Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 17

Artikel: Alterungsuntersuchungen an Statorwicklungen elektrischer Maschinen

Autor: Nylund, K. / Mosimann, Th.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916279

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: 10.07.2025

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

Die Gesamtlaufzeit in der stromdurchflossenen Strecke beträgt:

$$t_1 = 12\ \mu s$$

Ein proportionaler Anstieg der Spannung $\hat{u}_c$ mit fortschreitender Länge ist demnach nur bis zu $t_1 = 8\ \mu s$ oder bis zu einer Länge von $l = 200$ m zu erwarten.

Die Spannung $\hat{u}'_i$ ist in diesem Beispiel gleich $\hat{u}'_c$.

$$\hat{u}'_c = L'_a \frac{\hat{i}_{st}}{t_s} = 1{,}25\ \text{kV/m}$$

Unter Berücksichtigung der unteren Grenze der Durchbruchfeldstärke zeigt sich, dass etwa nach 10 m ein Durchschlag zwischen Bewehrung und Bleimantel erfolgen muss (Fig. 24). Kommt es zum Durchschlag, so muss im gleichen Moment der niederohmigere Bleimantel einen Teil des Stromes übernehmen, was zur Folge hat, dass der Lichtbogen am Durchschlagsort l_1 stromstark sein wird. Die Spannung $\hat{u}_c$ bricht bei $x = l_1$ zusammen. Nun ergeben sich für die Kabellängen $x > l_1$ dieselben Bedingungen, wie sie für das Zustandekommen des ersten Durchschlages bestanden haben usw. So können bei einem Blitzschlag Durchschläge zwischen Bewehrung und Bleimantel an mehreren Orten stattfinden. In Fig. 25 wird die thermische Wirkung eines Stoßstromlichtbogens auf Bleiblech gezeigt. Auffällig ist der krasse Unterschied zwischen einem frei auftreffenden und einem örtlich begrenzten Lichtbogen. Zur thermischen Wirkung kommt die Druckwirkung des Lichtbogens hinzu; sie beträgt für den frei auftreffenden Bogen als Kraftstoss ca. 8 p.s. Die Kraftwirkung ist sicher um ein vielfaches höher, wenn der Bogen zwischen Bewehrung und Bleimantel erstens auf einem Fleck, zweitens in engem Raum und drittens in Anwesenheit verdampfungsfähiger Stoffe brennen muss. Hiedurch entstehen neben Löchern die starken Deformierungen des Kabelaufbaues.

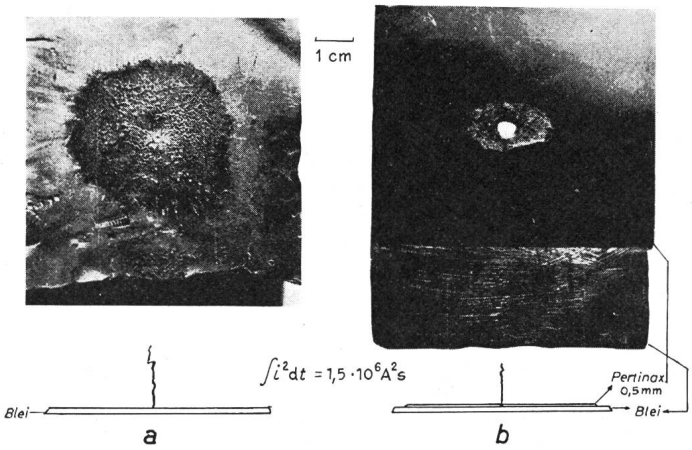

Fig. 25
Stoßstromeinwirkung auf Bleiblech
a frei brennender Lichtbogen; *b* begrenzt brennender Lichtbogen

7. Schlussbemerkung

Die Arbeit wurde am Institut für Hochspannungs- und Messtechnik der Technischen Hochschule Darmstadt durchgeführt. Der Verfasser dankt Prof. Dr.-Ing. *G. Frühauf* für die Förderung dieser Untersuchungen.

Literatur

[1] *W. Griesinger* und *R. Riedel:* Schutz von Fernmeldekabeln gegen Blitzschäden. Fernmeldepraxis 38(1961)1, S. 7...16.
[2] *K. Berger* et al.: Telephon- und Signalkabel mit erhöhter Blitzsicherheit. Bull. SEV 56(1965)13, S. 493...507.
[3] *J. Artbauer:* Kabel und Leitungen. Stuttgart, Berliner Union/Berlin, Verlag Technik, 1961.
[4] *E. D. Sunde:* Lightning Protection of Buried Cable. Bell. Syst. techn. J. 24(1945)2, S. 253...300.
[5] *H. Kaden:* Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik. 2. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1959.
[6] *G. Liebmann:* Solution of Partial Differential Equations with a Resistance Network Analogue. Brit. J. appl. Phys. 1(1950)4, S. 92...103.
[7] *K. Berger* und *E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955 bis 1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.
[8] *W. Zaengl:* Das Messen hoher, rasch veränderlicher Spannungen. Dissertation der Technischen Hochschule München 1964.
[9] *K. Berger:* Blitzschutzproben bei Stollenbauten und Stollenkabeln im Gebirge. Schweiz. Bauztg. 81(1963)21, S. 377...380.
[10] *H. F. Schwenkhagen:* Allgemeine Wechselstromlehre. Band 2: Vierpole, Leitungen, Wellen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1959.
[11] *V. Fritsch:* Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern besonders in der angewandten Geoelektrik. Karlsruhe, Braun, 1960.
[12] *K.-H. Schneider:* Überspannungen in erdverlegten Kabeln durch Blitzeinschlag in den Kabelmantel. Dissertation TH Darmstadt (1966).

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *K.-H. Schneider,* Institut für Hochspannungs- und Messtechnik der Technischen Hochschule Darmstadt, D - 61 Darmstadt.

Alterungsuntersuchungen an Statorwicklungen elektrischer Maschinen

Von *K. Nylund* und *Th. Mosimann,* Zürich

621.313.045 : 620.193.918

Es werden die verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Isolationsüberwachung kritisch beurteilt, und die während der letzten Jahre gewonnenen Erfahrungen bei Messungen an einer grösseren Anzahl Maschinen besprochen. Die meisten der wohl bekannten zerstörungsfreien Prüfverfahren für die Isolationsüberwachung ermöglichen die Änderungen einiger Eigenschaftswerte während der Betriebszeit zu verfolgen. Das Heranziehen mehrerer Prüfverfahren erlaubt einige Aussagen über den Alterungszustand der Isolationen abzugeben. Die gesammelten Erfahrungen solcher Messungen ermöglichen auch Angaben über einige Kennwerte festzulegen. Erst durch umfassende Modellversuche, die den Zweck haben, den Einfluss der verschiedenen Belastungsparameter auf ein bestimmtes Isolationssystem abzuklären, können die Interpretationsmöglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfverfahren für die Isolationsüberwachung erweitert werden.

Les différents procédés d'essais non destructifs de surveillance de l'isolation sont examinés et les expériences faites au cours des dernières années, lors de mesures à un grand nombre de machines, sont décrites. La plupart des procédés d'essais non destructifs bien connus permettent de suivre les variations de quelques valeurs caractéristiques durant le service. L'application conjuguée de plusieurs procédés fournit quelques indications sur l'état de vieillissement des isolations. L'expérience acquise avec de telles mesures permet également des indications pour certaines valeurs caractéristiques. Les possibilités d'interprétation des procédés d'essais non destructifs de surveillance de l'isolation ne peuvent être élargies que par des essais détaillés sur modèles, dans le but de déterminer l'influence des divers paramètres de la charge sur un système d'isolation donné.

