Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 3

Artikel: Die Bedeutung der Wahl des Imprägniermittels für die Konstruktion und die Anwendung von Kondensatoren

Autor: Boyer, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916678

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: 25.12.2025

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

Die Bedeutung der Wahl des Imprägniermittels für die Konstruktion und die Anwendung von Kondensatoren

Von *P. Boyer*, Fribourg

621.319.4 : 621.315.61

Die Darstellung des Prinzips und der verschiedenen Gesichtspunkte der Imprägnierung wird als eine unentbehrliche Einführung in diese allgemeine Orientierung angesehen. Es wird grundsätzlich gezeigt, dass die Imprägniermittel mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften auf das Verhalten der Kondensatoren einen entscheidenden Einfluss ausüben, und dass ihre Wahl schlussendlich nicht richtig erfolgen kann, ohne die genauen Verwendungsbedingungen zu kennen. Oft hängt diese Wahl des Imprägnierungsmittels stark von der Vollständigkeit und Genauigkeit der vom Verbraucher dem Kondensatorenkonstrukteur zur Verfügung gestellten Angaben ab.

La connaissance des principes de l'imprégnation associé à celle des diélectriques de base et des agents d'imprégnation constitue les rudiments absolument indispensable à la construction correcte et systématique des condensateurs. Le choit approprié des agents d'imprégnation dépend essentiellement des conditions d'utilisation et des types de condensateurs. L'utilisateur avisé s'appliquera donc à informer le constructeur de condensateurs le plus soigneusement et le plus exactement possible. Ce dernier, en tenant naturellement compte de différents facteurs plus ou moins critiques pourra par conséquent opter en toute objectivité pour la solution réellement la plus satisfaisante.

(Übersetzung)

Eines der wichtigsten Konstruktionselemente von Kondensatoren sind die darin verwendeten Imprägnationsdielektrika. Durch kompetente Fachleute wurden darüber schon oft Abhandlungen verfasst, die mit den Erfahrungen und Versuchen gut übereinstimmten, aber ebenso oft wurden von Verbrauchern Urteile gefällt, die auf Vorteilen oder allzu schematischen Ansichten fussten. Aus dieser Situation heraus, die sicher zum Teil auf ungenügende Information oder schlechte Erfahrungen zurückzuführen sein dürfte, ist der Wunsch entstanden, mit einer möglichst objektiven Orientierung zu einer Übereinstimmung der Ansichten von Kondensatoren-Verbrauchern und -Herstellern beizutragen. Diese Orientierung wird unvermeidliche Lücken, vor allem durch die Vielschichtigkeit der Materie bedingt, aufweisen.

Trotz der möglichst umfassenden Behandlung der Imprägnation werden gewisse Kondensatorentypen nur beiläufig erwähnt werden: jene Konstruktionen, die kein Imprägniermittel benötigen und trotzdem kein im Innern oder in Luft oder Gas verlaufendes unerwünschtes Feld aufweisen. Man kann dies durch konstruktive Massnahmen erreichen, wobei zu dieser Gruppe z. B. Keramikkondensatoren, Kondensatoren mit metallisierten oder nicht-metallisierten synthetischen Folien, Metallack-Kondensatoren und auch Elektrolytkondensatoren gehören. Bei diesen ist der Elektrolyt nur insofern ein Teil des Dielektrikums, soweit er zur Aufrechterhaltung und Erneuerung der Oxydschicht, als eigentlichem Dielektrikum, dient.

1. Prinzip und Gesichtspunkte der Imprägnation

Die Imprägnations-Dielektrika können sowohl auf die mechanischen, thermischen und vor allem elektrischen Eigenschaften, wie auch auf die Lebensdauer der Kondensatoren einen bestimmenden Einfluss ausüben. Ihre Rolle ist deshalb ebenso wichtig wie diejenige des Basis-Dielektrikums selbst. Der in Fig. 1 dargestellte schematische Schnitt eines Kondensators im imprägnierten und nicht-imprägnierten Zustand zeigt das Prinzip und den Zweck der Imprägnation. Im nicht-imprägnierten Zustand ist die Qualität des durch Aufeinanderschichten oder Wickeln von Belägen mit einer oder mehreren Isolier-Lagen (Basis-Dielektrikum) erhaltenen Kondensators noch durch Feuchtigkeitsspuren, die je nach Betriebsbedingungen in den Zwischenräumen kondensieren können, beeinträchtigt; ferner sind Luft- oder Gaseinschlüsse in Blasen-, Schicht- oder Blättchenform feststellbar. Mit der Imprägnierung, welcher normalerweise das Trocknen mit einer bestimmten Temperatur und unter einem gewissen Druck vorangeht, bezweckt man die vollständige und dauernde Entfernung aller Instabilitätsursachen, wie Feuchtigkeitsspuren und gasförmiger Einschlüsse.

