Alterungsversuche zur Entwicklung und Beurteilung neuer Stator-Isolationen

Autor(en): **Abegg, K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **51 (1960)**

Heft 18

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-917052

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Alterungsversuche zur Entwicklung und Beurteilung neuer Stator-Isolationen

Von *K. Abegg*, Zürich

621.313-181.2.048.1 : 620.199 : 621.315.61

Die ständig zunehmende Zahl neuer Isolierstoffe und Isolierverfahren erschwert Qualitätsvergleiche und die Beurteilung ihres zweckmässigen Einsatzes in den Wicklungen elektrischer Maschinen. Da langdauernde Versuche in Maschinen im Betrieb aus zeitlichen Gründen nicht in Frage kommen, versucht man durch künstliche Alterungsversuche Einblick in das Betriebsverhalten neuer Wicklungsisolationen zu erhalten. Es handelt sich dabei um Versuchsanordnungen, welche die Beanspruchungen in den Wicklungsisolationen nachbilden und durch Steigerung bestimmter Alterungsparameter gestatten, in relativ kurzer Zeit Qualitätsvergleiche mit bekannten Isolationen zu erhalten. Als Alterungskriterien werden dabei üblicherweise Schadenursachen gewählt, welche an konventionellen Isolationen zu Störungen geführt haben und Prognosen für das mutmassliche Betriebsverhalten neuer Isolationen zulassen. Es wird gezeigt, welche Möglichkeiten zur Untersuchung und Beurteilung neuer Isoliermaterialien vorhanden sind, und an Beispielen Art und Durchführung von Alterungsversuchen näher beschrieben.

Le nombre sans cesse croissant de nouveaux matériaux isolants et de nouveaux procédés d'isolement complique la comparaison des qualités et leur emploi judicieux pour les enroulements de machines électriques. Des essais de longue durée avec des machines n'étant guère réalisables, faute de temps, on tente d'obtenir par des essais de vieillissement accéléré des indications sur le comportement en service des nouvelles isolations d'enroulements. Il s'agit de dispositions qui reproduisent les sollicitations de ces isolations et permettent, par l'aggravation de certains paramètres de vieillissement, de faire en relativement peu de temps des comparaisons avec des isolations connues. Comme critères de vieillissement, on choisit des causes d'avaries qui ont généralement donné lieu à des perturbations avec les isolations conventionnelles et permettent des pronostics sur le comportement probable des nouvelles isolations en service. L'auteur montre quelles sont les possibilités d'examiner et de juger de nouveaux isolants et il décrit plus en détail, à titre d'exemples, le mode et l'exécution d'essais de vieillissement.

1. Einleitung

Mit zunehmender Verbreitung neuer Isoliermaterialien stellt sich für Hersteller und Benützer elektrischer Grossmaschinen in gleicher Weise das Problem der Beurteilung und der zweckmässigen Wahl neuer Isolationen für Statorwicklungen. Seit Jahren wird versucht, diese Fragen durch künstliche Alterungsversuche zu beantworten, wobei die Elektrofirmen, welche neue Isolationen entwickeln, vor allem den Vergleich mit bekannten Isolierverfahren suchen, während sich die Elektrizitätsbetriebe hauptsächlich für die Lebensdauer neuer Isolationen interessieren. Dass solchen Versuchen ausschlaggebende Bedeutung beigemessen wird, ist verständlich, wenn man bedenkt, dass durch die Wahl geeigneter Isoliermittel und neuer Isolierverfahren die Gefahr von Wicklungsdefekten im Betrieb reduziert und die Lebenserwartung dieses wichtigen Maschinenelementes wesentlich gesteigert werden kann.

Bei der Wahl künstlicher Alterungsversuche geht man zweckmässig von den heute bekannten Schadenursachen in Statorwicklungen aus; es handelt sich bekanntlich um mechanische, chemische oder dielektrische Ursachen, die in hohem Masse von der Temperatur, d. h. von thermischen Erscheinungen, beeinflusst werden [1] [1]). Welcher Ursache die Hauptbedeutung zukommt, ist schwer festzustellen und wird auch in Zukunft nicht eindeutig bestimmt werden können, da die Schadenanfälligkeit der Isolationen weitgehend vom verwendeten Material und vom Isolierverfahren abhängt. Unbestritten ist der Einfluss der Temperatur, einem Alterungsparameter, der schon vor Jahrzehnten erkannt und zur bekannten Einteilung der Isoliermaterialien in Wärmeklassen geführt hat [2]. Es liegt daher auf der Hand, für Alterungsversuche eine Anordnung zu wählen, welche den Betriebsverhältnissen der Statorwicklung am nächsten kommt. Der Nachteil solcher Testmaschinen liegt einerseits im Preis, anderseits in der Zeit, die verstreicht, bis Kontrollmessungen eine sichere Beurteilung gestatten. Ein solches Vorgehen ist heute, im Zeitalter des raschen technischen Fortschrittes, genau so wenig durchführbar wie in der Pionierzeit des Elektromaschinenbaues, als gleichermassen kühne Entschlüsse im Interesse der technischen Entwicklung gefasst werden mussten.

Das Problem der künstlichen Alterungsversuche lässt sich folgendermassen umschreiben: Die wesentlichsten Alterungsparameter von Statorisolationen sollen in Versuchsanordnungen derart gesteuert werden, dass in kurzer Zeit eine Beurteilung neuer Isolationen durch Vergleich mit bekannten Isolationen möglich ist. Das Wesentliche künstlicher Alterungsversuche liegt daher

a) in der Vergleichsmethode, welche den Qualitätsvergleich von neuen Isolationen mit bekannten Isolierverfahren gestatten soll;

b) in der Verkürzung der Versuchszeiten durch Verschärfung bestimmter Alterungseinflüsse.

Durch den unumgänglichen und bewussten Verzicht auf Absolutmessungen, die sich über Jahre,

[1]) Siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

ja sogar über Jahrzehnte erstrecken müssten, ist man auf ein Vergleichsverfahren angewiesen. Dieses besteht darin, dass man bestimmte Alterungskriterien sowohl bei bekannten als auch bei neuen Isolationen während der künstlichen Alterungsversuche anwendet und durch Vergleich der Resultate sich darüber Rechenschaft ablegt, ob und um wieviel besser die neue Isolation, verglichen mit bekannten Statorisolationen, ist. Durch Verwendung bekannter Alterungsgesetze, wie beispielsweise desjenigen von *Montsinger*, ist es in Einzelfällen möglich, Aussagen über die mutmassliche Lebensdauer zu machen. Es soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass Prognosen dieser Art nur dann einen gewissen Wahrscheinlichkeitswert besitzen, wenn sie für eine Mehrzahl verschiedener Alterungsparameter bestätigt werden.

