

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 39 (1948)
Heft: 10

Artikel: Die Wicklungsisolation im Grossmaschinenbau
Autor: Beldi, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059274>

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: 03.04.2026

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

- [11] Kerst, D. W.: The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction. Phys. Rev. Bd. 60(1941), Nr. 1, S. 47...53.
- [12] Kerst, D. W., u. R. Serber: Electronic Orbits in the Induction Accelerator. Phys. Rev. Bd. 60(1941), Nr. 1, S. 53...58.
- [13] Wideröe, Rolf: Der Strahlentransformator. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. Bd. 13(1947), Nr. 8, S. 225...232, u. Nr. 10, S. 299...311.
- [14] Wideröe, Rolf. Schweizer Pat.-Anm. Nr. 12 017 vom 16. Mai 1946.
- [15] Pollock, H. C.: Combination of Betatron and Synchrotron for Electron Acceleration. Phys. Rev. Bd. 69(1946), Nr. 3/4, S. 125.

Adresse des Autors:
Dr. Rolf Wideröe, Giesshübelstrasse 114, Zürich 45.

Die Wicklungsisololation im Grossmaschinenbau

Vortrag, gehalten an der Isolationstagung des SEV vom 24. April 1947 in Zürich,
von F. Beldi, Baden

621.318.048

Im ersten Teil wird die Beanspruchung der Wicklungsisololation und ihre Verbesserung behandelt. Es zeigt sich, dass die wärmeelektrischen Probleme im Dauerbetrieb für bedeutend höhere Spannungen gelöst sind, als solche heute zur Anwendung gelangen. Auch die Alterungsvorgänge sind abgeklärt, wobei festgestellt wurde, dass der Glimmer auch in starken elektrischen Feldern dem mechanischen und chemischen Angriff standhält. Gegen die Folgen von atmosphärischen Überspannungen muss die Wicklung durch zweckmässige Koordination der Isolationsfestigkeit und Überspannungsableiter geschützt werden.

Im zweiten Teil wird gezeigt, dass dank der weitgehenden Entwicklung der Maschinenisololation bedeutende Einsparungen an Material erzielt werden konnten und dass die Maschinen einen hohen Grad von Betriebssicherheit erreicht haben.

Dans la première partie, l'auteur s'occupe de la sollicitation de l'isolation des enroulements et de l'amélioration de cette isolation. Les problèmes thermoélectriques qui se posent en régime permanent sont déjà résolus pour des tensions bien supérieures à celles qui sont actuellement en usage. De même, les phénomènes de vieillissement sont maintenant élucidés et l'on a constaté que le mica est capable de supporter les attaques mécaniques et chimiques, même lorsque les champs électriques sont particulièrement intenses. Les enroulements doivent toutefois être protégés par une coordination judicieuse des isolements et par des parafoudres contre les méfaits des surtensions d'origine atmosphérique.

Dans la seconde partie de son exposé, l'auteur montre que les progrès considérables réalisés dans le domaine de l'isolement des machines ont permis d'importantes économies de matériaux et que la sécurité de service des machines a atteint un niveau élevé.

Das Gebiet der Isoliertechnik im Grossmaschinenbau ist sehr weitläufig. Deshalb sollen hier nur drei Hauptpunkte behandelt werden:

Die Materialverbesserung,
deren Einfluss auf die Maschinengrösse,
Betriebsverfahren.

Neben der Orientierung über die genannten Punkte verfolgt der Vortrag noch einen weiteren Zweck. Es soll gezeigt werden, wie durch zu scharfe Abnahmebedingungen gerade das Gegenteil von dem erreicht werden kann, was eigentlich bezweckt war. Die hohen Forderungen zwingen oft zu einer forcierten Lösung, die wohl die Abnahmeprüfung ohne Schwierigkeiten durchzuführen gestattet, unter Umständen aber auf Kosten der Dauerhaftigkeit der Isolation geht.

Im Einführungsvortrag hat A. Imhof¹⁾ die drei wesentlichen Werkstoffgruppen des Elektro-Maschinen- und Apparatebaus erwähnt. Von den drei genannten Gruppen «gute Stromleiter, Eisen und Isoliermaterial» wurde das letzte, also das Dielektrikum, als das Mannigfaltigste sowohl hinsichtlich der beteiligten Stoffe als auch ihrer Eigenschaften bezeichnet. Man kann noch einen Schritt weiter gehen und sagen, dass seit der Erfindung des elektromagnetischen Prinzips der Spannungserzeugung die Isoliertechnik einen ausschlaggebenden Einfluss auf die elektrischen Konstruktionen ausgeübt hat. So stellt sich seit etwa einem halben Jahrhundert in der Starkstromtechnik nicht mehr die Frage, wie man eine hohe Spannung erzeugt, sondern das Problem liegt in der günstigsten Isolierung

der Maschinenwicklung für diese hohe Spannung. Die Art und Weise der Isolierung einer Wicklung gegen den Eisenkörper oder in sich ist meist ausschlaggebend für die Abmessungen einer Maschine und damit für deren Ausführbarkeit. Dies trifft besonders für die Isolation gegen den aktiven Eisenkörper, also die Nutisolation, zu. Sie ist auch immer wieder Gegenstand einer näheren Betrachtung in der Fachliteratur, und deshalb soll mit ihr begonnen werden.

Bei der Nutisolation treten alle Probleme einer guten Isolierung in verschärfter Masse in Erscheinung. Man verlangt vom Material hohe Durchschlagfestigkeit, grosse Temperaturbeständigkeit, besonders gute Homogenität und hohe mechanische Festigkeit. Dazu kommt noch die Forderung grosser Wärmeleitfähigkeit, denn die im Nutleiter erzeugte Stromwärme muss durch die Isolation an das Eisen abgeführt werden. Es treffen sich damit auch entgegengesetzte Eigenschaften, weil gute Isolatoren, also schlechte Elektrizitätsleiter, auch schlechte Wärmeleiter sind.

