Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 23 (1932)

Heft: 5

Artikel: Neuerungen und Fortschritte auf dem Gebiet der elektrischen Isoliermaterialien : Bericht über die 7. akademische Diskussionsversammlung in der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich

Autor: Dünner, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057445

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: 22.08.2025

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

2. Entreprises produisant de l'énergie pour leurs propres besoins.

Les entreprises produisant de l'énergie pour leurs propres besoins utilisèrent en 1930/31 $1600 \cdot 10^6$ kWh environ, dont 86 % provenaient de leurs propres installations et 14 % des entreprises d'utilité publique.

64 % des livraisons ont été effectuées à l'industrie, 28 % aux chemins de fer, 7 % aux entreprises électriques. Le reste, soit 1 %, représente les livraisons effectuées directement aux ménages.

3. Production et consommation totales d'énergie électrique en Suisse.

La production hydraulique d'énergie électrique s'élève dans son ensemble à $5026 \cdot 10^6$ kWh environ pour l'année 1930/31. La production thermique, avec ses $23 \cdot 10^6$ kWh, est insignifiante en comparaison.

Les $5057 \cdot 10^6$ kWh représentant la production totale ont été utilisés comme suit:

par les ménages, l'agriculture et les artisans	22 %
par l'industrie:	
applications chimiques, métallurgiques et thermiques	20 %
autres applications	14 %
par les chemins de fer	11,5 %
par l'exportation	20 %
par pertes d'énergie et installations de pompage	12,5 %

De l'énergie destinée à la traction électrique 70 % ont été utilisés par les CFF.

—

L'année hydrologique 1930/31 a été abondante en eau, aussi bien en hiver qu'en été. En outre les quatre groupes de l'usine électrique de Ryburg-Schwörstadt ont été mis en activité, le premier en octobre 1930, le dernier en juillet 1931. Ces deux circonstances ont eu pour conséquence que la quantité d'énergie hydraulique disponible dans les usines d'utilité publique s'est accrue de 17 %. Cette augmentation est due pour les $2/3$ à des conditions atmosphériques plus favorables et pour $1/3$ à la mise en activité de l'usine de Ryburg-Schwörstadt. En septembre 1931 l'usine de Sernf-Niederenbach est entrée en exploitation.

—

L'Office fédéral de l'économie électrique saisit cette occasion pour remercier sincèrement l'Union de Centrales Suisses d'électricité de sa précieuse collaboration et toutes les entreprises qui ont établi avec un soin particulier les rapports présentés.

Neuerungen und Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Isoliermaterialien.

Bericht [1]) über den 7. akademischen Diskussionsvortrag in der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich

Mittwoch, den 4. November 1931.

Von Prof. *E. Dünner*, Zürich.

621.315.61

Im folgenden Artikel sind die Referate in gekürzter Form wiedergegeben, welche an der 7. akademischen Diskussionsversammlung gehalten wurden, zuerst das einleitende Referat des Berichterstatters und dann sieben Referate von Vertretern von Fabrikationsfirmen. Diese sieben Referate haben fast ausschliesslich Produkte der betreffenden Firmen zum Gegenstand. Behandelt werden hauptsächlich: Spulenisolation für Maschinen, Drahtisolation für Wicklungen (Email und Asbest), Einlagen in Oelisolationen, Baustoffe für Durchführungen und Kabelisolierung.

L'article qui suit donne un résumé des rapports présentés à la 7e assemblée académique de discussion, d'abord celui de l'auteur, puis 7 rapports de représentants des fabriques, traitant presque uniquement les produits spéciaux de ces dernières. Il est question principalement de ce qui suit: Isolation de bobines pour machines, isolation de fils d'enroulements (émail et amiante), séparations pour isolations dans l'huile, matériaux pour traversées et isolement de câbles.

I. Einleitendes Referat von Prof. E. Dünner.

Der Begriff «Isolation» dürfte wohl gleichen Alters sein wie der Begriff «elektrische Erscheinung»; denn der Wunsch elektrische Ladung zu behalten oder auf vorgeschriebener Bahn zu leiten, führt zwangsweise zur Isolation des Ladungsträgers oder der Leitung. Während Nieder- und Mittelspannung das Isolationsproblem mit den früher unvollkommenen Isolationen beherrschen liessen, haben die im letzten Jahrzehnt rasch ansteigenden Betriebsspannungen entsprechend steigende Ansprüche an die Isoliermaterialien gestellt, und die Technik auch auf diesem Gebiete zu ausgedehnter Forschung gezwungen. Hohe Spannung ist nur möglich bei hochwertiger Isolation, und die Schwierigkeiten der Hochspannungstechnik liegen nicht so sehr in der Erzeugung hoher und höchster Spannungen, als in der Isolierung der unter dieser Spannung stehenden Ladungsträger. Die elektrische Abteilung an der E. T. H. glaubte sich daher berechtigt, dieses Gebiet als Thema eines Diskussionsvortrages zu wählen; wobei in erster Linie die Iso-

[1]) Die Referate, einschliesslich das einleitende, sind in gekürzter Fassung wiedergegeben; auch die Zahl der Figuren wurde gegenüber der Zahl der gezeigten Lichtbilder stark beschränkt.

liermaterialien der Starkstromtechnik berücksichtigt werden sollen.

Entsprechend den drei Aggregatzuständen können gasförmige, flüssige und feste Isoliermaterialien unterschieden werden, von denen je ein bis zwei Vertreter kurz besprochen seien.

Von den *gasförmigen Isoliermedien* ist in erster Linie die Luft zu erwähnen, welche als mittelguter Isolator da Verwendung findet, wo keine grossen Beanspruchungen vorliegen. Die mässige Isolierfähigkeit führt zu grossen Distanzen und damit zu teuern Konstruktionen, so dass im Innern von Maschinen und Apparaten meistens von ihr abgesehen wird, um so mehr, als sie als Träger von Feuchtigkeit umgekehrt sogar gefürchtet ist. Infolge ihrer kleinen Dielektrizitätskonstanten zieht sie bei geschichteten Anordnungen die hohen Feldstärken auf sich und leitet dann den unvollkommenen Durchbruch ein, der durch Bildung salpetriger Säure zur Materialzerstörung führt. Die Hauptaufgabe bei der Herstellung guter Isolation besteht daher in der Vermeidung jeder Spur eingeschlossener Luft.

Wesentlich wichtiger für die Hochspannungstechnik sind die *flüssigen Isoliermaterialien*, als deren Hauptvertreter das Transformatorenöl angeführt sei. Dank seiner gegenüber Luft drei- bis viermal grösseren Durchschlagsfestigkeit sind bedeutend kleinere Distanzen möglich; zugleich ist seine Wärmeableitungsfähigkeit höher. Ueber Transformatorenöl sind vielseitige Untersuchungen durchgeführt worden, und es darf in diesem Zusammenhang auf das 1931 erschienene Buch von Dr. Stäger, Baden, «Elektrische Isoliermaterialien» hingewiesen werden, in welchem über die Forschungsergebnisse der Untersuchungen an Oel und an anderen für die Isoliertechnik in Frage kommenden Medien weitgehende Auskunft gegeben ist. Die riesige elektrische Festigkeit des Oels in dünnen Schichten, in denen die Stossionisation erschwert ist, führt dazu, dass oft mit Vorteil der feste Stoff zur Hauptsache nur als Träger des Oels in möglichst dünner Schicht benützt wird. Es ist z. B. bekannt, dass oelgetränktes Papier in Schichten unter 0,01 mm Feldstärken über eine halbe Million kV/cm aushält. Bei Durchschlagsmessungen an Kondensatorelementen mit drei Papieren von je 0,008 mm Dicke wurde für eine Minutenbeanspruchung bei 60° C 1900 V, bei Dauerbeanspruchung 1100 V gemessen, was Feldstärken von 800, resp. 460 kV/cm entspricht. Die Kombination von dünnem, saugfähigem Papier mit Oel muss daher als äusserst glücklich bezeichnet werden.

Ein weiterer Vertreter flüssiger Isolation, der gleichzeitig noch die Funktion als Klebmittel zu übernehmen hat, ist der Schellack, der als übliches Bindemittel von Glimmerisolation weitgehendste Verwendung findet (Mikanit und dergleichen). An diese seit drei Jahrzehnten fast ausschliesslich verwendete Wicklungsisolation für höhere Spannungen werden nun in den letzten Jahren immer grössere Anforderungen gestellt, welche den Schellack als bestes Bindemittel in Frage stellen. Allerorts sind Bestrebungen im Gange, ihn für die Mikanitfabrikation durch ein anderes Klebmittel, z. B. asphalthaltigen Lack, zu ersetzen. Zu der früheren Forderung grosser elektrischer Festigkeit kommt heute verschärfend die Forderung eines möglichst kleinen Verlustwinkels, eingeführt durch tg δ, der durch das Verhältnis Wirk- zu Blindstrom definiert ist. Die Erfahrung lehrt, dass der Verlustwinkel mit der angelegten Feldstärke im Zusammenhang steht und dass grosse Verluste infolge ihrer Erwärmung Schwächung des Materials und damit Einleitung des Durchbruches zur Folge haben. Es darf die Behauptung aufgestellt werden, dass der Verlauf des tg δ z. B. in Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Güte und namentlich über die Beanspruchung des Materials bedeutend besseren Aufschluss gibt, als die nur einen Grenzwert darstellende Durchbruchfeldstärke.