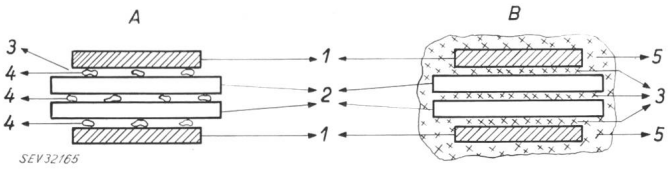

Fig. 1

Schematischer Schnitt durch einen Kondensator

A Im nicht imprägnierten Zustand; *B* Im imprägnierten Zustand; *1* Metallischer Belag (Elektrode, Armatur); *2* Basis-Dielektrikum (fest); *3* Zwischenräume; *4* Luft- oder Gasblasen; *5* Imprägniermittel

Das Dielektrikum des Kondensators ist demnach die Resultierende aus der Verbindung von zwei oder mehreren Isolierschichten, in festem, halbfestem, zeitweise festem oder flüssigem und seltener gasförmigem Zustand. Die Formen dieser Verbindung hängen, unter einem gewissen Gesichtswinkel betrachtet, von der Imprägnierbarkeit des Basis-Dielektrikums ab. Dieses ist imprägnierbar, wenn seine Struktur porös und durchlässig ist (Papier und andere analoge Isoliermaterialien); es ist nicht-imprägnierbar, wenn dessen Struktur relativ kompakt ist (immerhin unter der Annahme einer geringen, praktisch unvermeidbaren Porosität).

2. Imprägnierbare Basis-Dielektrika

Das Papier ist der wichtigste Vertreter der imprägnierbaren Dielektrika. Seine Zusammensetzung und sein Verhalten in einem elektrischen Feld, gleich welcher Art, bedingen normalerweise eine Imprägnierung. Die Anwendung eines Imprägniermittels bringt aus folgenden Gründen mehr Vor- als Nachteile:

a) Bessere Ausnützung der relativ hohen Dielektrizitätskonstante (5,6...6,6) durch die Imprägnation; Vergrösserung der Permittivität des imprägnierten Papiers durch entsprechende Wahl des Imprägniermittels und der Papierdichte. Dieser Vorteil ist aus Fig. 2 ersichtlich. Die aufgeführten Werte wurden unter der Annahme berechnet, dass das imprägnierte Papier aus einer Serieschaltung von Zellulosefasern und Imprägniermittel (mit geringem Parallelanteil) bestehe. Die Werte wurden durch Versuche bestätigt. Die Auswertung dieses Vorteils kann entweder durch Reduktion der Abmessungen für eine gleich gute Isolation oder durch Verstärkung der Isolation bei gleichen Abmessungen geschehen [1] [1]).

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

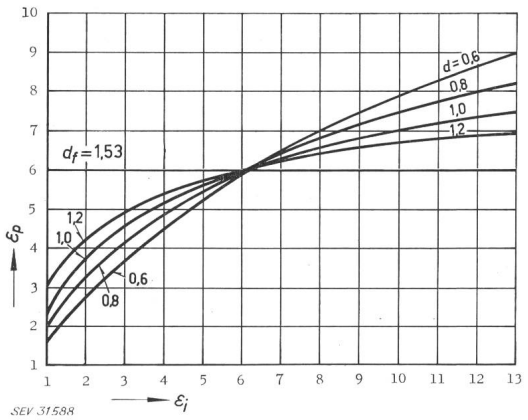

Fig. 2
Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstante ε_p des imprägnierten Papiers und derjenigen des Imprägniermittels ε_i
d Dichte des Papiers; d_f Dichte der Papierfaser

b) Die Imprägnierung trägt wesentlich zum Ausgleich des elektrischen Feldes im Innern des Kondensators bei, unter der Annahme, dass die Randeffekte nicht miteinbezogen werden. Berücksichtigt man, dass sich die Feldstärken umgekehrt proportional der Dielektrizitätskonstante der Isolierschichten verteilen, so würde die günstigste Lösung in einer Kombination von Imprägniermittel und Basis-Dielektrikum gleichem ε_r und möglichst hoher dielektrischer Festigkeit bestehen. Die Konsequenzen dieser elektrophysikalischen Gesetze sollen hier kurz erläutert werden: Bei äquivalenten physikalischen Zuständen des Imprägniermittels, hauptsächlich der Viskosität, kann eine wesentliche Erhöhung der dielektrischen Festigkeit festgestellt werden, wenn die Permittivität des Imprägniermittels derjenigen des Basis-Dielektrikums angenähert ist. Gleichzeitig erfahren Ionisationseinsatzpunkt und Lebensdauer der Kondensatoren eine Verbesserung. Diese zuletzt genannten Vorteile können sich allerdings nur unter Beachtung gewisser wesentlicher Bedingungen bei der Wahl der Basis-Dielektrika, sowie der Kondensatorenherstellung selbst, auswirken.

Temperatureigenschaften einiger polychlorierter Diphenyle

Tabelle I

Eigenschaften	Diphenyle				
	Einheit	Hexa-chloriert	Penta-chloriert	Tetra-chloriert	Trichloriert
Viskosität bei 60 °C	cSt	400	40	10	5
Spezifische Wärme bei 20 °C	cal/g/°C	0,25	0,26	0,27	0,28
Wärmeleitfähigkeit bei 40 °C	$\frac{\text{cal}}{\text{cm·s·°C}}$	$23 \cdot 10^{-5}$	$24 \cdot 10^{-5}$	$25 \cdot 10^{-5}$	$27 \cdot 10^{-5}$

c) Die flüssigen Imprägniermittel sind willkommene Wärmeübertrager, vor allem in grossen Leistungskondensatoren, wo der Wärmeleitkoeffizient sowohl von der Isolation der Gehäuse wie den Temperatureigenschaften des Imprägniermittels abhängt [2]. In Tabelle I sind einige Wärmewerte der wichtigsten polychlorierten Diphenyle (chlorierte synthetische Öle der Askarel-Klasse) aufgeführt.

