Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 20

Artikel: Neue Isoliermaterialien mit Glimmerpapier zur Spulen- und Stabisolation von elektrischen Maschinen

Autor: Rembold, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916780

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: 10.07.2025

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

[16] *R. Boll:* Elektronik *10* (1961), S. 293.
[17] *R. Brenner, F. Pfeifer:* Frequenz *14* (1960), S. 167.
[18] *R. Brenner, F. Pfeifer:* Frequenz *15* (1961), S. 87.
[19] *R. Brenner, D. Ganz:* ETZ A *82* (1961), S. 148.
[20] *R. Deller:* Z. angew. Phys. *13* (1961), S. 181.
[21] *J. J. de Jong, M. G. Smeets, H. B. Haanstra:* J. Appl. Phys. *29* (1958), S. 297.
[22] *R. Becker, W. Döring:* Ferromagnetismus, Springer, Berlin 1939.
[23] *R. M. Bozorth:* Ferromagnetism, D. van Nostrand, Toronto—New York—London 1951.
[24] *E. Kneller:* Ferromagnetismus, Springer, Berlin—Göttingen—Heidelberg 1962.
[25] *F. Th. Beckers:* Philips Techn. Rdsch. *22* (1960/61), S. 252.
[26] *H. Voigt:* Feinwerktechnik *55* (1951), S. 208.

Adresse des Autors:

Dr. A. Mager, Vacuumschmelze AG, Grüner Weg 37, D-6450 Hanau.

Neue Isoliermaterialien mit Glimmerpapier zur Spulen- und Stabisolation von elektrischen Maschinen

Von *H. Rembold,* Zürich

621.315.613.1

1. Allgemeines

Seit dem zweiten Weltkrieg hat der Einsatz von Glimmerpapieren statt Glimmersplittings in der Elektroindustrie immer grösseren Umfang angenommen. Die am meisten bekannt gewordenen Glimmerpapiertypen heissen Samica bzw. Isomica, Micamat, Dehydrated Mica und Romica bzw. Cogémica, Integrated Mica.

Im Herstellungsverfahren unterscheiden sich die beiden Papiere grundsätzlich voneinander. Als Ausgangsprodukt für die Herstellung von Samica werden ausschliesslich Grubenabfälle von Muskovitglimmer verwendet. Diese werden einer Hitzebehandlung von 800 °C unterzogen, wodurch unter teilweiser Aufspaltung der Schichten etwa die Hälfte des Kristallwassers abgespalten wird [1] [1]). Anschliessend wird dann in einer Sodalösung abgeschreckt und mit Schwefelsäure behandelt. Die dabei stattfindende Kohlensäuregasentwicklung spaltet den Glimmer völlig auf und zerkleinert ihn weiter. Es entsteht eine Pulpe, die getrocknet und auf einer Papiermaschine zu einem feinen Glimmervlies verarbeitet wird. Das Vlies enthält nur noch sehr kleine Glimmerteilchen von durchschnittlich ca. 0,1 mm Durchmesser.

Cogémica, ein Produkt der Fa. Cogébi in Lot (Belgien), entsteht dagegen nach einem einfacheren Verfahren. Die Aufspaltung der Splittings geschieht mechanisch durch einen starken Wasserstrahl, wobei Phlogopit oder Muskovit verwendet werden kann. Die entstandenen Spaltstückchen werden dann in einem Bad sedimentiert und anschliessend auf einem fortlaufenden Gitter gesammelt, zu einem Vlies vereinigt und getrocknet. Das entstandene Vlies ist lockerer als Samica und enthält kleine Splittings von einem durchschnittlichen Durchmesser von ca. 0,15...0,2 mm. Durch die rein mechanische Spaltweise ist die Kristallstruktur der Teilchen erhalten geblieben. Das reine, bindemittelfreie Vlies besitzt einen genügenden Zusammenhalt, welcher wahrscheinlich auf elektrostatische Kräfte zurückzuführen ist. Doch ist diese Frage bis heute noch nicht einwandfrei abgeklärt. Romica ist ein Produkt, das mit Cogémica identisch ist.

Während Samica in Form flexibler Folien und Bänder für die Isolierung von Generatoren und Motoren aller Spannungen bereits grosse Anwendung gefunden hat [2; 3; 4], beschränkte sich die Verwendung von Romica, mit wenigen Ausnahmen auf die Herstellung von Micaniten und saugfähigen Bändern zur Herstellung von Magnetspulenisolationen nach dem Vakuumimprägnierverfahren. Über diese Materialien wurde schon früher berichtet [5]. Inzwischen jedoch sind eine Reihe neuer Isolierbänder und Folien entwickelt worden, deren Aufbau und Eigenschaften im folgenden beschrieben sind.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Imprägnierbare Romicabänder für die Isolation von Hochspannungsmaschinen

Schon vor wenigen Jahren wurden Versuche unternommen, mit einem Träger, wie Glasgewebe oder Polyesterweb, verklebte Romicabänder mit nachfolgender Imprägnierung zur Isolation von Generatorstäben heranzuziehen. Anfängliche Misserfolge jedoch, die auf die ungenügende Alterungsbeständigkeit einer solchen Isolation bei 160 °C zurückzuführen waren, liessen vermuten, dass in einer festen Isolation mit thermohärtenden Harzen die im Romica enthaltenen, natürlichen Glimmersplittings sich allmählich spalten und so ein «Aufgehen» der Isolation bewirken. Die Anwendbarkeit des Romicapapiers für die Generatorisolationen, die ein stabiles Verhalten des tg δ auf lange Zeit verlangen, wurde daher generell bezweifelt.

