

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 49 (1958)

Heft: 2

Artikel: Elektrische Eigenschaften von Starkstromkondensatoren

Autor: Meier, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059699>

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: 04.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
 DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS (SEV) UND
 DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Elektrische Eigenschaften von Starkstromkondensatoren

Von K. Meier, Fribourg

621.319.4.027.3

Es werden die praktisch wichtigsten Eigenschaften von Starkstromkondensatoren, nämlich Durchschlagsfestigkeit, Verlustfaktor und Ionisationsverhalten besprochen. Diese Eigenschaften hängen in starkem Masse von den zur Verwendung gelangenden Rohstoffen — Papier und Imprägniermittel —, sowie von der Art der Herstellung ab. Ferner sind sie Funktion der Temperatur, der Frequenz, sowie der Höhe und Dauer der angelegten Spannung. Es werden diese Abhängigkeiten, soweit sie von Bedeutung bei der Abnahme und im Betrieb von Leistungskondensatoren sind, an Hand von Messergebnissen beschrieben.

Exposé des propriétés de condensateurs pour courant fort, qui sont pratiquement les plus importantes: résistance à la perforation, facteur de pertes et comportement en cas d'ionisation. Ces propriétés dépendent dans une grande mesure des matières premières utilisées, telles que le papier et l'imprégnant, ainsi que du mode de fabrication. En outre, elles varient en fonction de la température, de la fréquence, ainsi que de la valeur et de la durée de la tension appliquée. Ces différentes influences sont décrites en se basant sur des résultats de mesures, pour autant qu'elles intéressent les essais de réception et le service des condensateurs de puissance.

1. Die Rohstoffe des Dielektrikums

a) Mineralöle

Die technisch als Isolierflüssigkeiten verwendeten Öle sind ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, deren Hauptgruppen die aliphatischen und zyklischen Kohlenwasserstoffe sind. Beide Hauptgruppen bestehen aus gesättigten und ungesättigten Untergruppen. Dies ist von besonderer Bedeutung bei der Beurteilung der Alterung eines Öles. Unter Alterung versteht man im allgemeinen die chemische Veränderung im Laufe der Zeit (mit oder ohne Anwesenheit eines elektrischen Feldes). Sie besteht bei Luftzutritt in einer Oxydation des Öles und führt zur Bildung von organischen Säuren, Wasser und Schlamm.

Bei hermetisch von der Atmosphäre abgeschlossenen Ölen, die mit organischen Isolermaterialien in Berührung stehen, kann eine Veränderung hauptsächlich dadurch entstehen, dass das Öl gewisse Bestandteile aus den Isolermaterialien herauslöst. Im Betrieb ist auch eine örtliche Überhitzung als Ursache der Alterung denkbar. (Als zulässige Höchsttemperatur wird für die gebräuchlichen Isolieröle etwa 100 °C angesehen.)

Ein Fortschreiten der Alterung kann am deutlichsten an der Zunahme der dielektrischen Verluste gemessen werden; chemisch lässt sich eine Erhöhung der Säurezahl und der Viskosität feststellen.

Für Wechselstromkondensatoren spielt nun aber neben der Alterung noch eine andere Eigenschaft der Öle eine wichtige Rolle, nämlich das sog. Gasverhalten. Darunter versteht man die Fähigkeit, unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes Gase (vor allem Wasserstoff) anzulagern oder abzuspalten. Besitzt ein Öl die Fähigkeit zur Anlagerung,

so wird es gasfest genannt [1]¹⁾. Sein Verhalten bezüglich Ionisation (siehe Abschnitt 4) ist viel besser, als bei einem gasabspaltenden Öl. Leider sind die gasfesten Öle (Öle mit hohem Aromatengehalt) schlecht in bezug auf Alterung und umgekehrt, die gesättigten Naphtenöle, die eine geringe Alterung aufweisen, sind nicht gasfest, so dass bei der Wahl eines geeigneten Kondensatoröles immer ein Kompromiss eingegangen werden muss.

b) Synthetische Öle (Chlordiphenyle)

Die in Amerika unter dem Sammelnamen Askarels bekannten synthetischen Öle (in Deutschland Clophen, in Frankreich Pyralène genannt) setzen sich als Imprägniermittel für Phasenschieberkondensatoren immer mehr durch. Dies ist in der Hauptsache auf drei Eigenschaften zurückzuführen, welche die Chlordiphenyle gegenüber den Mineralölen auszeichnen:

- α) Hohe Dielektrizitätskonstante (4,5...5,5 bei 20 °C);
- β) Vorzügliche chemische Stabilität;
- γ) Flammwidrigkeit.

Die chemische Stabilität, welche die Folge der grossen Energie der Molekülbindung ist, äussert sich darin, dass bei Sauerstoff- und Temperatureinwirkung praktisch keine Veränderungen auftreten. Insbesondere fehlen Säure- und Schlammbildung, ferner verursachen sie keine Korrosion von Metallen und diese wirken ihrerseits nicht auf Chlordiphenyle ein.

Diesen äusserst geschätzten Eigenschaften stehen solche gegenüber, die an sich unerwünscht sind,

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

die aber heute zu keinen Bedenken mehr Anlass geben:

- α) Niedrigere Wärmeleitfähigkeit gegenüber Mineralöl;
- β) Höherer Verlustfaktor als bei Mineralöl;
- γ) Lösungsvermögen von einigen organischen Stoffen;
- δ) Vorhandensein eines Dispersionsgebietes.

Die dritte Eigenschaft ist bedeutungslos, solange bei der Konstruktion der Kondensatoren als Isoliermaterialien nur Papier, Transformerboard und Baumwolle verwendet werden. Bezüglich der vierten Eigenschaft kann folgendes bemerkt werden: Das Dispersionsgebiet ist bedingt durch den polaren Aufbau von chlorierten Ölen (dieser Aufbau bewirkt übrigens die hohe Dielektrizitätskonstante). Das Dispersionsgebiet liegt bei den verwendeten Chlordiphenylen tiefer als 0°C (bei 50 Hz) und lässt sich an einer starken Abnahme der Kapazität und einer bedeutenden Zunahme des Verlustfaktors feststellen (Fig. 1). Gleichzeitig erfolgt bei Tempe-

Zellulose, Lignin und Harzen. Die komplexe Faserstruktur der Zellulose bleibt im fertigen Papier erhalten und verleiht ihm eine ausserordentlich grosse Oberfläche. Diese wiederum ist die Ursache für die Begierigkeit zur Wasseraufnahme, welche auf zwei Arten geschieht: physikalisch in Form von kapillar eingesogenem Wasser und chemisch in Form von an die Glukosemoleküle angelagerten Wassermolekülen (sog. Hydratation).