d) Die Imprägniermittel bilden oft das stabilisierende Element, das für ein regelmässiges Funktionieren der Kondensatoren unerlässlich ist. Warmhärtende synthetische Harze verleihen z. B. den Kondensatoren die zum Ertragen von starken Beschleunigungen, Stössen oder Vibrationen usw. notwendige Festigkeit. Ferner kann der aktive Teil des Kondensators durch die Imprägniermittel vor dem Eindringen von Feuchtigkeit oder anderen zerstörenden Einflüssen geschützt werden. In einer anderen Anwendung, den Metallpapierkondensatoren, spielen die mikrokristallinen Wachse im Moment der Selbstheilung eine wichtige Rolle.

e) In gewissen Fällen allerdings kann durch die Imprägnierung das Basis-Dielektrikum verschlechtert werden. Diese Erscheinung lässt sich, unter Ausschluss der Imprägniermittel zweifelhafter Qualität oder schlechter Verträglichkeit mit dem Basis-Dielektrikum, auf verschiedene Art erklären. Der Vergleich elektrischer Messwerte, vor allem des Verlustwinkels von trockenem und imprägniertem Papier, gibt hiefür gewisse Hinweise [3]. Eine Verschlechterung der Isolationseigenschaften des Papiers ist unverkennbar. Ohne Beifügung eines Imprägniermittels würden diese im Betrieb allerdings rasch noch viel mehr verschlechtert, so dass mit der Imprägnierung ein bis heute sehr zufriedenstellender Kompromiss gefunden werden konnte. Durch die Imprägnierung können die Eigenschaften eines Kondensators in einem zulässigen Rahmen vermindert, dafür anderseits die mechanische oder thermische Stabilität beträchtlich verbessert werden.

f) Die Wahl des Imprägniermittels stellt daher praktisch das Resultat eines technischen Kompromisses dar, in welchem in erster Linie die Betriebsbedingungen des Kondensators, die Auswahl der erhältlichen Imprägnanten und schliesslich die betreffenden Kenntnisse des Herstellers selbst hineinspielen. Zuletzt kann auch noch der Preis eine Rolle spielen.

In der Literatur wurde bereits gezeigt [3], dass es die Auswahl an Imprägniermitteln den Konstrukteuren grosser Kondensatoren unter gewissen Voraussetzungen ermöglichen würde, sowohl Mineralöl wie eines der polychlorierten Diphenyle zu verwenden.

3. Nicht-imprägnierbare Basis-Dielektrika

Die Kategorie der nicht-imprägnierbaren Basis-Dielektrika ist viel unterschiedlicher als die bereits beschriebene; sie wird zur Hauptsache durch die synthetischen Folien und den Glimmer vertreten. Die bei den imprägnierbaren Dielektrika aufgeführten Vor- und Nachteile sind normalerweise dieselben, ihre Auswirkungen jedoch sind stark verschieden. Es kann hier weniger von einer eigentlichen Imprägnierung als vielmehr von einem mehr oder weniger vollkommenen Ausfüllen des aktiven Kondensatorteils, abhängig von der Porosität des Dielektrikums, gesprochen werden.

Die Vergrösserung der Dielektrizitätskonstante des Komplexes Basis-Dielektrikum/Imprägniermittel ist beachtlich, sie ist aber nicht das Hauptziel der Imprägnierung. Bessere Stabilität und grössere Kapazität für Kondensatoren dieser Art können wirksamer mittels anderer Fabrikationsmethoden erhalten werden: durch Metallisierung beider Seiten des Basis-Dielektrikums oder durch thermische Behandlung schrumpfbarer Folien. Dadurch können inhomogene elektrische Felder in eingeschlossenen Luft- oder Gasblasen zwischen den einzelnen Dielektrikumslagen praktisch vollständig eliminiert werden [4].

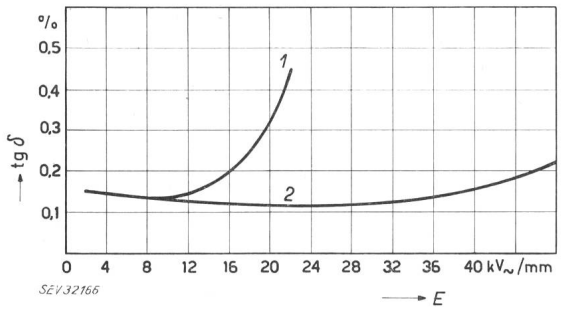

Fig. 3

Der Verlustfaktor tg δ (bei 50 Hz) in Funktion der elektrischen Feldstärke *E* bei Kondensatoren mit Folien aus Polyäthylen-Terephtalat

Dicke des Basis-Dielektrikums: 0,025 mm
1 ohne Imprägnierung; *2* mit Imprägnierung in Mineralöl

Durch die Imprägnierung wird die Feldstärkenverteilung zwischen den das Dielektrikum des Kondensators bildenden Isoliermaterialien teilweise verbessert. Der erzielbare Gewinn hängt sowohl von der Art des Imprägniermittels wie auch von den Imprägnierungsbedingungen ab (Fig. 3). Verschiedene Versuche haben allerdings gezeigt, dass unter gewissen kritischen Bedingungen durch Imprägnierung die Empfindlichkeit synthetischer Folien auf ionisierende Entladungen eines relativ schwachen 50-Hz-Feldes nur vorübergehend verbessert werden konnte. Die Kurven (Fig. 4) von *L. V. Baldwin* [5] für Terephtalat-Polyäthylen-Folien sind dafür typisch.

