

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 58 (1967)
Heft: 11

Artikel: Entwicklung von modernen Hochspannungsisolationen
Autor: Nylund, K. / Möller, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916258>

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: 23.02.2026

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

Entwicklung von modernen Hochspannungsisolationen

Von K. Nylund und W. Möller, Zürich

621.3.048 : 621.3.027.3

Die Isolation begrenzt erfahrungsgemäss die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von elektrischen Maschinen. Der Wunsch nach widerstandsfähigeren und damit zuverlässigeren Isolationen sowie die stürmische Entwicklung von neuen Isolier- und Kunststoffen führte in den letzten Jahren bei den Herstellern von elektrischen Grossmaschinen zu einer intensiven Isolations-Entwicklung, die im folgenden beschrieben werden soll. Zunächst werden die Anforderungen an eine moderne Hochspannungsisolation geschildert. Auf Grund der ermittelten Anforderungen werden die Isolierstoffe ausgewählt, kombiniert und die Isolationen zunächst in normgemässen Versuchen im Laboratorium, sodann in Attrappen- und Prototypversuchen geprüft. Es werden ferner an einigen konkreten Beispielen die Möglichkeiten einer sachgerechten und rationellen Herstellung sowie einer vernünftigen Beurteilung der Isolation untersucht.

L'expérience prouve, que l'isolement limite la productivité et la durée de vie des appareils électriques. Le désir de disposer d'isolants toujours plus résistants et mieux éprouvés, ainsi que le développement de nouveaux isolants et de nouvelles matières synthétiques ont engagé les producteurs de grands appareils électriques dans une recherche intensive des isolants, décrite dans le chapitre suivant.

L'exposé relate d'abord les exigences qui doit satisfaire l'isolation à haute tension. Les isolants sont choisis et combinés en fonction de ces dernières, puis éprouvés dans des essais simulés ou dans des prototypes. A l'aide de quelques exemples concrets, la production rationnelle et l'appréciation de l'isolement sont également analysées.

1. Einleitung

1.1 Aufbau einer Hochspannungsisolation

Hochspannungsisolationen für Grossmaschinen und Magnetspulenwicklungen bestehen zumeist aus Glimmervlies- oder Glimmersplitting-Bändern, die mit Gewebebändern verstärkt und hohlraumfrei mit einer härtenden oder thermoplastischen Flüssigkeit imprägniert und verfestigt worden sind (Fig. 1).

1.2 Gründe für eine Neuentwicklung von Hochspannungsisolationen

Die Isolation einer elektrischen Maschine begrenzt weitgehend deren Belastung, Lebensdauer und Betriebssicherheit. Die in den ersten Nachkriegsjahren in Europa häufig aufgetretenen Betriebsausfälle an elektrischen Grossmaschinen waren zumeist auf Isolationsschäden infolge unzulänglicher Isolierstoffe und dauernder Überbeanspruchung zurückzuführen. Es handelte sich zumeist um Glimmerisolationen, die mit Bitumen bzw. Schellack verklebt, mit Baumwollbändern verstärkt und mit Hartgewebe, Hartpapier, Preßspan oder Holz verkeilt waren. Solche Werkstoffe werden aber bei mechanischer und elektrischer Überlastung relativ schnell zerstört.

Diese Erfahrungen und die Entwicklung von mechanisch wie thermisch beständigen Kunststoffen mit ausgezeichneten Isoliereigenschaften sowie mit entsprechender Verfahrenstechnik führten zu rationell herstellbaren, widerstandsfähigeren Hochspannungsisolationen grösserer Lebensdauer.

1.3 Arbeitsprogramm einer Isolationsentwicklung

Der erste Schritt in der Isolationsentwicklung ist die Ermittlung der praktisch gestellten Anforderungen. Um für die jeweiligen Anforderungen aus der Vielzahl der Materialien die angemessenste Kombination mit möglichst kleinem Aufwand zu finden, müssen zunächst durch eine systematische Materialprüfung die geeignetsten Werkstoffe ausgewählt werden. Die Materialien werden unter Berücksichtigung bestimmter Auswahlregeln miteinander kombiniert und nochmals normgerecht geprüft, um eine vergleichbare Beurteilung und Auswahl zu ermöglichen.

Die geeignetsten Materialkombinationen werden anschliessend im Vergleich mit der bisher verwendeten Isolation in möglichst praxisnahen Modellversuchen geprüft. Wenn die Ergebnisse im Einklang mit den systematischen Materialprüfungen und mit den praktischen Erfahrungen an der bewährten Isolation stehen, erlauben sie Rückschlüsse auf das voraussichtliche Betriebsverhalten der neuen Isolation.

Nachher müssen rationelle Verfahren gefunden werden, um die Isolation konstruktionsgerecht zu einer Wicklung zu verarbeiten. Dazu sind systematische, verfahrenstechnische Untersuchungen im Laboratorium und in einer Pilot-Plant erforderlich, um mit möglichst wenigen Prototypversuchen und ohne Betriebsstörungen die neue Isolation in die Fabrikation einzuführen. Die Fabrikation der Isolationen erfordert eine sorgfältige Planung mit einwandfreien und klaren Fabrikationsvorschriften, vor allem ein gut ausgebildetes, zuverlässiges Team, sachgerechte Einrichtungen und Verarbeitungsmaschinen sowie eine sorgfältige Überwachung der oft zahlreiche und aufwendige Stufen umfassenden Wicklungsfabrikation.

Die fertige Prototyp-Wicklung wird schliesslich, bevor sie für den Betrieb frei gegeben wird, den praktisch möglichen Grenzbeanspruchungen ausgesetzt und geprüft.

Das Verhalten der Wicklung unter den tatsächlichen Betriebsbedingungen ist sehr aufschlussreich für die Richtigkeit der Isolationsentwicklung und erlaubt aufgrund einer zuverlässigen Analyse des Betriebsverhaltens eine weitere Qualitätsverbesserung. An laufenden Grossmaschinen sind wegen des hohen Kosten- und Materialaufwandes, der erforderlichen Betriebssicherheit sowie wegen der langen Betriebs- und Amortisationszeiten umfangreiche Alterungsuntersuch-

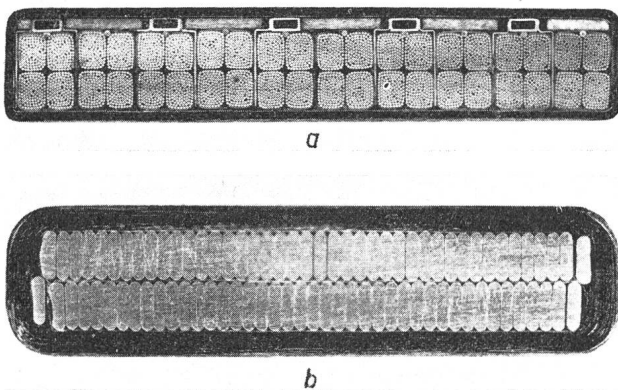


Fig. 1

Moderne Hochspannungsisolationen

a Schnitt durch eine Magnetspule; b Schnitt durch einen Roebelstab

ungen sowohl zur Betriebsüberwachung als auch für eine erfolgreiche Weiterentwicklung aussagekräftig und notwendig.

Die Kriterien bei derartigen Alterungsuntersuchungen sollen nicht allein danach ausgesucht werden, ob sie sicher gemessen werden können und sich ebenso systematisch wie eindeutig während der Beanspruchung ändern, sondern ob sie Alterungsschäden frühzeitig erkennen lassen. Denn nicht jede Alterungserscheinung bedroht die Wicklung und nicht jede Eigenschaftsverbesserung verlängert die Lebensdauer.

Als sehr wertvoll hat sich die visuelle Kontrolle erwiesen, die sowohl eine Ergänzung wie auch Bestätigung der messtechnischen Beurteilung ermöglicht.

2. Analyse der Anforderungen an Hochspannungsisolationen

Die Kenntnis der an die Isolation gestellten Anforderungen ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung alterungsbeständiger Isolationen. Man unterscheidet Eigen- und Fremdbeanspruchungen. Zu den Eigenbeanspruchungen, die sich weitgehend rechnerisch erfassen lassen, gehören die mechanischen Stöße beim Ein- und Ausschalten der Maschine, die Vibrationen, die Zug-, Scher- und Druckkräfte. Ferner sind zu den Eigenbeanspruchungen die elektrischen Spannungen zu zählen, die mechanische Spannungen induzieren sowie durch Glimmen die Isolation zerstören können. Vor allem verändern dauernde Wärmeeinwirkungen die Materialien und damit die Eigenschaften der Isolation häufig irreversibel in ungünstigem Sinne.

Dazu kommen die Fremdbeanspruchungen, die sich für den Hersteller zumeist nicht genau erfassen lassen und sich mit dem Anwendungsbereich ändern. Hierzu gehören aber auch mechanische Stossbeanspruchungen beim Einbau oder bei unregelmäßigem Betrieb der Wicklungen, lange Betriebsunterbrüche, Netzüberspannungen, Kurzschlüsse auf dem Netz, häufiges Ein- und Ausschalten und Fehlsynchronisationen. Diese Beanspruchungen wirken sich vor allem dann ungünstig auf die Lebensdauer aus, wenn keine oder nur unzulängliche Revisionen durchgeführt werden [1]¹⁾.

3. Auswahl und Prüfung der Isolierstoffe

3.1 Beständigkeit gegen mechanische Beanspruchungen

Bevor man aufgrund des Pflichtenheftes mit der Materialauswahl beginnt, müssen von allen in Betracht kommenden Werkstoffen möglichst viele Eigenschaften in vergleichbarer Weise erfasst werden. Das ist bei den zahlreichen nationalen Prüfnormen einerseits und dem internationalen Marktangebot andererseits nicht immer leicht. Besonders fehlt es heute noch an Kenntnissen über das Langzeitverhalten der handelsüblichen Isolierstoffe. Bevor über eigene Langzeitversuche berichtet wird, sollen die verwendeten Prüfmethoden kurz skizziert werden.

Die *Dauerstandsfestigkeit* lässt sich nach DIN 50117 und 50118 mit Hilfe von käuflichen Dauerzugseinrichtungen auch bei höheren Temperaturen bestimmen. Physikalisch lässt sich bei einer Dauerspannung die entsprechende Verformung in eine elastische, eine retardiert elastische und eine viskose Komponente gliedern und qualitativ durch ein idealisiertes 4-Parameter-Modell der Rheologie beschreiben und mathematisch durch ein mehr oder weniger kontinuierliches

Relaxationsspektrum darstellen [2]. Allerdings muss man bei der Dauerstandsfestigkeit von Kunststoffen berücksichtigen, dass sich im Gegensatz zu den metallischen Werkstoffen schon bei geringen Temperaturänderungen nicht nur die Relaxationszeiten sondern auch die Elastizitätsmoduln bzw. die Verformungen verändern. Es ist daher praktisch noch nicht möglich, nur aufgrund der in Kurzzeitprüfungen erhältlichen Eigenschaftswerte die Dauerstandsfestigkeit zu berechnen.

Die Wicklung bzw. Isolation wird jedoch nicht nur dauernd statisch sondern auch dynamisch beansprucht. Die *Dauerschwingfestigkeit* ist daher bei der Konstruktion von pulsierenden und rotierenden Wicklungen besonders gefragt und ebenfalls nur schwierig zu bestimmen. Bei der Prüfung nach DIN 50100 wurden gleichartige Proben zweckmässig gestaffelten, genau definierten Schwingbeanspruchungen unterworfen. Mit zunehmender Lastwechselzahl bzw. Beanspruchungszeit sinkt die Bruchspannung. Aus der Funktion zwischen Lastwechselzahl und Bruchspannung, in der graphischen Darstellung als Wöhlerkurve bekannt, kann man die Dauerschwingfestigkeit ermitteln. Die Ausfallwahrscheinlichkeit lässt sich aus der Wöhlerkurve für jede Belastung durch eine Lebensdauer- und Verteilungsfunktion erfassen. Die einzuhaltende Sicherheitsspanne kann aufgrund dieser Versuche annähernd berechnet werden. Der Dauerschwingfestigkeit können Biege-, Druck-, Zug-, Torsions- und allgemeine Schwingbeanspruchungen zugrunde liegen, die jeweils unterschiedliche Werte ergeben.