Aus der Ueberlegung heraus, dass gesundes Material mit steigender Feldstärke nur mässige und proportionale Aenderung des tg δ zeigt, stärkeres Anwachsen auf Schwächung der elektrischen Festigkeit deutet, ist der sogenannte Ionisationsknick zu einem Kriterium der Materialgüte geworden (Fig. 1). Die physikalische Erklärung desselben dürfte im Eintritt des Glimmens der eingeschlossenen Gasblasen zu suchen sein; bekannt ist die Forderung, dass er bei Wicklungsisolationen z. B. mindestens oberhalb der Phasenspannung liege.

Weitere flüssige Medien, welche sowohl als Isolatoren, als auch als Klebmittel wirken müssen, sind die bekannten Formaldehydharze, deren Kombination mit Papier als Hartpapier oder Bakelit in den Handel kommt. Sie haben den Nachteil, dass sie während der Fabrikation einen chemischen Prozess durchmachen, bei dem sich wasser- oder gashaltige Teile abspalten können, die das Produkt schädigen.

Ein grosser Teil der *festen Isolierstoffe* hängt mit den flüssigen zusammen, wie der erwähnte Mikanit und die Hartpapiere, die als geschichtetes Material ein ungemein wertvolles Isoliermaterial darstellen. Ihre Nachteile, schichtweise Herstellung und Gütereduktion bei Aufnahme von Feuchtigkeit (Fig. 2), fehlen bei dem eine homogene Masse bildenden Porzellan.

Neben Wicklungs- und Transformatorisolationen bilden die Durchführungen ein weiteres Anwendungsgebiet der festen Isoliermaterialien. Die hohen Betriebs- und noch höheren Prüfspannungen stellen dabei an das Isoliermaterial sehr grosse Anforderungen. In Konkurrenz stehen die Porzellanklemme mit Oelfüllung und die Hartpapierklemme mit Metalleinlagen (Kondensatorklemme). Neuerdings führt sich auch die Oelklemme mit Kondensatoreinlagen ein [2]).

Parallel mit den Fortschritten in der Herstellung von Isoliermaterial geht die verschärfte Prüfung. Wenn auch heute noch der jahrelange Be-

[2]) S. Bull. SEV 1932, Nr. 3, S. 61.

trieb die beste Probe darstellt, so geben doch die mannigfaltigen Untersuchungen, denen bei der Typenprüfung der Kandidat unterworfen wird, einen verhältnismässig sicheren Rückschluss auf seine Güte und Verwendbarkeit. Neben den mechanischen Prüfungen interessieren vornehmlich die elektrischen Prüfungen, von denen zu erwähnen sind:

1. Die Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit;
2. die Bestimmung der dielektrischen Verluste oder des Verlustwinkels tg δ, als neuere Prüfart.

Ein Mangel der zweiten, sonst hervorragenden Prüfung liegt darin, dass nur über ein Raumgebiet als Mittelwert und nicht über das Volumenelement dv Auskunft gegeben wird, so dass kleine, örtliche Fehler das Gesamtresultat unter Umständen zu wenig beeinflussen, um erkannt zu werden. Ueber den Zusammenhang des tg δ und der Verluste mit der Temperatur orientiert generell Fig. 3, über die Abhängigkeit der obigen Grössen von der herrschenden Feldstärke Fig. 1. Auf alle Fälle hat diese neue Prüfmethode sehr viel zur Verbesserung der Isoliermaterialien beigetragen und gestattet, ein Urteil zu bilden, ohne den Prüfling durch Ueberbeanspruchung zu schwächen. Für die Durchführung derartiger Messungen wird meistens die Scheringsche Messbrücke benützt, bei der aber bei hohen Spannungen durch Ableitungsströme leicht Fehler entstehen können, welche die Resultate fälschen. Es genügt daher unter Umständen nicht, nur die Messresultate bekannt zu geben; wichtig und auf alle Fälle sehr erwünscht ist auch die Angabe der Messmethode [3]).

Von grossem Interesse ist auch die Zeitabhängigkeit der angegebenen Versuche, da oft erst eine mehrstündige Probe richtige Auskunft über die Güte und die für Betrieb zulässigen Werte gibt (Fig. 2). Es ist bekannt, dass für stark kurzzeitige Beanspruchungen der Temperaturdurchschlag zurücktritt und die Stossionisation massgebend wird. Für die zulässigen Beanspruchungen bei Stoßspannungen liegen zur Zeit erst für eine beschränkte Anzahl Materialien zuverlässige Angaben vor.

[3]) S. auch Bull. SEV 1930, Nr. 6, S. 197.

Ein noch wenig abgeklärtes Gebiet der Hochspannungstechnik ist die Frage der Kriechspannung. Es nützt natürlich nur in beschränktem Masse, hochwertige Isoliermaterialien herzustellen, wenn mit Rücksicht auf den Kriechweg, d. i. der Weg längs Trennflächen verschiedener Materialien, die Reduktion der Distanzen illusorisch wird. Parallel zur Verbesserung des Materials für Durchschlag ginge daher eine Verbesserung im Sinne der Erhöhung der Kriechspannung, über deren Wesen allerdings eine volle Abklärung noch aussteht.

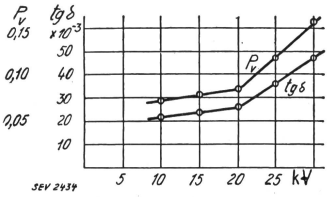

Fig. 1.
Dielektrische Verluste P_v u. Verlustwinkel tg δ einer Mikanitisolation in Abhängigkeit der Spannung.

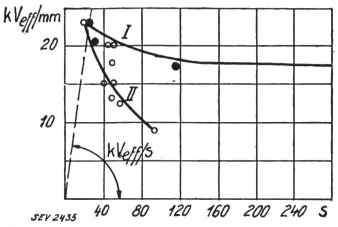

Fig. 2.
Längsdurchschlag- (II) und Querdurchschlagsfestigkeit (I) von Hartpapier in Abhängigkeit der Zeit;
I gemessen an 2 bis 4 mm dicken Schichten,
II gemessen an 25 mm hohen Stücken.

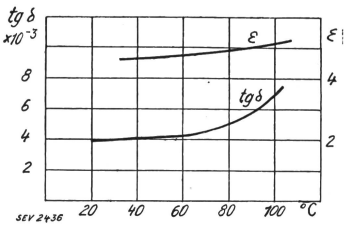

Fig. 3.
Verlustwinkel tg δ und Dielektrizitätskonstante ε in Abhängigkeit der Temperatur.

II. Diskussion und Referate von Vertretern der Fabrikationsfirmen.

Als erster Diskussionsredner meldet sich Dr. *M. Wellauer* (MFO, Oerlikon) zum Wort. Seine mit Lichtbildern belegten Ausführungen beziehen sich auf neuere Ausführungen und Untersuchungen an Generatorisolationen, durchgeführt von der Maschinenfabrik Oerlikon. Eine ausführliche Wiedergabe seiner Darlegungen findet sich im Bulletin des SEV 1931, Nr. 24, S. 589, unter dem Titel: «Zusammenfassende Darstellung der dielektrischen Verluste in Mikanitisolationen für Generatorspulen hoher Spannung».

F. Beldi (BBC, Baden) orientiert anschliessend über entsprechende Untersuchungen und Versuchsresultate an Wicklungsisolationen der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden; er führt aus:

Im Grossmaschinenbau muss nebst einer hochwertigen elektrischen Isolation der stromführenden Wicklung gegen den Metallkörper grosse mechanische Festigkeit und Wärmebeständigkeit verlangt werden. Gerade hier treffen gegensätzliche Eigenschaften der Isolierstoffe besonders scharf aufeinander.

Bevor wir zum eigentlichen Isolierproblem im Maschinenbau übergehen, möchte ich den, man kann wohl sagen «normalisierten Isolierstoff», nämlich Glimmer, und seine Verwendungsmöglichkeit für hohe Spannungen streifen. Bekanntlich besitzt Glimmer sehr geringe dielektrische Verluste und eine grosse Wärmebeständigkeit. Die zur Verwendung gelangenden dünnen Glimmerschichten werden zu einer kompakten Isolierschicht verarbeitet.

