den Empfehlungen der CEI noch zulässig. Für 220-kV-Kabel steigt der Anteil der dielektrischen Verluste bereits auf 18 %.

Aus diesen Zahlen ist ohne weiteres verständlich, dass Kabel mit derart grossen dielektrischen Verlusten für die 400-kV-Übertragung nicht in Frage kommen, da die Belastbarkeit beträchtlich herabgesetzt werden müsste.

In Anbetracht, dass eine Senkung des Verlustfaktors unter  $20 \cdot 10^{-4}$  kaum realisierbar ist, versucht man heute ein Kabeldielektrikum aus Kunststofffolien herzustellen. Ein synthetisches Versuchskabel für 345 kV wird zur Zeit an der Cornell Universität in USA geprüft. Die Kabelisolation, aus aufgerauhten Polykarbonatbändern aufgebaut, wurde analog wie ein Höchstspannungskabel getrocknet, entgast und anschliessend mit dünnflüssigem synthetischem Öl imprägniert. Dank der niedrigen Dielektrizitätskonstanten ( $\approx 2,4$ ) und dem sehr kleinen Verlustfaktor des Kabels (bei 80 °C  $\approx 6 \cdot 10^{-4}$ ), können die Verluste des synthetischen Kabels beachtlich gesenkt werden.

Welchen Einfluss bei der Entwicklung dieser neuartigen Kabel die Vakuumtechnik ausübt, wird die Zukunft lehren.

**Gino Beer, Ingenieur, Ansaldo-San Giorgio, Genova:** Seit drei Jahren sind bei uns Evakuierungs- und Ölaufbereitungsanlagen in Betrieb. Es handelt sich um Pumpensätze mit einer Sauggeschwindigkeit von 3000...6000 m<sup>3</sup>/h und um eine Ölaufbereitungsanlage für 1900 l/h in einem Durchlauf mit einem Restwassergehalt von 1,5 g/t Öl und einem Druck (nach Henry) für die gelösten Gase in der Größenordnung von 0,3...0,5 Torr.

Die Transformatoren werden bei Ansaldo-San Giorgio in ihrem Kessel evakuiert, nachdem die Kessel vor der Montage mit einem Halogenlecksuchgerät geprüft worden sind. Normalerweise rechnen wir mit Undichtigkeiten von  $10^{-1}$  Torr · l/s und im Maximum mit 1 Torr · l/s. Mit diesen Bedingungen erreichen wir ein Endvakuum von  $4 \cdot 7 \cdot 10^{-2}$  Torr. Mit unseren Konstruktionen und mit unseren Isolationen erreichen wir keine grosse Verbesserung des tg δ und des Isolierwiderstandes, wenn wir bei besserem Endvakuum von einigen  $10^{-1}$  Torr arbeiten. Dies bedeutet eine relative Verbesserung von 5...20 %. Wenn aber bei  $3 \cdot 10^{-1}$  Torr kein Wasser mehr vom Kondensator austritt und der Druck auf  $5 \cdot 10^{-2}$  Torr erniedrigt wird, so kondensieren noch 200...400 g Wasser pro Tonne Papier und Preßspan. Für die Kontrolle des Trocknungsvorganges benützen wir δ- und Isolierwiderstandsmessungen, welche wir leider nur indirekt messen und die nur eine gewisse statistische Anzeige des Trocknungsgrades geben können.

Die Diffusionsgeschwindigkeit des Wassers aus dem Papier ist sehr gering und ergibt im Dielektrikum eine gewisse Verteilung des Wassergehaltes in Funktion der Zeit. Die Verteilung kann von jedem Konstrukteur für seine Bauelemente und für seine Isolationen im Laboratorium untersucht, aber in der Fertigung nicht direkt kontrolliert werden. Die einzige genaue Mes-

sung wäre deshalb nur in einem absolut dichten Vakuumkessel möglich, wenn man die Ventile schliessen könnte und warten bis sich die Gleichgewichtspartialdrücke stabilisieren. Diese Stabilisierung und die relative Messung der Partialdrücke ist leider nicht möglich, weil die Transformatorenkessel zu undicht sind, und man gezwungen ist, mit indirekten elektrischen oder physikalischen Messungen zu arbeiten.