Neue Versuchsresultate haben jedoch gezeigt, dass sich gerade mit imprägnierbaren Bändern aus Romica eine Isolation aufbauen lässt, die den an eine Generatorisolation gestellten Anforderungen genügt. Dabei ist allerdings zu bemerken, dass nicht nur der Qualität des Glimmerpapiers, sondern auch dem Aufbau des Bandes, dem Imprägnierharz, dem Imprägniervorgang, der Fertigung der Wicklung, sowie dem qualitativen und quantitativen Aufbau der fertigen Isolation aus den einzelnen Komponenten grösste Bedeutung zukommt.

Zur mechanischen Verfestigung des trockenen Romicapapiers wird ein flexibler Träger benützt. Am besten eignet sich ein Glasgewebe oder Polyesterweb (Polyaethylenglycolterephtalat), während reine Kunststoffolien als Träger weniger geeignet sind. Bei Alterungsprüfungen, die bei Temperaturen durchgeführt werden, die über 130 °C liegen, sollte nur ein Band mit Glasgewebe verwendet werden. Zur Verklebung des Trägers mit dem Romicavlies wird ein Bindemittel verwendet, welches bei Zimmertemperatur fest und bei höheren Temperaturen plastisch bis leicht zähflüssig ist. Ausserdem wird der Binder von den geläufigen Imprägnierharzen angelöst, was den Imprägniervorgang erleichtert, jedoch nicht unbedingt notwendig ist.

Die Wahl des geeigneten Imprägnierharzes ist einer der wichtigsten Faktoren. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass sich anhydridgehärtete Epoxyharze bei der

33'258-268

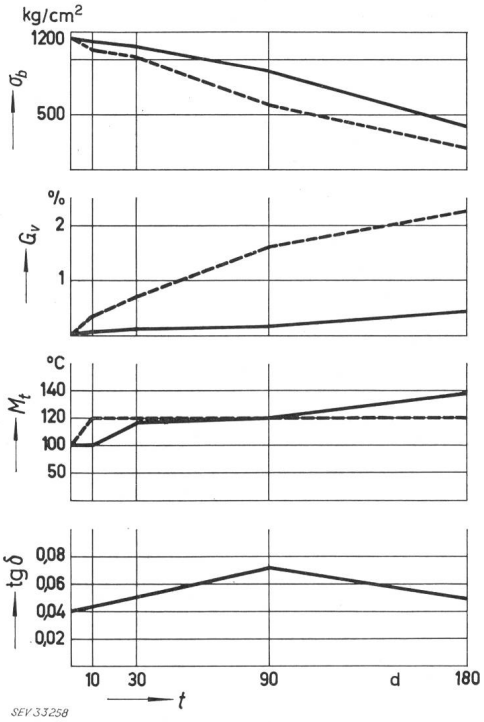

Fig. 1

Alterungseigenschaften des gehärteten, für die Imprägnierung von Romica-Isolationen verwendeten Epoxyharzes

σ_b Biegefestigkeit; G_v Gewichtsverlust; M_t Formbeständigkeit (Martens); tg δ Verlustfaktor; t Zeit

——— Verlauf der Eigenschaft bei 160 °C

- - - - Verlauf der Eigenschaft bei 180 °C

thermischen Alterung am besten verhalten und sich daher auch für die Generatorisolation am besten eignen [6]. Manche Firmen benützen auch Gemische von Epoxy- und Polyesterharzen, deren Viskosität durch Styrolzusatz besonders niedrig gehalten werden kann, so dass eine Raumtemperaturimprägnierung möglich ist. Ein Zusatz von Styrol kann sich jedoch u. U. im Sinne einer erhöhten Versprödung bei der Alterung des Harzes auswirken, doch spielt auch der Typ des verwendeten ungesättigten Polyesterharzes immer eine wichtige Rolle. Allgemein lässt sich jedoch sagen, dass ein erhöhter Zusatz von Styrol eine Verminderung der mechanischen Eigenschaften bewirkt. Die im folgenden beschriebenen Versuchsergebnisse wurden mit einem Epoxyharz des Typs Bisphenol A/Epichlorhydrin unter Zusatz eines reaktiven Verdünners und eines Gemisches von verschiedenen Anhydriden erhalten. Die wichtigsten Alterungseigenschaften dieses Harzes sind aus Fig. 1 ersichtlich.

Die Herstellung der fertigen Isolation geschieht nun im allgemeinen folgendermassen: Nach dem Bewickeln der Stäbe muss vor dem Einziehen des Imprägnierharzes eine gute Trocknung derselben vorgenommen werden. Dies geschieht bei einer Temperatur von ca. 110 °C und wenn möglich unter Vakuum von ca. 1...2 Torr während 2 h. Bei der Fabrikation von langen Stäben kann ein Trocknen unter Vakuum meistens nicht erfolgen. Man erhöht in solchen Fällen die Trocknungszeit auf etwa das zehnfache. Anschliessend wird die Imprägnierung unter Vakuum, meist bei etwas erhöhter Temperatur oder wenn die Viskosität des Imprägnierharzes und die Saugfähigkeit der Isolation es zulassen, bei Raumtemperatur vorgenommen. Durch die besonders lockere, poröse Beschaffenheit des Romicapapiers wird der Imprägniervorgang sehr erleichtert. Es ist jedoch stets von besonderem Vorteil, wenn die zu imprägnierenden Spulen oder Stäbe beim Imprägnieren noch warm sind, da dadurch das Eindringen des Harzes sehr erleichtert wird. Nach dem Imprägnieren mit dem vorevakuierten Harz kann schon nach kürzerer Zeit ein normaler oder ein leicht erhöhter Druck auf die Stäbe einwirken. Schliesslich wird 4 h lang bei einer Temperatur von 150 °C gepresst. Die Presstemperatur und die Zeit hängen natürlich jeweils vom verwendeten Imprägnierharz ab.

