

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 39 (1948)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Bedeutung einiger Neustoffe für die Starkstrom- und Hochspannungstechnik  
**Autor:** Caflisch, Ch.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059270>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.05.2025

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

# BULLETIN

## DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

### Bedeutung einiger Neustoffe für die Starkstrom- und Hochspannungstechnik

Vortrag, gehalten an der Isolationstagung des SEV vom 24. April 1947 in Zürich,  
von Ch. Caflisch, Zürich

621.315.616.96

*In diesem Kurzreferat werden die Eigenschaften einer Reihe von neuen Werkstoffen behandelt, und es wird versucht, daraus ihre Bedeutung für die Hochspannungs- und Starkstromtechnik abzuschätzen.*

*Dans ce bref exposé, l'auteur décrit une série de nouvelles matières et essaye d'en dégager l'importance pour la technique des courants forts ainsi que pour la technique des hautes tensions.*

#### I. Einleitung

Es ist nur selten möglich, alle Vorteile grundsätzlich neuer Werkstoffe voll auszunützen, ohne in der Konstruktion und Fabrikation wesentliche Umstellungen vorzunehmen. Deshalb muss man vor ihrer Anwendung die Eigenschaften solcher Werkstoffe genau kennen lernen; die zuverlässigsten Berechnungsgrundlagen erhält man aus physikalisch und chemisch einwandfrei definierten spezifischen Materialkonstanten.

Da ich in der Kürze nicht vollständig sein kann, zeige ich aus den zahlreichen Arbeiten der Materialprüfabteilung der Maschinenfabrik Örlikon nur einige Untersuchungen über die Feuchtigkeitsempfindlichkeit und die obere Grenztemperatur einiger neuer Isolierstoffe, wobei ich die Siliconlacke besonders berücksichtigen werde.

Die erste Bekanntschaft mit solchen Neustoffen wird meist durch irgendein Prospektblatt oder einen Zeitungsartikel vermittelt. Dabei geht der Reklamemann fast immer so vor, dass er Ergebnisse von Betriebsversuchen mitteilt, die ganz sensationelle Ergebnisse gezeigt haben, welche er dann restlos auf die Verwendung des anzupreisenden neuen Werkstoffes zurückführt. Wir Forschungsleute machen immer wieder die Erfahrung, dass es nur sehr selten möglich ist, aus den Ergebnissen von Betriebsversuchen einen Werkstoff seriös zu beurteilen, weil viele andere, kaum beachtete Faktoren für das Resultat des praktischen Versuches entscheidend verantwortlich sind. Zur sicheren kritischen Beurteilung bleibt uns kaum etwas anderes übrig, als in systematischer Kleinarbeit die exakt definierten Eigenschaftswerte zusammenzutragen.

#### II. Einfluss der Feuchtigkeit auf Isolierstoffe

Es wird in diesem Zusammenhang unsere erste Aufgabe sein, abzuklären, auf welchem Wege Feuchtigkeit auf Isolationen einwirken kann. Einfache Überlegungen zeigen, dass wir die Feuchtigkeitsabhängigkeit der Eigenschaften von Isolierstoffen auf nur drei wesentlich verschiedene Erscheinungen zurückführen können:

1. Oberflächenerscheinungen,
2. Sättigung der Isolierstoffe mit Feuchtigkeit,
3. Durchlässigkeit für Wasserdampf.

##### 1. Oberflächenerscheinungen

Bei der näheren Betrachtung der beiden berechneten Isolatoren Fig. 1 sehen wir klar, wie z. B. die Überschlagnspannung von solchen Oberflächeneffekten abhängen kann. Auf dem mit Benzol und Alkohol sauber gereinigten Isolator links zerfließt das

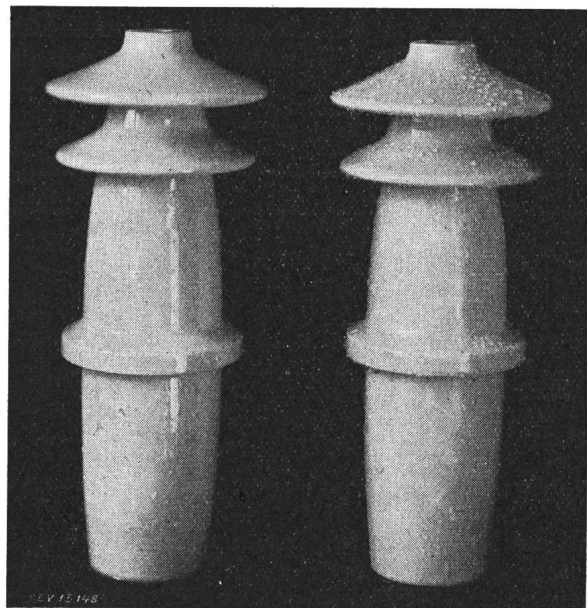


Fig. 1

Berechnete Porzellanisolatoren

links: Isolator mit fettlösenden Mitteln gereinigt  
rechts: Isolator mit Paraffinfilm überzogen

Regenwasser in grossen Flächen. Auf dem anderen zieht sich das Wasser zu Tropfen zusammen, die abkugeln, ohne die Isolatorenoberfläche zu benetzen. Ein kaum sichtbarer Film von Paraffin bewirkt diese starke Veränderung der Form der Wassertropfen und vermag so die Überschlagnspannung unter Regen wesentlich heraufzusetzen.