Die geringsten Feuchtigkeitsspuren verschlechtern die dielektrischen Eigenschaften des Papiers und des imprägnierten Dielektrikums (das Imprägniermittel kann Feuchtigkeit aus dem Papier aufnehmen aber auch abgeben bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat). Eine Entfeuchtung wird am wirkungsvollsten durch Anwendung eines möglichst hohen Vacuums bei hoher Temperatur erreicht. Die obere Grenze für die zulässige Temperatur ist gegeben durch die Tatsache, dass das Papier bei einer Entfeuchtung im Hochvacuum während 10 Tagen bei Temperaturen über 120°C bereits angegriffen wird.

Infolge des komplizierten Aufbaues der einzelnen Fasern und wegen ihrer gegenseitigen Berührung ist die Entfeuchtung ein Vorgang, der auch bei hohen Temperaturen äusserst langsam vor sich geht. Dies wird um so ausgeprägter, je grösser die Dichte (Grad der Satinage) des Papiers ist. Die verwendeten Papiere werden nämlich vom Papierfabrikant in verschiedenen Satinagegraden geliefert. Mit der Dichte ändert sich die Fasermenge pro Volumeneinheit des Papiers. Wären sämtliche im normalen Papier enthaltenen Zwischenräume mit Zellstofffasern ausgefüllt, so hätte das Papier das spezifische Gewicht der reinen Zellstofffaser ($\approx 1,5$). Praktisch kann man einen Wert von max. etwa 1,3 erreichen. Die für Starkstromkondensatoren verwendeten Papiere haben eine Dichte von 1,2 (Satinage A) bis 1,0 (Satinage C). Die ersten haben eine um etwa 15% höhere Durchschlagsfestigkeit als die zweiten, dafür aber auch grössere dielektrische Verluste (s. Fig. 4).

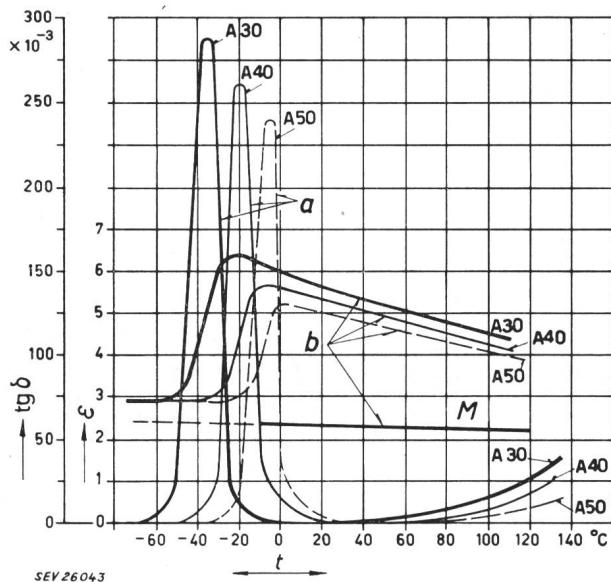


Fig. 1

Verlustfaktor (a) und Dielektrizitätskonstante (b) verschiedener Imprägnierungsmittel in Funktion der Temperatur
 t Temperatur; $\text{tg}\delta$ Verlustfaktor; ϵ Dielektrizitätskonstante;
 A30, A40, A50 Typenbezeichnungen für Clophene; M Mineralöl

raturen unterhalb des Stockpunktes der allmähliche Übergang zum festen Zustand der bis zur Versprödung und Rissbildung führt und einen starken Abfall der Durchschlagsfestigkeit zur Folge hat [2]. Fig. 1 zeigt, dass heute chlorierte Öle erhältlich sind, deren Verlustmaximum auch bei Freiluftkondensatoren ausserhalb der möglichen Umgebungstemperatur liegt.

c) Papiere

Heute werden bei der Kondensatorfabrikation vorwiegend Zellstoff-Papiere (Natronzellulose-Papiere) verwendet, deren Grundmaterial Holz ist. Das Holz wird mittels Chemikalien zu Zellstoff aufgearbeitet. Dieser besteht aus Zellulose und aus zusätzlichen, das Holz begleitenden Stoffen wie Hemi-

2. Die Durchschlagsfestigkeit

a) Gleichspannung

Die Bedeutung der Gleichspannungsprüfung von Starkstromkondensatoren liegt darin, dass sie normalerweise neben der Kapazitätsmessung die einzige verlangte Stückprüfung ist. Sie gibt keine Anhaltspunkte über das dielektrische Verhalten (Erwärmung, Ionisation) eines Kondensators, da keine Beziehung zwischen Gleichspannungs-Durchschlagsfestigkeit und Verlustfaktor besteht.

In Fig. 2 sind die an Kleinkondensatoren gemessenen Werte der Gleichspannungs-Durchschlagsfeldstärke in Abhängigkeit von der Dicke des Dielektrikums dargestellt. Interessant ist das starke Ansteigen der Durchschlagsfeldstärke bei den imprägnierten Wickeln, während bei den getrockneten, unimprägnierten dieser Anstieg nur unbedeutend ist. Dieser Umstand deutet darauf hin, dass der dünne Imprägniermittelfilm zwischen den einzelnen

Papierlagen der Kondensatorwickeln eine wichtige Rolle spielt.

Die in Fig. 2 aufgetragenen Kurvenpunkte sind Mittelwerte aus 10 Messungen. Dabei wurde festgestellt, dass Durchschläge am Rand der Wickel