Das Ziel jedes künstlichen Alterungsversuches, die Verkürzung der Versuchszeiten, kann nur dann erreicht werden, wenn es gelingt, die interessierenden Alterungseinflüsse (Alterungsparameter) zu verschärfen. Diese Aufgabe ist besonders dann nicht leicht, wenn man Vergleichsversuche mit neuen Isolierstoffen durchführen will, die vermutlich konventionelle Isolationen qualitativ weit übertreffen. So ist es denkbar, dass ein Alterungsparameter, z. B. die Temperatur, konventionelle Isolationen schon sehr bald in Mitleidenschaft zieht, während neue, warmfeste Isolationen auch bei bedeutend höheren thermischen Beanspruchungen keine Alterungserscheinungen zeigen. In solchen Fällen kann durch geeignete Wahl der Alterungsparameter zuerst der Vergleich mit bekannten Isolationen durchgeführt und anschliessend, durch Steigerung der Prüfbedingungen, die Grenzbeanspruchung des neuen Materials ermittelt werden.

Die Überlegungen zeigen, dass bei künstlichen Alterungsversuchen sowohl der Wahl der Alterungsparameter, als auch ihrer Einflussgrösse eine entscheidende Bedeutung zukommt. Besonders die Festlegung der Grösse und damit im Zusammenhang die Bestimmung des Alterungsprogramms muss dem spezifischen Aufbau der Isolationen Rechnung tragen. Es muss auch in diesem Zusammenhang wieder auf die bekannte Tatsache hingewiesen werden, dass jeder Prüfling durch unvernünftiges Hochschrauben bestimmter Anforderungen zerstört werden kann. Durch solche Massnahmen kann wohl der Grenzwert für einen bestimmten Alterungsparameter ermittelt werden; man muss sich jedoch hüten, basierend auf einzelnen Grenzwerten die Alterungsbeständigkeit beurteilen zu wollen.

Die heute bekannten Versuchsanordnungen zur künstlichen Alterung von Statorisolationen können in zwei Kategorien unterteilt werden:

a) Grossversuche unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer möglichst grossen Zahl verschiedener Alterungsparameter (Temperatur, thermomechanische Beanspruchung, Ionisation);

b) Kleinversuche (Laboratoriumsversuche), welche sich bewusst auf bestimmte Einflussgrössen der Alterung beschränken.

Während bei Grossversuchen die Wicklungsabmessungen und die Versuchsbedingungen den tatsächlichen Verhältnissen in der Maschine möglichst genau nachgebildet werden, begnügt man sich bei Kleinversuchen, bestimmte Parameter wie

a) Einfluss der Temperatur,
b) Einfluss des Glimmens,
c) Einfluss der mechanischen Beanspruchung,
d) Einfluss der Spannung usw.

an Isolations-Mustern einzeln zu untersuchen. In neuester Zeit werden in vermehrtem Masse Gross- und Kleinversuche derart miteinander kombiniert, dass Kleinversuche an Prüflingen durchgeführt werden, die zuvor in Grossversuchen unter Bedingungen künstlich gealtert wurden, welche den Betriebsbedingungen in der Maschine weitgehend entsprechen.

Im folgenden werden einige Alterungsversuche zur Entwicklung und Beurteilung von Statorwicklungsisolationen näher beschrieben, wobei im Interesse der Übersichtlichkeit einige typische Verfahren herausgegriffen werden. Die Versuche lassen sich beliebig ausbauen und ergänzen, was im Hinblick auf eine möglichst umfassende Beurteilung neuer Isolationen wünschenswert ist.

2. Alterungs-Grossversuche in Statorsegmenten

Im Bestreben, die Betriebsbeanspruchungen von Statorwicklungen zur Abklärung von Isolationsschäden möglichst genau nachzubilden, wurden schon seit etwa 10...15 Jahren Ausschnitte aus Turbostatoren hergestellt, in welchen die Vorgänge näher untersucht werden konnten, denen Statorwicklungsisolationen im Betrieb unterworfen sind. Diese Untersuchungen führten in den USA [3] und in Europa [4] zur Entdeckung eines neuen Alterungsparameters, der thermomechanischen Beanspruchung des Isoliermaterials. Es hatte sich gezeigt, dass bei ungenügender thermomechanischer Festigkeit der Isolation durch die Wärmedilatationen des Wicklungskupfers Kriecheffekte auftreten können, welche die Nutenisolationen innert kurzer Zeit zerstören.

Diese Beobachtungen gaben Anlass zur Entwicklung einer Reihe neuer Isolationen auf Kunstharzbasis, die heute in Form vakuumimprägnierter Kunstharz-Bandisolationen sowie kunstharzvorimprägnierter Band- und Folienisolationen auf dem Markt erhältlich sind [5]. Es liegt auf der Hand, dass die Versuchsanlagen, welche die Reproduktion der Kriechschäden gestatteten, für Alterungsversuche an neuen Isolationen beigezogen wurden. Dabei schenkte man der thermomechanischen Festigkeit der neuen Isolationen besondere Beachtung in der Erkenntnis, dass auch beste elektrische und dielektrische Eigenschaften wenig nützen, wenn die Isolation den ihr aufgezwungenen Wärmedilatationen nicht standhält.

Fig. 1 zeigt ein typisches Statorsegment, einen Ausschnitt aus einem Turbogenerator von 3,1 m Eisenlänge. In den 5 Statornuten können je 2 Wicklungsstäbe eingebaut und die Isolationshülsen Alterungsversuchen unterworfen werden. Es ist dabei üblich, die beiden Stäbe einer Nut aus gleichem Material nach gleichem Verfahren zu isolieren, da dadurch die Alterungsmessungen wie tg-δ- und Spannungs-Kontrollen erleichtert werden. Bei den Messungen wurde festgestellt, dass zur Kontrolle

von Nut-Umpressungen (Folienisolationen) gerade Wicklungsstäbe genügen, die leicht ein- und ausgebaut sowie auf einfache Weise ausgemessen werden können. Die Untersuchung durchgehender Bandisolationen erfolgt mit Hilfe vollständiger Wicklungsstäbe inklusive Wicklungsköpfe, da die Kröpfungsstellen zwischen Nutenteil und Wicklungsköpfen besondere Beachtung erfordern.

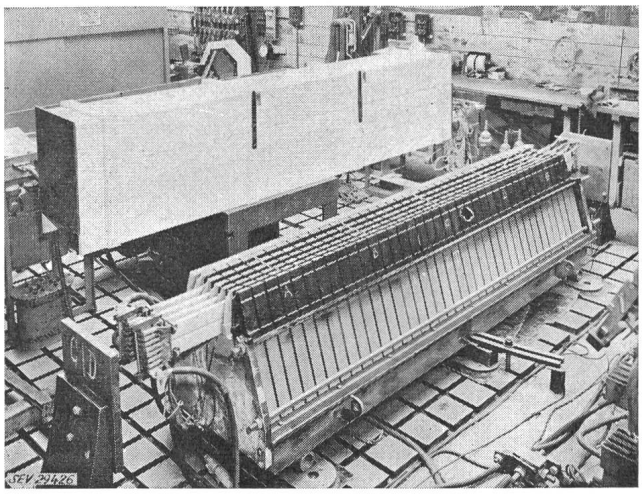

Fig. 1
Statorsegment für Alterungsversuche an Stator-Wicklungsisolationen

Während der künstlichen Alterung von Statorisolationen im Segment können folgende Alterungsparameter untersucht werden:

a) Temperatureinfluss;
b) Thermomechanische Beanspruchung;
c) Ionisationseinfluss.