Die Form der Wassertropfen, die hier eine so grosse technische Bedeutung hat, ist physikalisch durch Messung der Oberflächenspannung der äussersten Schicht des Isolators eindeutig bestimmt.

Es wurde dazu eine Messmethode gewählt, die apparativ sehr einfach ist und deren unmittelbare numerische Resultate mit den in Fig. 1 gezeigten Erscheinungen in anschaulichem Zusammenhange stehen. Wir messen in einem Mikroskop mit horizontalem Tubus und drehbarem Okular mit Fadenzug direkt den Winkel, den die Wasseroberfläche am Rande des Tropfens mit der Isolierstoffoberfläche bildet (Fig. 2).

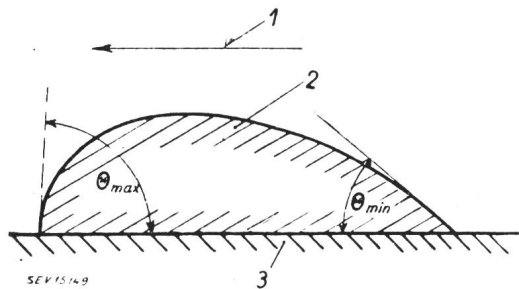


Fig. 2  
Messung des Randwinkels  $\Theta$  von Wassertropfen (schematisch)

- 1 Bewegungsrichtung  
2 Wassertropfen  
3 Isolierstoff

Tabelle I zeigt den maximalen und minimalen Randwinkel bei vordringender, bzw. bei sich zurückziehender Wasserfläche, gemessen auf der technisch sauberen Oberfläche einer Reihe von Isolierstoffen.

Randwinkel von Wassertropfen auf Isolierstoffen  
Tabelle I

| Werkstoff                                       | $\Theta_{\max}$ | $\Theta_{\min}$ |
|-------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Paraffin, techn.rein . . . . .                  | 110             | 95              |
| Polythenfolie . . . . .                         | 100             | 95              |
| Siliconlack DC 993 . . . . .                    | 98              | 85              |
| Öllack schwarz, ofentrocknend . .               | 92              | 85              |
| Isolierlack, härthar . . . . .                  | 90              | 55              |
| Öllack gelb, lufttrocknend . . .                | 85              | 50              |
| Imprägnierwachs (Chlorierte Aromaten) . . . . . | 95              | 40              |
| Bakelitlack, nicht ausgebacken .                | 85              | 35              |
| Glas, sauber . . . . .                          | 0               | 0               |
| Glimmer, frisch gespalten . . .                 | 0               | 0               |

Diese Messungen zeigen, dass ein Wassertropfen auf der Oberfläche aller nicht wasserlöslichen und nicht quellbaren Kohlenwasserstoffe einen grossen Randwinkel hat. Auch die Silicone gehören in diese Kategorie. Bei härthbaren Harzen stellen wir eine leichte Abhängigkeit vom Kondensationszustand fest. Auf anorganischen Isolierstoffen, z. B. Glas, Keramik und leider auch Glimmer, messen wir einen Randwinkel 0, also vollständige Benetzung. Die Grenzflächenenergie Isolierstoff-Wasser ist demnach bei diesen Körpern kleiner als die Energie der Grenzfläche Isolierstoff-Luft. Daraus schliessen wir, dass diese Körper in feuchter Luft immer mit einer mehr oder weniger dicken Wasserschicht überzogen sind, was z. B. durch Messung des

Oberflächenwiderstandes nachgewiesen werden kann.

Bei löslichen und stark wasserabsorbierenden (quellbaren) Körpern sind die Verhältnisse etwas weniger einfach, doch sind hier die Oberflächeneffekte für die elektrotechnische Praxis nicht unmittelbar wichtig.

Wollen wir wasserabstossende Schutzüberzüge in der Technik anwenden, so steht uns eine grosse Auswahl an Stoffen mit genügender Oberflächenspannung zur Verfügung. Der Optimismus sinkt, wenn wir die Gefahr der Verschmutzung in Rechnung setzen, die jeden Schutz illusorisch macht. Ferner spielen auch Alterungserscheinungen, so Zersetzung, Verlieren der Haftfestigkeit und Verdunstung solcher Schutzschichten eine entscheidende Rolle, so dass ich heute zugeben muss, keinen Schutzüberzug für Keramik zu kennen, dem ich im Wetter eine Lebensdauer von mehreren Jahren garantieren könnte. Auch Silicone verhalten sich nicht besser, wie die Hersteller ausdrücklich bestätigt haben.