Eine derart erhaltene Isolation ergibt im ungealterten Zustand zufriedenstellende elektrische und mechanische Eigenschaften. Will man jedoch, dass auch bei der Temperaturalterung keine gefährlichen Veränderungen dieser Eigenschaften eintreten, dann muss neben den guten Alterungseigenschaften des Imprägnierharzes auch auf den chemischen Aufbau des Bindemittels, sowie auf das quantitative Verhältnis der einzelnen Komponenten (Glimmer, Glas und Harz) geachtet werden. Für Grossmaschinen der Wärmeklasse B werden an die Isolation folgende Ansprüche gestellt:

Bei einer Alterung von 160 °C sollte nach 6 Monaten der maximale Verlustfaktoranstieg $(\Delta \text{ tg } \delta / \Delta U)_{max.}$, gemessen an einer Isolationsdicke von 3 mm, unter 2 ‰/kV liegen. Die elektrische Durchschlagfestigkeit nach der Alterung sollte noch zwischen 25 und 30 kV/mm betragen.

Für diese Anforderungen kommt als Trägermaterial lediglich Glasgewebe in Frage, wobei das Problem der Schlichte (Klebstoff) noch besonders wichtig ist. Die verschiedenen wichtigen Kriterien seien kurz besprochen.

2.1 Einfluss der Schlichte

Zur Verbesserung der Feuchtigkeitsbeständigkeit von Laminaten wurden in der letzten Zeit umfangreiche Arbeiten über den Einfluss diverser Schlichten auf die Alterungseigenschaften veröffentlicht. Obwohl sich einzelne Autoren in Detailfragen widersprechen, scheint doch eindeutig festzustehen, dass der chemischen Bindung zwischen Harz und «coupling agent» einerseits und zwischen diesem und der Glasoberfläche anderseits entscheidende Bedeutung zukommt. So erhält man bei Epoxyimprägnierharzen offensichtlich gute Werte mit Amino- bzw. Epoxygruppenhaltigen Silanestern [7; 8]. Die bei den Nassfestigkeitsuntersuchungen an glimmerfreien Laminaten erhaltenen Erkenntnisse lassen sich nutzbringend bei der Verbesserung der thermischen Alterungsbeständigkeit glimmerhaltiger Isolationen verwerten. Soweit die Untersuchungen heute gediehen sind, scheint es auch hier vorteilhaft zu sein, im Zusammenhang mit Epoxyimprägnierharzen lediglich aminogruppenhaltige Silanschlichten oder hitzegereinigte Glasgewebe zu verwenden. Wird Glasgewebe mit Öldextrinschlichte verwendet, so sollte das Gewebe keinesfalls über 2 % Schlichtegehalt aufweisen, da es sich erwies, dass bei einer thermischen Langzeitbeanspruchung der Isolation bei Temperaturen über 120 °C sich durch langsame Zersetzung der Schlichte ein allmähliches Nachlassen der Haftung und somit ein Aufgehen der Isolation ergeben kann. Eingehende Untersuchungen auf diesem Gebiete sind noch im Gange.

2.2 Einfluss des Bindemittels

Ähnliche Schwierigkeiten können auch auftreten, wenn zur Verklebung des Glasgewebes mit Romica nicht das ge-

eignete Bindematerial verwendet wird. Die Bedeutung des Binders zum Aufbau einer alterungsbeständigen Isolation wurde schon vor längerer Zeit erkannt und in der Literatur [9] auf die Notwendigkeit hingewiesen, dass der Binder im Sinne einer leichten Mischbarkeit mit dem Imprägnierharz flüssig bis zähflüssig sein und sich mit diesem «vertragen» muss. In umfangreichen Untersuchungen konnte der Autor jedoch feststellen, dass weniger die allgemeine Mischbarkeit und Verträglichkeit des Binders mit dem Imprägnierharz, als die Möglichkeit einer chemischen Vernetzung der beiden Komponenten das ausschlaggebende Kriterium ist. Mit absolut festen Bindemitteln konnten bereits zufriedenstellende Resultate erzielt werden. Fig. 2 zeigt das Alterungsverhalten von Isolationen, die mit Romicaglasseide und dem erwähnten Epoxyimprägnierharz aufgebaut wurden, wobei zum Verkleben des Romicavlieses mit dem Glasgewebe diverse Bindemittel verwendet wurden. Alle drei verwendeten Binder sind fest und werden bei Temperaturen von über 100 °C vom Imprägnierharz allmählich gelöst; die Möglichkeit einer Vernetzung mit diesem war jedoch verschieden gut.

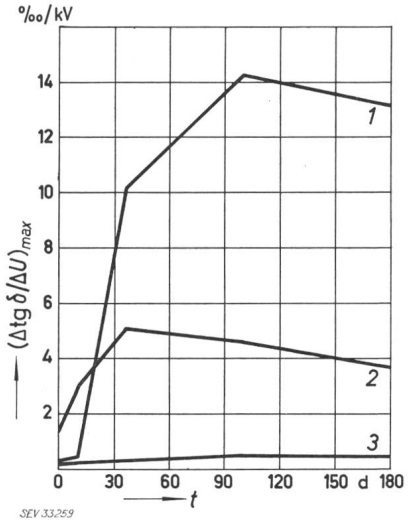

Fig. 2

Dielektrische Eigenschaften von vakuumimprägnierten Romica-Isolationen bei der Alterung von 160 °C

(Gemessen an Versuchsstäben mit einer Isolationsdicke von 3 mm)
Die zur Verklebung von Glasseide und Romica verwendeten Binder waren mit dem verwendeten Epoxyimprägnierharz verschieden stark vernetzbar