Der Wärmeaustausch mittels flüssiger Imprägniermittel ist natürlich auch für diese Sorte von Basis-Dielektrika möglich. Gegenwärtig verliert allerdings dieser Vorteil an Bedeutung.

Der Hauptzweck der Imprägnierung der als nicht-imprägnierbar bezeichneten Basis-Dielektrika besteht im wesentlichen in einer Verbesserung der mechanischen, thermischen und klimatischen Stabilität von Kondensatoren. Die warmhärtenden Harze, vor allem die Epoxy-Gruppe, ermöglichten die Realisierung beachtlicher Fortschritte. So war es z. B. möglich, den Mikrophon-Effekt elektronischer Apparate, die Stössen ausgesetzt sind, dadurch zu beheben, dass man die darin verwendeten kleinen Polyesterfolienkondensatoren, die bis anhin thermisch behandelt wurden, in einem synthetischen, warmhärtenden Harz imprägnierte.

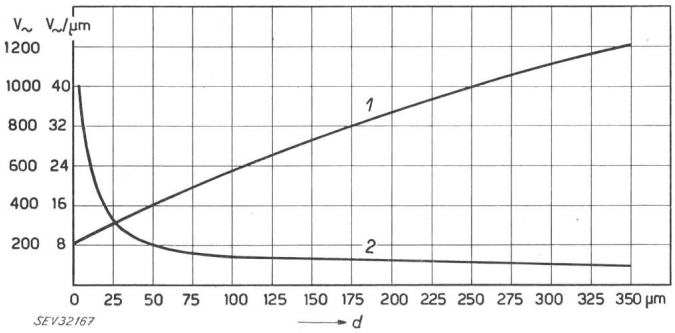

Fig. 4

Kritische Ionisationseinsatzpunkte bei verschiedenen Spannungen oder Feldstärken in Funktion der Dicke des Basis-Dielektrikums bei Kondensatoren mit Folien aus Polyäthylen-Terephtalat

Frequenz: 50 bis 60 Hz, Temperatur: 20 °C
1 kritische Ionisationsspannung in V~; kritische Ionisations-Feldstärke in V/µm

Das Basis-Dielektrikum erfährt durch die Imprägnierung oft eine gewisse Verschlechterung. Auch in diesem Falle liegt es an dem Hersteller, den günstigsten Kompromiss, der den Verwendungsbedingungen der Kondensatoren am besten entspricht, zu finden.

Der Preis des Basis-Dielektrikums liegt im allgemeinen wesentlich höher als derjenige des Imprägniermittels. Die Möglichkeiten sind deshalb weniger eingeschränkt als im Falle der imprägnierbaren Dielektrika.

4. Imprägniermittel

Die heute verfügbaren, sehr zahlreichen Imprägniermittel weisen ausgezeichnete Isolationseigenschaften auf. Dem seriösen Kondensatorenfabrikanten stellen sich trotzdem ebenso komplexe wie heikle Probleme bezüglich der Auswahl solcher Materialien. Die Imprägniermittel sind in verschiedenen Formen erhältlich, die sich im Verlaufe der Imprägnierung zum Teil fast vollständig ändern können: verflüssigbare Feststoffe, die in feste Form zurückkehren (umkehrbar oder nicht); Flüssigkeiten, deren Viskosität in Funktion der Temperatur und des Druckes variiert, und die flüssig werden oder in einen nicht umkehrbaren festen Zustand übergehen.

In Tabelle II sind die Ausgangswerte der wichtigsten in Kondensatoren verwendeten Imprägniermittel zusammengefasst. Nicht jede Kondensatorenfabrik bewertet die erwähnten Sorten gleich: die Einführung oder Aufgabe des einen oder anderen Produktes hängt hauptsächlich von den zur Verfügung stehenden Betriebseinrichtungen und deren Zustand, dem technischen Niveau des Unternehmens und dem Stand der Forschungsarbeiten ab. Diese Voraussetzungen sind naturgemäss stark verschieden.

Die Wahl eines Imprägniermittels wird in erster Linie von dessen physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften bestimmt. Der Kondensatoren-Konstrukteur misst gewöhnlich den folgenden Charakteristika die grösste Bedeutung bei:

A) *Physikalische Eigenschaften:*
1. Viskosität in Funktion der Temperatur bzw. in Funktion der Verwendungsdauer.
2. Zulässiger Temperaturbereich.
3. Feuchtigkeitsempfindlichkeit.
4. Unbrennbarkeit.

B) *Chemische Eigenschaften:*
1. Säuregehalt.
2. Chlorgehalt.
3. Chemische Stabilität.
4. Verträglichkeit mit andern, eventuell nur vorübergehend in Kontakt mit dem Imprägniermittel tretenden Materialien.