## 2. Sättigung der Isolierstoffe mit Feuchtigkeit

Eine weit grössere Rolle als die Oberflächeneffekte spielen bei der Einwirkung von Feuchtigkeit auf Dielektrika die Volumeneffekte. Die Feuchtigkeitsempfindlichkeit der technisch so wichtigen Zellstoffdielektrika Preßspan, Baumwollbänder und -Umspinnungen hat schon früh zu einer intensiven Bearbeitung dieses Themas geführt. Diese Körper sind in ständiger, unter Quellung bis 30 % ihres Eigengewichtes Feuchtigkeit aufzunehmen und werden dabei dielektrisch schlecht.

Ich will mich auf eine kurze Zusammenfassung beschränken: Die Kurzzeitdurchschlagfestigkeit sinkt erst bei sehr grossen Wassergehalten merklich. Die zahlenmässigen Ergebnisse sind stark von der Form der Prüfkörper und der Geschwindigkeit des Spannungsanstieges abhängig: Wärmedurchschläge. Die Messung der dielektrischen Verluste erweist sich hier als sehr fruchtbares Kriterium.

Hinsichtlich der Sättigung mit Feuchtigkeit können wir die Isolierstoffe in drei Gruppen einteilen:

1. Isolierstoffe, deren Wasserabsorption nur Bruchteile von Prozent beträgt und deren dielektrische Qualitäten dadurch nicht wesentlich verschlechtert werden. Dazu gehören die Isolieröle, Vergussmassen, reine thermoplastische und härthbare Kunstharze, fast alle Isolierlacke und auch die Silicone. Diese Isolierstoffe können wir als feuchtigkeitsicher bezeichnen.

2. Anorganische Körper, z. B. Glasgewebe, Glimmer und Asbest nehmen scheinbar Wasser auf, und ihre dielektrischen Eigenschaften werden dadurch verschlechtert. Wir haben aber schon gezeigt, dass ein grosser Teil dieses Wassers nur an der Oberfläche gebunden ist. Der folgende Versuch zeigt deutlich, dass fast alle diese Feuchtigkeit nur an der Oberfläche adsorbiert ist: Eine Rolle Glasband nimmt bei Lagerung in einer Atmosphäre von 20 °C und 95 % relativer Feuchtigkeit 3...4 % Wasser auf. Überziehen wir das Glas mit einem Schutzfilm wie den Isolator in Fig. 1, so messen wir eine rund 10mal kleinere Sättigung der Wasseraufnahme. Auch diese Gruppe von Isolierstoffen kann bei geschützter Oberfläche als feuchtigkeitsbeständig bezeichnet werden.

3. Die letzte Gruppe von dielektrischen Werkstoffen vermag unter Volumenvergrößerung wesentliche Quantitäten

ten Wasser zu absorbieren und büst dabei seine dielektrischen Qualitäten ein. Dazu gehören vor allem die wegen ihrer guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften und ihrem relativ niedrigen Preis als Isolierstoffe geschätzten Zelluloseprodukte, so Papier usw.

Kommen wir zurück auf die Silicon-Isolationen und beachten, dass die hohe Verarbeitungstemperatur die Verwendung von Zellulose als Harzträger ausschliesst, so sehen wir deutlich, warum derartige Isolationen so gute Feuchtigkeitseigenschaften zeigen: Die Füll- und Hüllstoffe sind Glas und Glimmer und haben somit, da ihre Oberfläche durch das Harz geschützt ist, keine Veränderung ihrer dielektrischen Eigenschaften durch Feuchtigkeit zu erwarten. Dabei können wir die Silicone durch andere an sich feuchtigkeitssichere Harze ersetzen, ohne Qualitätseinbusse bei mittleren Temperaturen.

Bei oberflächlicher Betrachtung könnte man glauben, die glimmerisolierten Spulen unserer Hochspannungsmaschinen müssten im Widerspruch zu glücklicherweise seltenen Erfahrungen ebenfalls feuchtigkeitssicher sein. Die bequeme Fabrikation erfordert es leider, Baumwollbänder und Papierbahnen mit zu verarbeiten. Die Klebelacke auf Schellackbasis sind ebenfalls nicht einwandfrei feuchtigkeitssicher. Durch Verwendung von Asphalt als Klebelack kann die Feuchtigkeitssicherheit verbessert werden. Asphalt hat schlechte Klebeeigenschaften, und erst 1930, als unser leider kürzlich verstorbener Dr. Boller diese durch Beimischung von Guttapercha verbesserte, gelang die Fabrikation einwandfreier asphaltgebundener Glimmerisolationen.