1. Allgemeines

Die Isolationsüberwachung von Wicklungen rotierender Maschinen bezweckt vor allem das frühzeitige Erkennen von Isolationsmängeln, damit unerwarteter Ausfall von Maschinen verhindert, ihre Betriebstüchtigkeit erhalten, und die Lebensdauer verlängert werden kann. Eine solche Überwachung der Hochspannungsisolationen während dem Betrieb wird von den meisten Energieversorgungs-Unternehmen und

Herstellern von elektrischen Maschinen seit Jahrzehnten durchgeführt. Es handelt sich bei dieser Form der Überwachung in der Regel jedoch lediglich um die Messung des Isolationswiderstandes, um eine eventuelle 50-Hz-Spannungsprüfung sowie eine visuelle Untersuchung der Wicklungen. Der Widerstandsmessung zur Beurteilung des Feuchtigkeitsgrades der Isolation, d. h. der Einsatzbereitschaft der Maschine, kann ohne grossen Aufwand bei einem Stillstand durchgeführt werden, während die 50-Hz-Spannungsprüfung und die visuelle Kontrolle meistens mit Revisionsarbeiten kombiniert werden. Dies bedeutet aber, dass die beiden letzten Prüfungen keine Prophylaxe gegen unliebsame Betriebsausfälle bilden, da sie zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden, wo eine allgemeine Revision der Maschine ohnehin als angebracht empfunden wird [1] [1]).

Die visuelle Kontrolle und die Spannungsprüfung mit reduzierter Prüfspannung kann somit im engeren Sinne nicht als eine Überwachung betrachtet werden, da sie zeitlich an die allgemeine Revision der Maschinen gebunden sind. Somit bleibt für die grosse Zeitspanne zwischen zwei Revisionen eine gewisse Unsicherheit betreffend Betriebstüchtigkeit der Wicklungen bestehen.

Eine sinnvolle Überwachung der Isolation sollte während der Betriebszeit periodisch ohne grossen Aufwand, je nach Alter und Betriebsbedingungen alle 1...3 Jahre erfolgen, um eine Verminderung des Isoliervermögens rechtzeitig zu erkennen, damit die notwendigen Schritte zur Abhilfe eingeleitet werden können.

Die Anhäufung von unerwünschten Betriebsausfällen an Hochspannungsmaschinen während den ersten Nachkriegsjahren führte zu einer regen Entwicklung von modernen betriebssicheren Isolationen [2]. Die bessere Ausnützung der neuen Isolationen, der Bau von grösseren Maschineneinheiten, sowie die Unzulänglichkeit der damaligen Überwachungsmassnahmen liessen auch die Entwicklung zerstörungsfreier Prüfmethoden für die Isolationsüberwachung von Wicklungen vorantreiben. Wünschenswert bei der Entwicklung solcher Prüfmethoden ist nicht nur die Kenntnis einiger Eigenschaftswerte der Isolation, sondern auch die Möglichkeit den Alterungszustand festzulegen um damit eventuelle Prognosen über Lebenserwartung des Isolationssystems abgeben zu können.

Da die Alterung einer Isolation weitgehend durch die Überlagerung mechanischer, elektrischer, thermischer und chemischer Einwirkungen bestimmt wird, ist es klar, dass es sich nicht um ein Universal-Prüfverfahren handeln kann. Vielmehr müssen durch mehrere Prüfverfahren unter Berücksichtigung der verschiedenartigen Betriebsbedingungen und Isolationssysteme diejenigen Eigenschaftswerte gemessen werden, die den Alterungszustand am besten wiedergeben. Insbesondere müssen im Laboratorium Modellversuche durchgeführt werden, die den Zweck haben, den Einfluss der verschiedenen Belastungsparameter auf ein bestimmtes Isolationssystem abzuklären. Erst dann ist es möglich, die durch den Betrieb verursachte Alterung einer Isolation einigermassen zu beurteilen.

Die heutigen Prüfverfahren für die Isolations-Überwachung von Wicklungen erlauben zwar weitgehende Schlüsse über die Betriebstüchtigkeit abzugeben, jedoch bilden die während Jahren gesammelten Erfahrungswerte an Maschinen verschiedener Grösse und mit jeweils anderen Betriebsverhältnissen eine wichtige und notwendige Erweiterung der Interpretationsmöglichkeiten.

2. Problematik der Wechselspannungsprüfung mit 50 Hz

Die Wechselspannungsprüfung während einer Minute wird in weiten Kreisen noch als einzige zuverlässige Prüfung betrachtet, um die Betriebssicherheit einer Wicklung zu beurteilen. Ohne Zweifel mag diese Methode bei neueren Wicklungen, bei denen die Durchschlagspannung noch grösser als 4...5mal die Nennspannung beträgt, angebracht sein. Bei gealterten Isolationen garantiert diese Entweder-Oder-Methode zwar ein Mindestdurchschlagsniveau gemäss der angelegten Prüfspannung, jedoch werden keine Erkenntnisse über Alterungserscheinungen und Lebenserwartung gewonnen [3]. Vielmehr besteht die Gefahr, dass bei der Prüfung die Isolation dielektrisch überlastet wird und schon nach einigen Betriebsstunden versagen kann.

Fig. 1 zeigt das Isoliervermögen in Form von Haltespannungszeit-Charakteristiken von neuen und gealterten Isolationen. Bei neuen Isolationen kann die Prüfspannung während Monaten angelegt werden ohne dass ein Durchschlag erfolgt. Dies bedeutet, dass die 1-min-Prüfung keine Schwächung für die Isolation darstellt. Mit zunehmender Alterung der Isolation kann sich jedoch die Haltespannungs-Charakteristik gegen kürzere Zeiten verschieben, so dass eine angelegte Prüfspannung während einer Minute eine gefährliche Annäherung an die Haltezeit bedeuten kann, da die Prüfdauer von 1 min bei hohen Spannungen oft einen wesentlichen Anteil der Haltezeit darstellt. Aus diesen Gründen sollte die 1-min-Wechselspannungsprüfung als Überwachungsmassnahme von Wicklungsisolationen vermieden werden. Anderseits kann und soll die Wechselspannungsprüfung nach Beendigung von Revisionsarbeiten an Wicklungen durchgeführt werden, da eine noch so fachgerecht durchgeführte Revision immer ein gewisses Risiko auf mechanische Beschädigung der Isolationen in sich birgt.

Die in den letzten Jahren erfolgte Entwicklung der 0,1-Hz-Spannungsprüfung [4] sowie die Prüfung mit einer Sinus-Halbwelle von 50 Hz [5] ermöglicht wahrscheinlich diese anstelle der Wechselspannungsprüfung als Überwachungs-

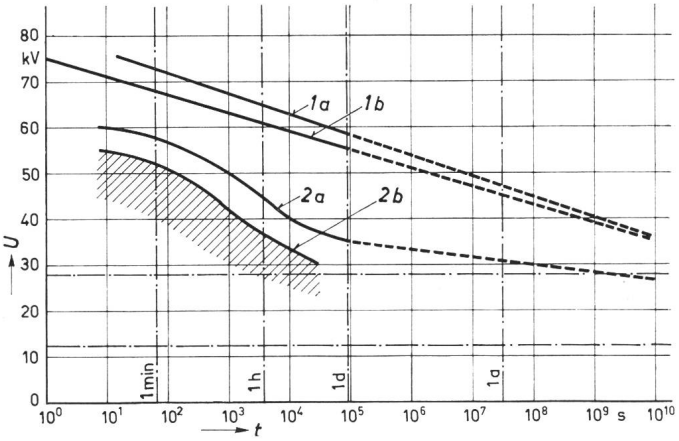

Fig. 1

Haltespannungszeit-Charakteristiken von neuen und gealterten Isolationen

1 vakuum-imprägnierte Glimmervlies-Glasgewebeband-Isolation. *a* Neuzustand, *b* nach 2000 thermischen Zyklen zwischen 40...155 °C; *2* Schellackmikafolium-Isolation.
a Neuzustand, *b* nach längerer Betriebzeit

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

massnahme einzuführen. Leider fehlen immer noch genügende Angaben über die Korrelation zwischen der normalen 50-Hz-Wechselspannungsprüfung und diesen neuen Prüfmethoden.

3. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

3.1 Verlustfaktor-Messungen

Der Verlustfaktor bzw. dessen maximaler Anstieg pro kV wird seit langem mit Erfolg als Fabrikationskontrolle verwendet. Insbesondere lässt sich auf Grund der Normalverteilungskurve die Gleichmässigkeit der Fabrikation beurteilen. Es ist klar, dass diese Messungen unter günstigen Laboratoriumsbedingungen stattfinden können, und dass die Stäbe nicht schmutzig und feucht werden; ferner kann der unerwünschte Einfluss der Kopfisolation auf das Messergebnis durch Schutzringelektroden weitgehend eliminiert werden.

