

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 61 (1970)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Messverfahren zur Ermittlung der Isolierungsadmittanz von Hochspannungsentwicklungen gegen Erde und Bestimmung der dominierenden Fehlerstelle  
**Autor:** Schnell, L.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915995>

### **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>**

# Messverfahren zur Ermittlung der Isolierungsadmittanz von Hochspannungswicklungen gegen Erde und Bestimmung der dominierenden Fehlerstelle

Von L. Schnell, Budapest

1193-2002

621.317.333.4:621.3.011.21

In dem am 17. August 1969 erschienenen Heft des Bulletins des SEV wurde eine Arbeit veröffentlicht [1]<sup>1)</sup>, in der die Beurteilung des Isolierzustandes von Statorwicklungen besprochen wird. Der Verfasser gibt über das Verhalten der Isolierungen verschiedenen Typs recht interessante und wertvolle Angaben bekannt und berichtet u. a. über ein Messverfahren, bei welchem er entweder das eine oder das andere Ende der Phasenwicklung eines erregten Generators auf Erdpotential legte und mit Hilfe der dabei unternommenen Ionisationsmessung nachgewiesen hat, dass sich die Wicklung der untersuchten Maschine an ihrer Eingangsseite infolge der inneren Strahlung in einem schlechteren Zustand befand.

Diese Untersuchung gehört in den Problembereich, der sich zum Ziel setzte, ein Verfahren auszuarbeiten, das berufen ist, das Vorhandensein bzw. den Ort des schwachen Punktes der Wicklung zu ermitteln.

Die in der folgenden Arbeit behandelte Methode wurde bisher noch an keiner Grossanlage erprobt, ihre prinzipielle Richtigkeit wird aber durch Modellversuche bewiesen. Es ist vorstellbar, dass sie sich in gewissen Fällen zur Untersuchung der Isolierung von Hochspannungsanlagen, so. z. B. von Statorwicklungen von Generatoren anwenden lässt.

## 1. Einleitung

Bei den Untersuchungen des Isolierungszustandes von Hochspannungsmaschinen und -apparaten werden meistens der Verlustfaktor und die Kapazität der Isolation der ausser Betrieb gesetzten Anlage gemessen. Die erhaltenen Ergebnisse geben über den Durchschnittszustand der Isolation Aufschluss.

Oft wäre es sehr nützlich zu wissen, ob der als Messergebnis gewonnene sehr hohe Verlustfaktor im grossen und ganzen auf eine gleichmässig schadhaft gewordene Isolation hinweist oder aber die Isolation im allgemeinen gut ist und nur an einer geringen Stelle beschädigt wurde. Als besonders nützlich ist jene Information anzusprechen, die auf den Fehlerort hinweist.

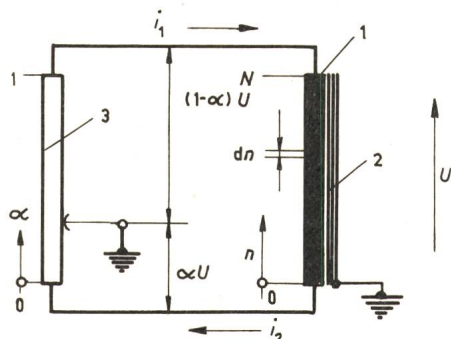


Fig. 1

Einschichtwicklung im Generatorbetrieb

1 Wicklung; 2 Eisenkern; 3 Spannungsteiler;  $U$  induzierte Spannung;  $n, N$  Windungszahl;  $\alpha$  Position des Spannungsteilers;  $i_1, i_2$  Eingangs- und Ausgangsströme der Wicklung

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Le Bulletin de l'ASE du 17 août 1969 publia un article [1]<sup>1)</sup> consacré à l'évaluation de l'isolement des enroulements statoriques. L'auteur fournit des indications fort intéressantes et précieuses au sujet du comportement de divers types d'isolement et décrit e. a. un procédé de mesure, dans lequel il relia l'un ou l'autre extrémité de l'enroulement à phases d'un générateur excité au potentiel de terre, en provenant alors par des mesures d'ionisation que l'enroulement de la machine examinée fut dans un moins bon état vers son entrée par suite du rayonnement interne.

Cet essai se rapporte au problème relatif à l'élaboration d'un procédé destiné à la détermination de l'existence, resp. de l'emplacement du point faible de l'enroulement.

La méthode décrite dans l'article suivant n'a pas encore été essayée dans une grande installation, mais le bien-fondé de son principe est prouvé par des essais de maquette. On peut présumer que ce procédé peut s'appliquer dans certains cas lors de l'essai de l'isolement d'installations à haute tension, p. ex. des enroulements statoriques de générateurs.

In dieser Arbeit wird ein Messverfahren erörtert, das — in gewissen Grenzen — die Möglichkeit bietet, einen Isolationsfehler zwischen dem Leiter und dem geerdeten Eisenkörper zu erkennen und dessen Ort annähernd bestimmen zu können.

## 2. Das Messprinzip

Das Prinzip des Verfahrens soll an der Einschichtwicklung eines Generators ( $I$  in Fig. 1) untersucht werden. Die zwischen den Wicklungsklemmen induzierte Spannung sei  $U$ ; diese kann durch Erregung des Eisenkerns 2 geändert werden. Zu den Generatorklemmen schliesst sich ein Spannungsteiler 3 an, dessen Schleifkontakt geerdet ist.

Die Stellung des Schleifkontaktes soll mit  $\alpha$  bezeichnet werden ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), ferner soll die Beziehung

$$Y(n) = G(n) + j\omega C(n)$$

die zwischen Wicklung und Eisenkern vorhandene, auf die Einheitswindungszahl entfallene Admittanz bedeuten.  $U(n)$  bedeutet hingegen jene Funktion, durch welche die zwischen einem Wicklungspunkt und der Erde herrschende Spannung in Abhängigkeit von der Windungszahl  $n$  beschrieben wird. Unter Zugrundelegung von Fig. 2a gilt:

$$U(n) = U \left[ \frac{n}{N} - \alpha \right] \quad (1)$$

worin  $N$  die Windungszahl der Gesamtwicklung bedeutet.