1 thermoplastischer Binder (keine Vernetzung); *2* hochwärmebeständiger, duroplastischer Binder (schwache Vernetzung); *3* duroplastischer Binder (starke Vernetzung); $(\Delta tg\,\delta / \Delta U)_{max}$ maximaler Verlustfaktoranstieg; *t* Zeit

2.3 Einfluss des Harzgehaltes

Ebenso wichtig, wie die Beschaffenheit des Binders, der Schlichte und des Imprägnierharzes, ist auch der Gehalt an Imprägnierharz und Binder in der fertig gehärteten Isolation. Einmal können sich bei zu hohem Harzgehalt an einzelnen Stellen der Isolation Harznester bilden, die erfahrungsgemäss leicht ein Aufgehen bei der thermischen Beanspruchung bewirken. Ausserdem spielt bei der Herstellung langer Stäbe und Spulen die Wärmeausdehnung der Isolation eine grosse Rolle. Ist der thermische Ausdehnungskoeffizient zwischen Kupfer und Isolation zu verschieden, dann sind Spannungen, Risse und eine Ablösung der Isolation vom Kupfer beim Wärmespiel zu befürchten. Wie Fig. 3 zeigt, ist jedoch der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α der fertig gepressten Isolation linear abhängig vom Gesamtharzgehalt (Imprägnierharz + Binder).

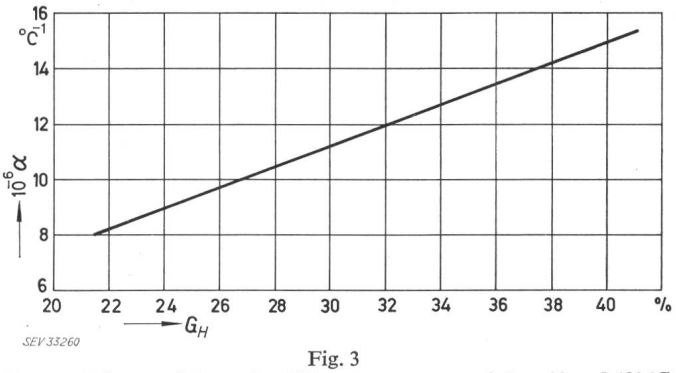

Fig. 3

Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α, gemessen zwischen 20 und 120 °C, in Funktion des Harzgehaltes G_H

Isolation aus Romicaglasseide, imprägniert mit einem dünnflüssigen Epoxyharz und 4 h bei 150 °C gepresst

Die besten Alterungsresultate erhielt man mit Versuchsstäben, deren Gesamt-Harzgehalt zwischen 27 und 40 % schwankte. Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α gemessen zwischen 20 und 120 °C schwankt dann zwischen

Eigenschaften und Aufbau einer Isolation aus Romicaglasseide imprägniert mit einem flüssigen Epoxyharz

Tabelle I

Aufbau		
Harzgehalt	%	35
Glimmergehalt	%	50
Glasgehalt	%	15
Isolationsdicke	mm	3
Presstemperatur	°C	150
Pressdauer	h	4
Eigenschaften		
Durchschlagfestigkeit [1])	kV/mm	30
Dielektrischer Verlustfaktor [1]) tg δ (10...60 kV/cm)	%	0,4...0,5
Max. Verlustfaktoranstieg [1]) $(\Delta tg\,\delta/\Delta U)_{max.}$	‰/kV	< 2 (≈0,3...0,5)
Biegefestigkeit [1]) nach DIN 53452	kg/cm²	2000
Schlagbiegefestigkeit [1])	cmkg/cm²	15,4
Wärmeleitzahl	W/m °C	0,3
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α gemessen zwischen 20 und 120 °C	$°C^{-1}$	$\approx 12 \cdot 10^{-6}$

[1]) Gemessen bei 20 °C nach einer Alterung von 180 Tagen bei 160 °C. Die thermischen und mechanischen Eigenschaften wurden an Versuchsplättchen bestimmt.

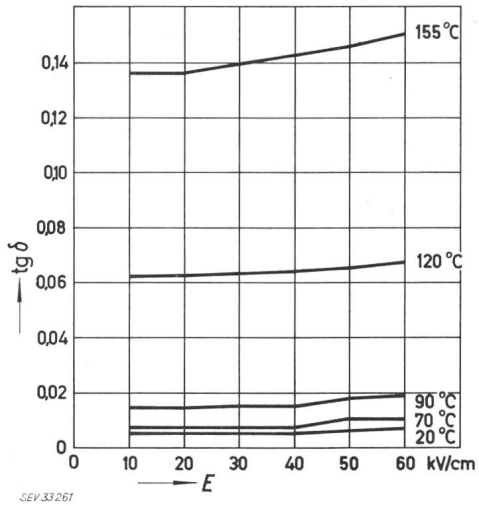

Fig. 4

Dielektrischer Verlustfaktor tg δ in Funktion der Temperatur und der Feldstärke E

(gemessen an isoliertem Versuchsstab von 10 × 30 × 500 mm bei einer Isolationsdicke von 3 mm)
Isolation aus Romicaglasseide, vakuumimprägniert mit einem dünnflüssigen Epoxyharz und 4 h bei 150 °C gepresst

$10{,}7 \cdot 10^{-6} ... 14{,}6 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Für Elektrolytkupfer als Leitermetall kann ein Vergleichswert von $16{,}0 \cdot 10^{-6} ... 17{,}5 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} angenommen werden.

Zusammenfassend sind Aufbau und Eigenschaften der besprochenen Isolation in Tabelle I wiedergegeben. Fig. 4 zeigt den Verlauf der dielektrischen Verluste in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feldstärke.

