Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 60 (1969)

Heft: 14

Artikel: Kunststoff-Filme in Leistungskondensatoren

Autor: Georg, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916164

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: 13.07.2025

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

Kunststoff-Filme in Leistungskondensatoren

Von *G. Georg*, Zürich

181 - 184

Die bisher bekannten Kunststoffilme sind mit dem Imprägniermittel Chlordiphenyl nicht verträglich, sondern nur mit Mineralöl. Um breite Wickel imprägnieren zu können, ist eine Papierlage hinzuzugeben. In einem Vergleich wird gezeigt, dass ein Dielektrikum aus Film—Papier—Mineralöl einem solchen aus Papier—Chlordiphenyl wirtschaftlich unterlegen ist. Nur bei Mittelfrequenzen besteht eine Ausnahme. Sodann werden die Forderungen entwickelt, die an einen neuen Kunststoffilm zu stellen sind. Dieser ist im Polypropylen gefunden worden. Seine Eigenschaften, insbesondere seine Durchimprägnierbarkeit mit Chlordiphenyl werden geschildert. Da beliebig dünne Filme noch nicht erhältlich sind, ist zur Zeit die Anwendung auf den Hochspannungsbereich 1,2...1,5 kV beschränkt.

Les films synthétiques connus jusqu'à présent ne conviennent pas aux imprégnants à base de chlorodiphényle, mais seulement aux imprégnants à base d'huiles minérales. L'imprégnation des enroulements larges nécessite l'intercalage d'une couche de papier. Une comparaison prouve, que du point de vue économique, un diélectrique film—papier—huile minérale est moins avantageux qu'un diélectrique au papier—chlorodiphényle, à l'exception toutefois des fréquences moyennes. On expose ensuite les exigences imposées à un nouveau film synthétique, exigences assurées par le polypropylène dont on décrit les caractéristiques, et en particulier son pouvoir d'imprégnation avec le chlorodiphényle. Du fait que des films assez minces ne sont pas encore disponibles, leur application se limite pour l'instant au domaine de haute tension de 1,2...1,5 kV.

1. Warum sind Kunststoffilme [1]) bisher nur in kleinem Ausmass in Leistungskondensatoren eingesetzt worden?

Bei der Herstellung kleiner Kondensatoren der Elektronik und der Nachrichtentechnik sind seit längerer Zeit Kunststoffilme in Gebrauch. Derartige Filme lassen sich ausserordentlich dünn herstellen. Allerdings sind ihre Dielektrizitätskonstanten (DK) nicht hoch. Tabelle I gibt eine Zusammenstellung der charakteristischen Daten von Filmen und Imprägniermitteln.

Es erhebt sich die Frage, warum die offensichtliche Überlegenheit in den technischen Daten gegenüber dem aus mehreren imprägnierten Papierlagen aufgebauten Dielektrikum nicht beim Leistungskondensator zur Anwendung kam. Gewichtige wirtschaftliche Gründe müssen vermutet werden.

2. Allgemeine Forderungen an Imprägniermittel

Grundsätzlich muss der Kondensatorwickel eines Leistungskondensators mit einem flüssigen Imprägniermittel imprägniert sein, das im Hinblick auf folgende Eigenschaften ausgewählt wird:

a) *Kapazität:* Einführung einer höheren DK, als sie Luft und Vakuum bieten.

b) *Isolation:* Fernhalten der Luft mit ihrer niedrigen Glimmeinsatzspannung und niedrigen Durchschlagfestigkeit.

c) *Eignung zur Abführung der Verluste:* Abtransport der im Wickel erzeugten Verlustwärme an die Oberfläche des Gehäuses.

d) *Sicherheit:* Beweglichkeit während des Temperaturspieles, so dass bei tiefen Temperaturen keine Spalten entstehen.

Verbreitete Imprägniermittel mit diesen Eigenschaften sind Mineralöle und mehrfach chlorierte Diphenyle. Sie unterscheiden sich in der DK, die z.B. bei Trichlordiphenyl 2,5 mal höher liegt, als bei Mineralöl. Trichlordiphenyl ist allerdings ein chemisch empfindlicher Stoff, der zahlreiche Materialien angreift und selbst sehr leicht Verschmutzungen erleidet, die dann den Verlustfaktor rapid verschlechtern.