Neben der Zeit, der mechanischen Spannung und der Temperatur wird die Dauerschwingfestigkeit wegen der Dämpfung entscheidend auch von der Frequenz des Lastwechsels bestimmt. Für ein brauchbares Ergebnis sind daher zahlreiche Proben notwendig. Ein durch Frequenzerhöhung geraffter Dauerschwingversuch ist problematisch, da seine Ergebnisse zumeist nicht auf kleinere Frequenzen übertragbar sind. Dies gilt besonders für Werkstoffe, die im Bereich der Prüfungstemperatur ein Dämpfungsmaximum aufweisen, wie von Matting [3] an glasfaserverstärkten Polyester- und Epoxydharzen gezeigt wurde.

Lamine aus Epoxydharzen ergeben wegen der geringeren und im Prüfbereich weitgehend temperaturabhängigen Dämpfung wesentlich höhere Dauerschwingfestigkeiten als Polyesterharz-Lamine. Bei Isolationen wird die Dauerbeanspruchung weniger durch die Scheitelspannung als vielmehr durch die Amplitude der Verformung bestimmt, weil sich der Konstrukteur vor allem für die konstruktiv gegebenen möglichen Verformungen interessiert. Die Dauerschwingfestigkeit von Laminen für Wicklungsisolationen wird am zweckmässigsten an isolierten Hochspannungsstäben bestimmt (vgl. Abschnitt 5), weil sich die Dauerschwingfestigkeit nur aus der Art und Weise sowie Form des Isolationsverbandes ergibt.

Auch die *Zugscherfestigkeit* in Schichtrichtung kann recht brauchbare und schnell zu ermittelnde, aber nur relativ zu wertende Hinweise auf die Dauerschwingfestigkeit von Schichtstoff-Isolationen liefern. Allerdings besitzt der Zugscherversuch einen unvergleichlich geringeren Informationswert als der Dauerschwingversuch, der zu den schwierigsten, umfangreichsten und langwierigsten Materialprüfungen gehört.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

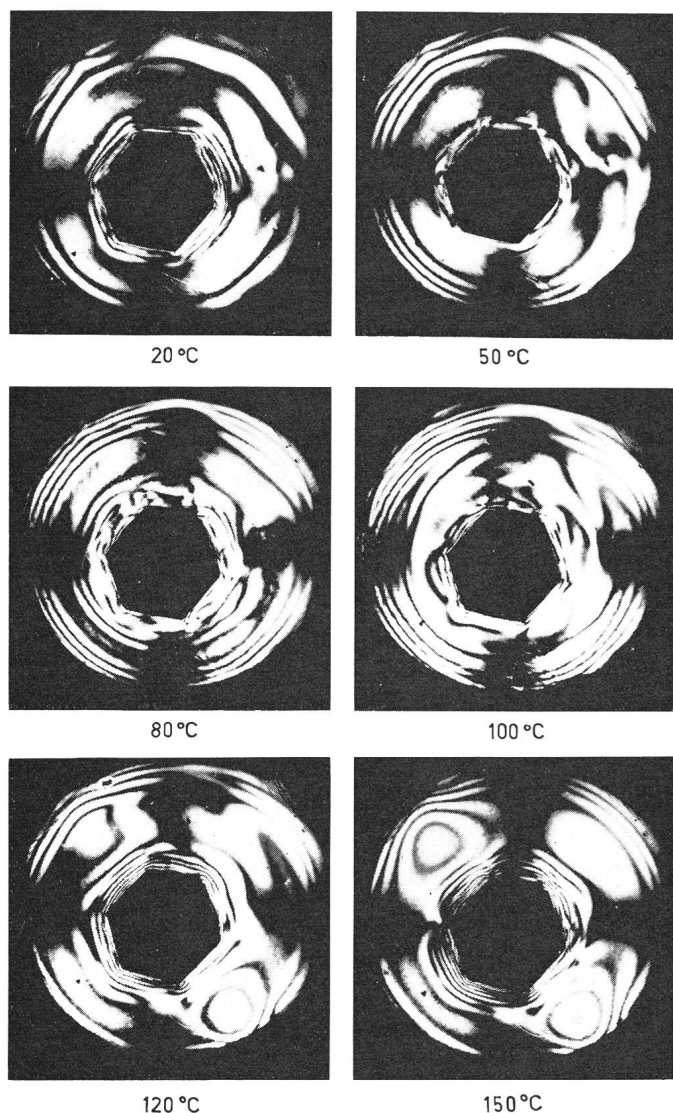


Fig. 2
Navy-hox-bas-Test-Prüfkörper aus einem Epaxyd-Polyaminoamid-Harz in der Aufsicht im polarisierten Licht bei verschiedenen Temperaturen

Vielmehr als durch dauernd angreifende äussere Spannungen können Isolationen durch die bei Kälte- und Hitzeschocks auftretenden Expansionen und Dilatationen mechanisch bis zur Rissbildung beansprucht werden [4]. Solche Beanspruchungen treten z. B. bei Fahr-, Seilbahn-, Pumpenmotoren und manchmal auch bei Freiluftisolatoren auf. Bei reinen Kunstharzisolationen beträgt der Ausdehnungskoeffizient gegenüber dem des Kupfers etwa das Dreifache unterhalb und häufig das Acht- bis Zehnfache oberhalb der Erweichungstemperatur. Durch die dadurch auftretenden Spannungen kommt es leicht zum Abscheren des Harzes vom Kupfer. Je enger der Erweichungsbereich des Kunstharzes desto leichter können sich durch geringe Temperaturschwankungen Spannungsspitzen aufbauen. Erwünscht ist daher ein möglichst kleiner Temperaturkoeffizient des Elastizitätsmoduls im Erweichungsbereich des Harzes. Oberhalb des Erweichungsbereiches verhält sich das Harz gummielastisch, d. h. die Spannungen können sich verteilen aber nicht auflösen. In Fig. 2 werden im polarisierten Licht aufgenommene Photos von zylindrischen ausgehärteten Formgußstücken mit eingegossenen Sechskantschrauben bei verschiedenen Temperaturen wiedergegeben. Das Harz hat eine Erweichungstemperatur von ca. 40 °C und wurde bei der

Härtung auf ca. 50 °C erwärmt. Fig. 2 zeigt, dass bei der Geliertemperatur die Isochromatenzahl und damit die inneren Spannungen minimal sind. Photothermoelastische Untersuchungen können jedoch nur an transparenten Formgußstücken durchgeführt werden. Die dadurch ermittelte Spannungsverteilung darf aufgrund der Ähnlichkeitsbeziehung der Elastizitätslehre in gleicher Weise auf gleichdimensionierte, mit Mineralmehl gefüllte Gußstücke übertragen werden, wenn annähernd idealelastisches Verhalten vorliegt [5]. Der kleinere Ausdehnungskoeffizient der gefüllten Formgußstücke wird im allgemeinen durch den höheren Elastizitätsmodul ausgeglichen, wie die Berechnung sowie die praktischen Erfahrungen zeigen.

Mit Hilfe der Photothermoelastizität lassen sich bei neuen Konstruktionen durch Modellversuche die Spannungsverteilungen bestimmen und entsprechend günstig gestalten. Auch zur Prüfung der Rissbeständigkeit von Giessharzen sind Untersuchungen an zylindrischen Giesskörpern mit eingegossenen Sechskantschrauben nach einer Navy Test Mil-Norm im polarisierten Licht sehr brauchbar. Die Prüfkörper werden zuvor abwechselungsweise mit einem heissen und kalten Medium, z. B. Wasser bei 100 °C/0 °C, hinreichend lange (30 min) schockartig behandelt und auf Risse geprüft. Besonders häufig treten am Schraubenkopf, also an Kanten und Ecken, Scheibenrisse auf.

Diese Untersuchung bewährte sich besonders bei der Entwicklung von rissbeständigen Kunstharz-Mischungen. Sie zeigte ferner, dass innere Spannungen bei Kunstharzen vermieden werden können: durch niedere Geliertemperaturen, durch weitgehende Härtung oberhalb der Erweichungstemperatur, durch flexible Komponenten, die den Temperaturkoeffizienten des Elastizitätsmoduls im Erweichungsbereich herabsetzen und schliesslich durch Verwendung von Isolationskomponenten mit nahezu gleichen linearen Ausdehnungskoeffizienten.

3.2 Thermische Beständigkeit

Nicht nur durch Temperaturschwankungen sondern vor allem durch dauernde Wärmeeinwirkungen können Kunststoff-Isolationen zerstört werden.

Die thermische Alterungsbeständigkeit der modernen Hochspannungsisolationen ist daher entscheidend für ihre Funktionstüchtigkeit und Lebensdauer. Um die Materialien angemessen auswählen zu können, wurden an den für eine Hochspannungsisolation in Betracht kommenden Kunstharzen, Schichtpreßstoffen, Lacken, Lackdrähten, Isolierbändern und an Isolierpapieren Alterungsuntersuchungen durchgeführt. Im Prinzip wurden stets die technologisch wichtigsten Eigenschaftswerte in Abhängigkeit von der Zeit bei drei gegeneinander abgestuften Temperaturen bestimmt. Man erhält so die Eigenschaftskurven, aus denen man jeweils diejenige Alterungszeit entnimmt, nach der die Eigenschaftsänderungen eine bestimmte Toleranzgrenze, d. h. den Eigenschaftsgrenzwert, erreichen. Als Alterungskriterien eignen sich bei den Harzen und Schichtpreßstoffen vor allem der Gewichtsverlust, der Schwund, die mechanischen Festigkeiten sowie das Temperaturverhalten des Elastizitätsmoduls und der dielektrischen Verluste.

Trägt man die Zeiten, in der die Eigenschaftswerte erreicht werden, im logarithmischen Maßstab gegen die zuge-

Chemischer Aufbau		Temperatur °C						
		80	100	120	140	160	180	200
Phenol-Formaldehyd Harze	nicht modifiziert	-----						
	Ölmodifizierung	-----						
	Alkydmodifizierung	-----						
	Siliconmodifizierung	-----						
Polyurethan-Harze	nicht modifiziert	-----						
	Polyesterharzmodifizierung	-----						
	Epoxydharzmodifizierung	-----						
Ungesättigte Polyesterharze	Phthalsäure-Maleinsäure-Glykol-Typ	-----						
	Adipinsäure-Isophthalsäure-Glykol-Typ	-----						
	Bisphenol-A-Glykol u. Dialkylphthalat Typen	-----						
	„Alkyd“ Typ	-----						
Kohlenwasserstoff-Harze	Butadien-Styrol-Copolymerisat	-----						
Epoxydharze Bisphenol-A-Typ	mit Anhydrid-Härter	-----						
	mit aromat. Amin-Härter	-----						
	mit aliphat. Amin; BF ₃ Amin- und Polyamid-Härter	-----						
	mit Anhydrid-Härter	-----						

Polyimide-Esterimide		-----						
Siliconharze	Alkydmodifizierung	-----						
	Polyphenylmethylsiloxan	-----						
Siliconelastomere	linearer Polysiloxantyp	-----						

Grenztemperaturen von Kunstharzen ermittelt an: ----- Harzfilmen — VSM-Harzstäben
 VSM-Schichtpreßstoffstäben (30 % Harz)

hörigen absoluten Alterungstemperaturen auf, so erhält man die Gebrauchsdauerkurven, deren 25 000-h-Temperatur vereinbarungsgemäss [6] als Grenztemperatur bezeichnet und als Mass für die Alterungsbeständigkeit angesehen wird. Tabelle I zeigt für verschiedene Kunstharze, Lacke und Schichtpreßstoffe die Grenztemperaturen. Diese Untersuchungen wurden an anderer Stelle näher beschrieben [8]. Bei den Lacken geben die Gewichtsverluste, Durchschlagsfestigkeiten und Rissbildung, bei den Lackdrähten die Haftung, die «heat shock» Beständigkeit und die Durchschlagsfestigkeit Auskunft über die Alterungsbeständigkeit. Ausser an einzelnen Drähten liefert besonders die Alterungs-Untersuchung an Twist-Drahtproben sowie an Motoretten unter elektrischer Spannung und Feuchtigkeitseinwirkung für die Praxis wertvolle Aussagen. Allerdings sind die Motoretten-Prüfungen schon sehr parameterreich und daher für die Materialprüfung aufwendig.

