

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 52 (1961)
Heft: 19

Artikel: Vakuumimprägnierte Isolationen elektrischer Maschinen
Autor: Peter, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059082>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

ment, c'est pourquoi le refroidissement se fait par circulation de la masse dans un refroidisseur.

Le cycle complet est de 5 jours comprenant le séchage, l'imprégnation et le refroidissement. Avec une ancienne installation il pouvait durer jusqu'à 20 jours.

Bibliographie

- [1] Hunter, P. V. et J. Temple Hazell: Development of Power Cables. London: Newnes 1956.
[2] Fabre, J.: Les lois de dégradation du papier imprégné d'huile

- dans les transformateurs. Bull. Soc. franç. Electr. 7^e série, 9(1959) 103, p. 409...418.
[3] Ehlers, W. et H. Lau: Kabel-Herstellung. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1956.
[4] Thornton, E. P. G. et D. H. Booth: The Design and Performance of the Gas-Filled Cable System. Proc. IEE-A 106(1959)27, p. 207...230.
[5] Brinkmann, K. et M. Beyer: Fortschritte bei der dielektrischen Trocknung von Hochspannungskabeln. ETZ 77(1956)24, p. 881...884.
[6] Emanuel, L.: High Voltage Cables. London: Chapman & Hall 1929.

Adresse de l'auteur:

G. Martin, ingénieur, S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (VD).

Vakuuminprägnierte Isolationen elektrischer Maschinen

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

533.5 : 621.313.048.1

I. Einleitung

Vakuuminprägnierte Isolationen kommen bei elektrischen Maschinen in einer solchen Vielfalt zur Anwendung, dass eine umfassende Behandlung hier nicht möglich ist. Aus diesem Grunde werden im folgenden die Statorisolationen elektrischer Generatoren ausführlich behandelt und andere vakuuminprägnierte Isolationen nur gestreift.

Den Hochspannungsisolationen musste der Konstrukteur seit jeher besondere Beachtung schenken, da kein anderer Teil des Generators für seine Betriebssicherheit wichtiger ist.

Der beste Isolierstoff, den die Natur bietet, ist der Glimmer. Seine hervorragenden elektrischen Eigenschaften, seine Wärmebeständigkeit und die Widerstandsfähigkeit gegen Chemikalien werden von keinem synthetischen oder anderen natürlichen Stoff erreicht. Der Glimmer kommt in Form von flächenhaften Kristallen begrenzter Grösse vor, was seine Verwendung ohne Träger und Bindemittel ausschliesst. Während der Glimmer seinen Platz als wichtigster Bestandteil einer Hochspannungsisolation bis heute behaupten konnte, haben Träger, Bindemittel und die Art ihrer Applikation sich verschiedentlich geändert.

2. Diskontinuierliche, nicht vakuuminprägnierte Isolationssysteme

In Europa werden seit etwa 50 Jahren die geraden Nutteile der Statorwicklungen mit Micafoliumumpressungen isoliert. Diese Isolierfolien bestehen aus grossen Glimmerschuppen welche mit den Naturharzen Schellack (= Schellackmicafolium) oder Asphalt (= Asphaltmicafolium) auf dünnes Isolierpapier geklebt wurden. Die so erhaltenen Folien werden auf Wärmestischen und Wälzmaschinen um den Nutenteil der Wicklungsstäbe gebügelt, in geheizten Pressen auf Form gepresst und ausgehärtet. Die Isolation der Wicklungsköpfe besteht je nach den thermischen Anforderungen aus Papier oder Micapapierbändern, welche unter Verwendung geeigneter Bindemittel aufgewickelt oder nach dem Wickeln unter Vakuum mit Asphalt imprägniert werden. Dieses Isolierverfahren wird diskontinuierlich genannt, weil ein Übergang zwischen der Isolierung des geraden Teiles und derjenigen des Spulenkopfes entsteht.

Diskontinuierliche Folienisolationen ergeben im elektrisch am stärksten beanspruchten Nutenteil eine elektrisch und — durch das in breiter Bahn verarbeitete Trägermaterial — eine mechanisch hochwertige

Isolation, während der Wickelkopf eine flexible und leichte Isolierung erhält.