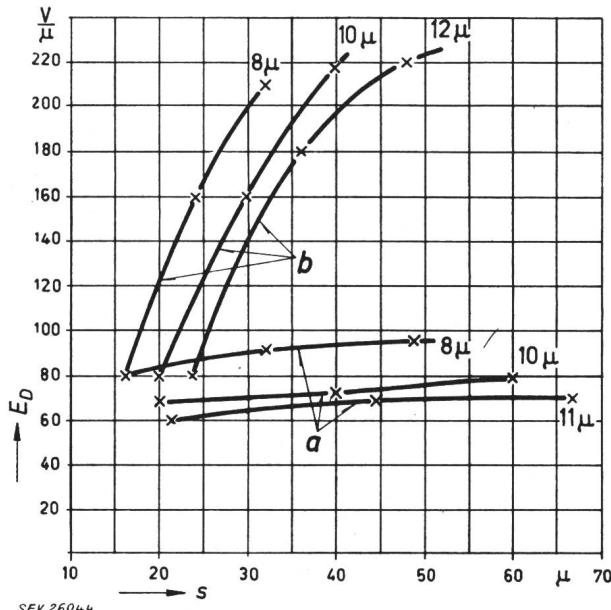


Fig. 2

Gleichspannungs-Durchschlagfeldstärke

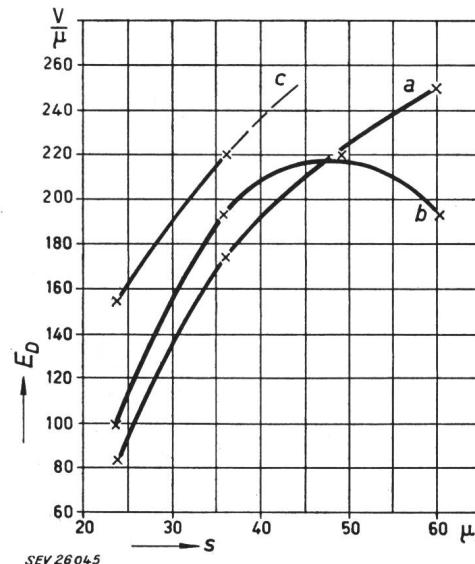
a ofentrockene, unimprägnierte Wickel; b imprägnierte Wickel; E_D Durchschlagfeldstärke; s totale Dicke des Dielektrikums = Dicke einer Lage \times Lagenzahl (die verschiedenen Dicken einer Lage, aus welcher sich das Dielektrikum zusammensetzt, sind neben den Kurven angegeben); \times Messpunkte

(Überschläge treten bei richtiger Dimensionierung nicht auf), d. h. dort wo die Feldstärke am grössten war, nur ausnahmsweise auftraten. Ferner wurde bei den Versuchen eine oft ziemlich grosse Streuung beobachtet, die umso grösser wurde, je weniger Papierlagen vorhanden waren. Diese beiden Feststellungen legen die Vermutung nahe, dass die in jedem Papier vorhandenen leitenden Teile, sowie Verunreinigungen im Papier oder zwischen den Papierlagen für die Durchschlagsfestigkeit von wesentlicher Bedeutung sind. Es soll hier zuletzt noch darauf hingewiesen werden, dass die Kurven in Fig. 2 nur für einen ganz bestimmten Kondensatortyp gelten, weil die dazu verwendeten Papiere (Satinagegrad, Hersteller), sowie die Reinheit des verwendeten Imprägniermittels und das Imprägnationsverfahren die Durchschlagsfertigkeit stark beeinflussen.

b) Wechsel- und Stoßspannung

Es hat sich die Frage gestellt, ob bei Wechselspannungbelastung die bei Gleichspannung festgestellte Abhängigkeit der Durchschlagsfeldstärke von der Lagenzahl erhalten bleibt. Dies war nicht ohne weiteres zu beantworten, musste doch angenommen werden, dass die Spannungsverteilung im Schichtdielektrikum bei Wechselspannung anders ist als bei Gleichspannung. Fig. 3 zeigt die Messresultate für 12 μ dicke Papiere. Als Stoßspannung wurde die Normalwelle 1|50 μ s verwendet, während bei

der Wechselspannung der Spannungsanstieg ungefähr 400 V/s betrug (ein Vorversuch zeigte, dass auch mit einem Spannungsanstieg von nur 200 V/s der gleiche Mittelwert der Durchschlagsspannung ermittelt wurde).

Fig. 3
Durchschlagfeldstärke E_D für 12 μ dicke Papiere

c bei Stoßspannung 1|50 μ s; b bei Wechselspannung (Scheitelwert) Anstieg 400 V/s; a bei Gleichspannung; s Dicke des Dielektrikums

Während die Gleichspannungs-Durchschlagsfestigkeit praktisch zeitunabhängig ist, besteht bei Wechselspannung eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Dauer der einwirkenden Spannung. Je kürzer die Einwirkungsdauer ist, umso höher wird die Durchschlagsspannung. Kurvenmässige Angaben findet man bei Hochhäusler [3]. Es wird auf diese Feststellung im 5. Abschnitt eingegangen.

Die Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Wechsel-Durchschlagsspannung ergab, dass von 20...90 °C eine praktisch lineare Abnahme von ungefähr 20% erfolgt. Bei Gleichspannung erfolgte eine Verminderung der Durchschlagsfestigkeit erst oberhalb von 50 °C, während bei Temperaturen zwischen 20 °C und 50 °C die Durchschlagsfeldstärke dieselbe blieb.

c) Folgerungen für Starkstromkondensatoren

Starkstromkondensatoren haben, sofern sie mit Chlordiphenylen imprägniert sind, eine Betriebsfeldstärke von 12...14 V/ μ . Vergleicht man damit die in den Fig. 2 und 3 angegebenen Mittelwerte der Durchschlagsfestigkeit, so erkennt man, dass eine sehr grosse Sicherheit gegenüber kurzzeitigen Überspannungen vorhanden ist. Diese Sicherheit ist bei Hochspannungskondensatoren (für 2000...8000 V) grösser als bei Kondensatoren für Niederspannung (für 220 und 380 V), weil jene ein Dielektrikum von meistens 4...5 Lagen haben, während diese normalerweise 2- oder 3-lagig ausgeführt werden.

Bezüglich des verwendeten Imprägniermittels kann hier angegeben werden, dass bei Gleichspannung kein Unterschied besteht zwischen Mineralöl-

und Chlordiphenylimprägnation. Bei Wechsel- und Stoßspannungsbeanspruchung dagegen weisen mit Chlordiphenyl imprägnierte Kondensatoren eine durchwegs höhere Durchschlagsfestigkeit auf.

3. Der Verlustfaktor

a) Verluste der Komponenten des Dielektrikums

Der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ eines Dielektrikums wird definiert als Verhältnis des Wirkstromes zum Blindstrom eines mit dem betreffenden Dielektrikum hergestellten Kondensators. Als elektrisches Ersatzschema ergibt sich eine Parallelschaltung von Kapazität und Widerstand, wobei beachtet werden muss, dass dieser Widerstand im allgemeinen frequenz- und spannungsabhängig ist.

Die Verluste von unpolaren Isolier-Flüssigkeiten (z. B. Mineralöl) sind bei Raumtemperatur sehr klein und steigen leicht mit zunehmender Temperatur. Es handelt sich hier um Verluste infolge der endlichen Leitfähigkeit, was dadurch bestätigt wird, dass diese umgekehrt proportional zur Viskosität der Flüssigkeiten sind. Infolge von Alterung usw. tritt eine Ionenvermehrung ein, die sich in einer Vergrößerung der Verluste auswirkt.

Bei den Chlordiphenylen als polaren Flüssigkeiten treten neben den Verlusten infolge Leitfähigkeit noch solche infolge der Polarisation auf. Diese werden mit abnehmender Temperatur grösser und erreichen im Dispersionsgebiet ihr Maximum (s. Fig. 1). Dies ist das Temperaturgebiet, in welchem die Dipoldrehbewegungen infolge der hohen Viskosität stark behindert und schliesslich verunmöglicht werden. Das hat zur Folge, dass die Dielektrizitätskonstante stark absinkt bis zu einem Wert, welcher einer unpolaren Flüssigkeit entspricht.