In Tabelle II wurden die Ergebnisse einer Alterungsuntersuchung nach Drahtlacktypen angegeben. Die Dauergebrauchskurven erlauben nicht nur einen qualitativen Vergleich, sondern, wenn sie auf einen bewährten Drahtlack mit bekannter Wärmebeständigkeit bezogen werden, die höchstzulässige Dauergebrauchstemperatur abzuschätzen.

Durch eine künstliche Alterung ist aber nur dann eine vergleichbare Beurteilung der Alterungsbeständigkeit möglich, wenn die Beanspruchungen annähernd den praktischen Verhältnissen entsprechen. So zeigt z. B. Fig. 3, dass beim gleichen Lackdraht-Typ durch eine nachträgliche Kunstharz-Imprägnierung die Dauerwärmebeständigkeit vermindert werden kann. Die künstliche Alterung darf aber andererseits nicht mit Parametern überladen werden. Die Beanspruchung muss zumindest genau reproduzierbar und möglichst mathematisch erfassbar sein, damit systematische Materialvergleiche sowie Voraussagen durch Extra- bzw. Interpolationen möglich sind.

3.3 Elektrische Alterungsbeständigkeit

Isolationen versagen in der Praxis manchmal bei wesentlich niedrigeren Spannungen als man aufgrund der Durchschlagfestigkeiten der verwendeten Isolierstoffe erwarten darf. Diese Diskrepanz erklärt sich einmal daraus, dass die Durchschlagfestigkeiten an Werkstoffen unter optimalen Verhältnissen im homogenen Feld bestimmt werden, während auch bei sachkundig konstruierten Isolationen mit inhomogenen Feldern gerechnet werden muss. Zum anderen können Verunreinigungen durch Metallflitter, Elektrolyte oder durch Alterungsprodukte eine Ionenwanderung und einen Wärmedurchschlag infolge des heterogenen Feldes und der mit zunehmender Stromwärme steigenden Leitfähigkeit verursachen. Auch die bei hohen Feldstärken auftretenden Glimmentladungen an den Isolationsoberflächen sowie die damit verbundene Bildung von Ozon und nitrosen Gasen können infolge chemischer Veränderungen zu einer Abnahme der Durchschlagspannung führen, wie dies Fig. 4 an einer Folienisolation zeigt.

Vor allem aber können innere und äussere Glimmentladungen eine Zersetzung von Materialkomponenten, Aufspaltung der Schichtstoff-Isolationen und Auflockerung des ganzen Isolationsverbandes bewirken, was wiederum zu einer beschleunigten thermisch-mechanischen Alterung führt. Es ist deshalb sehr wesentlich, in speziell gebauten Glimmzellen die Glimmbeständigkeit von Isolierstoffen und einfacheren Kombinationen aus Isolierstoffen zu untersuchen. Fig. 5 zeigt eine Glimmzelle, deren Elektroden und Prüfanordnung den Empfehlungen des CT 15 der CEI ²⁾ entsprechen [9].

Die äusseren Isolationsoberflächen sollen nicht nur gegen Glimmentladungen, sondern auch gegen Kriechströme beständig sein. Eingehende Alterungs-Untersuchungen an Isolierstoffen zeigten, dass die Kriechwegbildung nach bestimmten Alterungszeiten, die charakteristisch für die je-

²⁾ Comité Technique 15 (Matériaux isolants) der Commission Electrotechnique Internationale.

Drahtlack-Typ	Temperatur °C							
	80	100	120	140	160	180	200	220
Polyvinylformal								
Polyäthylenterephthalat								
Siliconharze								
Polyamidimid								
Polyamidimid mit Polyäthylenterephthalat								
Polyamidimid mit Polyvinylformal								
Polyimid								

weiligen Stoffe sind, plötzlich auftreten und in Beziehung zu den durch die Kriechströme gebildeten halbleitenden Abbauprodukten stehen [7]. Allerdings dürfen die in der Prüfung ermittelten Kriechwegfestigkeiten nur als relative Richtwerte interpretiert werden, weil die normgemässen Beanspruchungen selten auch in der Praxis zu finden sind.

Neben diesen von äusseren Einflüssen abhängigen Eigenschaftsänderungen treten auch im $\tan\delta$ -Temperaturverhalten Änderungen auf. Fig. 6 zeigt, dass sich das Debye-Maximum der $\tan\delta$ -Temperatur-Funktion mit zunehmender Alterungstemperatur und -zeit sich zunächst nach höheren Temperaturen verschiebt, weil durch die zunehmende Vernetzung und sterische Ordnung die Beweglichkeit der verantwortlichen polaren Molekülgruppen in zunehmendem Masse eingeschränkt wird. Das Debye-Maximum sowie das folgende Gebiet der Ionenleitung sollten stets eindeutig oberhalb der Temperaturklasse der Isolation liegen, um extreme dielektrische Verluste und die hierdurch möglichen Wärmedurchschläge zu vermeiden.

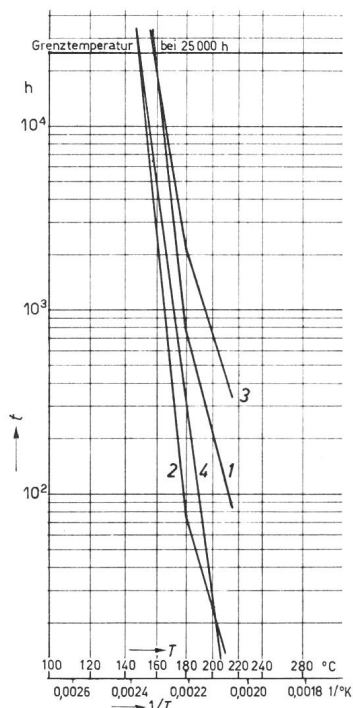


Fig. 3
Prüfung von Lackdrähten

Dauer der Prüfzeit t in Funktion der Temperatur T (bei einer Prüfspannung von 3 kV), bis 30 % der Prüflinge ausgefallen sind
1 PETP-Lackdraht-Twist ohne Bindemittel; 2 PETP-Lackdraht-Twist mit Araldit CY 205/HY 905; 3 PETP-Lackdraht-Twist mit Glimmervlies-Glasgewebe-Harz (Orlithermharz); 4 PETP-Lackdraht-Twist mit Siliconharz verklebt

3.4 Beständigkeit gegen Bestrahlung

Moderne Hochspannungsisolationen werden z. B. in Forschungselektromagneten einer mehr oder weniger energiereichen, ionisierenden Strahlung ausgesetzt, die bis zu 10^4 Mrad betragen kann, während z. B. die für einen Menschen tödliche Dosis bei 10^{-4} Mrad liegt. Ein Mrad entspricht einer Energieaufnahme von 10^3 erg/g bzw. 2,8 Wh/kg. Die technisch wichtigen Strahlenarten wie Gamma-, Elektronen-, Protonen- und die meisten Neutronenstrahlen verändern erfahrungsgemäss gleichartig die Isolierstoffe. Das Ausmass der Einwirkung hängt von der Dosis und bei manchen Werkstoffen auch von der Dosisleistung ab. Die höchstzulässige Strahlendosis, bei der die empfindlichste Eigenschaft sich

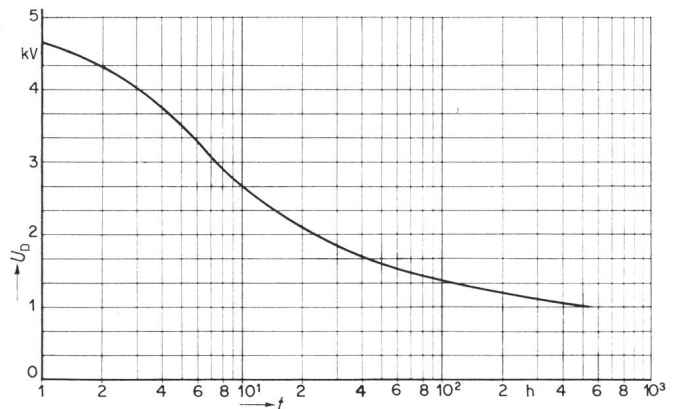


Fig. 4
Durchschlagspannung U_D einer Folienisolation in Funktion der Belastungszeit t

unzulässig (vereinbarungsgemäss 25...50 %) verändert hat, liegt bei den Isolierstoffen zwischen 0,1 und 10^5 Mrad. Die Strahlenbeständigkeit einer Isolation und damit die Betriebssicherheit der zumeist sehr aufwendigen Kernforschungsanlagen hängt weitgehend von der Auswahl und sachgerechten Kombination der Werkstoffe ab, umso mehr als aus wirtschaftlichen und zeitlichen Erwägungen sowie aus Sicherheitsgründen nur selten Strahlenbeständigkeitsuntersuchungen bis zu 10^5 Mrad an Prototypen möglich sind.

Aber auch die Bestimmung der Strahlenbeständigkeit der Werkstoffe ist bei den interessierenden Strahlendosen nicht nur sehr aufwendig und langwierig sondern auch problematisch, weil die für die Praxis wichtigen Veränderungen während der Bestrahlung infolge von Intensitätsschwankungen sowie durch zusätzliche elektrische oder mechanische Beanspruchungen verursacht werden können. Glücklicherweise wurden von den nichtmilitärischen Bestrahlungsuntersuchungen an Kunststoffen in den USA, in England und anderen Ländern umfangreiche und detaillierte Ergebnisse im letzten Jahrzehnt veröffentlicht [10]. Sie bestätigen, dass die Strahlenbeständigkeit weitgehend von der chemischen Struktur bestimmt wird und daher eine Klassifizierung möglich ist. Allerdings lässt sich die Strahlenbeständigkeit durch eine Modifizierung des Werkstoffes z. B. durch bestimmte Zusätze von Antioxydantien, von sog. aromatischen Stabilisatoren, gelegentlich auch von UV-Absorbern, Glimmerpulver, Aluminiumoxyd oder Russ wesentlich verbessern [10], durch Wärme und andere Faktoren verschlechtern. Es wurde darum eine besonders strahlenbeständige Imprägnierharz-Kombination für Magnetspulenisolationen entwickelt

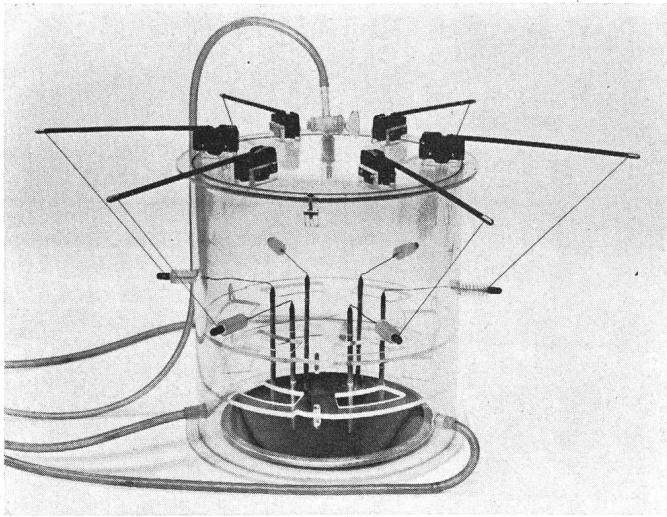


Fig. 5
Glimmzelle gemäss den Empfehlungen des CT 15 der CEI²⁾

(Fig. 7, Kurven 2 und 4), die nach einer Bestrahlung von $5 \cdot 10^9$ rad sogar in der Biegefestigkeit keine Eigenschaftsänderungen aufwies [13].

