Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 22 (1931)
Heft: 24

Artikel: Zusammenfassende Darstellung der dielektrischen Verluste in Mikanitisolationen für Generatorspulen hoher Spannung

Autor: Boller, W. / Wellauer, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058606

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: 22.08.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A., Zurich 4
Stauffacherquai 36/38

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXII[e] Année | N° 24 | Vendredi, 27 Novembre 1931

Zusammenfassende Darstellung der dielektrischen Verluste in Mikanitisolationen für Generatorspulen hoher Spannung.

Von Dr. *W. Boller* und Dr. *M. Wellauer*, Oerlikon.

537.226.5+621.315.613:621.313.048

Im ersten Teil der Arbeit wird die Bedeutung der Ionisationsverluste in der Mikanitisolation von Maschinenspulen gezeigt. An Hand von Messungen an Mikanitfolien und an ganzen Spulenumwicklungen wird nachgewiesen, dass schon sehr geringe Lufteinschlüsse im Mikanit genügen, um die Ionisationsverluste bei höherer Spannungsbeanspruchung beträchtlich grösser werden zu lassen als die Verluste im festen Material und dass dieselben für die Erwärmung der Isolation ausschlaggebend sind. Als Kriterium für die Güte einer Spulenisolation muss der Ionisationsknick angesehen werden. In einem weiteren Abschnitt wird auf das Grundmaterial, das Mikafolium, näher eingegangen. Es wird der Einfluss der Bestandteile, wie Glimmer, Bindelack, Papier, Lösungsmittel und deren Widerstandsfähigkeit gegen Wärme und Ozon auf die mechanischen Eigenschaften des Mikafoliums beschrieben. Vor allem werden die günstigen Eigenschaften eines neuen Mikafoliums nachgewiesen und erklärt.

Auf diesen Grundlagen werden Messungen an Spulenumwicklungen und Maschinenwicklungen wiedergegeben, sowie die Mittel beschrieben, welche die Maschinenfabrik Oerlikon anwendet, um ein Glimmen der Wicklung bis zu hohen Spannungen zu verhüten.

La première partie de l'article fait ressortir l'importance des pertes par ionisation dans l'isolement des bobines à la micanite. Des mesures effectuées sur des feuilles de micanite et aussi sur l'enrobement de bobines entières ont démontré que déjà de très petites bulles d'air dans la micanite suffisent pour qu'à des tensions élevées les pertes par ionisation dépassent de beaucoup les pertes dans la matière solide et exercent une influence prédominante sur l'échauffement de l'isolant. Le coude de la courbe d'ionisation doit être considéré comme critère pour la qualité de l'isolement. Une autre partie de l'article est consacrée à une étude plus approfondie de la matière première, le micafolium. Les auteurs décrivent l'influence des composants tels que le mica, le liant, le papier, les solvants, ainsi que de leur résistance à l'échauffement et à l'action de l'ozone, sur les propriétés mécaniques du micafolium. Ils démontrent et expliquent en particulier les propriétés favorables d'un nouveau micafolium.

Partant de cette base, les auteurs relatent des mesures effectuées sur des enrobements de bobines et sur des bobines finies et décrivent les moyens appliqués par les Ateliers de Construction Oerlikon pour éviter jusqu'à des tensions élevées les effluves qui ont tendance à se produire sur les enroulements à leur sortie des encoches.

I. Einleitung.

1. Die isolierende Umwicklung bei Generatorspulen oder Stäben wird, wenn hohe elektrische oder thermische Beanspruchungen auftreten, ausnahmslos aus Mikanit hergestellt. Die Herstellung geschieht von Hand oder maschinell derart, dass Mikanitfolien um den Kupferleiter gewickelt werden. Oft wird eine alkoholische Schellacklösung oder ein anderer Lack als Bindemittel zwischen den einzelnen Lagen angewandt. Die Aufwicklung, die auf einem heissen Tisch bei Handfabrikation oder auf geheizten Rollen oder Mulden bei der maschinellen Fabrikation erfolgt, bewirkt ein Zusammenkleben der aufgewickelten Mikanitfolien. Danach wird die ganze Spule in Holz- oder vorgewärmten Eisenformen auf die richtige Form gepresst. Dieser Fabrikation haften prinzipielle Mängel an, die im folgenden genannt seien:

a) Die Verdampfung des im Lack des Mikanits vorhandenen Lösungsmittels findet nur unvollkommen statt.

b) Beim Umwickeln der Mikanitfolien wird Luft zwischen die Lagen eingewickelt.

c) Beim nachherigen Pressen der Isolation in die richtige Form können Rümpfe auftreten. Ferner können die Mikanitplättchen verschoben und gebrochen werden.

d) Durch die nachherige Temperaturbehandlung oder durch die Erwärmung der Isolation in der Maschine können die Lösungsmittel verdampfen. Ferner kann eine Zersetzung des Bindelackes eintreten. Hierbei wird in erster Linie Wasser abgespalten. Durch beide Prozesse wird die Isolation wesentlich verschlechtert.

2. Es ist heute eine allgemein anerkannte Auffassung, dass für den Durchschlag von geschichteten Isoliermaterialien in erster Linie die eingeschlossenen Luft- oder Gasräume verantwortlich sind. Sobald nämlich die Feldstärke in der Isolation eine gewisse kritische Grösse überschreitet, werden die Gasblasen ionisiert; es treten lokale Verluste auf, die meist auf sehr kleine Raumteile

konzentriert sind. Diese Ionisationsverluste können die Verluste des festen Materials weit überschreiten. Dadurch werden diese Stellen und deren Umgebung stark erwärmt; der Durchschlag tritt ein. Eine direkte Gefährdung der Glimmerplättchen durch das mit der Ionisation verbundene Auftreten von Ozon und salpetriger Säure findet allerdings nicht statt, wohl aber wird das Papier und vor allem der Bindelack angegriffen.

Die Bedeutung der Ionisation der eingeschlossenen Gase wurde zuerst in der Kabelfabrikation erkannt. Erst nachdem es gelungen war, diese Erscheinung bei der Kabelfabrikation ganz zu unterdrücken, war es möglich, betriebssichere Kabel für hohe Spannungen bis 130 kV herzustellen (Fig. 1).

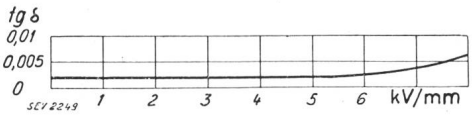


Fig. 1.
tg δ-Charakteristik eines Dreileiterkabels für 25 kV.

Die Vermeidung von Luft- oder Gaseinschlüssen in Kabeln wurde durch verschiedene Mittel erreicht. Die wichtigsten sind [1]): Vollständige Entfeuchtung und Evakuierung des Kabelpapieres innerhalb des Bleimantels und Verwendung eines dünnflüssigen Oeles als Imprägniermittel, das frei durch die hohle Kabelseele fliessen kann. Das Oel wird in das evakuierte Kabel unter Vermeidung jedes Luftzutrittes eingesogen. Dadurch wird die Garantie geboten, dass das Oel alle Poren der Kabelisolation ausfüllt. Das Kabel wird mit Ausdehnungsgefässen für das Oel ausgerüstet, die das infolge der Temperaturschwankungen auftretende überschüssige Oel aufnehmen. Ferner wird dadurch das Kabel unter einen dauernden Ueberdruck gesetzt. Durch diese Mittel war es möglich, die Beanspruchung der Kabelisolation betriebsmässig von 12 kV/cm auf 50 kV/cm zu steigern.