Es handelt sich dabei um die wichtigsten auch im Betrieb auftretenden Einflussgrössen. Die Steigerung der Alterungsgeschwindigkeit, oder — was gleichbedeutend ist — die Reduktion der Versuchsdauer wird dabei hauptsächlich durch Steigerung der thermomechanischen Beanspruchung in folgender Weise erzielt:

Die im Statorsegment eingebauten Stäbe werden ohne Ventilation durch Wechselstrom derart aufgeheizt, dass ihre mittlere Kupfertemperatur im Statoreisen nach einer Stunde den der betreffenden Wärmeklasse zugeordneten Temperaturwert erreicht. Die Speisung mit Wechselstrom von 50 Hz hat zur Folge, dass Temperaturdifferenzen in den Stäben infolge der zusätzlichen Kupferverluste ähnlich den Betriebsverhältnissen nachgebildet werden. Durch intensive Luftkühlung wird das Statorsegment samt den Prüfstäben in einer weitern Stunde auf Umgebungstemperatur abgekühlt, worauf das Spiel von neuem beginnt. Fig. 2 zeigt einen typischen Temperaturzyklus in einem Statorsegment. Obwohl bei diesem Verfahren die Grösse der durch das Belasten und Entlasten eines Generators ausgeübten thermomechanischen Wicklungsbeanspruchungen nicht überschritten wird, gestatten die sich laufend wiederholenden Temperaturzyklen, die Nutenisolation in wenigen Monaten mit mehr als 1000 Lastwechseln zu beanspruchen und die Kriechfestigkeit der Isolation zu beurteilen. Vergleichsversuche im Segment haben eindeutig gezeigt, dass Kriecheffekte rasch festgestellt werden können und dass die typischen Veränderungen schon nach wenigen Temperaturzyklen eintreten.

Durch Erhöhung der oberen Grenztemperatur kann die thermomechanische Alterung beschleunigt werden. Man hat sich dabei aber Rechenschaft zu geben, wie weit dieses Verfahren für Wicklungsisolationen in Maschinen mit B-Grenztemperaturen zweckmässig ist. Insbesondere ist ein direkter Vergleich mit traditionellen Schellack- und Asphaltisolationen bei Grenztemperaturen über 120 °C nicht mehr möglich.

Der Ionisationseinfluss lässt sich bei Alterungsversuchen im Statorsegment leicht durch Anlegen einer Wechselspannung nachahmen. Das Statoreisen wird dabei gegen Erde isoliert und gegen das Wicklungskupfer an Spannung gelegt. Es ist dabei üblich, die verkettete Spannung, welche der untersuchten Nutenisolationsdicke entspricht, anzuwenden, so dass die Isolation mit einer Spannung beansprucht wird, die $\sqrt{3}$mal so gross ist, wie die im Betrieb maximal auftretende Phasenspannung. Zur Erleichterung von Vergleichen werden die Isolationsdicken vorzugsweise für 10 kV Nennspannung, verkettet, gewählt. Eine Steigerung des Ionisationseinflusses kann durch die Wahl höherer Frequenzen (z. B. 500...1000 Hz) erreicht werden.

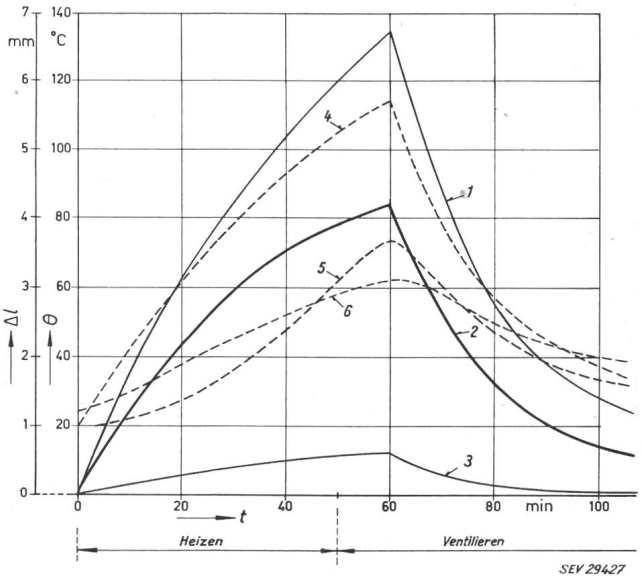

Fig. 2
Temperaturzyklus an einem Wicklungsstab mit Asphaltmicafolium-Isolation

t Zeit; Temperatur; Δ*l* Änderung der Länge
Dehnungen: *1* Wicklungskupfer; *2* Asphaltmicafolium-Isolation; *3* Statoreisen
Temperaturen: *4* mittlere Kupfertemperatur; *5* mittlere Temperatur der Stator-Zahnmitte; *6* Nutengrundtemperatur

Als Alterungskriterien für die Versuche in Statorsegmenten können praktisch alle bekannten Verfahren zur Alterungskontrolle von Statorwicklungen im Betrieb angewandt werden. Damit gewinnen künstliche Alterungsversuche in Statorsegmenten eine Bedeutung, welche über die reinen Fragen der Isolationsentwicklung hinausgeht. Die Anwendung einer möglichst grossen Zahl verschiedener Alterungskriterien gestattet nicht nur einen direkten

Vergleich dieser Kriterien, sondern liefert auch Unterlagen für die Beurteilung neuer Isoliermaterialien, basierend auf Messungen im Betrieb. Es soll auch an dieser Stelle wieder darauf hingewiesen werden, dass weniger Absolutmessungen als vielmehr Vergleichsresultate interessieren und Qualitätsaussagen zulassen.