3.5 Beständigkeit gegen Feuchtigkeit und Wasser

Hochspannungs- und vor allem Magnetisolationen müssen häufig auch in Gegenwart von Kondenswasser und gegen Kühlwasser funktionsfähig bleiben. Durch hydrophob wirkende Zusätze, durch eine Verbesserung der Spaltfestigkeit und durch einen praktisch wasserundurchlässigen, schlagwie rissfesten Wasserschutzmantel konnte eine Hochspan-

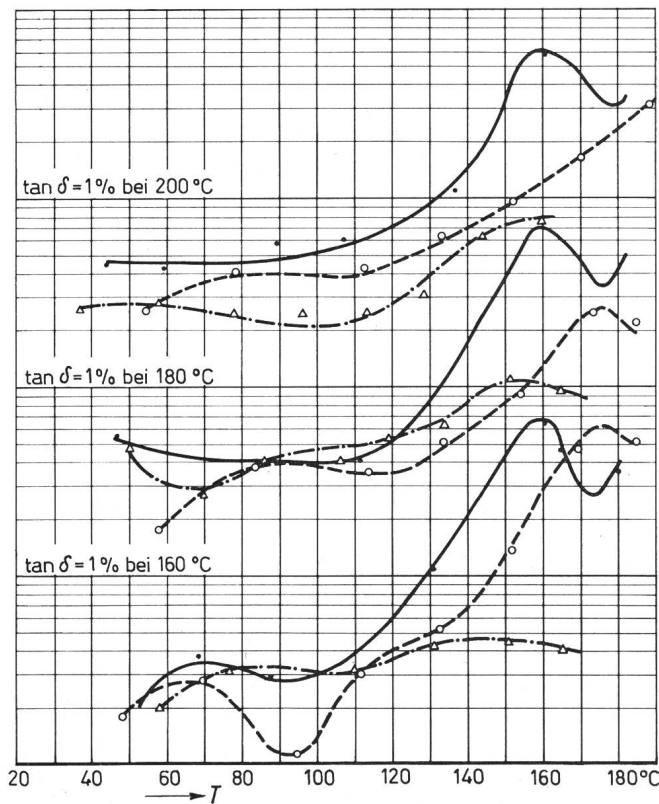


Fig. 6
Temperatur-Verhalten des Verlustfaktors $\tan \delta$ eines Epoxydharz-Formstoffes vor und nach einer thermischen Alterung bei 160, 180 und 200 °C
T Temperatur
Thermische Alterung:
— 1 Tag; —○— 30 Tage; —△— 180 Tage

nungsisolation mit ausgezeichneter Wasserbeständigkeit entwickelt werden.

4. Aufbau der Isolationen aus verschiedenen Isolierstoffen [11]

Bei der Prüfung und Klassifizierung der Isolierstoffe setzt man voraus, dass sie sich während der Verarbeitung zu Isolationen sowie im Betrieb nicht verändern und sich ihre Eigenschaftsbeiträge im Isolationsverband daher abschätzen lassen. Wird der Isolierstoff jedoch im physikalischen oder chemischen Aufbau verändert, so können die Eigenschaften des Isolationsverbandes nicht mehr vorausbestimmt werden. Durch Quellung, Kristallisation, Verdampfen einzelner Komponenten, durch Oxydation, Dehydratisierung, Dehydrierung, Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation oder durch einen anisotropen Aufbau der an der Isolation

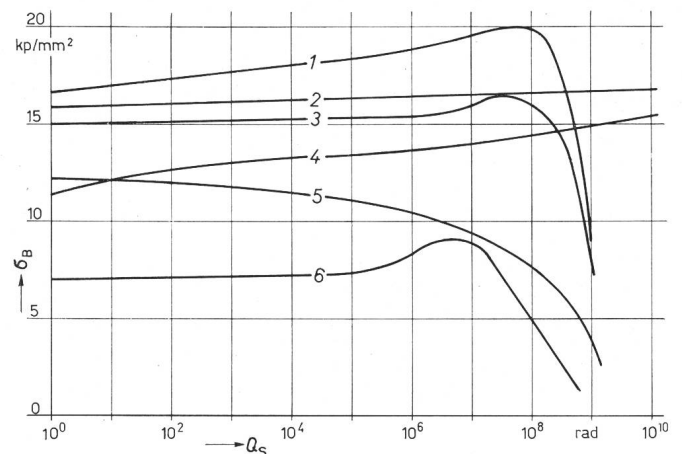


Fig. 7
Biegefestigkeit σ_B in Funktion der Strahlendosis Q_S
1 Samica-Glasgewebe mit Araldit CY 205/Hexahydrophthalsäureanhydrid; 2 Samica-Glasgewebe mit Spezialharz für Magnetspulen; 3 Araldit CY 205/Hexahydrophthalsäureanhydrid; 4 Spezialharz für Magnetspulen; 5 Araldit CT 200/Phthalsäureanhydrid/Quarzmehl; 6 Araldit CY 230/Triäthylentetramin

beteiligten Isolierstoffe ergeben sich die Isolatioeseigenschaften nicht mehr aus der Summe der verwendeten Werkstoffe. Neue Eigenschaftsprüfungen unter praxisnahen Bedingungen sind daher nötig.

So wurde die Dauerstandsfestigkeit bei erhöhter Temperatur und die Dauerschwingfestigkeit unter elektrischer Spannung verschiedener Isolationen der Maschinenfabrik Oerlikon bestimmt und einige Ergebnisse in Fig. 8 und 9 wiedergegeben (vgl. Abschnitt 5).

Fig. 8 zeigt, dass die zeitliche Verformung oberhalb der Erweichungstemperatur des Laminates bzw. Isolation wesentlich zunimmt, d. h. die Dauerstandsfestigkeit erheblich abnimmt.

Bei Isolationen, die im Einsatz hoher Feuchtigkeit oder Wasser ausgesetzt sind, wird während einer längeren Wasserlagerung der Isolationswiderstand gemessen, der auch nach mehreren Wochen nicht wesentlich abnehmen darf. Haarrisse vermindern nicht nur die Wasserfestigkeit sondern ermöglichen bei hohen elektrischen Feldstärken Glimmerscheinungen, wodurch die Isolation und auch der Leiter chemisch angegriffen werden [11b].

In der Praxis werden die modernen Hochspannungsisolationen nicht nur mechanisch-elektrisch sondern zusätzlich

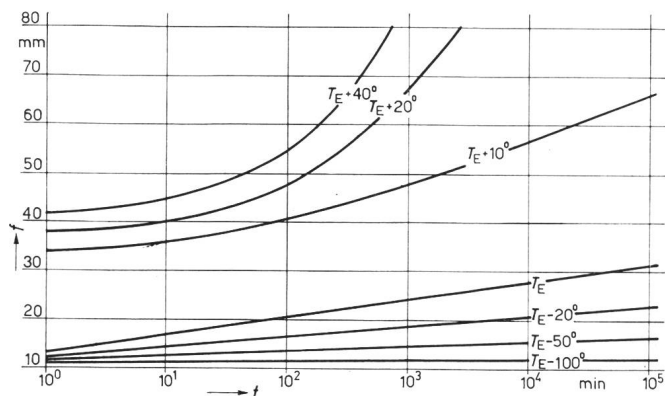


Fig. 8
Verformbarkeit einer Hochspannungsisolation in Funktion der Belastungszeit t bei verschiedenen Temperaturen
 f Durchbiegung; T_E Erweichungstemperatur

thermisch beansprucht. Daher wurde der Verformung unter mechanischer Dauerspannung in Funktion von der Betriebstemperatur und der Zeit besondere Beachtung geschenkt (Fig. 8).

5. Anwendungstechnische Prüfungen an den Isolationen

Die Eigenschaften der Isolierstoffkombinationen ergeben sich nicht immer aus denen der Komponenten und müssen daher ermittelt werden. Allerdings dient die Prüfung der Isolation nicht so sehr der Auswahl als vielmehr dazu, die Eignung unter den voraussichtlichen praktischen Beanspruchungen beurteilen zu können. Ohne grossen Aufwand ist es in dieser Entwicklungsstufe noch möglich, die Isolation durch eine geeignete Modifizierung der jeweiligen Anwendung anzupassen. Die für die Entwicklung von modernen Hochspannungsisolationen sehr wichtige anwendungstechnische Prüfung umfasst die Bestimmung des Kurz- und Langzeitverhaltens unter den Fabrikations- und Betriebsbedingungen. Allerdings sollte die Prüfung nicht allzu parameterreich sein, um den Aufwand verantworten und eine sinnvolle systematische Auswertung mit einwandfreier Aussage ermöglichen zu können.

Besonders bewährt haben sich Bestimmungen des $\tan \delta$ -Niveaus, des $\tan \delta$ -Anstieges und seiner Temperaturabhängigkeit. Hiedurch kann vor allem die Herstellungsqualität beurteilt werden.

Auch die Zeit- sowie Temperaturfunktionen des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeiten unter elektrischer Spannung geben wichtige Hinweise für die Praxis und können dem Konstrukteur als Berechnungsunterlagen dienen.

Die thermischen, elektrischen und thermoelektrischen Langzeitprüfungen sind zur Beurteilung des Betriebsverhaltens bzw. Eignung der Isolation ausserordentlich aufschlussreich. Diesbezügliche Versuche zeigen, dass moderne Kunstharz-Isolationen in der Wärmeklasse F eingesetzt werden dürfen. Allerdings müssen moderne Isolationen als tragende Konstruktionselemente auch hohe mechanische Beanspruchungen aushalten. Der Konstrukteur muss daher auch die Dauerschwing- und Dauerstandfestigkeit der Isolation kennen, um richtig dimensionieren zu können. Besonders wichtig ist bei den Hochspannungswicklungen, die pulsierenden Beanspruchungen ausgesetzt sind, eine hinreichende Dauerschwingfestigkeit. Diese lässt sich nach dem Wöhlerverfahren bestimmen. Allerdings wurde die Bruchfestigkeit nicht, wie üblich, der Lastwechselzahl bei sichtbarem Bruch

sondern bei elektrischem Durchschlag zugeordnet, der schon beim ersten Haarriss anspricht und ein empfindliches Kriterium darstellt. Die Prüfung ergab, dass schon nach einer kurzen, hochfrequenten Pulsation bei relativ grossen Amplituden die ersten mechanischen Ermüdungserscheinungen auftreten, die eine Verminderung der Durchschlagfestigkeit bzw. Betriebsicherheit zur Folge haben können.

Dieser Dauerschwingversuch ist also wesentlich härter und praxisnaher als das Wöhlerverfahren. Durch Veränderung der elektrischen Spannungen und deren Belastungszeit kann auch der überlagerte Effekt der dielektrischen und mechanischen Beanspruchungen untersucht und abgeschätzt werden (Fig. 9) [12].

Fig. 10 zeigt eine Prüfanordnung, die das Einspannen von jeweils 4 Prüflingen bzw. isolierten Stäben erlaubt. Die Prüfstäbe haben eine isolierte Länge von ca. 600 mm und werden in der Mitte auf eine Länge von 200 mm von einer Klammer festgehalten, die auch als Erdelektrode und als Schwingungserzeuger dient. Den Stabkern verwendet man als Hochspannungselektrode. Mit einem Motor von ca. 1400 U./min wird das Drehmoment auf einen Lagerbock, über einen Exzenter auf eine Pleuelstange und über eine Schubstange auf den Druckstempel bzw. Schwingungserzeuger übertragen.