Nachteile dieser Isolationsart sind die geringe Wärmeleitfähigkeit sowie die Neigung zum Aufblähen in den Lüftungsschlitten und am Austritt aus dem Blechpaket. Da Folienisolationen nicht hohlraumfrei aufgebracht werden können, treten schon bei relativ tiefen Spannungen Glimmentladungen auf, welche Träger und Bindemittel zerstören und auch die Glimmerschuppen angreifen. Die Übergänge zwischen der Nutumpressung des geraden Teiles und den mit Bändern bewickelten gebogenen Teil bieten gewisse Schwierigkeiten, weshalb man aus Sicherheitsgründen gezwungen ist, den geraden Teil über die Eisenlänge hinaus zu verlängern. Bei langen Stäben ist die Verarbeitung von Folien überdies sehr kompliziert.

Vor etwa 10 Jahren wurden Folienisolationen mit Kunstharzbindemitteln entwickelt, welche eine ausgezeichnete Formstabilität auch bei Betriebstemperaturen über 100 °C gewährleisten. Zur Verarbeitung dienen die gleichen Fabrikationseinrichtungen wie bei Schellack- oder Asphaltmicafolium. Auch diese Folien können nicht hohlraumfrei aufgebracht werden. Die Verlängerung des geraden Teils am Nutaustritt und die Verarbeitungsschwierigkeiten bei langen Stäben blieben ebenfalls bestehen.

3. Anforderungen an eine moderne Isolation

Schadenfälle, welche vor allem bei Maschinen mit grossen Eisenlängen auftraten, führten zu einer gesteigerten Entwicklungstätigkeit der Elektroindustrie auf dem Gebiet der Statorwicklungs-Isolationen. Die Ursachen konnten dabei genau ermittelt und unter Berücksichtigung der konstruktiven Bedürfnisse folgendes «Pflichtenheft» für eine moderne Isolation aufgestellt werden:

a) Hohe Durchschlagsfestigkeit, damit der Isolationsauftrag reduziert, die Nutraum-Ausnützung verbessert und eine gute Ableitung der Kupferverluste gewährleistet werden kann.

b) Kleine dielektrische Verluste in Abhängigkeit der angelegten Spannung. Die dadurch angestrebte Hohlraumfreiheit ergibt gleichzeitig eine gute Wärmeleitfähigkeit.

c) Kleine dielektrische Verluste in Abhängigkeit der Temperatur, damit der Isolationsverband durch dielektrische Verluste so wenig wie möglich zusätzlich erwärmt wird.

d) Keine Bläsebildung, d.h. die Isolation darf keine Unterschiede in der Dielektrizitätskonstanten aufweisen, welche erhöhte Spannungen verursachen und mit einer rascheren Ermüdung des Dielektrikums zur Folge haben.

e) Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit. Der Isolationsverband darf — z. B. bei Stillstand der Maschine — keine Feuchtigkeit aufnehmen.

f) Vermeidung von Glimmschäden, erreichbar durch Hohlraumfreiheit im Isolationsinnern und durch Auswahl von glimmbeständigen Isoliermaterialien.

g) Gute Wärmeleitfähigkeit, erreichbar durch Hohlraumfreiheit und entsprechende Materialauswahl.

h) Hohe mechanische Festigkeit, damit die Isolation den elektrodynamischen Kräften, die bei Kurzschlüssen oder stossartiger Belastung auftreten, widerstehen kann.

i) Hohe Warmfestigkeit und thermomechanische Festigkeit, damit die Generatoren langzeitige Überlasten und stark schwankende Belastungen risikolos aushalten.

Diese Qualitätsansprüche werden ergänzt durch einige Anforderungen, welche unbedingt erfüllt sein müssen:

a) Einfacher, leicht anleitbarer Produktionsprozess.

b) Sichere Applikationsmöglichkeit auch bei Stäben mit grosser Länge und/oder extremen Querschnitten.

Die erwähnten qualitativen und fabrikatorischen Anforderungen führten auf vakuumimprägnierte Bandisolationen, eine Isolationstechnik, mit welcher es gelang, alle Nachteile der diskontinuierlichen Folienisolationen auszumerzen.

