

# ALTERUNGSVORGÄNGE IN DER STABILISIERUNG VON TURBOGENERATOREN UND DEREN NACHWEIS DURCH MESSUNGEN

Von

J. EISLER

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektrische Apparate,  
Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 19. Mai 1964)

## 1. Einleitung

Über das vorliegende Thema sind in der letzten Zeit so viele ausgezeichnete, durch Messungen belegte theoretische und angewandte Arbeiten erschienen, daß es beinahe vermessen erscheint, ihre Zahl noch zu vermehren. Der hauptsächlichste Grund dafür, daß der Verfasser sich dennoch dazu entschlossen hat, ist der, daß in der Beurteilung dieser Erscheinungen noch bei weitem keine völlige Übereinstimmung festgestellt werden kann.

An und für sich wäre dies vielleicht kein Unglück, doch hat es zur Folge, daß auch die Ansichten über die Zweckmäßigkeit der Messungen auseinandergehen, was freilich weniger vorteilhaft ist, insbesondere dann, wenn deshalb von Ort zu Ort auch ganz verschiedene Messungen durchgeführt werden. Dies aber führt zwangsläufig dazu, daß sich die Erfahrungen schwieriger verwerten lassen, weil sie nicht immer miteinander verglichen werden können.

Aus seiner langjährigen Praxis in der Forschung und technischen Anwendung hat der Verfasser den Schluß gezogen, daß fast jeder der irgendeine Meßmethode *in der Praxis* erprobt und für geeignet befunden hat, mit Recht behaupten darf, seine Methode habe sich bewährt. Der Grund für abweichende Meinungen kann also nur darin zu suchen sein, daß die Methoden nicht unter gleichen Bedingungen angewendet wurden.

Eben deshalb unternimmt hier Verfasser den Versuch, die allgemeinen und besonderen Eigenschaften der Turboisolierungen von neuem zu untersuchen, daraus ein Bild von den charakteristischen Vorgängen der Alterung zu formen und schließlich daraus Schlußfolgerungen darüber zu ziehen, welche Kontrollmessung im gegebenen Fall als die zweckmäßigste erscheint. Freilich haben dies schon andere, berufenere getan, dennoch hofft Verfasser, daß seine auf die Ergebnisse dieser ausgezeichneten Forscher gestützten Auseinandersetzungen nicht ganz unnütz sein werden.

## 2. Die wahrscheinlichen Ursachen der Alterung von Stabisolierungen als Folge ihres Aufbaus

### 2.1. Überblick

Die Micafolienisolierungen der Turbostäbe (nur diese werden untersucht, weil sich auch die Diskussion nur auf diese bezieht), scheinen auf den ersten Blick ähnlichen Charakters zu sein wie die Kabelisolierungen. Diese Analogie, die hauptsächlich darauf basiert, daß es sich in beiden Fällen um geschichtete Isolierungen handelt, erweist sich als recht oberflächlich. Da derartige u. E. unrichtige Ansichten im Schrifttum anzutreffen sind, müssen sie auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

Betrachtet man zunächst die gemeinsamen Züge, gelangt man zu der Feststellung, daß der erste die schon erwähnte geschichtete Struktur ist, der zweite hingegen der, daß in beiden Isolierungen unter der Einwirkung der Betriebsbeanspruchungen Hohlräume entstehen, in denen Ionisation auftreten kann. Mit diesen Feststellungen sind aber die Analogien auch so gut wie erschöpft, ja selbst auf diesen Gebieten nicht vollständig, und zwar aus folgenden Gründen:

a) Der Aufbau der Kabelisolierungen ist im allgemeinen viel regelmäßiger als der der Turboisolierungen, weil die Papierschichten gleichmäßig aufgewickelt sind, während die Glimmerschichten aus verschieden großen, dicken und recht regellos aufeinandergestreuten Plättchen bestehen.

b) In der Kabelisolierung gehören das getränkte Papier und das Isoliermaterial zwischen den Papierschichten in dieselbe Wärmebeständigkeitsklasse, während der Glimmer eher in die Klasse H, der Schellack oder der Asphalt hingegen entschieden in die Klasse A gehört, ja die Wärmebeständigkeit der neuerdings gebrauchten Kunststoffe nicht die der Klasse H erreicht.

c) Die Entstehung der Hohlräume in einer Kabelisolierung wird durch die Wanderung der Tränkmasse verursacht, in einer Turboisolierung hingegen durch die von der Wärmedilatation ausgelöste mechanische Beanspruchung.

Aus allen diesen Gründen ist die Analogie zur Erklärung der Erscheinungen so gut wie unbrauchbar, weshalb es nicht zu umgehen ist, die Alterungserscheinungen der Turboisolierungen für sich allein zu betrachten.

Allgemein herrscht die Ansicht vor, daß der Charakter der Alterung wesentlich davon abhängt, in welchem Verhältnis die Isolierung Glimmer und Klebstoff enthält und weiterhin davon, welche Größe die Glimmerplättchen haben.

Wird Glimmer in der noch seltenen Form von Samicafolium verwendet, spielt der Klebstoff eine untergeordnetere Rolle, weil nur dessen verhältnismäßig sehr weitgehende Alterung einen Durchschlag verursachen kann. In der Klebstoffschicht kann ein nennenswerter Strom selbst bei ihrer Alterung nur in Spiralforn, d. h. auf einem sehr langen Weg fließen, zum mindestens auf einem sehr langen Weg im Verhältnis zu dem, der in der aus Glimmer-

plättchen aufgebauten Isolierung zur Verfügung steht. Eine derartige Isolierung ist jedenfalls um so besser, je dünner das aufgewickelte Samicafolium ist, denn um so größer ist die Zahl der aufgewickelten Schichten und um so länger ist auch der dem Strom zur Verfügung stehende Weg.

Leider wird die Verwendung derartiger Samicafoliumisolierungen dadurch erschwert, daß sie gegen Längsbeanspruchungen also gegen die Dilatationsbewegungen ziemlich empfindlich sind.

Bei der Beurteilung der gewickelten Micafoliumbandisolierung muß bedacht werden, daß das Band auch aus Mikafolium geschnitten wird, daß sich also innerhalb eines Bandes das Verhältnis der Glimmer- und der Klebstoffschichten zueinander von dem in einer tuchartig aufgewickelten Micafoliumisolierung im wesentlichen nicht unterscheidet.

Derartige aus kleinen Glimmerplättchen aufgebaute Isolierungen können daher scheinbar gemeinsam untersucht werden unabhängig davon, ob es sich um Bänder oder um tuchartigen Micafolien handelt. Bei genauer Betrachtung stellt sich aber auch hier heraus, daß es doch ein gewisser Unterschied besteht je nachdem, ob die Isolierung aus kleinen oder aus großen Glimmerplättchen aufgebaut wird. Von einer scharfen Trennlinie kann freilich nicht die Rede sein, Eine sprunghafte Änderung im Charakter des Vorgangs tritt erst dann ein, wenn die Glimmerschicht kontinuierlich die ganze Stablänge entlang reicht oder, da kontinuierliche Glimmerplatten in dieser Länge nicht existieren, wenn Samicafoliumisolierung verwendet wird, von der schon die Rede war.