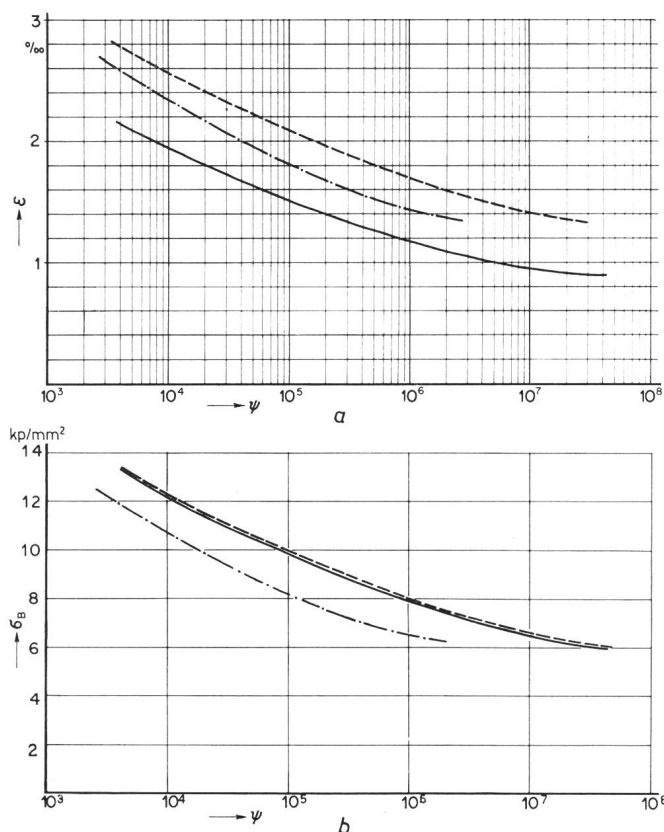


Fig. 9

Bestimmung der Dauerschwingfestigkeit σ_B (b) und der Bruchdehnung ϵ (a) einiger Kunstharzisolationen

Ψ Pulsationen bis zum elektrischen Durchschlag bei 20 kV
(Effektivwert)

Dauer der angelegten Spannung 5 s/min

- vakuumimprägnierte Glimmervlies-Glasgewebe-Epoxyharz-Isolation (3-Schicht-Band)
- - - vakuumimprägnierte Glimmervlies-Glasgewebe-Epoxyharz-Isolation (2-Schicht-Band)
- · · · · vakuumimprägnierte Glimmervlies-Glasgewebe-Epoxyharz-Isolation (vorimprägniertes 2-Schicht-Band)

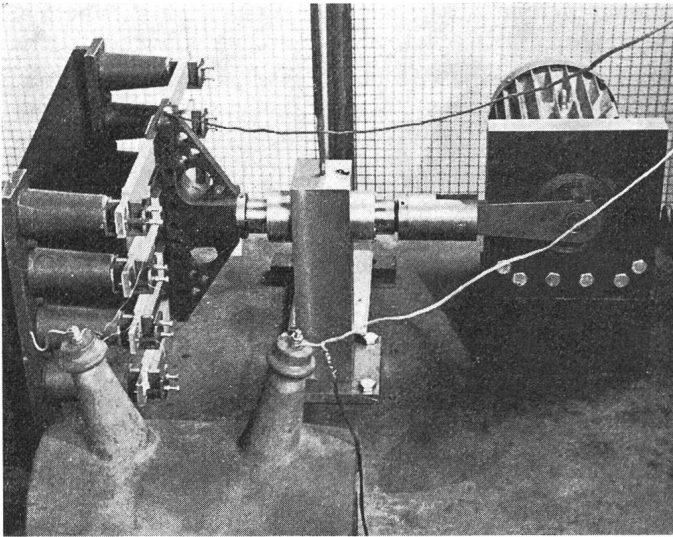


Fig. 10

Prüfordnung für die Bestimmung der Dauerschwingfestigkeit von Hochspannungs-Isolationen

In Fig. 9 sind die Wöhlerkurven für zwei moderne Hochspannungsisolations wiedergegeben. Es handelt sich um eine vakuumimprägnierte und um eine vorimprägnierte Glimmervlies-Glasgewebe-Epoxydharz-Isolation, bzw. Orlitherm- und Orlitsa-Isolation der Maschinenfabrik Oerlikon. Fig. 9 verdeutlicht, dass eine vakuumimprägnierte Isolation gegenüber der vorimprägnierten Variante eine höhere Dauerschwingfestigkeit und eine geringere Verformung erträgt, was bei der jeweiligen Anwendung vom Konstrukteur berücksichtigt werden muss.

Bei der Entwicklung von strahlenbeständigen Schichtstoff-Isolationen kann man davon ausgehen, dass die strahlenempfindlichste Isolationskomponente, zumeist das Bindemittel oder die Glasgewebeschichte, die Strahlenbeständigkeit bestimmt. Durch Gasbildung während der Bestrahlung werden die Isolierbandlagen aufgespalten und die mechanische wie die elektrische Festigkeit vermindert. Durch gleichzeitige Versprödung wird auch die Rissbildung, Aufspaltung und Zerstörung beschleunigt. Die Veränderung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls wurden darum als empfindlichstes Kriterium zur Beurteilung der Strahlenbeständigkeit ausgewählt. Da allerdings die Strahlenleistung in der Praxis kleiner und daher zumeist die Gasbildungsgeschwindigkeit geringer als die Diffusionsgeschwindigkeit durch das Laminat ist sowie weitere Degenerationsprozesse möglich sind, dürfte die Strahlenbeständigkeit der Isolation in der Praxis höher liegen, als man aufgrund von Fig. 7 annehmen muss.

6. Prototypversuche

Die beschriebenen Laboratoriumsversuche zielen auf die beste materialtechnische Lösung der gestellten Anforderungen hin. Die Erfahrungen haben aber gezeigt, dass die Isolationsqualität nicht nur durch die geeignete Materialkombination sondern ebenso durch die technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen sowie durch die Einrichtungen der Fabrikation bestimmt wird. Diese beiden Gesichtspunkte miteinander zu verbinden, für die jeweilige Isolation die rationellsten und einfachsten Herstellungsverfahren zu finden und zu prüfen, ist der Zweck der Prototypversuche, die an

Stäben und Spulen in normaler Grösse durchgeführt werden und für eine störungsfreie Produktion unumgänglich sind.

Durch Prototypversuche ist es möglich, die Eignung der Isolation und der Wicklung unter den Betriebsbedingungen mit ihren komplizierten und einander überlagerten Beanspruchungen zu überprüfen. Dies ist z. B. durch Alterungsuntersuchungen in geeigneten Statorattrappen möglich [14].

Je nach Temperaturklasse des zu untersuchenden Isolationssystems werden die Stäbe Temperaturzyklen zwischen 30 °C und Klassentemperatur innerhalb von ca. 60 min unterworfen. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass 2000 Zyklen für die Beurteilung des Isolationssystems ausreichend sind, wobei die den Alterungszustand charakterisierenden Eigenschaftswerte vor und während der Alterung festgehalten werden. Diese Messungen erlauben nicht nur, fabrikatorisch und technisch neue Isolationssysteme zu untersuchen, sondern auch geeignete Alterungskriterien für die Überwachung von Isolationen im Betrieb zu überprüfen. Als solche Alterungskriterien sind zu erwähnen: $\tan \delta$ -Messung, Ionisationsmessungen, Absorptionsstrommessungen, Bestimmung vom Polarisationsindex und Isolationsstrom-Spannungscharakteristik bei stufenweise erhöhter Gleichspannung.

Eine weitere sehr interessante Untersuchung in diesem Zusammenhang ist die Bestimmung der Haltespannungs-Charakteristiken vor und nach einer solchen Alterung. Fig. 11 zeigt für eine moderne Hochspannungsisolation die entsprechenden Haltespannungs-Charakteristiken. Die Resultate bestätigen, dass die thermomechanischen Beanspruchungen zu keiner nennenswerten Änderung der Haltespannungs-Charakteristik geführt haben.

Moderne Hochspannungsisolations bestehen zumeist aus Isoliermaterialien von sehr guter Wasserbeständigkeit. Trotzdem kann Wasser in eine solche Isolation durch Aufspaltung der Isolation oder durch ein Ablösen vom Leiter in die Spalten und Risse eindringen und den Isolationswiderstand sowie die Durchschlagfestigkeit herabsetzen. Durch bestimmte Schutzmassnahmen können diese Fehlerquellen ausgeschaltet werden, so dass auch nach über einem halben Jahr Wasserlagerung der Isolationswiderstand nicht vermindert wird.

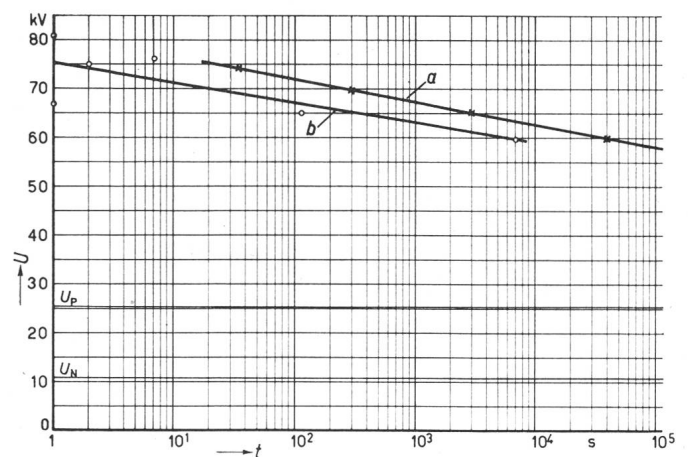


Fig. 11

Haltespannungscharakteristik einer modernen Hochspannungsisolation für 11 kV Nennspannung U_N bzw. für 25 kV Prüfspannung U_P
a vor einer thermisch-mechanischen Alterung; b nach einer thermisch-mechanischen Alterung
 U Haltespannung; t Zeit

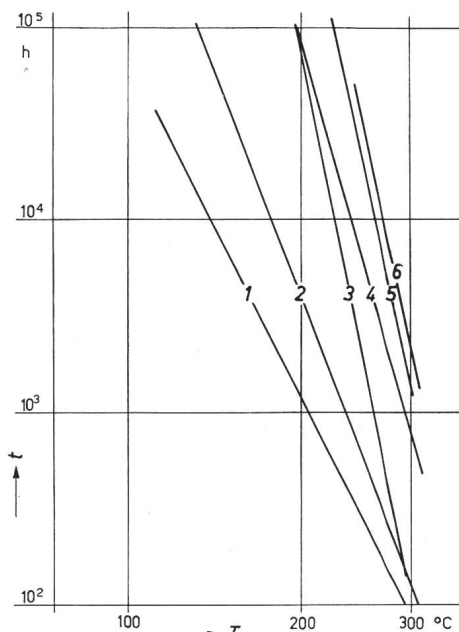


Fig. 12

Dauergebrauchskurven von verschiedenen Isolationen aus vorimprägnierten Kunstharz-Glimmer-Glasgewebe-Bändern

t Zeit; T Temperatur

1 Glimmervlies auf Papier und Epoxydharz; 2 Glimmervlies auf Glasgewebe mit Epoxydharz; 3 Glimmervlies auf Glasgewebe mit Siliconharz I; 4 Glimmervlies auf Glasgewebe mit Siliconharz II; 5 Glimmervlies auf Glasgewebe mit Siliconelastomer; 6 Glimmersplittings auf Glasgewebe mit Siliconelastomer

Eine besonders gute Riss- und Wasserbeständigkeit bei gleichzeitigen thermischen und elektrischen Beanspruchungen besitzen Isolationen aus Glimmer-Glasgewebestreifen, die mit Siliconen imprägniert sind (Fig. 12) [11b; 15].

7. Herstellung der Isolationen

Bei der Entwicklung von modernen Hochspannungsisolierungen sind weitgehend auch die Wünsche der Werkstätte zu berücksichtigen, möglichst rationelle, einfache und herkömmliche Herstellungsprozesse anzuwenden. In der Praxis bedeutet dies, dass auch die Ausrüstungen für die Herstellung, die Fabrikationszeiten und die Zuverlässigkeit der Prozesse sowie die Herstellungskosten bei der Entwicklung der Isolation beachtet werden müssen. Diese Arbeiten lassen sich nur durch Studien und Versuche in einer Modellfabrikation und sog. «Pilot plant» (Fig. 13) unter Werkstatt-Bedingungen bewältigen. Hierbei werden die Arbeitsoperationen bestimmt und die maschinellen sowie zeitlichen Schritte und Kontrollen genau festgelegt.

Die Entwicklung von modernen Herstellungsprozessen ist besonders an die Verarbeitungseigenschaften der Isolierstoffe und Isolierkombinationen gebunden. Die neuen Materialien erlauben jedoch aufgrund ihrer Vielfalt und Anpassungsfähigkeit sowie ihrer genau spezifizierbaren Eigenschaften, die Arbeitsoperationen den fabrikatorischen Möglichkeiten und Einrichtungen anzupassen, sie genau festzulegen, zu mechanisieren und sie weitgehend zu automatisieren. Hierdurch hängt die Fabrikation nicht mehr allein von den Erfahrungen des Meisters und der Geschicklichkeit wie Tüchtigkeit des Arbeiters und der Arbeiterin ab. Da die Herstellungsschritte, die zu verarbeitenden Werkstoffe, die Verarbeitungsdaten wie Druck, Zeit, Temperatur und die Verarbeitungseinrichtungen genau bestimmt sind, können Abweichungen und damit Fehlerquellen, z. B. unzureichende

Härtungszeiten, rechtzeitig durch laufende Kontrollen erkannt und ausgeschaltet werden.