Auch die Zellulose hat polaren Aufbau, der eine hohe Dielektrizitätskonstante bewirkt und Polarisationsverluste verursacht, die von den Begleitstoffen im Papier (Lignin, Hemizellulose, Harze) noch vergrössert werden.

b) Verluste des imprägnierten Papiers

Die Temperaturabhängigkeit der Kapazität und des Verlustfaktors von trockenem und imprägniertem Papier verschiedener Satinage ist in Fig. 4 dargestellt. Für eine qualitative Beurteilung der Kapazität und des Verlustfaktors des Mischdielektrikums aus den Eigenschaften der Komponenten eignet sich das sehr einfache Seriemodell [4]. Dieses Modell besteht aus der Serieschaltung zweier Kondensatoren, wobei der erste als Dielektrikum sämtliche Papierfasern ohne Zwischenräume enthält und der zweite die Gesamtmenge des im Mischdielektrikum anwesenden Imprägniermittels. Für die Kapazität und den Verlustfaktor dieser Serieschaltung erhält man folgende Formeln:

$$C = \frac{C_p \cdot C_i}{C_p + C_i} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_p \cdot C_i + \operatorname{tg} \delta_i \cdot C_p}{C_p \cdot C_i} \quad (2)$$

$$\text{für } \operatorname{tg} \delta_i \approx 0 : \operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_p \cdot C_i}{C_p - C_i} \quad (2')$$

Die Indizes p und i beziehen sich auf Papier und Imprägniermittel. Wenn man nun in Fig. 4 den Verlauf des Verlustfaktors für unimprägnierte und imprägnierte Papierwickel vergleicht, so sieht man aus dem parallelen Verlauf der entsprechenden Kurven, dass in Gl. (2) die Verluste des Imprägniermittels für den ganzen Temperaturbereich vernachlässigt werden dürfen. Dann zeigt Gl. (2) deutlich die grosse Bedeutung eines möglichst kleinen Verlust-

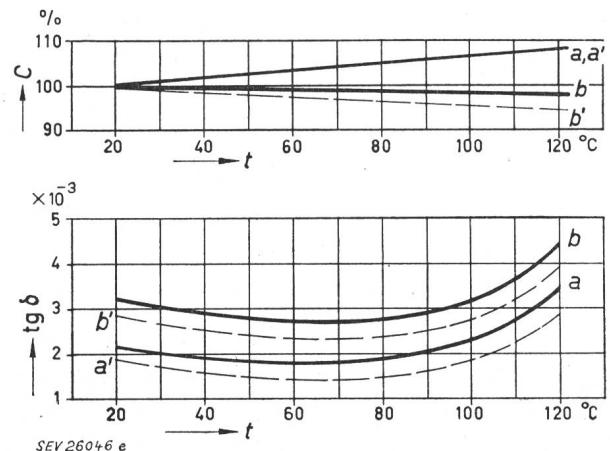


Fig. 4
Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ und Kapazität C von Papieren verschiedener Satinage in Funktion der Temperatur
 a) vakuumgetrocknete, unimprägnierte Wickel, Satinage A
 b) mit Pyralène 1476 imprägnierte Wickel, Satinage A
 a') vakuumgetrocknete, unimprägnierte Wickel, Satinage C
 b') mit Pyralène 1476 imprägnierte Wickel, Satinage C

faktors des Papiers sowie die Tatsache, dass mit Chlordiphenyl imprägnierte Kondensatoren (infolge der höheren Dielektrizitätskonstanten) auch bei bester Trocknung und Entgasung höhere Verluste als mit Mineralöl imprägnierte Kondensatoren haben.

c) Spannungsabhängigkeit der Verluste

In Fig. 5 sind die Verlustfaktoren in Funktion der Temperatur für drei verschiedene Messfeldstärken angegeben. Der Verlauf der Kurven zeigt, dass bei kleinen Messfeldstärken zusätzliche Verluste

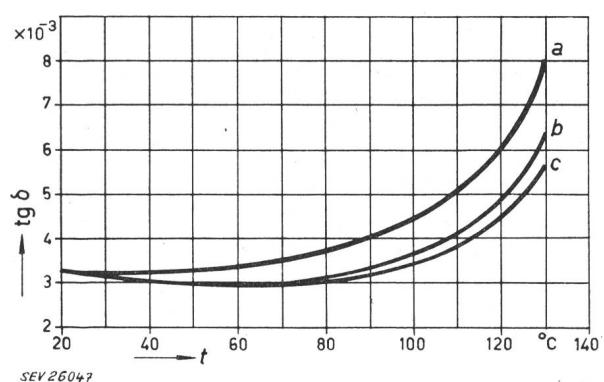


Fig. 5
Temperaturabhängigkeit des Verlustfaktors bei verschiedenen Messfeldstärken eines einwandfreien Kondensators
 Feldstärken: a) 2 V/μ; b) 8 V/μ; c) 14 V/μ

auftreten. Gl. (2) legt die Vermutung nahe, dass in diesem Fall die Verluste im Imprägniermittel nicht mehr zu vernachlässigen sind. Dass dies tatsächlich der Fall ist, hat Liebscher [5] gezeigt. Danach wandern die Ionen im Imprägniermittelfilm zwischen den Papierlagen bei kleinen Feldstärken so langsam, dass sie während einer Halbperiode nicht den ganzen Spalt durchlaufen können. Bei hoher Feldstärke dagegen erfolgt die Bewegung der Ionen so rasch, dass sie bereits nach dem Bruchteil einer Halbperiode den Spalt durchlaufen haben, zur Ruhe kommen und keine Verluste mehr verursachen.

Zur Beurteilung der thermischen Stabilität eines Kondensators genügt die Kenntnis der unter Betriebsfeldstärke aufgenommenen Verlust-Temperaturkurve. Es hat sich jedoch gezeigt, dass eine analoge Kurve, aufgenommen mit sehr niedriger Messfeldstärke, einen wertvollen Hinweis auf den Reinheitszustand des verwendeten Imprägniermittels liefert. Fig. 5 zeigt den Verlauf der Kurven eines einwandfreien Kondensators und Fig. 6 eines solchen,

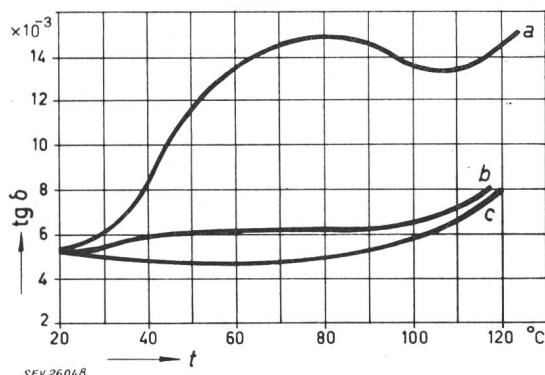


Fig. 6

Wie Fig. 5, aber mit verunreinigten Imprägniermitteln

in dessen Imprägniermittel sich Verunreinigungen aufgelöst haben. Solche Verunreinigungen können entweder bei der Imprägnierungsaufbereitung in dieses gelangt sein, oder während der Erwärmung des Kondensators vom Imprägniermittel aus ungeeigneten Isolermaterialien herausgelöst worden sein. Diese Verunreinigungen vergrössern zwar den Verlustfaktor bei der Betriebsfeldstärke nur unwesentlich, doch muss angenommen werden, dass sie die Lebensdauer der Kondensatoren herabsetzen.