Bevor auf die Untersuchung der Isolierung eingegangen würde, erscheint es zweckmäßig, die wichtigeren *Schlußfolgerungen* des Verfassers vorwegzunehmen.

Die elektrische Festigkeit des Glimmers ist verhältnismäßig hoch. Wegen seiner kleinen Verluste neigt er weniger zu thermischen Durchschlägen, bei der Temperatur in den Maschinen altert er nicht (er gehört zumindest in die Klasse H) und ebenso ist er gegenüber Ionisation widerstandsfähig. Aus diesem Grunde erscheint die Annahme berechtigt, daß der Durchschlag dann eintritt, wenn der *Klebstoff* zugrundegeht, der schlechtere elektrische Eigenschaften aufweist, bei der in den Maschinen herrschenden Temperatur nicht wärmebeständig ist (Klasse A) und durch die Ionisation beschädigt wird. Für diese Auffassung spricht auch die Tatsache, daß der »OTUSZ« (Staatlicher Überspannungsschutzdienst) auf Grund der Statistiken zu der Meinung gelangt ist, daß die Lebensdauer der Generatorisolierungen mit der aus dem Gesetz von MONTSINGER abgeleiteten Lebensdauer des Klebstoffs gut übereinstimmt [1]. Das Zugrundegehen des Klebstoffs ist wahrscheinlich auf zwei im großen und ganzen gleichzeitig wirkende Vorgänge zurückzuführen.

Der eine Vorgang ist die thermische Alterung, der andere die Zerstörung durch die in den Hohlräumen entstehende Ionisation. Der Durchschlag wird indes, wie schon gesagt, *unmittelbar* nicht durch die Tatsache der Ionisation

*allein* und nicht durch die Alterung *allein*, sondern durch das Zugrundegehen des Klebstoffs hervorgerufen.

Ist diese Feststellung richtig, müssen die Kontrollmessungen, die zu ermitteln haben, für wann der Durchschlag zu erwarten ist, darauf ausgerichtet werden, daß sie in erster Linie *über den Zustand des Klebstoffes* Auskunft geben.

Es kann natürlich auch von Interesse sein festzustellen, inwieweit sich in der Isolierung Vorgänge abspielen, die diese Alterung hervorrufen; im Vergleich zu der erwähnten Anforderung liefern jedoch derartige Feststellungen für den Betrieb nur zweitrangige Informationen. Es ist aber auch klar, daß bei einer *neuen* Isolation mit neuem Klebstoff, von diesem Gesichtspunkt aus betrachtet (neben der Feststellung, ob in der Isolierung keine groben Fabrikationsfehler vorhanden sind) eben der voraussichtliche Verlauf der Alterung von Interesse ist. Vielleicht ist es deshalb nicht überflüssig, das Gesagte ein wenig zu konkretisieren.

Bei der Untersuchung einer alten, bereits in Betrieb befindlichen Isolierung ist es an und für sich weniger interessant festzustellen, wie stark die in der Isolierung auftretende Ionisation ist. Von Interesse kann höchstens die seit der letzten Kontrolle eingetretene Vergrößerung sein, aber auch dies nur in zweiter Linie. Es ist nämlich denkbar, daß in einer ursprünglich lückenhaften Isolierung eine verhältnismäßig starke Ionisation vorliegt, die sich sogar vergrößert hat, daß sich aber zusammenhängende, vom Leiter bis zum Eisenkörper reichende verkohlte Schichten trotzdem nicht ausbilden konnten, daß also keine Durchschlagsgefahr besteht. Andererseits ist aber auch denkbar, daß die Isolierung ursprünglich ionisationsfrei war, daß die Ionisation auch bei der Messung verhältnismäßig gering ist, daß jedoch der Klebstoff wegen der verhältnismäßig hohen Temperatur verkohlt ist. Im Bereich der Möglichkeit liegt es auch, daß schon eine verhältnismäßig geringe Ionisation über einen langen Zeitraum eine solche Zerstörung hervorgerufen hat, daß der Durchschlag alsbald eintritt.

Den Hauptzweck der Untersuchung bildet es demnach, den *Zustand des Klebstoffs zu erkennen*, und die Kontrollmethoden sind gut, wenn sie Erkenntnisse hierüber liefern. Der Zustand des Klebstoffs kann durch seinen konduktiven Widerstand gekennzeichnet werden oder durch seine Verluste, die ebenfalls konduktiven Charakter haben, wenn der Alterungsvorgang für uns interessant wird. Daraus folgt aber, daß eine Gleichstrommessung wesentliche Informationen liefern kann, und diejenigen [2, 3], die diese vorschlagen, können, wie sich zeigen wird, in gewissen Fällen recht haben. Es kann jedoch auch Fälle geben, in denen die Messung des  $tg\delta$  charakteristischere Werte liefert, in erster Reihe dann, wenn sie so durchgeführt wird, daß die Ionisation den  $tg\delta$  nicht beeinflußt, z. B. bei *Niederspannungen*.

Die in Abhängigkeit von der Spannung mit Hochspannung durchgeführte

Messung des  $\text{tg}\delta$  liefert im allgemeinen Ergebnisse der zweiten Kategorie, indem sie aufzeigt, welches Maß die Ionisation angenommen hat, wieviele Hohlräume in der Isolierung vorhanden sind. Denkbar ist es natürlich auch, daß der im Klebstoff auftretende konduktive Verlust wegen der Alterung so groß ist, daß im wesentlichen dieser der Wert von  $\text{tg}\delta$  bestimmt. Das geht daraus hervor, daß der  $\text{tg}\delta$  in Abhängigkeit von der Spannung bis zu einem gewissen Spannungswert konstant ist, mit der Betriebszeit jedoch steigt. In diesem Fall zeigt die in Abhängigkeit von der Spannung durchgeführte Messung des  $\text{tg}\delta$  bei etwa jährlicher Wiederholung den in Abb. 1 dargestellten

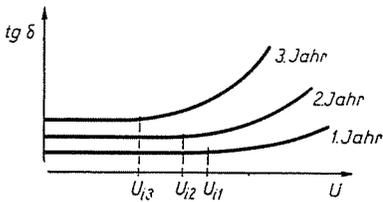


Abb. 1

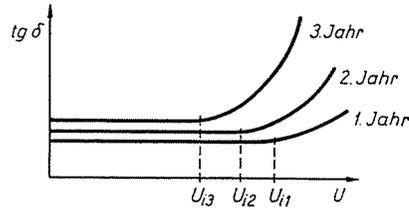


Abb. 2

Verlauf. Unter dem Ionisationsknick wachsen die Verluste in der Zeit, die Ionisationsschwelle ändert sich jedoch kaum. Wenn hingegen die Ionisation die Isolierung noch nicht beschädigt, während sich die Zahl der Hohlräume wegen der Dilatation schnell erhöht, ergibt sich der in Abb. 2 dargestellte Verlauf.