Für den Hersteller moderner Hochspannungsisolierungen ist ferner wichtig, ein universelles Verfahren zu entwickeln, das auf ein möglichst grosses Sortimentsgebiet angewandt werden kann. Den unterschiedlichen Anforderungen wird man allein durch eine Modifikation der Materialkomponenten gerecht, ohne jedoch die Fabrikationsbedingungen zu ändern. Im folgenden sollen anhand von zwei weit auseinanderliegenden Einsatzbereichen mit verschiedenen Anforderungen der Anwendungsbereich eines Isolationsverfahrens beschrieben werden. Als Beispiele wurden Isolationen für grosse Präzisions-Elektromagnete für die kernphysikalische Forschung und Statorwicklungen rotierender Hochspannungsmaschinen für Kraftwerkgeneratoren gewählt.

Die Isolationen von Forschungsmagneten werden zumeist grossen elektrischen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt, die durch elektromagnetische Kräfte, thermische Spannungen infolge der Wasserkühlung und durch induzierte Überspannungen beim Abschalten der Speisung entstehen. Ausserdem sollen sie wegen starker Kondenswasserbildung feuchtigkeitsbeständig, wasserdicht und schliesslich gegen ionisierende Strahlen beständig sein. Daneben wird eine sehr hohe geometrische Genauigkeit der Spule verlangt [16].

Die Isolation der Statorwicklungen für rotierende Maschinen wird dauernd hohen thermischen und elektrischen Beanspruchungen ausgesetzt, muss aber ebenfalls bei häufigen Lastwechseln, Kurzschlüssen und Überspannungen am Netz grossen mechanischen Beanspruchungen standhalten. Schliesslich soll die Isolation wegen der hohen elektrischen Beanspruchungen glimmfrei und auf jeden Fall glimmbeständig sein. Während aber die Magnetisolation flexibel sein muss, erwartet man von einer guten Statorisolation eine hohe Warmteifigkeit bzw. eine hohe mechanische Festigkeit bei höherer Temperatur.

Grosse Statorstäbe für rotierende Maschinen weisen Gewichte bis 50 kg auf. Grosse Magnetspulen wiegen dagegen zumeist mehrere Hundert Kilogramm. Dies bedeutet, dass sowohl die langen schlanken Statorstäbe wie die schweren Magnetspulen nicht nur selbsttragend sein sondern auch solche Festigkeitseigenschaften aufweisen müssen, dass sie beim Herstellungsablauf, Transport und bei der Montage

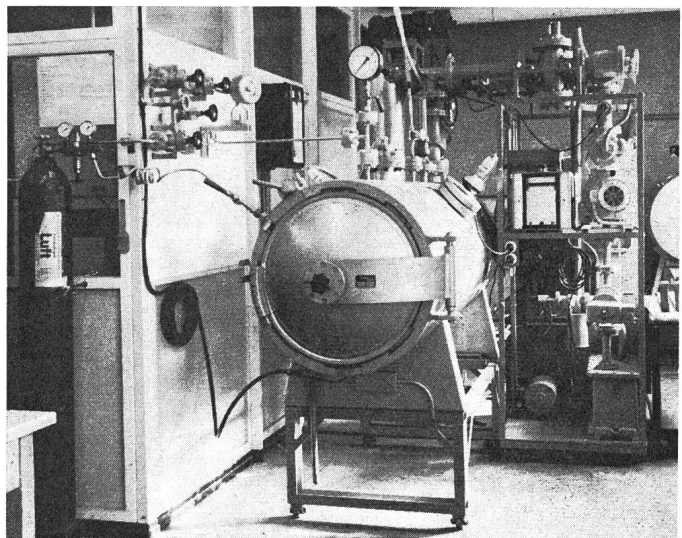


Fig. 13

Pilot-Plant für Vakuumimprägnierungen

keine Qualitätseinbusse erleiden und sich nicht dauernd verformen.

Die Herstellung von Elektromagneten und Statorstäben für rotierende Maschinen ist gleichartig und lässt sich in eine Reihe von Arbeitsoperationen einteilen, wobei im folgenden die wichtigsten Operationen kurz behandelt werden.

7.1 Schablonieren und Wickeln von Leitermaterial zu Stäben und Spulen

Während das Schablonieren, Verröbeln oder Wickeln des Leitermaterials aus relativ dünnen Kupferbändern zu Statorstäben oder Spulen für rotierende Maschinen herstellungstechnisch keine Schwierigkeiten bereiten und mit den üblichen Hilfsmitteln durchgeführt werden können, stellen diese Operationen bei der Magnetspulenfabrikation grosse Anforderungen an die Schablonier- und Wickelausrüstung, an Isolier- sowie Leitermaterialien und verlangen vor allem grösste Sorgfalt bei der Ausführung.

Während für normale Scheibenwicklungen in Einzel- und Doppelabteilungen sowie für Lagenwicklungen (Zylinderwicklungen) einfache Wickel-Bänke genügen, müssen für dreidimensionale Wicklungen solche mit zwei zueinander orthogonalen, im allgemeinen entkoppelten Bewegungen verwendet werden.

Da das Anbringen der Leiterisolation am Leiter meist vor dem Wickeln durch Umbündeln erfolgt, ist es auch verständlich, dass die applizierte Leiter-Isolation beim Wickeln grossen Druck- und Reibungsbeanspruchungen ausgesetzt wird.

7.2 Vorbehandlungen der schablonierten oder gewickelten Stäbe oder Spulen

Für die langen schlanken Statorstäbe oder die grossen Magnetspulen mit Gewichten von mehreren Hundert Kilogramm ist oft eine Vorbehandlung notwendig, damit die nachfolgenden Arbeitsoperationen überhaupt durchführbar werden.

Im Prinzip genügt eine Verfestigung der Stäbe oder Spulen, um kompakte selbsttragende Einheiten zu bekommen. Jedoch sollten die Stäbe einer Statorwicklung immer unter Wärme und Druck in genau hergestellten Pressformen gleichzeitig mit dem Verfestigen auf exakte Masse und Formen einer ersten Trocknung bei erhöhter Temperatur unterworfen werden. Hiedurch wird nicht nur eine Verfestigung zu einer kompakten Einheit erreicht, sondern auch die besseren Voraussetzungen für eine einwandfreie Vakuumtrocknung, Imprägnierung und Aushärtung geschaffen, da eventuelle Verunreinigungen oder leichtflüchtige Bestandteile durch diese Behandlung «totgebrannt» bzw. verflüchtigt werden. Diese Sicherheitsmassnahmen sind vom Isoliermaterial-Standpunkt aus nicht notwendig. Jedoch muss trotz grösster Sorgfalt damit gerechnet werden, dass während der Lagerung, Bearbeitung und beim Transport die Stäbe oberflächlich verschmachtet werden.

Bei grossen Magnetspulen ist oft eine Vortrocknung im Umluftofen sowie eine Vakuumtrocknung und eine Imprägnierung mit geeigneten Epoxydharz-Mischungen notwendig, um die erforderliche Festigkeit und Formgenauigkeit für die weiteren Arbeitsoperationen zu erhalten.

7.3 Isolieren

Die Applikation der Leiterisolation am Leiter der Magnetspulen erfolgt meist vor dem Wickeln durch eine maschinelle

Umbündelung. Dadurch wird eine exakte Bandüberlappung und ein gleichmässiger Bandzug erreicht. Bei Statorstäben mit einfachen Formen kann auch der Wickel der Hauptisolation (Isolation gegen Erde) maschinell umbündelt werden.

Die äussere Paketisolation von Magnetspulen und bei Statorstäben mit komplizierten Formen wird heute fast ausnahmslos manuell angefertigt. Die Qualität der Umbündelung ist massgebend für die Qualität des Endproduktes und muss deshalb durch eingehende Kontrollen der Isolierbänder und deren Verarbeitung überwacht werden.

Durch die Umfangsmessungen während der Umbündelung wird laufend geprüft, ob die Bänder mit der richtigen Bandüberlappung und genügend satt angezogen werden. Ausserdem kann jederzeit mit Hilfe einer speziellen Messzange, die auf den vorgeschriebenen Pressdruck bei gegebener Druckfläche eingestellt wird, kontrolliert werden, ob der Isolierverband die vorgeschriebene Dichte im Endzustand erreicht.

Jede umbündelte Spule wird durch Umfangsmessungen, Gewichtsmessungen und Dichtemessungen nach der Umbündelung kontrolliert.

7.4 Vakuumtrocknung und Vakuumimprägnierung

Bekanntlich wird die Isolationsqualität umso besser, je kompakter und je porenärmer die Isolation ist. Daher strebt man eine vollständige Ausfüllung der Hohlräume und Poren im Wickel durch eine härtende Imprägnierflüssigkeit an. Eine Imprägnierung ist jedoch nur möglich, wenn Feuchtigkeit und Gase vorher aus dem Wickel und dem Harz entfernt worden sind. Da auch ein kurzzeitiger Zutritt von Luft und anderen Gasen die vakuumimprägnierte Isolation wieder verschlechtern und den Qualitätsunterschied gegenüber der vorimprägnierten Bandisolation aufheben würde, werden die Entgasung und Imprägnierung möglichst in der gleichen Druckphase hintereinander durchgeführt.

Damit die Entgasung möglichst schnell erfolgt, sollten die Abspumpzeiten kurz, das Temperaturgefälle zwischen Wickel bzw. Harz und Kühlfallen sowie die Wärmezufuhr gross, der Strömungswiderstand und der Gasdruck im Entgasungs- bzw. Imprägnierkessel klein sein. Die Wickeloberfläche sollte weitgehend freiliegen. Ferner nimmt die Entgasungszeit etwa mit der Isolierband-Lagenzahl, mit der Dichte des Wickels und Schichtdicke bzw. Viskosität des Harzes in einer Potenzfunktion zu. Schliesslich wird die Entgasungszeit noch durch die zu entgasende Masse, Verdampfungswärme, durch den Verteilungsgrad und Dampfdruck der Verunreinigungen bestimmt.

Eine moderne Entgasungsanlage für Kunstharze besteht zumeist aus Füllkörpersäulen oder Kammern mit rotierenden Bürsten und Kegelflächen, in die das vorgewärmte Harz mit Verteilerdüsen unter Vakuum eingespritzt bzw. eingesogen wird. Im Durchlauf wird das Harz in zwei Druckstufen, nämlich unter Vor- und Endvakuum, unter gleichzeitiger Erwärmung auf die Imprägniertemperatur entgast, anschliessend in den Imprägnierkessel eingesogen, die ebenfalls entgasten, sowie isotherm vorgewärmten Isolierbandwickel überflutet, schliesslich das Vakuum möglichst mit einem inerten Gas gebrochen und mit Überdruck der Kessel bzw. der Harzspiegel belastet. Die Überflutungsdauer sollte möglichst die zum Imprägnieren des Wickels notwendige Zeit nicht überschreiten.

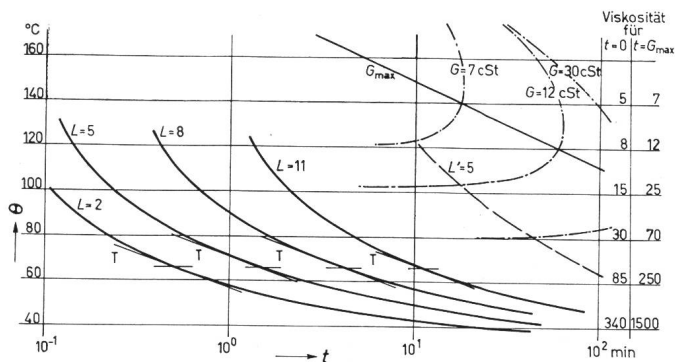


Fig. 14

Bestimmung von optimalen Imprägnierbedingungen

G Beziehung zwischen Gebrauchsdauer und höchstzulässiger Imprägnierviskosität und Temperatur; G_{\max} Beziehung zwischen maximaler Gebrauchsdauer und Imprägnierviskosität bzw. Temperatur; L minimale Imprägnierdauer in Funktion von der Imprägnierviskosität bzw. Imprägniertemperatur für 2, 5, 8, 11 Bandlagen eines glimmerarmen (L) und eines glimmerreichen (L') Isolierbandes; T zu G parallele Tangente an L , d. h. $t_G - t_L = \text{maximum}$; Θ Temperatur; t Gebrauchsdauer

Die Berührungspunkte bezeichnen die optimalen Imprägnierbedingungen

Mit zunehmender Temperatur sinkt die Anfangsviskosität und nimmt der zeitliche Viskositätsanstieg zu. Für jede Viskositätsgrenze, die durch die Porosität des Wickels und die Imprägnierdrucke festliegt, gibt es daher eine bestimmte Imprägniertemperatur, bei der die Gebrauchsdauer des Harzes ein Maximum erreicht. In Fig. 14 ist aufgrund von Laboratoriumsversuchen für ein bestimmtes Harz die Beziehung zwischen maximaler Gebrauchsdauer und Temperatur dargestellt.