In Fig. 2b wird die Verteilung der Admittanz zwischen Wicklung und Eisen veranschaulicht (in der Figur wurde lediglich die Verteilung der reellen Komponente eingetragen). Nach-



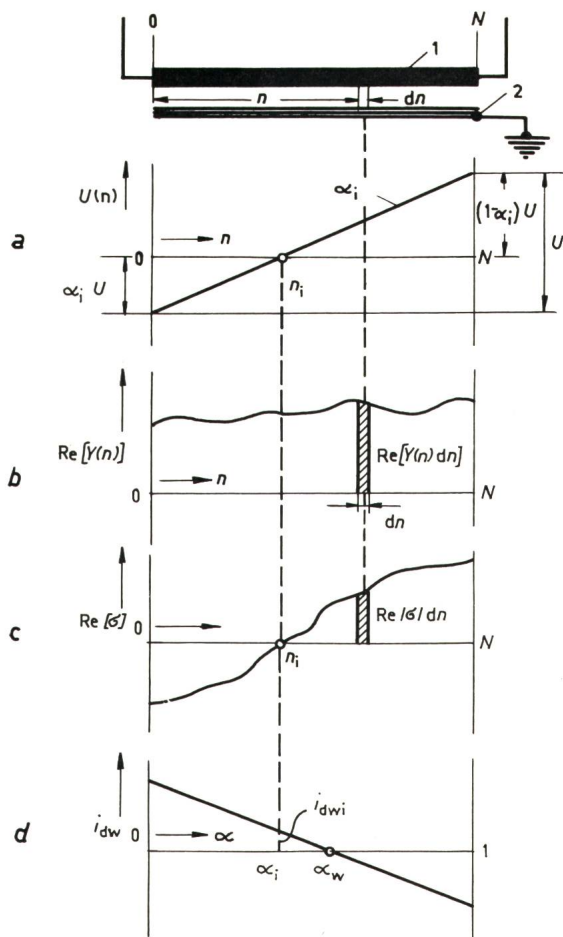


Fig. 2

Verteilung verschiedener Parameter längs der Wicklung

a vorausgesetzte Spannungsverteilung bei gegebenem  $\alpha$

b Verteilung der Real Komponente der Admittanz  $Y(n)$

c Verteilung der Real Komponente der Stromdichte  $\sigma$

d Verteilung des Differenzstromes  $i_{dw}$

$i_{dlw}$  Real Komponente des Differenzstromes;  $i_{dlwi}$  bestimmter Wert von  $i_{dw}$ ;  $n_i$  bestimmter Wert von  $n$

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

dem die Leitfähigkeit eines Kanals von Breite  $dn$  an einem beliebigen Ort  $n$

$$Y(n) dn = [G(n) + j \omega C(n)] dn$$

beträgt, kann unter Berücksichtigung der Gl. (1) für den Strom, der durch den Kanal hindurchfließt, geschrieben werden:

$$\sigma dn = U(n) \cdot Y(n) dn = U(n) [G(n) + j \omega C(n)] dn$$

worin  $\sigma$  die auf die Windungszahl bezogene Stromdichte des die Isolation durchfließenden Stromes bedeutet.

Durch Multiplizieren der in den Fig. 2a und 2b gezeigten Funktionen ergibt sich Fig. 2c, der die Verteilung der Stromdichte  $\sigma$  zu entnehmen ist. Die unter der Kurve liegende Fläche ist gleich dem Strom, der sich über die Erdungen schließt. Dieser Strom ist jedoch nichts anderes als die Differenz der in Fig. 1 angeführten Ströme  $i_1$  und  $i_2$ , somit gilt:

$$i_d = i_1 - i_2 = \int_0^N U(n) \cdot Y(n) dn = \frac{U}{N} \int_0^N n \cdot Y(n) dn - U \alpha \int_0^N Y(n) dn \quad (2)$$

Nachdem die bestimmten Integrale konstant sind, werden der reelle und imaginäre Teil der Komplexfunktion

$$i_d = f(U, \alpha)$$

falls  $U$  konstant bleibt, in  $\alpha$  linear sein, man kann also diese mit Geraden darstellen [sofern  $Y(n)$  von  $U(n)$  nicht abhängig ist]. Dies besagt also, dass wenn man imstande ist, die reelle und imaginäre Komponente von  $i_d$  zu registrieren, man dann in Abhängigkeit von  $\alpha$  Geraden erhält (Fig. 2d).

Aus Fig. 2a ist die Gl. (1) bei fixiertem  $\alpha_i$  ersichtlich, aus Fig. 2d hingegen die reelle Komponente von  $i_d$  über  $\alpha$ . Die Bereiche  $0 \leq n \leq N$  der Fig. 2a, 2b und 2c, sowie die Bereiche  $0 \leq \alpha \leq 1$  der Fig. 2d können einander gegenseitig zugeordnet werden. Somit besteht zwischen  $n_i$  und  $\alpha_i$ , durch welche der Wert  $U(n) = 0$  bestimmt wird, die Beziehung  $n_i = \alpha_i N$ . In Fig. 2d wird durch  $\alpha_i$  der zur vorgegebenen Spannungsverteilung gehörige Differenzstrom  $i_{dwi}$  geliefert, vom zu  $i_{dw}=0$  gehörigen  $\alpha_w$  wird hingegen jener ausgezeichnete Punkt  $n_{GS} = \alpha_w N$  der Wicklung bestimmt, der nachstehend erörtert werden soll.

Die reellen und imaginären Komponenten des Differenzstromes  $i_d$  werden durch die Gleichungen

$$i_{dw} = \frac{U}{N} \int_0^N n \cdot G(n) dn - \alpha U \int_0^N G(n) dn \quad (3)$$

und

$$i_{dm} = \omega \left[ \frac{U}{N} \int_0^N n \cdot C(n) dn - \alpha U \int_0^N C(n) dn \right]$$

bestimmt. Die Achse  $\alpha$  wird von den Geraden  $i_{dw} = f_w(\alpha)$  und  $i_{dm} = f_m(\alpha)$  in den Punkten

$$\alpha_w = \frac{1}{N} \cdot \frac{\int_0^N n \cdot G(n) dn}{\int_0^N G(n) dn} = \frac{1}{N} n_{GS} \quad (4)$$

und

$$\alpha_m = \frac{1}{N} \cdot \frac{\int_0^N n \cdot C(n) dn}{\int_0^N C(n) dn} = \frac{1}{N} n_{Cs}$$

geschnitten.  $n_{GS}$  und  $n_{Cs}$  sind die Abstände zwischen den Schwerpunktgeraden der Leitfähigkeitsverteilungs- und Kapazitätsverteilungsfunktionen und dem Punkt  $n = 0$  (Fig. 3a).

Die in den Gl. (3) und (4) vorkommenden Ausdrücke

$$\int_0^N G(n) dn = G \quad (5)$$

und

$$\int_0^N C(n) dn = C$$

stellen die zwischen Wicklung und Eisenkörper resultierende, mit den üblichen Methoden messbare durchschnittliche Leitfähigkeit bzw. durchschnittliche Kapazität dar.