4. Vakuumimprägnierung

Gleich wie die vorimprägnierten Folienisolationen bestehen die vakuumimprägnierten Isolationen aus Glimmer, Träger und Bindemittel. Bei den Folienisolationen ist das Bindemittel bereits in für die Verklebung ausreichender Menge vor der Verarbeitung im Isoliermaterial enthalten. Bei vakuumimprägnierten Isolationen wird das Bindemittel nach dem Aufbringen von Glimmer und Träger — ganz oder teilweise — unter Vakuum in die Isolationen gebracht.

Die Vakuumimprägnierung bedingt eine Reihe von gänzlich neuen Arbeitsprozessen, welche im folgenden beschrieben werden.

4.1 Vortrocknung

Um eine qualitativ hochwertige Isolation zu erhalten, muss die im Band nach dem Aufwickeln noch vorhandene Feuchtigkeit entfernt werden. Es wird normalerweise bei erhöhter Temperatur unter Vakuum getrocknet. Um bei gegebenen Isolationsabmessungen Temperatur, Druck und Trocknungszeit optimal einstellen zu können, muss experimentell der zeitliche Zusammenhang des Trocknungsgrades mit Temperatur, Druck und Isolationsabmessung aufgenommen werden.

In der Praxis sind Pumpenleistung und erreichbares Vakuum durch die Dimensionierung der Anlage, die Temperatur durch den gewählten Fabrikationsprozess gegeben, so dass nur noch die Trocknungszeit variiert werden kann. Es haben sich zwei unterschiedliche Trocknungsprozesse ergeben:

a) *Imprägnierung bei Raumtemperatur:* Das Imprägniergut wird vorerst in einem Umluftofen vorgetrocknet. Die Temperatur ist gleich der Aushärtetemperatur, damit im gleichen Ofen bereits imprägnierte Stäbe ausgehärtet werden können. Die warmen Stäbe werden darauf in einem nicht heizbaren Autoklaven bei bestmöglichem Vakuum fertig getrocknet.

b) *Imprägnierung bei erhöhter Temperatur:* Die isolierten Wicklungsstäbe werden im Autoklaven aufgeheizt und bei Imprägniertemperatur getrocknet. Die Abkühlung der Isolation infolge Feuchtigkeitsentzug ist sehr klein und muss nicht berücksichtigt werden.

4.2 Imprägnierung

Um eine hohlraumfreie Isolation zu erhalten, wird das Bindemittel unter Vakuum in die Isolation gebracht. Je tiefer der Druck desto geringer ist der Luftanteil im Autoklaven. Es können daher praktisch alle Räume zwischen Glimmer und Träger mit Bindemittel gefüllt werden.

Zur Kontrolle der Imprägnierung ist es heute üblich, den dielektrischen Verlustfaktor in Abhängigkeit der Spannung zu messen. Sind die gemessenen Werte praktisch spannungsunabhängig, ist die Isolation gut durchimprägniert, gut verklebt und hohlraumfrei.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass für vakuumimprägnierte Hochspannungsisolationen einige Torr zur Erreichung der geforderten Hohlraumfreiheit genügen. Bei tieferen Drücken wird die Imprägnieranlage durch Dämpfe des Bindemittels stark verschmutzt, ohne dass eine messbare Qualitätsverbesserung eintritt.

Zum Imprägnieren werden die Wicklungsstäbe ganz mit Bindemittel überdeckt und anschliessend das Vakuum gebrochen. Bei den neuesten Isolierverfahren liegen die Stäbe in angepassten Giesswannen, so dass nur eine geringe Überdeckung durch Bindemittel stattfindet. Es ist daher notwendig das Vakuum langsam zu brechen, damit nicht Luft oder das zum Vakuumbrechen benötigte Gas in die noch nicht durchdränkte Isolation dringen kann. Wenn das Imprägniermittel nicht genügend dünnflüssig ist um die ganze Isolationsdicke bei Raumdruck zu durchdringen, wird die Imprägnierung durch Anwendung von Überdruck vervollständigt.

Eine weitere Möglichkeit, dicke Schichten zu imprägnieren, besteht darin, mehrere Isolationsaufträge nacheinander zu imprägnieren, so dass pro Arbeitsgang nur eine dünne Schicht durchdrungen werden muss.