Ferner wurde die Zeit-Temperatur-Funktion der Imprägnierung eines bestimmten Isolierbandwickels angegeben. Aus Fig. 14 kann man die optimale Imprägniertemperatur ansehen, bei der die Differenz zwischen Imprägnierzeit und Gebrauchsdauer möglichst gross ist. Allein die Imprägnierdrucke liegen durch die verwendeten Materialien nicht fest und sollten vor der Imprägnierung möglichst niedrig und anschliessend möglichst hoch sein (Fig. 15). Da die Para-

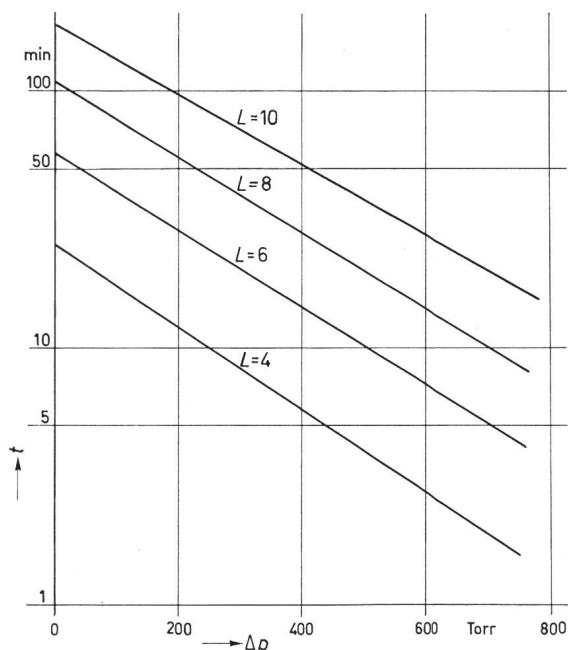


Fig. 15

Imprägnierzeit t in Funktion vom Imprägnierdruck Δp
 L Zahl der imprägnierten Isolierbandlagen

meter Viskosität, Zeit, Temperatur, Wickeldichte, Wickeldicke bzw. Isolierbandlagenzahl in relativ einfachen, zumeist exponentiellen Beziehungen zueinander stehen, lassen sich die optimalen Imprägnierbedingungen auch berechnen.

Sind die idealen Imprägnierbedingungen bekannt, so berechnet man den bei einem Imprägnierzyklus zu erwartenden Viskositätsanstieg bzw. den nach jedem Zyklus notwendigen Neuharz-Zusatz (Fig. 16). Dieser sollte dem Harzverbrauch entsprechen, damit kein Harzausschuss auftritt. Der Harzverbrauch ergibt sich aus dem Volumen-Verhältnis von Imprägniergut zu Imprägnierharz.

Aus dem Aufbau des Wickels sowie aus dem Harz ergeben sich also die optimalen Imprägnierbedingungen. Die Isolierstoffauswahl für eine Hochspannungsisolation muss daher nicht nur die qualitativen sondern auch die fabrikatorischen Gesichtspunkte berücksichtigen. Das Isolierband sollte möglichst reissfest, wickel- und imprägnierfähig sein. Vom Harz erwartet man, dass es niederviskos ist, bei möglichst hoher Temperatur eine sehr lange Gebrauchsdauer

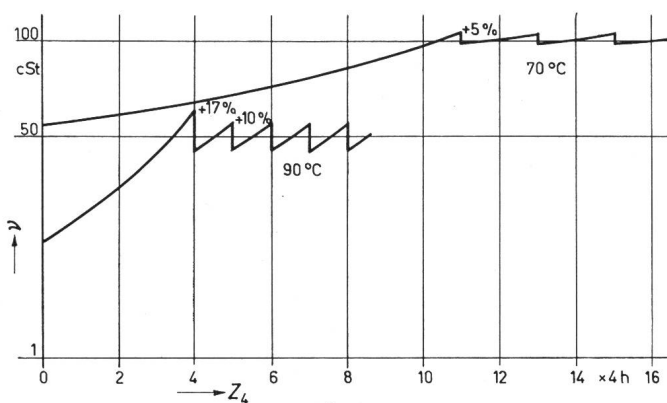


Fig. 16

Neuharzzusatz bei konstanter Viskosität
 ν Viskosität; Z_4 4-h-Zyklen

besitzt, aber sich bei geringer Temperaturerhöhung schnell aushärten lässt. Durch Verwendung von latenten Beschleunigern, die erst bei erhöhter Temperatur «anspringen», lässt sich dieses Problem lösen. Ferner sollte das gleiche Harz den verschiedenen Anwendungen durch geringfügige Modifikationen angepasst werden können, so dass es z. B. für Grossmaschinen-Isolationen sehr warmfest, für Bahnmaschinen-Isolationen kälteschockbeständig, für Magnetisolationen strahlen-, riss- und wasserbeständig modifiziert sein sollte. Allein durch eine geeignete Kombination von möglichst wenigen Materialien sowie durch Vereinheitlichung der Prozesse lässt sich eine weitgehende wie rationelle Ausnutzung der relativ kostspieligen Imprägnieranlagen erreichen.

Für eine einwandfreie und wirtschaftliche Kunstharz-Imprägnierung müssen nicht nur die optimalen Imprägnierbedingungen bekannt und in einer «pilot plant» der Konstruktion angepasst werden, sondern auch eine zweckmässige und leistungsfähige Imprägnieranlage vorhanden sein.

7.5 Kalibrierung und Aushärtung

Durch Einführung von lösungsmittelfreien, niederviskosen, härtbaren Imprägniermitteln lassen sich die Isolationen auf die vorgeschriebenen Masse verfahrenstechnisch leichter kalibrieren. Wegen der Weichheit des Isolierverbandes im unausgehärteten Zustand und durch das Fehlen leichtflüchtiger Bestandteile, die bei höheren Härtungstempe-

raturen zum Aufblähen der Isolation führen, sind nur niedrige Kalibrierdrucke erforderlich. Allerdings müssen diese Kalibrierdrucke bei der Aushärtung von modernen Kunstharz-Isolationen sehr genau eingehalten werden, da die optimalen dielektrischen und mechanischen Eigenschaften nicht nur durch eine Optimalisierung der Materialmengen und der Härtungstemperatur, sondern auch der Kalibrierdrucke erreicht werden. Die praktischen Erfahrungen haben gezeigt, dass die grössten Schwierigkeiten bei der Formgebung und Aushärtung von Kunstharz-Isolationen besonders bei grossflächigen Objekten auf Delaminierungen, Zerquetschungen und zahlreiche Mikrohohlräume zurückzuführen sind. Erst die Entwicklung von entsprechend geeigneten Imprägnierharzen, Kontrollvorrichtungen für die Bestimmung der erforderlichen Materialmenge, Spezialausrüstungen für die Kalibrierung sowie die Einführung von Prototypversuchen für die Festlegung der optimalen Aushärtezyklen haben diese Schwierigkeiten beseitigen und einwandfreie Isolationsqualitäten sicherstellen können.

8. Prüfung und Beurteilung von Isolationen

Die Herstellung von modernen Hochspannungs-Isolationen erfordert, wie aus Abschnitt 7 hervorgeht, eine wesentlich genauere Einhaltung der einzelnen Arbeitsoperationen als bei klassischen Isolationen.

In der Praxis bedeutet dies, dass jeder Arbeitsoperation, die irgendwie die Qualität beeinflussen kann, jeweils eine Kontrolle folgen muss. Durch diese Massnahme wird nicht nur verhindert, dass sich eventuelle Fehler bei den Arbeitsoperationen während der Herstellung summieren und damit die Ausschussquote im Endstadium erhöhen, sondern dass auch der Ausschuss durch den ganzen aufwendigen Fabrikationsprozess geschleppt wird.

Bei der Kontrolle des Arbeitsablaufes werden zahlreiche Qualitätskriterien zur Beurteilung herangezogen. So umfassen die wichtigen Kontrollen die Bestimmung der Masse, Oberflächenbeurteilung und Bestimmung der Krümmungsradien. Ferner sind Dichtebestimmungen zur Überwachung der Isolations-Zusammensetzung von Interesse. Daneben bilden die dielektrischen Untersuchungen von Hochspannungs-Isolationen heute wie vor Jahrzehnten die wichtigste Qualitätsprüfung. Diese Prüfungen können in $\tan \delta$ -Messungen an Einzelstäben oder Spulen, Spannungsprüfung und Durchschlagspannungsprüfung und gegebenenfalls in weitere dielektrische Messungen an fertig eingebauten Wicklungen eingeteilt werden.

Durch die $\tan \delta$ -Messung in Funktion der Spannung an Einzelstäben oder Spulen soll vor allem die Gleichmässigkeit der Produktion sichergestellt werden, indem je nach Betriebsspannung und Grösse des Prüfobjektes die $\tan \delta$ -Bedingungen festgelegt und kontrolliert werden. Einige Vorschläge nationaler Normen [18] für die zulässigen $\tan \delta$ -Werte sind in Fig. 17 aufgezeichnet.

Die modernen vakuumimprägnierten Kunstharz-Isolationen bereiten bezüglich der $\tan \delta$ -Kontrolle keine Schwierigkeiten, da schon das Imprägnieren unter Vakuum neben der sorgfältig durchgeführten Materialauswahl gute $\tan \delta$ -Werte ergibt.

Es wird oft und mit Recht die Frage gestellt, was man unter guten $\tan \delta$ -Werten versteht und in welcher Beziehung die $\tan \delta$ -Werte zur Lebenserwartung z. B. einer Spule ste-

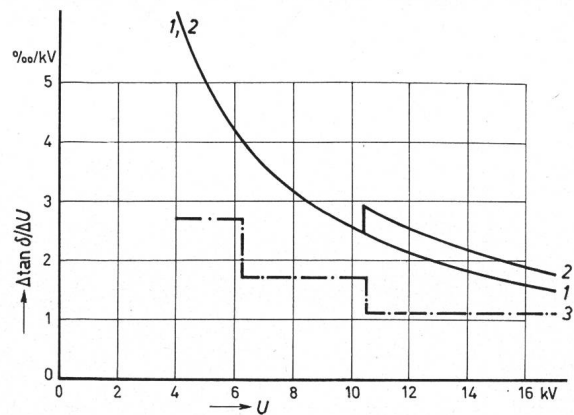


Fig. 17
Normenvorschläge verschiedener Länder über den auf die Nennspannung bezogenen Verlustwinkel-Anstieg
 δ Verlustwinkel; U Nennspannung
1 VDE 0530/33/1966; 2 EdF 1966; 3 KEMA

hen. Diese Fragen lassen sich selbstverständlich nicht allgemein beantworten. Jedoch können einige Grundsätze angegeben werden, die wenigstens für die modernen vakuumimprägnierten Kunstharz-Isolationen Gültigkeit haben.

Die Erfahrung zeigt, dass die Erwärmung vakuumimprägnierter Kunstharz-Isolationen auf Betriebstemperaturen (130 °C bzw. 155 °C «hot-spot»-Temperatur) zu keiner nennenswerten Änderung des $\tan \delta$ -Anstieges führen. Das bedeutet, dass eine Auflockerung des Isolationsverbandes, im Gegensatz zu den klassischen Isolationen aus Schellackmikafolium oder Asphaltkompondmikafolium nicht stattfinden sollte.