C) *Elektrische Eigenschaften:*
1. Dielektrizitätskonstante.
2. Verlustfaktor.
3. Spezifischer Widerstand.
4. Dielektrische Festigkeit.
5. Verhalten im elektrostatischen Feld.
6. Verhalten im elektrischen Wechselfeld (bei verschiedenen Frequenzen).

Zusammenstellung der wichtigsten Imprägniermittel für Kondensatoren

Tabelle II

Imprägniermittel	Physikalische Zustandsform bei 20 °C	Dielektrizitätskonstante bei 50 Hz und 20 °C	Schmelztemperatur (fest) oder Gefriertemperatur (flüssig) °C	Anwendung
Vegetabile Wachse	fest	2,5...3,0	83... 90	ältere Papier-Zylinderkondensatoren
Tierische oder davon abgeleitete Wachse	fest	15	120...140	Papier- und Metallpapierkondensatoren
Mineralwachse (Ozokerite)	fest	2,0...2,5	65... 85	Papier- und Metallpapier- sowie Polystyrenkondensatoren
Wachse auf Petrolbasis (mikrokristallin)	fest	2,3	65... 85	wie Mineralwachse
Synthetische, nicht chlorierte Wachse, abgeleitet von fetten Säuren	fest	20	80... 90	Papier- und Metallpapierkondensatoren
Chlorierte synthetische Wachse (Polychloronaptalene)	fest	4,0...5,5	85...130	Papierkondensatoren
Vaseline, reine oder technische Qualität	fest bis flüssig	2,2	≈ 40	Papier- und Metallpapierkondensatoren, Glimmer- und Polystyrenkondensatoren
Polyisobutylen	flüssig/fest	2,2	—45...+20	Papier- und Metallpapierkondensatoren, Kondensatoren aus synthetischen Folien
Mineralöle	flüssig	2,2	≈ — 45	Wie Vaseline oder Polyisobutylen
Diphenyle:				
trichloriert	flüssig	5,8	— 20	Papierkondensatoren (alle Kategorien)
tetrachloriert		5,4	— 10	
pentachloriert		5,0	+ 10	
hexachloriert		4,6	+ 30	
Flüssige Silikone	flüssig	2,1...3,0	—75...—20	Papierkondensatoren. Kondensatoren mit synthetischen Folien
Epoxyharze	flüssig/fest	3,5...4,5	—	wie flüssige Silikone
Nicht gesättigte Polyesterharze	flüssig/fest	2,8...4,0	—	wie flüssige Silikone

4.1 Viskosität in Funktion der Temperatur und, in gewissen Fällen, in Funktion der Verwendungsdauer

Diese ausserordentlich wichtige Eigenschaft hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Imprägnierung und damit auf die Stabilität und Lebensdauer von Kondensatoren. Prinzipiell soll die Viskosität im Moment der Imprägnierung immer unterhalb 100 cSt liegen; diese meist gut erfüllbare Bedingung (Fig. 5) wird einerseits durch die chemische Stabilität (Oxydation unter dem Einfluss der mit dem Imprägniermittel in Kontakt tretenden Materialien bei hohen Temperaturen) und anderseits durch den Dampfdruck des Imprägniermittels begrenzt. Diese sollte keinesfalls vernachlässigt werden, ansonst mit Schwierigkeiten bei der Herstellung von Kondensatoren gerechnet werden müsste.

Die Verwendung eines Imprägnier-Dielektrikums guter Qualität, aber relativ hoher Viskosität, bedingt die Anwendung einer von der Kabelfabrikation her bekannten Technik: die Imprägnierung mit Überdruck. Hier ist ein Abweichen von der klassischen Imprägniertechnik ausnahmsweise am Platz.

Die warmhärtenden synthetischen Harze sind besonders zu erwähnen: Im Moment der Anwendung setzen sich diese Produkte aus verschiedenen Teilen (Basisharz, Härter, Beschleuniger, Katalysatoren usw.) zusammen, wobei die Viskosität nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Anteil aktiver Elemente (Härter, Katalysator, Beschleuniger) abhängt, welche nach kürzerer oder längerer Zeit zum Gelieren und zur Polymerisation der Imprägniermasse führen. Unter diesen Voraussetzungen muss die Imprägnierung laufend durch Messung der Viskosität des Imprägniermittels überwacht werden. Nur so kann eine regelmässige Fabrikation erreicht und vor allem der von der Vorbereitungszeit abhängige Einsatzpunkt des Harzes bestimmt werden.

4.2 Zulässiger Temperaturbereich

Innerhalb des für die Anwendung zulässigen Tempeturbereiches müssen die physikalischen, chemischen und vor allem die elektrischen Werte relativ stabil bleiben. Bei Wachsen ist die obere Grenze durch die Schmelztemperatur gegeben, für die warmhärtenden Harze wird die Maximaltemperatur durch die thermische Deformation (Reissen) bestimmt. Die Minimaltemperatur der Mineralöle und der chlorierten Öle liegt im Prinzip beim Stockpunkt, der nur unter Beachtung von für die Betriebssicherheit der Kondensatoren unerlässlichen Massnahmen gelegentlich unterschritten werden darf. Weitere Temperaturgrenzwerte sind in erster Linie durch das Dielektrikum selbst gegeben.