Als Klebmittel wurde anfänglich allgemein Schellack verwendet. Die Schwäche dieser Isolationsart besteht, wie von verschiedenen Seiten erkannt wurde, in der Eigenschaft, dass Schellack bereits bei verhältnismässig niedrigen Temperaturen weich zu werden beginnt, wobei ein Aufquellen der Isolation und Festsitzen derselben in der Nut eintritt. Nach langjährigem Betrieb bei hohen Temperaturen zeigt sich ein weiterer Nachteil in der Auflösung des Schellacks in Pulverform, wobei die Umpressung jede innere Festigkeit verliert und zu Hohlraumbildung neigt. Das Glimmen in dem entstandenen Hohlraum wird meist in seiner Auswirkung überschätzt. Aus amerikanischen Arbeiten ist bekannt — und diese Ansicht deckt sich auch mit den Erfahrungen an Maschinen bis 15 kV —, dass diese Koronabildung nicht gefährlich ist, jedoch meist gefühlsmässig als *unerwünscht* betrachtet wird. Bei sehr starkem Glimmen ist allerdings eine Verkohlung des Bindemittels infolge Erwärmung durch die Glimmverluste möglich.

Bei den üblichen Generatorspannungen hat sich das erwähnte Schellackfolium elektrisch bewährt.

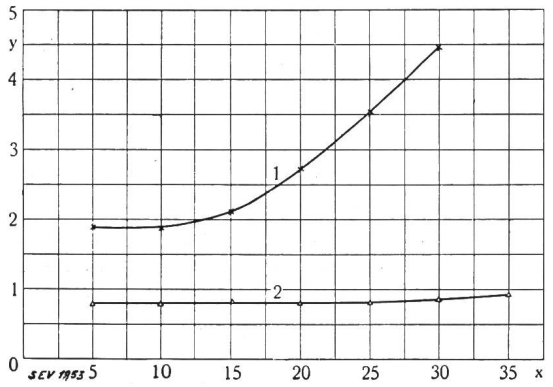

Fig. 4.
Dielektrische Verluste eines Generatorstabes in Funktion der Spannung. Temperatur 16° C.
x Angelegte Spannung in kV.
y Verluste in W reduziert auf eine Feldstärke 10 kV/cm.
1 Gewöhnliche Isolation.
2 Verbesserte Isolation.

Eingehende Untersuchungen haben aber gezeigt, dass für hohe Ansprüche in mechanischer und elektrischer Beziehung dieses Produkt nicht mehr genügt.

Wird der Lackgehalt zwecks Verkleinerung des Aufquellens unter ein gewisses Mass verringert, so sinkt die Durchschlagsfestigkeit im kalten Zustand bei kurzer Beanspruchungsdauer, wohl infolge geringerer Klebfähigkeit einzelner Schichten und dadurch entstehender Hohlräume. Dies würde die Ansicht, dass als einleitender Vorgang des Durchschlages bei festen Isolierstoffen ein Gasdurchbruch eintritt, unterstützen.

Ein Schluss bezüglich Klebfähigkeit der einzelnen Schichten lässt sich wohl aus der Spannungsabhängigkeit der dielektrischen Verluste herauslesen. Fig. 4 gibt für die Schellackisolation und die seinerzeit von Brown Boveri verbesserte Isolation den Einfluss der Spannung auf die Grösse der dielektrischen Verluste wieder.

Kurve 2, die der verbesserten Isolation entspricht, zeigt praktisch Unabhängigkeit der dielektrischen Verluste von der Spannung, während bei der Schellackisolation Kurve 1 bei Ueberschreitung einer gewissen Spannung Zunahme der Verluste erfolgt. Diese Zunahme ist meist bedingt durch Glimmverluste in der Isolation. Aus der Spannungsabhängigkeit lässt sich ein Schluss auf die Grösse etwa vorhandener Luftschichten im Dielektrikum ziehen. Bekanntlich beträgt die zum Durchschlag einer Luftschicht notwendige Spannung im Minimum etwa 320 V. Aus Messungen wurde für die verbesserte Isolation eine Luftschicht ebener Ausbildung von höchstens $^{12}/_{1000}$ mm berechnet. Luftschichten kugelförmiger Gestalt haben infolge der möglichen Kraftlinienverdrängung grössere Festigkeit. Die geringe Spannungsabhängigkeit bei Porzellan ist vermutlich dieser Eigenschaft zuzuschreiben.

Grosse Elastizität der Umpressung ist erwünscht. Der diesbezügliche Fortschritt kann durch Versuchsergebnisse hinsichtlich mechanischer Belastungen stetigen und stossartigen Charakters illustriert werden. Um neben den Falten und Rissbildungen bei Ueberbelastung auch die unsichtbaren Zerstörungen erfassen zu können, war die Umpressung gleichzeitig unter Spannung gehalten. Die Schellackisolation schlägt im kalten Zustand bei einer Spannung von 13 kV schon bei 8 mm Durchbiegung durch, während die neue Isolation eine Spannung von 32 kV bis zu einer Durchbiegung von 21 mm verträgt. Da die Flexibilität der Isolation mit grösserer Temperatur zunimmt, wird die zulässige Durchbiegung im warmen Zustand grösser. Einer Kraftwirkung senkrecht auf die Flachseite des Stabes ist die Isolation besser gewachsen als in Hochkantrichtung.

Um eine Einsicht in die Verhältnisse des Aufquellens bei hohen Temperaturen zu gewinnen, wurden Probestäbe in Eisenformen erwärmt. Während die Schellackisolation ein Aufquellen zeigt, ist bei der verbesserten Isolation praktisch keine Veränderung zu erkennen. Mit diesen hängt auch ein Lackausfluss zusammen. Es wurde z. B. an einer 6 mm dicken Umpressung die Lackausflussmenge bei verschiedenen Temperaturen bestimmt. Setzen wir die Ausflussmenge bei 150° C bei der gewöhnlichen Isolation gleich 100 %, so beträgt die Ausflussmenge der verbesserten Isolation bei gleicher Temperatur 12 %, d. h. ca. $^1/_8$ derjenigen der gewöhnlichen Isolation.

Nachdem die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der beiden Isolationen einander gegenübergestellt wurden, soll nun noch die mit der neuen Isolation erreichbare Betriebsspannung festgestellt werden.

Betrachten wir vorerst die Vorgänge beim Dauerbetrieb. Die dielektrischen Verluste sind gegenüber den Gesamtverlusten einer Maschine sehr gering. Bei einem 13-kV-Turbogenerator wurden beispielsweise die dielektrischen Verluste zu 0,35 % der totalen *Verluste* bestimmt. Gleichwohl muss

der Grösse der dielektrischen Verluste Beachtung geschenkt werden, da sie, wie Versuche zeigen und die Theorie des Wärmedurchschlages lehrt, für den Dauerbetrieb der Isolation nicht ohne Einfluss sind. Für die Grösse der zulässigen Spannung im Dauerbetrieb ist nebst der thermischen Festigkeit des Materials das Wärmegleichgewicht der Isolation in der Maschine massgebend.

Als Beispiel wollen wir Generatorstäbe für eine Hochspannungsmaschine, die mit der neuen Isolation umpresst waren, betrachten. Sie wurden einer Dauerprüfung entsprechend den Verhältnissen im Betriebe unterworfen (Fig. 5). Die Spannung von 57 kV wurde ohne weiteres gehalten. Die Verluste nahmen mit der Zeit ab; nach einer Stunde war das Wärmegleichgewicht erreicht. Die Spannung von 60 kV, die in diesem Falle dauernd gehalten wird, kann als Kippspannung angesprochen werden, denn eine wenig höhere Spannung von 63 kV führt in kurzer Zeit zur Zerstörung des Stabes; die Verluste steigen rasch, die Temperatur in der Isolierschicht nimmt unzulässige Werte an. Es sei her-

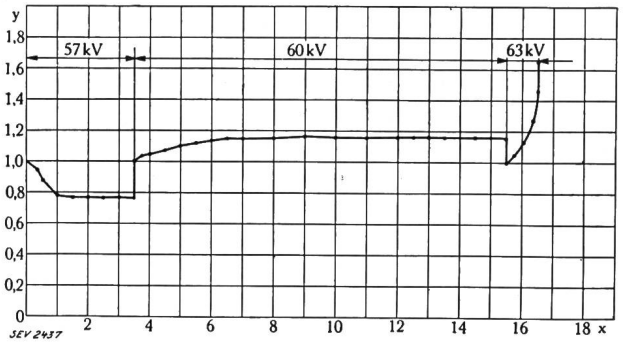

Fig. 5.
Dielektrische Verluste von verbesserter Mikanitisolation in Abhängigkeit der Spannung und Zeit (x Zeit in Stunden).

vorgehoben, dass eine Kippspannung von 60 kV bei einer Maschine mit Y-Schaltung einer Klemmenspannung von etwa 100 kV entspricht. In dieser Beziehung stellt also das angeführte Ergebnis einen wesentlichen Fortschritt in der Isoliertechnik der Elektromaschinen dar.