3. Eine kurze Ueberlegung zeigt, dass diese Mittel leider bei der Herstellung der Mikanitisolation von Maschinenspulen nicht angewendet werden können. Erstens fehlt ein vakuumdichter Abschluss nach aussen, der bei der Kabelfabrikation durch den Bleimantel von selbst gegeben ist. Zweitens ist die Baulänge einer Maschinenspule viel kürzer als die eines Kabels. Als einziger Vorteil der Maschinenspule gegenüber dem Kabel ist zu erwähnen, dass das bei der Maschinenisolierung verwandte Mikanit thermisch und elektrisch weit hochwertiger ist als das bei Kabeln benützte Papier. Dieser Vorteil ist aber nur scheinbar, da, wie schon erwähnt, bei der Mikanitisolierung die dünne Papierschicht und vor allem der Bindelack den Einflüssen der Ionisierung nicht standzuhalten vermögen.

4. Es müssen deshalb andere Wege eingeschlagen werden, um bei der Isolierung von Maschinenspulen ähnlich gute Resultate zu erzielen, wie dies bei der Kabelfabrikation bereits der Fall ist. Die vorliegende Mitteilung soll in erster Linie dem Zweck dienen, diese Mittel zu beschreiben und die Fortschritte festzustellen, die auf diesem Gebiete in den letzten Jahren erzielt worden sind.

5. In dieser Arbeit wird als wichtigstes Kriterium für die Beurteilung der Güte der Mikanitisolierung die Messung der Verluste bzw. des Tangens des Verlustwinkels angesehen. Dieser Messmethode wird oft der Vorwurf gemacht, dass sie nur die Verluste über alles festzustellen in der Lage sei, aber nicht zeigen könne, an welcher Stelle der Fehler auftrete. Diesem zum Teil berechtigten Mangel kann aber durch Unterteilung des Messbelages wirksam abgeholfen werden, so dass sich die Messung der Verluste trotzdem als sehr gutes Mittel erweist, die Fehlerstellen einer Isolation zu ermitteln. Eine solche Messung zeigt Fig. 2. Kurve 1 zeigt den Verlauf des tg δ bei der Messung über die ganze Länge einer Maschinenspule. Darauf wurde der Messbelag so unterteilt, dass zwei gleiche Hälften der Spule gemessen werden konnten (Kurve 2 und 2'). Eine weitere Unterteilung der schlechteren Hälfte führte darauf zu einer noch weitergehenden Feststellung der fehlerhaften Stelle der Spule (Linie 3 und 3'). Diese Methode kann in sehr vielen Fällen angewendet werden.

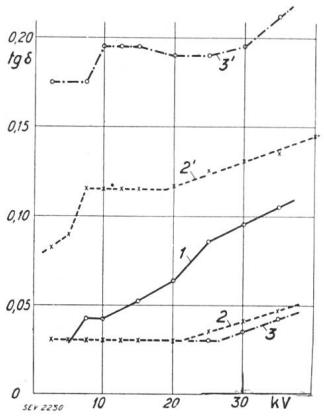


Fig. 2.
Feststellung der Fehlerstelle an einer Maschinenspule durch Unterteilung des Messbelages.
1 ganze Spule.
2 Messbelag halbiert, gute Hälfte.
2' Messbelag halbiert, schlechte Hälfte.
3 $^3/_4$ des Messbelages, gute Stelle.
3' $^1/_4$ des Messbelages, schlechte Stelle.

II. Die dielektrischen Verluste bei der Mikanitisolierung.

1. Unter dielektrischen Verlusten versteht man bekanntlich die Verluste, die im dielektrischen Material infolge der Beanspruchung im Wechselfeld entstehen. Bei festen Isolatoren tritt der Verlust auf infolge der (meist nebensächlichen) Ohmschen Leitfähigkeit und besonders infolge der Umpolarisierung der Moleküle im elektrischen Wechselfeld. Bei geschichteten Materialien, bei denen die einzelnen Stoffe verschiedene dielektrische Eigenschaften besitzen, können besonders grosse dielektrische Verluste auftreten. Die gut isolierenden Flüssigkeiten haben sehr wenig dielektrische Verluste, die Gase gar keine. Sobald jedoch ein Gas ionisiert ist, steigen seine Verluste sehr stark an. Zur Charakterisierung eines dielektrischen Materials verwendet man am besten die

[1]) G. B. Shanklin. Some recent development of high tension cable practice. G. E. R. 1926, S. 311. K. J. Rosch und H. G. Burd. El. World 1930, Bd. 96, S. 1132.

tg δ-Spannungscharakteristik. δ ist der Komplementärwinkel zum Phasenverschiebungswinkel φ und wird als Verlustwinkel bezeichnet. Der *tg* des Verlustwinkels stellt demnach das Verhältnis des Wirkstromes zum Blindstrome im dielektrischen Material dar. Dieses Verhältnis ist unabhängig von der Menge des gemessenen Materials. Die Angabe des Verlaufes des *tg* δ in Abhängigkeit von der angewandten Spannung oder Feldstärke ist deshalb derjenigen des Verlaufes der Verluste (in Watt) selbst vorzuziehen.

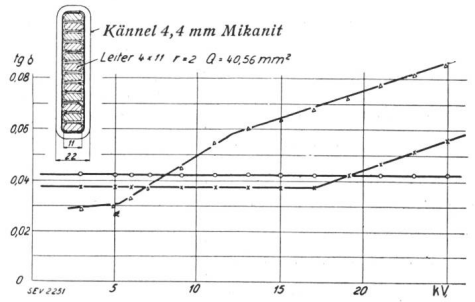


Fig. 3.
tg δ-Charakteristik von drei Maschinenspulen verschiedener Fabrikationsart.

2. Solange ein Isoliermaterial nur dielektrische Verluste hat und sich unter deren Einfluss noch nicht merkbar erwärmt, steigen die dielektrischen Verluste mit der angewandten Spannung quadratisch an, und der *tg* δ ist konstant. Fig. 3 zeigt den Verlauf des *tg* δ bei drei Maschinenspulen verschiedener Güte. Der Verlauf ist typisch für geschichtete Isoliermaterialien. Von einer gewissen Spannung an steigt der *tg* δ plötzlich an. Diese kritische Spannung wird als *Ionisationsspannung* bezeichnet, weil von dieser Spannung an die im geschichteten Material eingeschlossenen Gas- oder Lufträume ionisiert sind. Vom Ionisationsknick steigen deshalb die Verluste im geschichteten Material stärker an. Die dielektrischen Verluste lassen sich nun auf Grund der folgenden Ueberlegungen trennen [2]).

Im Gegensatz zu den dielektrischen Verlusten im festen dielektrischen Material steigen nämlich die Verluste in einer ionisierten Gasstrecke nicht quadratisch mit der Spannung an, sondern sind vom durchgehenden Strom abhängig, wie die charakteristische Fig. 4 zeigt. Zuerst steigt die Spannung proportional mit der Stromstärke; die Luftstrecke verhält sich wie ein Ohmscher Widerstand. Von einer gewissen Stromstärke an nimmt die Spannung langsamer zu, um schliesslich fast konstant zu bleiben. Ist die ionisierte Luft in einem festen Dielektrikum eingeschlossen, wie dies z. B. bei Mikanitisolation der Fall ist, so wird der Strom in der ionisierten Gasstrecke durch den Kapazitätsstrom des festen Materials bestimmt.

[2]) Siehe die Darstellung von C. L. Dawes, H. H. Richard and P. H. Humphries: Ionisations studies in paper insulated cables. JAIEE 1929, S. 3.

Der durchgehende Strom ist dann angenähert der angelegten Spannung proportional und die Ionisationsverluste sind dieser Spannung proportional. Die Verluste in einem geschichteten Material mit Lufteinschlüssen lassen sich deshalb durch die zwei folgenden Gleichungen darstellen:

$P_d = K_d \cdot U^2$ Verluste im festen Material;
$P_i = K_i \ (U—U_i)$ Ionisationsverluste;
K_d und K_i sind Konstante. U_i ist die Ionisationsspannung.