Wir stellen fest, dass für unsere Konstruktionen und Isolationen tg  $\delta$ -Messungen an Transformatoren mit sog. fester Isolierung anwendbar sind, jedoch nicht für Transformatoren mit Bakelithülsen. In diesem Falle sind Isolierwiderstandsmessungen empfindlicher. Es steht auch eine sichere, wenn auch grobe Messung in der Ermittlung des Wasserkondensatanfalles zur Verfügung. Dies kann genau mit einem kleinen, billigen und auf 7...8 °C gekühlten Kondensator am Auspuff der Vorpumpe gemessen werden. Natürlich soll man auch den Wasseranfall der Undichtigkeiten berücksichtigen.

Unsere Erfahrung zeigt, dass, auch wenn tg  $\delta$  und der Isolierwiderstand konstant sind, immer noch Wasser aus den Wicklungen frei wird. Wir halten die Evakuierung für beendet, wenn in einem Tag nicht mehr als 100 g Wasser pro t Papier und Preßspan kondensieren. Auf der Basis von Modellversuchen können wir schätzen, dass bei einer Temperatur von 100 °C im Kupfer und bei einem Endvakuum von  $4 \cdot 10^{-2}$  Torr der Wassergehalt im Dielektrikum unserer Transformatoren kleiner als 0,2 % ist.

**Dr. phil. K. Michel, AG Brown, Boveri & Cie., Baden:** Die Bemühungen, eine von Hohlräumen und Poren freie Isolation zu erlangen, gelten nicht ausschließlich der Verbesserung der dielektrischen Eigenschaften, sondern führen, wie an verschiedenen Beispielen dargelegt wurde, nicht zuletzt auch zu günstigeren mechanischen Eigenschaften, zu erhöhter thermischer Beständigkeit und besonders zu einer besseren Wärmeleitfähigkeit der Isolation.

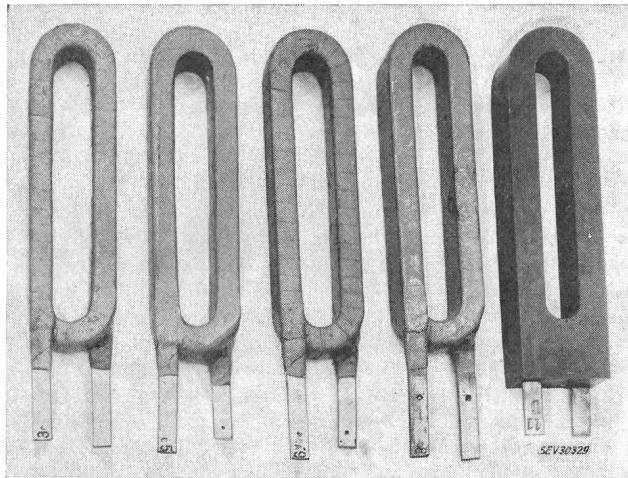


Fig. 1  
Versuchsspulen für Erwärmungsversuche

Im Rahmen von Untersuchungen über das thermische Verhalten von Spulen für Traktionsmotoren wurden Erwärmungsversuche durchgeführt, welche die massgebliche Rolle der Imprägnierung für den Wärmeaustausch durch die Isolation deutlich zum Ausdruck bringen.

Die Versuchsspulen (Fig. 1) in Form und Aufbau Wendepolspulen entsprechend, sind grösstenteils isoliert durch Umbändern mit Glasgewebeband oder Glimmer-Glasgewebe-Kombinationen und mit verschiedenen Imprägnierungsmitteln im Vakuum behandelt. Eine Ausführung wurde ohne zusätzliches Trägermaterial in einer Form mit einem Epoxydiessharz, gefüllt mit Quarzmehl, umgossen. Für die Erwärmungsversuche wurden die Spulen mit einer bestimmten Stromstärke (etwa 300 A) belastet und gleichzeitig in einem Windkanal durch einen konstanten Luftstrom gekühlt. Gemessen wurde die mittlere Erwärmung des Kupfers gegenüber der Kühllufttemperatur nach Erreichen des Temperaturgleichgewichts. Je nach Aufbau und Behandlung der