Als Alterungskriterien für Statorsegment-Versuche sind zu erwähnen:

a) Kriechkontrolle

Die Kriechkontrolle lässt sich leicht durch Messung der Verschiebung verschiedener Punkte der Isolationsoberfläche relativ zu einer festen Mess-

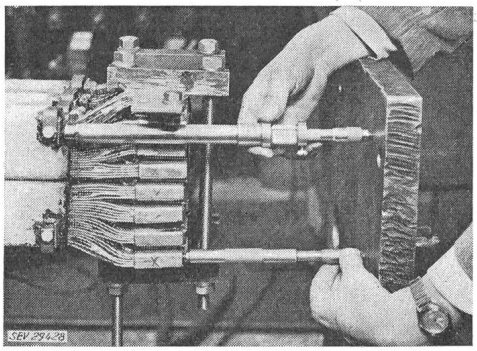

Fig. 3
Stichlehren zur Kontrolle von Kriecherscheinungen bei Nuten-Isolationen

basis durchführen. Es handelt sich dabei durchwegs um Längenmessungen mit Hilfe von Stichlehren (Fig. 3) oder Messuhren (Fig. 4). Die prozentuale Längenänderung der Nutenisolation wird am zweckmässigsten in Funktion der Temperaturzyklenzahl

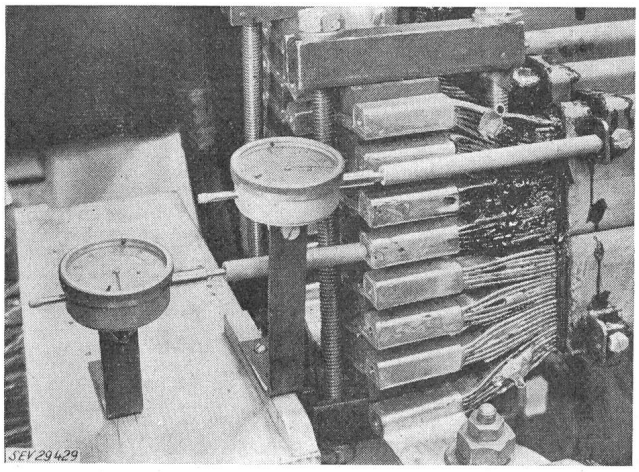

Fig. 4
Messuhren zur Kontrolle von Kriecherscheinungen bei Nuten-Isolationen

aufgezeichnet. Wie aus Fig. 5 hervorgeht, lässt sich dadurch rasch und sicher beurteilen, ob ein Isoliermaterial den thermomechanischen Beanspruchungen standhält oder zum Kriechen neigt. Zur Kriechkontrolle gehört auch das Feststellen von Aufquellungen oder Aufstauchungen in den Kühlschlitzen und am Nutaustritt.

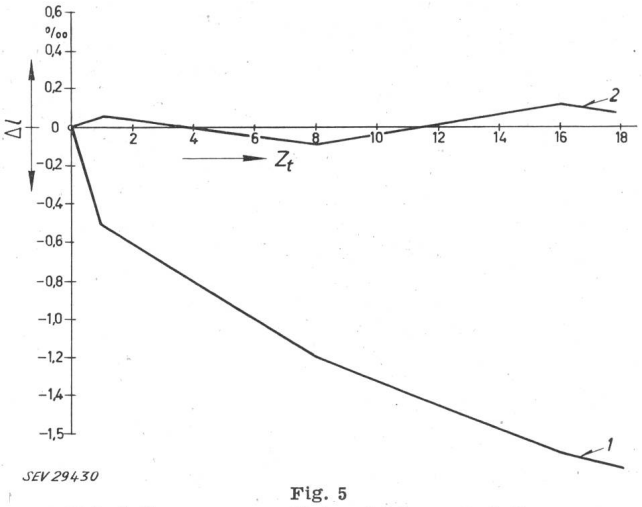

Fig. 5
Kriechdiagramm von Statorwicklungs-Isolationen
Bleibende Längenänderungen in ‰ der Länge der Nutenisolation
1 Nutenisolation aus Asphaltmicafolium; *2* Nutenisolation aus Epoxysamicafolium
Δl bleibende Dehnung; Z_t Zahl der Temperatur-Zyklen

b) Verlustwinkel-Kontrolle

Die Kontrolle der dielektrischen Verluste in Funktion der Spannung jedes einzelnen Prüfstabes erfolgt mit der Scheringbrücke, abgeschirmt, schon vor dem Einbau. Nach dem Einbau dient eine Kontrollmessung, die meistens einen stärkeren Anstieg der dielektrischen Verluste in Funktion der Spannung zeigt, als Basis für alle weiteren tg-δ-Messungen. Die Verschlechterung der dielektrischen Verluste muss als Anteil der nicht abgeschirmten, mit Glimmschutzanstrich versehenen Stabenden (Wickelköpfe) in Kauf genommen werden und hat mit dem dielektrischen Verhalten der Nutenisolation nichts zu tun. Im Verlaufe der Temperaturzyklen werden die tg-δ-Kontrollen laufend wiederholt, wobei Änderungen der Verlustwinkelwerte auf Veränderungen in der Isolation (Aufquellen und Hohlraumbildung, Nachpolymerisation usw.) schliessen lassen. Im Segment lassen sich auch tg-δ-Charakteristiken in Funktion der Temperatur leicht messen und im Verlauf der Alterung miteinander vergleichen.

c) Ionisationskontrollen

Beim Einsatz von Glimmentladungen in Hohlräumen elektrischer Isolationen treten Ausgleichsvorgänge auf, deren Messung eine Beurteilung der Homogenität des untersuchten Isoliermaterials zulassen. Diese Ionisationsmessungen sind empfindlicher als die Verlustwinkelkontrollen mit der Scheringbrücke und lassen sich derart ausbauen, dass durch Verwendung von Meßsonden einzelne Fehlerquellen im Dielektrikum lokalisiert werden können [6]. Glimm-Alterungsversuche haben gezeigt, dass zwischen schwachen, unschädlichen Entladungen und intensiven, energiereichen Glimmvorgängen unterschieden werden muss, welche mit fortschreitender Alterung nicht nur das Bindemittel, sondern auch Glimmerbarrieren zerstören. Der Übergang zwischen den beiden Ionisationszuständen ist meistens ausgeprägt und wird als Ionisationsschwelle bezeichnet. Im Laufe der letzten 10 Jahre wurden verschiedene Ionisationsindikatoren ent-

wickelt, die sich in der Art der gewählten Messgrösse unterscheiden (Spitzenwert-Ladungs-Messung, Quadratische Mittelwertmessung des Ionisationsstromes [7]).

d) Gleichspannungs-Kontrollen mit Niederspannung

GleichspannungsKontrollen mit Niederspannung (500...1000 V) werden zur Messung des Polarisationsindexes, des Ableitstromes nach 10 min und des Resorptionsstromes angewandt [8].

e) Gleichspannungs-Kontrollen mit Hochspannung

Gleichspannungs-Kontrollen mit Hochspannung können zur Ermittlung der bezogenen Abweichung vom Ohmschen Gesetz und zur Lokalisierung eventueller schwacher Stellen in der Isolation (Fehlerortung) beigezogen werden [8].

f) Wechselspannungs-Kontrollen

Wechselspannungs-Kontrollen werden meistens nach Abschluss der künstlichen Alterung angewandt, um Aufschluss über das Absinken der Spannungsfestigkeit des Isoliermaterials zu erhalten.

g) Temperaturkontrollen

Temperaturkontrollen dienen zur Überwachung der Wärmeleitfähigkeit des Isoliermaterials mit Hilfe von direkt auf dem Kupfer aufgebauten Thermoelementen, mit Widerstandselementen in den Nuten und durch Messung der mittleren Temperatur mit Gleichstrom [8].