Diese Betrachtungen zeigen uns, dass sich die Feuchtigkeitssicherheit einer Isolation immer erzwingen lässt. In den meisten Fällen wird es genügen, alle Zelluloseprodukte durch anorganische Stoffe, z. B. Glas und Glimmer, zu ersetzen, oder Folien und Gespinste aus geeigneten Thermoplasten zu verarbeiten. Der daraus resultierende Mehrpreis verhindert eine konsequente Anwendung dieses Rezeptes auf Listenfabrikate.

### 3. Wasserdampfdurchlässigkeit

Es ist naheliegend, Zellstoffisolationen durch Lackierungen vor der Aufnahme von Feuchtigkeit schützen zu wollen. Um zahlenmässige Angaben über die Wirksamkeit eines solchen Schutzes machen zu können, haben wir den folgenden einfachen Versuch angesetzt.

Vorschriftsgemäss ausgebackene Lackfilme wurden nach verschiedenen, häufig etwas heikeln Methoden vom Träger abgetrennt, ohne sie zu schädigen. Diese Filme wurden dann auf zwei gegenüberliegenden Flächen von vorher scharf getrockneten Preßpanklötzen gelegt und an ihrem Rand mit Picein verklebt. Die anderen vier Seiten des Preßspans waren mit Aluminiumblech verschlossen (Fig. 3).

Im Inneren dieser Vorrichtung haben wir eine relative Feuchtigkeit, die vom Wassergehalt des Preßspans abhängt und leicht unter 10 % gehalten werden kann. Stellen wir diese Vorrichtung in einen

Hygrostaten von höherer relativer Feuchtigkeit, so haben wir ein Modell, bei dem zwei Räume mit verschiedenem Wasserpartialdruck durch einen dünnen Film voneinander getrennt werden. Die in Funktion der Zeit gemessene Gewichtszunahme ist

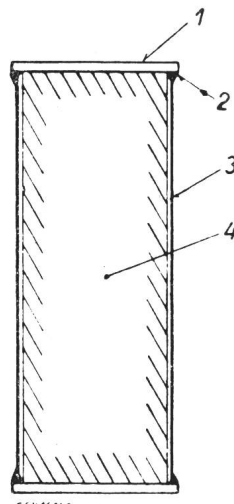


Fig. 3

Messeinrichtung für  
Wasserdampfpermeation  
(schematisch)

- 1 Aluminiumeinfassung
- 2 Vakuumkitt
- 3 Lackfilm
- 4 Preßspan

ausschliesslich auf den Durchgang von Wasserdampf durch den Lackfilm zurückzuführen, denn die Einfassung aus Aluminium und Vakuumkitt ist als wasserdicht zu bezeichnen.

Wiederholte Versuche an gleichartigen Filmen zeigen, dass die durch den Lackfilm hindurchgegangene Feuchtigkeit proportional ist der Fläche des Lackfilmes, der Zeit, der Differenz der Wasserpartialdrucke aussen und innen und ziemlich genau umgekehrt proportional der Dicke des Lackfilmes. Die Temperaturabhängigkeit wurde nicht näher untersucht. Nach dem Gesagten ist es naheliegend, einen Koeffizienten der «Wasserdurchlässigkeit» zu definieren und entweder absolut in  $\text{cm/d}^1$  (Wasserpartialdruck in  $\text{g/cm}^2$ ) auszudrücken, oder anschaulicher die bei einem Feuchtigkeitsgefälle von 95 % relativ auf im Mittel 10 % relativ bei 20 °C durch den Lackfilm hindurchdiffundierte Wassermenge in  $\text{g/d} \cdot \text{cm}$  anzugeben, wie in Tabelle II.

Wasserdampfdurchlässigkeit von Isolierstoff-Filmen  
gemessen in  $10^{-6} \text{ g/d} \cdot \text{cm}$  bei 20 °C zwischen 95 % und 10 %  
relativer Feuchtigkeit

Tabelle II

| Werkstoff                                           | Wasserdampfdurchlässigkeit |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|
| Öllack schwarz, ofentrocknend . . . . .             | 1 ... 3                    |
| Öllack, pigmentiert . . . . .                       | 3 ... 9                    |
| Öllack gelb, lufttrocknend . . . . .                | 5 ... 10                   |
| Folie aus weichgemachtem Polyvinylchlorid . . . . . | 6                          |
| Isolierlack, härtpar . . . . .                      | 8 ... 30                   |
| Siliconlack DC 993 und DC 996 . . . . .             | 30 ... 100                 |
| Polythlenfolie, Lieferant A . . . . .               | 80                         |
| Polythlenfolie, Lieferant B . . . . .               | 1,0                        |
| Polystyrolfolie . . . . .                           | 15                         |

Wir finden grosse Unterschiede auch an sich ähnlichen Körpern bei verhältnismässig grossen Streuungen der Messungen an einem und demselben Lack. Die gemessenen Zahlen hängen stark von

<sup>1)</sup> d ist Symbol für Tag.



der Art der Herstellung der Filme ab. So erhält man z. B. bei langsamem Aufheizen und bei Verarbeitung mit wenig Lösungsmittel kleinere Durchlässigkeit der Lackfilme.