3. Vorimprägnierte, härtbare Bänder

Schon seit einigen Jahren sind mit Kunstharz vorimprägnierte, mit einem Träger verstärkte Glimmerpapierbänder im Handel. Sie wurden mit verschiedenem Erfolg für die Isolierung von Spulenwicklungen benützt. Die verwendeten Kunstharze sind meist Polyester-, Epoxy- oder Silikonharze im ungehärteten oder vorpolymerisierten Zustand. Nach dem Bewickeln der zu isolierenden Leiter wird die Aushärtung in einer Wärmepresse vorgenommen. Die Herstellung solcher vorimprägnierten Bänder erfolgt meist durch Imprägnierung in der entsprechenden Harzlösung mit anschliessendem Verdampfen des Lösungsmittels, welches jedoch stets noch in Spuren auf der mit Harz beschichteten

Durchschlagfestigkeit der Romicafilisolation

Tabelle II

Versuchsobjekt	Isolationsdicke mm	Bänder mit Polyestervlies verstärkt		Bänder mit Glasgewebe verstärkt	
		Durchschlagspannung[2]) kV	Durchschlagfestigkeit kV/mm	Durchschlagspannung[2]) kV	Durchschlagfestigkeit kV/mm
Versuchsstäbe	0,6	20,3	34	12,8	23
Versuchsstäbe	1,0	25,8	26	22,2	22
Erregerspulen für Gleichstrommotoren	1,0			21,3	21
Mehrleiterspulen	1,6	42,2	26		
Versuchsstäbe [1])	3,0			70	23
Röbelstäbe	3,0			92	31

[1]) Die Messungen wurden nach Alterung von 180 Tagen bei 160 °C durchgeführt.
[2]) Durchschnittswerte.

Folie verbleibt. Dies macht sich später in den oft zu hohen dielektrischen Verlusten, sowie bei thermischer Wechselbeanspruchung einer mangelnden Beständigkeit der Isolation nachteilig bemerkbar. Aus diesen Gründen hat sich der Versuch, die Bänder im Vakuum mit einem dünnflüssigen, thermohärtenden Harz zu imprägnieren, aufgedrängt. Dieses Verfahren ermöglicht es, schon bei der Herstellung jedes Lösungsmittel auszuschalten und ergibt nach der Vakuumimprägnation völlig luftfreie Folien und Bänder. Mit diesen wird dann wie üblich der zu isolierende Leiter umwickelt

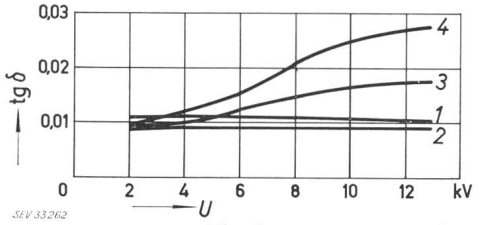

Fig. 5
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ in Funktion der Spannung U bei der Alterung von 160 °C
(Gemessen bei 20 °C und 50 Hz)
Isolation aus Romicafil mit Glasgewebe verstärkt. Versuchsstäbe 15 × 30 × 300 mm, Isolationsdicke 3 mm

1 Anlieferungszustand $(\Delta \text{tg}\, \delta / \Delta U)_{max} < 0{,}1$ ‰/kV
2 45 Tage bei 160 °C $(\Delta \text{tg}\, \delta / \Delta U)_{max} < 0{,}1$ ‰/kV
3 75 Tage bei 160 °C $(\Delta \text{tg}\, \delta / \Delta U)_{max} = 1{,}2$ ‰/kV
4 120 Tage bei 160 °C $(\Delta \text{tg}\, \delta / \Delta U)_{max} = 2{,}8$ ‰/kV

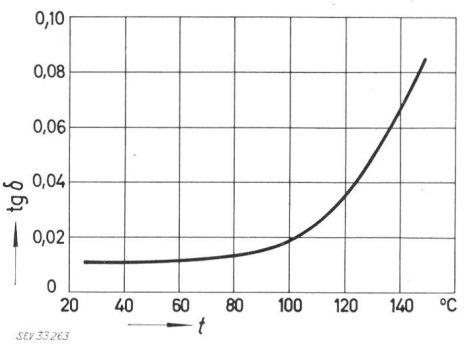

Fig. 6
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ in Funktion der Temperatur t (bei 50 Hz)
Romicafil mit Glasgewebe verstärkt. Isolationsdicke 2 mm, Versuchsstab 15 × 30 × 300 mm

und die entstandene Isolation in der Wärme, meist in einer Presse, ausgehärtet. Es hat sich gezeigt, dass mit diesem Verfahren [11] hergestellte Isolationen in ihren Eigenschaften am ehesten denen einer vakuumimprägnierten Isolation nahekommen.

Fig. 5 zeigt den Verlauf des dielektrischen Verlustfaktors in Funktion der Spannung nach verschiedenen Zeitabschnitten bei einer Alterung von 160 °C; Fig. 6 gibt die Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Temperatur. Selbst bei einer Alterung von 160 °C bleibt der maximale Anstieg des Verlustfaktors pro 1 kV Spannungsänderung längere Zeit unter 1 ‰. In der Tabelle II sind die an verschiedenen Versuchsobjekten gemessenen Durchschlagspannungen aufgetragen. Bei guter Verarbeitung kann mit einer Durchschlagfestigkeit von 22...25 kV/mm gerechnet werden.