Der Hauptbestandteil der Nutisolation und zugleich der wärmebeständigste Teil ist auch heute noch der Glimmer, der in dünnen Plättchen auf Papierblätter geklebt wird. Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Qualität des Lackes von überwiegendem Einfluss auf die Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Verluste ist. Fig. 1 zeigt den grossen Unterschied zwischen der von den meisten Firmen verlassenen Schellack-Isolation und der seit zwei Jahrzehnten eingeführten Asphalt-Isolation. Durch solche frappante Ergebnisse ermutigt, sucht der Versuchsingenieur nach weiteren Mitteln. So wurden durch eine zweck-

¹⁾ siehe Imhof, A.: Elektrische Isolierstoffe, eine Übersicht. Bull. SEV Bd. 39(1948), Nr. 5, S. 129...140.

mässige Änderung im Fabrikationsverfahren noch günstigere Werte erzielt (Fig. 1, Kurve 3).

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Verlustverminderung auf den Wirkungsgrad der Maschine praktisch keinen Einfluss ausübt. So betragen die dielektrischen Verluste beispielsweise

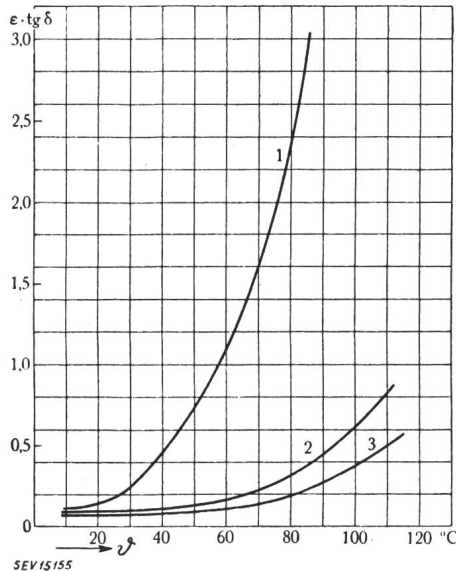


Fig. 1
Temperaturabhängigkeit der Verlustziffer verschiedener Nutsisolationen
1 Glimmer mit Schellack geklebt; 2 Glimmer mit Asphaltlack geklebt; 3 Ausführung nach verbessertem Fabrikationsverfahren

für einen Turbogenerator von 100 000 kVA Leistung im betriebswarmen Zustand nur 6 kW, das sind 0,06 ‰ der Generatorleistung. Diese Verluste und ihre Abhängigkeit von der Temperatur haben, wie gezeigt werden soll, nur Bedeutung in bezug auf das Wärmegleichgewicht in der Isolation im Dauerbetrieb, speziell bei Maschinen hoher Spannung.

Bei der heute weit getriebenen Ausnutzung der Maschinen wird bekanntlich im gesunden Betrieb eine Temperatur von über 100°C zugelassen. Die Erwärmung ist vornehmlich durch die Wicklungs- und Eisenverluste bedingt. Dazu kommt noch die durch die dielektrischen Verluste in der Wicklungs-isolation verursachte Erwärmung. Temperatur und dielektrische Verluste können sich unter Umständen in der Isolation gegenseitig steigern. Der Vorgang soll durch einen Versuch erläutert werden, bei welchem die Spannung am Dielektrikum und die Temperatur am Messbelag konstant gehalten wurden.

Vorerst steigen die Verluste — diese sind proportional der Verlustziffer $\epsilon \cdot \text{tg} \delta$ — und damit auch die Temperatur nach Fig. 2 stark an. Überschreitet die Ausgangstemperatur oder die angelegte Spannung aber einen gewissen Wert nicht, verflacht sich der Vorgang nach einer bestimmten Zeit, wie aus Fig. 2 hervorgeht. Wird der Versuch bei gleicher Spannung und Anfangstemperatur wiederholt, so kann, wie dies Fig. 2 sehr schön illustriert, durch die vorangehende starke Erwärmung eine bedeutende Verbesserung eintreten. Diese zeigt sich auch in der Temperaturabhängigkeit (Fig. 3). Durch die

während des Versuches aufgetretene starke Erwärmung ist sie kleiner geworden. Ist die Ausgangstemperatur oder die Spannung aber zu hoch, so tritt eine Schwächung oder sogar Verkohlung des Materials ein. Die Folge ist ein elektrischer Durchschlag.

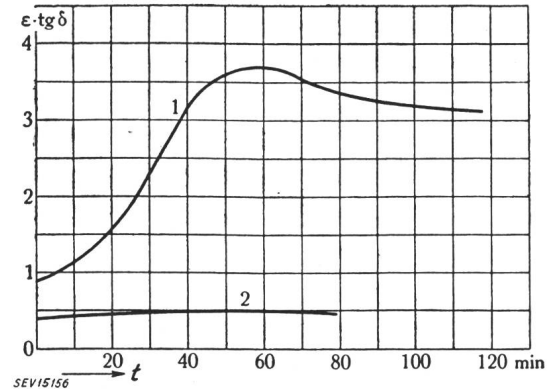


Fig. 2
Dauerversuch an einer Isolation mit grossen dielektrischen Verlusten
Verlustziffer in Funktion der Zeit
1 Erster Versuch bei konstanter Wechselspannung von 90 kV;
2 Zweiter Versuch bei derselben Spannung
Beide Versuche bei 90°C am geerdeten Messbelag

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die von einem Dielektrikum dauernd gehaltene Spannung praktisch nur von den thermischen und elektrischen Eigenschaften des Materials abhängt und fast nicht von der Dicke der Isolation. Jede Vergrößerung der Schichtdicke wird nämlich durch die Verschlechterung der Wärmeabfuhr unwirksam gemacht. Selbstverständlich muss den kurzzeitig

