

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	52 (1961)
Heft:	19
Artikel:	L'emploi du vide dans le séchage et le dégazage des câbles à haute tension
Autor:	Martin, G.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1059081

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: 16.01.2026

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

die angestrebte raschere Verdampfung der Feuchtigkeit im Innern der Isolation auf. Mit Hilfe des Ölaufbereitungskessels wird nun gleichzeitig in den getrennten Behältern das Öl hochwertig behandelt. Von Zeit zu Zeit kann das restliche Heizöl des Transformatoren mit dem aufbereiteten Öl des Behälters durchmischt werden. Nach der Trocknung des Transformatoren und des separaten Öles erfolgt die Vakuum-Ölimprägnierung des gesamten Transformatoren. Anschliessend kann

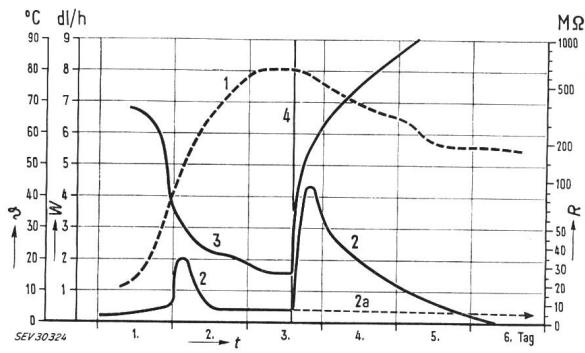


Fig. 7

Diagramm der Vakuumtrocknung eines umgebauten Transformatoren am Aufstellungsplatz

θ Temperatur; R Isolationswiderstand; W Wasserauffall; t Zeit
 1 Temperatur im Transformator; 2 ausgeschiedene Kondenswassermenge der Vakuumpumpe des Transformatoren; 2a Verlauf von 2 ohne Absenkung des Öles im Transformator; 3 Isolationswiderstand des Transformatoren (Oberspannung gegen Unterspannung und Eisen); 4 Absenken des Ölspiegels

L'emploi du vide dans le séchage et le dégazage des câbles à haute tension

Conférence donnée à l'Assemblée de discussion de l'ASE, le 16 mai 1961 à Zurich
 par G. Martin, Cossigny-Gare

533.5 : 621.315.2.027.3

Comparaison entre l'isolation des câbles et celle des transformateurs et étude de l'importance du séchage et du dégazage pour les câbles à masse, à huile et à pression de gaz. Enfin, description d'une installation moderne d'imprégnation des câbles à masse.

C'est l'invention de la presse à plomb par *François Borel* en 1879 qui a permis l'isolation des câbles selon une technique encore utilisée actuellement, car sans la protection d'une gaine métallique, le papier imprégné absorbe l'humidité et les gaz et perd rapidement ses qualités diélectriques [1] ¹⁾.

En 1881 déjà, pour l'exposition de Paris, *François Borel* réalisait un câble isolé par du jute imprégné d'un mélange d'huile et de colophane, protégé par une gaine de plomb.

Si le jute fut remplacé plus tard par du papier, l'isolation des câbles est toujours imprégnée par des huiles minérales et protégée par une gaine de plomb, comme cela se faisait il y a 80 ans. Je m'empresserai d'ajouter que si le principe n'a pas changé, la technique s'est considérablement améliorée depuis.

Contrairement à l'usage dans la fabrication des transformateurs, la viscosité des huiles employées pour les câbles varie énormément. Depuis les huiles ultrafluides des câbles à très hautes tensions jusqu'aux vaselines additionnées de polyisobutylènes et de cires microcristallines, en passant par les mélanges huile colophane, on couvre en effet à peu près toute l'échelle des viscosités.

Pour ce qui nous intéresse, ces différences de viscosité ne jouent qu'un rôle secondaire, car toutes les

¹⁾ Voir bibliographie à la fin de l'article.

er nochmals mit der gesamten Ölaufbereitungsanlage nachbehandelt werden.