3. Kleinversuche zur Alterungskontrolle von Isoliermaterialien

Die im Abschnitt 2 beschriebenen Grossversuche weisen den Vorteil auf, dass die Betriebsbedingungen, unter welchen die Statorisolationen zu arbeiten haben, am besten nachgebildet werden. Die Grösse der Installationen und Prüfstäbe hat jedoch zur Folge, dass sich diese Versuche — abgesehen von finanziellen Erwägungen — für Untersuchungen im Laboratorium wenig eignen. Dem Wunsche Rechnung tragend, für Vorabklärungen und zur Grobausscheidung einfachere Versuche im Laboratorium anwenden zu können, wurden Kleinversuche entwickelt. Diese gestatten, wenn auch nicht mehr in gleich umfassender Weise wie die Grossversuche in Statorsegmenten, bestimmte, besonders interessierende Alterungsparameter zu prüfen. Aus der Vielzahl an Kleinversuchen werden im folgenden drei typische Versuche näher beschrieben:

a) thermoelektrische Ofenprüfung;
b) Spannungs-Dauerstandprüfungen;
c) Schlitzzellen-Glimmprüfung.

2.1 Thermoelektrische Ofenprüfung [9]

Die thermoelektrische Ofenprüfung wurde von der Electricité de France entwickelt und verfolgt den Zweck, durch gleichzeitige thermische und elektrische Beanspruchung von Versuchsstäben Vergleichswerte zur Beurteilung neuer Isolationen zu erhalten. Sie berücksichtigt, abgesehen von der thermomechanischen Beanspruchung, die gleichen Alterungsparameter wie der Grossversuch in Statorsegmenten. Durch Vergleich des thermoelektrischen Verhaltens konventioneller Isolationen mit den bekannten Alterungserscheinungen im Betrieb einerseits und durch den Vergleich der thermoelektrischen Alterung neuer Isolationen mit derjenigen konventioneller Isolationen anderseits ist es möglich, die Qualität neuer Isoliermaterialien zu beurteilen und Informationen für deren Weiterentwicklung oder Verwendung zu sammeln.

Die Prüfung wird an geraden Versuchsstäben von 60 cm Länge durchgeführt, wobei versucht wird, die Qualität der Nutenisolation normaler Wicklungsstäbe möglichst genau nachzubilden. Die Versuchsstäbe bestehen aus Kupferteilleitern, welche nach den bekannten Verfahren miteinander verflochten (Röbelstäbe) oder verdrillt (Teilleiterbündelstäbe) und gegeneinander isoliert sind [14]. Dadurch ist es möglich, den Aufbau der Kunststäbe und den Einfluss der Teilleiterisolationen — einen Parameter, welcher die Alterungsvorgänge der Nutenisolationen wesentlich beeinflussen kann — in die Versuche einzubeziehen.

Die Meßstrecke der Versuchsstäbe beträgt 20 cm und trägt einen Leitbelag aus Graphitlack, durchgraphitiertem Papier, graphitierten Asbest- oder Glasbändern usw. Die beiden Stabenden von je 20 cm Länge können mit einem Glimmschutzanstrich versehen werden, wie er am Nutaustritt von Hochspannungswicklungen üblich ist. Es hat sich gezeigt, dass Leitbelag und Glimmschutz im Verlaufe der Ofenbehandlung rascher altern als das eigentliche Isoliermaterial. Um diesen Einfluss auszuschliessen und eine Verfälschung der Messresultate zu vermeiden, werden die Anstriche jeweils vor der Wiederholung der Alterungsmessungen erneuert.

Da besonders bei wenig warmfesten Materialien (Asphalt- und Schellack-Micafolien) mit einem Aufquellen der Nutenisolationen zu rechnen ist, welches bei Wicklungsstäben durch das Statoreisen beschränkt wird, werden die Versuchsstäbe im Bereich der Meßstrecke in «falsche Nuten» gelegt, welche gestatten, auf die Breitseite der Versuchsstäbe einen Druck in der Grössenordnung 1 bis 2 kg/cm² auszuüben.

Um den Einfluss der thermomechanischen Alterung bei der Ofenprüfung berücksichtigen zu können, werden neuerdings Versuchsstäbe verwendet, die aus Wicklungsstäben herausgeschnitten wurden, die in Statorsegmenten durch mehrere Tausend Wärmezyklen künstlich gealtert wurden. Dadurch lassen sich neue Isolationen nach einer Versuchsdauer von 1 bis 1½ Jahren mit im Betrieb gealterten Isolationen vergleichen.

Fig. 6 zeigt eine typische Anordnung der Versuchsstäbe im Wärmeofen. Der Ofen kann durch Heissluftumwälzung auf beliebige Temperaturen bis 180 °C geheizt werden, wobei Thermostaten die Temperatur auf ± 5 °C konstant halten und registrierende Thermometer eventuelle Störungen erkennen lassen. Die Verwendung von Heissluft zum Aufheizen des Ofens gewährleistet eine gleichmässige Temperaturverteilung im Ofen, die durch Einbau von Thermoelementen überwacht werden kann. Durch eine Hochspannungsdurchführung kann das Kupfer der Versuchsstäbe auf eine beliebig einstellbare Spannung gebracht werden, so dass die Isolation neben der thermischen Beanspruchung auch elektrisch beansprucht und Glimmentladungen aus-

gesetzt werden kann. Die Meßstrecke jedes Stabes ist an eine Messdurchführung geführt, welche jederzeit tg-δ-Kontrollen gestattet. Es ist dabei zweckmässig, die Stabenden, wie in Fig. 6 dargestellt, abzu-

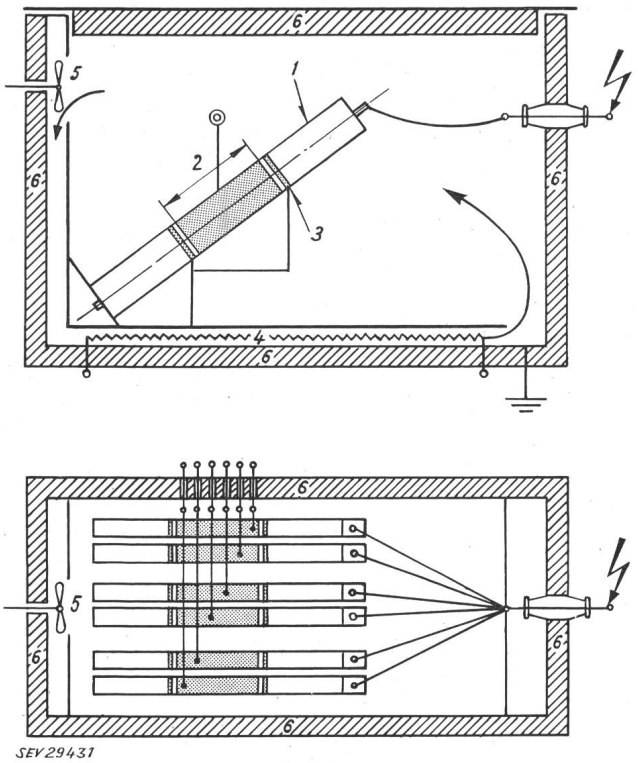

Fig. 6
Ofentest, Versuchsanordnung
1 Versuchsstäbe; *2* Messelektrode (Graphitanstrich, Graphitpapier); *3* Abschirmung; *4* elektrischer Heizkörper zur Umluft-Heizung; *5* Umluft-Ventilator; *6* Ofen-Isolation

schirmen, um Messfehler, hervorgerufen durch Veränderungen des Glimmschutz-Anstriches, auszuschliessen.