Anhand der Gl. (3) lässt sich auch die Steilheit der Geraden  $i_d = f(\alpha)$  errechnen:

$$\frac{\partial i_{dw}}{\partial \alpha} = -UG$$

und

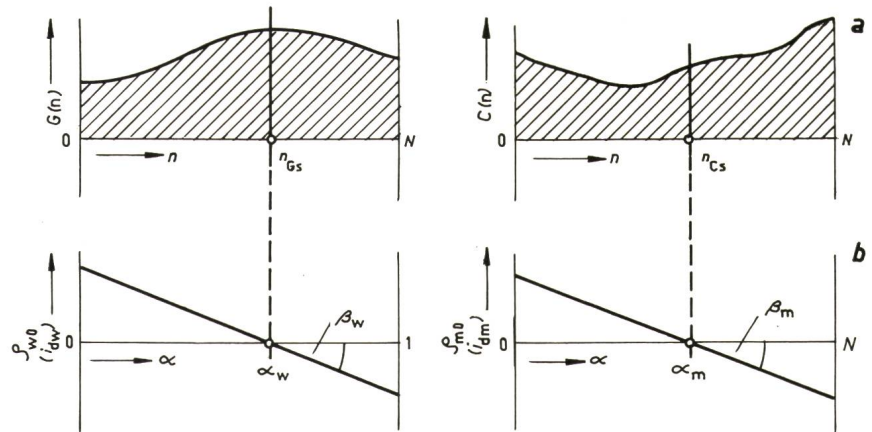
$$\frac{\partial i_{dm}}{\partial \alpha} = -U\omega C$$



Fig. 3  
Verteilung der Leitfähigkeit  $G(n)$  und Kapazität  $C(n)$  längs der Wicklung

$q_{w0}, q_{m0}$  Stellungen der Potentiometer der Fig. 5 bei Abgleich;  $\beta_w$  und  $\beta_m$  Neigungswinkel der Geraden  $q_{w0} = f_w(\alpha)$  bzw.  $q_{m0} = f_m(\alpha)$ ;  $\alpha_w$  und  $\alpha_m$  Schwerpunkte der Leitfähigkeitsverteilungs- bzw. Kapazitätsverteilungsfunktionen;  $i_{lw}, i_{lm}$  Real- und Imaginärkomponente des Differenzstromes

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1



Diese bedeuten jene konduktiven, bzw. kapazitiven Ströme, die über Einfluss der zwischen Wicklung und Eisenkörper eingeschalteten Spannung  $U$  in der Isolierung auftreten würden.

Die entsprechend genaue Registrierung der Funktionen  $i_{dw} = f_w(\alpha)$  und  $i_{dm} = f_m(\alpha)$  ist keine leichte Aufgabe und erfordert eine Spezialeinrichtung. Das an dem Lehrstuhl für Messgeräte und Messtechnik der Budapester Technischen Universität entwickelte automatische C-tg  $\delta$ -Registriergerät (Fig. 4) eignet sich zur Durchführung dieser Aufgabe [2]. Das Messprinzip zeigt Fig. 5 (der Sinn der Bezeichnungen 1, 2 und 3 ist der gleiche, wie in Fig. 1). Der Eisenkern des Stromkomparators 4 wird durch den Differenzstrom  $i_d = i_1 - i_2$  erregt und die Gegenerrregung durch zwei Wicklungen von je  $N_1$  Windungszahl erzeugt. Die Erregung  $i_d$  wird von einer kon-

zentrisch angeordneten Durchführung, die entsprechend isoliert und von einem Komparatoreisenkern umgeben ist, geliefert [3]. Die Windungen  $N_1 - N_1$ , von denen die Gegenerrregung erzeugt wird, werden von den Strömen  $i_w$  bzw.  $i_m$  durchflossen; diese werden von den Einheiten  $A_0$  und  $A_{90}$  den Zusammenhängen

$$i_w = k q_w U$$

und

$$i_m = j k q_m U$$

gemäß erregt. Die Werte  $i_w$  und  $i_m$  sind also den Potentiometerpositionen  $q_w$  und  $q_m$  verhältnismäßig. Der Ausgleich

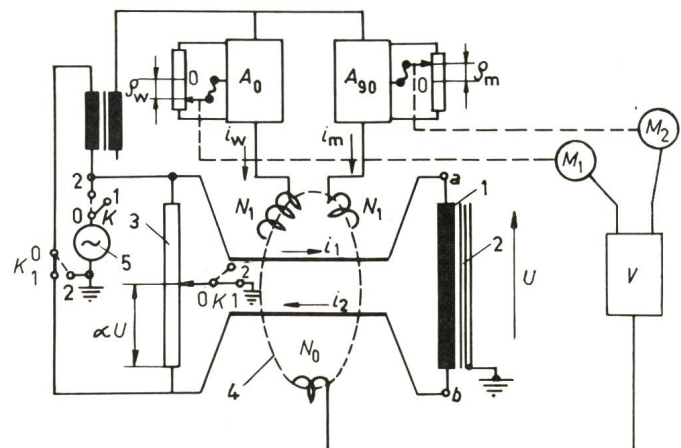


Fig. 5

#### Blockschema eines automatischen Ausgleichs

1 Wicklung; 2 Eisenkern; 3 Spannungsteiler; 4 Stromkomparator-Eisenkern; 5 Generator mit veränderbarer Spannung;  $A_0, A_{90}$  Einheiten mit bestimmtem Übertragungsfaktor;  $V$  Verstärker;  $N_1, -N_1$  Erregerwicklungen des Stromkomparators;  $i_w, i_m$  Erregerströme;  $N_0$  Detektorwicklung des Stromkomparators;  $q_w, q_m$  Stellungen der Abgleichpotentiometer;  $K$  Umschalter

erfolgt in Stellung 0-1 der Schalter  $K$  selbsttätig, derart, dass die Fortbewegungen eines Doppelkoordinatenschreibwerks in Richtung  $x$  (waagrecht) von  $\alpha$ , seine Fortbewegungen in Richtungen  $y_1$  und  $y_2$  (senkrecht) hingegen von den Grössen  $q_w$  und  $q_m$  abhängig sind. Der automatische Ausgleich wird von den Hilfsmotoren  $M_1$  und  $M_2$  bewerkstelligt. Im ausgeglichenen Zustand gelten folgende Gleichungen:

$$i_{dw} = N_1 i_w$$

und

$$i_{dm} = N_1 i_m$$

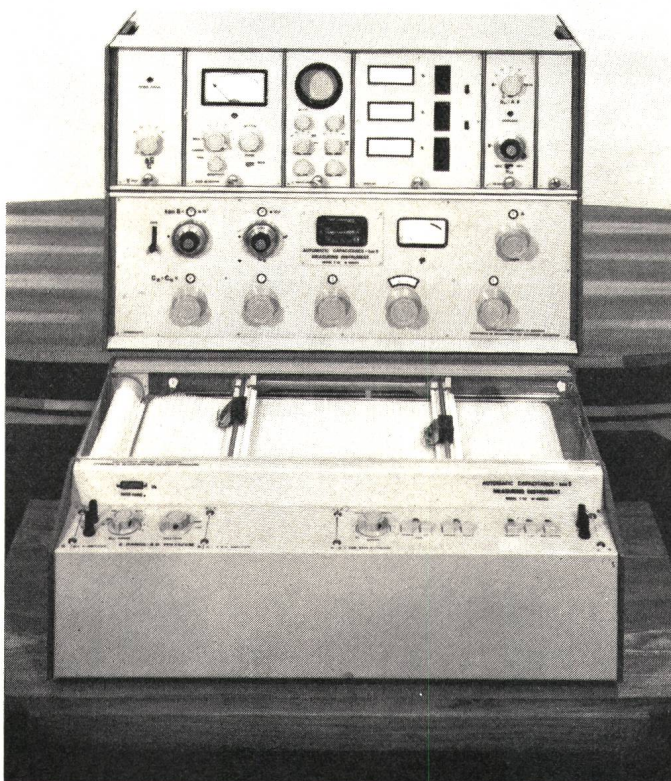


Fig. 4

Automatischer C-tan  $\delta$ -Recorder, welcher zur Aufzeichnung der Diagramme in Fig. 10 geeignet ist



Aus diesen lassen sich die Potentiometerpositionen  $\varrho_{w0}$  und  $\varrho_{m0}$ , durch welche der Ausgleich geschaffen wird, errechnen:

$$\varrho_{w0} = \frac{1}{k N_1} \left[ \frac{1}{N} \int_0^N n \cdot G(n) dn - \alpha G \right] = G \frac{\alpha_w - \alpha}{k N_1}$$

und

$$\varrho_{m0} = \frac{\omega}{k N_1} \left[ \frac{1}{N} \int_0^N n \cdot C(n) dn - \alpha C \right] = \omega C \frac{\alpha_m - \alpha}{k N_1}$$

Sind also die Grössen  $G(n)$  bzw.  $C(n)$ , die zu einem vorgegebenen Ort  $n$  gehören, bei sämtlichen Spannungsgrössen, die auf diesen Ort entfallen, konstant, so bilden die Funktionen

$$\varrho_{w0} = f_w(\alpha)$$

und

$$\varrho_{m0} = f_m(\alpha)$$

Geraden, welche die Achse  $\alpha$  an den Stellen  $\varrho_{w0} = 0$  bzw.  $\varrho_{m0} = 0$  in den Punkten  $\alpha_w$  bzw.  $\alpha_m$  schneiden (Fig. 3b). Diejenige Orte der Wicklung, welche die Windungszahlen von  $n_{GS} = \alpha_w N$  bzw.  $n_{CS} = \alpha_m N$  aufweisen, lassen sich diesen Punkten zuordnen, rechts und links von jenen herrscht das gleiche «Moment» von Leitwert bzw. Kapazität; diese Punkte zeigen also auf die aus Fig. 3a ersichtliche Art die Schwerpunktlinie der Leitfähigkeits- bzw. Kapazitätsverteilung auf.

Aus der Gl. (6) ergeben sich die Beziehungen

$$\operatorname{tg} \beta_w = \frac{\partial \varrho_{w0}}{\partial \alpha} = -G \frac{1}{k N_1}$$

und

$$\operatorname{tg} \beta_m = \frac{\partial \varrho_{m0}}{\partial \alpha} = -\omega C \frac{1}{k N_1}$$

die besagen, dass durch die Neigungswinkeltangente der Ergebnisse die durchschnittlichen, mit den bekannten Verfahren messbaren Leitfähigkeiten bzw. Kapazitäten geliefert werden.

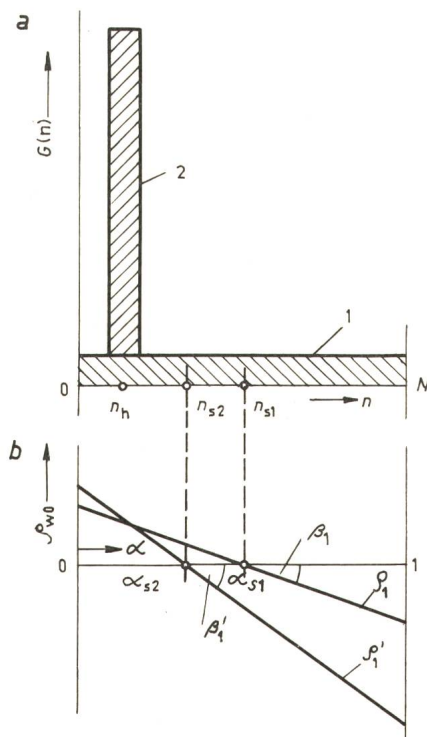


Fig. 6

Die Wicklung einer konzentriert auftretenden Leitfähigkeitsvergrößerung 1 gleichmässige Leitfähigkeitsverteilung längs der Wicklung; 2 konzentriert auftretende zusätzliche Leitfähigkeitsvergrößerung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1, 2 und 3

Kurve 1 in Fig. 6a veranschaulicht eine entlang  $n$  gleichmässige Leitfähigkeitsverteilung. Deren Diagramm  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  wird bei einer festgelegten Spannung  $U_1$  durch die Gerade  $\varrho_1$  in Fig. 6b gezeigt; diese schneidet die Achse  $\alpha$  an der Stelle  $\alpha_{s1} = 0,5$ . Dieser entspricht im Verteilungsdiagramm  $G(n)$  dem Punkt  $n_{s1}$ , durch den die Schwerpunktlinie der Verteilung 1 bestimmt wird. Es sei vorausgesetzt, dass sich die Leitfähigkeit zwischen Wicklung und Erde aus irgendeinem Grunde verdoppelt, jedoch derart, dass sich die Zunahme auf einen kurzen Abschnitt der Wicklung beschränkt (Kurve 2). Die Schwerpunktlinie der Resultierenden der Verteilungen 1 und 2 verschiebt sich nach dem Punkt  $n_{s2}$ ; durch die in Fig. 6b mit  $\varrho_1'$  bezeichnete Gerade  $\varrho_{w0} = f_1'(\alpha)$  wird die Achse  $\alpha$  in dem Punkt  $\alpha_{s2}$  geschnitten, wobei letzterer dem Punkt  $n_{s2}$  entspricht.