Fig. 7 zeigt das Diagramm einer entsprechenden Trocknung. Man erkennt wie der Wasserauffall *W* zunächst bei steigender Temperatur, im besondern aber anschliessend nach dem Absenken des Ölspiegels stark ansteigt. Zugleich wird die angestrebte Erhöhung des Isolationswiderstandes *R* erreicht. Die gestrichelte Linie der Wasserausscheidung zeigt, wie die Trocknung ohne das Absenken des Ölspiegels verlaufen würde. Mit einer wesentlich längeren Behandlungszeit hätte der angestrebte Trocknungszustand kaum erreicht werden können.

Transformatoren können auch in Betrieb, somit unter Spannung, mit den Ölaufbereitungsanlagen behandelt werden. Dabei darf aber am Transformatoren selbst kein Vakuum auftreten. Schon bei kleinem Unterdruck kann das Isolieröl Gase ausscheiden, so dass Ionisationserscheinungen auftreten, die Zerstörungen an der Isolation zur Folge haben könnten.

Literatur

- [1] *Stoll, P.*: Die Aufbereitung und Regenerierung von Mineralölen unter besonderer Berücksichtigung der Transformatorenöle. Bull. SEV 52(1961)19, S. 764...770.
 [2] *Goldstein, A.*: Die Trocknung und Vakuumimprägnierung von Hochspannungstransformatoren und Messwandlern. Bull. SEV 52(1961)19, S. 757...764.

Adresse des Autors:

H. Hartmann, Ingenieur, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden (AG).

huiles minérales ont à peu près la même capacité, ou pour être plus juste la même incapacité de dissoudre l'eau [2].

Ces différentes viscosités se feront sentir dans la rapidité avec laquelle un papier imprégné reprendra l'humidité de l'air ambiant. La teneur en eau qu'atteint

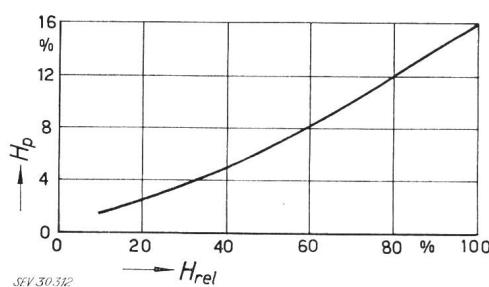


Fig. 1
 Valeur finale de la teneur en humidité du papier imprégné placé dans de l'air à 20 °C en fonction de l'humidité de l'air
 H_p Humidité dans le papier; H_{rel} Humidité de l'air

dra finalement un tel papier placé dans de l'air plus ou moins humide, ne dépendra pratiquement pas de l'imprégnant. Cette valeur finale est donnée à la fig. 1 pour une température de 20 °C. Cette reprise d'eau se fait selon une courbe exponentielle avec une constante de temps pouvant aller d'environ 1^{1/2} h pour du

papier imprégné à l'huile fluide, à 12 h pour un papier de câble à masse et 48 h pour du papier imprégné à la vaseline.

En ce qui concerne le papier, *A. Goldstein et P. Stoll* ont montré toute l'importance du séchage sous vide. Leurs conclusions sont aussi valables pour l'isolation des câbles, mais je voudrais attirer votre attention sur la particularité suivante: Le câble étant soumis à des mouvements, pendant la pose ou par suite des cycles d'échauffement, il faut conserver au papier une certaine souplesse pour éviter des cassures de l'isolation. Nous constatons que plus le papier est sec plus il est cassant. Il y a donc pour les câbles un certain danger de surséchage [3].

Des mesures faites par la méthode de *K. Fischer* ont montré que la quantité d'eau dans l'isolation d'un câble après plusieurs années de service aussi bien qu'au sortir de l'usine est de l'ordre de 0,1...0,5 %. Le chiffre supérieur correspondant aux jonctions et boîtes d'extrémité ou un travail fait à l'air libre a permis une reprise d'humidité. Un séchage avec un vide résiduel plus poussé que 0,2 mm Hg serait-il avantageux? Nous ne le pensons pas, car non seulement il pourrait être dangereux à cause du surséchage, mais il serait inutile, car de toute façon il se fait une certaine reprise d'humidité au montage.

D'autre part si nous comparons avec les teneurs en eau observées par *Fabre* [2] après des années de service, teneurs qui peuvent atteindre plus de 4 % dans l'isolation des transformateurs de puissance et 9 % dans les transformateurs de mesure, nous pouvons dire que d'une manière générale la teneur en eau des câbles est faible.