3. Verträglichkeit von Imprägniermitteln mit festen Dielektrika

Die oben erwähnten Filme sind alle mit Mineralöl verträglich, jedoch nicht mit Chlordiphenyl. Es ist klar, dass dies wegen der verschiedenen DK der Imprägniermittel für die Wirtschaftlichkeit von besonderer Bedeutung ist.

4. Imprägnierfähigkeit breiter Kondensatorwickel

Grosse Leistungskondensatoren weisen ein besonderes konstruktives Merkmal auf. Scharfe Rationalisierung im Fa-

[1]) Die deutsche Sprache verwendet für sehr dünne Kunststoffblätter das Wort «Folie». Es wird vorgeschlagen, im Kondensatorenbau wie in allen anderen Sprachen das Wort «Film» zu gebrauchen. Im praktischen Betrieb entfällt damit eine Verwechslungsgefahr.

Charakteristische Daten von Filmen und Imprägniermitteln

Tabelle I

Filmmaterial	Physikalische Werte			Elektrische Werte			Relative Preise in der Schweiz [2])	
Verbindung	g/cm³	minimale Dicke µm	Dauer-Temperatur °C	ε [1]) bei 50 Hz	tan δ ‰	ε tan δ [1]) $\cdot 10^{-3}$	pro kg	pro m²
Kondensatorpapier, d. h. Zellulosefaser	1,0	6		6,6			100	100
Polystyrol	1,05	3	80	2,5	< 0,25	0,62	310	330
Polyester	1,4	3,5	130	3,2	< 2,0	6,4	250	350
Polycarbonat	1,2	2	130	2,8	< 0,9	2,5	250	300
Polypropylen	0,9	6	90	2,2	< 0,3	0,66	130...230	117...207
Mineralöl	0,88			2,3			4,8	
Trichlordiphenyl	1,4			5,8			17	

[1]) ε = relative Dielektrizitätskonstante; ε tan δ = Verlustziffer.
[2]) bei Bestellung von 10 µm-Dicken und von 1000 kg.

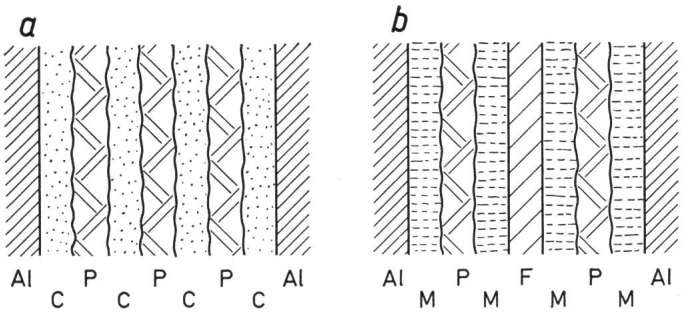

Fig. 1
Bisheriger Aufbau der Dielektrika
a Papier(P)—Chlordiphenyl(C)—Dielektrikum;
b Film(F)—Papier(P)—Mineralöl(M)—Dielektrikum (sog. sandwich);
Al Aluminium

brikationsprozess, in dem die Wickellöhne im Vordergrund stehen, hat zu verhältnismässig breiten Wickeln geführt. Bei den schmalen Wickeln der Kleinkondensatoren mag es möglich sein, im Vakuumprozess die Luft im Wickel abzuziehen und das Imprägniermittel dem Wickelinneren zuzuführen. Werden die Wickel aber breiter — 300 mm und mehr sind üblich — so gelingt es nicht mehr, durch Unterdruck Lufteinschlüsse zu entfernen und durch Kapillarkräfte und bescheidenen Überdruck (hohem Überdruck stehen fabrikatorische Gründe entgegen) das Imprägniermittel in den Wickel einzubringen. Die glatten Flächen von Folie und Film, die zudem unter dem Stapelpressdruck stehen, haften derart aufeinander, dass die obigen Transportkräfte nicht genügen. Der naheliegende Ausweg ist, bei breiten Wickeln Papierbahnen zusammen mit den Filmen einzulegen. In deren Fasergerüst und längs der Oberflächen bestehen dann genug offene Kanäle, so dass der Imprägnationsprozess innert nützlicher Frist abgewickelt werden kann. Damit entsteht der gegenüber dem bisherigen (Fig. 1a) neue Dielektrikumsaufbau (Fig. 1b).