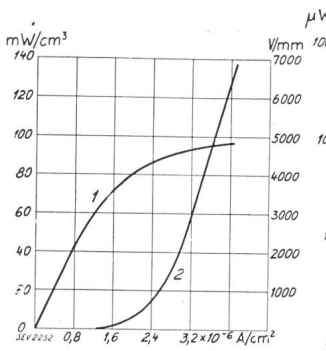


Fig. 4.
Spannung und Ionisationsverluste an einer glimmenden Luftschicht von 0,37 mm zwischen Glasplatten. 60 Per./s. 19° C.
1 Spannung V/mm.
2 Verluste in W/cm³.

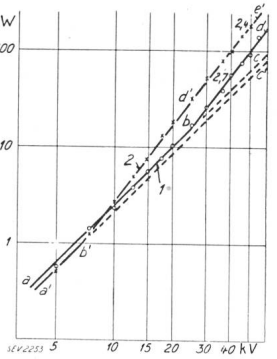


Fig. 5.
Verlustmessung an Schellackmikanit-Maschinenspule.
1 Verluste vor der Wärmebehandlung.
2 Verluste nach der Wärmebehandlung.

Trägt man nun die Verlustcharakteristik eines solchen dielektrischen Materials in einem Koordinatensystem auf, das als Ordinate den Logarithmus der Verluste, als Abszisse den Logarithmus der Spannung zeigt, so lassen sich die Verluste im festen Material von denen in den ionisierten Gasstrecken trennen. Fig. 5 zeigt eine solche Charakteristik einer Mikanitumwicklung einer Maschinenspule. Die Linie *a—b—c* stellt die mit der Spannung quadratisch verlaufenden Verluste des festen Materials dar. Tatsächlich verlaufen die Verluste nur bis zum Punkt *b* quadratisch nach der Gleichung $P = 2{,}48 \cdot 10^{-14} \cdot U^2$. Von diesem Punkt an, der durch den Ionisationsknick charakterisiert ist, beginnen die Verluste mehr als quadratisch mit der Spannung anzusteigen; die Verluste verlaufen nach der Linie *b—d—e*. Die die Linie *b—c* übersteigenden Verluste sind deshalb als Ionisationsverluste anzusprechen.

Die zweite Linie *a'—b'—d'—e'* zeigt die Verluste derselben Spulenisolation nach Erwärmung auf 130° C während zwei Stunden. Anfänglich steigen die Verluste wieder quadratisch mit der Spannung ($a'—b'$, $P = 2{,}07 \cdot 10^{-14} \cdot U^2$). Die Verluste im festen Material sind absolut etwas kleiner geworden. Hingegen beginnt die Ionisation nun schon bei 7 kV, gegenüber bei 24 kV vor dem Wärmeprozess. Die Verluste steigen dann stark an. Das frühere Auftreten des Ionisationsknickes und die bedeutende Zunahme der Ionisationsverluste

der wärmebehandelten Spule ist auf die Bildung von Hohlräumen innerhalb des Mikanits zurückzuführen. Welches die innere Ursache dieser Hohlraumbildung ist, werden wir in einem späteren Abschnitt diskutieren. Vorerst kann man annehmen, dass sich infolge der höheren Temperatur und Zersetzung des Bindelackes (Schellack) Gasblasen gebildet haben. Diese Erscheinung wurde an vielen Maschinenspulen aus Schellackmikanit gefunden und muss für dieses Material als typisch bezeichnet werden. Ganz allgemein hat sich gezeigt, dass bei wärmebehandelter Schellackmikanitspulenisolation der Ionisationsknick bei 1 bis 1,5 kV/mm liegt.

In Fig. 6a sind auf Grund der Trennung der Verluste nach Fig. 5 die Verluste in Funktion der

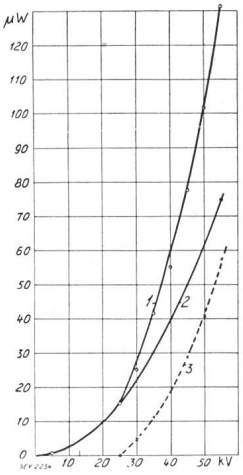


Fig. 6a.
Verlustmessung an Schellackmikanit-Maschinenspule vor der Temperaturbehandlung.
1 Totalverluste.
2 Verluste im festen Material.
3 Ionisationsverluste.

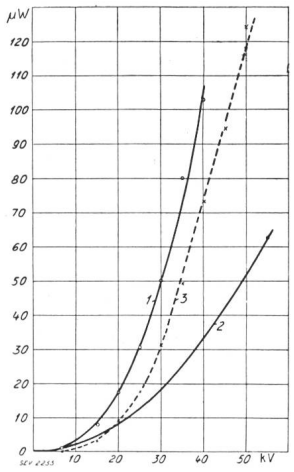


Fig. 6b.
Verlustmessung an Schellackmikanit-Maschinenspule nach der Temperaturbehandlung.
1 Totalverluste.
2 Verluste im festen Material $P_d = 2{,}08 \cdot 10^{-14} \cdot U^2$ W.
3 Ionisationsverluste $P_i = 4{,}5 \cdot 10^{-9}\ (U-24)$ W.

Spannung vor der Wärmebehandlung, in Fig. 6 b nach der Wärmebehandlung aufgetragen. Man sieht, wie speziell im zweiten Teil die Ionisationsverluste sehr rasch anwachsen und bald die Verluste des festen Materials weit übersteigen. Verlängert man den geraden Teil der Ionisationsverlustkurve nach unten bis zum Schnittpunkt mit der Abszissenachse, so erhält man die idealisierte Ionisationsspannung U_i. Die wirkliche Ionisationsspannung sei mit U_g bezeichnet. Die Gleichung der idealisierten Verlustkurve der eingeschlossenen Gasblasen lautet:

$$P_i = 4{,}5 \cdot 10^{-9}\ (U-24)\ \text{Watt}$$

Der Unterschied zwischen dem Wert der tatsächlichen Ionisationsspannung U und der idealisierten Ionisationsspannung U_i ist darauf zurückzuführen, dass die Lufteinschlüsse nicht als gleichmässig verteilt und als gleichmässig dick anzunehmen sind. Vielmehr beginnen die dicken Gasblasen früher zu glimmen, dann folgen bei höherer Feldstärke die dünneren Gaseinschlüsse. Auf diese Weise findet ein langsamer Uebergang der Ionisationsverlustkurve bis zum linear mit der Spannung verlaufenden Teil statt. Im linearen Teil der Verlustkurve ist anzunehmen, dass alle Lufteinschlüsse ionisiert sind. Fig. 6 a und 6 b zeigen deutlich den verheerenden Einfluss der Ionisationsverluste in einem geschichteten Material. Es ist deshalb anzustreben, die Gaseinschlüsse innerhalb der Mikanitumwicklung von Maschinenspulen auszuschalten. Auf dieses Ziel haben sich in erster Linie die Bestrebungen der Fabrikation zu richten. Diese Aufgabe ist viel wichtiger, als das Herabsetzen der Verluste des festen Materials, obwohl natürlich dieses Ziel auch erstrebenswert ist.