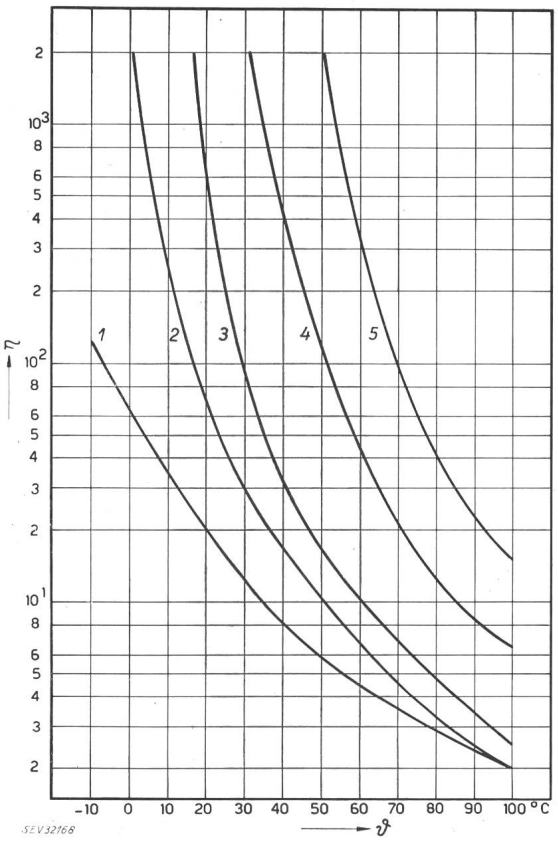

Fig. 5

Kinematische Viskosität η einiger Mineralöle und synthetischer Öle (polychlorierte Diphenyle) in Funktion der Temperatur ϑ

1 Mineralöl; *2* trichloriertes Diphenyl; *3* tetrachloriertes Diphenyl; *4* pentachloriertes Diphenyl; *5* hexachloriertes Diphenyl

4.3 Feuchtigkeitsempfindlichkeit

Die Feuchtigkeit ist ein sehr gefürchteter Feind der Dielektrika. Alle Isoliermaterialien werden von ihr mehr oder weniger stark angegriffen, am empfindlichsten jedoch reagieren zweifellos die chlorierten Imprägniermittel. Der Verschluss und die Isolation der mit chlorierten Dielektrika imprägnierten Kondensatoren müssen deshalb von einwandfreier Qualität sein.

4.4 Unbrennbarkeit

Die chlorierten Dielektrika haben den grossen Vorteil, unbrennbar zu sein; man nennt sie daher auch «Askarels». Werden diese Imprägniermittel durch Hitze oder Lichtbogeneinwirkung zersetzt, so wird kein freier, für den Kondensator gefährlicher Wasserstoff abgegeben, da die Verbindung Wasserstoff—Chlor zur Bildung von stabilem und unbrennbarem Salzsäuregas führt (Tabelle III) [6].

Durch elektrische Lichtbogen erzeugte Zersetzungsprodukte von Mineralöl und pentachlorierten Diphenyl

Tabelle III

Zersetzungsprodukt	Mineralöl %	Pentachloriertes Diphenyl %
Wasserstoff	60	0
Kohlenoxyd	3	0...0,3
Kohlensäure	0	0...0,3
Kohlenwasserstoffe ungesättigt	16	0
Kohlenwasserstoffe gesättigt	10	0
Sauerstoff	2	0
Stickstoff	9	0
Chlor	0	0
Salzsäuregas	0	99...100

4.5 Säurehaltigkeit

Diese chemische Eigenschaft gibt dem Kondensatorenkonstrukteur wichtige Hinweise für die Beurteilung der Stabilität und des Alterungsverhaltens eines Imprägniermittels. In Tabelle IV sind einige für frische Imprägniermittel gültige Maximalwerte zusammengestellt.

Säuregehalt einiger Imprägniermittel

Tabelle IV

Imprägniermittel	Säuregehalt, ausgedrückt in mg KoH/g
Polychlorierte Diphenyle	max. 0,01
Mineralöl	max. 0,05
Chlorierte synthetische Wachse	max. 0,1
Nichtchlorierte synthetische Wachse	max. 2
Polyisobutylene	max. 0,02

4.6 Chlorhaltigkeit

Chlor kann normalerweise nur in chlorierten Imprägniermitteln nachgewiesen werden. Dessen Anteil liefert einen schlüssigen Hinweis für die Stabilität des betreffenden Produktes und schwankt praktisch zwischen 10^{-6}...10^{-7} im frischen Zustand.

4.7 Chemische Stabilität

Diese wichtige Eigenschaft wird vor allem durch die chemische Zusammensetzung des Imprägniermittels bestimmt. Bei den Mineralölen können die Alterungsstabilität und das Gasaufnahmevermögen nie auf einen Nenner gebracht werden, weshalb nur eine genaue Prüfung die Unterlagen für den günstigsten Kompromiss liefern kann. Verzögernde, oxydationsverhindernde und stabilisierende Zusätze können die chemische Stabilität ebenso gut vorübergehend wie auch nur scheinbar verbessern. Die photochemische Empfindlichkeit eines pentachlorierten Diphenyls oder eines mittels Anthraquinon stabilisierten chlorierten Wachses stellt einen typischen Fall von Verschlechterung dar, deren Auswirkungen sich je nach Inbetriebnahme des Kondensators mehr oder weniger stark bemerkbar machen.