5. Anwendung von Film—Papier—Mineralöl

Bei einem Mischdielektrikum wird angenommen, dass die Teilkapazitäten in Serie geschaltet sind. Daraus ergibt sich bei gleichen Flächen:

$$\frac{d}{\varepsilon_r} = \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\varepsilon_i}$$

worin ε_r die relative Dielektrizitätskonstante, d die Gesamtschichtdicke, ε_i die relative Dielektrizitätskonstante der Teildielektriken und d_i deren Schichtdicke ist.

Korrekterweise wird beim Papier die DK der Zellulosefaser eingesetzt und ihr Dickenanteil aus dem Verhältnis der spezifischen Gewichte bestimmt. Der restliche Flüssigkeitsspalt ist dann beim Imprägniermittel zu berücksichtigen.

In einer Vergleichsrechnung wird angenommen, dass alle Papier- und Filmdicken zusammen 30 µm betragen. Das spezifische Gewicht des Papieres sei 1,0 (Sat. C), als Filmmaterial wird Polystyrol angenommen. Dann ergeben sich als resultierende DK:

Papier-Chlordiphenyl $\varepsilon_r = \approx 6{,}2$
Film-Papier-Mineralöl $\varepsilon_r = \approx 3$

Gleiche Schichtdicken vorausgesetzt, fällt also die DK auf die Hälfte des bisherigen Wertes, d.h. um dieselbe Kapazität zu erreichen, ist das Dielektrikumsvolumen zu verdoppeln. Derart wirken sich also die Einführung eines Kunststoffilmes und der damit unvermeidliche Rückschritt zum Mineralöl aus.

Tabelle I zeigt, dass Mineralöl billiger als Chlordiphenyl ist, Kunststoffilm jedoch viel teurer als Papier. Daraus folgt, dass die Kombination Film—Papier—Mineralöl der Kombination Papier-Chlordiphenyl preislich unterlegen ist. Die Steigerung der Feldstärke im Film wäre ein Ausweg. Dem sind jedoch gewisse Grenzen gesetzt, weil wegen der ähnlichen DK auch im glimmempfindlichen Mineralöl die Beanspruchung gesteigert würde. Es gibt zwar schon heute eine Ausnahme, bei der der Einsatz von Kunststoffilmen nicht zu umgehen ist. Bei Mittelfrequenz-Kondensatoren (bis 10 kHz) werden infolge der hohen Frequenz die Blindleistungen auf engstem Raum konzentriert. Somit ist der Konstrukteur gezwungen, den Verlustfaktor soweit als irgend möglich zu senken. Niedrigste Verlustfaktoren weisen aber einzig die oben genannten Kunststofffilme, insbesondere Polystyrol auf. Darum ist schon seit einiger Zeit das Filmdielektrikum beim Mittelfrequenz-Leistungskondensator zu finden.

6. Anforderungen an einen neuen Kunststoffilm

6.1 Bisherige Beurteilung

Es liegt nahe, dass sich viele Wissenschafter um einen Ausweg bemüht haben. Dass ohne Volumverkleinerung bei den hohen Filmpreisen kein wirtschaftlicher Fortschritt zu erzielen wäre, erschien eindeutig. Insofern sah man den Weg in einer Vergrösserung der DK des Films über den bereits mit Papier-Chlordiphenyl erzielten Wert von 6 hinaus, wobei man sich aber mit wesentlich erhöhten Verlustfaktoren auseinanderzusetzen gehabt hätte. Auch ein Imprägniermittel mit einer im gleichen Verhältnis erhöhten DK ausfindig zu machen, erschien mehr als ungewiss [1] [2]).

Im Wissen um die schliesslich erzielte Lösung ist es möglich, die Forderungen an einen neuen Kunststoffilm auch anders zu definieren.