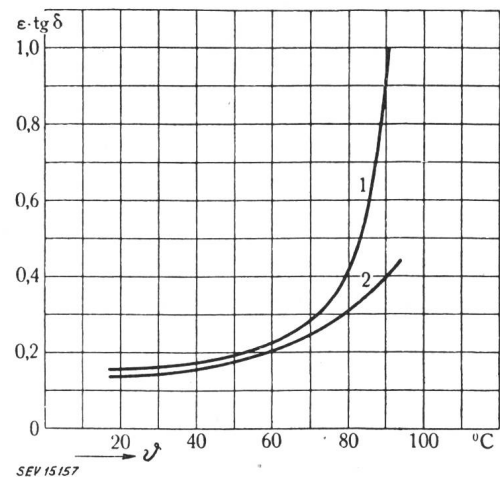


Fig. 3
Temperaturabhängigkeit der Verlustziffer einer Isolation mit grossen dielektrischen Verlusten
1 Verlustziffer, gemessen vor dem Dauerversuch (Fig. 2);
2 Verlustziffer, gemessen nach dem zweiten Dauerversuch (Fig. 2)

auf tretenden Spannungserhöhungen, welche bei Schaltvorgängen, Erdschlüssen oder bei Einwirkung atmosphärischer Entladungen auftreten, ebenfalls Rechnung getragen werden. Diese Spannungen übersteigen meist die stationäre Betriebsspannung wesentlich, so dass sie bei Isolationen mit kleinen

Verlusten für die Dimensionierung der Isolation ausschlaggebend werden.

Versuche an einem Modell eines Generators für eine Betriebsspannung von 50 000 V bestätigen die an Probestäben gemachten Feststellungen, dass die Isolation hinsichtlich Wärmegleichgewicht und auch Durchschlagfestigkeit für bedeutend höhere Spannungen entwickelt ist, als heute zur Anwendung gelangen. Zusammenfassend ist damit festzustellen, dass die Beanspruchung der glimmerhaltigen Isolation im Dauerbetrieb ein wärmeelektrisches Problem ist, das heute einwandfrei beherrscht wird.

Ein zweites Problem, das auch eine weitgehende Abklärung gefunden hat, betrifft einen vieldiskutierten Alterungsvorgang der Isolation im stationären Betrieb. Hier sind es die Kabelfabrikanten, die durch ihre anfänglich schlechten Erfahrungen mit Hochspannungskabeln auf das Problem hingewiesen haben. Nicht hohe Prüfspannungen oder grosse dielektrische Verluste — der erwähnte Wärmedurchschlag war bei den niedrigen Kabeltemperaturen auch nicht zu befürchten — waren die Schwierigkeiten, mit denen die Kabelindustrie kämpfte. Es waren vielmehr elektrische Entladungen (Glimmen) in kleinen Hohlräumen, die das Material mechanisch und chemisch angriffen. Der Vorgang wurde auch schon mit Korona-Erosion bezeichnet. Der chemische Angriff basiert auf Säure- und Ozonbildung, der mechanische erfolgt durch den Aufprall der kleinsten elektrischen Teilchen, der Ionen. Tritt Feuchtigkeit hinzu oder wird in der Isolation Wasser abgespalten, so verstärkt sich der Angriff.

Zersetzungsprodukte können also auch vom Kupferleiter ausgehen. Ungeschützte, lufthaltige und feuchte Zellulose-Isolationen verlieren damit relativ schnell ihre Festigkeit.

Diese glimmerlose Isolation lässt sich aber durch zweckmässige Wahl des Materials und der Bearbeitung weitgehend vor dem Angriff durch Glimmen schützen, was aus Fig. 5 für Drahtisolationen hervorgeht.

Material und Vorbehandlung	Zeit, nach welcher Zerstörungen durch starkes Glimmen beobachtet wurden
Baumwollisolation	■ 6 Tage
Uebliche Isolation bestehend aus Papier u. Baumwolle ohne Imprägnierung	■ 11 Tage
Wie 2., jedoch zweckmässig imprägniert	■ 7 Wochen
Spezialpapier lackiert. Leiter vorbehandelt	■ 4 Monate

SEV 15159

Fig. 5

Glimmversuch an verschiedenen Drahtisolationen

Durch das Mittel der dielektrischen Verlustmessung hat man die Möglichkeit, das Dielektrikum nach seiner Fertigstellung zerstörungsfrei auf Glimm-Entladungen hin zu untersuchen, indem der Verlauf des Verlustfaktors $\text{tg } \delta$ in Funktion der Spannung aufgenommen wird. Bei einer einzigen, relativ dicken Luftschicht im Verhältnis zum festen in Serie geschalteten Dielektrikum zeigt sich eine klare Spannungsabhängigkeit (Fig. 6, Kurve 1). In geschichteten Dielektriken ist dieser Charakter we-

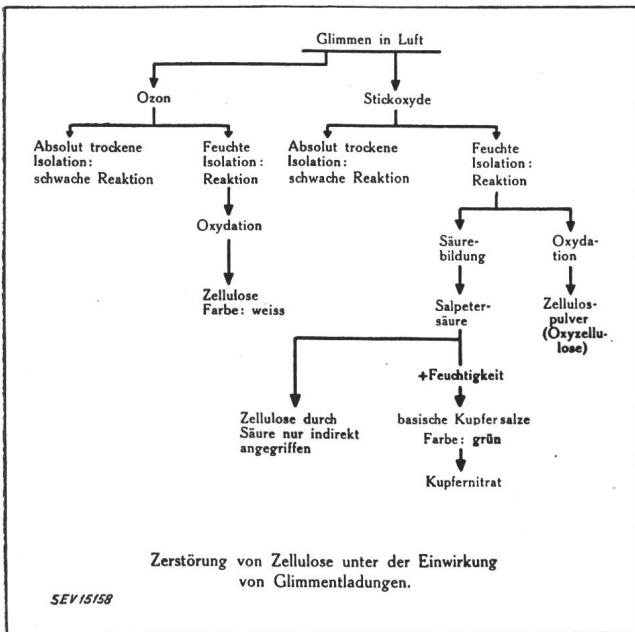


Fig. 4

Zerstörung von Zellulose unter der Einwirkung von Glimmentladungen

Unter dem Einfluss der Glimmentladungen wird, wie Fig. 4 für eine Zellulose-Isolation veranschaulicht, infolge Oxydation des Luftstickstoffes zu Stickoxyden teilweise Salpetersäure gebildet. Es entstehen dann Kupfersalze, u. a. Kupfernitrat. Die