3. In den folgenden Messungen an Mikanitfolien haben wir untersucht, ob das Mikanitfolium selbst einen Ionisationsknick besitzt. Es ergaben sich dabei Anhaltspunkte über die Grösse des Ionisationsverlustes in dünnen Luftschichten. Die Feststellung, ob das Mikanitfolium Verluste hat, ist wichtig für die Beurteilung des Grundmaterials und des Bindelackes. Die Mikanitfolien wurden zu diesem Zweck zwischen Stahlplatten gelegt. Darauf wurde mit statisch abgeschirmten Rändern die $tg\ \delta$-Charakteristik aufgenommen. Fig. 7 zeigt eine Messung an einem Mikanitfolium von ca. 0,255 mm Dicke (Linie 1). Man sieht, dass der $tg\ \delta$ bis zur Ionisationsspannung von ca. 3 kV/mm konstant ist, dann aber sehr stark ansteigt. Der Anstieg rührt natürlich von der eingeschlossenen Luft. Es fragt sich nun, wo befindet sich diese eingeschlossene Luft? Einen Anhaltspunkt erhält man durch folgende Messung: Das Folium wurde nach der ersten Messung mit ca. 1 kg/cm² gepresst und wieder gemessen. Die neue Messung zeigt Linie 2. Die Ionisationsspannung liegt nun wesentlich höher bei 3,8 kV/mm. Man muss daraus schliessen, dass die Luft, die sich, weil die Mikanitfolien nicht ganz glatt sind, zwischen dem Mikanitfolium und dem Metall befindet, zum Teil entwichen ist. Das heisst, die Luftschicht ist durch die Pressung wesentlich dünner geworden. Dadurch steigt die Durchschlagspannung der Luftschicht und der Knick setzt erst bei höherer Spannung ein. Einige Messungen dieser Art sind in Tabelle I zusammengestellt.

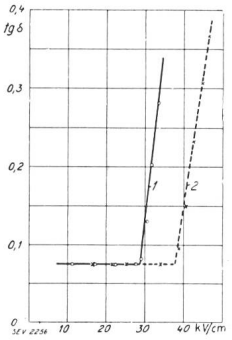


Fig. 7.
tg δ-Charakteristiken von Mikanitfolien zwischen Metallplatten.
1 vor der Pressung.
2 nach der Pressung.

Man sieht aus Tabelle I, dass die berechnete Durchschlagfeldstärke der Luftschichten bei der Annahme, dass die Luftschichten ungefähr so dick sind, wie sich die Kondensatorplatten zusammenpressen lassen, ziemlich gut mit der Durchschlag-

Tabelle I.

Mikanitfoliumblatt No.	d Abstand der Kondensatorplatten nach der Pressung (ca. Dicke des Foliums) mm	Dicke der Luftschicht (durch Pressung festgestellt) mm	Ionisationsspannung U_g V	Festigkeit der Lufteinschlüsse kV/cm	Festigkeit der Luft von derselben Dicke nach Schuhmann kV/cm
6	0,255	0,105	1040	76	92
7	0,240	0,140	1040	72	82
8 (4 Blätter zusammen)	0,905	0,295	3100	76	64

feldstärke einer gleich dicken Luftschicht übereinstimmt. Aus diesen Messungen geht hervor, dass sich die Hauptmenge der Luft zwischen dem Folium und den Metallplatten befindet und dass die einzelnen Mikanitfolien keine Gaseinschlüsse enthalten, die bei den angewandten Spannungen bis zu 4 kV/mm zum Glimmen kommen.

4. Aus dem sehr starken Anstieg des $tg\,\delta$ in Fig. 7 lässt sich erkennen, wie relativ gross die Verluste in sehr dünnen Luftschichten sein können. Es können demnach in einer Maschinenspulenisolation schon geringe Gaseinschlüsse einen sehr deutlichen Ionisationsknick und grosse Ionisationsverluste hervorzurufen. In Fig. 8 sind die Verluste

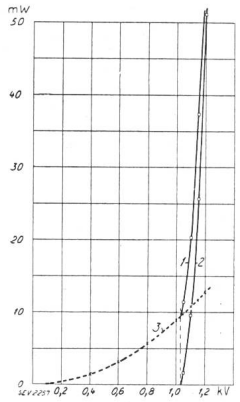


Fig. 8.
Verlustmessungen an Mikanitfolium von 0,255 mm Dicke.
1 Totalverluste.
2 Verluste im festen Material.
3 Ionisationsverluste in Luftschicht von 0,105 mm Dicke.

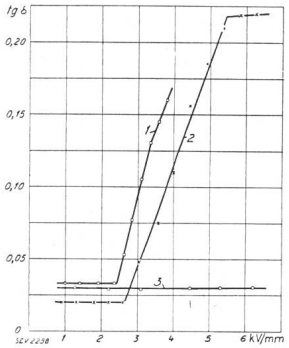


Fig. 9.
tg δ-Charakteristik von Mikanitfolium zwischen Metallplatten.
1 Anlieferungszustand.
2 Nach der Pressung mit 10 kg/cm^2.
3 nach Aufbringen eines leitenden Belages.

des bereits genannten Foliums Nr. 6 in Abhängigkeit von der Spannung aufgetragen. Wie man sieht, steigen die Ionisationsverluste in der dünnen Luftschicht von ca. 0,105 mm sehr rasch an und überschreiten diejenigen des festen Materials bald um das Mehrfache.

5. In den folgenden Messungen gelang es, diese Luftschicht vollständig auszuschalten. Zu diesem Zweck wurde auf das Folium ein dünner, leitender Belag aus einer Mischung von Kienruss und Lack aufgebracht. Wie Fig. 9 zeigt, kann man nun ein Mikanitfolium bis zur Durchschlagspannung beanspruchen, ohne dass sich der $tg\,\delta$ ändert. Damit ist der Beweis erbracht, dass gutes Mikanitfolium selbst bis zu sehr hohen Beanspruchungen keinen Ionisationsknick aufweist und damit auch keine Lufteinschlüsse enthält. Die Luftblasen und damit der Ionisationsknick können daher nur durch den Wickelprozess und durch die Temperaturbehandlung gebildet werden. Bevor nun auf die Fabrikation selbst näher eingegangen sei, wollen wir das Mikanit einer näheren Betrachtung unterziehen.

III. Das Mikanit.

1. Das Mikanit wurde vor mehr als 30 Jahren von C. W. Jefferson und A. H. Dyer in die Elektrotechnik eingeführt. Schon die Erfinder verwandten als Klebelack für die Glimmerblättchen Schellack. Die Herstellung geschieht bekanntlich so, dass die Mikablättchen auf heissen Tischen mit Schellackpulver bestreut oder mittels einer alkoholischen Schellacklösung aufeinander geklebt werden. Unter Druck und Erwärmung findet dann nach Verdampfung des Lösungsmittels ein Zusammenhaften der Glimmerblättchen statt. Als Grundlage dient ein Blatt dünnes Papier von ca. 0,03 mm Dicke. Es entsteht so eine gut isolierende und mechanisch ziemlich feste, biegsame Folie. Die Ausgangsmaterialien sind also Glimmer und Bindelack. Welches sind nun die Eigenschaften dieser Stoffe, die für den Verwendungszweck und die Brauchbarkeit des Mikanits massgebend sind?

2. Der Glimmer ist ein sehr guter Isolator. Seine hauptsächlichsten Eigenschaften sind: Grosse dielektrische Festigkeit und kleiner Verlustwinkel bis zu hohen Temperaturen. Glimmer wird erst bei Temperaturen über 200° C leitend. Mechanisch ist Glimmer, der in dünnen Blättchen von ca. 0,01 bis 0,02 mm Dicke verwendet wird, elastisch und hart. Die Biegsamkeit der Folie wird wesentlich durch die Dicke der Glimmerblättchen bestimmt. Für Spulenumwicklungen ist eine aus Mikablättchen von ca. 0,01 mm Dicke zusammengesetzte Folie am vorteilhaftesten.