Le dégazage du papier et de l'huile avant l'imprégnation joue aussi un rôle très important. Comme nous pouvons le voir à la fig. 2 la tension de perforation au choc des papiers imprégnés, d'après *Thornton et Booth* [4], est fortement dépendante de la pression lors du dégazage. Dans cette figure les tensions de perforation données sont mesurées sur des feuilles de papier imprégné prises entre des électrodes plates, ce qui explique les valeurs très élevées jamais atteintes par l'isolation des câbles.

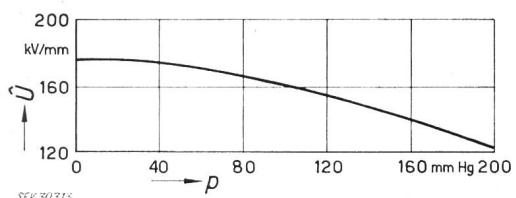


Fig. 2

Gradient de perforation au choc du papier imprégné U en fonction de la pression au moment du dégazage p

La surface des fibres de cellulose étant énorme, on admet qu'un cm^3 de papier a une surface qui peut aller jusqu'à 1000 m^2 [3], il reste toujours des molécules d'air accrochées à cette surface. Cet air restant se dissoudra dans l'huile à condition que cette dernière ait été suffisamment dégazée préalablement. C'est là que la très grande capacité d'absorption des gaz par l'huile minérale joue un rôle important. Il y aura donc intérêt à traiter l'huile avant l'imprégnation sous un vide aussi poussé que possible.

Lors du séchage du papier il faut lui fournir la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau. Ancienne-

ment cet apport de chaleur se faisait par convection en chauffant les parois de la cuve, ce qui prenait beaucoup de temps, car la quantité de chaleur à transmettre peut être considérable. Actuellement on a tendance à chauffer directement les câbles en faisant passer un courant dans les conducteurs, la température de ces conducteurs étant contrôlée en mesurant leur résistance ohmique.

Il est aussi possible d'employer la haute fréquence [5]. Dans ce cas la chaleur est produite directement dans le papier à sécher grâce aux pertes diélectriques. Ce procédé permet d'enlever en quelques heures le 90 % de l'eau. Le reste devant être extrait au moyen d'un vide poussé, il serait dangereux de conserver le chauffage diélectrique jusqu'au séchage complet, des surchauffements locaux pouvant se produire.

Le contrôle du séchage et du dégazage en cours de fabrication présente de grandes difficultés. Il est bien sûr possible de mesurer la capacité, les pertes diélectriques, la résistance d'isolement et la différence de température entre le cuivre et l'enveloppe du câble tout au long du séchage, mais ces indications sont difficiles à interpréter. La diminution de la capacité avec le séchage est très faible et demande des mesures de haute précision peu compatibles avec des procédés industriels. Les pertes diélectriques, bien que fortement dépendantes de la qualité du papier donnent des résultats intéressants à condition de s'en tenir aux valeurs relatives. La résistance d'isolement varie malheureusement trop avec la température pour que l'interprétation des résultats soit aisée. La mesure de la différence de température entre le cuivre et l'enveloppe du câble est très intéressante, que la source de chaleur soit à l'intérieur ou à l'extérieur du câble, tant que dure le séchage on constate une différence de température due à l'évaporation de l'eau. Cette différence cesse une fois le câble séché.

La méthode de contrôle la plus universellement employée consiste à fermer la vanne entre la pompe et le câble à sécher et à mesurer la remontée de la pression absolue dans le câble ou la cuve d'imprégnation. Si le séchage et le dégazage sont terminés, le vide se maintient pendant un temps donné en dessous d'une valeur prescrite.

Le contrôle sur le câble terminé se fera par la mesure des pertes diélectriques du câble lui-même, d'échantillons d'huile ou encore en mesurant directement la teneur en eau par la méthode de *K. Fischer*.

Pendant le montage des boîtes de jonction et d'extrémité il ne se fera pas seulement une reprise d'humidité, mais une grande quantité d'air sera absorbée par l'isolation.