6.2 Neue Aufgabenstellung

Auf jeden Fall soll mit Chlordiphenyl imprägniert werden. Nun ist in allen Teildielektriken die elektrische Verschiebung εE gleich. Die grösste Feldstärke tritt somit dort auf, wo die DK am kleinsten ist. Das ist in einem Film der Fall, der eine relativ niedrige DK hat. Würde dieser Film eine Feldstärke

$$E_{\text{Film}} = \frac{\varepsilon_{\text{Papier}}}{\varepsilon_{\text{Film}}} \varepsilon_{\text{Papier max}}$$

zulassen, so wird offensichtlich unter voller Ausnutzung des mit Chlordiphenyl imprägnierten Papieres eine verbesserte Volumenausnutzung erzielt, weil die Schichtdicke reduziert oder, was auf dasselbe herauskommt, die angelegte Spannung erhöht werden kann. Wäre der Film durchimprägnierbar, so könnte er an die Aluminiumfolie angelegt werden und eine einzige zwischen den Filmen liegende Papierlage würde ausreichen. Vor allem aber ist nur ein Film sinnvoll, dessen Flächenpreis möglichst niedrig liegt. Dazu bieten Filme mit niedrigem spezifischem Gewicht, die für andere Zwecke in grossen Mengen produziert werden, offensichtlich die besten Voraussetzungen.

7. Polypropylen als neuer Kunststoffilm

Nach umfangreichen Such- und Entwicklungsarbeiten wurde die beste Annäherung an die oben bezeichneten Ziele schliesslich beim Polypropylen gefunden. Obwohl dieses Material erst seit 1957 produziert wird, hat es auf dem Gebiet der

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Verpackungsfolien eine ausserordentliche Verbreitung erfahren. Die Voraussetzung für ein preiswertes Rohmaterial ist also erfüllt.

7.1 Allgemeine Materialeigenschaften

Für den Einsatz als Kondensatorfilm wird die extrudierte Folie biachsial gereckt, was meist durch ebenes Strecken geschieht. Dadurch werden die Molekülketten in eine Ebene gezwungen. Besondere Beachtung muss ferner den Zusätzen im Ausgangsgranulat gewidmet werden. Solche Zusätze sind z. B. Antioxydationsmittel, weil Polypropylen bei höheren Temperaturen, die beim Extrusionsprozess nicht zu vermeiden sind, von Sauerstoff angegriffen wird. Ferner treten Verarbeitungshilfsmittel hinzu, und es bleiben Reste der Polymerisationskatalysatoren zurück.

Wie erfüllt nun das gereckte Polypropylen (PP-Film) die obigen Forderungen?

Es ist mit Chlordiphenyl verträglich, sogar durchimprägnierbar und bis zu ziemlich hohen Temperaturen beständig. Es verträgt hohe Feldstärken ohne zu glimmen. Wie Tabelle I zeigt, ist die Verlustziffer fast so niedrig wie bei Polystyrol. Das spezifische Gewicht ist 0,9 und der Preis liegt viel günstiger als bei allen bisher bekannten Filmarten. Somit ist es möglich, das Dielektrikum der Fig. 2 aufzubauen.

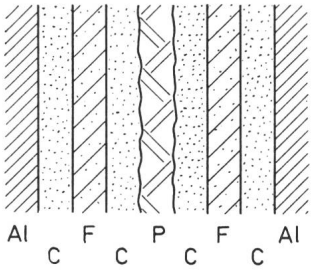

Fig. 2
Neuer Aufbau eines Film(F)—Papier(P)—Chlordiphenyl(C)—Dielektrikums
(sog. inverse sandwich)