Es ist denkbar, daß die Zunahme von  $\frac{\Delta \text{tg}\delta}{\Delta U}$  größer, die Verringerung der Schwellenspannung  $U_i$  schneller ist, ohne daß der Durchschlag der Isolierung näher läge als dann, wenn das Anwachsen von  $\frac{\Delta \text{tg}\delta}{\Delta U}$  kleiner, die Verringerung der Schwellenspannung  $U_i$  gleichfalls geringer, der Ausgangswert von  $\text{tg}\delta$  dagegen größer ist.

Hier muß bemerkt werden, daß es auch Fälle gibt, in denen sich der anfängliche Wert von  $\text{tg}\delta$  zuerst vermindert, weil die ursprünglich schlecht getrocknete Isolierung in der Maschine während der Betriebszeit trocknet, so daß der  $\text{tg}\delta$  wegen der Alterung der Isolation und wegen der Ionisation erst dann zu steigen beginnt. Es ist auch einzusehen, daß der Anfangswert von  $\text{tg}\delta$  in gewissen Fällen mit dem Fortschreiten der Klebstoffalterung nach Erreichen eines Maximums von neuem sinkt.

Das Bild wird verworrener, wenn der Anfangswert von  $\text{tg}\delta$  bei einer Spannung gemessen wird, bei der die Ionisation schon eingetreten ist. Dies ist daher auf keinen Fall richtig. Die Änderung des Anfangswertes bei den jährlich wiederholten Messungen zeigen für beide Fälle und für ein und dieselbe Isolierung die Abbildungen 3a und 3b (berechnete Werte).

Eine neuerdings vorgeschlagene Variante der  $\text{tg}\delta$ -Messung schaltet an die Stelle des Abgleichsinstruments ein Kathodenstrahloszilloskop und macht so das Oszillogramm des Verluststromes sichtbar.

Um unsere Schlußfolgerungen zu begründen, untersuchen wir nunmehr zuerst die aus relativ kleinen Glimmerplättchen aufgebaute Isolierungen und nachher die durchgehende Micafoliumisolierungen. Die aus verhältnismäßig großen Platten aufgebaute Isolierung stellt einen Übergang zwischen den beiden Fällen dar und soll deshalb nicht gesondert untersucht werden.

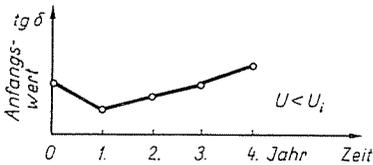


Abb. 3a

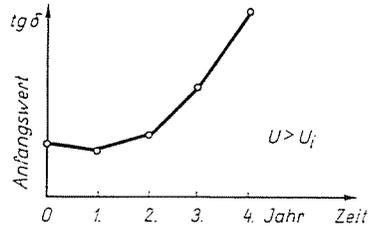


Abb. 3b

## 2.2. Aus verhältnismäßig kleinen Glimmerplättchen aufgebaute Isolierung

Das der Untersuchung zugrunde gelegte Modell zeigt die Abb. 4. Die Isolierung ist natürlich nicht so regelmäßig, was jedoch grundsätzliche Schlüsse nicht ausschließt.

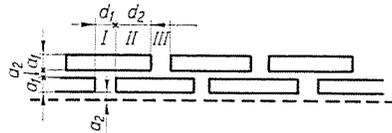


Abb. 4

Die Isolierung kann in drei charakteristische Zonen aufgeteilt werden, die gesondert untersucht werden sollen.

Die Stärke der Glimmerschichten ist  $a_1$ , die des Klebstoffs  $a_2$ , die Abmessungen in Schichtrichtung sind  $d_1$  und  $d_2$ . Die Permittivität der beiden Werkstoffe ist  $\varepsilon_1 = 7$  und  $\varepsilon_2 = 3,5$ . Die gesamte Schichtstärke für das elementare Modell ist

$$a' = 2 a_1 + 2 a_2, \quad (1)$$

die Gesamtstärke der Isolierung

$$a = N a', \quad (2)$$

wobei  $N$  die Zahl der Schichten bezeichnet.

Die auf das elementare Modell entfallende Spannung sei  $U' = \frac{U}{N}$ , die Durchschlagfeldstärke des Glimmers  $(E_d)_1$ , die des Klebstoffes  $(E_d)_2$ , die Feldstärken seien  $E_1$  und  $E_2$ .

Es sollen nun die in der I., II. und III. Zone auftretenden Feldstärken ohne Rücksicht darauf berechnet werden, daß in der Isolierung auch mit Luft gefüllte Hohlräume vorhanden sein können.

### I. Zone

$$U' = E_{11} a_1 + E_{21} (a_1 + 2 a_2). \quad (3)$$

Bekannt ist, daß

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{3,5}{7} = 0,5. \quad (4)$$

Da die Durchschlagfestigkeit des Glimmers größer ist als die des Klebstoffs und außerdem im Glimmer die Feldstärke nur halb so groß ist, genügt es, bloß die Feldstärke im Klebstoff zu berechnen. Sie schreibt sich zu

$$E_{21} = \frac{U'}{1,5a_1 + 2a_2}, \quad (5)$$

in der II. Zone (auf ähnliche Weise berechnet) zu

$$E_{2II} = \frac{U'}{a_1 + 2a_2} \quad (6)$$

und in der III. Zone zu

$$E_{2III} = \frac{U'}{1,5a_1 + 2a_2}. \quad (7)$$

Offenbar tritt die größte Feldstärke im Klebstoff in der II. Zone auf. Die in den hier entstehenden Hohlräumen auftretende größte Feldstärke ist, da  $\varepsilon_2 = 3,5$ , ungefähr das Dreifache des Wertes von Gl. (6). Dies wird übrigens später noch genauer berechnet werden. Die durchschnittliche Feldstärke ist hingegen

$$E_m = \frac{U'}{a'} = \frac{U'}{2(a_1 + a_2)}. \quad (8)$$

Wenn die ganze Isolierung aus  $N$  solchen Elementarschichten besteht, ergeben sich wegen  $a = Na'$  und  $U = NU'$  offenbar die gleichen Feldstärken für die ganze Isolierung.

Ist also bei der Spannungsprüfung eine Sicherheit  $b$  gewünscht, ergibt sich für die Abmessungen (der kritischen Zone II) wegen

$$(E_{zui})_2 = \frac{(E_d)_2}{b}$$

der Zusammenhang

$$N(a_1 + 2 a_2) = \frac{U_p}{(E_{zui})_2} = \frac{b U_p}{(E_d)_2} . \quad (9)$$

$(E_d)_2$  ist für Schellack ungefähr 200 kV/cm,  $U_p = 2 U + 3$  kV oder für 10,5-kV-Maschinen  $U_p = 24$  kV. Unter Zugrundelegung von  $b = 2$  hat man

$$N(a_1 + 2 a_2) = 2 \frac{24}{200} = 0,24 \text{ cm} . \quad (10)$$

Mit diesem Wert kommt man nicht weit, solange die Abmessungen  $a_1$  und  $a_2$  und die Zahl  $N$  der Schichten unbekannt sind. Wenn jedoch zwei von diesen bekannt sind, kann der dritte Wert berechnet werden.