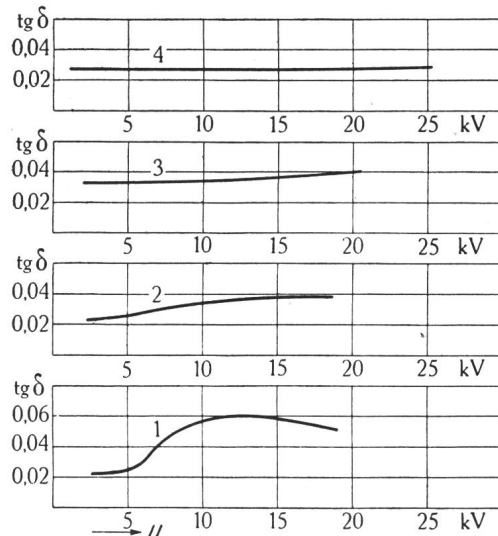


Fig. 6

Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors verschiedener Nut-Isolationen

1 Isolation mit grösserem Lufteinschluss in einer Schicht; 2 geschichtetes Dielektrikum mit Lufteinschlüssen; 3 Nutisolation normaler Ausführung; 4 Nutisolation Spezial-Ausführung, Isolationsdicke 2,6 mm

niger eindeutig ausgeprägt (2). Durch Anwendung hoher Drücke während der Fabrikation der geschichteten Nutisolation (3) lassen sich Luftschichten soweit auspressen, dass sie bei betriebsmässiger Beanspruchung nicht mehr schaden. Wird noch eine spezielle Auswahl der drei Grundstoffe Glimmer, Papier und Lack getroffen, so wird eine Umprägung (4) erreicht, die nach ihrer Fertigstellung praktisch keine Spannungsabhängigkeit mehr aufweist.

Damit wäre die öfters vom Auftraggeber gestellte Forderung, dass «die Isolation vollständig dicht sein müsse und keine Luftzwischenräume enthalten soll», erfüllt. Und doch darf sie kaum in ihrer strengsten Form aufrechterhalten werden. Schon bei Betrachtung der Wärmevorgänge in der Maschine wird ersichtlich, dass die Eigenschaften der Materialien der erwähnten Forderung entgegenstehen. Bei grossen Maschinen z. B. wird die Umprägung direkt auf den Nutenleiter aufgewickelt. Der Kupferleiter hat bekanntlich nicht den gleichen Ausdehnungskoeffizienten wie seine ihn umhüllende Isolation. Es zeigt sich nun, dass die Isolation durch die fortschreitende Erwärmung und Abkühlung immer mehr gegen den aktiven Leiter in ihrer Längenausdehnung zurückbleibt (Fig. 7). Die Isolation muss sich deshalb vom Leiter ablösen, womit Hohlräume unvermeidlich werden. Durch eine passende Konstruktion lassen sich diese jedoch praktisch unschädlich machen.

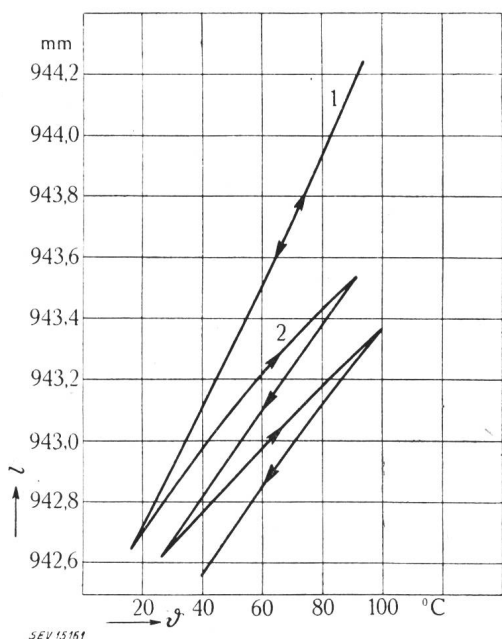


Fig. 7

Längen des Kupferleiters und der Isolationsschicht (6 mm) in Funktion der Temperatur

1 Ausdehnung des Cu-Leiters; 2 Ausdehnung der Micafoliumisolation (in 0,5 mm Tiefe gemessen)

Temperatur der Isolation praktisch gleich Cu-Temperatur. Die Ausdehnungen beziehen sich auf eine ursprüngliche Messlänge von 942,64 mm

Die lange Dauer des Krieges führte zu einer Verknappung speziell der glimmerhaltigen Isoliermaterialien. Auf dem Kontinent war man deshalb gezwungen, den Glimmer teilweise oder ganz durch

lackiertes Papier oder einen Kunststoff zu ersetzen. Über die erwähnten Glimmentladungen in dünnen Luftschichten hat man dadurch ungewollt wertvolle Erfahrungen sammeln können. Celluloseacetate, die besonders im Ausland als Ersatz für Glimmer Verwendung fanden, weisen praktisch dieselben kleinen dielektrischen Verluste auf wie der Glimmer. Wie Untersuchungen gezeigt haben, scheiden sie aber in der Wärme Essigsäure aus, ein nachteiliger Umstand, der allen Cellulose-Estern eigen ist. Tritt