4. Die Erwärmung

a) Wärmeerzeugung und -abgabe

Die in einem Kondensator wirksame Verlustleistung $P_v = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta$ macht sich nach aussen als Erwärmung bemerkbar. Die Wärmeerzeugung findet in den Wickeln statt. Die Zentren der Papierwickel werden dadurch, gegenüber der Behälterwand des Kondensators, eine Übertemperatur annehmen. Diese hat zur Folge, dass sich eine Wärmeströmung von den aktiven Teilen des Kondensators zu den Kesselwänden ausbildet. Die Wärmeströmung bevorzugt dabei den Weg in Richtung der Stirnseite der Wickel. Die Abführung der Wärme erfolgt zum Teil als Wärmeleitung in den Alumi-

niumfolien und zum Teil als Konvektion infolge der Zirkulation des Imprägniermittels.

Sobald sich ein stationärer Zustand eingestellt hat, fliesst pro Zeiteinheit eine konstante Wärmemenge vom Innern des Kondensators an dessen Gehäusewand und wird dort an die Umgebung abgegeben. Findet der Wärmestrom auf diesem Weg einen grossen «thermischen Widerstand» vor, so wird der Temperaturunterschied zwischen Anfang und Ende dieses «Weges» gross werden.

Die Wärmeabgabe an der Aussenfläche des Behälters erfolgt zum Teil durch Wärmestrahlung und zum Teil durch Konvektion der zirkulierenden Luft und kann in folgender Form geschrieben werden:

$$q = \alpha A \cdot \Delta \theta \quad (3)$$

worin q die abgeföhrte Wärmemenge pro Zeiteinheit, A die Oberfläche des Kondensators und $\Delta \theta$ die Über temperatur der Oberfläche des Kondensators gegenüber der Umgebung bedeuten. α ist die Wärmeabgabenzahl, die Strahlung und Konvektion berücksichtigt. Sie ist keine Konstante, sondern steigt leicht mit der Temperatur an; ferner hängt sie stark von Zustand und Farbe der Oberfläche ab. Für Stahlbleche, wie sie in Kondensatorkesseln verwendet werden, wurden folgende ungefähren Werte von α ermittelt:

Glattes Blech vor dem Anstrich

$$\alpha \approx 9 \dots 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Glattes Blech nach dem Anstrich

$$\alpha \approx 11,5 \dots 12,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

b) Temperaturverteilung

Die Temperaturverteilung ist natürlich stark abhängig von der Anordnung der aktiven Teile innerhalb des Kondensatorgehäuses. In Fig. 7 ist die Temperaturverteilung im Innern des Kondensators, nach Fig. 11, angegeben. Bei den Messungen wurden im Innern des Kondensators sowohl zwischen den ein-

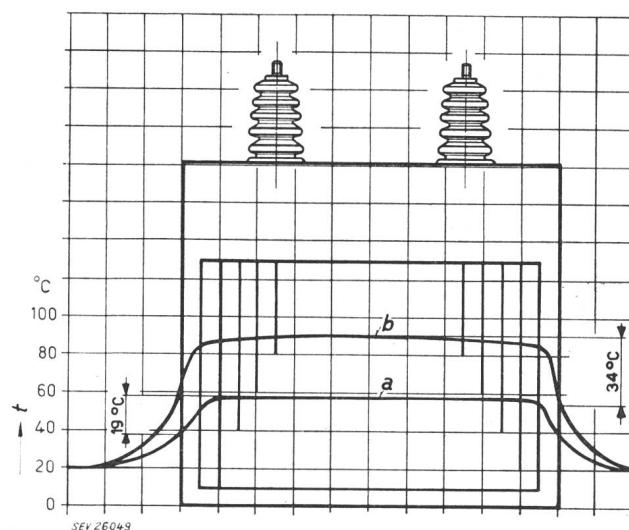


Fig. 7

Temperaturverteilung in einem Kondensator nach Fig. 11 bei zwei verschiedenen Spannungen

a bei einer Spannung von 3000 V; b bei einer Spannung von 4000 V

zelnen Wickeln, wie auch im Innern eines Wickels selbst, Thermoelemente angebracht. Die Außen temperatur am Behälter wurde an Thermometern abgelesen. Dabei zeigte es sich, dass ein grosser Temperatursprung zwischen der Außenfläche des Behälters und dem Imprägniermittel im Innern herrscht, während zwischen dem Imprägniermittel und den aktiven Teilen der Temperaturunterschied nur gering ist.

c) Die Kippleistung

Unter Kippleistung versteht man jene Leistung des Kondensators, bei der seine Oberfläche nicht mehr genügt, um die entwickelte Verlustwärme abzuführen. Es entsteht also kein stabiler Zustand mehr, sondern die Übertemperatur nimmt dauernd

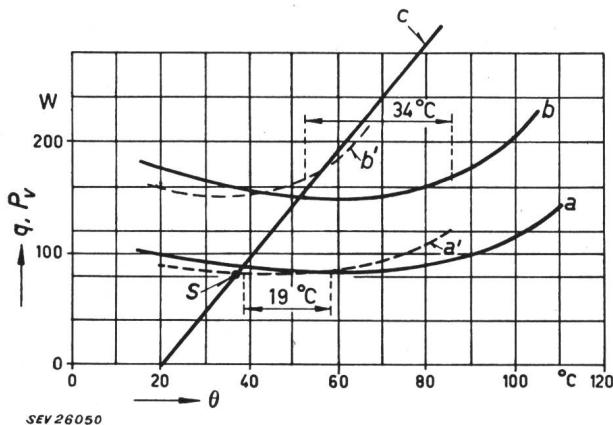


Fig. 8

Erzeugte und abgeföhrte Wärme eines Kondensators

- a Verlustleistung bei 3000 V; b Verlustleistung bei 4000 V;
- c Wärmeabgabe am Gehäuse gemäss Gl. (3); a', b' «verschobene» Kurven von a und b
- q erzeugte und abgeföhrte Wärme; P_v Verlustleistung;
- S Schnittpunkt der Kurven a' und c; θ Temperatur