Ist hingegen die Gesamtdicke  $a = N a'$  der Isolierung bekannt, läßt sich die Gesamtdicke  $2 N a_2$  des Klebstoffs aus der Formel

$$2 N a_2 = \frac{2 b U_p}{(E_d)_2} - a$$

berechnen. Des weiteren kann die im Klebstoff überhaupt mögliche maximale Feldstärke berechnet werden. Sie tritt offenbar in der II. Zone auf, und zwar dann, wenn die Dicke des Klebstoffs in allen Elementarschichten gegen Null strebt (was im übrigen nicht wahrscheinlich ist). Dieser Wert ergibt sich sehr einfach zu

$$E_{2 \text{ max}} = \frac{U_p}{a} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 2 E_m = 2 \frac{U_p}{a} , \quad (11)$$

weil in diesem Fall

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{7}{3,5} = 2 .$$

Hieraus ist die denkbar größtnotwendige Gesamtdicke

$$a_{\text{max}} = \frac{2 U_p}{(E_{zui})_2} = \frac{2 U_p}{(E_d)_2} b . \quad (12)$$

Wenn, wie vorausgesetzt,  $(E_d)_2 = 200$  kV/cm, wird

$$a_{\text{max}} = 0,48 \text{ cm} . \quad (13)$$

Offensichtlich entspricht der übliche Wert von 0,3 ... 0,4 cm, denn es ist unwahrscheinlich, daß sich zwischen den Glimmerschichten nirgends Kleb-

stoff befindet. Ist z. B.  $a_2$  bloß  $0,2 a_1$ , was ebenfalls unwahrscheinlich ist, errechnet sich die im Klebstoff auftretende größte Feldstärke bei einer Gesamtdicke von  $a = 0,35$  cm in der II. Zone zu

$$E_2 = \frac{U_p}{N(a_1 + 2a_2)} = \frac{U_p}{N(a_1 + 0,4a_1)} = \frac{U_p}{1,4a_1}. \quad (14)$$

Die gesamte Schichtdicke ist

$$a = N(2a_1 + 2a_2) = N(2a_1 + 0,4a_1) = Na_1 2,4, \quad (15)$$

woraus

$$Na_1 = \frac{a}{2,4}. \quad (16)$$

Mit diesem Wert ergibt sich aus Gl. (14)

$$E_2 = \frac{U_p}{1,4a} 2,4 = \frac{U_p}{0,35} \cdot \frac{2,4}{1,4} = 117 \text{ kV/cm},$$

was zwar nicht wenig ist, aber unter der Durchschlagsfeldstärke bleibt. Um auch in diesem Fall nur eine Feldstärke von

$$\frac{(E_d)_2}{b} = \frac{(E_d)_2}{2} = 100 \text{ kV/cm}$$

entstehen zu lassen, wäre eine Dicke von

$$(a_{100}) = \frac{U_p b}{(E_d)_2} \cdot \frac{2,4}{1,4} = \frac{24,2}{200} \cdot \frac{2,4}{1,4} = 0,41 \text{ cm}$$

erforderlich.

Die *minimale* Schichtdicke ergäbe sich, wenn die Isolierung *nur* aus Schellack bestände:

$$a_{\min} = \frac{U_p b}{(E_d)_2} = \frac{24,2}{200} = 0,24 \text{ cm}.$$

Wird als Klebstoff nicht Schellack, sondern Bitumen-Compound von guter Qualität verwendet, dessen größte elektrische Festigkeit gleichfalls 400 kV cm erreichen kann, ergeben sich noch kleinere Dicken.

Im allgemeinen kann gesagt werden, daß die für fertige Isolierungen vorgeschriebene Spannungsprüfung in einem guten Klebstoff keinen Durchschlag hervorruft. Die bei der Prüfung der *einzelnen* Stäbe angewandte ungefähr

1,5fache Prüfspannung kann jedoch gegebenenfalls schon gefährlich werden, weshalb ihre eventuelle Herabsetzung zu erwägen ist. Wenn jedoch in dem in gutem Zustand befindlichen Klebstoff während der Prüfung kein Durchschlag zustandekommt, braucht mit einem solchen auch im Betrieb nicht gerechnet zu werden, weil die Betriebsspannung bei 10,5-kV-Maschinen bloß ca. 25% der Prüfspannung ausmacht. Theoretisch muß auch mit einem *thermischen Durchschlag* gerechnet werden, weil die Temperatur für einen Klebstoff der Klasse A zu hoch ist, doch ist er wegen der verhältnismäßig kleinen Spannung unwahrscheinlich. Indes kann ein *örtlicher* thermischer Durchschlag auftreten, wo in den Hohlräumen eine starke Ionisation auftritt. Von der Bedeutung der in den Hohlräumen auftretenden Ionisation war schon öfters die Rede, weshalb es zweckmäßig sein wird, zu untersuchen, unter welchen Umständen diese schädliche Erscheinung zustandekommt.

Aus dem Gesetz von PASCHEN folgt, daß in einem etwa mit Luft gefüllten Hohlraum ein Durchschlag, also Ionisation nur dann zustandekommen kann, wenn die auf den Hohlraum entfallende Spannung größer ist als 0,23 kV. Aus dieser Bedingung läßt sich berechnen, welche maximale Hohlraumdicke in einer Isolierung von gegebenem Aufbau zulässig ist.

Die maßgebliche Spannung ist jetzt nicht die Prüfspannung, da es unwirtschaftlich wäre, zu verlangen daß auch bei diese Spannung noch keine Ionisation auftrete. Es kann als hinreichend betrachtet werden, wenn die Schwellenspannung der Ionisation z. B.  $1,2 U_f$  beträgt, wenn  $U_f$  die Betriebsphasenspannung ist, bei 10,5-kV-Maschinen also 6 kV. Die maßgebliche Spannung ist also  $1,2 \cdot 6 = 7,2$  kV.

Es muß betont werden, daß es keineswegs gleichgültig ist, ob in der Isolierung ein einziger Hohlraum von der Dicke  $na_3$  oder  $n$  Hohlräume mit einer Dicke von je  $a_3$  vorhanden sind. In diesem Fall wird die Schwellenspannung wesentlich höher sein, bzw. bei gleicher Schwellenspannung darf die Gesamtstärke aller Hohlräume viel größer sein als diejenige eines einzigen Hohlraumes. Viele kleine, dünne Hohlräume sind also weniger gefährlich als wenige oder gar ein einziger Hohlraum.

Dies leuchtet einfach ein, wenn die Isolierung nur aus einer einzigen Art von festem Stoff mit der Gesamtdicke  $a$  besteht und in ihr  $n$  jeweils  $a_3$  dicke Hohlräume vorhanden sind.

Es sei die Permittivität des Werkstoffes  $\epsilon'$ , die Dicke des Werkstoffes

$$a' = a - na_3. \quad (17)$$

Die Feldstärke in den Hohlräumen ist dann

$$E_3 = \frac{U}{\frac{a'}{\epsilon'} + na_3}, \quad (18)$$

weil  $U = E' a' + E_3 n a_3$  und  $\frac{E'}{E_3} = \frac{1}{\varepsilon'}$ .