Wie bekannt ist, treten an Durchführungen bei Spannungssteigerung meist am Flansch Entladungserscheinungen in nachfolgender Reihenfolge auf: Glimmen, Büschel-Gleitfunken und als Folge der letzteren bei genügender Stromzufuhr Ueberschlag. Prinzipiell liegen die Verhältnisse bezüglich Spannungsbeanspruchung am Nutaustritt von Generatoren gleich wie bei den Fassungen der Durchführungsisolatoren. Zwischen dem Eisen des Generators und dem Leiter der Spule treten die elektrischen Verschiebungslinien nicht senkrecht in das Isoliermaterial ein. Es entsteht deshalb in tangentialer Richtung eine Spannung auf der Umpressungsoberfläche. Diese tangentiale Spannung kann eine Gleitentladung auf der Leiterisolation zur Folge haben, die sich durch plötzliches Ausbrechen helleuchtender Funken kennzeichnet. Bei genügender Spannung, also genügender Ladungszufuhr, führt sie zu einer Funkenentladung.

Die Gleitfunkenspannung ist einesteils abhängig von der Schichtdicke, anderenteils von der Dielektrizitätskonstanten des Materials. Für eine bestimmte Dielektrizitätskonstante hat sie etwa den in Fig. 6 gezeichneten Verlauf. Die Gleitfunkenspannung ist also unabhängig von der Entfernung

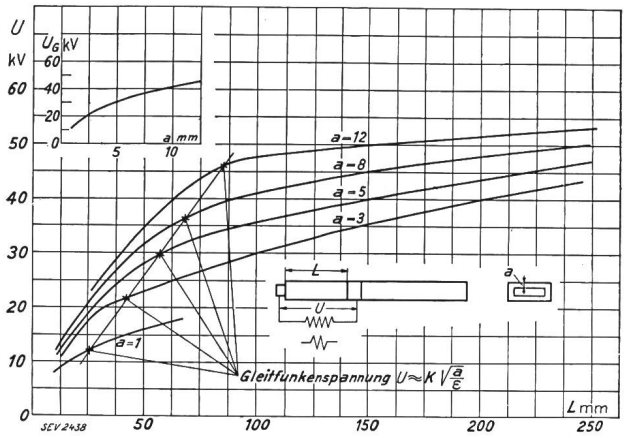

Fig. 6.
Gleitfunkenspannung an Generatorstäben.

der Elektroden. Steigert man die Spannung über die Gleitfunkenspannung hinaus, so treten je nach der Elektrodendistanz Funkenüberschläge auf.

Bei 8 mm Isolationsdicke z. B. trifft dies für Spannungen grösser als 36 kV zu, der Ueberschlag wird stets durch Gleitfunken eingeleitet. Bei Distanzen kleiner als 68 mm treten Ueberschläge ohne vorherige Gleitentladung auf.

Durchschlagsproben an den bereits erwähnten Generatorstäben, die mit der verbesserten Isolation umpresst waren, ergaben bei einer Isolationsstärke von 8 mm Durchschlagswerte von über 200 kV. Im Zusammenhang mit den vorerwähnten Gleitfunken und Ueberschlagsversuchen ist also zu erkennen, dass mit Rücksicht auf Gleitentladungen die Dicke der Isolation wesentlich höher gewählt werden muss, als für die Durchschlagsfestigkeit an und für sich erforderlich wäre.

Aus der elektrischen Festigkeitslehre ist nun bekannt, dass durch Zudecken der Elektroden mit Isoliermaterial die Entladungsspannung bedeutend erhöht werden kann. Weiterhin ist bekannt, dass durch Potentialsteuerung mit Hilfe von leitenden Einlagen in die Umpressung, ähnlich wie bei Kondensatordurchführungen, eine wesentliche Verbesserung erzielt wird. Fig. 7 zeigt einige Ausführungsformen. Oben ist der mittels Papier eingedeckte

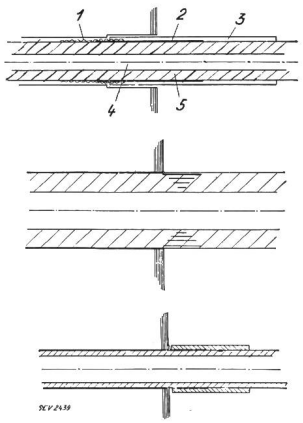

Fig. 7.
Potentialsteuerung in Generatorisolation am Nutaustritt.
1 Asbestband.
2 Metalleinlage.
3 Papier.
4 Leiter.
5 Stabumpressung.

Metallbelag — die Nut ist zu diesem Zwecke am Austritt etwas vergrössert — durch einen Asbeststreifen mit dem aktiven Eisenkörper verbunden. Die Ausführungsform in der Mitte entspricht der erwähnten Potentialsteuerung durch Kondensatoreinlagen. Brown Boveri hat mit einer Anordnung nach der untersten Skizze sehr gute Erfahrungen gemacht. Der durch Isoliermaterial eingedeckte leitende Belag ist direkt mit dem Eisenkörper in Verbindung gebracht. Bei sehr hohen Prüfspannungen wird ausserdem ein halbleitender Lackanstrich verwendet. Es ist dadurch möglich geworden, Stäbe der bisherigen Ausführung, die bei etwa 30 kV schon Entladungen aufweisen, mit 100 kV Spannung zu prüfen, und zwar ohne nennenswerte Entladungserscheinungen.

Einige Schwierigkeiten bieten noch die Abstützungen der Wicklungen. Bei mittleren Spannungen ist das Problem relativ einfach zu lösen. Bei hohen Spannungen treten bei den üblichen Abstützungen mit Bolzen Entladungen im Luftkeil auf. Diese Entladungen wurden unterdrückt einesteils durch Ausfüllen des Luftkeiles mit Isoliermaterial oder durch Entlasten des Luftkeiles, in dem eine weitere Luftschicht in der Bolzenabstützung einen Teil der Spannung übernimmt, oder bei sehr starker Beanspruchung durch Entlasten des Luftraumes mittels ganz oder halbleitenden Einlagen auf den anliegenden Abstützungs- resp. Wicklungsteilen.

Mit Hilfe der erstgenannten Abstützungsanordnung haben wir gute Resultate erzielt. Es ist z. B. gelungen, an einem betriebsbereiten Turbogenerator für 36 kV eine Spannungsprobe nach VDE-Vorschriften anstandslos durchzuführen. Diese Vorschriften verlangen u. a., dass vor Ueberschreitung der Nennspannung um 25 % keine Gleitfunken beobachtet werden dürfen. Bei der Probe traten sogar bei der vollen Prüfspannung noch keine Gleitfunken auf.

Nach diesen Darlegungen taucht ohne weiteres die Frage auf, welche Betriebsspannung mit dem erwähnten Isoliermaterial nun für einen Generator zu erreichen ist. Wir haben gesehen, dass die Durchschlagsspannung bei 8 mm Isolationsdicke mehr als 200 kV beträgt. Legen wir gegen Durchschlag bei der Isolationsprobe eine 1,7fache Sicherheit zugrunde, d. h. lassen wir für das Material eine Prüfspannung von etwa 120 kV während 1 min zu, so wäre mit Rücksicht auf die schärfere Prüfvorschrift RET (Regeln für elektrische Transformatoren des VDE) (2 E + 16 kV) eine Nennspannung von etwa 50 kV zulässig. Generatoren mit solchen Nennspannungen würden dann wohl direkt, also ohne Zwischentransformator, Leistung in das Versorgungsgebiet liefern. Die zugrunde gelegte Prüfung für Transformatoren wäre dann notwendigerweise auch für solche Maschinen zu übernehmen. Aus zahlreichen Untersuchungen folgt, dass die Durchschlagsspannung von festen Isoliermaterialien bei Spannungsstoss bis etwa 2,3mal so hoch liegt als bei 50 Per./s. Wird also die Maschine mit mehr als doppelter Spannung bei 50 Per./s geprüft, so dürfte ihre Isolation kurzzeitigen Ueberspannungen von 4,6fachem Betrag der Nennspannung gewachsen sein. Da höhere als vierfache Ueberspannungen sehr selten in Netzen auftreten, können die Prüfvorschriften nach RET für Maschinen mit so hohen Spannungen als ausreichend bezeichnet werden.