zu, wodurch der Verlustfaktor und damit die erzeugte Wärme zunehmen und ihrerseits die Übertemperatur vergrössern, usw. bis zum Durchschlag des heißesten Wickels. Man kann die Verhältnisse am besten an Hand von Fig. 8, die für den schon erwähnten Kondensator in Fig. 11 gilt, überblicken. Kurve a stellt die Verlustleistung $P_v = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta$ für eine Spannung von 3000 V in Funktion der Temperatur der aktiven Teile dar. Kurve c ist die von der Behälteroberfläche abgegebene Wärmeleitung. Da nun aber die aktiven Teile gegenüber der Behälteroberfläche eine Übertemperatur von rund 19 °C haben, wurde die Kurve a um diese Temperatur «zurückverschoben», wodurch sich die Kurve a' ergab²⁾. Der Schnittpunkt S der Kurven a' und c ergibt den stabilen Betriebszustand. Die Kurven b und c gelten für den Fall einer höheren Kondensatorleistung (entsprechend der Spannung von 4000 V). Es zeigt sich in diesem Fall, dass ein stabiler Dauerbetrieb sehr fraglich ist. Es genügt eine kleine Erhöhung der Umgebungstemperatur, um das thermische Gleichgewicht zu stören. Messungen des

²⁾ Es handelt sich dabei nicht um eine Parallelverschiebung, weil die einzelnen Punkte je nach der Höhe der Verlustleistung verschoben werden müssen; denn z. B. eine grössere Verlustleistung ergibt einen höheren Wärmestrom und dieser wiederum eine ungefähr proportional höhere Übertemperatur zwischen den aktiven Teilen und der Behälteroberfläche.

Verlustfaktors (Fig. 9) ergaben bereits nach 4...5 h ein leichtes, aber ständiges Ansteigen der Verluste, das darauf hinweist, dass der Kondensator thermisch gefährdet ist.

An Hand oberer Erwägungen ist es möglich, die höchstzulässige Umgebungstemperatur für irgendwelchen Kondensatortyp festzulegen, sobald man den Verlauf des Verlustfaktors in Funktion der Temperatur und den Temperaturunterschied zwischen dem Behälter und dem aktiven Teil kennt.

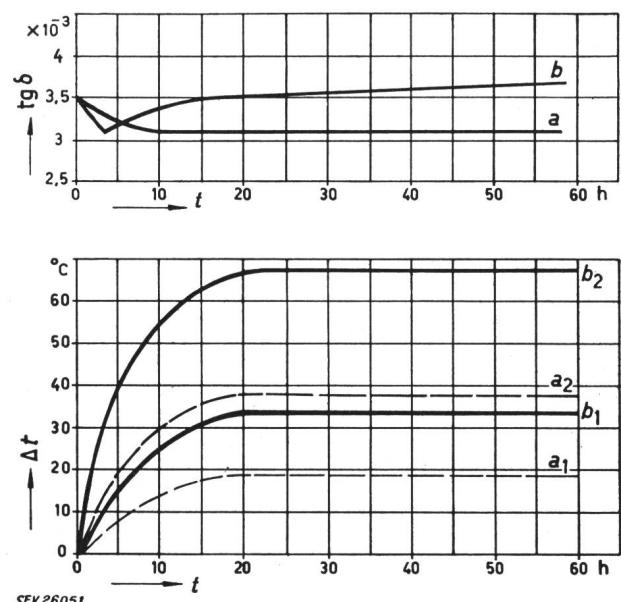


Fig. 9

Übertemperatur Δt und Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ in Funktion der Zeitdauer t , während welcher ein Kondensator unter Spannung steht

- a bei 3000 V Spannung; b bei 4000 V Spannung
- a_1, b_1 Temperatur der Behälterwand; a_2, b_2 Temperatur in den aktiven Teilen; Raumtemperatur ≈ 20 °C

5. Die Ionisation

a) Mineralölkondensatoren

Wenn man bei Phasenschieberkondensatoren den Verlustfaktor in Funktion der Spannung bis weit über die Nennspannung hinaus misst, so erhält man Kurven, die den charakteristischen « $\operatorname{tg} \delta$ -Knick» aufweisen. Dieser liegt bei jener Spannung, bei welcher das Imprägniermittel sich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zu zersetzen beginnt. Diese Zersetzung besteht bei Mineralölen in einer Zertrümmerung der Kohlenwasserstoffe, die sich in einer Wasserstoffabspaltung und nachfolgenden Polymerisation (X-Wachsbildung) der entstandenen ungesättigten Verbindungen bemerkbar macht. Daraus erklärt sich die Bedeutung des im ersten Abschnitt erwähnten Gasverhaltens der verschiedenen Ölsorten, d. h. ihres «Widerstandes» gegen Gasabspaltung.

Das Auftreten des Ionisationsvorganges kann am einfachsten am Aufsteigen von Gasblasen aus den Wickeln beobachtet werden. Das Vorhandensein von X-Wachs kann an Wickeln, die lange der Ionisation ausgesetzt waren, als brauner Niederschlag auf den Papierlagen festgestellt werden. Die Kurve

a der Fig. 10³⁾) lässt erkennen, dass die genaue Bestimmung der sog. Ionisationseinsatz-Spannung, bei der die erste lokale Ionisation des Imprägniermittels erfolgt, sehr schwierig ist. Der tg δ-Knick ist in Wirklichkeit ein flacher Übergang von einer ganz

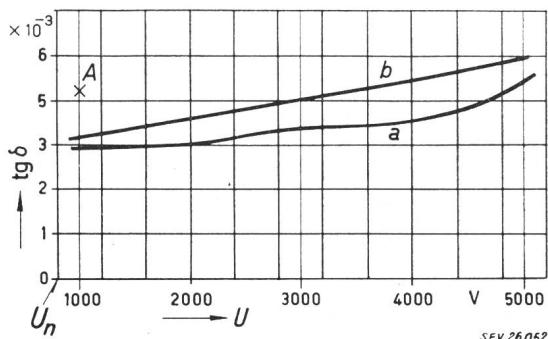


Fig. 10
Verlustfaktor $\text{tg} \delta$ eines Kondensatorwickels in Funktion der
Meßspannung U

Kurve *a* gemessen mit steigender Spannung an neuem Kondensator. *A* Messpunkt bei 1000 V, anschliessend an der Aufnahme der Kurve *a*

Kurve *b* gemessen mit steigender Spannung, 100 h nach der
Aufnahme der Kurve *a*

U_n Nennspannung des Kondensatorwickels (800 V)

leicht ansteigenden Kurve zu einer etwas steilern. Dies hat seinen Grund darin, dass die ersten Ionisationsvorgänge an räumlich kleinen «bevorzugten» Stellen beginnen. Diese Stellen sind jene Punkte im Dielektrikum, die die grösste örtliche Feldstärke aufweisen, also die Ränder der Aluminiumfolien sowie Punkte im Innern wo leitende Verunreinigungen vorhanden sind. Die Ionisationszentren sind räumlich so klein, dass ihr Einfluss auf die Erhöhung des Verlustfaktors des grossflächigen Dielektrikums mit einer üblichen Scheringbrücke nicht festgestellt werden kann. Ein messbarer Anstieg von $\text{tg} \delta$ erfolgt erst, wenn der grösste Teil des Dielektrikums zu ionisieren beginnt oder wenn die Ionisation an den Folienrändern schon weit fortgeschritten ist.