Die auf die einzelne Hohlräume entfallende Spannung ist

$$U_3 = E_3 a_3 = \frac{U a_3}{\frac{a'}{\varepsilon'} + n a_3} \quad (19)$$

Sie darf nicht größer als 0,23 kV sein, d. h.

$$0,23 \geq U_3 = \frac{U a_3}{\frac{a'}{\varepsilon'} + n a_3} = \frac{U a_3}{\frac{a - n a_3}{\varepsilon'} + n a_3} \quad (20)$$

und hieraus

$$a \geq a_3 \left[ \frac{U \varepsilon'}{0,23} - n (\varepsilon' - 1) \right], \quad (21/a)$$

während

$$a_3 \leq \frac{a}{\frac{\varepsilon' U}{0,23} - n (\varepsilon' - 1)} \quad (21/b)$$

Je größer also  $n$ , um so kleiner kann bei gegebenem  $a_3$  des Hohlraumes die Dicke  $a$  der Isolierung sein, bzw. um so dicker können bei gegebener Dicke  $a$  die Hohlräume sein. Auf den ersten Blick scheint es, als könnte die Formel auch einen unendlichen großen Nenner haben, doch ist dies ein Irrtum. Die größtmögliche Zahl der Hohlräume ist  $n = \frac{U}{0,23}$ . Damit hat man

$$a_3 \leq \frac{a}{n}.$$

Auf Grund einer ähnlichen, etwas umständlicheren Rechnung schreibt sich die höchstzulässige Dicke der Hohlräume in einer aus zweierlei festem Werkstoff bestehenden Isolierung zu

$$a_3 \leq \frac{0,23}{U \varepsilon_1 \varepsilon_2} \frac{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}{1 - \frac{0,23 n}{U}} \quad (22)$$

Im vorliegenden Fall, d. h. für  $U = 1,2 U_f$ , wird

$$a_3 \leq \frac{0,23}{1,2 U_f \varepsilon_1 \varepsilon_2} \frac{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}{1 - \frac{0,23 n}{1,2 U_f}} = \frac{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}{\frac{1,2 U_f \varepsilon_1 \varepsilon_2}{0,23} - n \varepsilon_1 \varepsilon_2} \quad (23)$$

Man sieht auch hier sehr gut, daß sich die zulässige Dicke der einzelnen Hohlräume mit zunehmendem  $n$  vergrößert. Leider haben die Werte von  $a_3$ , die sich nach Einsetzen der in der Praxis vorkommenden Werte ergeben, die Größenordnung  $10^{-3}$  cm.

Mit  $\varepsilon_1 = 7$ ,  $\varepsilon_2 = 3,5$  und  $1,2 U_f = 7,2$  kV wird

$$a_3 = \frac{3,5 a_1 + 7 a_2}{770 - 24,5 n} \quad (24)$$

Es sei  $a_2 = 0,2 a_1$ , wie dies vorhin vorausgesetzt wurde (also eine an Glimmer sehr reiche Isolierung), und überdies sei die Dicke  $na_3$  der Luftspalte vernachlässigt, es sei also

$$a_1 + a_2 \approx a = 0,35 \text{ cm.} \quad (25)$$

Aus den beiden Gleichungen wird

$$a_1 = 0,2916 \text{ und } a_2 = 0,0584 \text{ cm}$$

und hieraus für einen einzigen Hohlraum ( $n = 1$ )

$$(a_3)'_1 \leq \frac{3,5 \cdot 0,2916 + 7 \cdot 0,0584}{770 - 24,5} = 0,00191 \text{ cm} \approx 0,02 \text{ mm.} \quad (26)$$

Für  $n = 10$  wird

$$(a_3)'_{10} = 0,0272 \text{ mm.}$$

Bei so dicken Hohlräumen wird die Isolierung nun schon um  $10 \cdot 0,0272 = 0,272$  mm dicker als 3,5 mm. Dies ist freilich die zulässige obere Grenze der Hohlraumdicke, die einzelnen Hohlräume können beliebig schwächer sein. Wenn die Dicke der einzelnen Hohlräume auch jetzt 0,02 mm beträgt, kann die *gesamte* Hohlraumdicke jetzt  $10 \cdot 0,02 = 0,2$  mm = 0,02 cm, d. h. das Zehnfache des vorigen Wertes erreichen, ohne daß in den Hohlräumen Ionisation eintreten würde.

Man kann sich leicht davon überzeugen, daß es keine wesentliche Änderung bedeutet, wenn sich das Verhältnis  $\frac{a_1}{a_2}$  ändert. Es sei z. B. jetzt  $a_2 = 5 a_1$  oder  $a_1 = 0,0584$  und  $a_2 = 0,2916$  mm. Dann ist

$$a'_3 \leq 0,003.$$

Hieraus geht hervor, daß die Ionisation durch entsprechende Dimensionierung im Prinzip zwar vermieden werden kann, daß dies aber *praktisch*

kaum möglich ist. Die auch theoretisch unvermeidliche Ursache für das Altern des Klebstoffes bildet hingegen die Tatsache, daß die Betriebstemperatur der Isolierung bei Schellack und Asphalt jenen Wert übersteigt, den diese Werkstoffe vertragen.

### 2.3. Aus kontinuierlichen Glimmerplättchen (*Samicafolium*) aufgebaute Isolierung

Das Modell der Isolierung ist im Abb. 5 dargestellt. Die ganze Isolierung baut sich aus solchen elementaren Schichten auf. Hier verursacht die Alterung der  $a_2$  dicken Klebstoffschicht im allgemeinen keinen Durchschlag. Wenn durch diese Schicht ein nennenswerter Strom fließen soll, muß der spezifische Wider-

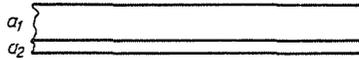


Abb. 5

stand stark absinken, weil der Strom wegen der Kontinuitätlichkeit der Glimmerschicht nur auf einer Spiralbahn fließen kann. Daraus folgt, daß die Isolierung um so besser ist, je dünner die Samicafoliumschichten sind, denn um so größer ist die Schichtzahl und um so länger auch der Weg, auf den der Strom vom Leiter zum Eisenkörper fließt. Der durch die Glimmerschichten quer zur Schichtichtung fließende Strom ist nämlich verhältnismäßig gering im Vergleich zu jenem, der im Klebstoff fließt, wenn der spezifische Widerstand des letzteren wegen des Alterns zu sinken beginnt. Die Dimensionierung für den Durchschlag ist hier im Neuzustand, für die Beanspruchung durch die Prüfspannung, sehr einfach. Ist die Zahl der Schichten wieder  $N$ , dann gilt für die Dicke der Isolierung

$$a = N(a_1 + a_2).$$

Hier gibt es keine gesonderten Zonen.