Der Wahl der Ofentemperatur muss bei der Ofenprüfung besondere Beachtung geschenkt werden. Als wesentlichster Alterungsparameter hat sie auf die Wärmefestigkeit der zu untersuchenden Isolationen Rücksicht zu nehmen, wenn Fehlschlüsse bezüglich Alterungsbeständigkeit bei tieferen Temperaturen vermieden werden sollen. Bei gleichzeitiger thermischer und elektrischer Alterung ist es dabei üblich, die höchsten einer bestimmten Wärmeklasse zugeordneten Temperaturen nicht zu überschreiten (z. B. 130 °C bei Wärmeklasse B). Die Temperaturen werden dabei mit Thermoelementen direkt auf der Isolationsoberfläche gemessen, da bei Dauerversuchen unter Spannung Isolationen mit relativ hohen dielektrischen Verlustwinkelwerten infolge der dielektrischen Wärmeerzeugung Temperaturen erreichen können, die wesentlich über der mittleren Ofentemperatur liegen. Dieses Verhalten kann für Wärmedurchschlagsmessungen an verschiedenen Isoliermaterialien ausgenützt werden, indem bewusst die Wärmeabgabe von je zwei Versuchsstäben längs einer Breitseite reduziert und die Wärmedurchschlagstemperatur ermittelt wird.

Bei rein thermischen Alterungsversuchen (ohne Spannungseinwirkung) wird üblicherweise nach Massgabe der Wärmefestigkeit der untersuchten Isolation die Temperatur um 20...40 °C erhöht, so dass innert nützlicher Frist thermische und thermoelektrische Alterungsvergleiche durchgeführt werden können.

Die elektrische Beanspruchung der Versuchsstäbe erfolgt in ähnlicher Weise wie bei den Statorsegment-Versuchen: Die Stäbe werden dauernd einer Spannung ausgesetzt, welche der verketteten Spannung von Wicklungen der untersuchten Isolationsdicke entspricht. Für neue Stäbe wählt man üblicherweise Isolationsdicken für eine verkettete Nennspannung von 10 kV, um einen weiteren Parameter in der Beurteilung der Isolation, die Isolationsdicke, möglichst auszuschliessen.

Zur Steigerung der Alterungsgeschwindigkeit kann die Frequenz der angelegten Spannung auf 900...1000 Hz erhöht werden. Obwohl dadurch die Zahl der Entladungen pro Zeiteinheit um den Faktor 18...20 gegenüber industriefrequenten Spannungen (50 Hz) vergrössert wird, hat sich gezeigt, dass die Alterungsgeschwindigkeit — verglichen mit Wicklungen im Betrieb — nicht in gleichem Masse erhöht wird. Dies ist weiter nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, dass die thermoelektrische Ofenprüfung nur einen Teil der Alterungsparameter umfasst und damit in ihrer Wirkung nicht mit den effektiven Betriebsbeanspruchungen verglichen werden kann.

Zur Beurteilung der thermoelektrischen Alterungsversuche im Ofen können grundsätzlich die gleichen Alterungskriterien wie bei den Grossversuchen in Statorsegmenten zugezogen werden: tg-δ-Kontrolle, Ionisationskontrolle, Gleichspannungs-Kontrolle mit kleinen Spannungen.

2.2 Spannungs-Dauerstandprüfungen

Die Verbesserung der thermomechanischen Alterungsbeständigkeit, welche insbesondere bei neuen, kunstharzgebundenen Statorisolationen erreicht wird, hat nicht nur eine Verlängerung der Lebensdauer moderner Isolationen zur Folge, sondern eröffnet auch neue Perspektiven auf dem Gebiet der Dimensionierung von Hochspannungsisolationen für Statorwicklungen. Die Isolationsdicken müssen so gewählt werden, dass sie dem allmählichen Zerfall der Isolation Rechnung tragen und noch nach jahrzehntelanger Alterung ein Spannungsniveau gewährleisten, welches den störungsfreien Betrieb der Maschine sicherstellt. Da die zulässigen minimalen Isolationsdicken Wirtschaftlichkeit und Betriebstemperatur der elektrischen Maschinen wesentlich beeinflussen, ist es nicht verwunderlich, dass parallel mit der Entwicklung neuer Isolationen Versuche zur Beurteilung der Spannungs-Dauerstandfestigkeit durchgeführt werden. Wie bei allen Alterungsversuchen interessiert dabei der Vergleich mit bekannten, konventionellen Isolationen, wobei weniger die Resultate an neuen Isolationen als vielmehr die Werte im Betrieb oder künstlich gealterter Wicklungen gesucht werden.

Die Spannungsfestigkeit einer Isolation kann auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten untersucht werden:

a) der raschen Spannungssteigerung (z. B. 1 kV/s) bis zum Durchschlag oder Überschlag (Durchschlagversuch);

b) dem raschen Hochfahren auf einen bestimmten Spannungswert und das Messen der Zeit bis zum Durchschlag (Dauerstandversuch).

Legt man den Versuchen wieder Versuchsstäbe zu Grunde, die für eine verkettete Nennspannung von 10 kV isoliert sind, dann kann durch das Aufzeichnen der Durchschlagfeldstärke in kV pro mm Isolationsdicke über dem logarithmischen Zeitmassstab ein anschauliches Bild der gesuchten Werte erhalten werden (Fig. 7).

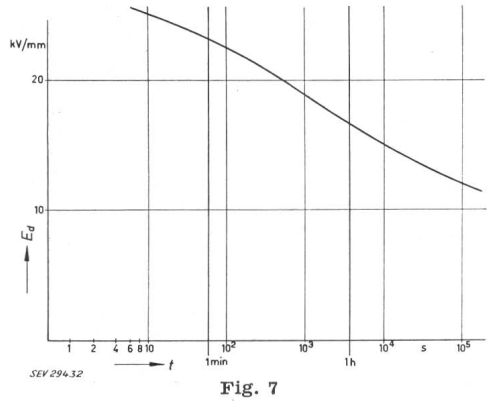

Fig. 7
Mittelwerte von Spannungs-Dauerstandprüfungen an einer 2,8 mm dicken Nutenisolation aus Schellackmicafolium
t Zeit; E_d Durchschlagfeldstärke

Nachteilig für die Beurteilung der Durchschlagwerte wirkt sich die Streuung aus, die besonders bei den Dauerstandversuchen ein beträchtliches Ausmass erreichen kann. Man ist daher gezwungen, für jeden Versuchspunkt eine grössere Zahl von Versuchsstäben zu opfern, was finanziell besonders dann ins Gewicht fällt, wenn zu Vergleichszwecken Wicklungsstäbe normaler Grösse sowohl mit Gleichspannung als auch mit Wechselspannung geprüft werden. Da eine statistische Behandlung der Spannungs-Zeit-Charakteristiken häufig auf Schwierigkeiten stösst, ist es zweckmässig, nicht nur den Mittelwert der Messungen, sondern auch den gemessenen Streubereich einzuzeichnen. Solche Kurven erleichtern den Vergleich und bewahren vor Fehlschlüssen.