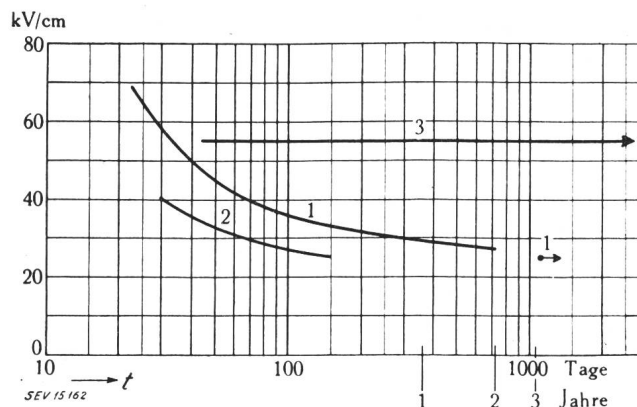


Fig. 8

Glimmfestigkeit bis zur Zerstörung verschiedener Isolationen
Durchschlagfestigkeit in Funktion der Beanspruchungsdauer
1 Spezialpapier mit asphaltähnlichem Lack verarbeitet;
2 Triacetat-Isolation; 3 Nutisolation mit Glimmer

Glimmen hinzu, so hat das Material, wie Fig. 8, Kurve 2 zeigt, nur kleine Widerstandskraft gegen den Angriff. Ähnliche Feststellungen mit einem Acetatcellulose-Produkt, dem Triafol, wurden auch im Ausland gemacht; deshalb ist bei Maschinen mit Triafoliumprägung durch eine Druckgasfüllung diesem Alterungsvorgang zu begegnen versucht worden.

Bessere Resultate, Kurve 1 in Fig. 8, wurden mit einer Umprägung erzielt, deren Papier speziell ausgesucht und mit Asphaltlack imprägniert war. Es besitzt etwas grössere Verluste als die Triafoliumprägung, dagegen hat es aber eine bedeutend bessere Glimmfestigkeit. An einer Glimmerumprägung konnte, wie Fig. 8, Kurve 3 zeigt, selbst in der Versuchszeit von über drei Jahren bei hoher Beanspruchung kein Durchschlag erzwungen werden.

Es kann auch öfters festgestellt werden, dass Lufteinschlüsse in glimmerhaltigen Dielektriken meist in ihrer Auswirkung überschätzt werden. Unsere eingehenden Untersuchungen haben gezeigt, dass auch in stärksten elektrischen Feldern — welche in der Praxis nie dauernd zur Wirkung kommen — der Glimmer sowohl dem chemischen Einfluss, als auch dem Ionenaufprall standhält. Ähnliche Feststellungen wurden an alten Maschinen gemacht. Isolationen, die auf Grund ihrer Spannungsabhängigkeit extreme Lufteinschlüsse aufweisen (Fig. 9), haben im praktischen Betrieb jahrzehntelang der Glimmbeanspruchung ohne Durchschlag standgehalten.

Alle diese Feststellungen führen zur Schlussfolgerung, dass Lufteinschlüsse in glimmerhaltigen Isolationen nicht gefährlich sind, wohl aber in sol-

chen ohne Glimmer, wo sie bei Überbeanspruchung im Dauerbetrieb zu Störungen Anlass geben können.

Was für Folgen übertriebene Forderungen bezüglich Glimmfreiheit der Wicklungen haben können, soll noch an einem typischen Beispiel geschildert werden. Für eine Hochspannungsmaschine

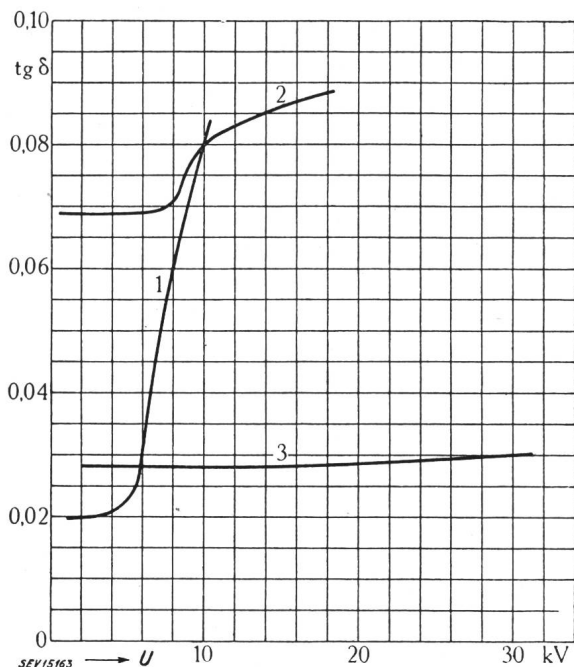


Fig. 9
Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors einiger Nutilolationen