4.3 Weitere Arbeitsgänge

Damit die Generatorstäbe in die Statornuten passen, muss der gerade Nutteil kalibriert werden. Warmhärtende Bindemittel verlangen eine Behandlung bei erhöhter Temperatur, welche in geheizten Pressen oder in Umluftöfen durchgeführt wird. Bindemittel, welche nach dem Aushärten nicht mehr flexibel sind werden in Pressformen, die den ganzen Stäben die genaue geometrische Form geben, ausgehärtet.

5. Konsequenzen

Die Vakuumimprägnierung stellt eine Reihe von Anforderungen, welche bestimmte Konsequenzen für den Hersteller von vakuumimprägnierten Isolationen haben.

5.1 Materialauswahl

Als Hauptbestandteil von Hochspannungsisolationen bleibt der Glimmer. Er wird sowohl in Schuppen als auch als Glimmerpapier (Glimmervlies) bei vakuumimprägnierten Isolationen verarbeitet.

Glimmerpapiere haben Vorteile, welche bei der Vakuumimprägnierung besonders zur Geltung kommen. Es sind dies die Herstellbarkeit in grossen Folien, Regelmässigkeit in der Dicke, kleine Schüppchen und die daraus resultierende Porosität, welche das einwandfreie Durchimprägnieren erleichtert. Glimmerpapierisolationen von mehreren Millimetern

Dicke können mühelos durchimprägniert werden. Grosse Glimmerschuppen sind in sich aufspaltbar, was den Zusammenhang einer Isolation beeinträchtigt. Die kleinen Partikel des Glimmerpapiers sind, sofern richtig untereinander verklebt, weniger aufspaltbar, was die Festigkeit von Glimmerpapierisolationen wesentlich erhöht.

Sowohl Glimmerschuppen als auch Glimmerpapiere werden zusammen mit einem Träger verarbeitet. Der Träger gibt den Bändern die zur Verarbeitung notwendige Festigkeit. Je nach der gewünschten Wärmebeständigkeit können Papier, Baumwolle, Seide, Kunststoff (als gelochte Folien oder Gewebe) oder Glasgewebe verwendet werden.

Nicht alle Bindemittel erfüllen die spezifischen Anforderungen der Vakuumimprägnierung. Solche die beim Aushärten flüchtige Bestandteile abgeben, können nicht verwendet werden, da im Innern der Isolationen gasgefüllte Hohlräume entstehen würden. Als geeignet haben sich die Asphalte und lösungsmittelfreie Kunstharze gezeigt. Von den letzteren befriedigten in elektrischer und mechanischer Hinsicht nur die ungesättigten Polyester- und die Epoxydharze.

Asphalte sind verhältnismässig dickflüssig, so dass bei dickeren Isolationen mehrere Imprägnierungen bei erhöhter Temperatur und unter Druck notwendig sind. Als Thermoplaste haben sie zudem eine geringe Warmfestigkeit, jedoch den Vorteil, dass die Spulen in der Wärme plastisch verformbar sind. Die Verformbarkeit wird bei Spulenwicklungen ausgenützt, da diese beim Ein- und Ausbau verformt werden müssen.

Polyester- und Epoxydharze sind als Duroplaste in ausgehärtetem Zustand nicht mehr plastisch verformbar. Spulenwicklungen werden daher erst nach dem Einbau in den Stator vollständig ausgehärtet. Die Polyesterharze haben wesentliche Vorteile in technologischer, die Epoxydharze in mechanischer und dielektrischer Hinsicht.

5.2 Konstruktion

Konstruktive Anpassungen an vakuumimprägnierte Isolationen waren notwendig um die Fabrikation zu vereinfachen. So werden die Wickelköpfe derart gestaltet, dass die Pressformen aus geraden Teilen und Kreisbogen zusammengestellt werden können. Die Radien der Wicklungen werden so gross gewählt, dass die Bänder nicht eingeschnitten werden müssen, was besonders für maschinelles Wickeln (Umbündeln) Voraussetzung ist.

5.3 Fabrikation

Die Fabrikation umfasst folgende Arbeitsgänge: verfestigen der Kunststäbe, umbündeln, trocknen, imprägnieren, kalibrieren und aushärten der Isolation.