Um Sekundäreffekte wie Randüberschläge, Wärmedurchschläge am Ende der Meßstrecke usw. zu vermeiden und vergleichbare Resultate zu erhalten, müssen bei den Messungen bestimmte Vorsichtsmassnahmen eingehalten werden:

a) Für Kurzzeit-Durchschläge mit hohen Spannungen ist die Spannungsteuerung an beiden Enden der Meßstrecke unerlässlich, wenn Überhitzung des Halbleiteranstriches und vorzeitige Randüberschläge vermieden werden sollen. Auch für Stossversuche sind Spannungsteuerungen zu empfehlen.

b) Bei Dauerstandversuchen ist der Wärmefestigkeit des Isoliermaterials Beachtung zu schenken, besonders dann, wenn die dielektrischen Verluste in Funktion der Temperatur rasch ansteigen. In diesen Fällen ist es zweckmässig, die Wicklungsstäbe in «falsche Nuten» einzuschliessen, so dass sie nicht aufquellen können, und durch intensive Kühlung der Randzonen dafür zu sorgen, dass keine Überhitzung des Glimmanstriches auftritt. Überhitzung der Randzonen führt zu Gleitüberschlägen oder Wärmedurchschlägen, das heisst zu Vorgängen, die im normalen Betrieb der Wicklung üblicherweise nicht auftreten.

Versuche mit Nutenisolationen aus Schellackmicafolium haben gezeigt, dass mit steigender Zahl der Betriebsjahre eine Reduktion des 50-Hz-Spannungsniveaus eintritt. Dieser Spannungs-Alterungseffekt kann durch Spannungs-Dauerstandprüfungen an neuen Stäben, an jahrelang gelagerten Reservestäben und an Stäben, welche nach jahrelangem Betrieb aus Maschinen ausgebaut wurden, nachgewiesen werden. Es ist dadurch möglich, sich ein Bild über den Abfall der Spannungsfestigkeit im Laufe des Betriebes zu machen.

In ähnlicher Weise können Spannungs-Dauerstandprüfungen an neuen und künstlich gealterten Isolationen durchgeführt werden, sei es, dass die Alterung im Statorsegment oder thermoelektrisch im Ofen erfolgte. Der Vergleich mit konventionellen Isolationen, bei denen der Abfall der Spannungsfestigkeit in Funktion der Betriebszeit bekannt ist, erlaubt dann, auf dem Umweg über künstliche Alterungsversuche, Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Statorisolationen bezüglich Spannungsalterung zu beurteilen.

2.3 Schlitzzellen-Glimmprüfung

Die Schlitzzellen-Glimmprüfung gestattet, das zu prüfende Material während längerer Zeit einer intensiven Glimmbeanspruchung auszusetzen und durch visuellen Vergleich oder quantitative Messungen die Alterungsbeständigkeit im elektrischen Wechselfeld bei Anwesenheit glimmender Hohlräume zu beurteilen. Da die zerstörende Wirkung von Glimmentladungen in den Isolationen von Hochspannungswicklungen mit Nennspannungen über ca. 3 kV schon seit Jahren bekannt ist, zeigte sich besonders bei Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Isolationstechnik das Bedürfnis, die Veränderungen näher zu untersuchen, die konventionelle und moderne Isolierstoffe unter dem Einfluss des Glimmens erleiden [10; 11].

Nach einem französischen Vorschlag des Comité d'Etudes 15 der CEI können für Glimmuntersuchungen Glaszellen verwendet werden, welche sich sehr gut zur Untersuchung dünner Materialien wie Folien, Papiere, Gewebe, Bänder usw. eignen. Die zu prüfenden Isoliermaterialien werden zwischen zwei distanzierte Glasplatten gelegt. Zwei Elektroden sind derart angeordnet, dass ungefähr die Hälfte des Prüflings einer intensiven Glimmbeanspruchung ausgesetzt ist, während die andere Hälfte zu Vergleichszwecken nicht beansprucht wird (Fig. 8).

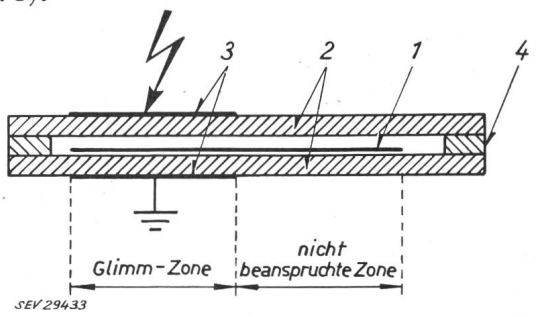

Fig. 8
Glas-Glimmzelle für dünne Isoliermaterialien
1 Prüfling; *2* Glasplatten; *3* Glimmelektroden; *4* Glasrahmen (2 mm dick)

Der Nachteil der Glaszelle liegt darin, dass Kombinationen dünner Isolierstoffe, das heisst vollständige Wicklungsisolationen, nicht unter Bedingun-

gen geprüft werden können, die den Verhältnissen beim Betrieb der Maschine ähnlich sind. Aus diesem Grunde wurde eine Schlitzzelle entwickelt, welche diese Forderung weitgehend erfüllt [12; 13]. Der Aufbau der Zelle berücksichtigt die durch zahlreiche Untersuchungen an alten Wicklungsstäben bestätigte Tatsache, dass die stärkste Glimmbeanspruchung von Nutenisolationen unmittelbar an der Kupferoberfläche auftritt. Diese Schäden sind auf Glimmentladungen in Hohlräumen zurückzuführen, welche schon während der Fabrikation der Stäbe oder später, infolge thermomechanischer Beanspruchungen, während des Betriebes entstanden sind. Fig. 9 zeigt den schematischen Aufbau einer Schlitzzelle.