An der Spitze der nach steigender Durchlässigkeit geordneten Tabelle stehen die guten alten Öllacke. Erstaunlicherweise zeigen sowohl die Siliconlacke wie auch das eine Muster Polythenfolie ungünstige Werte. Zu diesen Zahlen bleibt noch zu bemerken, dass Metalle Koeffizienten geben, die einige Grössenordnungen kleiner sind.

Mit diesen Zahlen versehen können wir eine Reihe von Rechnungen durchführen, die uns zeigen, wie gross die «Halbwertszeit» der Befeuchtung von Konstruktionselementen aus hygroskopischen Hüll- und Füllstoffen, z. B. Papier in Maschinen, ist. Wir finden hier Werte zwischen einigen Wochen bei gewöhnlichen Lackierungen bis viele Jahre bei Spezialisolationen für die Tropen, in qualitativer Übereinstimmung mit den Messungen des Isolationswiderstandes in Funktion der Zeit. Aus diesen Messungen und Rechnungen folgt als wesentliches Ergebnis, dass keine der heute bekannten Lackierungen einen vollkommenen Feuchtigkeitsschutz für Isolationen aus Zellstoff darstellt. Nur porenfreie Metallgehäuse haben Halbwertszeiten, die grösser sind als die Lebensdauer der Maschinen, die sie schützen sollen.

Mit diesen drei getrennt behandelten Erscheinungen: Oberflächenspannung, Sättigung mit Feuchtigkeit und Durchlässigkeit der Isolierstoffe, glaube ich alle bei der Einwirkung von Feuchtigkeit auf Dielektrika wesentlichen Zusammenhänge gezeigt zu haben. Vergleichen wir zusammenfassend die Eigenschaften der oben genannten Neustoffe mit den längst bekannten Werkstoffen der Elektrotechnik, stellen wir abschliessend fest, dass eine sprunghafte Entwicklung in der Richtung verbesserter Feuchtigkeitssicherheit nicht stattgefunden hat und in der nächsten Zeit auch nicht zu erwarten ist.

### III. Obere zulässige Grenztemperatur

Ein anderes brennendes Materialproblem der Isoliertechnik ist die obere zulässige Temperatur der Isolierstoffe. Auch hier haben wir verschiedene Mechanismen vollständig getrennt zu behandeln.

#### 1. Chemische Stabilität

Jeder Körper ist bei erhöhter Temperatur chemisch weniger stabil, er altert. Das äussert sich bei nicht kristallinen festen Körpern, was die meisten organischen Isolierstoffe sind, am deutlichsten an Änderungen der mechanischen Eigenschaften, hauptsächlich an einem Abfall der Bruchdehnung.

Kurz zusammengefasst zeigen die zahlreichen Messungen wesentlich folgende Ergebnisse: die meisten organischen Dielektrika oxydieren oberhalb 100...150 °C rasch. Anorganische Gläser kristallisieren bei längerem Verweilen bei höheren Temperaturen gelegentlich aus. Kristalline Körper sind meist stabiler.

Silicone nehmen hier tatsächlich eine Sonderstellung ein. Der Chemiker nennt für DC 993 eine

um rund 90 °C und für DC 996 eine um rund 70 °C höhere zulässige Temperatur als für Zellulose. Die in amerikanischen provisorischen Normen für Silicone vorgesehene Grenztemperatur von 175 °C ist demnach eher vorsichtig gewählt.

#### 2. Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften

Grosse chemische Stabilität bei hoher Temperatur gewährleistet nicht unbedingt die Erhaltung der bei Zimmertemperatur gemessenen guten dielektrischen Eigenschaften. Ihre Temperaturabhängigkeit muss Gegenstand besonderer Untersuchungen sein.

Die Kurzzeitdurchschlagfestigkeit, die gelegentlich zur Beurteilung von Isolationen herangezogen wird, ist in vielen Fällen stark temperaturabhängig. Leider lassen sich daraus keine Schlüsse ziehen, weder auf die Dauerfestigkeit, noch auf den Mechanismus des Durchschlages, so dass diese Methode allein zur sicheren vergleichenden Beurteilung von Dielektrika nicht ausreicht. Die dielektrischen Verluste zeigen deutlich, wenn die Beweglichkeit von freien Ionen und polaren Gruppen im Isolierstoff durch die Erhöhung der Temperatur verändert wird, was bei anorganischen Gläsern und organischen Thermoplasten fast immer der Fall ist.