J. B. Whitehead [3]) stellte durch Versuche fest, dass Glimmer im Gegensatz zu faserigen Materialien aus Zellulose von Ozon nicht angegriffen wird. Bei Mikanitisolation findet man, dass die Glimmentladung der eingeschlossenen Luftschichten das Papier punktartig durchlöchert, dass aber die Entladungsbahnen an den Mikablättchen auf-

[3]) J. B. Whitehead. Gasous ionization in built up insulation. II. JAIEE 1924, S. 19.

hören. In den eingeschlossenen Luftblasen spielt das Ozon die Hauptrolle, während nitrose Gase nur ganz untergeordnet als Zerstörer in Frage kommen. Reichliche Ionisation in dünnen Luftschichten zwischen Glasplatten hat keinen Einfluss auf Glimmer. Auch direktes Auflegen von lamellierten Eisenscheiben bei hoher Spannung schadet Glimmer nicht. Hingegen ist Glimmer leicht verletzlich durch Gleitentladungen, die über seine Oberfläche springen. Der Glimmer splittert dann leicht auf, besonders wenn die Spannung einen gewissen Wert überschreitet.

3. Gerade so wichtig für die Eigenschaften des Mikafoliums, aber weniger untersucht und aufgeklärt, sind die Eigenschaften des Bindelackes. Bis vor kurzem wurde als Bindelack für das Mikafolium von Maschinenspulen ganz allgemein Schellack verwendet, trotz den grossen Nachteilen, die diesem Bindelack nachgesagt werden. Vor allem soll Schellack schon bei normalen Temperaturen chemisch unstabil sein und bei 70° C bereits in starkem Masse Gase abgeben. Ferner muss der Schellack in wasserhaltigen Lösungsmitteln, wie Spiritus, aufgelöst werden. Gasabgabe, Wasser- und Spiritusgehalt wirken sich aber in der Fabrikation von Maschinenspulen dahin aus, dass Gasblasen zwischen den Lagen entstehen mit den bereits erklärten ungünstigen Folgen [4]). Statt Schellack wurde in neuester Zeit Glyptal als Bindemittel empfohlen, allerdings nicht direkt für Mikafolium für Maschinenspulen. Trotzdem seien hier die Eigenschaften dieses Mikanits kurz gestreift. Glyptal, ein synthetisches Harz aus Glyzerin und Phtalsäure, soll folgende gute Eigenschaften haben, speziell im Vergleich zu Mikanitisolation mit Schellack (siehe Tabelle II) [5]):

Nach der gleichen Quelle sollen auch Phenolharze keine günstigeren Eigenschaften aufweisen als Schellackmikanit. Phenolharze haben vor allem den Nachteil, dass sie nicht kleben. Der mechanische Halt der Glimmerteilchen untereinander ist deshalb nicht gut, weil ihre Oberflächen vom Phenolharz nicht genügend benetzt werden. Ferner verhalten sich die Phenolharze und Schellack gegen hohe Temperaturen weniger gut als Glyptal. Während Glyptal bei höheren Temperaturen verdampft als Alkohol, bilden Schellack und Phenolharze Rückstände aus Kohle und anderen Zersetzungsprodukten, die speziell den Oberflächenwiderstand stark herabsetzen.

4. Diese Angaben über Glyptalmikafolium konnten von den Verfassern dieser Arbeit nicht überprüft werden, erscheinen aber auch nicht auf die spezielle Verwendung zu Maschinenspulenisolation zugeschnitten (weitere Angaben im Hinblick darauf wurden in der Literatur nicht gefunden). Im folgenden sei ein anderes Bindemittel beschrieben, das in den letzten Jahren immer mehr Eingang in die Mikanitisolation von Maschinenspulen gefunden hat. Mit diesem Mikafolium, das als Asphaltlackmikafolium bezeichnet sei, wurden sehr gute Resultate an Maschinenspulenisolationen erreicht. Der Bindelack des Asphaltlackmikafoliums enthält als Grundbestandteil Asphalt und gekochtes Leinöl, Holzöl oder ein anderes ähnliches Produkt als klebender Zusatz. Als Lösungsmittel wird Benzin oder Benzol verwendet. Die Zusammen-

[4]) Die im Laboratorium der Maschinenfabrik Oerlikon durchgeführten Versuche ergaben folgendes: Tatsächlich entwickelt Schellack beim Schmelzen Gase. Die genaue Untersuchung ergab, dass es sich lediglich um Wasserdampf handelt. Bei Steigerung der Temperatur tritt die Wasserdampfbildung von neuem auf. Mit dieser Wasserbildung steigt der Schmelzpunkt des Harzes. Das deutet auf ein Zusammentreten von Molekülen zu grösseren Komplexen unter Austritt von Wasser hin.

[5]) L. E. Barringer. A revolutionary development of mica insulation. G. E. R. 1926, S. 757.

Tabelle II.

Eigenschaften	Mikanit, glyptalgeklebt	Mikanit, schellackgeklebt
Elektrische Eigenschaften		
dielektrische Festigkeit	110—160	100
spez. Widerstand	200	100
spez. Oberflächenwiderstand	400	100
dielektrische Verluste	66	100
Physikalische Eigenschaften		
Dichtigkeit	107	100
Kompressibilität	leicht	leicht
gleiten	Mika kann nicht gleiten	Mika kann gleiten
Längsfestigkeit	150—200	100
Durchsichtigkeit	wie bei Schellack	wie bei Glyptal
Widerstand gegen Abkratzen	wie bei Schellack	wie bei Glyptal
Chemische Eigenschaften		
Verkohlungstendenz	leicht	deutlich
Zersetzungsprodukte	nicht leitend	leitend
Zersetzungsprodukte	greifen Cu nicht an	greifen Cu an
Einfluss der Mineralöle	kein	kein
Einfluss der Feuchtigkeit	sehr leicht	leicht
Einfluss der Hitze	leicht	deutlich

setzung ist: 40 bis 60 % Glimmer, 20 bis 40 % Lack, 10 % Papier, 0,5—1,5 % Wasser, 1 % Lösungsmittel. Als Vergleich seien die Werte von Schellackmikanit angeführt: 40 bis 60 % Glimmer, 20 bis 40 % Schellack, 10 % Papier, 2 bis 4 % Wasser, 1 % Lösungsmittel.

Welches sind nun die Gründe, welche zu den bereits erwähnten guten Resultaten mit diesem Mikafolium geführt haben?

a) Mechanische Eigenschaften: Asphaltmikafolium ist vor allem, bezogen auf gleiche Stärke der Glimmerblättchen, bedeutend flexibler als Schellackmikafolium. Besonders nach Anwendung höherer Temperaturen über 130° C wird Schellack im Gegensatz zum Asphaltlack hart und spröd. Auf diesen Unterschied sind speziell die guten Resultate in bezug auf den Ionisationsknick an Spulenumwicklungen zurückzuführen, die im folgenden Abschnitt angegeben werden. Asphaltmikafolium lässt sich in einem gewissen Grade formen, ohne den inneren Zusammenhang zu verlieren, während das spröde Schellackmikafolium bei demselben Prozess sich spaltet und Hohlräume bildet. Besonders für lange Spulen grosser Maschinen ist diese günstige Eigenschaft des Asphaltmikafoliums wertvoll, da sich solche Spulen bei Kurzschlüssen oder schon beim Einbau leicht biegen.

b) Chemische Eigenschaften: Die günstigeren Eigenschaften gegenüber Schellackmikafolium kommen schon bei der Analyse zum Ausdruck, da bei Asphaltmikafolium der Wassergehalt bedeutend geringer ist. Unter anderem ist dies darauf zurückzuführen, dass das Lösungsmittel bei Asphaltmikafolium leichter wasserfrei zu halten und viel weniger hygroskopisch ist. Wir haben im chemischen Laboratorium der Maschinenfabrik Oerlikon genaue Untersuchungen gemacht, um Aufschluss über die chemische Beständigkeit von Schellack und Asphaltlack bei höheren Temperaturen zu erhalten. Den dabei benutzten Apparat zeigt Fig. 10. Eine bestimmte Menge eines Lackes (meistens 10 g) wurde abgewogen und in dem Gasbestimmungsapparat während 30 Minuten auf 140° C erhitzt.