Auf Grund der einfachen Verarbeitung und den ausserordentlich guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Isolation hat das Romicafilverfahren grosses Interesse gefunden. Zu den vorzüglichen elektrischen Eigenschaften gesellen sich weitere Vorteile, wie gute Wärmeleitfähigkeit und Beständigkeit gegen Kriechstrom, Feuchtigkeit und thermische Wechselbeanspruchung. Im Motoren-, besonders Traktionsmotorenbau (Fig. 7) ergeben sich dadurch

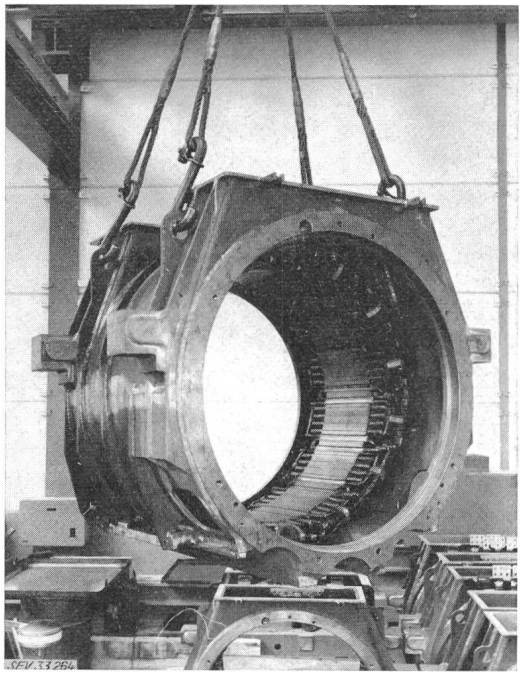

Fig. 7
Stator eines SBB-Bahnmotors
für 745 kW Dauerlauf und 835 kW Stundenlauf, 420 V, 16²/₃ Hz

erhebliche Vorteile. So konnten durch den Einsatz der Romicafilisolation die Leistungen von Motoren bis zu 20 % erhöht werden. Die Stabilität gegen thermische Wechselbeanspruchung zwischen 20 und 120 °C erwies sich auf Grund von durchgeführten Erwärmungszyklen an Rotor- und Polspulen kombiniert mit mechanischer und elektrischer Beanspruchung. Auch bei längerer Lagerung in gesättigter Kochsalzlösung haben sich an der Isolation keine negativen Veränderungen gezeigt.

Nach den bis jetzt gemachten mehrjährigen Erfahrungen in der Praxis kann gesagt werden, dass das Romicafilverfahren für Nieder- und Mittelspannungsmaschinen bis 6 kV Betriebsspannung, besonders für Traktionsmotoren, eine ideale Isolationsmöglichkeit darstellt. Ohne Vakuumimprägnieranlage lässt sich eine kompakte weitgehend luftfreie Isolation herstellen.

In Tabelle III sind die Eigenschaften einer mit Romicafil aufgebauten Isolation dargestellt.

Eigenschaften und Aufbau einer Isolation aus Romicafil [1])

Tabelle III

Aufbau		
Harzgehalt	%	30...35
Glimmergehalt	%	50...55
Glasgehalt	%	≈ 15
Isolationsdicke	mm	1,5
Presstemperatur	°C	135...150°
Pressdauer	h	1,5...3
Eigenschaften		
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	25
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ (10...60 kV/cm)		
bei 20 °C	%	1,1...1,4
bei 100 °C	%	4,0...4,6
Max. Verlustfaktoranstieg (Δ tg $\delta/\Delta U)_{max.}$	‰/kV	< 2
Wärmeleitzahl	W/m °C	≈ 0,26

[1]) Mit Glasgewebe verstärkte Bänder.

4. Eine elastische Isolation für hohe thermische Beanspruchung

Zur Isolation von rotierenden elektrischen Maschinen haben Silikonelastomerbänder vor allem für Spezialfälle eine sehr nutzbringende Verwendung gefunden, so bei Motoren in hohen Umgebungstemperaturen, zur erhöhten Sicherheit gegen plötzliche Überlastungen, zum Schutz vor Feuchtigkeit und korrodierenden Chemikalien, sowie bei Sonderkonstruktionen, wo die Leistung raumsparend untergebracht werden musste. Die Verwendung im Traktionsmotorengebiet hat ebenfalls einen gewissen Umfang angenommen, während ursprünglich unternommene Entwicklungen auf dem Sektor des Grossmaschinenbaus [11] heute in der Praxis keine grosse Bedeutung mehr haben.

Als trägerlose Bänder sind extrudierte Profilbänder aus gefülltem Silikonkautschuk bekannt geworden. Ebenso werden mit Glasgewebe verstärkte Gummibänder verwendet. Bei diesen ist der verwendete Silikonkautschuk ausvulkanisiert und an der Oberfläche mit seiner selbstklebenden vulkanisierbaren Schicht versehen, oder aber der Kautschuk befindet sich im halbvulkanisierten Zustand. Der Aufbau einer guten, hohlraumfreien Leiterisolation mit solchen Bändern muss jedoch nach ganz anderen Gesichtspunkten erfolgen als bei der Verwendung von thermohärtenden Harzen. Diese lassen sich beim Verpressen vor der Härtung nochmals in einen schmelzbaren Zustand überführen und fliessen in

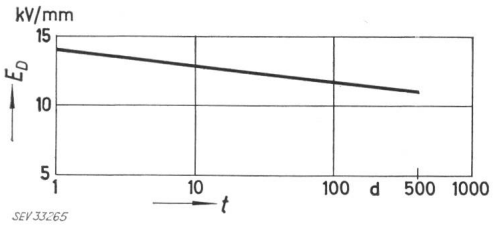

Fig. 8

Abfall der Durchschlagfestigkeit E_D bei Temperaturalterung von 240 °C

Isolation aus Romica-Silast; Dicke 1 mm
t Zeit

die kleinen Hohlräume, die beim Umwickeln mit Bändern oder Folien verblieben sind, wodurch luftfreie und kompakte Isolationsschichten entstehen. Bei den Kautschukbändern tritt in der Wärme kein Schmelzen mehr ein. Lediglich in den Zwischenschichten findet eine Verschweissung statt, wodurch aus den einzelnen Wickellagen eine homogene Schicht entsteht. Dies bringt den Nachteil mit sich, dass überall dort, wo noch Hohlräume im Wickel verblieben sind, diese beim Vulkanisieren in der Isolation verbleiben.