Roebelstäbe bestehen heute vorwiegend aus vorisolierten Flachkupferdrähten. Diese glas-lack- oder nur lack-isolierten Leiter können mittels eingelegten Klebefolien verfestigt werden. Neuerdings sind glas-lack-isolierte Drähte erhältlich, bei welchen der Lack noch nicht ausgehärtet ist und die Leiter somit unter blosser Wärmezufuhr verklebt werden können. Verfestigt wird entweder in geheizten Pressen oder in Pressformen im Umluftofen. Beim letzteren Verfahren können auch die gebogenen Teile der Wicklungsstäbe verfestigt werden, was eine grosse Formgenauigkeit bereits vor dem Aufbringen der Hauptisolation gewährleistet.

Teilleiterbündelstäbe haben meist eine Glas-Asbest-Zwischenlage als Teilleiterisolation, oder sie werden aus lack-isolierten Teilleitern zusammengestellt. Das Glas-Asbest-Papier ist mit einem nicht ausgehärteten Lack versehen, so dass die Teilleiter mit der Zwischenisolation selbst verklebt werden können. Lack-isolierte Teilleiter werden mit Lack eingestrichen und verfestigt. Teilleiterbündelstäbe werden normalerweise in für Nut und Wickelkopf durchgehenden Pressformen verfestigt.

Die Isolierbänder werden heute noch von Hand aufgewickelt. Isoliermaschinen sind in Entwicklung und für gerade Teile der Stäbe vereinzelt bereits im Betrieb. Einzelne Isolationssysteme verwenden als letzte Lage ein Glasband für den Oberflächenschutz, andere ein Putzband, welches nach dem Aushärten des Bindemittels wieder entfernt wird und runde Kanten gewährleistet.

Nach dem Umbündeln wird die Isolation wie beschrieben getrocknet und in der Form der Wicklungsstäbe angepassten Imprägnierwannen imprägniert. Die Imprägnieranlagen bestehen aus: Vakuumkessel, Abscheider und dem Pumpsatz. Dazu kommen noch Anlagen für die Harzaufbereitung und die Heizung der Autoklaven, wenn bei erhöhter Temperatur imprägniert wird.

Die imprägnierten Stäbe werden entweder sofort (wenn bei erhöhter Temperatur imprägniert wird) oder nach einer beliebigen Zeit in Pressformen auf Sollmass kalibriert. Isolationen mit wärmehärtenden Bindemitteln werden nach dem Kalibrieren in einem Umluftofen ausgehärtet.

6. Anwendungsbeispiele von vakuumimprägnierten Isolationen

Vakuumimprägnierte Isolationen kommen, wie bereits erwähnt, hauptsächlich bei Statorwicklungen elektrischer Generatoren zur Anwendung. Weitere äusserst wichtige Anwendungsgebiete sind Polspulen von Traktionsmotoren und Spulen grosser Elektromagnete, welche im folgenden noch kurz erwähnt werden.

6.1 Statorwicklungen elektrischer Maschinen

Mit Asphalt imprägnierte Mica-Papierbänder (Glimmerschuppen) ergeben billige und für Maschinen mit relativ tiefen Betriebstemperaturen alle Anforderungen erfüllende Isolationen. Da sie sich unter Wärme plastisch verformen lassen, sind sie besonders für Spulenwicklungen geeignet.

Kunstharzimprägnierte Bänder ergeben Isolationen von bisher unerreichter thermomechanischer Festigkeit. Die Klebkraft der verwendeten Kunstharze ist so gross, dass die Isolation trotz der unterschiedlichen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten nicht vom Kupfer abreisst. Die Dauerwärmebeständigkeit ist bei den bekannten Anwendungen je nach Imprägnierharz 130...160 °C und kann noch gesteigert werden. Bei Verwendung von Micavlies-Glasseidenbändern entsteht eine Isolation von ausgezeichneter Wärmeleitfähigkeit und hoher mechanischer Festigkeit.

Einige von kunstharzimprägnierten Isolationen erreichte Eigenschaften seien an Hand von Qualitätskriterien mit älteren Isolationssystemen verglichen:

Die Durchschlagsfestigkeit konnte gegenüber den nicht vakuumimprägnierten Isolationen erhöht werden. Wärmedurchschläge treten nicht mehr auf (Fig. 1).