Anders liegen die Verhältnisse bei Messungen an in Betrieb stehenden Maschinen, wo in erster Linie die totale Änderung sämtlicher gemessenen Stäbe einer Phase anhand des tan δ-Verlaufes in Funktion der Spannung und der Betriebszeit Rückschlüsse auf Delaminierungen, Hohlraumbildung und Zersetzung des Isolationsverbandes, verursacht durch die Betriebsbeanspruchungen, geben soll. Als integrierende Messung über mindestens eine Phase kann somit nur ein mittlerer Alterungsgrad aus dem messtechnisch parallelgeschalteten Stäben oder Spulen festgehalten werden. Im weiteren kann der Einfluss der Kopfisolation nicht unterbunden werden, da die Abschirmung jedes Einzelstabes einen zu grossen Arbeitsaufwand bedeuten würde. Auch der Einfluss der Verschmutzung und des Feuchtigkeitsgrades kann nur schwer von dem der eigentlichen Alterung getrennt werden, so dass bei solchen Messungen Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden müssen, die unter Umständen ein Mehrfaches der Veränderung durch die Alterung ausmachen.

Fig. 2 zeigt tan δ-Anstiege pro kV gemessen an Einzelstäben nach der Fabrikation, während die Fig. 3 die tan δ-Verlaufe unmittelbar nach dem Einbau, gemessen an der ganzen Phase, also ebenfalls im Neuzustand, zeigt. Man ersieht aus den beiden Kurven, dass die Diskrepanz zwischen der abgeschirmten Messung an den Einzelstäben und der unabgeschirmten an den ganzen Phasen doch einiges ausmachen kann. Die Messung an den Einzelstäben z. B. der Maschine I ergibt gemäss der Normalverteilung einen Wert des maximalen tan δ-Anstieges von ca. 1,0 ‰/kV, während der Anstieg, gemessen an der ganzen Phase, einen solchen von 3,5 ‰/kV ergibt. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Diskrepanz hauptsächlich durch die Oberflächenströme vom Stabende an das Statoreisen, die als Wirkkomponente in die Messung eingehen, verursacht werden, während die Kapazität der Wicklungsausladung dabei eher eine untergeordnete Rolle spielt. Diese unerwünschten Oberflächenströme werden in erster Linie durch das Verhältnis Schenkel- zu Nutteiloberfläche, sowie durch den Endenglimmschutzanstrich selbst beeinflusst. Aus diesen Gründen kann dieses Phänomen nur durch eine entsprechende Abschirmung unterdrückt werden.

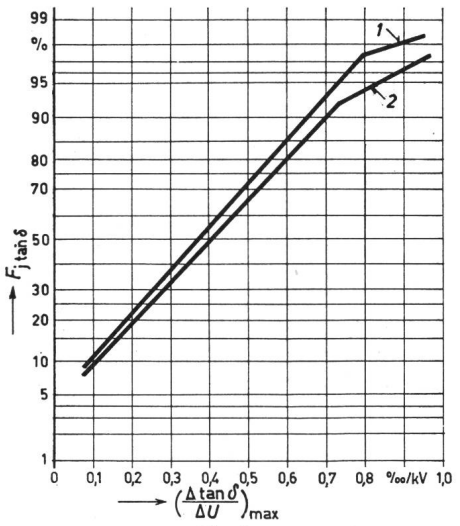

Fig. 2

Normalverteilungskurven über den Anstieg pro kV von tan δ, **gemessen an Einzelstäben nach der Fabrikation**

1 Maschine I, Betriebspannung 10,5 kV; *2* Maschine II, Betriebspannung 6,3 kV

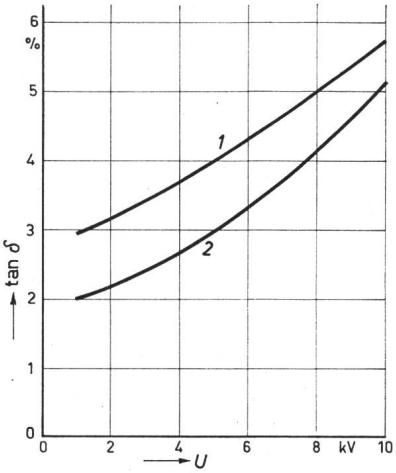

Fig. 3

tan $\delta = f(U)$ **nach dem Einbau an der ganzen Phase gemessen**

1 Maschine I, $(\Delta \tan \delta / \Delta U)_{max} = 0{,}35$ %/kV; *2* Maschine II, $(\Delta \tan \delta / \Delta U)_{max} = 0{,}49$ %/kV

tan δ Verlustfaktor; U effektive Spannung

Die tan δ-Messung an ganzen Wicklungen sollte nur dann zur Überwachung von Isolationen verwendet werden, wenn erstens der Neuzustand der Wicklung und weiter der Störeinfluss der Schenkelströme bekannt ist. In der Praxis bedeutet dies, dass ziemlich umfassende Untersuchungen notwendig sind, damit die Oberflächenbeschaffenheit der Schenkelpartien der Statorstäbe messtechnisch festgehalten und die Alterung aus den tan $\delta = f(U)$-Kurven richtig interpretiert werden kann. Ferner müssten die Messungen unmittelbar vor und unmittelbar nach einer Revision sowie nach einer durch den Betrieb erfolgten sicheren Trocknung der Isolation vorgenommen werden, um den Einfluss der Parameter Feuchtigkeit und Verschmutzung auftrennen zu können, damit schlussendlich als Resteinfluss derjenige der eigentlichen Alterung übrigbleibt.

Da die tan δ-Messung an einer ganzen Wicklung eine integrierende Messung darstellt, können vereinzelte schlechte Stäbe in einer Phase vorhanden sein, ohne dass dies in den Messresultaten zum Vorschein kommt. Durch eine Auftrennung der Phasen kann selbstverständlich dieser Nachteil beseitigt werden, jedoch lässt sich dies aus zeitlichen Gründen in den wenigsten Fällen praktisch durchführen.

Damit hat sich die tan δ-Messung an ganzen Wicklungen als zerstörungsfreies Prüfverfahren, zur Bestimmung des Alterungszustandes, nicht überall durchsetzen können. Auf Wunsch der Elektrizitätswerke werden diese Messungen hin

und wieder in Verbindung mit Messungen anderer Eigenschaftswerte durchgeführt. Wenn aber die tan δ-Messung als einziges Alterungskriterium verwendet wird, besteht die Gefahr, dass die Beurteilung wegen der Unempfindlichkeit dieser Messung zu gut oder wegen der Verschmutzung der Schenkelpartien zu schlecht ausfallen kann.

3.2 Ionisationsmessung

Die Ionisationsmessung als zerstörungsfreies Verfahren, zur Prüfung des Alterungszustandes von Hochspannungsisolationen, ist relativ neu. Auf Grund der Ionisationsmessung kann wie bei der tan δ-Messung auf die Glimmeinsatzspannung sowie auf die Glimmintensität geschlossen werden.

Es ist allgemein bekannt, dass Glimmentladungen in einer Isolation je nach Intensität der Entladungen im Laufe der Jahre zur Zerstörung der Isolation führen können. Das Ausmass der Zerstörung hängt weitgehend von der Beständigkeit der einzelnen Komponenten gegen Glimmentladungen und von Lage, Grösse und Form der glimmenden Hohlräume ab. Bei den klassischen Isolationen mit thermoplastischen Bindemitteln wie Asphaltkompound oder Schellack muss damit gerechnet werden, dass schon bei Betriebstemperatur eine gewisse Delaminierung und Aufquellung der Isolation stattfindet, die als Glimmherde angesehen werden müssen. Die Glimmentladungen in diesen Hohlräumen bewirken Erosionsschäden und eine chemische Zersetzung der Isolation. Die Zerstörung der Isoliermaterialkomponenten wird bei Zufuhr von Frischluft und Feuchtigkeit noch beschleunigt. Es muss somit gerechnet werden, dass speziell bei Verwendung von organischen Komponenten rings um die Hochspannungselektroden (Kupferkern) das Glimmen zu einer Zerstörung der Bindung der Teilleiter untereinander führt, was Vibrationen derselben zur Folge hat, die sowohl die restlichen Isoliermaterialkomponenten der Teilleiterisolation, wie auch der Nutenisolation, durch mechanischen Abrieb zerstören können.