- 1 Isolation einer 8,5-kV-Maschine nach 26 Jahren Betriebszeit;
- 2 Isolation einer 15-kV-Maschine nach 24 Jahren Betriebszeit;
- 3 Isolation neuer Ausführung

wurden für die Spannungsprüfung extreme Bedingungen gestellt. Die Maschine musste bei der doppelten Betriebsspannung absolut glimmfrei sein und durfte bei der 2^{1/2}fachen Spannung keine Gleitentladungen zeigen. — Die Regeln für elektrische Maschinen (REM) des VDE schreiben z. B. vor, dass Gleitfunkenfreiheit nur bis zur 1,25fachen Spannung zu garantieren sei. — Selbstverständlich gibt es praktisch immer einen Weg, solch hohen Forderungen gerecht zu werden. Man kann meist auch alles erfüllen, was der Kunde wünscht, besonders dann, wenn die Kostenfrage nicht in den Vordergrund gerückt wird. Im vorliegenden Fall konnte — nach Erprobung verschiedener Vorschläge — durch spezielle Massnahmen, z. B. kapazitive Spannungssteuerung, die eingegangene Verpflichtung erfüllt werden. Die Maschine war den kurzzeitigen Spannungsproben gewachsen und erfüllte die Bedingungen auf Glimm- und Gleitfunkenfreiheit. Nach kaum 4jährigem Betrieb trat aber ein Durchschlag an der erwähnten kapazitiven Steuerung auf. Die Wicklung wurde kaum in Mitleidenschaft gezogen. Daraufhin ist die Steuerung auf unser Ansuchen hin entfernt worden. Ohne jegliche Änderung an der aktiven Wicklung kam die Maschine wieder in Betrieb. Heute — es sind über zwölf Jahre her — steht die Maschine anstandslos

in robustem Betrieb, ohne dass eine weitere Störung aufgetreten wäre.

Es seien noch einige Worte der Wicklungs-Abstützung ausserhalb des Eisens gewidmet. Bei Turbomaschinen (Fig. 10) muss die Wicklung am Nutaustritt durch kräftige Keile aus Isoliermaterial gegen jede Verbiegung geschützt werden. Ebenso

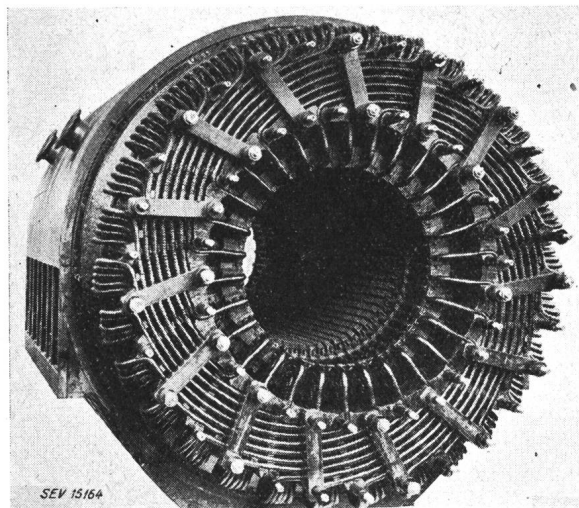


Fig. 10
Turbogenerator
von 31 250 kVA Leistung und 36 000 V Betriebsspannung,
3000 U./min

sind die Spulenköpfe durch Pressbolzen gegen jede Bewegung festzuhalten. Auch bei langsamlaufenden Maschinen (Fig. 11) müssen die Spulenköpfe durch kräftige Bolzen und Platten gegen Deformationen, hauptsächlich beim Auftreten dynamischer Kräfte,

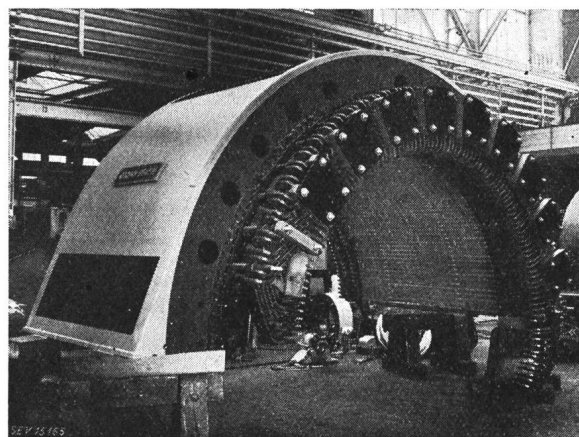


Fig. 11
Statorhälfte eines Generators für Wasserturbinenantrieb
von 32 500 kVA Leistung und 12 000 V Betriebsspannung,
550 U./min

geschützt werden. Neben der starken mechanischen Festigkeit dieser Abstützungen wird gute Isolierung der Spulenköpfe gegen das Eisen und von Wicklungsteil gegen Wicklungsteil gefordert. Es gehört zu den Aufgaben des Konstrukteurs, das zweckmässigste Material auszuwählen.

In Fig. 12 sind für allgemein bekannte Isoliermaterialien einige wichtige Werte eingetragen. Das

Luvikan z. B. hat die kleinsten dielektrischen Verluste, aber auch die geringste Wärmebeständigkeit. Asbestit dagegen, mit seiner grossen Wärmebeständigkeit, zeigt kleine Durchschlagfestigkeit. Infolge dieser oft stark divergierenden Eigenschaften ist die Aufgabe der Materialauswahl nicht immer leicht zu lösen. Es gibt wohl viele hochwertige Isolierstoffe; stellt aber die Praxis irgendeine spezielle

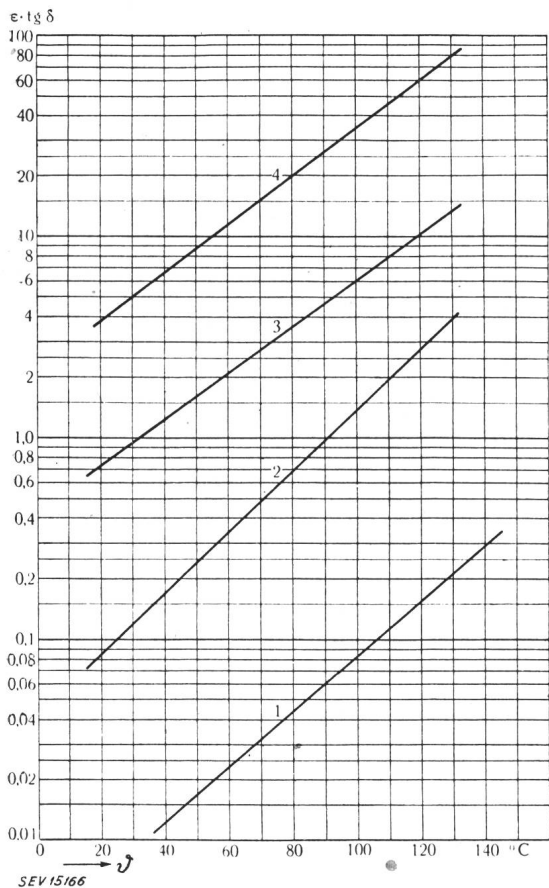


Fig. 12 Temperaturabhängigkeit der Verlustziffer, Durchschlagfestigkeit und Wärmebeständigkeit einiger Isoliermaterialien