Dans le cas des câbles à huile un traitement sous vide des boîtes avant leur remplissage permettra d'extraire cet air dissous. Par contre il est extrêmement difficile de ressortir l'eau du papier imprégné. Ceci ne peut se faire que par un lavage à l'huile sèche, mais comme l'huile ne peut absorber que quelques grammes d'eau par tonne, pour diminuer de 0,1 % la teneur en eau du papier, il faudra le laver avec environ 100 fois son volume d'huile.

Si nous considérons les câbles utilisés dans des réseaux à 60 kV et plus, nous constatons qu'ils sont de trois types différents: les câbles à masse, les câbles à l'huile et les câbles à gaz sous pression. En réalité tous sont isolés avec du papier imprégné avec de l'huile minérale plus ou moins fluide. Ce qui les différencie

ce sont les vacuoles ou si vous préférez les bulles de gaz qui peuvent se trouver dans le diélectrique. Dans les câbles à masse qui sont imprégnés avec un mélange d'huile et de colophane on est obligé d'admettre ces vacuoles qui se forment dès que le câble a été soumis à des cycles thermiques, c'est pourquoi le gradient maximum de fonctionnement est limité à environ 4 kV/mm. Ces câbles sont séchés et imprégnés en cuve, puis mis sous plomb. Dans ce cas le dégazage doit être suffisant pour assurer une résistance assez élevée à la perforation au choc.

Pour les câbles à huile fluide au contraire, on fait tout pour éviter ces vacuoles, ce qui nécessite des réservoirs de compensation pour la dilatation de l'huile. Le dégazage joue alors un rôle primordial. Le gradient maximum de fonctionnement variant entre 9 et 14 kV/mm suivant la pression utilisée, la moindre bulle de gaz serait immanquablement le siège d'une décharge par ionisation. Ces câbles sont généralement préséchés en cuve, mis sous plomb, puis séchés, dégazés et imprégnés sous plomb. Le séchage final et le dégazage sont très longs, la mise sous vide ne pouvant se faire que par les extrémités.

Il existe à l'étranger des installations permettant d'imprégnier ces câbles en cuve et de les mettre sous plomb sans que le diélectrique entre en contact avec l'air humide. Ceci a naturellement l'avantage d'accélérer considérablement la fabrication.

Enfin dans les câbles à gaz les vacuoles sont admises, mais le fait de les mettre sous pression permet d'élèver le gradient maximum jusqu'à 9 et même 10 kV/mm. Dans ce cas également le dégazage ne joue pas un grand rôle.

Ces câbles peuvent être fabriqués suivant deux techniques bien différentes. On peut les traiter comme des câbles à masse et les mettre sous pression soit en leur insufflant du gaz à l'intérieur, soit en les munissant d'une gaine présentant une certaine élasticité et en les plaçant dans un tube rempli de gaz sous pression. La deuxième solution consiste à isoler les conducteurs directement avec du papier préimprégné, à les mettre sous plomb puis à insuffler du gaz sous pression.

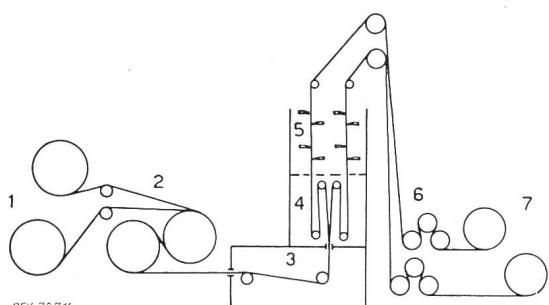


Fig. 3

Schéma d'une machine à préimprégner le papier

1 Double dérouleur; 2 Rouleaux de chauffage; 3 Cuve à vide; 4 Cuve d'imprégnation; 5 Couteaux racleur; 6 Rouleaux de tirage; 7 Double enrouleur

Dans ce dernier cas le papier est séché et imprégné sur une machine avant d'être coupé en rubans et guipé sur le conducteur. Cette machine (fig. 3) qui peut traiter deux papiers en même temps comprend: un double dérouleur, deux rouleaux de chauffage, une cuve à vide, une cuve d'imprégnation, des couteaux racleurs pour limiter la quantité de masse restant sur le papier et enfin des rouleaux de tirage et un double enrouleur.

Le séchage du papier se fait principalement sur les rouleaux chauffeurs, le passage sous vide a pour but d'assurer une imprégnation pratiquement totale du papier dans la cuve d'imprégnation avec une masse à base de vaseline.