A. Metraux (Emil Haefely & Cie., A.-G., Basel) gibt einige Versuchsresultate diesbezüglicher Untersuchungen an Wicklungsisolationen bekannt, welche an Ausführungen der Firma Haefely in Basel gemessen wurden. Wenn auch die von den Vorrednern gezeigten Werte der dielektrischen Verluste, gemessen an Isolationen mit Asphaltfolien, nicht voll erreicht wurden, so zeigen die Versuche doch, dass bei sorgfältigster Ausführung auch mit Schellackfolien ganz vorzügliche Resultate bezüglich Durchschlagsspannung und dielektrischer Verluste erreicht werden. Fig. 8 orientiert über die Resultate der Verlustbestimmung an einer mit Metalleinlagen versehenen Wicklungsisolation für den Stator eines zweipoligen Turbogenerators von 10 000 kVA und 10 500 V. Nach seiner Ansicht können bei bester Fabrikation auch mit dem bekannten und bewährten Schellackmikanit sehr weitgehende Forderungen an die elektrische Güte einer Wicklungsisolation erfüllt werden.

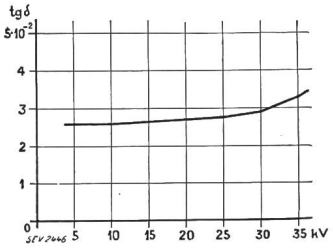

Fig. 8.
Verlustwinkel einer Spule mit Schellackfoliumisolation in Abhängigkeit der Spannung, in kaltem Zustand nach Erwärmung auf 125° C.
Nennspannung 10 500 V.

Als nächster Diskussionsredner ergreift Ingenieur *Wolf* von den Schweizerischen Isolawerken Breitenbach das Wort. Seine sich vorzugsweise auf die Erzeugnisse der genannten Firma beziehenden Ausführungen umfassen die folgenden Punkte:

Die mit Schellackmikafolien gemachten Erfahrungen sind befriedigend, solange es sich nicht um Wicklungen für höhere Spannungen und gleichzeitig grosse Leistungen handelt, wobei die grosse Erwärmung besonders in Betracht fällt. Die Bestrebungen, diese grossen Hemmnisse in der Konstruktion von Hochspannungsmaschinen zu beheben, führten vorerst dazu, den Gehalt an Bindemitteln, also an Schellack, zu vermindern. Es ist eine Tatsache, dass bei sehr geringem Lackgehalt die Verluste in kaltem Zustande bedeutend niedriger sind als bei hohem Lackgehalt. Sobald sich aber das Material bis zu einer Betriebstemperatur von 80 bis 90° C erwärmt, so genügt die Klebekraft des geringen Quantums Bindemittel nicht mehr, um die Schichten zusammenzuhalten, wenn dieselben beim Wickeln überhaupt zu richtigem Haften gebracht werden konnten. Ganz empirisch ist schon seit vielen Jahren das Mikafolium mit einem Lackgehalt von 30 bis maximal 35 % hergestellt worden, welche

Menge zwecks Erreichen homogener Endprodukte kaum umgangen werden kann.

Eingehende Versuche haben nun dazu geführt, ein Bindemittel auf Asphaltbasis, in der Hauptsache Gilsonit, unter Zusatz geeigneter Oele zu schaffen, dessen Klebkraft nicht hinter derjenigen des Schellacks zurücksteht und das vor allem auch die hervorragende Eigenschaft besitzt, selbst bei Dauererwärmung über die maximalen Betriebstemperaturen weder Wasser abzuscheiden noch mechanische Spannungen zwischen den einzelnen Schichten hervorzurufen. Der Erweichungspunkt dieses neuen Bindemittels liegt bei ca. 140° C; Ionisationspunkt und Steigerung der dielektrischen Verluste liegen daher unter gleichen Spannungsverhältnissen bei einer ca. 50° C höhern Temperatur als bei Schellack. Auch bei diesem Mikafolium hat sich ein Bindemittelgehalt von 30 bis 35 % als unumgänglich erwiesen.

Als weitere Neuerung unter den für Nutenisolationen in Betracht fallenden Mikanitprodukten dürfte das in den letzten Jahren von der General Electric Co. durch die AEG in Europa eingeführte «Supra-Mikanit» erwähnt werden, das als Bindemittel Glyptal, ein Kondensationsprodukt aus Phtalsäureanhydrid und Glyzerin, benützt. Obwohl markante Vorteile, wie etwas grössere Oelfestigkeit, höhere Erweichungstemperatur und gute dielektrische Eigenschaften diesem Produkt unzweifelhaft eigen sind, macht sich doch als Mangel das Fehlen jeglich sichern Anhaltspunktes über die bei der Härtung stattfindenden Reaktionen geltend. Dadurch kann ein Urteil über das Verhalten im Betrieb nicht von vorneherein gesichert werden, wie dies bei den Erfahrungswerten mit Schellack der Fall ist. Bei jeder Neuerwärmung selbst unter 220° C, bei welcher das Harz normalerweise polymerisiert, erweicht es wieder, so dass es eine zähplastische Struktur annimmt; bei noch höheren Temperaturen wird es spröde und verliert gleich dem Schellack jegliche Klebekraft. Vergleichende Versuche mit Kollektorlamellen für Traktionsmotoren aus Glyptalmikanit und solchen, aus dem von den Schweizerischen Isolawerken für den gleichen Zweck hergestellten *Amberit* haben folgende Zusammendrückarbeit und dauernden Dickenverlust bei gleichen Temperaturen und Druckverhältnissen ergeben: Nominelle unter Druck von 250 kg/cm² im kalten Zustande messbare Dicke beider Sorten Lamellen = 0,85 mm.

Druck kg/cm²	Temperatur ° C	Lamellendicke in mm	
		Glyptal	Amberit
250	180	0,76	0,84
900	180	0,732	0,817
nach Erkalten 250	20	0,736	0,838

Es ist also bei den Glyptallamellen eine dauernde und starke Veränderung eingetreten, welche sie für den Kollektorbau unbrauchbar macht.

Aehnliche Erfahrungen sind auch mit Kollektorringen und Nuteneinlagen aus Glyptalmikanit gemacht worden, wobei festzustellen war, dass nach kurzer Betriebsdauer das Harz in pulverförmigen Zustand übergegangen war. Diese eigenen Feststellungen sind voll bestätigt worden durch die praktischen Versuche von Verbrauchsfirmen.

Bei den Nutenisolierungen für Motoren mittlerer Spannungen ist auf folgende Neuerungen aufmerksam zu machen: An Stelle der üblichen Isolation, bestehend aus schichtenweiser Kombination von Preßspan und Oeltuch ist die Schichtung von «Transformerboard» und «Latheroid» oder «Fishpaper» getreten, ohne aber voll befriedigende Resultate zu geben. Eine wesentliche Verbesserung bringt in dieser Richtung die elastische Verbindung aus Transformerboard oder Latheroid mit Oeltuch oder Oelpapier, die unter dem Namen «Tisolite B und L» in Dicken von 0,2 bis 0,7 mm auf den Markt kommt. Die Vorteile dieses neuen Materials bei 0,3 mm Dicke sind durch die folgenden Vergleichsmessungen belegt:

	Tisolite B	Preßspan
Durchschlagsfestigkeit:		
trocken	7800 V	2700 V
nach 96 Stunden in feuchter Luft	2300 V	250 V
Falzverlust bei Vorfalzung um 180°	ca. 30 %	ca. 50 %

Bei der Behandlung der Nutenisolationen darf auch auf die grossen Fortschritte hingewiesen werden, welche durch die Verwendung von emaillierten und emailliertumsponnenen Drähten erzielt worden sind. Vor allem sind die grosse Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeitseinflüsse, die hohe Durchschlagsfestigkeit von 2000 bis 5000 V zwischen den einzelnen Windungen bei gleichzeitiger Raumersparnis (ca. 15 % gegenüber zweifacher Umspinnung mit Baumwolle) und nicht zuletzt die grosse Wärmebeständigkeit als markante Vorteile hervorzuheben. Für die Auswertung dieser Vorzüge ist aber in erster Linie richtige Behandlung der Wicklung Voraussetzung. Die Lackschicht ist im Anlieferungszustand derart gestaltet, dass sie die beim Wickeln vorkommende Beanspruchung in bezug auf Dehnung und Biegung aushalten kann, ohne dass dabei ein Loslösen oder Abspringen derselben stattfindet. Erst nach der Vollendung der Wicklung soll die totale Erhärtung des Emails erfolgen durch Dauererwärmung der fertigen Wicklungen bei 120° C, und zwar während 10 Stunden, wenn die Emailschicht nur gegen Lösungsmittel, wie Imprägnierlacke, unempfindlich gemacht werden soll, 20 Stunden, wenn mechanische Beanspruchungen sowie Vibrationen und Einwirkung von Zentrifugalkräften zu berücksichtigen sind. Trotz der hohen Sicherheit, die der Emaildraht in bezug auf Isolationsfähigkeit bietet, empfiehlt es sich, die Wick-

lungen noch zu imprägnieren, um grössere Stabilität der Windungen unter sich zu erreichen, also zur Vermeidung von inneren Vibrationen. In allen diesen Fällen muss *vor* der Imprägnierung immer die Härtung des Emails erfolgen.