Diese Hohlräume können dadurch vermieden werden, dass man den Bändern, die naturgemäss eine bestimmte Dicke aufweisen, einen ganz bestimmten, z. B. dreieckigen Querschnitt verleiht, oder aber, dass man den Wickel mit einem dünnflüssigen Silikonharz nachträglich imprägniert. Auf diese Weise lassen sich Isolationen mit verhältnismässig niederen dielektrischen Verlusten aufbauen. Nachteilig ist jedoch die immer wiederkehrende Beobachtung, dass sich bei solchen Isolationen in den Durchschlagwerten abnorm hohe Streuungen zeigen. So beobachtete man z. B. oft, dass bei der Prüfung an bereits montierten Spulen Durchschläge bei derart niederen Spannungen erfolgten, wie sie aus vorangegangenen Versuchen an Spulen oder Stäben nicht zu erwarten waren. Trotz besonderer Vorsicht, ist eine Elastomerisolation der beschriebenen Art auf Grund ihrer mechanischen Verletzlichkeit den bei einer Fabrikation üblichen Bedingungen im allgemeinen nicht gewachsen. Manchmal zeigt sich auch, dass bei unverstärkten Bändern allein durch zu starkes Ziehen diese so stark vorgespannt werden, dass sie, unter dieser Vorspannung vulkanisiert, eine Isolation bilden, die bei der thermischen Beanspruchung Haarrisse ergibt oder sogar platzt.

Um diesen Nachteilen, die sicherlich manchem Leser bekannt sind, abzuhelfen war es notwendig, einen neuen Weg zu finden. So entstand Romica-Silast, ein vulkanisierbares, leicht selbstklebendes Isolierband, das sich aus einer Kombination von Romica und Silikonelastomer, verstärkt mit einem

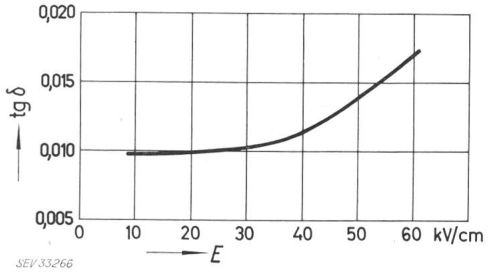

Fig. 9

Dielektrischer Verlustfaktor tg δ in Funktion der Feldstärke E (bei 20 °C, 50 Hz)

Isolation aus Romica-Silast; Versuchsstäbe 20 × 10 × 300 mm; Isolationsdicke 1 mm, aus Bändern von 0,1 × 20 mm, gestossen gewickelt und 3 h bei 180 °C gepresst

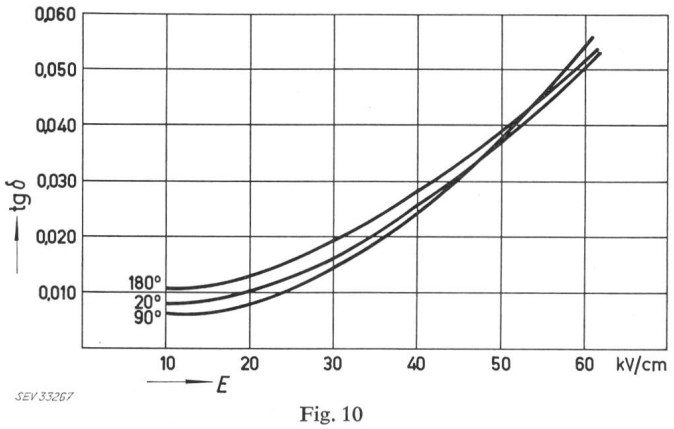

Fig. 10

Dielektrischer Verlustfaktor tg δ in Funktion der Temperatur und der Feldstärke *E* (bei 50 Hz)

Gemessen an Versuchsspulen mit Romica-Silast isoliert. Isolationsdicke 1 mm; Bänder von 0,13 × 20 mm, halb überlappt gewickelt

Glasgewebe, zusammensetzt. Der Zusatz von Glimmerpapier ergibt eine wesentliche Verbesserung der elektrischen Dauerfestigkeit sowie der mechanischen Beständigkeit der Isolation.

Die Verarbeitung dieser neuen Isolierfolie ist sehr einfach. Das leicht selbstklebende Band wird halb überlappt oder gestossen um den zu isolierenden Leiter gewickelt und bei 180 °C mit oder ohne Pression ausvulkanisiert. Wenn das Material direkt auf Kupfer gebracht werden soll, muss das Metall speziell mit einem Primer- bzw. einer Grundierpaste vorbehandelt werden, um die Klebfestigkeit auf dem Metall zu erhöhen. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der fertig ausvulkanisierten, elastisch gewordenen Isolation sind im Temperaturbereich von — 50... + 200 °C weitgehend gleichbleibend.