7.2 Das Durchimprägnieren

Besonders interessant ist die Durchimprägnierbarkeit des Filmes. Sie wird dadurch erzielt, dass ein geringer Anteil des Polypropylen kurze ataktische Ketten bildet, die eine höhere Löslichkeit aufweisen. Diese kurzen Ketten werden somit im Imprägnierprozess aus dem Kettengefüge des Polypropylen herausgelöst, womit das Chlordiphenyl den gesamten Film durchtränkt. Dies hat den eminenten Vorteil, dass fertigungsbedingte Fehlstellen vom Chlordiphenyl aufgefüllt und «ausgespühlt» werden. Zudem durchdringt das Chlordiphenyl den Film und gelangt in den Zwischenraum zwischen Aluminiumfolie und Polypropylenfilm. Der Zwischenraum wird aufgefüllt, allfällig vorhandene Gasreste werden im Chlordiphenyl gelöst und damit unschädlich gemacht. Diese «Durchimprägnierung» des Polypropylenfilmes ist eine ausgezeichnete Voraussetzung für die Erhöhung der Glimmeinsatzspannung. Es wurde bereits erwähnt, dass dem Polypropylen-Rohmaterial verschiedene Zusätze beigegeben werden müssen oder in ihm noch enthalten sind. Es ist daher notwendig, dem Chlordiphenyl einen geeigneten Zusatz beizugeben, der für die Bindung solcher Fremdionen sorgt, die das Chlordiphenylmolekül aufspalten würden. Dieser Zusatz kommt gleichzeitig dem allgemeinen Schutz gegen Alterungsprodukte und allgemeine Materialunreinheiten zugute. Es gibt über Zusätze eine umfangreiche Patentliteratur, die zu diskutieren hier zu weit führen würde.

7.3 Verlustfaktoren beim PP-Film

Sehr wesentlich und bedeutungsvoll ist der niedrige Verlustfaktor. In Tabelle I ist der Verlustfaktor des trockenen

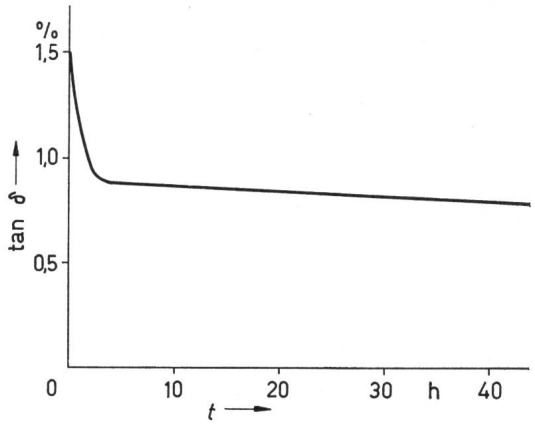

Fig. 3
Reduktion des Verlustfaktors tan δ beim Dielektrikum Polypropylen—Papier-Chlordiphenyl nach erstmaligem Einschalten
Gezeigt an einem Kondensator 150 kvar, 1150 V, Filmanteil 69 %, betrieben bei 1,1 U_n und 45 °C Umgebungstemperatur
t Einschaltdauer

PP-Filmes mit $< 0{,}3$ ‰ bezeichnet. Da wegen der DK-Verteilung in den drei Schichten der Hauptteil der Spannung am Film liegt und dort die grösste Feldstärke auftritt, kann der niedrige Verlustfaktor des Filmes voll ausgenutzt werden. Während der Papierkondensator nicht unter ca. 1,8 ‰ gebracht werden kann, werden beim Filmkondensator anfängliche Verlustfaktoren um 1,2 ‰ gemessen. Neuartig ist, dass nach dem erstmaligen Einschalten der Verlustfaktor sinkt. Nach ein bis zwei Stunden unterschreitet er die 1-‰-Grenze und stabilisiert sich nach einiger Zeit in der Gegend von 0,7...0,8 ‰. Es sind auch schon niedrigere Werte gemessen worden. Fig. 3 zeigt ein Beispiel.

Die Erklärung für diesen «Formierungseffekt» liegt darin, dass die Durchimprägnation des Filmes im Imprägnierprozess nicht abgeschlossen werden kann. Sie läuft im Betrieb weiter. Die im Film eingebetteten Fremdionen der Filmzusätze werden nach und nach erreicht, vom Imprägniermittelzusatz abgebunden und scheiden als Verlustquellen aus. Im weiteren Rahmen wirken an diesem Neutralisierungsprozess alle Oberflächen mit, insbesondere die der Aluminiumfolie. Deshalb lassen sich in kleinem Ausmass derartige Beobachtungen auch schon bei Papierkondensatoren machen.