Die Feldstärke im Klebstoff ist

$$E_2 = \frac{U_p}{N \left( a_1 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + a_2 \right)} \leq E_{zul} = \frac{(E_d)_2}{b}, \quad (27)$$

woraus

$$N \left( a_1 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + a_2 \right) = \frac{b U_p}{(E_d)_2}. \quad (28)$$

Andererseits ist die Dicke  $a$  der Isolierung

$$a = N(a_1 + a_2).$$

Mit dem hieraus ermittelten  $a_1$  nimmt die Gl. (28) die Form

$$a \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + Na_2 \left( 1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) = \frac{b U_p}{(E_d)_2} \quad (29)$$

an. Mit  $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 0,5$  und  $b = 2$  hat man

$$0,5 (a + Na_2) = \frac{2 U_p}{(E_d)_2} \quad (30)$$

$$a + Na_2 = \frac{4 U_p}{(E_d)_2}, \quad (31)$$

das heißt mit den genannten Werten von  $U_p$  und  $(E_d)_2$  wird

$$a + Na_2 = \frac{96 \text{ kV}}{200 \text{ kV/cm}} = 0,48 \text{ cm}. \quad (32)$$

Die *minimale* Dicke ergibt sich auch jetzt, wenn die Dicke des Glimmers gegen Null strebt:

$$a_{\min} = \frac{b U_p}{(E_d)_2} = 0,24 \text{ cm}. \quad (33)$$

Die *maximal* notwendige Dicke hingegen ergibt sich wieder, wenn die Dicke des Klebstoffs gegen Null strebt:

$$a_{\max} = \frac{b U_p}{(E_d)_2} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 0,48 \text{ cm}. \quad (34)$$

Die Dicke  $a$  der Isolierung fällt zwischen diese beiden Werte.

Ist wieder  $a = 0,35$  cm, wird  $Na_2 = 0,130$  cm, die Gesamtdicke des Klebstoffs kann also nicht beliebig angenommen werden, sie ist auch jetzt

$$Na_2 = \frac{2 b U_p}{(E_d)_2}$$

wie bei der aus Plättchen bestehenden Isolierung.

Die Bemessung für die Prüfspannung ist offenbar auch hier einfach, ja exakter als bei der aus kleinen Glimmerplättchen aufgebauten Isolierung.

Die Berechnung der Hohlräume ist identisch mit der schon dargelegten.

Die durch die Erwärmung des Klebstoffs hervorgerufene Alterung verläuft hier ebenso wie in der aus kleinen Glimmerplättchen aufgebauten Isolierung.

## 2.4. Zur Feststellung der Klebstoffzustandes geeignete Meßverfahren

## 2.4.1. Widerstandsmessung

Von den Widerstandsmessungen sind in erster Linie dann kennzeichnende Werte zu erwarten, wenn die Alterung des Klebstoffs schon verhältnismäßig fortgeschritten ist. Bei der Messung des Widerstandes fließt nämlich der Strom auf mehreren Wegen von der einen Elektrode (im allgemeinen dem Leiter) zur anderen Elektrode (im allgemeinen dem Eisenkörper), und zwar deshalb, weil der Glimmer einen größeren spezifischen Widerstand hat als der Klebstoff, selbst wenn dieser ganz neu ist. Die Verhältnisse bei einer aus kleinen Glimmerplättchen aufgebauten Isolierung versucht Abb. 6a, diejenigen bei einer aus Samicafolium aufgebauten Isolierung Abb. 6b darzustellen.

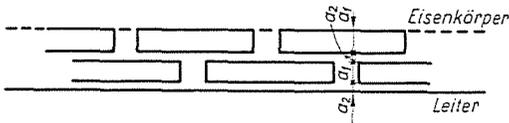


Abb. 6a

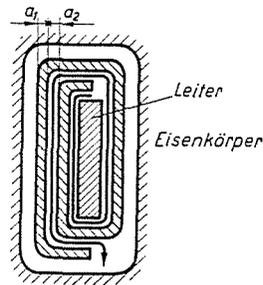


Abb. 6b

Aus diesen Abbildungen — die freilich bloß eine grobe Näherung darstellen — ist zu ersehen, daß der eine Strompfad im wesentlichen senkrecht auf die Schichten, also durch den Glimmer verläuft, während der andere Pfad den Glimmer umgeht.

Der Vorzug des kontinuierlichen Micafoliums besteht darin, daß der Weg des Stromes, wenn er nicht durch den Glimmer fließt, immer lang ist, während er bei der aus kleinen Glimmerplättchen aufgebauten Isolierung im Vergleich zum ersteren Fall kurz sein kann. Eines ist jedenfalls sicher: dieser Weg ist um so länger je mehr Schichten die Isolierung enthält, und außer der Weglänge, ist es eine möglichst geringe Dicke der Klebstoffschichten, die den Widerstand vergrößert. Diese möglichst geringe Schichtdicke kann übrigens auf die vorgehend beschriebene Weise auch rechnerisch ermittelt werden. Die Formeln liefern jedoch die minimale Gesamtdicke der Klebstoffschichten, die Schichtzahl berührt dies nicht. Diese wird möglichst groß genommen, und dem setzen nur die wirtschaftlichen Gesichtspunkte eine Grenze. Diese Fragen wurden deshalb im Zusammenhang mit der Messung besprochen, weil sie deren Brauchbarkeit weitgehend beeinflussen. Dazu, daß die Widerstandsmessung schon zu Anfang der Alterung genügend empfindliche Ergebnisse liefern wird, besteht um so begründetere Hoffnung, je geringer die Zahl der

Schichten ist, denn um so kleiner wird der Widerstand des im Klebstoff zustandekommenden Strompfades im Verhältnis zu dem normal auf die Schichten verlaufenden Weg sein. Diesen letzteren beeinflußt nämlich z. B. die Schichtzahl überhaupt nicht, ja selbst die Gesamtdicke des Klebstoffs nur in verhältnismäßig geringem Maße.

Wie groß die Alterung sein muß, damit die Widerstandsmessung genügend empfindlich wird, bestimmen in erster Linie die geometrischen Verhältnisse, denn auf ihrer Grundlage kann die Ersatzschaltung aufgebaut werden, aus der sich die Empfindlichkeit feststellen läßt.

Es soll nun untersucht werden, was man für die Zwecke der Bestimmung des Klebstoffzustandes von der Widerstandsmessung und von der  $\text{tg}\delta$ -Messung erwarten kann.

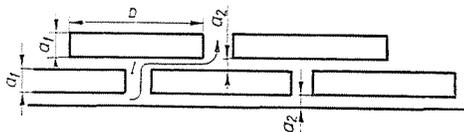


Abb. 7

Da  $a_1$  im Vergleich zu  $l$  klein ist, bestimmt den Widerstand im wesentlichen die Hälfte der Plattenbreite  $b$  (Abb. 7). Wenn  $k$  den mittleren Umfang der Isolierung bezeichnet, ist der Querschnitt der im Stromweg liegenden Klebstoffschicht  $a_3 k$ , die Länge des Strompfades hingegen  $\frac{Nb}{2} \approx Nl$ . Wenn die Nutenlänge  $L$  ist, so sind  $2 \frac{L}{b}$  solcher Pfade parallel geschaltet.

Die Abbildung zeigt, daß zur Berechnung des Stromes ein viel komplizierteres Ersatzschema notwendig wäre, weil dieses auch die richtige Spannungsverteilung wiedergeben müßte.