Während der Verlauf der Durchschlagfestigkeit bei Temperaturalterung von 240 °C einen schwachen Abfall aufweist (Fig. 8), kann bei 180 °C praktisch keine Verringerung der Durchschlagfestigkeit festgestellt werden. Je nach der Art und Fertigung der Isolation können auch ohne nachheriges Tauchen mit einem Imprägnierharz niedrige dielektrische Verluste erhalten werden. Um gute Werte zu erhalten ist es empfehlenswert, möglichst gestossen zu wickeln (Fig. 9). Bis praktisch 200 °C ist der Verlauf des Verlustfaktors unabhängig von der Temperatur (Fig. 10).

Fig. 11 zeigt die Ergebnisse eines Versuches aus der Praxis. In einem Versuchsrotor wurden Spulen isoliert mit Romica-Silast eingebaut und nach einem Versuchslauf von 560 h bei erhöhter Temperatur die Durchschlagspannung gemessen. Die Erwärmung des Rotors betrug während der ersten 300 h 160 °C (Δt_1) und während der folgenden 260 h 180 °C (Δt_2). Die Durchschlagwerte blieben nahezu konstant.

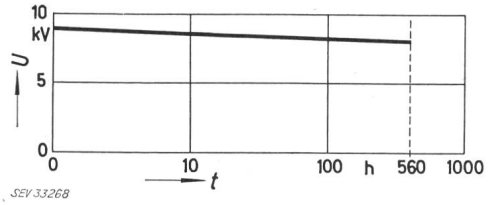

Fig. 11

Abfall der Durchschlagspannung *U* von Spulen eines Versuchsrotors beim Warmlauf

Die Erwärmung betrug während den ersten 300 h 160 °C (Δt_1), während den folgenden 260 h 180 °C (Δt_2), die erreichten Gesamttemperaturen lagen demnach bei ca. 180 und 200 °C

Isolation aus Romica-Silast, Isolationsdicke 0,85 mm

t Zeit

Eigenschaften und Aufbau einer Isolation aus Romica-Silast

Tabelle IV

Aufbau		
Glimmergehalt	%	55
Elastomergehalt	%	20...30
Glasgehalt	%	15...20
Isolationsdicke	mm	1
Presstemperatur	°C	180
Pressdauer	h	3
Eigenschaften		
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	16
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ (10...60 kV/cm), bei 20 °C		
a) gestossen gewickelt	%	1,2...2,0
b) halb überlappt gewickelt	%	2,5...4,0
max. Verlustfaktoranstieg (Δ tg $\delta/\Delta U$) *max.* gestossen gewickelt	‰/kV	5
Wärmeleitzahl	W/m °C	0,20

Tabelle IV fasst die Eigenschaften dieser Isolation zusammen. Sie hat in der Praxis, besonders auf dem Gebiet der Traktionsmotoren der Isolationsklasse H schon umfangreiche Verwendung gefunden.

5. Zusammenfassung

Bänder aus Romicavlies auf Glasgewebe kaschiert eignen sich besonders zur Umbändelung von Leitern und Spulen. Die entstandene Isolation gibt nach der Imprägnierung mit geeigneten Epoxyharzen und Pressung in der Wärme eine Isolation, deren Eigenschaften den Anforderungen für Maschinen mit hohen Spannungen entsprechen. Wenn keine Imprägnierung im Vakuum möglich ist, kann mit Romicafilbändern eine luftfreie Isolation von guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften erzielt werden. Romica-Silast verbindet viele Eigenschaften: Dauerwärmebeständigkeit bis 200 °C, bleibende Elastizität zwischen —50 und +250 °C, Beständigkeit gegen Feuchtigkeit, gute elektrische und hinreichende mechanische Eigenschaften, Stabilität der dielektrischen Verluste bis 180 °C und einfache Verarbeitung.

Literatur

[1] *Diehl E.*, Schweiz. Mineral. petrogr. Mitt. Bd. 35, 497 (1955).

[2] *Doljak B., Moravec M., Wohlfahrt O.:* «Micadur» — eine neue Isolation für Statorwicklungen elektrischer Maschinen. Brown Boveri Mitt. 47, 352 (1960).

[3] *Abegg K., Caflisch Ch., Knapp F.:* Isolationen hoher Festigkeit für Gneratoren grosser Leistungen. Bull. Oerlikon, Nr. 332, 8 (1959).

[4] *Mosimann H.:* Insulating Systems, used in Europe, based on Mica Paper and Thermosetting Resins. Insulation, September 1963, 45.

[5] *Kezdi G., Schmid R.:* Romica für Elektroisolationen. Micafil-Nachr., November 1960.

[6] *Blinne K.* u. *Möller W.:* Der Einfluss der Zusatzstoffe auf die Eigenschaften und die Alterungsbeständigkeit von Epoxyharz-Formstoffen. Kunststoffe und Plastics Heft 1, 1 (1963).

[7] *Pluddemann E. P., Clark H. A., Nelson L. E., Hoffmann K. R.:* Evaluation of new Silane Coupling Agents for Glassfiber Reinforced Plastics. 17th Annual Meeting of Reinforced Plastics Division, Chicago, February, 1962.

[8] *Young F. M., Roskos T. G.,* Radloff H. R.: Interfacial Properties of an Amine-modified Silane and its preformed Polymer at E-Glass-surfaces.
17th Annual meeting of Reinforced Plastics Division, Chicago, February, 1962.

[9] *Lafton C. M., Hill C. F., Moses G. L., Berberich L. G.:* A new High-Voltage Insulation for Turbine-Generator Stator-Windings. AIEE-Transactions 70, 721, (1951).

[10] *Rossi G.:* Romicafil, eine neue, kontinuierliche Isolation für elektrische Maschinen. Micafil-Nachrichten, Februar 1964.

[11] Insulation, Juni 1955, 4—7.

Adresse des Autors:

Dr. *Heinz Rembold,* Chemiker, Micafil AG, Postfach, 8048 Zürich.