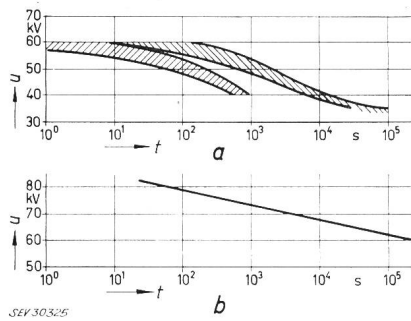


Fig. 1

Durchschlagsverhalten von Schellackmicafolium und kunstharzimprägnierten Micavlies-Glasseidenbändern

gemessen an Wicklungsstäben mit 3 mm dicker Isolation

a Haltezeiten t für 3 mm dicke Schellackmicafolium-Isolationen

b Haltezeiten t für 3 mm dicke kunstharzimprägnierte Micavlies-Glasseidenband-Isolationen

u Durchschlagsspannung;

- Messung an eingespannten Stäben;
- Messung an nicht eingespannten Stäben

Die dielektrischen Verlustwinkel vergrößern sich nur unwesentlich mit der Spannung. Im Betrieb ändern sie sich nicht, da die Isolation sich nicht vom Kupfer löst und auch nicht in sich auflößert (Fig. 2).

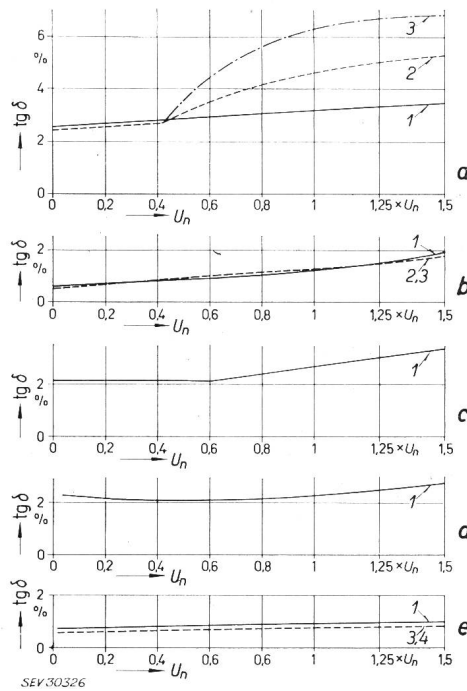


Fig. 2

Spannungsabhängigkeit des dielektrischen Verlustfaktors $tg \delta$ verschiedener Isolationen

U_n Nennspannung

a Schellack-Micafolium; b Epoxy-Samicafolium; c mit Polyester vorimprägniertes Samicaband; d asphaltimprägnierte Micabänder; e epoxyimprägnierte Samicabänder

1 Neuzustand; 2 1 Zyklus bis 120 °C; 3 100 Zyklen bis 120 °C; 4 1 Zyklus bis 150 °C

Die Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Verluste ist klein, so dass die zusätzliche Erwärmung im Betrieb nicht ins Gewicht fällt und keine Gefahr für Wärmedurchschläge besteht (Fig. 3).

Die Feuchtigkeitsaufnahme ist sehr gering. Dieses Verhalten hat den Vorteil, dass die sich sonst über mehrere Tage erstreckende Wicklungstrocknung bei Inbetriebnahme oder langem Stillstand von Genera-

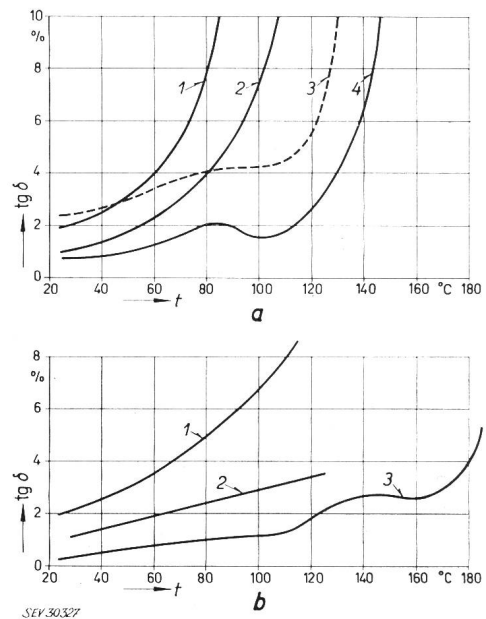


Fig. 3

Temperaturabhängigkeit t des dielektrischen Verlustfaktors $tg \delta$ verschiedener Isolationen

a Folien-Isolationen

1 Schellack-Micafolium; 2 Asphalt-Micafolium; 3 Epoxy-Micafolium (AEG); 4 Epoxy-Samicafolium (MFO)

b Band-Isolationen

1 asphaltimprägnierte Micabänder; 2 polyesterimprägnierte Micabänder; 3 epoxyimprägnierte Samicabänder

toren nicht mehr erforderlich ist. Das günstigste Verhalten einer solchen Isolation unter tropischen Klimabedingungen liegt auf der Hand (Fig. 4).