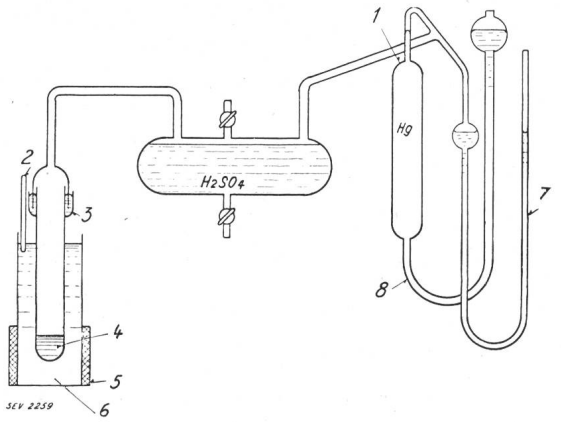
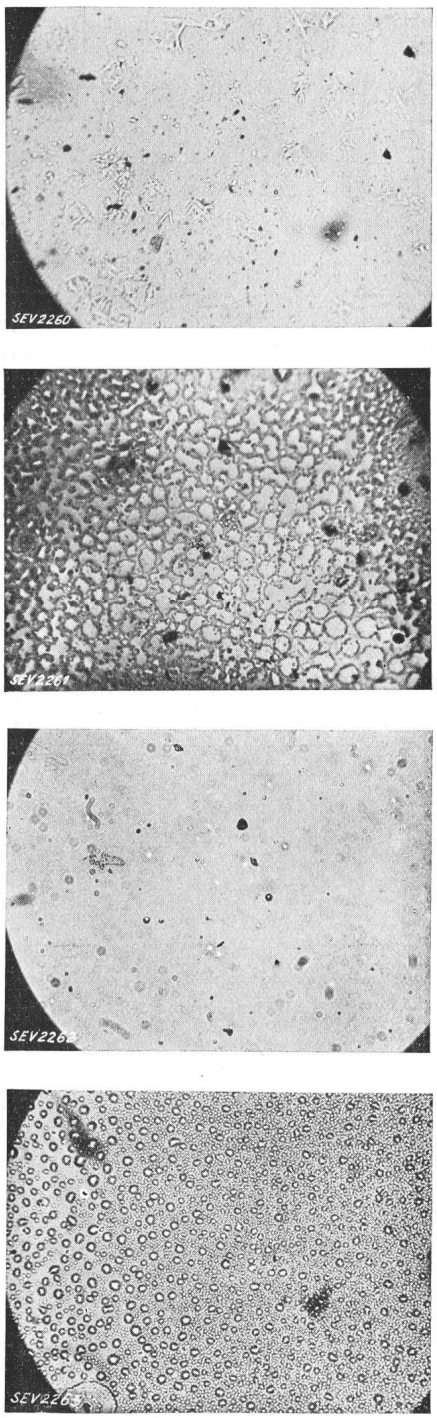


Fig. 10.
Apparatur zur Bestimmung der Gasabgabe von Lackproben.

1 Ausdehnungsgefäss.
2 Thermometer.
3 Quecksilberdichtung.
4 Lackprobe.
5 Heizkörper.
6 Oelbad.
7 Oelmanometer.
8 Gummischlauch.

Nach der Abkühlung auf die Ausgangstemperatur konnte eine Volumenänderung an einem Kapillarrohr abgelesen werden. Ein mit Quecksilber gefülltes Ausdehnungsgefäss diente zur Kompensation des Ueberdruckes. Die gewonnenen Resultate sind besonders im Hinblick auf die bereits erwähnten Angaben in der Literatur interessant. Eine Gasabgabe unter Zersetzung wurde nämlich weder bei Schellack noch bei Asphaltlack festgestellt. Hingegen zeigt Schellack eine starke Abgabe von Wasser, das sich an den Wänden der Apparatur nie-



Schellack vor der Ozoneinwirkung

Schellack nach der Ozoneinwirkung

Asphaltlack vor der Ozoneinwirkung

Asphaltlack nach der Ozoneinwirkung

Fig. 11.
Schellack und Asphaltlack vor und nach der Einwirkung von Ozon. (Staubkörnchen dienen als Kondensationszentren).

derschlug. (Allfällig vorhandener Wasserdampf wurde durch ein Gefäss mit H_2SO_4 absorbiert.) Bei Asphaltlack konnte diese Erscheinung nicht beobachtet werden. Diese Resultate führten uns zu der unter Abschnitt *a)* angegebenen Auffassung, die das günstige Verhalten des Asphaltmikafoliums in bezug auf den Ionisationsknick aus den mechanischen Eigenschaften des Asphaltlackes erklärt.

Im weiteren untersuchten wir das Verhalten des Schellackes und des Asphaltlackes gegenüber den Einflüssen des Ozons. Zu diesem Zwecke wurden zwei Glasplatten einseitig mit dem zu untersuchenden Lack bestrichen und getrocknet. Auf der anderen Seite der Glasplatte war eine Stanniolfolie aufgebracht. Zwei derartige Platten wurden Lackschicht auf Lackschicht zusammengelegt und mit einer solchen Spannung geprüft, welche die Luft zwischen den Lackschichten zum Glimmen brachte. Die Wirkung dieser Probe zeigt Fig. 11, Mikrophotographien von Schellack und Asphaltlack vor und nach der Einwirkung von Ozon. Die Schellackschicht war matt angegriffen und roch sehr stark nach Essigsäure. Die Asphaltschicht hatte sich kaum verändert. Tabelle III enthält die Zunahme der Säurezahl nach der Einwirkung des Ozons auf verschiedene Lacke.

Tabelle III.

Lack	Zunahme der Säurezahl
Asphaltlack *a*	3,4
„ *b*	3,7
„ *c*	2,5
Schellack	25,3

Die analytische Untersuchung ergab, dass die durch das Ozon gebildeten Säuren grösstenteils aus niedrigen Fettsäuren bestehen, die als stark ionenbildend bekannt sind. Die starke Bildung gut leitender Säuren unter dem Einfluss des Ozons ist natürlich eine ungünstige Eigenschaft des Schellackes.

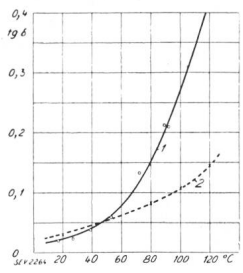


Fig. 12.
Verlauf des tg δ mit der Temperatur.
1 Schellackmikanit.
2 Asphaltlackmikanit.

c) Elektrische Eigenschaften: Sehr wichtig für den Elektromaschinenbau ist die Abhängigkeit der dielektrischen Verluste von der Temperatur. Fig. 12 zeigt den Verlauf des tg δ in Abhängigkeit von der Temperatur für Schellack- und Asphaltlackmikafolium. Auch in dieser Beziehung ist das Asphaltlackmikanit viel besser als Schellackmikanit. Infolge dieser Tatsache verhält sich Asphaltmikanit bei hoher elektrischer Beanspruchung günstiger, doch soll auf diese Messungen hier nicht näher eingegangen werden.