Als Beispiel sei eine Verlustmessung an zwei mit Siliconlack getränkten Glasgeweben verschiedener Herkunft angeführt: Unter 100 °C messen wir an beiden Mustern Verlustwinkel unter 0,005. Bei 200 °C hat das amerikanische Muster einen  $\tan \delta = 2,7$ , also fast dreimal soviel Verluststrom wie kapazitiven Ladestrom! Am anderen Muster messen wir bei 200 °C  $\tan \delta = 0,012$ , also verhältnismässig sehr kleine dielektrische Verluste. Diese Messungen lassen den Schluss zu, dass eines der beiden Gläser als Isolierstoff oberhalb rund 120 °C nicht mehr zu gebrauchen ist, während das andere, wie auch der Siliconlack befriedigen. Damit habe ich vor allem zeigen wollen, dass Gläser für Isolationen bei hoher Arbeitstemperatur sorgfältig auszuwählen werden müssen.

#### 3. Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften

Da ein technisches Dielektrikum als Konstruktionselement auch mechanische Kräfte zu übertragen hat, ist die Kenntnis seiner mechanischen Eigenschaften bei der Arbeitstemperatur mindestens so wichtig wie die bereits besprochenen Punkte.

Vor allem spielt dabei das Kriechen eine Rolle, und wie beim warmfesten Stahl haben wir eine «Dauerstandfestigkeit» zu bestimmen, für die bei organischen Isolierstoffen gelegentlich der Ausdruck Thermoplastizität gebraucht wird. Dieser Erscheinung müssen wir grosse Aufmerksamkeit schenken, wenn mit Glasisolationen die 120 °C-Grenze überschritten werden soll. Dieses Fliessvermögen ist zum Teil der Grund, warum thermoplastische Kunststoffe in der Starkstromtechnik nur wenig Anwendung gefunden haben.

An einem Beispiel seien die Auswirkungen dieser Thermoplastizität demonstriert und auf eine

der vielen möglichen Messmethoden näher eingegangen. Die mechanische Festigkeit der Isolation von Lackdraht bei hoher Temperatur spielt eine grosse Rolle im Hinblick auf die Betriebssicherheit der Fabrikate bei thermischer Überlast. Um Windungsschlüsse infolge Thermoplastizität der Lackdrähte zu vermeiden, haben wir eine Prüfmethode entwickelt, die erlaubt, mit einfachen Mitteln zu weiche Drahtlackierungen auszuscheiden. Fig. 4 zeigt den Prüfapparat.

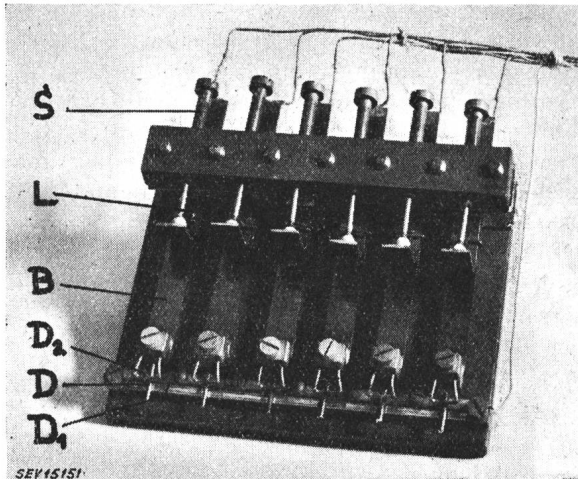


Fig. 4  
Versuchseinrichtung für die Prüfung der Wärmebeständigkeit von Drahtlack  
(Erklärung im Text)

Ein Stummel  $D$  des zu prüfenden Drahtes wird quer zwischen zwei parallele Stahldrähte von 1 mm Durchmesser gelegt. Der eine dieser Drähte  $D_1$  liegt fest auf der Bodenplatte, der andere  $D_2$  ist an einer Blattfeder  $B$  befestigt, deren Federkonstante und Ruhelage mit der Schraube  $S$  und dem Läufer  $L$  in kleinen Grenzen verstellt werden können. Die Federn sind durch Glimmerplatten von der Masse isoliert und liegen über Anzeigelämpchen und Alarmglocke an 40 V Wechselspannung. Der Druckapparat kommt in einen Ofen, in dem die Temperatur konstant gehalten oder mit 10 oder 100 °C/h gesteigert wird.

Sobald die Lackschicht durchgedrückt ist und zwischen den Stahldrähten der Vorrichtung über die Kupferseele des Lackdrahtes metallischer Kontakt hergestellt ist, spricht die Alarmvorrichtung an. Der mittlere Druck in der Auflagefläche zwischen Lackdraht und Stahldraht lässt sich aus der Verbiegung der Feder und der Grösse der Auflagefläche berechnen. Die wahre Grösse der Auflagefläche kann mit dem Mikroskop bestimmt oder für den Moment des Kurzschlusses wie folgt berechnet werden: Unter dem Stahldraht wird Isoliermaterial verdrängt, das am Rand die wahre Berührungsfläche vergrössern hilft (Fig. 5). Durch Gleichsetzen der beiden Lackvolumina 1 und 2 kann die wahre Auflagefläche in hinreichender Näherung berechnet werden, wenn Kupfer- und Aussendurchmesser des zu prüfenden Drahtes bekannt sind.