Bei einer kontinuierlichen Samicafolium-Isolierung ist die Länge des Strompfades annähernd  $Nk$ , der Querschnitt  $a_2 L$ .

Das Verhältnis der beiden Widerstände ist

$$\frac{R_{\text{micafolium}}}{R_{\text{samica}}} = \frac{b^2}{4k^2} = \frac{R_m}{R_s}$$

was im allgemeinen viel kleiner ist als 1, weshalb die Widerstandsmessung bei einer aus kleinen Glimmerplättchen aufgebauten Isolierung viel mehr aussagt.

Der kleinere Widerstand  $R_m$  ergibt sich aus der Formel

$$R_m = \varrho_k \frac{Nl b}{a_2 k 2L} = \varrho_k \frac{N b/2}{a_2 k} \frac{b}{2L} = \varrho_k \frac{N b^2}{4 a_2 k L}$$

Der Gesamtwiderstand der Glimmerschichten beträgt annähernd

$$R_g = \varrho_g \frac{2 N a_2 l}{k L}.$$

Das Verhältnis der beiden Widerstände ist

$$\frac{R_m}{R_g} = \frac{\varrho_k}{\varrho_g} \frac{b^2}{8 a_1 a_2}$$

und wenn  $\frac{\varrho_k}{\varrho_g} \approx 10^{-2}$ ,

was bei neuem Klebstoff annähernd zutrifft, ist dieses Verhältnis größer als 1, da  $b$  von der Größenordnung von 4 cm, während  $a_1$  und  $a_2$  von der Größenordnung  $10^{-2}$  cm sind. Aus diesem Grunde wird das Ergebnis der Wider-

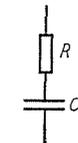


Abb. 8

standsmessung über eine in gutem Zustand befindliche Isolierung kaum eine Auskunft von Wert liefern [4, 5]. In derartigen Fällen wird den Widerstand des Klebstoffs eine bei niedriger Spannung durchgeführte  $\text{tg}\delta$ -Messung liefern können, die zweckmäßig auf Mittelfrequenz durchgeführt wird. Derartige Brücken sind im Handel erhältlich. Für diesen Fall ist die stark vereinfachte Skizze der Isolation in Abb. 8 dargestellt. Bekanntlich gilt hierbei

$$\text{tg}\delta = R \omega C,$$

woraus der Gesamt-Ersatzwiderstand  $R$  der Klebstoffschichten berechnet werden kann. Sichtlich wird die Alterung der Isolierung jetzt durch die Verringerung von  $\text{tg}\delta$  angezeigt, denn mit diesem sinkt der Widerstand  $R$ . Wegen der niedrigen Spannung vermag der aus der Ionisation stammende Verlust das Bild nicht zu verfälschen.

#### 2.42. $\text{tg}\delta$ -Messung

Wie im vorangegangenen Absatz bereits gezeigt, eignet sich die  $\text{tg}\delta$ -Messung zur Ermittlung der im Widerstand des Klebstoffs eingetretenen Veränderungen, und dies besonders dann, wenn die Messung bei kleinen Spannungen und auf den verhältnismäßig hohen Frequenzen von 800—8000 Hz vor-

genommen wird. Natürlich kann diese Messung wegen der niedrigen Spannung nichts über die zufolge der Hohlraumbildung auftretende Ionisation aussagen. Für den Nachweis der Ionisation ist zwar die bei 50 Hz Hochspannung durchgeführte  $tg\delta$ -Messung geeignet, doch gibt es auch Meßverfahren, die die Ionisation direkt nachweisen und die naturgemäß für diesen Zweck empfindlicher sind als die  $tg\delta$ -Messung. Man könnte fragen, was unter solchen Umständen die  $tg\delta$ -Messung mit Hochspannung überhaupt bieten kann. Wäre sie nicht einfach als veraltete Methode wegzulassen? Das wäre aber ein großer Fehler, und zwar aus mehreren Gründen.

Der erste Vorzug der  $tg\delta$ -Messung besteht darin, daß sie auf hoher Wechsellspannung vorgenommen wird, im wesentlichen also unter Bedingungen, wie sie in der Isolation im Betrieb vorliegen. Das bezieht sich gleichermaßen auf die Spannungsverteilung in den einzelnen Schichten, auf die Ionisation und auf die Verluste.

Die  $tg\delta$ -Messung liefert sehr nützliche Informationen über das Betriebsverhalten der Isolierung, ist aber *nur* der Wert des  $tg\delta$  angegeben, so liegt bloß die durch eine einzige Zahl ausgedrückte Resultierende aus vielen Teilinformationen vor. Es ist dem Fall vergleichbar, wenn der Blutdruck eines Patienten durch eine einzige Zahl angegeben wird. Diese Zahl hängt gleichfalls von sehr vielen Umständen ab, z. B. von der Abstammung des Patienten, von den Umständen, unter denen sein Leben verlaufen ist, von dem Zustand, in dem er sich augenblicklich befindet, usw.

Daß die Angabe eines einzigen Wertes von  $tg\delta$  nicht genügend charakteristisch ist, wurde früh bemerkt, weshalb heute fast ausschließlich die *Kurven* (bzw. Funktionen)  $tg\delta = f(U)$  und  $tg\delta = f(\vartheta)$  als kennzeichnend betrachtet werden. (Z. B. 6, 7, 8, 9.) Diese besagen schon weit mehr, insbesondere wenn ihr Verlauf und die konkreten Wertepaare regelmäßig, z. B. jährlich ermittelt werden. Es scheint jedoch, daß sie noch immer keine genügend exakte Information liefern, denn die Vergrößerung von  $tg\delta$  kann beispielsweise aus der Vergrößerung der Leitfähigkeit des Klebstoffes stammen, aber ebensogut auch aus der Zunahme der Ionisation. Es ist bekannt, daß der Knick beim Vorhandensein vieler Hohlräume verschwindet und daß der von der Ionisation herrührende  $tg\delta$  mit der Spannung monoton anwächst. Dasselbe Bild ergibt sich aber auch dann, wenn z. B. der konduktive Widerstand der Isolation spannungsabhängig ist. Eben deswegen erscheint es zweckmäßig, die  $tg\delta$ -Messung durch Oszillographieren des Verluststromes zu ergänzen [10], was versuchsweise bereits mehrerenorts eingeführt wurde. Die charakteristischen Kurvenformen, die den charakteristischen Fehlern entsprechen, können nur empirisch ermittelt werden, ausgenommen die Ionisation, da deren charakteristische Wirkung auf die Kurvenform allgemein bekannt ist.

Da die Spannungsprüfung ohnehin durchgeführt werden muß, ist es am zweckmäßigsten die  $tg\delta$ -Messung gleichzeitig mit dieser vorzunehmen.

### 2.43. *Absorptionsmessungen*

Bei diesen Messungen wird im wesentlichen der Lade- oder der Entladestrom der Isolierung gemessen. Es ist denkbar, daß diese Messungen die zweckmäßigsten Verfahren zur Ermittlung des Zustandes der Isolierung sein werden. Gewisse Information können sie auch über die Zahl der Hohlräume und somit auch über das Maß der Ionisation liefern.