Bei den modernen Kunstharzisolationen kann man aber höchstens mit geschlossenen, sehr kleinen Hohlräumen rechnen, die zwar bei höheren Spannungen auch zum Glimmen kommen können, jedoch im Laufe der Betriebszeit infolge Ablagerung von leitenden Zersetzungsprodukten an den Oberflächen der Hohlräume kurzgeschlossen werden. Aus diesen Gründen verhält sich die moderne Kunstharzisolation, die trotz Vakuumimprägnierung kleine Hohlräume aufweisen kann, wesentlich besser gegenüber Glimmentladungen als die klassische Isolation.

Es gibt heute eine ganze Reihe von Geräten, die ermöglichen, Ionisationsmessungen an Hochspannungswicklungen durchzuführen. Als Beispiel sei ein Gerät erwähnt, mit welchem die Verfasser solche Messungen durchführten. Das Prinzip dieser Messungen besteht darin, von einem ganzen Frequenzspektrum der hochfrequenten Ionisationsströme ein schmales Band von 185 Hz bei 10 kHz auszusieben und zu verstärken. Der Effektivwert des auf diese Weise erhaltenen Stromes bildet ein Mass für die Ionisation. Die Messung kann sowohl mit einer 50-Hz-Hochspannungsanlage, als auch bei drehender, erregter Maschine mit der eigenen Spannung durchgeführt werden. Die zweite Variante hat den Vorteil, dass ein Bild über die Ionisation bei betriebsmässiger Spannungsverteilung gewonnen wird.

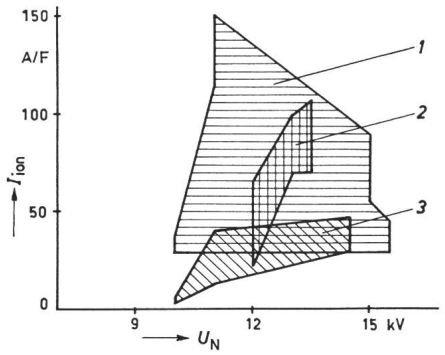

Fig. 4
Ionisationsstrom I_{ion} in Funktion der effektiven Betriebsspannung U_N
1 Schellackmikafolium-Isolation; *2* Glimmervliesfolium auf Papierträger mit Epoxydharz vorimprägniert; *3* Glimmervlies-Glasgewebeband-Isolation, vakuumimprägniert

Die Ionisationsmessung wird in der Regel an Objekten mit einer Nennspannung grösser als 10 kV durchgeführt. Um eine Vergleichsmöglichkeit zwischen Maschinen mit verschiedener Leistung zu haben, wird der gemessene Ionisationsstrom auf eine Kapazität von 1 F reduziert.

Anhand von zahlreichen in Frankreich durchgeführten Versuchen konnten Empfehlungen für die Strommittelwerte der Teilentladungen ausgearbeitet werden, die Aussagen über den Alterungszustand der Isolation erlauben sollen [6]. Diese Empfehlungen beziehen sich sowohl auf das Niveau wie auch auf die Änderung des Ionisationsstromes.

In Fig. 4 sind für eine grössere Anzahl Maschinen verschiedener Betriebsspannungen die Strommittelwerte, bezogen auf die Einheitskapazität bei Phasenspannung, aufgezeichnet. Die Überlegenheit der vakuumimprägnierten Bandisolation geht deutlich aus den erhaltenen Messwerten hervor. Auch für Maschinen mit Betriebsspannungen von 14 kV, d. h. Phasenspannungen von ca. 8 kV beträgt der Ionisationsstrom nur 30...40 A/F.

In Fig. 5 sind für die Isolationssysteme (gemäss Fig. 4) die Strommittelwerte in Funktion der Betriebszeit aufgezeichnet. Es ist hier sehr interessant zu vermerken, dass die Ionisation im Laufe der Betriebszeit abnimmt. Dies muss natürlich bei der Interpretation der erhaltenen Messwerte beachtet werden.

Bei Statorwicklungen kann die Ionisation oder das Glimmen im Laufe der Zeit im Rahmen der normalen Alterung bis zu einem Maximum zunehmen, bei dem sich Glimm- oder andere leitende Zersetzungsprodukte an den Hohlraumoberflächen abzulagern beginnen. Dies bedeutet eine langsame Kurzschliessung der Hohlräume und führt je nach Art und

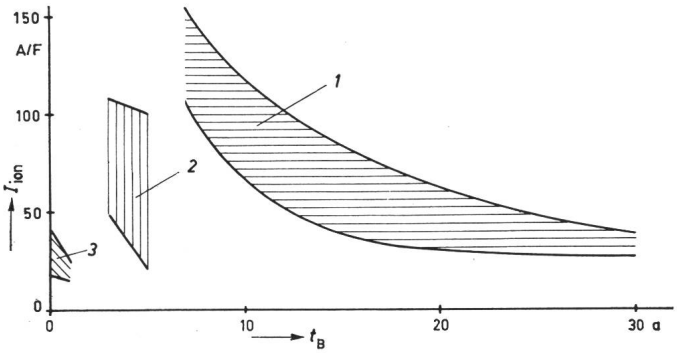

Fig. 5
Ionisationsstrom I_{ion} in Funktion der Betriebzeit t_B
Bezeichnungen siehe Fig. 4

Menge der Zersetzungsprodukte zu einem bleibenden oder vorübergehenden Löschen der Glimmentladungen. Wenn die Ionisationsmessung von Anfang an durchgeführt wird, weiss man daher immer, ob mit der Zeit der Ionisationsstrom grösser oder kleiner wird.

3.3 Prüfung mit Gleichspannung

Die Gleichspannungsprüfung für die Isolationsüberwachung und die Kontrolle des Alterungszustandes von Wechselspannungs-Wicklungen wird seit mehreren Jahren von Energieversorgungs-Unternehmen und Herstellern von elektrischen Maschinen mit Erfolg angewandt. Nach den ersten Jahren «hochgeschraubter» Hoffnungen, anhand der R_i-U-Charakteristik die Gleichspannungs-Durchschlagspannung extrapolieren zu können, werden heute die Interpretationsmöglichkeiten dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens realistischer beurteilt. Je nach der zu untersuchenden Eigenschaft der Isolation kann die Gleichspannungsprüfung in Kategorien eingeteilt werden, die der Reihe nach im folgenden näher behandelt werden sollen.

3.3.1 Prüfung mit niedriger Gleichspannung

Beim Anlegen einer konstanten Gleichspannung von 2...5 kV an den Wicklungsphasen entsteht ein zeitlich variabler Strom, der sich aus dem kapazitiven Ladestrom, dem Absorptions- und dem zeitlich konstanten Isolationsstrom zusammensetzt. Der Ladestrom sinkt schon nach einigen Sekunden wieder auf einen vernachlässigbar kleinen Wert. Das Verhältnis des 1-min-Wertes zu jenem nach 10 min ergibt den sog. Polarisationsindex, auch Nachladezahl genannt. Dieser Wert reagiert verhältnismässig empfindlich auf die äusseren Einflüsse wie Feuchtigkeitsgehalt und Verschmutzung einer Wicklung.

Der Polarisationsindex ist auch vom Isolationssystem selbst abhängig. Aus diesen Gründen muss es dem Hersteller auf Grund seiner Erfahrungen überlassen werden, welche Werte repräsentativ sind für:

a) Sehr feuchte oder verschmutzte Isolationen;
b) Feuchte oder leicht verschmutzte Isolationen;
c) Trockene und saubere Isolationen.

In der Maschinenfabrik Oerlikon wurden im Laufe der letzten Jahre an ca. 50 Maschinen mit Betriebsspannungen zwischen 6...16 kV und Leistungen zwischen einigen MVA bis 175 MVA Absorptionsstrom- und Isolationswiderstandsmessungen durchgeführt. Dabei handelte es sich um verschiedene Isolationen.

Die Betriebszeiten der untersuchten Wicklungsisolationen variierten zwischen einigen Monaten und 25 Jahren. Da es sich bei den meisten Messungen um die erstmalige Messung, also um die Basismessung für die Überwachung der Isolation handelte, können keine sicheren Aussagen über den Alterungszustand gemacht werden.