Isolation liegen die gefundenen Erwärmungen  $\Delta t$  bei gleicher Dicke der Isolation im Bereich von 100 °C bis über 200 °C (Fig. 2). Jede Säule des Diagramms gibt den Streubereich wieder, über dem sich die Messungen an 6 parallel ausgeführten Versuchsspulen verteilen. Die Ausführungen 1...5 enthalten als Träger der Isolation ein Glasgewebeband. Die ersten drei wurden mit verschiedenen lösungsmittelhaltigen Lacken, 4 und 5 mit lösungsmittelfreien Imprägnierharzen wie ungesättigten Polyesterharzen und Epoxydharzmischungen behandelt. Allgemein ergeben die lösungsmittelfreien Imprägniermittel eine bessere Wärmeableitung als die üblichen Isolierlacke, welche beim Trocknen durch die Verflüchtigung der Lösungsmittel an die 50 % ihres Volumens einbüßen. Das Beispiel 3 zeigt, dass auch mit lösungsmittelhaltigen Lacken gute Ergebnisse möglich sind, wenn erhöhte Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Lackharzes und günstige Verarbeitungseigenschaften wie gleichmässige, langsame Durchtrocknung einander ergänzen.

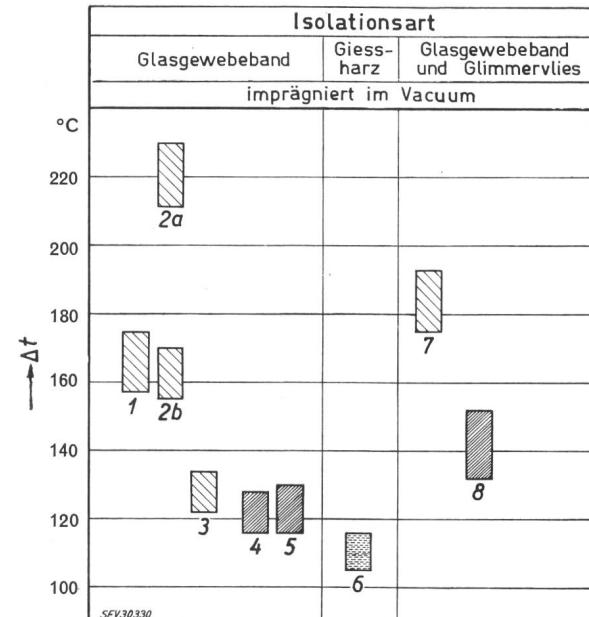


Fig. 2  
Erwärmungsversuche an Wendepolspulen  
 $\Delta t$  Erwärmung bei konstanter Strombelastung und konstantem Kühlluftstrom

Die Ausführungen 2a und 2b unterscheiden sich durch das angewendete Vakuum: 2a wurde bei ungenügendem Vakuum ( $> 10$  Torr), 2b wie die übrigen Ausführungen bei  $< 1$  Torr behandelt

Die Ausführungen 3 und 7 bzw. 4 und 8 wurden mit dem gleichen Imprägniermittel behandelt

#### Imprägniermittel:

- [White square] Lösungsmittelhaltige Lacke;
- [Dark grey square] Lösungsmittelfreie Lacke;
- [Hatched square] Epoxydiessharz mit Quarzmehlzusatz

Dass die Verarbeitungsbedingungen das Ergebnis weitgehend beeinflussen, ist ersichtlich aus den Beispielen 2a und 2b: Die ungenügende Evakuierung bei der Ausführung 2a führt zu einer über 50 °C höheren Erwärmung als bei der vorschriftsmässigen Vakuumbehandlung von 2b. Die beste Wärmeableitung wies erwartungsgemäss die ohne Verwendung von Faserstoffträgern im Vakuum gegossene Isolation 6 aus Epoxydharz mit hohem Gehalt an gut wärmeleitenden mineralischen Füllstoffen auf.

Durch Verwendung von Glimmer, hier in Form von Glimmervlies, die in vielen Fällen zur Erhöhung der Spannungsfestigkeit und der Beständigkeit gegen klimatische Einflüsse unentbehrlich ist, wird der Wärmedurchgang merklich verschlechtert (Beispiele 7 und 8). Die Überlegenheit der Imprägnierung mit lösungsfreien Imprägniermitteln (8) kommt wiederum deutlich zum Ausdruck. Das ungünstigere Verhalten der glimmerhaltigen Isolation ist teils auf die geringere Wärmeleitfähigkeit des Glimmers verglichen mit Glas und Quarz, teils auf die Erschwerung einer vollkommenen Durchimprägnierung zurückzuführen.