Wenn der Spannungsversuch nur mit Gleichspannung durchgeführt wird, können die genannten Messungen ebenso mit dem Spannungsversuch verbunden werden, wie die  $tg\delta$ -Messung. Eine nützliche Variante der Absorptionsmessung kann auch die Registrierung der Eigenentladungskurve mit Hilfe des Rotorvoltmeters darstellen, die sich ebenfalls mit dem Gleichspannungsversuch verbinden läßt.

Verfasser ist der Ansicht, daß auf dem Gebiet der Absorptionsmessungen die theoretischen Grundlagen bei verhältnismäßig so komplizierten Isolierungen, wie es die Turboisolierungen sind, noch nicht genügend geklärt sind, um mit ihnen andere als relative Ergebnisse erzielen zu können.

### 2.44. *Meßverfahren zur direkten Ermittlung des Ionisationsausmaßes*

Auf diese soll hier nicht im einzelnen eingegangen werden, u. zw. eines- teils wegen ihrer Vielfalt, andererteils weil sie praktisch gerade über den Klebstoffzustand nichts aussagen können, der doch nach der früheren Schlußfolgerung für die Lebensdauer der Isolierung entscheidend ist. Nur der Vollständigkeit halber sei hier ein einziges, in Anwendung befindliches Verfahren erwähnt, welches auf der Registrierung der durch die Ionisation erregten hochfrequenten Schwingungen beruht. Ein solches Gerät ist z. B. das bekannte Ionisationsregistriergerät von KOSKE.

## 3. Zusammenfassung

Obwohl die Schlußfolgerungen, abweichend von der üblichen Form, gleich zu Anfang vorweggenommen wurden, wird es vielleicht nicht überflüssig sein, sie hier nochmals ganz kurz zusammenzufassen.

1. Die Lebensdauer der Isolation von Turbostäben ist im wesentlichen die gleiche wie die Lebensdauer des Klebstoffes.
2. Gehört der Klebstoff zur Klasse A, kann die Turboisolation nicht als eine echte Isolation nach Klasse B betrachtet werden.
3. Das Altern des Klebstoffs wird einerseits durch die für ihn zu hohe Temperatur, andererseits durch die aus der inneren Ionisation stammende thermische Mehrbeanspruchung und durch die chemische Zerstörung verursacht.
4. Über den Zustand des Klebstoffs gibt voraussichtlich die  $tg\delta$ -Messung mit tonfrequenter Niederspannung die verlässlichste Auskunft. Das Ausmaß der Ionisation und die Schwellenspannung liefern die mit 50 Hz Hochspannung durchgeführte  $tg\delta$ -Messung und das gleichzeitig aufgenommene Oszillogramm des Verluststromes.
5. Die oszillographische Untersuchung des Verluststromes läßt sich vorteilhaft mit der 50-Hz-Spannungssprobe verbunden werden.

6. Über den Zustand des Klebstoffs können nützliche Informationen auch von Untersuchungen nach dem Verfahren der Absorptionsmessung erwartet werden. Diese Messung ist hauptsächlich dann von Vorteil, wenn die Spannungsprüfung mit Gleichspannung durchgeführt wird, mit der z. B. die Aufnahme der Entladungskurve verbunden werden kann.

7. Von der Widerstandsmessung können nützliche Information erwartet werden, wenn der in der Isolation befindliche Klebstoff nur noch eine Leitfähigkeit von  $10^{-10}$  bis  $10^{-9}$  S/cm hat. Dann charakterisiert jedoch seine Änderung das Altern des Klebstoffs. Es ist denkbar, daß aus der Kurve des Widerstands wie dies von amerikanischen Forschern behauptet wird, in Abhängigkeit von der Zeit der voraussichtliche Zeitpunkt des Durchschlags festgestellt werden kann. Die Voraussetzung hierfür ist, daß die Wärmedilatation die Isolation nicht grob beschädigt, nicht zerstört.

8. Als auf ein wahrscheinlich bekanntes Nebenergebnis sei darauf hingewiesen, daß das Verhältnis Glimmer—Klebstoff nicht willkürlich angenommen werden kann.

### Literatur

1. OTUSZ Közlemények (Mitteilungen des Staatlichen Ung. Dienstes für Überspannungsschutz und Isolationskontrolle) Budapest, 1962. (ung.).
2. CAMERON, A. W. W.: Diagnosis of AC Generator Insulation Condition by Nondestructive Tests. — AIEE. Trans. **71**, pt. III. 263 (1952).
3. MOSES, G. L.: Alternating and Direct Voltage Endurance Studies on Mica Insulation for Rotating Machinery. — AIEE Trans. Vol. **7**, pt. I. 763 (1951).
4. STARK, K. G.: Assessment of the Insulation Serviceability of Turbogenerator Stators and of High-Voltage Bushings. Proc. IEE, **109**, pt. A, 71 (1962).
5. WIDEMANN, A.: Die Isolationsprüfung elektrischer Maschinen mit Gleichspannung. — ETZ.-A. 512 (1956).
6. MEYER, H.: Zur Bedeutung der Verlustfaktorkenngrößen für Wicklungsisolierungen elektrischer Maschinen. ETZ.-A. 46 (1962).
7. EDWIN, K.—ZWICKNAGL, W.: Grundlagen für die Überwachung der Generator-Wicklungs-isolation. OZE. 423 (1960).
8. JOHNSON, J. S.—SEXTON, R. M.: Evaluation of the Internal Insulation of Generator Coils Based on Power-Factor Measurements. Trans. AIEE. pt III. 277 (1959).
9. SIEMER, W.: Die Bewertung der Hochspg-Isolation el. Maschinen. ETZ.-A. 321 (1955).
10. EISLER, J.: On the Adequacy of Some Possible Modifications of the Separate-Source Test of Electrical Equipment. Per. Polytechnica, **7**, 155—165 (1963).
11. FINDLAY, D. A.—BREARLEY, R. G.—LAUTTIT, C. C.: Evaluation of the Internal Insulation of Generator Coils Based on Power-Factor Measurements. Trans. AIEE. pt. III-A. 268 (1959).
12. FOUST, C. M.—BHIMANI, V. B.: Predicting Insulation Failure with Direct Voltage. Trans. AIEE. pt. III. 1120 (1957).
13. RUSHAL, R. T.—SIMONS, L. S.: An Examination of High-Voltage D. C. Testing Applied to Large Stator—Windings Proc. IEE. **102**, 565 (1955).
14. ABEGG, K.: Alterungsversuche zur Entwicklung u. Beurteilung neuer Stator-Isolationen. Bull. SEV. **51**, 18 (1960).
15. EDWIN, K.—ZWICKNAGL, W.: Die Bedeutung von Abnahmeprüfungen an Generator-Hochspannungswicklungen. E. u. M. **79**, 529 (1962).
16. WOHLFAHRT, O.: Messung des Glimmens an der Isolation von Statorwicklungen rotierender Hochspannungsmaschinen. E. u. M. **78**, 673 (1961).

Prof. Dr. János EISLER, Budapest, XI. Egry József u. 18—20. Ungarn.