	1 Luvikan	2 Hartpapier	3 Hartholz imprägniert	4 Asbestit
Wärmebeständigkeit °C . . .	< 150	ca. 150	> 150	> 150
Durchschlagfestigkeit kV/cm Eff. Wert	130	90	50	13

Zusatzbedingung, d. h. hohe mechanische Festigkeit bei hoher Temperatur, so vermindert sich die Zahl der geeigneten Stoffe ganz bedeutend. Leider gibt es keinen allgemein anwendbaren Isolierstoff in der Elektrotechnik.

Bisher wurde gezeigt, wie vielseitig die Anforderungen an das Isoliermaterial in elektrischen Maschinen sind. Auch konnte festgestellt werden, dass die wärmeelektrischen Erscheinungen und die Einflüsse etwelcher Glimmentladungen sich nur im Dauerbetrieb auswirken können. Der Vollständigkeit halber sollen noch einige Zeilen den Beanspruchungen der Isolation im nicht stationären Zustand des Netzes gewidmet werden.

In der Entwicklungszeit der Starkstromtechnik hat man bei der Konstruktion der Maschinen nur die Durchschlagfestigkeit der Materialien berücksichtigt und dabei die Isolationsdicke entsprechend der gewählten Prüfspannung bestimmt. Erst verhältnismässig spät wurde man auf die nicht stationären Vorgänge und ihre Rückwirkung auf die Maschinenwicklungen aufmerksam. Neben den absichtlichen Schaltvorgängen, den betriebsmässig gewollten Schalthandlungen, stiess man auf die Probleme der ungewollten Vorgänge, zu welchen die Erdschlüsse, Kurzschlüsse und die Einwirkung atmosphärischer Entladungen gezählt werden.

Bei den gewollten Schaltungen und bei den meisten Erdschlüssen erreichen die Überspannungen ungefähr den doppelten Wert der Betriebsspannung. Durch die bekannte, auf empirischer Grundlage aufgebaute Isolationsprobe an der fertigen Wicklung mit rund 2facher Nennspannung bei Betriebsfrequenz wird dieser Beanspruchung Genüge geleistet. Höhere Beanspruchungen der Isolation treten bei atmosphärischen Störungen auf, wenn Blitze in der Nähe von Freileitungen niedergehen oder diese selbst treffen. Die ausgelösten Wanderwellen, meist mit steiler Stirn, sind kurzzeitiger Natur (Beanspruchungsdauer einige Millionstelssekunden). Gefährlich können die Wanderwellen den Maschinenwicklungen dann werden, wenn die Maschinen direkt auf Freileitungen arbeiten, weil die Wanderwellen in diesem Fall fast unverändert in die Wicklungen gelangen können.

Da die Wicklungen mit Induktivitäten und Kapazitäten behaftet sind, regen die einlaufenden Spannungswellen Schwingungen an. Diese beanspruchen nicht nur den Wicklungseingang, sondern auch Spulengruppen, gegeneinander und gegen Eisen, sowie die Windungsisolation, und zwar mit Spannungen, die ein Mehrfaches der betriebsmässig auftretenden Spannung betragen können.

Das Entstehen solcher Überspannungen kann nicht vermieden werden. Andererseits ist es unwirtschaftlich, ja unmöglich, die Wicklungsisolation für diese hohen, abnormen Spannungsbeanspruchungen auszulegen. Hier muss ein passender Schutz vorgesehen werden. Es sind die allgemeinen Grundsätze der Koordination der Isolationsfestigkeit anzuwenden, indem die Maschinenisolation passend abgestuft wird. Dann ist durch Einbau von Ableitern an geeigneter Stelle die Spannung zu begrenzen und die Wanderwelle gegen Erde abzuleiten.

Wie wirkt sich nun die Materialverbesserung auf die Abmessungen der Maschinen aus?

Die verwendeten Isolierstoffmengen sind bedeutend grösser als meist geschätzt wird. Bei einem 7000-V-Generator z. B. beträgt der Isolationsanteil in der Nute über 50 % des Nutvolumens. Das Interesse an dessen Verminderung liegt nicht allein in der Einsparung dieses kostspieligen Materials, sondern mehr noch in der damit verbundenen Leistungssteigerung begründet. Eine Verminderung der Isolationsdicke bei der erwähnten 7000-V-Maschine um 1 mm kann eine Leistungssteigerung des Typs bis zu 20 % zur Folge haben. Moderne Ma-

schinen für 15 000 V Betriebsspannung haben nur eine Isolationsdicke von 4 mm, gegenüber 7,5 mm bei den ersten 13 000-V-Maschinen; dies bedeutet gewiss einen ganz wesentlichen Fortschritt auf dem Gebiete der Maschinenisolierung. Durch folgenden Vergleich lässt sich der Fortschritt ebenfalls sehr schön erkennen.