Trotz der Schwierigkeit einer eindeutigen Bestimmung des $\text{tg} \delta$ -Knicks haben die aufgenommenen Kurven des Verlustfaktors in Funktion der Spannung wichtige Erkenntnisse gebracht [6]. Die Ionisationseinsatzfeldstärke von Öl kondensatoren sinkt stark mit zunehmender Dicke des Dielektrikums (weil die Feldstärke an den Folienrändern zunimmt). Sie ist von der Unterteilung des Dielektrikums in Lagen unabhängig und bleibt bei Temperaturen zwischen 20 °C und 50 °C konstant. Zu den bei Liechti [6] angegebenen relativ hohen Werten muss bemerkt werden, dass diese vermutlich an neuen Kondensatoren gemessen wurden. Hopkins, Walters und Soville haben nämlich festgestellt [7], dass bei Öl kondensatoren ein starker Abfall der Ionisationseinsatzfeldstärke am Anfang der Zeitperiode, während der die Kondensatoren an Spannung liegen, erfolgt⁴⁾. Dieser Abfall hängt stark von der ver-

³⁾ Diese Kurve wurde zwar an einem Chlordiphenyl-Kondensator gemessen, es konnte jedoch auf Grund von eigenen Messungen festgestellt werden, dass ihr charakteristischer Verlauf bei Mineralölkondensatoren analog ist.

⁴⁾ Nach einem Betrieb mit 1,5facher Nennspannung, erhöhter Temperatur und einer Prüfzeit von einer Woche konnte bereits ein Sinken der Ionisationseinsatzfeldstärke von 12...50% festgestellt werden.

wendeten Ölsorte und der Güte des Imprägnierverfahrens ab.

b) Chlordiphenylkondensatoren

Über die Vorgänge, die sich in Chlordiphenylen bei hoher Feldstärke abspielen, weiss man bis heute relativ wenig. Es steht aber fest, dass auch bei mit Chlordiphenyl imprägnierten Kondensatoren ein $\text{tg} \delta$ -Knick auftritt (Fig. 10). Bei diesen Versuchen hat es sich im weiteren gezeigt, dass eine Art «Erholung» stattfindet, wenn ein Kondensator, der über die Ionisationseinsatzfeldstärke beansprucht worden ist, eine gewisse Zeit spannungslos bleibt. Ferner darf nach der erwähnten Arbeit [7] angenommen werden, dass bei Chlordiphenylen ein Abfall der Ionisationseinsatzfeldstärke während des Betriebes nicht auftritt.

Die Unsicherheit bei der Feststellung der Ionisationseinsatzspannung mittels Bestimmung des $\text{tg} \delta$ -Knicks hat Anlass gegeben dazu, empfindlichere Methoden zu entwickeln [7, 8]. Diese beruhen auf der Tatsache, dass Ionisationsvorgänge hochfrequente «Glimmströme» erzeugen, welche für die Messung vom Speisestrom getrennt und möglichst hoch verstärkt werden müssen. Mit den entwickelten neuen Methoden wurden auch weitere Erkenntnisse gewonnen: Die Ionisationsfeldstärke ist abhängig von der Satinage des Papiers und zwar hat dichteres Papier (Satinage A) eine leicht niedrigere Ionisationseinsatzfeldstärke als weniger dichtes Papier (Satinage C) [7]; ferner liegt bei Raumtemperatur die Ionisationsfeldstärke von Trichlordinphenyl (A30) höher als diejenige von neuem Mineralöl und diese wiederum höher als jene von Pentachlordinphenyl (A50) [7].

6. Das Betriebsverhalten

a) Überspannungen

Beim Ein- und Ausschalten von Kondensatoren, sowie beim Parallelschalten von Batterien treten Ausgleichsvorgänge auf, welche zu Überströmen und Überspannungen erhöhter Frequenz führen und sehr stark von den Netzverhältnissen und dem verwendeten Schaltmaterial abhängen. Es muss auch immer damit gerechnet werden, dass vereinzelte Schaltspannungen auftreten, die höher sind als die Ionisationseinsatzspannung. Es erhebt sich die Frage, ob dadurch im Kondensator ein bleibender Schaden angerichtet wird oder nicht, zeigt doch Fig. 10, dass eine Möglichkeit zur «Erholung» bei einmal eingetreterener Ionisation vorhanden ist.

Diesbezügliche Untersuchungen wurden an Chlordiphenylkondensatoren von Hopkins, Walters und Soville [7] durchgeführt, die ergaben, dass Überspannungen begrenzter Dauer zulässig sind, weil sie keine Herabsetzung der Ionisationseinsatzfeldstärke verursachen. Je höher aber diese überschritten wird, um so kürzer ist die dazu zulässige Zeit. So kann z. B. einmalig die dreifache Ionisationsspannung während 1 min an einen Kondensator ohne Schaden angelegt werden, während eine Spannung in der Höhe der doppelten Ionisations-

spannung bei einer Einwirkungsdauer von 20 min zu einer Herabsetzung der Ionisationsfeldstärke führt. Ferner wurde festgestellt, dass bei einmal eingetretener Verminderung der Ionisationsfeldstärke der ursprünglich vorhandene Wert unter Umständen wieder erreicht werden kann, wenn der betreffende Kondensator eine gewisse Zeit ausser Betrieb steht. (Es zeigt sich bei diesen Versuchen der Vorteil der neuen Methode zur Bestimmung der Ionisationseinsatzfeldstärke, indem hier die Meßspannung nur bis zum kritischen Wert erhöht werden muss und nicht darüber, wodurch eine Veränderung des Ionisationszustandes durch die Messung verhindert wird.)