7.4 Temperaturabhängigkeit der Kapazität bei PP-Film

Sie kann bei Papierkondensatoren durch Änderung des spezifischen Gewichtes des Papieres gesteuert werden, allerdings auf Kosten des Verlustfaktors. Bei Hochspannungskondensatoren mit ihren niedrigen Volumina pro Leistungseinheit sind aber niedrigste Verlustfaktoren unerlässlich, da sonst hohe Wickeltemperaturen den Alterungsprozess ungünstig beeinflussen, eventuell sogar die thermische Stabilität der Kondensator-Einheit gefährdet ist. Bei einem solchen Papierkondensator, dessen Papier ein spezifisches Gewicht von ca. 0,8 g/cm³ aufweist, ist der Temperaturbeiwert der Kapazität $-900 \cdot 10^{-6}$ pro °C. Beim Filmkondensator werden etwa $-700 \cdot 10^{-6}$ pro °C gemessen. Dieser Wert liegt also besser, kann aber kaum gesteuert werden.

7.5 Glimmeinsatz bei PP-Film

Wird mit Mineralöl imprägniertes Papier Spannungsbeanspruchung unterworfen, so lädt die hohe DK der Zellulosefaser die elektrische Beanspruchung auf die glimmempfindliche Ölschicht ab. Filme, deren DK kaum vom Öl abweichen, was be-

sonders bei Polypropylen zutrifft, lassen einen Glimmeinsatz erst bei höherer Spannung erwarten. Noch besser werden die Verhältnisse beim Imprägniermittel Chlordiphenyl, dessen DK in der Nähe der Papierfaser liegt und ein Mehrfaches des Filmes beträgt. Somit liegt der Hauptteil der Spannung am Film und nur ein kleiner Anteil am Chlordiphenyl und der Papierfaser. Bis bei Spannungssteigerung im Chlordiphenyl in kleinen Gasblasen Glimmen einsetzt, sind im Film bereits hohe Feldstärken erreicht worden. Die aus wirtschaftlichen Gründen anzuwendende hohe Feldstärke im Film ist also zulässig. Die Glimmeinsatzfeldstärke liegt in weitem Abstand darüber. Gemessene Glimmeinsatzspannungen über dem Doppelten der Nennspannung sind keine Seltenheit.

7.6 Lebensdauerfragen bei PP-Film

Die mittlere Lebensdauer t_L einer Gruppe gleichwertiger Kondensatoren hängt vor allem von zwei bestimmenden Grössen ab, der elektrischen Feldstärke E und der Temperatur T des Dielektrikums. Im interessierenden Temperaturbereich 60...90 °C ist bereits die Gültigkeit eines Potenzgesetzes nachgewiesen worden.

$$t_L = \left[\frac{\text{Konst.}}{E\,T}\right]^n$$

Für Papier-Chlordiphenyl Dielektriken ist an einer sehr grossen Zahl von Kleinkondensatoren über lange Zeiträume ein Wert des Exponenten von 7,7 ermittelt worden [3]. Gleich umfangreiche Arbeiten liegen für Film—Papier—Chlordiphenyl noch nicht vor, doch zeigen die bisherigen Versuchsreihen, dass der Exponent sinkt und sich offensichtlich zwischen 5 und 6 bewegen dürfte. Bei der Wahl der Nennfeldstärke ist sorgfältig zwischen dem Glimmeinsatz bei niedrigen Umgebungstemperaturen, der Durchschlagfestigkeit, allfälligen Schaltbeanspruchungen und den Alterungsrelationen abzuwägen. Ferner hat man wie bisher für eine thermisch möglichst günstige Gestaltung des konstruktiven Aufbaues zu sorgen. Die unter diesen Umständen angesetzten Versuchsreihen zeigen gegenüber dem Papier—Chlordiphenyl-Dielektrikum ein verbessertes Alterungsverhalten und bestätigen den kleineren Exponenten.