Für thermisch sehr hoch beanspruchte Wicklungen überlastbarer Maschinen ist ein neuer, mit Asbest umpresster Draht geschaffen worden. Die Isolierfähigkeit ist bei gleichem Raumbedarf derjenigen zweifacher Baumwollumspinnung um ca. 10 % überlegen und bleibt annähernd gleich, selbst wenn der Draht bis 250° C erwärmt wird, wobei die gute Haftung des Asbestes unveränderlich bleibt. Im Bau von Traktionsmotoren hat sich dieser Draht bereits eingeführt und dürfte auch bei den übrigen elektrischen Maschinen dank seiner Vorzüge bald durchgehend Aufnahme finden.

Die Ausführungen des nächsten Diskussionsredners, Prof. *A. Imhof* (Micafil A.-G. Altstetten) seien wie folgt wiedergegeben:

Das zu Isolationszwecken ausserordentlich viel angewandte Mineralöl erfordert, wegen den praktisch immer vorkommenden Verunreinigungen, zur Verhütung von Brückenbildungen *Barrieren* aus festem Isoliermaterial. Soweit Zylinder, Röhren, Platten, kragenartige Gebilde in Betracht kommen, wurden bisher vor allem Hartpapiere und tafelförmige Materialien, wie Preßspan, Edelpreßspäne, Karton usw. verwendet. Die Micafil brachte kürzlich unter dem Namen *Oleocel* ein neuartiges Material auf den Markt, welches in den oben genannten Handelsformen erzeugt wird und gegenüber den bisher angewandten Barrierenmaterialien erhebliche Vorteile aufweist. Gegenüber den Hartpapiergebilden besitzt es den Vorteil eines niedrigeren Preises, einer noch grösseren Zuverlässigkeit, da sich keine Hohlräume bilden können, und einer grösseren Kriechwiderstandsfähigkeit. Gegenüber dem Preßspan und preßspanähnlichen Materialien hat es den Vorteil, sich wie Hartpapier schon in der herstellenden Fabrik zu mechanisch stabilen, sauberen Zylindern bilden zu lassen, und zwar in allen Grössen nahtlos bis zu Zylindern von gut 3 m Länge und etwa 2 m Durchmesser, in allen gewünschten Wandstärken. Die Formen von Platten und Zylindern bleiben im Oel erhalten, es entstehen nicht die unschön wirkenden Verbiegungen, welche leicht zu Verengungen der für die Oelzirkulation wichtigen Zwischenräume führen. Die mechanische Stabilität ist nur wenig geringer als diejenige der Hartpapiere. Oleocel ist ein wie das Hartpapier aus Papier gewickeltes oder aus Papierlagen gepresstes Material, dessen einzelne Lagen jedoch nicht durch zusammenhängende Lackschichten, sondern nur durch ein feines Punktsystem verklebt sind. Deshalb ist das Material für Oel sehr leicht quer saugfähig. Ausserhalb des Oeles ist es daher nicht verwendbar. Fig. 9 zeigt die Durchschlagspannung in Funktion der Dicke bei rascher Spannungssteigerung (40 kV/s), Kugelelektroden von 25 mm Durchmesser nicht aufliegend, Schlagweite $a = 3{,}5 \times$ Dicke der Oleocelplatte, Oelschicht zwischen Kugel und Platte $1{,}25 \times$ deren Dicke; es wurde kaltes, technisch reines Transformatorenöl verwendet.

Die Micafil hat auch das *Hartpapier* durch Verwendung eines besonderen Harzes erheblich verbessert, derart, dass heute Durchschlagsfestigkeit

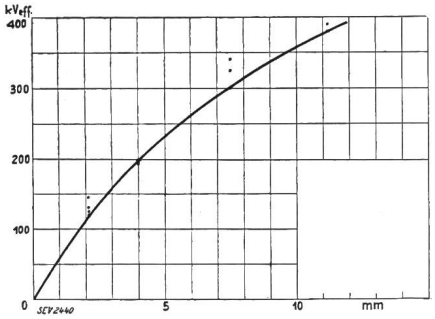

Fig. 9.
Durchschlagspannung von Oleocel bei rascher Spannungssteigerung (40 kV/s), in Oel 20° C, 50 Per./s.

und Temperaturzunahme der Verluste im Bau von Durchführungen keine Grenzen mehr legen bis zu Betriebsspannungen von 220 kV. Dies gilt auch bei Verwendung von relativ grossen Mengen des Harzes, weil die Polymerisationsprodukte des verwendeten Spezialharzes für die elektrischen Eigenschaften unschädlich sind, im Gegensatz zu denjenigen der bisher verwendeten Kunstharze.

Fig. 10 zeigt die spezifischen Verluste von Hartpapieren mit Bakelit und vergleichsweise mit Micafil-Harz als Bindemittel. Bei letzterem Harz ist der Anstieg mit der Temperatur weit mässiger.

Die Verbesserung des Hartpapiers führte naturgemäss auch zu Qualitätsverbesserungen der daraus hergestellten *Kondensatordurchführungen.* Eine zur Beurteilung wichtige Erscheinung bei Durchfüh-

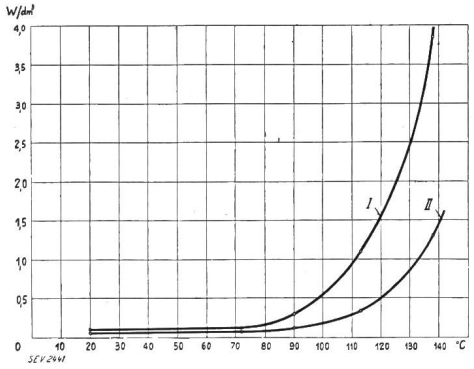

Fig. 10.
Dielektrische Verlustziffer von Hartpapier in Abhängigkeit von der Temperatur, bei 30 kV/cm, reduziert auf 10 kV/cm; 50 Per./s.
I Bakelit.
II Micafil-Harz.

rungen ist die Widerstandsfähigkeit gegen Wärmedurchschlag. Dieser ist möglich

a) durch Erhitzung des Innern von massiven Durchführungen über die vom Material dauernd ertragbare Grenztemperatur von ca. 100° C für Hartpapier. Bei der *Grenzspannung* wird diese Temperatur erreicht;

b) wegen Zunahme der Verluste mit steigender Temperatur, da oberhalb der *Kippspannung* zwischen dielektrischer Verlustwärme und abführbarer Wärmemenge kein Gleichgewicht mehr möglich ist.

Grenz- und Kippspannung sind für gleiche Kühlverhältnisse Materialkonstanten.

4 Durchführungen für 150 kV Betriebsspannung wurden während 8 Stunden mit 220 kV belastet, wobei das Unterteil in Oel von 90° C war. Die Verluste stiegen von 51 W auf dauernd 54 W, bei der Klemme mit höchsten Verlusten von 60 W auf konstant 67 W. Daraus folgt, dass die Fabrikation von

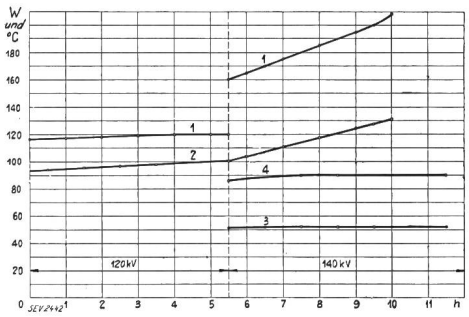

Fig. 11.
Dauerversuch an Porzellan- und Kondensatordurchführung. Unterteil in Oel 90° C; 50 Per./s. Verlust und Temperatur in Funktion der Zeit in Stunden.
1 Verlust, Porzellandurchführung.
2 Temperatur, Porzellandurchführung.
3 Verlust, Kondensatordurchführung.
4 Temperatur, Kondensatordurchführung.

Durchführungen mit mehr als 220 kV Kippspannung ohne besondere Kunstgriffe möglich ist.

In Fig. 11 sind Vergleichs-Dauerversuche einer Kondensatordurchführung von 87 kV Nennspannung und 210 kV Prüfspannung und einer Porzellan-Mehrrohrdurchführung von 80/195 kV dargestellt; das Unterteil beider war in Oel von 90° C. Die Kondensatordurchführung war aus einer Fabrikationsserie von 15 Stück als Exemplar mit grössten Verlusten ausgelesen worden. Man ersieht daraus, dass die Verluste bei Porzellan mit der Temperatur stark wachsen, im Gegensatz zu denjenigen des verwendeten Hartpapiers. Dementsprechend ist auch der Temperaturverlauf. Aus diesem Grunde sind der Verwendung von Porzellan gewisse Grenzen gesteckt, wenn auch anzunehmen ist, dass das Porzellan diesbezüglich noch Verbesserungen zugänglich sein wird.