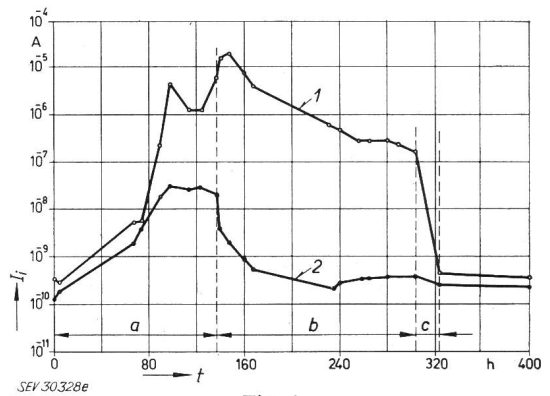


Fig. 4

Isolationsstrom I_i (1-min-Wert) von isolierten Spulen bei Wasserlagerung und Trocknung

t Zeit

1 Schellackmicafolium-Isolierung; 2 Kunstharz-Glimmerband-Isolierung

a Wasserlagerung; b Trocknung 20...25 °C; c Trocknung 100 °C

6.2 Polspulen von Traktionsmotoren

Bei den Polspulen für Traktionsmotoren werden vor allem gute Wärmebeständigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit verlangt. Keine Isolationstechnik kann diese Anforderungen in einem solchen Masse erfüllen wie die Vakuumimprägniertechnik. Die Wärmeleitfähigkeit ist ganz besonders zu erwähnen, da

sie gegenüber den lufthaltigen Lackbandisolationen 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 umbündelt und erst dann zu Spulen ge-

wickelt. Die Fertigisolation 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] *Decadaveine, P.-A.*: Procédé moderne d'isolation des bobines 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 Isoliereigenschaften 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 Barrierenisolationen bei Transformatoren oder Trocknung des Isolieröles 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 Hochspannungswandlern 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 ergaben bei der Seriefabrikation 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.

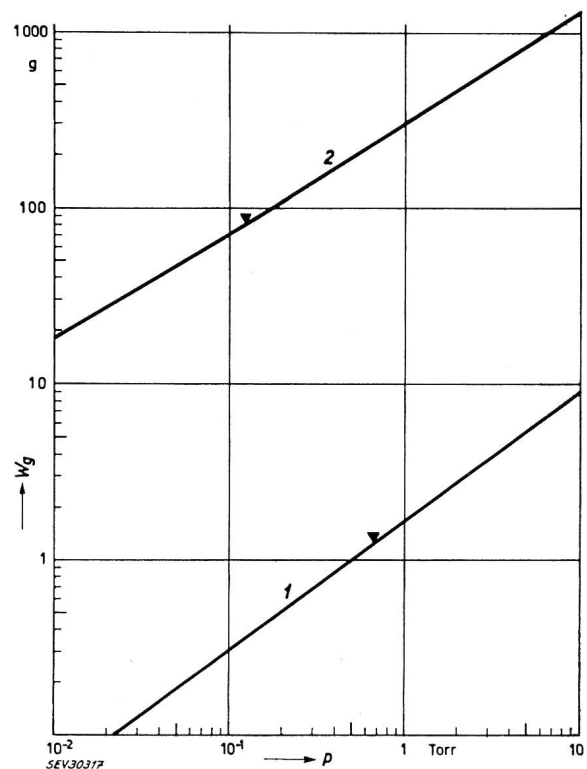


Fig. 1
Wassergehalt W_g von Papier und Öl eines 300-kV-Stromwandlers in Funktion des Dampfdruckes p
Temperaturen: von Papier 80°C , von Öl 30°C ;
1 250 kg Öl; 2 100 kg Kabelpapier

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