Die Zusammenstellung der Messresultate der einzelnen Maschinen ermöglicht trotzdem gewisse Aussagen über Isolationswiderstände und Polarisationsindizes an verschiedenen Isolationssystemen. Die Isolationswiderstände der einzelnen Maschinen sind natürlich nicht unmittelbar vergleichbar, da sie von der Wicklungskapazität abhängen. Aus diesem Grunde wird anstelle des Isolationswiderstandes die Isolationszeitkonstante verwendet, die das Produkt des Isolationswiderstandes und der Phasenkapazität darstellt. In Fig. 6 sind die Isolationszeitkonstanten ($R_{isol} \cdot C_{Ph}$) in Funktion

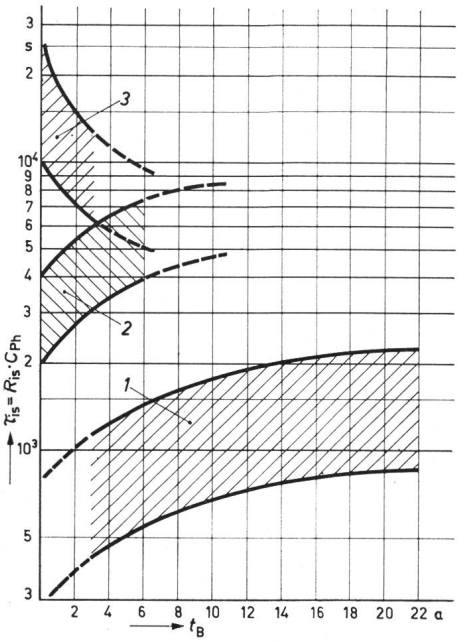

Fig. 6
Isolationszeitkonstante τ_{is} in Funktion der Betriebzeit t_B
Bezeichnungen siehe Fig. 4

der Betriebszeit für ca. 50 Maschinen dargestellt, wobei die Messungen des Isolationswiderstandes bei 2 kV Gleichspannung und bei ca. 25 °C Wicklungstemperatur, durchgeführt wurde. Zur Berechnung des Isolationswiderstandes wurde der 30-min-Wert des Stromes verwendet. Ferner wurden nur Werte bei eindeutig definiertem Zustand der Wicklung, also trocken und sauber, verwendet. Man ersieht, dass die Isolationszeitkonstanten für die klassischen und modernen Isolationssysteme verschiedene Niveaus aufweisen.

Bei der Schellackmikafolium-Isolation weist die Isolationszeitkonstante mit der Anzahl Betriebsjahre eine steigende Tendenz auf. Der steilere Anstieg kann auf ein weiteres Austrocknen und Aushärten der Schellackisolation sowie der Schenkelisolation in den ersten Betriebsjahren zurückgeführt werden. Die von den Verfassern an Schellackmikafolium-Isolationen bestimmten Zeitkonstanten zeigen, dass dieser Wert bei trockenen und relativ sauberen Isolationen bei ca. 800...2000 s liegen muss. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass Zeitkonstanten unterhalb von ca. 400 s auf feuchte oder verschmutzte Isolationen hinweisen.

Bei den moderneren Isolationssystemen kann der allgemeine Kurvenverlauf weniger eindeutig angegeben werden, da im Moment noch die erforderliche Betriebszeit fehlt. Jedoch zeigen die Messungen, dass die Zeitkonstanten dieser Systeme wesentlich grössere Anfangswerte haben als die Schellackisolation.

Bei der *diskontinuierlichen Isolation* von Glimmervliesfolium auf Papierträger mit Epoxydharz vorimprägniert zeigt sich in den ersten Betriebsjahren ebenfalls ein Anstieg der Isolationszeitkonstante, der auf eine weitere Austrocknung der Isolation im Bereich der Stoßstellen und der Schenkelpartien zurückgeführt werden kann.

Ein etwas anderes Verhalten der Zeitkonstantencharakteristik hat die *kontinuierliche Isolation* von imprägnierten Glimmervlies-Glasgewebeband-Isolation. Die sehr hohen Anfangswerte lassen sich durch die Vakuum-Imprägnierung mit lösungsmittelfreien, thermohärtenden Epoxydharzen erklären. Im Gegensatz zu den beiden anderen Systemen weist

die Isolationszeitkonstante dieser Isolation während den ersten Betriebsjahren einen leichten Abfall auf, was wahrscheinlich auf eine zunehmende Verschmutzung der Schenkelpartien der Spulen zurückgeführt werden muss. Nach einigen wenigen Betriebsjahren scheinen sich die Kurven der beiden zweiten Isolationssysteme zu überlappen.

Fig. 7 zeigt die Normalverteilungskurve der Polarisationsindizes der untersuchten Maschinen. Wie daraus hervorgeht liegt der Polarisationsindex für eine trockene und saubere Isolation innerhalb der Grenzen 3...4 mit einem Mittelwert von ca. 3,6. Insbesondere konnte zwischen den erwähnten ersten zwei Isolationssystemen kein Unterschied festgestellt werden. Dagegen wurden beim dritten Isolationssystem für saubere und trockene Wicklungen Werte grösser als 4 gemessen. Eine Abhängigkeit des Polarisationsindex von der Betriebszeit konnte nicht festgestellt werden; somit fällt diese Grösse als Alterungskriterium ausser Betracht. Dem Polarisationsindex muss trotzdem bei der Kontrolle von Verschmutzungsgrad und Feuchtigkeit der Isolation eine gewisse Bedeutung zugeschrieben werden.

Fig. 8 zeigt, dass eine relativ gute Korrelation zwischen dem Polarisationsindex und der Isolationszeitkonstante besteht. Die Grenze der Isolationszeitkonstante von 400 s zwischen feuchter und trockener Isolation entspricht einem Polarisationsindex von ca. 2,5 was mit den in der Literatur empfohlenen Richtwerten gut übereinstimmt [7]. Zur Erklärung dieser Erkenntnis wurden an einigen Maschinen die Polarisationsindizes, die Isolationszeitkonstanten und die Isolationswiderstände vor und nach einer Revision bestimmt, damit der Einfluss der Verschmutzung der Schenkelpartien auf diese Grössen ermittelt werden kann. Um den Parameter Feuchtigkeit zu eliminieren, konnte natürlich in allen Fällen erst nach einer mehrstündigen Betriebsperiode (ca. 1000 h) gemessen werden. Tabelle I zeigt für 3 Maschinen mit Schellack-Mika-Isolationen den Einfluss der Revision

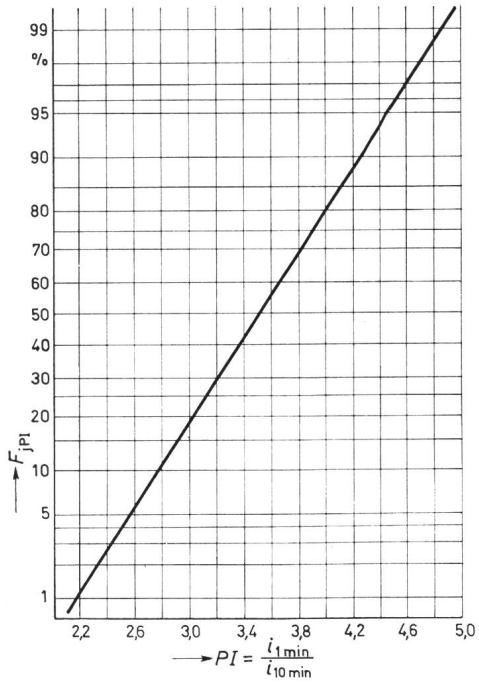

Fig. 7
Summenhäufigkeit F_{jPI} der Polarisationsindizes PI von 50 Maschinen mit diskontinuierlichen Isolationssystemen

$$PI = \frac{i_{1\,min}}{i_{10\,min}}$$

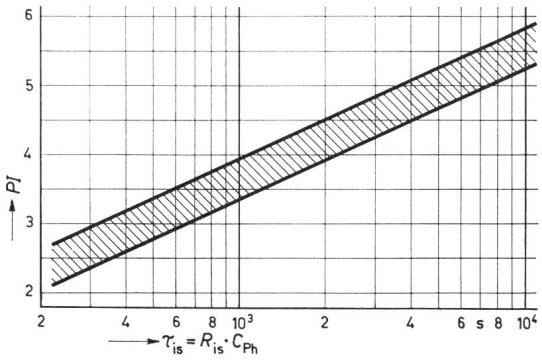

Fig. 8
Korrelation zwischen Polarisationsindex und Isolationszeitkonstante, gemessen an einer grösseren Anzahl Maschinen mit Schellackmikafolium-Isolation
$\tau_{is} = R_{is.} \cdot C_{Ph}$ Isolationszeitkonstante; PI Polarisationsindex

auf die erwähnten Eigenschaftswerte. Wie aus der Tabelle hervorgeht, haben die Revisionen an der Wicklung der 3 Maschinen wesentliche Erhöhungen der Messwerte gebracht. Ferner zeigte es sich, dass die Isolationszeitkonstante empfindlicher auf äussere Einflüsse reagiert wie Feuchtigkeit und Verschmutzung. Nach Auffassung der Verfasser eignet sich daher die Isolationszeitkonstante besser zur Beurteilung des Zustandes einer Wicklung als der Polarisationsindex.