Diese Untersuchungen können natürlich nicht sämtliche Bedingungen des praktischen Betriebes erfassen. Es zeigen jedoch die bis jetzt vorhandenen langjährigen Betriebserfahrungen mit Starkstromkondensatoren, dass solche Apparate zuverlässig arbeiten und eine sehr hohe Lebensdauer aufweisen.

b) Verhalten von Chlordiphenylkondensatoren bei tiefen Temperaturen

Starkstromkondensatoren für Freiluftaufstellung müssen auch bei sehr tiefen Temperaturen einwandfrei betrieben werden können. Dazu gehört, dass sie manchmal abgeschaltet werden und sich dabei bis auf die Umgebungstemperatur abkühlen. Es hat sich gezeigt [9], dass bei Chlordiphenyl-Kondensatoren, die auf sehr tiefe Temperaturen abgekühlt waren, beim Wiedereinschalten (und einige Zeit nachher) Schäden aufgetreten sind. Zur Erklärung können zwei Gründe angegeben werden: Der hohe Verlustfaktor im Absorptionsmaximum (s. Fig. 1) und die allmähliche Erstarrung der Chlordiphenyle bis zu einem glasartigen Zustand. Die Kenntnis des Maximums des Verlustfaktors (bei mit Chlordiphenylen imprägnierten Kondensatoren ist der Maximalwert etwas kleiner als bei den reinen Chlordiphenylen der Fig. 1) ist darum von Wichtigkeit, weil beim Einschalten die Erwärmung im Innern der Wickel sehr rasch zunimmt, während deren Aussenseiten noch «eingefroren» sind. Durch die entstehenden mechanischen Spannungen ist eine Beschädigung der äussern Papierlagen der Wickel denkbar. Eigene Schaltversuche an 12 Hochspannungskondensatoren bei Temperaturen etwas unterhalb des Maximums des Verlustfaktors haben jedoch zu keinen Durchschlägen geführt. Die grössere Gefahr scheint demnach in der Erstarrung des Imprägniermittels zu liegen, weil sie zu Hohlräumbildung führt. Hohlräume können sowohl im Imprägniermittel zwischen dem Behälter und den aktiven Teilen als auch im Dielektrikum zwischen den Folien auftreten. Im ersten Fall erweist sich eine Transformer-board-Isolation (s. Fig. 11) als äusserst günstig, indem sie einen Durchschlag gegen das Gehäuse verhindert. Im zweiten Fall muss angenommen werden, dass in den Hohlräumen des Dielektrikums beim Einschalten der Spannung eine Glimmentladung entsteht, die das Papier angreift und darum einen bleibenden Schaden verursacht. Bei den drei in der Hauptsache verwendeten Chlordiphenylen (Tri-, Tetra-,

Pentachlordiphenyl) kann auch eine Rissbildung bei verschiedenen Temperaturen auftreten [2]. Es muss daher bei Freiluftkondensatoren darauf geachtet werden, dass ein Chlordiphenyl gewählt wird, das bei der niedrigsten Betriebstemperatur noch mit Sicherheit zu keiner Riss- und Hohlräumbildung neigt.

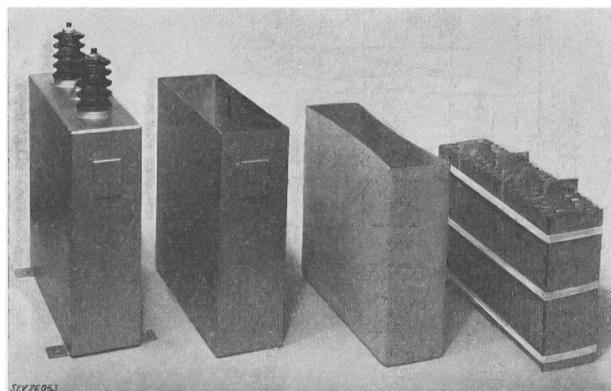


Fig. 11
Hochspannungskondensator der Condensateurs Fribourg S. A.
Nennspannung 3000 V; Nennleistung 25 kVar

7. Schlussbemerkungen

In Abschnitt 6 wurde darauf hingewiesen, dass heute Starkstromkondensatoren hergestellt werden können, die im Betrieb gegenüber Überspannungen sowie gegenüber hohen und tiefen Temperaturen eine ausreichende Sicherheit aufweisen. Bei den mit Mineralöl imprägnierten Kondensatoren muss der Vermeidung von Ionisationsvorgängen im Dielektrikum die grösste Aufmerksamkeit geschenkt werden. Bei mit Chlordiphenyl imprägnierten Kondensatoren hat dagegen die bisherige Erfahrung gezeigt, dass diese viel weniger «ionisationsanfällig» sind. Aus diesem Grunde ist es möglich, die Betriebsfeldstärke etwas höher zu wählen, trotzdem die Untersuchungen über die Ionisationsvorgänge und insbesondere über die Abhängigkeit der Ionisationseinsatzfeldstärke von der Temperatur, der Frequenz und der Dauer der Einwirkung der Spannung auch heute noch nicht vollständig sind.

Aus dem Gesagten ergibt sich die grosse Bedeutung der Verlust-Temperaturkennlinie bei Nennspannung. Die gleiche Kurve, aber bei sehr kleiner Feldstärke gemessen, gibt Auskunft über den Reinheitszustand des verwendeten Materials (vor allem des Imprägniermittels). Die Werte des Verlustfaktors eines einwandfrei hergestellten Kondensators werden in der Hauptsache durch die Verluste des verwendeten Papiers bestimmt.

Wegen der grösseren Dielektrizitätskonstante der Chlordiphenyle gegenüber Mineralöl und wegen der höheren zulässigen Betriebsfeldstärke kann das Volumen von Chlordiphenyl-Kondensatoren bedeutend kleiner gehalten werden. Darum muss bei diesen Kondensatoren der thermischen Stabilität vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dies gilt vor allem für Hochspannungskondensatoren (15...25 kVar), während bei Kondensatoren für Niederspannung, die im allgemeinen kleinere Le-

stungen haben (3...10 kVar), die spezifische Leistung pro Flächeneinheit aus konstruktiven Gründen kleiner ist.

Literatur

- [1] Wörner, Theo: Über die Gasfestigkeit von Isolierölen im elektrischen Feld. ETZ Bd. 72(1951), Nr. 22, S. 656..658.
- [2] Hochhäuser, Paul: Kältebeständigkeit von clophenimprägnierten Kondensatoren. ETZ-A Bd. 77(1956), Nr. 4, S. 101..105.
- [3] Hochhäuser, Paul: Die Verbesserung des Kondensatordielektrikums durch Hochvakuumbehandlung und -tränkung. ETZ Bd. 72(1951), Nr. 11, S. 357..361.
- [4] Coquillion, J.: Condensateurs au papier imprégné de pyralène pour courant alternatif. Facteurs influençant la capacité et les pertes. Rev. gén. Electr. Bd. 61(1952), Nr. 5, S. 205..213.
- [5] Liebscher, F.: Über die dielektrischen Verluste und die Kurvenform der Ströme in geschichteten Isolierstoffen bei