1927 kam ein Turbo-Generator für eine Leistung von 40 000 kVA zur Ablieferung. Sein Gewicht war 106 t. 17 Jahre später wurde vom Kunden eine zweite Maschine für 50 000 kVA bestellt. Diese Maschine hatte nicht mehr 106 t, sondern nur noch 72 t Gewicht. Bei einer Leistungssteigerung um 25 % konnte also das Gewicht um 32 % vermindert werden. Fig. 13 zeigt den neuen Turbo-Generator auf dem Versuchsstand. Solche Maschinen kommen, wie nebenbei erwähnt werden soll, nun auch in der Schweiz zur Aufstellung. Sie sollen hauptsächlich in der wasserarmen Zeit, als sogenanntes Winter-Kraftwerk, eingesetzt werden (Gasturbinen-Kraftwerk Beznau der NOK).

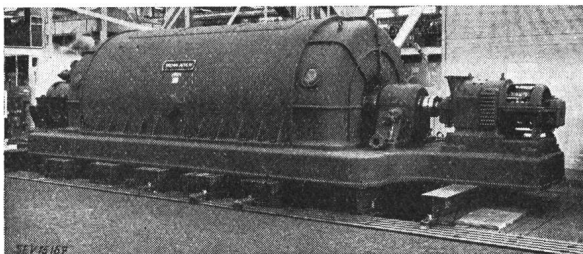


Fig. 13
Turbogenerator
von 50 000 kVA Leistung und 10 000 V Betriebsspannung,
30000 U./min

Neben der erwähnten Leistungssteigerung und Gewichtsverminderung haben, was speziell der Betriebsmann zu schätzen weiss, die Maschinen einen hohen Grad von Betriebssicherheit erreicht. Dazu je ein Beispiel für einen Turbo-Generator und für eine langsam laufende Maschine:

Eine 40 000-kVA-Turbo-Gruppe für 10 000 V Betriebsspannung hat im Zeitraum von 15 Jahren 2,52 Milliarden kWh bei einem Leistungsfaktor von 0,65 geliefert. Die Gruppe lief während 110 000

Stunden, was einem Benützungsfaktor von 84 % entspricht. Die mittlere Leistungsabgabe betrug 35 000 kVA, entsprechend 88 % der Vollleistung. Während der ganzen 15 Jahre wurde die Maschine nie geöffnet. Bei der Revision hielt die Wicklung noch der normalen Prüfspannung von 23 kV stand. Irgendwelche Bedingungen ausserhalb den Vorschriften des SEV waren seinerzeit bei der Bestellung nicht gemacht worden.

Das zweite Beispiel: Ein schweizerisches Kraftwerk reichte bei einer gründlichen Maschinenrevision mehr als 20 Spulen eines 8000-V-Generators zur Überprüfung des Isolationszustandes ein. Laut Statistik des Werkes waren die Spulen während 28 Jahren bei einem Benützungsfaktor von 87 % anstandslos im Betrieb gewesen. Die Spulen entsprachen z. B., wie durch eine Verlustmessung eindeutig festgestellt werden konnte, keinesfalls den erwähnten, hier und da gestellten scharfen Bedingungen. Sie haben ihnen natürlich auch im neuen Zustand, also vor 28 Jahren, nicht entsprochen. Und trotzdem sind diese Spulen ohne neue Isolierung wieder eingebaut worden, ein beredtes Zeugnis für ihre gute Qualität und die dargelegte Auffassung.

Ich habe Ihnen durch diese Beispiele von der Güte und dem hohen Grad von Betriebssicherheit gesprochen. Sie werden sich unwillkürlich fragen, wie es sich mit Störungen an solch grossen Maschinen verhält. Darüber möchte ich Ihnen am Schluss meines Vortrages eine Angabe machen.

Die Statistik, aus welcher die Störungsfälle ausgezogen wurden, umfasst über 5000 Turboläufer und langsam laufende Generatoren, die in den Fabriken in Baden hergestellt worden sind.

Die totale installierte Leistung dieser Generatoren beträgt mehr als 15 000 000 kVA. Das ist das rund 6fache der in der Schweiz installierten Maschinenleistung. Von diesen gelieferten Generatoren haben weniger als 5,5 ‰ zu Störungen Anlass gegeben, die zu einer längeren Ausserbetriebsetzung der Maschinen führten.

Adresse des Autors:

F. Beldi, Ingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie.,
Baden (AG).

CIGRE

Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension

11. Session, Paris 1946

[Schluss von Bd. 39(1948), Nr. 9, S. 313]

061.3 : 621.3

Gruppe 35:

Überspannungen, Blitzschläge und Blitzableiter

A. Registrierung elektrischer ultraschneller Vorgänge mit einem Kathodenstrahloszillographen in geschlossenem Glaskolben. Referat von W. Nethercot u. E. L. White. Das Referat, Nr. 126 (Grossbritannien), umfasst 13 Seiten Text mit 7 Figuren im Text.

Die elektrischen Vorgänge von weniger als 200 μ s Dauer sind bis jetzt mit Kathodenstrahloszillographen mit eingebauter Photographiervorrichtung untersucht worden, wobei das Vakuum ständig durch Pumpen aufrechterhalten wurde. Mit Rücksicht auf den Platzbedarf dieser Geräte und die

Nachteile der Verwendung von Vakuumpumpen wurde versucht, Oszillographen mit zugeschmolzenem Glaskolben zu bauen. Diese Oszillographen arbeiten mit Beschleunigungsspannungen von 5...10 kV, was Registriergeschwindigkeiten von rund 10 000 km/s entspricht. Diese Röhren eignen sich also zur Registrierung der meisten ultraschnellen Vorgänge, denen man in der Technik der hohen Spannungen begegnet.

Im Referat werden die Eigenschaften der Registrierkammerobjektive der Oszillographen mit luftdicht zugeschmolzenem Glaskolben angegeben, die für Aufnahmen mit sehr hohen Geschwindigkeiten vorgesehen sind. Anschliessend werden die Ergebnisse behandelt, die mit einem solchen Gerät bei den von der *Electrical Research Association* ausge-