7.7 Beschränkung des PP-Filmes auf Hochspannung

Es ist eine Erfahrungstatsache, dass wesentliche technische Weiterentwicklungen sogleich ihre Einschränkungen mit sich bringen. Solche sind bei der Dimensionierung die Begrenzung der Nennspannung des Dielektrikums auf 1,2...1,5 kV. Dies folgt daraus, dass Filmdicken unter 10 µm praktisch nicht erhältlich sind. 6 und 8 µm werden zwar in beschränkter Menge gefertigt, sind aber in absehbarer Zeit zu vertretbarem Preis noch nicht zu beschaffen. Da aus Preis- und verarbeitungstechnischen Gründen die Dicke der Papierlage auch nicht beliebig gesenkt werden kann, sind dem Spannungsbereich Grenzen gesetzt. Somit ist der PP-Film-Kondensator zur Zeit dem Einsatz bei Hochspannung 1,2...1,5 kV und Vielfachen davon vorbehalten. Der Vorteil zeigt sich aber sogleich, indem für 1,2 kV gegenüber den jetzt einzusetzenden 30 µm beim Papierkondensator 60...70 µm gewählt werden müssen. Die Volumenreduktion ist eindrücklich.

7.8 Wirtschaftlichkeit des PP-Filmkondensators

Es ist nicht leicht zu zeigen, wie sich die Kostenlage entwickelt, wenn eine Fertigung von Filmkondensatoren aufgenommen wird. Die Anzahl der Einflussgrössen ist nicht unbeträchtlich. So sind Filmpreise und Filmqualitäten der wenigen Hersteller noch unterschiedlich. Die Filmdicken, ebenso wie die Papierdicken mit ihren unterschiedlichen Preisen beeinflussen die Wahl der Nennspannung. Das Wickeln von Filmkondensatoren ist etwas aufwendiger, weil sich der glatte Film nicht so gut handhaben lässt wie Papier, und die Filme in unterschiedlicher Rollengüte angeliefert werden. Ein wesentlicher Kostenschlüssel liegt endlich beim Imprägnierprozess.

Generell kann gesagt werden, dass eindrückliche Kosteneinsparungen in der Fertigung noch nicht zu erzielen sind. Dies zwingt dazu in jedem Fall den prozentualen Anteil des Filmes an der Dielektrikumsdicke hoch anzusetzen (60...70 %) und die Feldstärke im Film so hoch als zulässig zu wählen. Wird die letztere nicht voll ausgenutzt, so sinkt die Volumenleistung sehr schnell, da die Leistung dem Quadrat der Feldstärke proportional ist, und der Preis des Papierkondensators wird erreicht oder sogar überschritten.

Die Vorteile der Filmtechnik liegen zur Zeit eindeutig beim betriebsmässigen Einsatz. Ein praktisches Beispiel soll zeigen, welchen wirtschaftlichen Fortschritt ein Film-Kondensator gegenüber einem Papier-Kondensator bedeuten kann. Vorausgesetzt wird in einem Unterwerk eine Kondensatoren-Batterie 16 kV, 5 Mvar, die parallel zu den Abgängen angeschlossen ist.

7.8.1 Kleinere Verluste. Pro kvar sinken die Verluste von 1,9 auf 0,7 W. Bei der gewählten Batterie sind dies 6 kW Verlusteinsparung. Wird mit 6000 jährlichen Betriebsstunden und einem Energiepreis von 0,03 Fr./kWh gerechnet, so führt dies zu verminderten Energiekosten von Fr. 1080.—. Mit 6 % kapitalisiert, entspricht dies einem Investitionsbetrag von 18000 Franken.

Die kleinere Verlustleistung verringert die Inanspruchnahme der im Netz installierten Leistungen. Wenn die Investitionskosten für Erzeugung, Transport und Transformation der