Um auch Durchführungen für höhere Spannungen liefern zu können und ferner auch diejenigen Käufer, welche *ölgefüllte Durchführungen* vorziehen, beliefern zu können, wurde eine ölgefüllte Durchführung entwickelt. Kleinheit der Abmessungen bei grösster Prüf- und Betriebssicherheit wurde erreicht, indem nicht allein das Kondensatorprinzip, sondern gleichzeitig die Verschiedenheit der Dielektrizitätskonstanten von Oel und festem Isoliermaterial zur Verbesserung der Spannungsverteilung herbeigezogen wurde. Fig. 12 zeigt den Verlauf der radialen und achsialen Gradienten als Funktion der Schlagweite. Die Wahl der Nennspannungen ist so getroffen worden, dass für möglichst viele Landesvorschriften eine wirtschaftliche Type vorhanden ist. Die Vorausberechnung ist wie bei Kondensatordurchführungen bis zu den extrem hohen Spannungen ohne Unsicherheit möglich.

H. Tschudi orientiert anschliessend über das von der Firma H. Weidmann A.-G., Rapperswil, hergestellte neue Produkt «*Transformerboard*».

Zu der allgemeinen historischen Forderung auf gute Durchschlagsfestigkeit traten in den letzten Jahren an die Isolierstoffe mehr und mehr neue Ansprüche. Man verlangte u. a. vom Preßspan immer grössere Zähigkeit, Härte, Biegefestigkeit, Wärmebeständigkeit gegen die heisse Luft der Motoren und das warme Oel der Transformatoren. Diesen Wünschen soll das «Transformerboard» entsprechen.

Das Transformerboard ist, für sich betrachtet, noch nicht der Isolierstoff, als welcher es in der Praxis auftritt, sondern vorerst ein nicht leitender Baustoff mit faseriger, öldurchlässiger Struktur. Die isolierenden Eigenschaften können erst in Kombination mit Transformatorenöl oder nach Imprägnierung mit Isolierlack erreicht werden. Die Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit ergibt daher im Anlieferungszustand kein richtiges Bild, sondern erst nach erfolgter Durchdringung oder Imprägnierung. Es war somit eine der Hauptaufgaben, bei den verlangten guten mechanischen Eigenschaften dennoch genügende Porosität zu wahren und ausreichende Aufnahmefähigkeit für Oel oder andere Imprägnierungsmittel zu gewährleisten.

Das Material hat mit dem in Amerika und England bekannten Pressboard oder Fullerboard Aehnlichkeit. Es besteht aus dünnen, nass aufeinander gelegten Schichten von ausgesuchten Fasern und die so gebildeten Tafeln werden wiederholt gepresst, getrocknet und gewalzt. Das fertige Material nimmt ca. 20 % Oel in sich auf und besitzt im Gegensatz zum hochpolierten Preßspan eine ziemlich rauhe Oberfläche. Die innige Durchdringung mit Oel ergibt eine hohe Durchschlagsfestigkeit, und durch die Benetzung mit Oel werden lokale Uebererwärmungen leichter als bei anderen festen Isoliermaterialien abgeleitet.

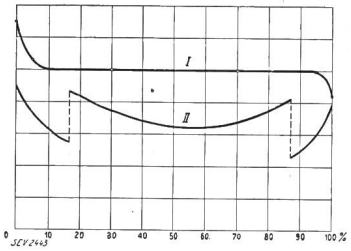

Fig. 12.
Oelgefüllte Durchführungen für 187 kV.
Verlauf der Achsial- und Radial-Gradienten.
I Achsial.
II Radial.

Es ist selbstverständlich, dass infolge der faserigen Beschaffenheit das saugfähige Material dem Einfluss der atmosphärischen Feuchtigkeit unterworfen ist und während Transport und Lagerung unter Umständen einige Prozente Feuchtigkeit aufnehmen kann. In Berücksichtigung dieser Tatsache gehen denn auch die neueren deutschen und eng-

lischen Prüfvorschriften nicht vom Anlieferungszustande aus.

Die mechanischen Kräfte, welche im Innern eines Transformators, Motors oder Schalters auftreten, sind sehr gross und vielseitig: plötzliche Drücke, ständige Vibrationen usw.; sie treten in trockener, heisser Luft oder in Oel auf. Damit das Isoliermaterial diesen Beanspruchungen standhält, muss es in erster Linie eine hohe elastische Dehnung besitzen. Diese Eigenschaft ergibt gute Formbarkeit, Fähigkeit zur Verpressung zu Manschetten und Kragen, Biegefähigkeit um scharfe Kanten und Anpassungsfähigkeit zu Einlagen zwischen zwei unebenen Flächen (z. B. für Stossfugenisolation). Nach dem Einbau in die Maschine ist das Isoliermaterial meist eingeklemmt und es muss jede Bewegung oder Verschiebung bis zum endgültigen Anziehen der Schrauben und nachher während der Erschütterungen des Betriebes mitmachen, Beanspruchungen, gegen die auch grösste Steifheit oder Zugfestigkeit nichts nützen würden. Das Isoliermaterial muss den Bewegungen des Metalls dauernd folgen können.

Die zweite Haupteigenschaft, welche wir dem Transformerboard zu geben trachteten, ist dessen geringe Alterung oder Ermüdung im Betriebe. Alle hochmolekularen, organischen Körper sind einer langsamen Oxydation, einer Verhornung und Verhärtung unterworfen. Der Einfluss heisser Luft oder heissen Oels beschleunigt in einem mit der Temperatur rasch steigenden Masse die Alterung. Dieser Erscheinung entgehen weder Oel noch Holz, noch Baumwolle, noch Lackbänder, Hartpapier usw. Ihr ist in gewissem Masse auch das Transformerboard unterworfen, aber es gelang, es zu einem nur langsam hart und brüchig werdenden Isolierstoff zu machen, der auch nach langem Dauerbetrieb den vorgesehenen mechanischen Anforderungen standhält.

Als letzter Diskussionsredner ergreift *P. E. Schneeberger* (Kabelwerke Brugg A.-G.) das Wort. Seine Ausführungen berühren Fragen der Isolationstechnik in der Kabelfabrikation.

In bezug auf die Behandlung der Isoliermaterialien hat auch die Hochspannungskabeltechnik in letzter Zeit wesentliche Fortschritte gemacht, um den im Freileitungsbau erreichten Resultaten zu folgen.

Als Hauptbestandteil der Isolation eines Hochspannungskabels dient für alle Konstruktionen Papier; die Art der Imprägnierung allein hat sich bei modernen Verfahren geändert. Die Möglichkeit, Papiere mit verschiedenen Dichtigkeitsgraden und damit verschiedener Dielektrizitätskonstanten herzustellen, gibt nun das Mittel, die sonst ungünstige Feldverteilung etwas zu verbessern. Mit sorgfältiger Auswahl der Papiersorten werden verschiedene Teilkapazitäten erzeugt und damit die Spannungsverteilung im Kabeldielektrikum günstiger gestaltet. Damit konnte z. B. die maximale Beanspruchung von 3900 V/mm bei normaler Ausführung ohne Abstufung auf 3300 V/mm mit Abstufung heruntergesetzt werden.