IV. Fabrikation der Spulenisolation aus Mikanit.

1. Nachdem wir das Mikanit als Ausgangsmaterial für die Maschinenspulenisolation eingehend besprochen haben, sei nun in diesem Abschnitt, bevor das Endprodukt, die Maschinenumwicklung, näher untersucht wird, auf die Fabrikation noch etwas näher eingegangen. Wie bereits in der Einleitung kurz gestreift, geht die Fabrikation normalerweise wie folgt vor sich: Das Mikafolium wird im heissen Zustand bei etwa 130 bis 200° C, je nach der Art des Mikafoliums, um den Kupferleiter gewickelt, dessen beide Enden meist schon isoliert sind. Infolge der hohen Temperatur wird das Mikafolium ziemlich weich und klebrig. Die Klebekraft ist von grosser Bedeutung. Die Umwicklung muss natürlich so erfolgen, dass das Mikafolium straff um den Leiter gezogen wird, jedoch sind der Zugkraft infolge der relativ geringen Festigkeit des Foliums ziemlich enge Grenzen gezogen. Ferner muss die Temperatur während des Wickelprozesses so gehalten werden, dass das Mikanit gleichmässig durchwärmt wird und das Lösungsmittel möglichst vollständig aus dem Bindelack entflieht. Nachdem die Isolation eine gewisse, durch Ausproben bestimmte Dicke hat, wird die Spule in vorgewärmten Eisenformen in die richtige Form gepresst. Nach dem Erkalten aus der Form genommen, befindet sich die Spule in einbaufertigem Zustande. Dieser Zustand wird als «grün» bezeichnet. Vorteilhaft wird nun die Spule einer Nachbehandlung unterzogen, die in einer längeren Erwärmung auf die höchste Temperatur, die die Spule in der Maschine betriebsmässig erreicht, besteht. Dieses sogenannte «Ausbacken» findet in einer Pressform statt. Es hat sich nämlich gezeigt, dass die Spulenisolation aus Schellackmikafolium und auch aus Asphaltmikafolium, besonders wenn letzteres während der Fabrikation nicht auf die richtige Temperatur erwärmt wurde, nach dem Fabrikationsprozess noch nicht den endgültigen Zustand erreicht hat, sondern bei einer nachfolgenden längeren starken Erwärmung sich verschlechtert. Diese Veränderung äussert sich auf verschiedene Weise.

Rein äusserlich kann sich die Spule aufblähen. Vor allem ändern sich aber die dielektrischen Verluste der Spulenisolation, speziell der Ionisationsknick. In Fig. 6 a und 6 b wurden bereits die Verluste an einer Schellackmikanitspule im «grünen» (Fig. 5 a) und im «ausgebackenen» Zustand (Fig. 6 b) verglichen. Die ausgebackene Spule erwies sich als bedeutend schlechter. Bei einer richtig fabrizierten Asphaltmikanitisolation tritt diese Veränderung nicht ein, da sich der Asphaltlack im Gegensatz zu Schellack bei Temperaturen bis 200° C chemisch nicht verändert. Fig. 13 zeigt eine Messung an einer Asphaltmikanitisolation während und nach dem «Ausbacken». Fig. 14 enthält eine entsprechende Messung an einer Schellackmikanitspule, jedoch bei einer Erwärmung auf nur 90° C. Der Unterschied ist sehr deutlich und zeigt den grossen Fortschritt, der mit dem Asphaltmikanit erzielt wurde.

2. Für die Qualität der Mikanitisolation wird ausser den Gaseinschlüssen der Prozentsatz an

Glimmer, Bindemittel, Papier und Lösungsmittel für wichtig gehalten. Was den Prozentsatz von Glimmer und Bindemittel anbetrifft, so ist die Ansicht von J. B. Whitehead [3]), dass ein hoher Glimmergehalt nötig sei, um die Mängel der Fabrikation zu kompensieren, für die heutige Fabrikation der Spulenisolation aus Asphaltlackmikanit nicht mehr

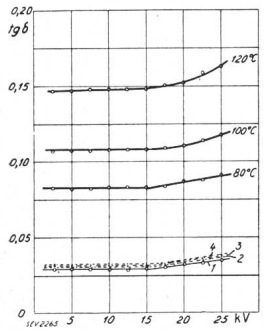


Fig. 13.
tg δ - Charakteristiken einer Maschinenspule aus Asphaltmikanit bei verschiedenen Temperaturen.
1 Anlieferungszustand.
2 kalt nach Wärmebehandlung bei 80° C, 3 Stunden lang.
3 kalt nach Wärmebehandlung bei 100° C, 3 Stunden lang.
4 kalt nach Wärmebehandlung bei 120° C, 3 Stunden lang.

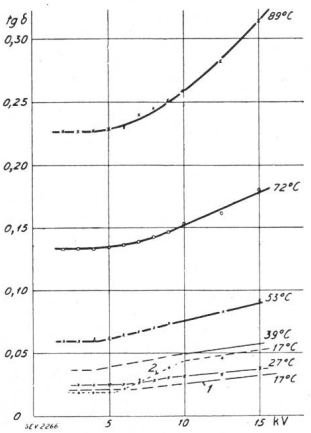


Fig. 14.
tg δ - Charakteristiken einer Maschinenspule aus Schellackmikanit bei verschiedenen Temperaturen.
1 Anlieferungszustand.
2 kalt nach Wärmebehandlung bei 89° C, 3 Stunden lang.

zutreffend. Im Gegenteil hat sich gezeigt, dass ein wesentlicher Lackgehalt unbedingt notwendig ist, um den Ionisationsknick auf eine hohe Beanspruchung zu verlegen.

V. Messungen an Maschinenspulen und Maschinenwicklungen.

1. Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten die grundlegenden Gesichtspunkte dargelegt wurden, die für die Isolierung von Maschinenspulen aus Mikanit massgebend sind, sei nun in diesem Abschnitt auf die Resultate näher eingegangen, die auf Grund dieser Studien an fertigen Maschinenspulen und Maschinenwicklungen erreicht wurden. Die erwünschten Eigenschaften sind die folgenden: Kleine Verluste und hoher Ionisationsknick, Temperaturbeständigkeit auch nach Dauererwärmungen auf die höchste Maschinentemperatur, also ca. 130° C. Als weiterer Punkt, der bisher noch nicht erwähnt wurde, ist noch zu nennen: Möglichste Glimmfreiheit der ganzen Maschinenwicklung bis zu hohen Spannungen. Dies betrifft hauptsächlich den Austritt der Spule aus der Nut, da diese Stelle diesbezüglich den schwierigsten Punkt der Wicklung darstellt. Ferner sind Glimmverluste zwischen der Spulenumwicklung und den Eisenblechen zu vermeiden.

2. Was nun den ersten Punkt dieser Forderungen anbelangt, so mögen die in Fig. 15 wiedergegebenen Messungen an einer Anzahl willkürlich aus der Fabrikation herausgegriffener Maschinenspulen die erreichte Qualität zeigen. Es handelt sich dabei um Maschinenspulen mit einer Wandstärke der

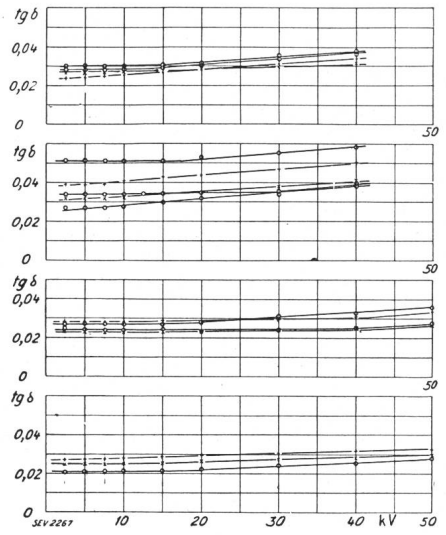


Fig. 15.
tg δ-Charakteristiken von serienmässig hergestellten Asphaltmikanit-Maschinenspulen.

Isolation von 4,5 bzw. 5 mm, für Generatoren von 11 bzw. 16 kV Betriebsspannung. Da mit dem Besteller die Abmachung getroffen wurde, dass von einem Ionisationsknick erst gesprochen werden kann, wenn der Anstieg des tg δ grösser ist als $0{,}4 \cdot 10^{-4}$ pro kV, kann festgestellt werden, dass bei diesen Spulen von einem Ionisationsknick bis zur Prüfspannung nicht gesprochen werden kann. Als Vergleich sei erwähnt, dass bei Schellackmikafolium gleicher Fabrikationsart der Ionisationsknick bei ca. 1,2 bis 1,5 kV/mm liegt. Die Spulen sind ausgebacken, also temperaturbeständig. Die Messungen wurden im einbaubereiten Zustand gemacht, ohne Abschirmung gegen Randentladungen des Messbelages. Es ist also möglich, Mikanitumwicklungen so zu fabrizieren, dass praktisch kein Ionisationsknick auftritt. Damit sind auch für diese Isolation Resultate erreicht worden, die sich mit den in der Einleitung erwähnten Fortschritten der Kabelfabrikation in die Parallele stellen lassen. Die Wege, die dazu beschritten werden mussten, waren allerdings ganz andere.