3.3.2 Prüfung mit stufenweise erhöhter Gleichspannung

Eine an eine Wicklung gegen Erde angelegte stufenweise erhöhte Gleichspannung bewirkt nicht einen dem Ohmschen Gesetz folgenden Isolationsstrom, sondern weicht mit zunehmender Spannung immer mehr von diesem ab. Bei dieser Messung müssen die Spannungsstufen einem genauen Zeitprogramm folgen, das so gewählt werden muss, dass die Absorptionskomponente des gemessenen Totalstromes proportional zur angelegten Spannung wird. In diesem Fall ist die Absorptionsstromkomponente nur noch durch einen konstanten Faktor im Messwert vertreten. Dies muss so durchgeführt werden, da bei der Messung in erster Linie der zeitlich konstante Isolationsstrom in Funktion der angelegten Spannung interessiert. Aus dem Verlauf der erhaltenen Kurve des Isolationsstromes in Funktion der angelegten Spannung können wertvolle Rückschlüsse auf eventuell vorhandene schwache Stellen in der Isolation gezogen werden. Als Indikation von schwachen Stellen wird die plötzlich einsetzende Reduktion des Isolationswiderstandes verwendet. Die Interpretation der so erhaltenen Kurven ist jedoch nicht immer einfach. Vor allem müssen Vergleiche früherer Messungen oder Messungen an typengleichen anderen Maschinen zur Verfügung stehen; in vielen Fällen ist man sogar nur auf den Vergleich der Werte der einzelnen Phasen angewiesen.

Fig. 9 zeigt die typische Indikation einer oder mehrerer schwachen Stellen in der Isolation der Phase W-Z. Bei dieser Phase wurde der Isolationsstrom bis $2 \times U_N$ gemessen. Die erste Interpretation lautete hier, dass die Phasen U-X und V-Y in Ordnung sind, während die Phase W-Z Schwach- oder Fehlerstellen aufweist. Bei der weiteren Beurteilung der Phase W-Z stösst man aber auf eine Reihe weiterer Fragen, die nicht direkt beantwortet werden können:

a) Gibt es eine oder mehrere schwache Stellen?
b) Liegen die schwachen Stellen ausserhalb oder innerhalb der Nutenpartie?
c) Kann die Abweichung der Phase W-Z gegenüber den beiden anderen Phasen eventuell dem Isolationssystem selbst zuge-

Einfluss der Verschmutzung auf den Polarisationsindex PI, Isolationswiderstand R_{isol} und die Isolationszeitkonstante τ_{is} einiger elektrischer Maschinen

Tabelle I

Leistung der Maschine	Nennspannung	Phasenkapazität	Messung vor der Revision			Messung nach der Revision		
kVA	kV	µF	*PI*	R_{isol} MQ	τ_{is} s	*PI*	R_{isol} MQ	τ_{is} s
33 500	12	0,240	2,3...2,5	950...1200	226...286	2,7...2,8	2500...2800	612...671
60 000	15,5	0,335	2,6...2,7	785	263	2,9...3,0	2000...2200	686...720
60 000	15,5	0,335	2,6	580...670	194...223	3,0...3,2	1900...2300	640...760

schrieben werden, z. B. Indikation der Stoßstellen bei diskontinuierlichen Isolationen?

Eine ausführliche Beantwortung obiger Fragen ist praktisch nicht möglich, es sei denn, die Isolation könnte mit einer Spannungsprobe durchgeschlagen werden. In vielen Fällen genügt es aber im Moment zu wissen, dass mit dieser Maschine etwas los ist, und dass eine Revision eingeplant werden muss, anlässlich der die Maschine dann eingehend untersucht werden kann.

Die Verfasser haben jedoch durch zusätzliche Messungen an einer grösseren Anzahl Hochspannungsmaschinen im Betrieb und durch Versuche im Laboratorium die Interpretationsmöglichkeiten der Gleichspannungsprüfung zu erweitern versucht.

In der Literatur [8] wird für den Fall, dass die schwachen Stellen ausserhalb des Statoreisens liegen, folgende Formel für die relative Stromerhöhung angegeben:

$$\frac{I_A - I_B}{I_B} = \frac{m}{2\,n\,(2+K)} \left(\frac{\coth a\,b}{\tanh a\,l} - 1 \right)$$

worin

I_A erhöhter Strom im Falle des Vorhandenseins von schwachen Stellen;
I_B Normaler Strom wenn keine schwachen Stellen vorhanden wären;
l Totale einseitige Schenkellänge eines Statorstabes;
m Anzahl Spulen mit schwachen Stellen;
n Anzahl geprüfter Spulen;
b Abstand der schwachen Stellen vom Statoreisen;
α $\sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$
K $\frac{I_{Nu}}{I_S}$
R_1 Oberflächenwiderstand pro Längeneinheit der Schenkelisolation;
R_2 Volumenwiderstand pro Längeneinheit der Schenkelisolation;
I_{Nu} Isolationsstrom durch die Nutpartie;
I_S Isolations- und Oberflächenstrom in der Schenkelpartie.

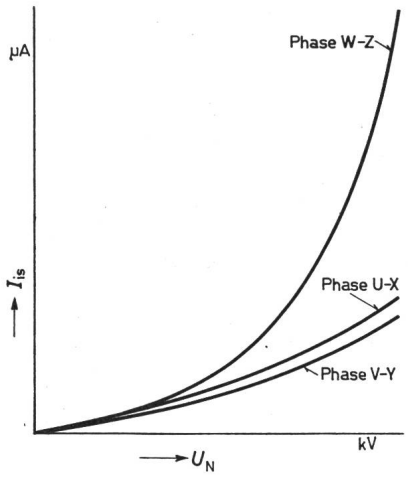

Fig. 9
Isolationsstrom I_{is} in Funktion der angelegten Gleichspannung U_N
Phase W—Z mit schwachen Stellen

Die Auflösung der Gleichung nach b ergibt den Abstand der Schwachstelle vom Statoreisen, was natürlich für die Beurteilung der Gefährlichkeit der Schwachstellen ein wichtiger Hinweis ist.

In der Praxis erschweren jedoch die beiden Grössen K und α die Anwendung der Formel. Um einigermassen vernünftige Werte zu erhalten, ist es notwendig, dass ein Stab der Wicklung ausgebaut wird, um die beiden Grössen im Laboratorium bestimmen zu können. Die Bestimmung der Konstante $\alpha = \sqrt{R_1/R_2}$ bietet messtechnisch keine Schwierigkeiten, jedoch ist der Wert von Fall zu Fall je nach Verschmutzung verschieden.