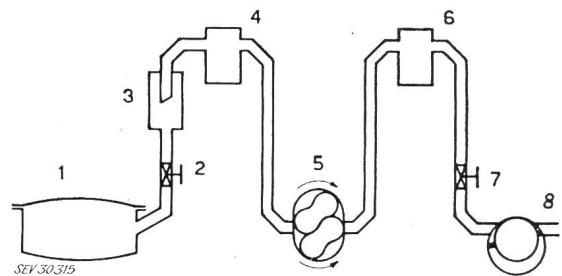


Fig. 4

Schéma d'une installation d'imprégnation de câbles à masse

1 Cuve d'imprégnation; 2 Vanne; 3 Retenue de masse; 4 Condenseur; 5 Pompe millitorr de 8000 m³/h à 10⁻¹ mm Hg; 6 Condenseur; 7 Vanne automatique; 8 Pompe à palette de 300 m³/h à 1 mm Hg

Pour terminer voyons comment se présente une installation moderne pour le séchage et l'imprégnation des câbles à masse (fig. 4). La cuve d'un diamètre de 4,9 m a une capacité de 22 m³, le vide est obtenu au moyen de deux pompes, une pompe préliminaire à palettes de 300 m³/h sous un vide de 1 mm Hg et une pompe du type millitorr ayant une puissance de pompage de 8000 m³/h sous un vide de 10⁻¹ mm Hg. La masse est séchée et dégazée de son côté par pulvérisation sous vide avant d'être introduite dans la cuve (fig. 5).

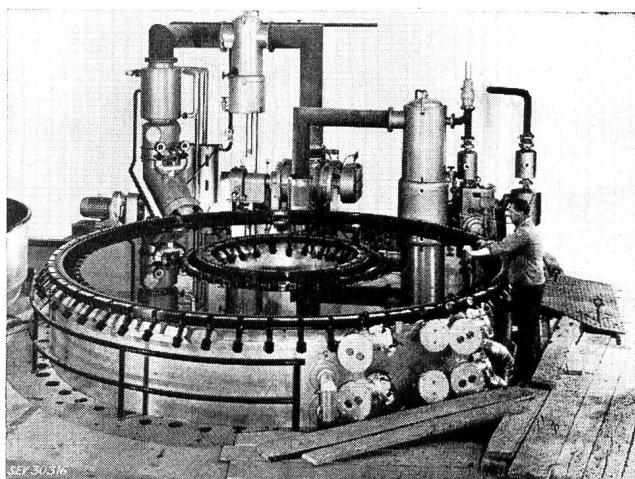


Fig. 5

Vue d'une installation d'imprégnation de câbles à masse

Cette installation permet par exemple de traiter 3,8 km de câble à masse 60/35 kV 1 × 240 mm², ce qui représente 7500 kg de papier à sécher. Si l'on admet que la teneur en eau du papier est de 8 % [6], ce sont 600 litres d'eau qu'il faudra évaporer. Pour porter à 100 degrés et évaporer ces 600 litres, il faudra leur transmettre 430 kWh en faisant passer un courant de 2...3 A/mm² dans le conducteur du câble. Une fois le séchage terminé, on remplit la cuve de masse préséchée sous vide et donne une surpression de 2 kg/cm² pour faciliter la pénétration de la masse dans les couches de papier.

Il serait beaucoup trop long d'attendre que ces 22 m³ de masse et de câble se refroidissent naturellement.

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] Emanueli, 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).

Vakuumimprägnierte 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

1. Einleitung

Vakuumimprägnierte 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 vakuumimprägnierte 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 Hochspannungsleitung bis heute behaupten konnte, haben Träger, Bindemittel und die Art ihrer Applikation sich verschiedentlich geändert.

2. Diskontinuierliche, nicht vakuumimprägnierte Isolationssysteme

In Europa werden seit etwa 50 Jahren die geraden Nutteile der Statorwicklungen mit Micafoliumumpressionsen 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 Lüftungsschlitzten 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 Kunsthärzbindemitteln 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-Ausnutzung 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) Es müssen die dielektrischen Konstanten aufweisen, welche erhöhte Spannungen ertragen und damit eine raschere Ermüdung des Dielektrikums zur Folge haben.