Der Punkt  $n_{s2}$  bestimmt die Schwerpunktlinie der Leitfähigkeitsverteilung  $1 + 2$  und liegt um so näher beim den dominanten Fehlerort bezeichnenden Punkt  $n_h$ , je grösser die Fläche 2 auf die Fläche 1 bezogen ist, d. h. je vorherrschender der Fehler sich erweist. Es ist aber nicht nur der Umstand zu verzeichnen, dass sich der Schnittpunkt der Geraden  $\varrho_1$  mit Achse  $\alpha$  verschiebt, sondern auch der Umstand, dass ihr Richtungstangens zunimmt. Nachdem in Fig. 6 angenommen wurde, dass die Leitfähigkeit aufs Doppelte angestiegen ist, gilt:

$$\operatorname{tg} \beta_1' = 2 \operatorname{tg} \beta_1$$

Falls also mit Hilfe der beschriebenen Methode die Untersuchung zu zwei verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt wird und in der Zwischenzeit an einer kurzen Strecke der Wicklung ein Schadhafwerden der Isolierung eingetreten ist, so ist man in der Lage, aus der Verschiebung des Schnittpunktes der das Resultat der ersten Messung festhaltenden Geraden  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  mit der Achse und dem Anwachsen von ihrem Richtungstangens auf den Ort und das Ausmass der Beschädigung der Isolation zu folgern. Sollte sich das Schadhafwerden eben am Orte  $n_{s1}$  der ersten Messung eingestellt haben, so ist selbstverständlich keine Schnittpunktverschiebung, sondern lediglich der Anstieg vom Richtungstangens wahrzunehmen. In diesem Falle kann man nicht entscheiden, ob die Beschädigung konzentriert auftrat oder aber  $G$  sich in der Weise veränderte, dass die Schwerpunktlinie der Verteilung an Ort und Stelle verblieb.

Bisher wurde angenommen, dass die Verteilung von Leitfähigkeit und Kapazität der Isolation längs der Wicklung von der Spannung nicht abhängig ist. Für die Isolation ist jedoch charakteristisch, dass ihre Leitfähigkeit spannungsabhängig ist und oberhalb einer Schwellengrösse mit der Spannung ansteigt. Da im Verlaufe des mit der behandelten Methode vorgenommenen Experimentes in einem beliebigen Punkt der Isolation ihre Spannungsbeanspruchung veränderlich ist, kann der Fall eintreten, dass nach Erreichen einer vorgegebenen Spannung die Konstanz der Leitfähigkeit aufhört und anfängt, mit der Spannung gemeinsam anzusteigen. Dies hat zur Folge, dass die Ergebnisse auch von der Spannung abhängig sind und die dargestellten Funktionen nunmehr keine Geraden sind.

Es soll nun untersucht werden, wie gross die zwischen einem beliebigen Punkt der Isolation und der Erde im Intervall von  $0 \leq \alpha \leq 1$  auftretende Höchstspannung ist. Aus Fig. 7 geht hervor, dass an den beiden Rändern der Wicklung die Höchstbeanspruchung gleich  $U$  ist, in der Mitte dagegen nur die Grösse von  $U/2$  aufweist.<sup>2)</sup> Die vorkommenden Spannungs-

<sup>2)</sup> Vom Einfluss des Wicklungsfaktors wird abgesehen.



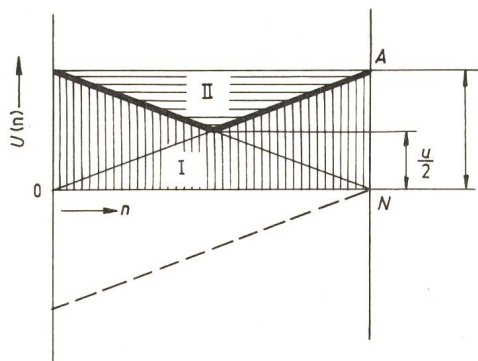


Fig. 7  
Verschiedene Spannungsverteilungen längs der Wicklung  
A Bezugszeichen; U Phasenspannung  
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

beanspruchungen fallen in die senkrecht gestrichelte Fläche I. Bei der mit der üblichen Methode durchgeführten Messung der durchschnittlichen Leitfähigkeit zwischen Wicklung und Eisenkörper ( $\tan \delta$  ist verhältnismäßig zu  $G$ , falls  $C = \text{konst.}$ ) wird die Spannung zwischen Wicklung und Eisenkern gelegt. In diesem Falle liegt also in jedem Wicklungspunkt die Beanspruchung  $U$  vor; die Spannungsbeanspruchung wird also durch die Flächen I + II der Fig. 7 gekennzeichnet. Die tatsächliche Betriebsspannungsbeanspruchung der Wicklung wird bei Sternschaltung von der Linie 0—A in Fig. 7, bei Deltaschaltung annähernd von der Grenzlinie der Fläche I bestimmt. Im Sinne dieser Ausführungen seien die Fig. 8a und 8b betrachtet, und es sei vorausgesetzt, dass am Ort  $n_1$  der Wicklung die sich gegen die Erde zeigende Leitfähigkeit bei  $U_{n1} > U'$  spannungsabhängig wird und ihre Grösse mit der Spannung gemeinsam ansteigt. Die Spannungsbeanspruchung des Punktes  $n_1$  wird im Falle  $\alpha = \alpha'$  eben  $U'$  sein. Das Ergebnis von  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  wird im Abschnitt  $0 \leq \alpha \leq \alpha'$  eine Gerade sein; nachdem aber bei  $\alpha > \alpha'$   $U_{n1} > U'$  ist, wird an der Stelle  $\alpha'$  in der Kurve ein Bruch zu verzeichnen sein und der Isolationsfehler steiler verlaufen. In diesem Falle geht der «Schwerpunkt» Charakter des Schnittpunktes  $\alpha_0$  der Geraden  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  und der Achse  $\alpha$  offensichtlich verloren, doch lässt sich der

Fehlerort  $n_1$  mit Hilfe von Fig. 8c bestimmen. Dieses Diagramm wird in der Schaltung gemäss Fig. 5 bei der Stellung 0—2 der dort eingezeichneten Schalter K aufgenommen (dies ist die übliche Methode, wenn man die Meßspannung zwischen Wicklung und Eisenkern legt). Dabei wird der Eisenkern 2 entregt und die erforderliche veränderbare Spannung durch den Generator 5 geliefert. Das Diagramm in Fig. 8c stellt die Leitfähigkeit  $G$  in Abhängigkeit von  $U$  dar. Der Eckpunkt bezeichnet die kritische Spannung  $U'$ . In deren Kenntnis lässt sich der Fehlerort  $n_1$  mit Hilfe der Konstruktion in Fig. 8a annähernd ermitteln.