Der Faktor K ist nicht nur vom Verschmutzungsgrad der Isolation, sondern auch vom Isolationssystem selbst, insbesondere vom Verhältnis Nutenoberfläche/Schenkeloberfläche sowie von der Oberflächenbehandlung abhängig. Das Auftreten von fehlerhaften oder schwachen Stellen in einer Isolation führt zwar je nach Anzahl derselben zu einer Änderung von K, jedoch kann für die erste grobe Abschätzung ein für das jeweilige Isolationssystem mittlerer Wert angenommen werden. In Fig. 10 ist als Beispiel der Faktor K für die kontinuierliche Bandisolation und die diskontinuierliche Isolation in Funktion der angelegten Spannung aufgezeichnet. Im vorliegenden Fall waren die Isolationswandstärken gleich. Während der Faktor K für die kontinuierliche Bandisolation nur wenig mit zunehmender Spannung abnimmt, kann für die diskontinuierliche Isolation eine sehr starke Abnahme von K beobachtet werden, die in erster Linie den Stoßstellen zugeschrieben werden muss. Es ist deshalb in der Praxis zu erwarten, dass die diskontinuierlichen Isolationen die höheren Isolationsströme, die scheinbar niedrigeren Isolationswiderstände und die steileren Strom-Spannungs-Charakteristiken aufweisen.

Bei Gleichspannungsmessungen an Wicklungen mit diskontinuierlichem Isolationssystem können unter Umständen Knicke in den Strom-Spannungskennlinien vorkommen, die zwar die Stoßstellen der Isolation als Schwachstellen indikieren, jedoch nicht als Folge von Fehlstellen interpretiert werden dürfen. Fig. 11 zeigt einen Fall, bei dem der Knick in der Kurve nur durch Reinigung der Isolationsoberflächen zwischen Nutenaustritt und den Stoßstellen um ca. 4 kV, von 12 kV– auf 16 kV– verschoben werden konnte. In der Praxis lässt sich die Frage über die Ursachen eines Knickes in der Strom-Spannungs-Charakteristik nur schwer beantworten. Die Annahme, dass es sich dabei immer um schwache Stellen in der Isolation handelt, die eine Revision der Wicklung erfordern, ist somit die sicherere Interpretation.

Bei dem kontinuierlichen Isolationssystem bedeutet ein Knick in der Strom-Spannungs-Charakteristik immer eine Schwachstellen-Indikation.

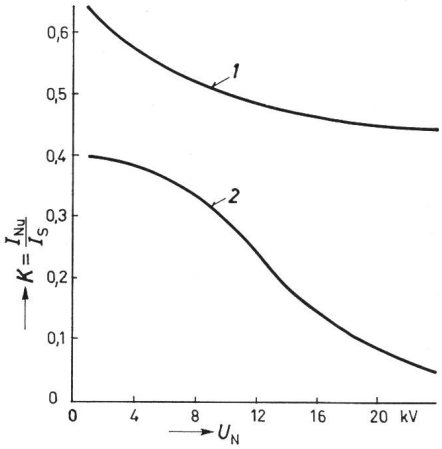

Fig. 10
Verhältnis Isolationsstrom I_{Nu} in der Nutpartie zum Isolations- und Oberflächenstrom I_S in der Schenkelpartie in Funktion der angelegten Gleichspannung U_N
1 kontinuierliche Bandisolation; *2* diskontinuierliche Isolation

Der qualitative Einfluss von Lage und Anzahl Fehlstellen auf die Strom-Spannungs-Charakteristik lässt sich nur durch umfangreiche Versuche im Laboratorium und auf Grund der gesammelten Erfahrungen aus Alterungsmessungen an Maschinen beurteilen.

Es ist heute noch nicht möglich, praktisch bindende Angaben über die Korrelation zwischen Fehl- oder schwachen Stellen und Strom-Spannungs-Charakteristiken abzugeben. Einige allgemein bekannte Tendenzen können aber jetzt schon erwähnt werden:

Die Gleichspannungsmessungen sollten bei kontinuierlichen Bandisolationen bis 2 × Betriebsspannung durchgeführt werden, bei diskontinuierlichen Isolationssystemen sollten sie jedoch auf 1,5 × Betriebsspannung beschränkt werden, damit die Stoßstellen nicht als schwache oder Fehlstellen indikiert oder sogar durchgeschlagen werden. Das Vorhandensein von schwachen oder Fehlstellen bewirkt einen Knick in der Strom-Spannungs-Charakteristik, wobei die Stromerhöhung gegenüber einer fehlerfreien Wicklung oder Phase mit der Anzahl Fehlstellen linear zunimmt.

Wenn die Fehlstellen ausserhalb der Nut liegen, so kann angenommen werden, dass der Knick in der Strom-Spannungs-Charakteristik bei umso höheren Spannungen erfolgt, je grösser der Abstand der Fehlstelle vom Nutenaustritt ist.

Das Vorhandensein mehrerer Fehlstellen in verschiedenen Abständen von Nutenaustritt kann zu einem Ausglätten des Knickes in der Strom-Spannungs-Charakteristik führen. Eine solche Phase zeigt jedoch einen wesentlich steileren Verlauf als eine gesunde Phase. Für die Beurteilung einer Kurve mit einem solchen steileren Verlauf kann die Abweichung vom Ohmschen Gesetz, charakterisiert durch $e = R_0\, di/dU$, verwendet werden, wobei R_0 den Isolationswiderstand bei niedrigen Gleichspannungen, z. B. 2 kV, darstellt. In der Literatur [2] wird eine obere zulässige Grenze der Abweichung e von 5 für eine gute Isolation angegeben. Dieser Wert ist aber stark umstritten [9].

Eine Kontrolle der Abweichung e vom Ohmschen Gesetz anhand von Messungen bei einer grösseren Anzahl Maschinen hat ergeben, dass ein Wert kleiner 5 in den meisten Fällen eingehalten werden kann. Die Abweichung e scheint vom Isolationssystem unabhängig zu sein, solange die angelegte Spannung dem jeweiligen Isolationssystem angepasst wird. Die Verfasser vertreten jedoch die Auffassung, dass eine strikte Trennung zwischen guten und weniger guten Isolationen bei einem Wert von $e = 5$ nicht immer zutreffend ist, da sehr hohe Werte von R_0, R-U-Charakteristik des Ableitlackes, Verschmutzungs- und Feuchtigkeitsgrad der Schenkelpartien der Spulen, Formgebung der Spulenausladungen samt Abstützanordnung Werte von $e > 5$ ergeben können; solche Einflüsse dürfen nicht als Fehl- oder schwache Stellen in der Isolation bezeichnet werden.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass sich die Gleichspannungsprüfung, d. h. die Aufnahme der Strom-Spannungs-Charakteristik, durch umfangreiche Versuche im Laboratorium, bei denen künstliche Fehl- oder Schwachstellen hergestellt werden, in der Interpretation wesentlich erweitern lässt. Für die Beurteilung des Alterungszustandes von Hochspannungsisolationen kann daher heute die Gleichspannungsprüfung als eine der wichtigsten Prüfmethoden bezeichnet werden.

3.3.3 Spannungsprüfung von Wicklungen mit hoher Gleichspannung

Die Spannungsprüfung von Statorwicklungen mit hoher Gleichspannung anstatt mit der üblichen 1-min-Wechselspannung bietet bekanntlich grosse Vorteile. Sie wird überall dort eingesetzt, wo eine genügende Wechselspannungsquelle nicht zur Verfügung steht, oder die Transportverhältnisse es nicht erlauben, eine Wechselspannungsanlage an den Messplatz zu bringen.

Die Gleichspannungsprüfung hat sich aber nicht überall durchsetzen können, da bis heute kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Gleich- und Wechselspannung gefunden werden konnte. In der Literatur werden Werte zwischen 0,9...2,2 angegeben, wobei aber in den meisten Fällen ein Korrelationsfaktor von 1,6 bei Gleichspannungsprüfung angewendet wird [2].