3. Zum Schutz der Spulenisolation gegen Entladungen beim Spulenaustritt verwendet die Maschinenfabrik Oerlikon Schutzeinlagen aus einem halbleitenden Belag nach dem Prinzip der kapazitiven Spannungsteilung. Zu diesem Zweck werden im Bereich des Spulenaustrittes aus der Nut halbleitende Beläge in die Mikanitisolation eingelegt, welche die Spannungsverteilung längs der Oberfläche der Spule vom Nutenaustritt bis zum Spulenkopf steuern.

Je nach der Anzahl dieser Einlagen und nach deren Lage innerhalb der Spulenisolation kann der Potentialabfall beliebig beeinflusst werden. Praktisch werden bei Spulen bis zu 5 mm Isolationsstärke nur 1 bis 2 Einlagen eingebaut. Mit einer Einlage kann die Glimmspannung, bei gleichzeitiger Anwendung eines halbleitenden Anstriches an der Oberfläche der Isolation, von ca. 12 kV auf 30 kV heraufgesetzt werden. Aber auch nach Ueberschreiten der Glimmspannung treten nur feine Streifenentladungen auf, welche die Oberfläche hauchdünn bedecken.

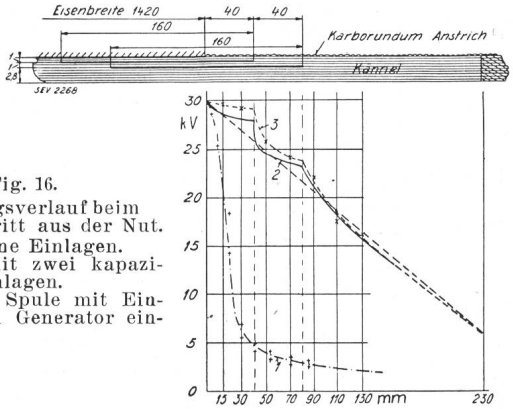


Fig. 16.
Spannungsverlauf beim Spulenaustritt aus der Nut.
1 Spule ohne Einlagen.
2 Spule mit zwei kapazitiven Einlagen.
3 Dieselbe Spule mit Einlagen im Generator eingebaut.

Büschelentladungen und Gleitfunken erscheinen erst bei einer Spannung von über 50 kV. Die günstige Wirkung dieser Schutzabschirmung gegenüber der normalen Spannungsbeanspruchung ohne Einlage zeigt Fig. 16. Die strichpunktierte Linie gibt den Verlauf der Spannung längs der Oberfläche der Spule ohne kapazitive, die ausgezogene Linie mit kapazitiver Einlage. Die gestrichelte Linie zeigt den Spannungsverlauf derselben Spule nach dem Einbau im Generator. In diesem Fall ist der Potentialverlauf infolge der Kapazität der Maschinenstirnseite gegen die Spule noch flacher. Der bedeutend kleinere Spannungsgradient einer Spule mit Einlagen erklärt deutlich das günstige Verhalten der Spule gegen Randentladungen beim Austritt aus der Nut.

4. Beim Messen der Verlustcharakteristik einer ganzen Generatorwicklung muss in Betracht gezogen werden, dass in diesem Falle nicht nur die Verluste innerhalb der Mikanitisolation, sondern in erster Linie der Glimmverluste der Wicklung im Spulenkopf, beim Spulenaustritt und zwischen der Spulenumwicklung und dem aktiven Eisen mitgemessen werden. Es lässt sich zum vorneherein nicht sagen, wie die Verluste auf diese einzelnen Stellen verteilt sind. Aus zahlreichen Messungen, die an Maschinenwicklungen der Maschinenfabrik Oerlikon gemacht wurden, konnte jedoch festgestellt werden, dass der Ionisationsknick in allen Fällen, wo nicht besondere Massnahmen gegen das Glimmen in der Luft, im Spulenkopf, beim Spulenaustritt und zwischen Spulenumwicklung und Eisen getroffen werden, der Ionisationsknick auf das Eintreten des Glimmens an diesen Stellen zurückzuführen ist. Der Ionisationsknick innerhalb der Spulenumwicklung lässt sich an normalen Maschinen nicht nachweisen.

Die Bedeutung der Verluste innerhalb der Spulenisolation und der übrigen Glimmverluste ist jedoch ganz verschieden. Während es sich bei den Verlusten innerhalb der Mikanitisolation, sobald diese auf das Glimmen der Luftschichten zurück-

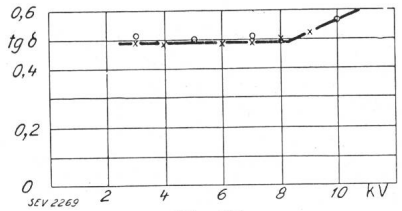


Fig. 17.
tg δ-Charakteristik der ganzen Wicklung eines Generators von 16800 kW, 10500 V, ausgerüstet mit Asphaltmikanitisolation.

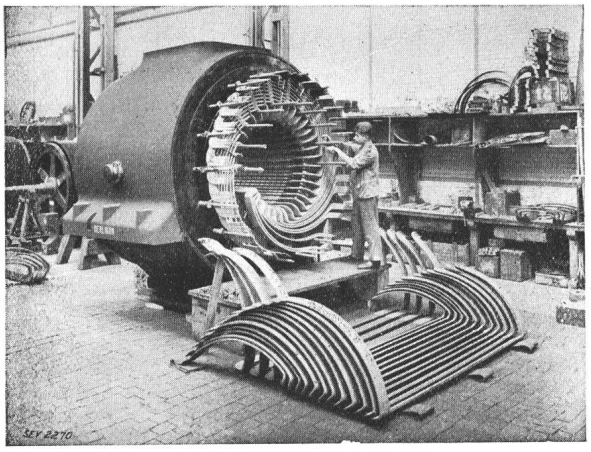


Fig. 18.
Stator des Generators von 16800 kW, 10,5 kV, beim Einbau der Spulen.

zuführen sind, um gefährliche Ionisationsverluste handelt, sind die Glimmverluste an den übrigen Stellen von viel geringerer Bedeutung. Diese Verluste können als Ableitungsverluste bezeichnet werden und tragen zu einer Erwärmung, die zu einem Durchschlag der Isolation führen könnte, nicht bei. Wir sind auf diese Verhältnisse näher eingetreten, da in neuester Zeit oft die Verlustmessung an ganzen Maschinenwicklungen verlangt wird, ohne dass diese Verhältnisse genügend beachtet werden.

Fig. 17 zeigt eine Verlustmessung bzw. eine tg-δ-Spannungscharakteristik an einer ganzen Maschinenwicklung eines Generators für 16800 kW und 10500 V Betriebsspannung. Es ist bemerkenswert, dass der Ionisationsknick oberhalb der Phasenspannung liegt. Der Generator glimmt also im normalen Betrieb nicht. Die Wicklung dieses Generators besteht aus Asphaltmikanit und hat die beschriebenen Einlagen. Ferner sei noch bemerkt, dass die Spulenumwicklung mit einem halbleitenden Anstrich versehen ist, der das Glimmen der Luftschichten zwischen Spulenisolation und Eisen gänzlich verhindert. Ein Bild dieses Generators mit den einbaubereiten Spulen zeigt Fig. 18.