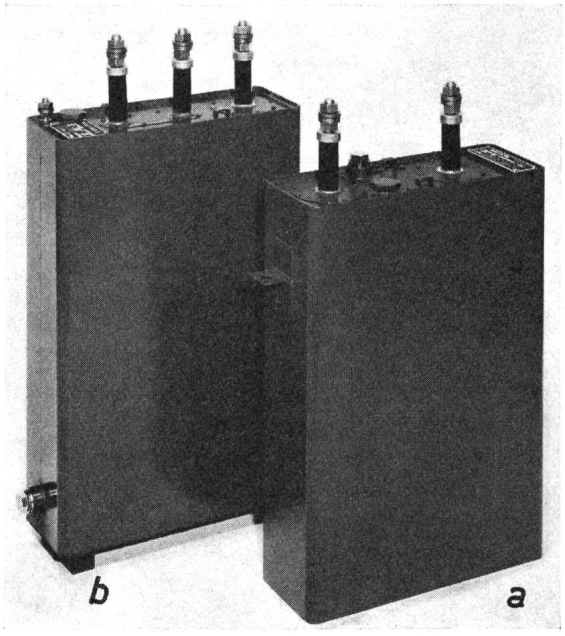

Fig. 4
Vergleich zwischen einer Hochspannungseinheit der Papier—Chlordyphenyl-Technik *(a)* **und der Film-Papier-Chlordyphenyl-Technik** *(b)*
a Papierkondensator 50 kvar, 6300 V, Innenraum, für Betatron, 21,6 Lit.
b Filmkondensator 100 kvar, 3 × 6600 V, Innenraum, gekapselt, 23,8 Lit.

elektrischen Energie mit Fr. 600.— pro kW niedrig angesetzt werden, ergibt sich eine Einsparung von Fr. 3600.—.

7.8.2 Kleinere Temperaturabhängigkeit der Kapazität. Im Bereich der allgemein massgebenden Umgebungstemperaturen +20...+40 °C stellt sich bei gleicher Ausgangskapazität eine durchschnittlich 1,5 % grössere Kapazität ein. Dieser Gewinn ist auf den kleineren Temperaturbeiwert und die infolge der niedrigeren Verlustfaktoren niedrigere Wickeltemperatur zurückzuführen. Wird der Wert der gesamten Batterie mit Fr. 123000.— angenommen, so bedeutet dies einen Mehrwert von Fr. 1800.—

7.8.3 Kleineres Volumen und Gewicht: Detaillierte Berechnungen führen hier zu weit, sie lassen sich aber mit Fr. 5500.— Einsparungen abschätzen.

8. Zusammenfassung

Bei einer an Freiluft fertig installierten Kondensatorenbatterie von 16 kV, 5 Mvar, im Wert von Fr. 123000.— bedeutet der Einsatz von Film-Kondensatoren gegenüber den bisherigen Papier-Kondensatoren einen Mehrwert von 28900 Franken oder 22 %. So kann es nicht überraschen, dass in den USA, wo die Entwicklung von Filmkondensatoren schon sehr weit fortgeschritten ist, sich diese in grossen Mengen im regulären Einsatz befinden und täglich neue hinzukommen.

Fig. 4 zeigt den Vergleich zwischen einer Hochspannungseinheit der Papier—Chlordiphenyl-Technik, die übrigens für das derzeit energiereichste Betatron für Strahlentherapie an das Kantonsspital in Zürich geliefert wurde, und einer Hochspannungseinheit der Film—Papier—Chlordiphenyl-Technik im regulären Netzeinsatz.

Literatur

[1] *W. Held:* Fortschritte beim Bau von Leistungskondensatoren. ETZ-A 83(1962)9, S. 307...311.

[2] *F. Liebscher* und *W. Held:* Kondensatoren. Dielektrikum, Bemessung, Anwendung. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1968.

[3] *W. Held* und *W. Rolvien:* Alterung und Lebensdauer von Leistungskondensatoren. Bull. SEV 58(1967)23, S. 1043...1054.

Adresse des Autors:
G. Georg, dipl. Ing. ETH, Micafil AG, Postfach, 8048 Zürich.

93

Auf diesem Schwingtisch im Zentral-Laboratorium der Siemens AG können Bauteile und auch ganze Geräte bis zu 10 000 Schwingungen pro Sekunde ausgesetzt werden. Damit lassen sich Belastungen bis zum Hundertfachen der Erdbeschleunigung (= 100 *g*) erreichen. Der Schwingtisch arbeitet nach dem Lautsprecher-Prinzip. Gegen den dabei entstehenden Lärm müssen sich Ingenieure und Assistentinnen mit einer kopfhörerähnlichen Konstruktion schützen.