4.8 Verhalten gegenüber mit dem Imprägniermittel in Kontakt tretenden Materialien

Der Qualitätsbeeinflussung des Imprägniermittels durch andere Materialien muss besonders bei chlorierten Dielektrika grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden. Weitgehende systematische Laboratoriumsversuche sind zur Abklärung dieser Probleme unumgänglich notwendig [1].

4.9 Dielektrizitätskonstante

Die in Tabelle II aufgeführten Werte weisen klar auf die Bedeutung dieses Kennwertes hin, von dem die Kapazität und gleichzeitig das Volumen oder, bei Kleinkondensatoren, der Miniaturisierungsgrad abhängt. Dies verlangt eine genaue Kenntnis des Verhaltens der Dielektrizitätskonstanten der Imprägniermittel, welche durch folgende Parameter bestimmt werden: Temperatur, Spannung, Frequenz. Die Figuren 6 und 7 zeigen die Veränderung der Dielektrizitätskonstante einiger Imprägniermittel in Funktion der Temperatur und der Frequenz. In einem Temperaturbereich, wo die als klassisch bezeichneten Imprägniermittel noch sehr

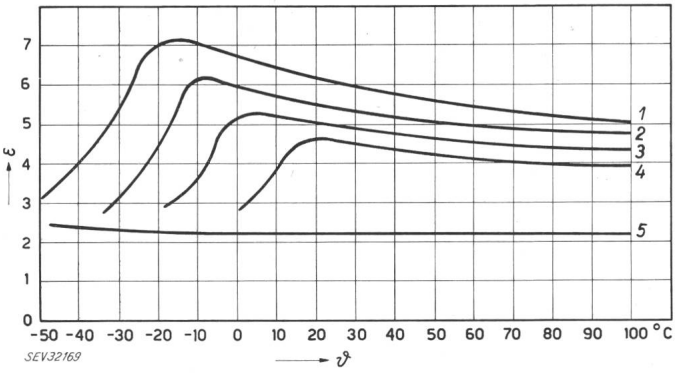

Fig. 6
Dielektrizitätskonstante ε bei 50 Hz einiger polychlorierter Diphenyle und eines Mineralöls in Funktion der Temperatur ϑ
1 trichloriertes Diphenyl; *2* tetrachloriertes Diphenyl; *3* pentachloliertes Diphenyl; *4* hexachloriertes Diphenyl; *5* Mineralöl

stabil bleiben, erleiden die chlorierten synthetischen Öle und Wachse beträchtliche Veränderungen.

4.10 Verlustfaktor

Der Verlustfaktor ist von fundamentaler Bedeutung. Bis heute stellt er zweifellos eines der besten Kriterien zur Beurteilung der Qualität von Imprägniermitteln im Anlieferungszustand und während der Fabrikation von Kondensatoren dar. Temperatur und Frequenz sind die üblicherweise bei der Prüfung angewandten Parameter (Fig. 8 und 9). Polare Imprägniermittel sind durch einen anomal grossen Streubereich charakterisiert, dessen Auswirkungen sich in der Dielektrizitätskonstante und im Verlustwinkel bemerkbar machen. In gewissen Fällen sind diese Eigenschaften die Ursache, dass sich der Kondensatorenfabrikant zur Aufgabe eines sonst bemerkenswerte Eigenschaften aufweisenden Imprägniermittels gezwungen sieht.

4.11 Spezifischer Widerstand

Die Erfahrung hat gezeigt, dass zwischen dem spezifischen Widerstand bei Gleichspannung und dem Verlustfaktor gute Übereinstimmung herrscht. Diese Relation ist allerdings nur unter folgenden Bedingungen richtig: geringe Streuung und physikalisch-chemische Stabilität des Imprägniermittels während der Messung. Die Messung des spezifischen Widerstandes ist deshalb eher als Kontrolle der Ver-

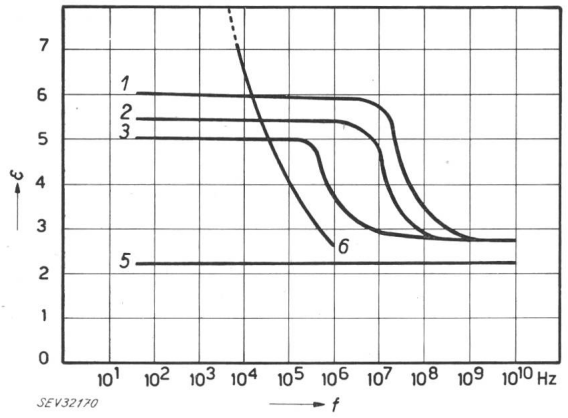

Fig. 7
Dielektrizitätskonstante ε einiger Imprägniermittel in Funktion der Frequenz *f* bei 20 °C
6 synthetisches Wachs mit hoher Dielektrizitätskonstante
Weitere Erklärungen für *1, 2, 3* und *5* siehe Fig. 6