Die Spannungsverteilung längs der Ausladungen der Stäbe oder Spulen ist bekanntlich wesentlich anders als bei Wechselspannung, da bei Gleichspannung dieselbe nur durch Ohmsche Widerstände, während sie bei Wechselspannung durch die Dielektrizitätskonstanten bestimmt wird. In der Praxis bedeutet dies, dass die Isolation der Schenkelpar-

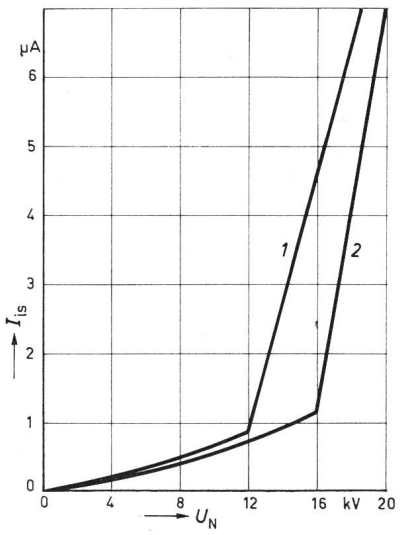

Fig. 11
Isolationsstrom I_{is} einer diskontinuierlichen Isolation in Funktion der angelegten Gleichspannung U_N
Nennspannung der Maschine 12 kV
1 vor Reinigung der Wicklung; *2* nach Reinigung der Wicklung

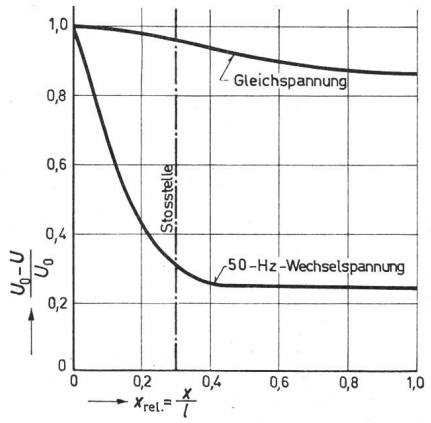

Fig. 12

Relative Spannungsverteilung einer diskontinuierlichen Isolation bei Gleich- und Wechselspannung 50 Hz in Funktion vom relativen Abstand vom Nutaustritt

U_0 angelegte Prüfspannung; U gemessene Spannung im Abstand x vom Nutaustritt;

$$x_{rel.} = \frac{\text{Abstand } x \text{ vom Nutaustritt}}{\text{Länge des Spulenschenkels}} = \frac{x}{l}$$

tien bei Gleichspannung einer bedeutend grösseren Belastung ausgesetzt sind. In Fig. 12 ist als Beispiel die Spannungsverteilung längs der Staboberfläche ausserhalb der Nuten bei Gleich- und bei Wechselspannung für eine diskontinuierliche Isolation experimentell bestimmt. Die Kurven zeigen eindeutig, dass die Stoßstellen der Isolation bei Gleichspannung mit fast voller Prüfspannung geprüft werden, während bei Wechselspannung die Stoßstellen nur mit 25...30 % der vollen Prüfspannung belastet werden.

Die Gleichspannungsprüfung bringt somit für die diskontinuierlichen Isolationssysteme ein erhöhtes Durchschlagsrisiko der Stoßstellen, und sollte nur dann angewendet werden, wenn insbesondere die Ausladungen der Stäbe oder Spulen aus irgendwelchen Gründen durch die Betriebsverhältnisse geschwächt sind und deshalb auf dielektrische Festigkeit geprüft werden müssen.

Als Ersatz für die Wechselspannungsprüfung mit 50 Hz scheint die Spannungsprüfung bei 0,1 Hz [4] und die Sinus-Halbwelle-Prüfung bei 50 Hz [5] eine Zukunft zu haben, da es sich in beiden Fällen um eine schonende Wechselspannungsprüfung handelt, die leistungsmässig der Gleichspannungsprüfung nahe steht. Jedoch erfordern auch diese Prüfmethoden umfangreiche Untersuchungen im Laboratorium, damit eine Korrelation mit der normalen 50-Hz-Wechselspannungsprüfung bestimmt werden kann.

3.4 Visuelle Kontrolle von Hochspannungsisolationen

Die visuelle Kontrolle von Hochspannungsisolationen bildet eine sehr wertvolle und notwendige Ergänzung der Alterungsuntersuchungen, und wird von vielen Herstellern elektrischer Maschinen in den Betriebsanleitungen vorgeschrieben [1]. Normalerweise wird diese Kontrolle in Zusammenhang mit der allgemeinen Revision der Maschinen durchgeführt, und umfasst u. a.:

a) Zustand der Keile und Keilsicherungen;
b) Zustand der Bandagierungen und Abstützanordnungen;
c) Zustand der Schenkelisolation;
d) Zustand der Ausladungen der Nutenisolation;
e) Zustand der Verbindungen, Ableitungen etc.;
f) Zustand der Glimmschutzlacke;
g) Verschmutzungsgrad.

Die Einstufung der Isolation nach obigen Kriterien setzt eine grosse Erfahrung voraus, und muss in den meisten Fällen Betriebsfachleuten oder Isolationsspezialisten überlassen werden.

Die visuelle Kontrolle sollte immer dann durchgeführt werden, wenn anhand der Alterungsuntersuchungen gemäss Ziff. 3.3.1...3.3.2 ein Verdacht reduzierter Betriebssicherheit vorliegt. Je nach Resultat der zerstörungsfreien Prüfverfahren kann sich die Kontrolle auf eine visuelle Untersuchung der Wicklung beschränken oder auf die Prüfung einiger ausgebauter Stäbe in der Nähe der Phasenklemmen erstrekken. Die ausgebauten Stäbe werden ihrerseits einer eingehenden dielektrischen, mechanischen und visuellen Untersuchung unterworfen, die den Alterungszustand der Wicklungsisolation festzulegen ermöglicht.

Da der Ausbau der Wicklungsstäbe viel Zeit und Kosten verursacht, sollte diese Arbeit nur dann durchgeführt werden, wenn die zerstörungsfreien Prüfverfahren gravierende Isolationsschäden vermuten lassen, die durch abnormale Betriebsbedingungen oder das hohe Betriebsalter der Maschine entstanden sind.

Literatur

[1] *P. Hauenstein:* Die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit elektrischer Maschinen. Bull. SEV 56(1965)18, S. 805...811.

[2] *J. Fabre* et al.: Recherches sur l'isolations des grandes machines synchrones. Rapport CIGRE No. 137, 1956.

[3] *A. Wickmann:* Das Alterungsverhalten von Isolierungen als Grundlage der Betriebsüberwachung von Wicklungen elektrischer Maschinen. Journées internationales AIM d'études des centrales électriques modernes 1966, Liège, 23...27 mai. Document 45, Institut électrotechnique Montefiore, Liège, 1966.

[4] *L. G. Viersberg* et *A. Kelen:* Quelques observations concernant l'essai à très basse fréquence de l'isolement des machines à haute tension. Rapport CIGRE No. 108, 1964.

[5] *H. G. Tempelaar* et *R. F. Goossens:* Essais diélectriques de l'isolement de turbo-alternateurs. Rapport CIGRE No.133, 1966.

[6] *G. Leroy:* Les problèmes d'ionisation dans les isolants solides en relation notamment avec les techniques de construction et vieillissement du nouveau matériel électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 8/3(1962)26, S. 69...87.

[7] *K. Edwin* und *W. Zwicknagel:* Grundlagen für die Überwachung der Generator-Wicklungsisolation. ÖZE 13(1960)6, S. 423...429.

[8] *L. G. Virsberg:* Puncture Risks when Testing Large Synchronous Machines with Direct Voltage. Proc. IEE 110(1963)9, S. 1637...1639.

[9] *K. Edwin* und *W. Zwicknagel:* Neue Ergebnisse bei Alterungsmessungen an Hochspannungswicklungen von Synchronmaschinen. E. u. M. 81(1964)5, S. 95...99.

Adresse der Autoren:

K. Nylund, dipl. Ingenieur ETH, und *Th. Mosimann,* Dipl. Elektrotechniker, Maschinenfabrik Oerlikon, Postfach, 8050 Zürich.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen der SC 59C und 59D des CE 59 vom 6. bis 10. März 1967 in Arnhem

SC 59C. Petits appareils de chauffage

Das SC 59C tagte am 9. und 10. März 1967 unter dem Vorsitz von R. Coutris (Frankreich), um den vom englischen Nationalkomitee unterbreiteten Entwurf über Messmethoden zur Prüfung des Gebrauchswertes von Heisswasserspeichern zu beraten. Nachdem an der letzten Sitzung des SC 59C ein Entwurf über Messmethoden zur Prüfung des Gebrauchswertes von Heizkissen und dgl. im wesentlichen abgeschlossen werden konnte, so dass der bereinigte Entwurf nun unter die 6-Monate-Regel gestellt werden kann, beschäftigten sich die ca. 30 Delegierten aus 11