Es gibt heute verschiedene Isolations-Systeme aus modernen Isolierstoffen und Isolierstoff-Kombinationen, die keiner Vakuum-Imprägnierung unterworfen werden. Jedoch beweist die Praxis, dass bei gleicher Sorgfalt eine Vakuum-Imprägnierung die besseren $\tan \delta$ -Werte ergibt. Andererseits kann mit Recht gefragt werden, ob bei einem $\tan \delta$ -Anstieg von z. B. 0,05 %/kV oder 0,15 %/kV eine unterschiedliche Lebenserwartung vorliegt. Diese Fragen können nur durch Glimmuntersuchungen an Materialkombinationen aufgrund praktischer Erfahrungen beantwortet werden. Gegenüber den klassischen Isolationen kann bei modernen Kunstharz-Isolationen eine längere Lebensdauer bei gleicher Beanspruchung erwartet werden, da der Isolationsverband wegen seiner wesentlich besseren Temperaturstabilität nicht aufgelockert wird und damit die Voraussetzungen für ein Glimmen nicht gegeben sind. Langjährige Erfahrungen an Grossmaschinenwicklungen sowie Langzeitversuche mit Kunstharz-Isolationen bestätigen diese Erwartung.

Das Auftreten von schlechten $\tan \delta$ -Werten muss deshalb bei den modernen Isolationen auf Mikro-Hohlräume im Isolationsverband zurückgeführt werden, die von der Kalibrierung, Aushärtung oder zu schlechtem Vakuum während der Imprägnierung herrühren. Es muss daher den $\tan \delta$ -Werten und vor allem dem $\tan \delta$ -Anstieg in Funktion der Spannung bei den modernen Isolationen grössere Beachtung geschenkt werden als bei den klassischen Isolationen, da die modernen Isolationen wegen der grösseren Ausnützung thermisch, elektrisch und mechanisch auch strengere Bedingungen einhalten müssen.

Die Spannungsprüfung muss an sämtlichen Einzelstäben oder Spulen laufend während der Fabrikation durchgeführt werden, damit eventuelle systematische Fehler der Produktion rechtzeitig entdeckt und eliminiert werden können. Es

ist üblich, bei dieser Prüfung das Spannungsniveau ca. 35...40 % höher als bei der Abnahmeprüfung der eingebauten Wicklungen zu legen und während den wichtigsten Einbauphasen im Stator eine abgestufte Spannungsprüfung durchzuführen, deren Ende die genormte Abnahmeprüfung bildet.

Unter Umständen kann somit eine Hochspannungswicklung 3...4 Spannungsprüfungen unterworfen werden, bevor sie in Betrieb kommt. Dieses Vorgehen wird von manchem Fachmann als eine unnötige Beanspruchung der Isolation kritisiert und angeblich schonendere Gleichspannungs-Prüfung empfohlen [17]. Wenn man jedoch die Haltespannungs-Charakteristik einer normalen modernen Hochspannungs-isolation der Fig. 11 betrachtet, so sieht man, dass auch erhöhte Prüfspannung von $1,4 U_p$ ohne Gefahr einer unkontrollierten Schwächung der Isolation angewandt werden dürfen. Es besteht somit kein Grund, die Wechselfspannungsprüfung durch eine Gleichspannungsprüfung zu ersetzen. Wenn weiter berücksichtigt wird, dass die Gleichspannungsprüfung eine relativ hohe Beanspruchung der Wicklungsköpfe, d. h. der Isolationspartien ausserhalb der Statornuten bewirkt, muss zumindestens bei den diskontinuierlichen Isolationen von der Gleichspannungsprüfung abgeraten werden.

Die Durchschlagsspannungsprüfung zur Beurteilung der Qualität der Isolation sollte normalerweise sofort nach Anlauf der normalen Fabrikation an einer sog. Nullserie und als Stichprobe während der Herstellung durchgeführt werden, um die Optimalisierung von Isolationsaufbau und Herstellungstechnik zu überprüfen.

Als unteres Durchschlagsspannungsniveau wird in den meisten nationalen Normen ein Wert von $(4...5)U_N$ (Betriebsspannung) angegeben. Dies entspricht bei den heute üblichen Isolationsdicken Durchschlagsfestigkeiten von 15...20 kV/mm, die von modernen Hochspannungsisolations ohne Schwierigkeiten eingehalten werden können.

Neben der normalen Abnahmeprüfung an der fertig eingebauten Statorwicklung können weitere dielektrische Messungen durchgeführt werden, die als Basismessung für die Betriebs-Überwachung der Isolation dienen.

9. Überwachung von im Betrieb befindlichen Isolationen

Es ist allgemein bekannt, dass die meisten Betriebsstörungen von Hochspannungs-Maschinen durch Isolationsfehler verursacht werden [19]. Diese Erfahrungen wurden hauptsächlich bei den klassischen Isolations-Systemen gesammelt. Die Einführung moderner Isolationen führte wegen der höheren thermischen und dielektrischen Ausnützung zu neuen Überwachungsmassnahmen, um Betriebsstörungen vorzubeugen sowie um Erfahrungen zu sammeln und systematische Alterungsuntersuchungen durchzuführen. Aufgrund solcher Untersuchungen sind Verbesserungen und Neuentwicklungen von Isolationen möglich. Es ist heute möglich, die Statorwicklungen von Hochspannungsmaschinen regelmässig durch eine Reihe von Alterungsmessungen auf ihren Alterungszustand hin zu untersuchen und anhand der Resultate Empfehlungen für Revisionen sowie Prognosen über die Lebenserwartung abzugeben.

Neben den unerlässlichen visuellen Wicklungskontrollen beruhen die meisten Überwachungsmassnahmen auf elektrischen Messungen, die in folgende Kategorien eingeteilt werden können:

- a) Absorptionsstrommessungen zur Bestimmung des Feuchtigkeit- und Verschmutzungsgrades, des Polarisationsindex und der Isolationszeitkonstanten.
- b) Ionisationsmessungen zur Ermittlung von Glimmschäden und von Delaminierungen in der Isolation.
- c) Bestimmung des Isolationsstromes in Funktion der angelegten Gleichspannung zur Beurteilung von eventuellen Schwach- oder Fehlerstellen in der Isolation.
- d) Spannungsprüfung mit reduzierter 50-Hz-Prüfspannung, mit Gleichspannung oder neuerdings mit 0,1-Hz-Prüfspannung [20] bzw. Sinus-Halbwellen bei 50 Hz [21].

Das Zusammenstellen der Resultate von mehreren Prüfverfahren und ein Vergleich mit den Ergebnissen im Laboratorium (vgl. Abschnitt 5, 6 und 8) erlauben weitgehend sichere Aussagen über den Alterungszustand. Erst die Alterungsmessungen an Grossmaschinenwicklungen, über die in einem weiteren Artikel ausführlich berichtet werden soll, erlauben eine endgültige Qualitätsbeurteilung der Isolation.

Literatur

- [1] P. Hauenstein: Die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit elektrischer Maschinen. Bull. SEV 56(1965)18, S. 805...811.
- [2] H. Oberst und G. W. Becker: Elastische und viskose Eigenschaften von Werkstoffen. Grundlagen und Begriffe. Berlin, Beuth, 1963.
- [3a] A. Matting und K. Wägen: Über das Dauerfestigkeitsverhalten glasfaserverstärkter Kunststoffe. Kunststoffe 54(1964)12, S. 746...749.
- [3b] A. Matting: Beurteilungsgrundlagen für die Sicherheit von Konstruktionen aus Glasfaserkunststoffen auf Grund ihrer statischen und dynamischen Eigenschaften. Materialprüfung 8(1966)2, S. 49...55.
- [4] K. Abegg: Alterungsversuche zur Entwicklung und Beurteilung neuer Stator-Isolationen. Bull. SEV 51(1960)18, S. 849...856.
- [5a] E. Hosp: Der gegenwärtige Stand der Photothermoelastizität. Materialprüfung 8(1966)3, S. 85...92.
- [5b] H. Schwiager: Das spannungsoptische Schichtverfahren in seiner Anwendung auf dynamische Spannungszustände. Materialprüfung 7(1965)7, S. 251...260.
- [6] VDE-Vorschrift 0304 Teil 2/7.59: Leitsätze für Prüfverfahren zur Beurteilung des thermischen Verhaltens fester Isolierstoffe. Teil 2: Bestimmung des Verhaltens von Isolierstoffen nach langdauernder Wärmeeinwirkung.
- [7] F. Blinne und W. Möller: Der Einfluss der Zusatzstoffe auf die Eigenschaften und die Altersbeständigkeit von Epoxharz-Formstoffen. Kunststoffe/Plastics 10(1963)1, S. 1...11.
- [8] W. Möller: Thermische Beständigkeit von Kunstharzen. Kunststoffe/Plastics 13(1966)6, S. 265...272.
- [9] Méthodes d'essai recommandées pour la détermination de la résistance relative des matériaux isolants à la rupture diélectrique par les décharges superficielles. Commission Electrotechnique Internationale, CEI-Documents 15(Secrétariat)65, Projet, Genève 1965.
- [10] R. O. Bolt und J. G. Carroll: Radiation Effects on Organic Materials. New York/London, Academic Press, 1963.
- [11a] K. Blinne, O. Mäder und J. Peter: Orlitherm, eine moderne Hochspannungsinsulation. Bull. Oerlikon -(1961)345, S. 37...60.
- [11b] E. Dünner, K. Nylund und H. Moser: Probleme, Stand und zukünftige Entwicklung der Isolation von Traktionsmotoren. Bull. Oerlikon -(1966)368/369, S. 11...25.
- [12a] M. Hempel: Dauerschwingverhalten der Werkstoffe. VDI-Z. 104(1962)27, S. 1362...1377.
- [12b] K. Oberbach: Das Verhalten der Kunststoffe im Dauerschwingversuch. Kunststoffe 55(1965)5, S. 356...361.
- [13] P. A. Tschopp: Design and Construction of the Exciting Coils for the Guiding Magnet of a 4 GeV Electron Synchrotron. In: Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology, Stanford California 1965. NBS Springfield/Virginia 1965.
- [14] J. Peter: Alterungsversuche an Statorwicklungsstäben. Bull. sci. AIM 76(1963)2, S. 216...258.
- [15] H. Rembold: Neue Isoliermaterialien mit Glimmerpapier zur Spulen- und Statorisolation von elektrischen Maschinen. Bull. SEV 55(1964)20, S. 1025...1030.
- [16] P. A. Tschopp: Technologie von tiefgekühlten und supraleitenden Elektromagneten. Bull. SEV 58(1967)4, S. 167...181.
- [17a] K. Edwin und W. Zwicknagel: Neue Entwicklungstendenzen bei der Betriebsüberwachung von Generator-Hochspannungswicklungen. Journées internationales AIM d'études des centrales électriques modernes 1966, Liège, 23...27 mai. Document 43, Institut électrotechnique Montefiore, Liège, 1966.
- [17b] R. Schuler: Erfahrungen mit elektrischen Messungen zur Beurteilung des Isolationszustandes der Statorwicklungen von grossen rotierenden Maschinen. Journées internationales AIM d'études des centrales électriques modernes 1966, Liège, 23...27 mai. Document 46, Institut électrotechnique Montefiore, Liège, 1966.
- [18] VDE-Vorschrift 0530 Teil 1/1.66: Bestimmungen für elektrische Maschinen. Teil 1: Allgemeines. § 33: Prüfung der Isolierung von Stäben und Spulen grosser Hochspannungsmaschinen.
- [19] J. Fabre et al.: Recherches sur l'isolation des grandes machines synchrones. Rapport CIGRE N° 137, 1956.
- [20] L. G. Virsberg und A. Kelen: Quelques observations concernant l'essai à très basse fréquence de l'isolement des machines à haute tension. Rapport CIGRE N° 108, 1964.
- [21] H. G. Tempelaar et R. F. Goossens: Essais diélectriques de l'isolement de turbo-alternateurs. Rapport N° 133, 1966.

Adresse der Autoren:

K. Nylund, dipl. Ingenieur ETH, und Dr. rer. nat. W. Möller, dipl. Chemiker, Maschinenfabrik Oerlikon, Postfach, 8050 Zürich.