Man kann sich auch vorstellen, dass Fig. 8c zwar einen «Brechpunkt» aufweist, das Diagramm  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  jedoch eine Gerade ist. Dies bedeutet, dass sich der Fehlerort im Bereich II der Fig. 7 befindet; das Isoliermaterial erleidet also unter normalen Betriebsverhältnissen keine solche Beanspruchung.

Bisher wurde der Fall behandelt, bei welchem die Funktionen  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  und  $\varrho_{m0} = f_2(\alpha)$  nur bei der Spannung  $U_1$  aufgenommen wurden. Man kann aber die Spannung  $U_1$  auch auf solche Art wählen, dass sie wesentlich kleiner sein soll als die Betriebsspannung  $U_b$  der Anlage (oder als deren Prüfspannung). Somit ist man dann in der Lage, die Aufnahme der Kurven bei verschiedenen Spannungen

$$U_1 < U_2 < U_3 < \dots U_k \dots < U_b$$

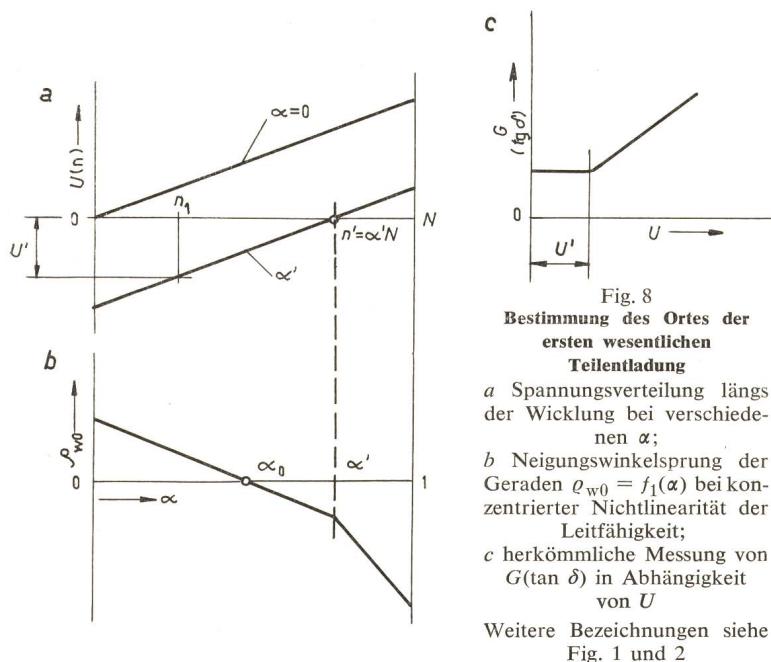
zu wiederholen. Falls  $G(n)$  und  $C(n)$  innerhalb des gegebenen Spannungsbereiches von der Spannung nicht abhängig sind, werden sich sämtliche Ergebnisse decken. Wählt man  $U_1$  genügend klein, so wird die ihr zugeordnete Kurve gewiss noch eben eine Gerade sein. Steigert man die Spannung, so wird neben  $U_k$  irgendwo die erste Teilentladung eintreten, die in der Kurve durch einen «Brechpunkt» angedeutet wird. Wird die Spannung noch weiter gesteigert, so zeigen sich beim Auftreten von neueren Teilentladungen an den neueren Diagrammen weitere Brechpunkte. Eine solche Versuchsreihe, mit der Aufnahme der herkömmlichen Kurven  $G = f(U)$  ergänzt, scheint geeignet zu sein, den Ort der ersten wesentlichen Teilentladung zu bestimmen.

Es mag vielleicht interessant sein, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Kurven miteinander zu vergleichen. Die Änderung der Richtung des Tangens, der Form und der Punkte  $n_s$  der Kurven können nämlich über Charakter, Ausmass und Ort der Isolationsschäden wesentlich mehr Informationen liefern, als das nach dem herkömmlichen Messen von  $\tan \delta$  gewonnene Ergebnis.

Die Messung kann auch mit einer Ionisationsmessung kombiniert werden, so dass vom Differenzstrom  $i_1 - i_2$  (Fig. 5) das Hochfrequenzglied ausgeschaltet wird und mit der Aufnahme der Kurven  $\varrho = f(\alpha)$  gleichzeitig auch irgendein Kennwert registriert wird. Man kann annehmen, dass diese Informationen diejenigen aufgrund der Kurven  $\varrho = f(\alpha)$  erhaltenen nützlich ergänzen.

### 3. Messergebnisse

Zum Beweis der prinzipiellen Richtigkeit des behandelten Verfahrens wurde an einem zahlreiche Anzapfungen aufweisenden Niederspannungswandler 550/100 V ein Versuch durchgeführt. Die An-





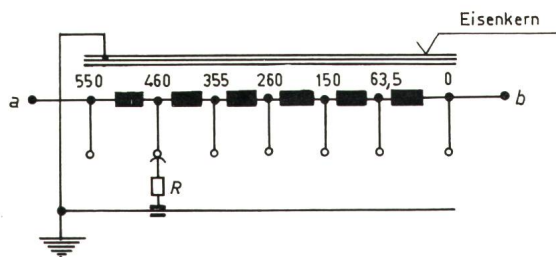


Fig. 9

Schema eines Versuchswandlers

R grosser Widerstand zur Herstellung dominierender Fehlerstellen bei den Anzapfpunkten; a, b Anschlussklemmen des Versuchswandlers

zapfungen der Primärseite waren bei 550—460—355—260—150—63,5 V. Das Schema des Versuchswandlers geht aus Fig. 9 hervor. Die Messungen wurden gemäss der Schaltung in Fig. 5 durchgeführt, und zwar so, dass das zwischen die Punkte a—b gelegte zu untersuchende Objekt der Fig. 9 entsprach (die Schalter K befanden sich in Stellung 0—1). Zwischen die Anzapfungen des Spannungswandlers und die Erde konnte ein Widerstand  $R$  oder eine Kapazität  $C$  (letztere wurde in die Figur nicht eingetragen) eingeschaltet werden, womit zwischen den zugänglichen Punkten der Wicklung und dem geerdeten Eisenkörper eine Steigerung der konzentrierten Leitfähigkeit oder der Kapazität erzeugt werden konnte. Fig. 10 zeigt eine der als Ergebnis erhaltenen Diagrammreihen. Bei Nennspannung wurde zwischen sämtliche