Die gute Übereinstimmung der Rechnung mit einigen Messungen im Mikroskop bestätigen die

Brauchbarkeit dieses Verfahrens. Zufälligerweise erhalten wir in dieser Messeinrichtung für Drähte mit  $L$ -Isolation nach VSM-Normen der Nenndurchmesser 0,3...2,0 mm einen kritischen Druck, der nur wenig vom Nenndurchmesser abhängig ist, so dass die an Drähten von verschiedenem Durchmesser gewonnenen Zahlen unmittelbar verglichen werden können.

Tabelle III gibt eine Zusammenstellung charakteristischer Resultate dieser Messungen bei laufender Temperatur und nur einem Druck. Dabei wol-

Thermoplastizität von Drahtlacken  
Fliesstemperatur gemessen bei einem mittleren Druck  
von 4 kg/mm<sup>2</sup>

Tabelle III

| Werkstoff                                               | Temperaturanstieg |                |
|---------------------------------------------------------|-------------------|----------------|
|                                                         | 10 °C/h<br>°C     | 100 °C/h<br>°C |
| Ölack, wenig eingebrannt . . .                          | 160...185         | 100...130      |
| Ölack, stark eingebrannt . . .                          | 160...185         | 170...200      |
| Kunsthartzlack A . . . . .                              | 100...140         | 140...180      |
| Kunsthartzlack B . . . . .                              | 140...170         | 140...190      |
| Kunsthartzlack, Spezialsorte . . .                      | über 200          | über 200       |
| Siliconlacke, nach Vorschrift<br>ausgebacken            |                   |                |
| DC 993 auf Cu und Al . . . . .                          | 60... 80          | 100...150      |
| DC 996 auf Cu . . . . .                                 | 90...110          | 120...170      |
| DC 996 auf Al . . . . .                                 | 50... 70          | 80...150       |
| Siliconlacke nach Alterung wäh-<br>rend 48 h bei 280 °C |                   |                |
| DC 993 auf Cu . . . . .                                 | 120...180         | über 200       |
| DC 996 auf Cu . . . . .                                 | über 200          | über 200       |

len wir das Verhalten einiger Arten käuflicher Lackdrähte vergleichen mit im Laboratorium hergestellten Siliconlackierungen. Der zu erwartende Einfluss des Oxydationszustandes bei Ölacken wird deutlich sichtbar bei rascher Steigerung der Temperatur, während bei langsamer Aufheizung der Lack in der Messapparatur aushärtet. Der Kunsthartzlack A zeigt ausgesprochen thermoplastische Eigenschaften und hat deswegen im Betrieb zu Störungen geführt. Die beiden Muster Siliconlacke DC 996 und DC 993 sind, wenn sie nach Vorschrift des Fabrikanten verarbeitet werden, noch stark thermoplastisch. Erst nach starker Wärmebehand-

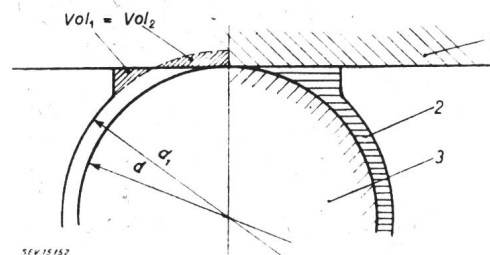


Fig. 5

Berechnung des plastischen Fließens von Drahtlacken

- 1 Stahldraht
- 2 Lackschicht
- 3 Kupferdraht

lung, wobei der Kupferdraht offenbar katalytisch wirkt, erhalten wir die gewünschte Druckfestigkeit; dafür verliert der Lack seine Haftfestigkeit und Bruchdehnung.

Diese stark plastischen Eigenschaften der Siliconlacke wollen bei ihrer Anwendung in der Kon-

struktion berücksichtigt sein; sie können höchstens zum Ausfüllen von Hohlräumen verwendet werden. Die mechanischen Kräfte müssen von Glimmer, Glas oder Asbest aufgenommen werden.

Da bis heute, Irrtum vorbehalten, alle Versuche mit Siliconlackdrähten fehlgeschlagen haben, verdienen einige andere hitzebeständige Drahtisolationen anorganischer Natur erwähnt zu werden: es sind einerseits die amerikanischen «Ceroc», anderseits die längst bekannten anodischen Oxydüberzüge auf Aluminium und die in der Maschinenfabrik Örlikon von Dr. Boller vor bald 10 Jahren entwickelten Phosphatisierungen für Kupferdrähte. Derartige Isolationen sind erheblich billiger als Glasseideumschichtungen und können diese in thermisch hoch, elektrisch aber wenig beanspruchten Wicklungen mit Vorteil ersetzen. Ihre mechanischen und elektrischen Eigenschaften sind verglichen mit den üblichen Drahtisolationen bei Zimmertemperatur mässig bis schlecht, was ihrer weiteren Verbreitung im Wege steht. Gelingt eine wesentliche Verbesserung ihrer mechanischen Eigenschaften bei dicken Schichten, so könnten sie für Hochspannungsapparate eine gewisse Bedeutung

erhalten, denn sie widerstehen der Glimmentladung viel besser als organische Isolationen.