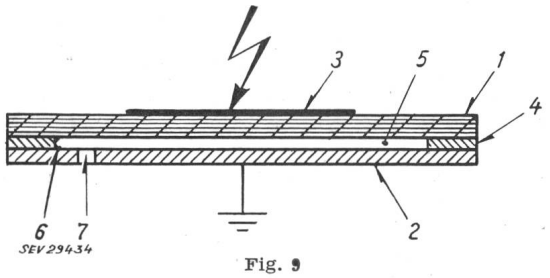

Fig. 9
Schlitz-Glimmzelle für Wicklungsisolationen
1 Prüfling (2...3 mm dick); *2* Kupferelektrode; *3* Aluminiumelektrode; *4* Glasrahmen (0,2 oder 2 mm dick); *5* Glimmschlitz; *6* Dichtungsmasse (für Versuche mit geschlossenen Zellen); *7* Gasanschluss (für Versuche mit geschlossenen Zellen)

Als Prüflinge können beliebige, in der Wicklungstechnik verwendete Isolationen mit Dicken von 2...5 mm verwendet werden, die auf einer Seite als Elektrode eine kreisrunde Aluminiumfolie tragen. Als Gegenelektrode dient eine quadratische Kupferplatte, welche durch einen Glasrahmen vom Prüfling distanziert wird. An Stelle der Kupferelektrode kann auch eine zweite Isoliermaterialplatte mit Aluminiumelektrode verwendet werden, so dass Glimmeffekte im Innern der Isolation nachgebildet werden können. Durch Veränderung der Glasrahmendicke ist es möglich, die Intensität des Glimmens bei konstanter Spannung zu variieren. Die Wahl von höheren Frequenzen (500...1000 Hz) für die angelegte Spannung gestattet, die Alterungsgeschwindigkeit bei der Glimmprobe derart zu steigern, dass schon nach wenigen Monaten eindeutige Vergleichsresultate verfügbar sind. Für einfache, visuelle Vergleichsversuche ist es üblich, den Glasrahmen an den Ecken offen zu lassen, so dass Luft und Feuchtigkeit ungehindert in den Glimmschlitz eindringen können. In Fällen, wo ein besserer Einblick in die elektrochemischen Vorgänge erwünscht ist, kann die Zelle vollständig abgedichtet werden, so dass für die Reaktion nur das ursprünglich eingeschlossene Luftvolumen zur Verfügung steht. Druckmessungen und Kontrolle der nachträglich dem Glimmschlitz zugeführten Luftmengen gestatten quantitative Untersuchungen der Glimm-Alterung. Der Schlitzzelle-Glimmversuch kann ohne Schwierigkeit auch zur Beurteilung der Glimmbeständigkeit von Wicklungsisolationen in Schutzgas-Atmosphäre herangezogen werden, indem der Glimmschlitz mit dem interessierenden Gas (z. B. N_2, H_2 usw.) gefüllt wird. Es ist damit möglich, die Alterungsbeständigkeit von Statorwicklungsisolationen gegen Glimmentladungen auch bei wasserstoffgekühlten Maschinen zu beurteilen und wertvolle Unterlagen für Isolationen von grossen Turbogeneratoren zu erhalten.

4. Zusammenfassung

An Hand von Beispielen wurde gezeigt, wie durch künstliche Alterungsversuche Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Statorisolationen mit bekannten Wicklungsisolationen verglichen und beurteilt werden können. Es wird dabei unterschieden zwischen Grossversuchen, welche möglichst alle Alterungsparameter zu erfassen trachten, und Alterungsversuchen im Laboratorium, die sich bewusst auf bestimmte Alterungseinflüsse beschränken. Durch gleichzeitige Anwendung verschiedener Alterungsversuche ist es heute möglich, sich ein gutes Bild über die Lebenserwartung neuer Isolationen zu machen, wobei vor allem Vergleichsversuche mit bekannten, konventionellen Isolationen Alterungs-Prognosen erleichtern. Da die künstlichen Alterungsversuche die wirklichen Betriebsbedingungen nur in beschränktem Masse nachbilden, wird man auch in Zukunft darauf angewiesen sein, künstliche Alterungs-Resultate an Wicklungen im Betrieb zu bestätigen und durch laufende Überwachung der Maschinenisolationen wichtige Betriebsinformationen zur Entwicklung neuer Isolationen zu sammeln.

Literatur

[1] *K. Abegg, Ch. Caflisch* und *F. Knapp:* Isolationen hoher Festigkeit für Generatoren grosser Leistung. Bull. Oerlikon Bd. -(1959), Nr. 332, S. 8...21.

[2] *Beberich, L. J.* und *T. W. Dakin:* Guiding Principles in Thermal Evaluation of Electrical Insulation. Trans. AIEE Bd. 75(1956), Part 3: Power App. & Syst., Nr. 25, S. 752...761.

[3] *Lafoon, C. M., C. F. Hill, G. L. Moses* und *L. J. Berberich:* A New High-Voltage Insulation for Turbine-Generator Stator Windings. Trans. AIEE Bd. 70(1951), Part 1, S. 721...726.

[4] *Abegg, K.:* L'effet de Creeping de l'isolation statorique des machines électriques et les moyens d'y remédier. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 15. Session 1954, Bd. 2, Rapp. 140.

[5] *Meyer, H.:* Die Verwendung von Kunstharzen bei Hochspannungswicklungen von elektrischen Maschinen. In «Kunststoffe in der Hochspannungstechnik», hg. von der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen e. V.; Berlin: VDE 1959. S. 60...65.

[6] *Fabre, J.* und *J.-P. Gelez:* Les mesures d'ionisation gazeuse dans les isolants. Reo. gén. Electr. Bd. 67(1958), Nr. 21, S. 130 L...140 L.

[7] *Langlois-Berthelot, R.:* La fatigue diélectrique des isolants et la maintenance des appareils électriques (notamment des transformateurs). Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 15. Session 1954, Bd. 2, Rapp. 105.
Renaudin, D.: Appareil de mesure de l'ionisation dans les transformateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 15. Session 1954, Bd. 2, Rapp. 105, Annexe II, S. 61...80.

[8] *Fabre, J., G. Lang, J. Laverlochère, G. Leroy, J. Narcy* und *G. Ruelle:* Recherches sur l'isolation des grands machines synchrones. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 16. Session 1956, Bd. 2, Rapp. 137.

[9] *Abegg, K., Ch. Caflisch* und *F. Knapp:* Recherches pour améliorer la résistance au vieillissement de l'isolation statorique des grands alternateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 17. Session 1958, Bd. 2, Rapp. 129.

[10] *Liebscher, F.:* Die Bedeutung der Glimmentladungen in Hochspannungswicklungen elektrischer Maschinen. VDE-Fachber. Bd. 19(1956), S. I/130....I/135.

[11] *Braun, R.:* Die Vergrünung von Kupferleitern an Hochspannungswicklungen. Masch.-Schaden Bd. 30(1957), Nr. 3/6, S. 86...87.

[12] *Caflisch, Ch.:* Diskussionsbeitrag zu [5] in «Kunststoffe in der Hochspannungstechnik», hg. von der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen e. V.; Berlin: VDE 1959. S. 66...69.

[13] *Knapp, F.:* Diskussionsbeitrag zu [5] in «Kunststoffe in der Hochspannungstechnik», hg. von der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen e. V.; Berlin: VDE 1959. S. 69...70.

[14] *Abegg, K.:* Aus der Technologie der Wasserkraftgeneratoren: Die Statorwicklungen. Bull. SEV Bd. 51(1960), Nr. 8, S. 428...437.

Adresse des Autors:
K. Abegg, Ingenieur, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.