Klemmen des Spannungswandlers und der Erde ein Widerstand von 5 M $\Omega$ , sodann von 10 M $\Omega$  eingesetzt, während  $\alpha$  von 0 bis 1 geändert wurde. Fig. 10 zeigt die Geraden  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$ . (Die eingetragenen Bezeichnungen — z. B. 460—10 M — bedeuten, dass zwischen die Anzapfung von 460 V und Erde ein Widerstand von 10 M $\Omega$  eingeschaltet wurde.) Nachdem dieser Widerstand wesentlich kleiner ist als der zwischen Wicklung und Eisen bestehende Betriebswiderstand, ist jener Anzapfpunkt, an dem der Widerstand angeschlossen wurde, der dominierende Fehlerort, gleichzeitig also auch der «Schwerpunkt» der Isolation. Das bedeutet, dass die Achse  $\alpha$  durch die Gerade  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  bei der Spannungsgrösse der betreffenden Anzapfung geschnitten werden muss. Die Achse  $\alpha$  muss also sowohl durch die Kurve von 5 M wie auch durch jene von 10 M, die der gleichen Anzapfung zugeordnet sind, in einem gemeinsamen Punkt geschnitten werden. Dieser Schnittpunkt muss an der Achse  $n$ , die mit einer Spannungsskala versehen ist, den Fehlerort, also die Spannungsgrösse der zuständigen Anzapfung bezeichnen. Wie aus Fig. 10 hervorgeht, wird diese Überlegung durch die Messungen sehr gut nachgewiesen. Die in Klammer gesetzten Zahlen der Fig. 10 sind die Nennspannungswerte der Anzapfungen, diejenigen ohne Klammer die aus dem Diagramm konstruierten Werte. Mit  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  gemeinsam wurde auch das Diagramm  $\varrho_{m0} = f_2(\alpha)$  aufgenommen; dieses ist für die Kapazitätsverteilung kennzeichnend. Da während des Versuchs die Werte  $C$  unverändert

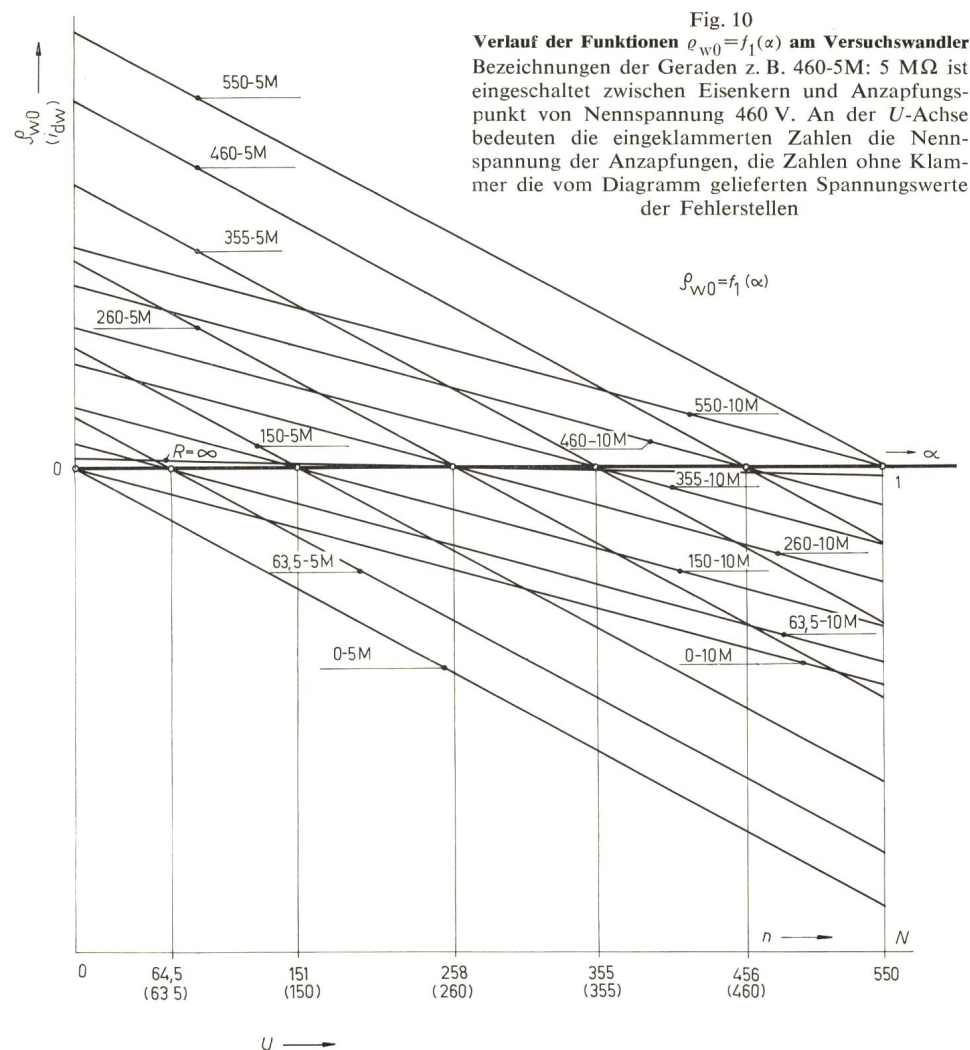


Fig. 10

Verlauf der Funktionen  $\varrho_{w0} = f_1(\alpha)$  am Versuchswandler  
Bezeichnungen der Geraden z. B. 460-5M: 5 M $\Omega$  ist eingeschaltet zwischen Eisenkern und Anzapfpunkt von Nennspannung 460 V. An der U-Achse bedeuten die eingeklammerten Zahlen die Nennspannung der Anzapfungen, die Zahlen ohne Klammer die vom Diagramm gelieferten Spannungswerte der Fehlerstellen

blieben, besteht dieses Diagramm aus einander überlagernden Geraden. Wurden an die Anzapfpunkte anstelle der Widerstände Kondensatoren gelegt, so war die Kurvenschar  $\varrho_{m0} = f_2(\alpha)$  der Fig. 10 ähnlich. Durch die Schnittpunkte der Geraden mit der Achse  $\alpha$  wurde der Ort der dominierenden Kapazität ebenso bestimmt wie bei den Widerstandsmessungen.