#### IV. Schlussbemerkung

Als wissenschaftlich orientierter Aussenseiter der Elektrotechnik fühlte ich mich verpflichtet, nicht nur die nackten Ergebnisse meiner Arbeit mitzuteilen. Mit Absicht habe ich die Methoden beschrieben und gezeigt, wie man in einzelnen Fällen von den Messergebnissen auf das Verhalten in der Praxis schliessen kann. Mit dieser Auffassung der Materialprüfung, die mit den klassischen Spannungsprüfungen vollständig bricht, lässt sich gelegentlich mit verblüffend einfachen Mitteln der Kern eines Problems erfassen. In diesem kurzen Beitrag habe ich weder in bezug auf die Prüfmethoden, noch in bezug auf die behandelten Materialien vollständig sein können. Immerhin glaube ich, dass wir auf Grund dieser wenigen Versuche ein klares Bild über den heutigen Stand der Silicon-Isolationen erhalten haben.

Adresse des Autors:

Ch. Caflisch, Physiker der Maschinenfabrik Örlikon, Zürich 50.

## Amerikanische Kraftwerkbauten

Von W. Howald, Thalwil

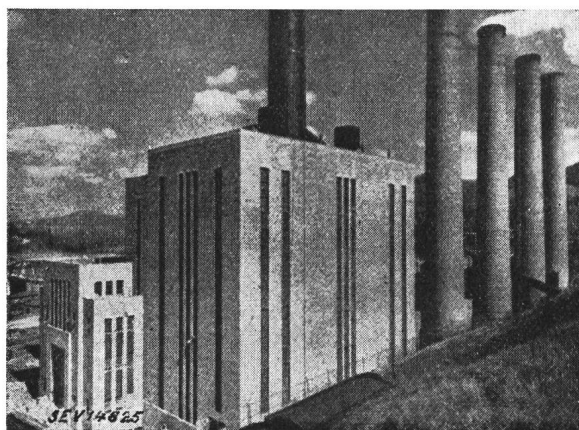
621.311.2(73)

In seinem Vortrag «Starkstromtechnik in Nordamerika» berichtete W. Wanger über die vorherrschenden Tendenzen im Bau der amerikanischen Kraftwerke<sup>1)</sup>. Hier werden an Hand von Bildern einige Ergänzungen zu diesen Ausführungen gemacht.

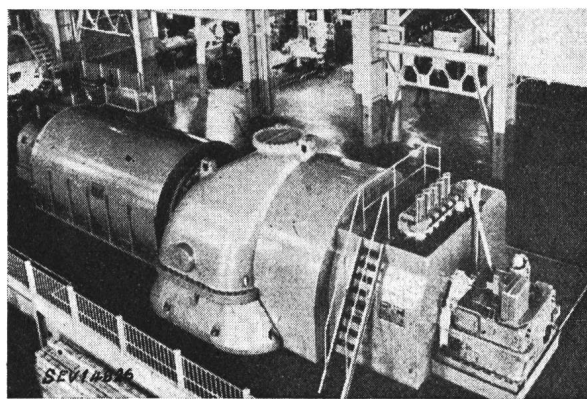
Dans sa conférence sur la technique du courant fort en Amérique du Nord<sup>1)</sup>, M. W. Wanger avait parlé notamment des tendances actuelles dans la construction des usines hydro-électriques américaines. Dans l'article ci-après, l'auteur fournit quelques renseignements complémentaires à ce sujet et présente une nouvelle série d'illustrations.

Der Kraftwerkbau ist in den Vereinigten Staaten von Nordamerika immer seine eigenen Wege gegangen und hat sich teils auf Grund der dortigen Grössenverhältnisse (Leistungen bis über 1 Million

schinengruppen, diese eine oft unvollkommene Materialausnutzung zu Gunsten geringerer Bearbeitungskosten, sowie die ausgesprochene Tendenz zum Freiluftbau (wegen der hohen Maurerlöhne).



a) Gesamtansicht



b) Dampfturbine 118 000 kW und Generator

Fig. 1  
Glen-Lyn-Kraftwerk in West-Virginia

kW pro Kraftwerk), teils nach den Arbeits- und Klimaverhältnissen orientiert. Jene bedingten die sehr grossen Einheitsleistungen der einzelnen Ma-

<sup>1)</sup> siehe Bull. SEV Bd. 38(1947), Nr. 12, S. 323...339.

### 1. Dampfkraftwerke

Dampfkraftwerke werden auch heute noch bei vielen Unternehmungen in der konventionellen Bauart mit Kessel- und Maschinenhaus erstellt;