Es ist bekannt, dass im Isolierpapier, in den Fugen nach dem Bewickeln und in der Tränkmasse selbst zum Teil wesentliche Ansammlungen von Gasblasen zu glimmen beginnen und die langsame Zerstörung einleiten. Anderseits ist auch die Entstehung von Hohlräumen, welche stark verdünnte Gase oder sogar Vakua darstellen, beim bis heute üblichen Fabrikationsverfahren möglich gewesen. Der Fabrikationsgang des Kabels, nachdem die Isolation auf den Leiter aufgebracht worden ist, stellt sich wie folgt dar: Der isolierte Leiter wird in den Trocken- und Imprägnierkessel gebracht, um die in den Papierschichten in grosser Menge vorhandene Feuchtigkeit zu entfernen. Dann wird die in einem Mischbehälter sorgfältig vorbereitete Tränkmasse in den vorher hochevakuierten Imprägnierkessel gezogen. Eine sehr leistungsfähige Vakuumpumpe erlaubt das Evakuieren der grossen Kessel bis unter 1 mm Druck. Nach dem Imprägnierungsprozess werden die Kabel nach den neuesten Verfahren künstlich gekühlt, während bisher das fertig imprägnierte Kabel warm mit dem Bleimantel umpresst wurde. Durch ein Kühlungsverfahren wird das Kabel erst in vollständig abgekühltem Zustande gepresst und infolgedessen werden sämtliche Papierhohlräume und Isolationszwischenräume reichlich mit Masse versehen. Die mit diesem Verfahren hergestellten Hochspannungskabel zeigen von der Spannung unabhängige Verlustkurven und erhöhte Durchschlagsfestigkeit. Da der Bleimantel erst nach Abkühlung auf 10 bis 15° C aufgezogen wird, ist die Bildung von Hohlräumen verunmöglicht und die Masse kommt bei der im Betrieb auftretenden Erwärmung stets unter etwas Druck, was eine weitere Verbesserung des Dielektrikums bedeutet. Den Abschluss der Isolation bildet eine auf Papierband kaschierte Aluminiumfolie, um Gaseinschlüsse zwischen Isolation und Bleimantel unschädlich zu machen. Die hauchdünne Folie folgt ohne weiteres den durch die Temperaturschwankungen bedingten Bewegungen der Isolation, denen der Bleimantel infolge seiner mechanischen Festigkeit nicht folgen kann. Die auf diese Weise hergestellten Kabel sind für Betriebsspannungen bis zu 40 kV gegen Erde oder zwischen Leiter und Blei absolut betriebssicher und wirtschaftlich. Die spezifische Beanspruchung kann bis 5 kV/mm betragen, ohne dass eine Verminderung der Durchschlagsfestigkeit auch bei wechselnder Belastung eintritt. Die günstigste Betriebstemperatur für das Massekabel liegt zwischen 30 und 40° C, wo die dielektrischen Verluste ein Minimum betragen.

Für höhere Betriebsspannungen hat sich mit Rücksicht auf Wirtschaftlichkeit und Fabrikationsmöglichkeit eine Neukonstruktion des Hochspannungskabels für notwendig erwiesen. Das durch Ingenieur Emanueli in der Kabelfabrik Pirelli entwickelte Druckölkabel ist berufen, das Uebertra-

gungsproblem mit 150- resp. 220-kV-Kabeln zu lösen. Die im modernen Massekabel, wenn auch in geringen Mengen, noch vorhandenen Gaseinschlüsse werden beim Druckölkabel theoretisch ganz eliminiert, wodurch ermöglicht wird, diese Kabel mit 10 kV/mm und eventuell noch mehr zu belasten. Zugleich sind höhere Betriebstemperaturen möglich, weil der Längenausgleich hier leicht vor sich geht, da der Leiter einen konzentrisch angeordneten Längskanal enthält, mit Expansionseinrichtungen an den Kabelenden.

Um die Bildung von Gasblasen während der Konstruktion zu verhindern, wurden mehrere Methoden studiert, die im folgenden zusammengefasst sind:

1. Bildung einer Masse, deren Blasengehalt auf das äusserste Minimum heruntergedrückt wird;
2. Benützung einer Gasatmosphäre, die sich sehr leicht in der Isoliermasse auflöst;
3. Anwendung einer vollständig entgasten Isoliermasse.

Für den ersten Punkt konnte leicht eine befriedigende Lösung gefunden werden, indem man das Vorhandensein des Längskanales ausnützte und das Kabel nach Auftragen des Bleimantels imprägnierte. Auf diese Weise wurde das Volumen, in dem sich die Hohlräume bilden können, ganz gewaltig reduziert, verglichen mit der Imprägnationsschicht gewöhnlicher Kabel.

Das Dielektrikum, bevor es mit isolierendem Oel imprägniert wurde, erlitt eine Waschung durch Kohlensäure. Derart wurde eine Gasatmosphäre geschaffen, die sich im isolierenden Oel auflöste. Man kann voraussetzen, dass ein bestimmtes Volumen Mineralöl ein ebenso grosses Volumen Kohlensäure absorbiert, dagegen an Sauerstoff nur den vierten Teil, an Wasserstoff sogar nur den zwanzigsten Teil des eigenen Volumens aufnimmt. Benützt man isolierendes Oel, das frei von Gas- und Luftblasen ist, so wird eine fast vollständige Absorption des sich noch im Kabel befindenden Gases erhalten.

Für die Entgasung des isolierenden Oeles musste eine besondere Apparatur studiert werden, die auf dem Prinzip der äusserst feinen Teilung des Oels in einem Gefäss mit höchstmöglichem Vakuum beruht.

Die Erfolge mit Druckkabeln haben nun in letzter Zeit eine ganze Anzahl von Neukonstruktionen zur Folge gehabt. Aussicht auf praktische Verwendbarkeit scheinen die von dem bekannten Kabelspezialisten Höchstätter im Verein mit der Firma Felten Guillaume entwickelten Gasdruckkabel zu haben, deren nähere Betrachtung ausserhalb den Rahmen eines kurzen Referates fällt.

Wirtschaftliche Mitteilungen. — Communications de nature économique.

Statistique de l'énergie électrique des grandes entreprises électriques d'utilité publique.

31(494):621.311(494)

La statistique de l'énergie des grandes entreprises électriques d'utilité publique, qui paraissait chaque mois, n'a pas pu être publiée depuis septembre 1931 en raison des changements mentionnés dans ce Bulletin, pages 105 et 108. On trouvera reproduits ci-après les résultats concernant les mois d'octobre, novembre et décembre 1931 [1]).

Dans les trois derniers mois de 1931, la production d'énergie électrique a été de $50 \cdot 10^6$ kWh environ (5,7 %) inférieure à celle du dernier trimestre de 1930. La distribution en Suisse a diminué de $10 \cdot 10^6$ kWh seulement (1,7 %), tandis que les exportations d'énergie accusent un recul de plus de $40 \cdot 10^6$ kWh (16,6 %). Si la livraison d'énergie en Suisse n'est que de peu inférieure à celle de l'année précédente, c'est que la forte diminution de 16 % constatée pour la livraison à l'industrie (y compris les applications chimiques, métallurgiques et thermiques) est en grande partie compensée par une augmentation de 6,4 % des quantités d'énergie livrées aux ménages, agriculteurs et artisans, une autre de 6,6 % de l'énergie livrée aux chemins de fer, une troisième de 11,1 % de l'énergie fournie aux moyennes et petites entreprises.

Verkauf eines Verteilnetzes im Kanton Neuenburg.

Auf 1. Januar 1932 übernahm die «Electricité Neuchâteloise S. A.» das auf neuenburgischem Gebiet gelegene, bis dahin der «Compagnie Vaudoise des Forces motrices des Lacs de Joux et de l'Orbe» gehörige Verteilnetz kaufweise, mit Ausnahme desjenigen von Vaumarcus. Das durch dieses Netz versorgte Gebiet umfasst 13 Gemeinden. Die Energie wird wie bisher von der Compagnie Vaudoise geliefert. Der Kaufpreis beträgt Fr. 1 100 000.—. Die Einnahmen aus diesem Netz betrugen im Jahre 1930 ca. Fr. 500 000.—.

[1]) Voir ce Bulletin, p. 124 à 126.

Aus den Geschäftsberichten bedeutender schweizerischer Elektrizitätswerke.

Aargauische Elektrizitätswerke, vom 1. Oktober 1930 bis 30. September 1931.

Der Energiekonsum hat im verflossenen Jahre $120{,}03 \cdot 10^6$ kWh betragen, gegenüber $118{,}58 \cdot 10^6$ im Vorjahre.

Davon lieferten

	10^6 kWh
die NOK	82,86
das E.-W. Olten-Aarburg	15,63
das K.-W. Rheinfelden	10,13
das K.-W. Röchling der Jurazementfabriken	5,99
der Spinnerei Windisch	2,62
das E.-W. Damsen Wettingen	0,44
Die 3 kleinen eigenen Werke	2,35

Darüber hinaus sind noch ca. $1{,}2 \cdot 10^6$ kWh transitiert worden. Die Leistung sämtlicher zur Erzeugung der Gebrauchsspannung dienenden Transformatoren betrug Ende des Berichtsjahres 55 197 kVA, die momentane Höchstbelastung 25 700 kW.

Vom Ertrag aus den Beteiligungen bei den NOK (11,2 Millionen), Aarewerke A.-G. (0,2925 Mill.), Rheinkraftwerke Albruck-Dogern (2,156 Millionen) abgesehen, betrugen:

	Fr.
Die Betriebseinnahmen inklusive Mieten (darin figuriert der Ertrag der Beteiligungen mit Fr. 889 791.—)	7 353 793
Die Betriebsausgaben und Verwaltungskosten	895 506
Die Ausgaben für Energiebezug	3 987 519
Die Abschreibungen und Einlagen in verschiedene Fonds	1 367 085
Die Passivzinsen	994 519
In die Staatskasse wurden abgeliefert	100 000

Pro erzeugte oder gekaufte kWh betrug der Ertrag im Mittel 5,26 Rp.