#### 4. Zusammenfassung

Das vorgeschlagene Untersuchungsverfahren bietet unter gewissen Umständen die Möglichkeit, Ausmass und annähernden Ort eines im Isoliermaterial auftretenden Fehlers bestimmen zu können. Als besonders vorteilhaft erscheint seine Verwendung bei den Untersuchungen von Generatorisolationen, da hier die auf den Eisenkern bezogene Lage sämtlicher Windungen ungefähr gleich ist. Als Nachteil und Hindernis kann hingegen angesehen werden, dass die Maschine zur Untersuchung erregt und die Spannung des Sternpunktes gegen Erde bis zur Phasenspannung gesteigert werden muss. Bei der Untersuchung von Generatorwicklungen ist auch vorteilhaft, dass für die dort vorkommenden Spannungen die kon-



zentrische Durchführung, durch welche die Differenz-  
erregung  $i_1 - i_2$  erzeugt wird (Fig. 5), und der notwendige  
Spannungsteiler unschwer verwirklicht werden können, wäh-  
rend dies bei Anlagen von höheren Spannungen unabwahr-  
bare Schwierigkeiten verursachen kann. Bei den periodischen Kon-  
trolluntersuchungen der Generatorwicklungen kann der Ver-  
gleich der in verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen  
Kurven  $q = f(\alpha)$  über den Zustand der Isolation mehr Auf-  
schluss geben als die herkömmlichen Verlustfaktormessun-  
gen.

Der Verfasser möchte Oberassistent *Péter Osváth*, der bei  
der Erstellung der Messeinrichtung und in der Durchführung

der Kontrollmessungen behilflich war, seinen Dank aus-  
sprechen.

#### Literatur

- [1] *R. Schuler*: Die Beurteilung des Isolationszustandes von Statorwicklungen. Bull. SEV 60(1969)17, S. 777...785.
- [2] *P. Osváth* und *L. Schnell*: Ein automatisches Messgerät zur Messung und Registrierung von Verlustfaktor und Kapazitätsänderung der Isolierstoffe. Elektrotechnika 62(1969)7/8, S. 276...278 (= ungarisch).
- [3] *L. Schnell*: Neue Möglichkeiten zur Überwachung des Isolationszustandes von elektrischen Hochspannungsmaschinen im Betrieb. Periodica Polytechnica Electr. Eng. (Budapest) 14(1970)1, S. 15...21.

#### Adresse des Autors:

Prof. Dr. *L. Schnell*, Technische Universität, Műegyetem rakpart 9, Buda-  
pest XI.

## Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen der GT 1, Huiles inhibées, und GT 2, Analyse de gaz, des SC 10A, Huiles isolantes à base d'hydrocarbures vom  
27. August 1970 in Paris

Die von der Arbeitsgruppe 1 zu entwickelnde Methode zur  
Prüfung inhibierter Isolieröle auf ihre Alterungsbeständigkeit ist  
soweit gediehen, dass alle apparativen Details sowie die Testbe-  
dingungen in sehr engen Toleranzgrenzen festgelegt sind, und dass  
die vorgeschriebenen Bedingungen von allen Prüfstellen erfüllt  
werden. Trotzdem stellte sich bei den zahlreichen Versuchen, die  
in den letzten Monaten durchgeführt worden sind, immer wieder  
heraus, dass die Wiederholbarkeit (Ergebnisse der Versuche eines  
Labors mit ein und derselben Apparatur) der Testergebnisse zwar  
hervorragend ist, während die Vergleichbarkeit (Ergebnisse aller  
an den Ringversuchen beteiligten Labors unter Benutzung ver-  
schiedener Geräte) der Ergebnisse noch einer wesentlichen Ver-  
besserung bedarf. Vergleicht man die Ergebnisse der verschiede-  
nen, an den Versuchen beteiligten Prüfstellen miteinander, dann  
wird offensichtlich, dass die Fehler systematischer Natur sind.  
Die Quellen für diese systematischen Fehler konnten bis jetzt je-  
doch nicht gefunden werden. Ungeachtet dieses Mangels wurde  
die redaktionelle Arbeit für den Entwurf einer CEI-Empfehlung  
fortgesetzt, da die Prüfmethode für die betriebliche Überwachung  
inhibierter Öle bereits schon jetzt gute Dienste leisten kann, so-  
lange die Prüfungen in ein und demselben Prüflabor durchgeführt  
werden. Diese Arbeiten werden noch im Laufe der nächsten Mo-  
nate zum Abschluss gebracht werden, so dass die erstellte Prüf-  
vorschrift voraussichtlich zur Réunion générale 1971 dem SC 10A  
zur weiteren Diskussion vorgelegt werden kann.

Der vor etwa Jahresfrist in der ersten Sitzung der Arbeits-  
gruppe 2 beschlossene Ringversuch zur Überprüfung der Repro-  
duzierbarkeit der Ergebnisse bei Verwendung verschiedener Appa-  
raturen wurde planmässig an einem Öl durchgeführt, dem ein

künstlich zusammengesetztes Gasgemisch zugesetzt worden war.  
Das Ergebnis war sowohl qualitativ als auch quantitativ überaus  
erfreulich, so dass in apparativer Hinsicht praktisch keine wesent-  
lichen Verbesserungen mehr notwendig sind.

Auch im Hinblick auf die für den Versand von Gasen oder  
gashaltigen Ölen zu verwendenden Probenbehälter sowie auf die  
Vorbehandlung der Proben zur Durchführung der Analysen  
wurde weitgehende Übereinstimmung der Meinungen erreicht.

Um sicherzugehen, dass alle bei fehlerhaft arbeitenden Trans-  
formatoren auftretenden und für die Fehlerdiagnose wichtigen  
Gase auch bei sehr kleinen Gasproben, wie sie beim vielfach an-  
gewendeten «strippen» anfallen, erfasst werden, wurde ein zweiter  
und damit letzter Versuch an einer Ölprobe angeregt, die einem  
«gasenden» Transformator zu entnehmen ist. Inzwischen soll je-  
doch bereits mit der redaktionellen Arbeit zur Aufstellung einer  
CEI-Empfehlung für die Probennahme, den Versand und die  
Analyse von freien oder in Isolieröl gelösten Gasen aus Hoch-  
spannungsgeräten begonnen werden.

In der weiteren Diskussion wurde beschlossen, dass das vor-  
liegende Projekt erst abzuschliessen sei, bevor mit der Aufstellung  
eines definitiven Schemas zur Auswertung der erhaltenen Analy-  
sendaten zwecks Fehlerdiagnose begonnen würde. Das wird in  
etwa 2 Jahren der Fall sein. In der Zwischenzeit werden von der  
Arbeitsgruppe CIGRE 15.01 «Papier-Huile» wichtige Vorarbeiten  
durchgeführt, die sich sowohl auf die rein statistische Erfassung  
publizierter Analysendaten als auch auf die Möglichkeit ihrer  
Auswertung erstrecken, so dass dann auf der Basis dieser Erge-  
bnisse unverzüglich mit der Erstellung eines entsprechenden CEI-  
Dokumentes begonnen werden kann.

*J. Schober*