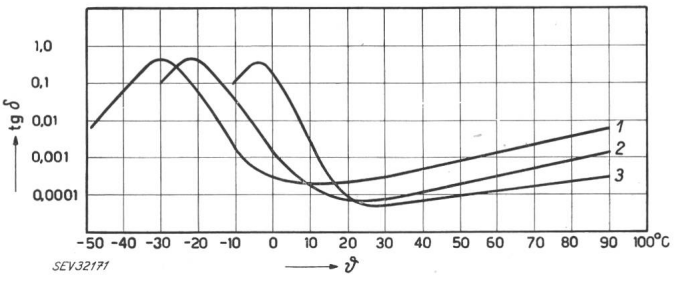

Fig. 8
Verlustfaktor tg δ (bei 50 Hz) einiger polychlorierter Diphenyle in Funktion der Temperatur ϑ
Erklärungen siehe Fig. 6

lustfaktormessung zu werten und kann infolge der nicht sehr grossen Genauigkeit meistens weggelassen werden.

4.12 Dielektrische Festigkeit

Die dielektrische Festigkeit ist für den Kondensatorenkonstrukteur von nur relativer Bedeutung. Sie erlaubt die rasche Feststellung von Verunreinigungen oder nennenswerter Feuchtigkeit im Imprägniermittel. Wichtiger scheint die genaue Überprüfung der dielektrischen Festigkeit des Komplexes Basis-Dielektrikum/Imprägniermittel. Zudem sind die Messmethoden zur Bestimmung der dielektrischen Festigkeit gegenwärtig noch zu stark voneinander abweichend, als dass die Resultate miteinander verglichen werden könnten.

4.13 Verhalten im elektrostatischen Feld

Die Eigenschaften der Imprägniermittel werden im elektrostatischen Feld eher stabiler. Selbst durch eine kurzzeitige Behandlung kann die Dielektrizitätskonstante und der Verlustfaktor gewisser Erzeugnisse (tierische Wachse und einige nicht chlorierte synthetische Wachse) verbessert werden.

4.14 Verhalten im elektrischen Wechselfeld

Das Verhalten der in Tabelle II zusammengefassten Imprägniermittel in einem Wechselfeld ist unterschiedlich. Gewisse Produkte sind nur bei tiefen Frequenzen brauchbar (synthetische Wachse), die meisten bis zu 20 kHz. Einige Mineralöle, die flüssigen Silikone und einige Wachse können auch bei Frequenzen über 20 kHz verwendet werden. Das Verhalten von Imprägniermitteln in einem Hochfrequenzfeld ist immer eine diskutable Angelegenheit; deshalb vermeidet der Kondensatorenkonstrukteur deren Anwendung wenn irgendwie möglich selbst in HF-Feldern schwacher Intensität, da durch Ionisationserscheinungen die Isolationseigenschaften dauernd verschlechtert würden.

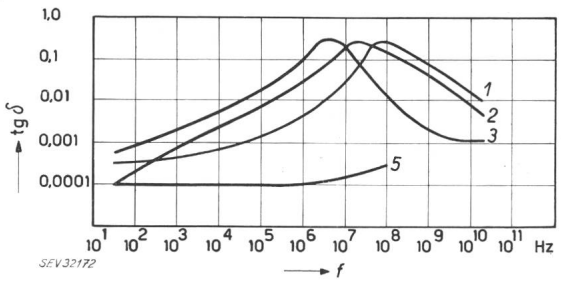

Fig. 9
Verlustfaktor tg δ (bei 20 °C) einiger polychlorierter Diphenyle und eines Mineralöls in Funktion der Frequenz *f* bei 20 °C
Erklärungen siehe Fig. 6

5. Wahl und Verwendungsbedingungen der Imprägniermittel

Die vorstehenden Kapitel bildeten die notwendige Vorbereitung auf die nun folgenden Ausführungen. Sie behandelten vor allem die durch die Kondensatorenfabrikanten oder die Rohmaterallieferanten zu beachtenden Probleme.

Die Wahl des Imprägniermittels ist im Endeffekt von mehreren Faktoren abhängig:

a) Die allgemeinen Verwendungsbedingungen;
b) Der Kondensatorentyp und, für jeden Typ, dessen Ausführungsart;
c) Die in neuerer Zeit realisierten oder realisierbaren Fortschritte in der Kondensatoren-Fabrikationstechnik.

In den meisten Fällen hängt die Wahl des Imprägniermittels stark von der Vollständigkeit und Genauigkeit der vom Verbraucher dem Konstrukteur zur Verfügung gestellten Angaben ab. Die erste Kontaktnahme ist deshalb als ausserordentlich wichtig zu bewerten.

Auf dieser Grundlage wird nun der Kondensatorenkonstrukteur unter verschiedenen, gleichwertig scheinenden Lösungen die Auswahl treffen; diese kann ebenso gut von seinem Können wie auch andern Einflüssen abhängen, wie z. B. den zur Verfügung stehenden Fabrikationsanlagen oder dem technischen Stand des Unternehmens selbst.

Wollte man die wichtigsten Kondensatorentypen, verbunden mit einer kritischen Prüfung der Zusammenhänge zwischen verwendbaren Imprägniermitteln und den vielfältigen Betriebsbedingungen, aufzählen, so würde dies den Rahmen dieses Artikels sprengen. Die interessierenden Angaben sind in Tabelle V zusammengefasst. Diese hat den Vorteil, dass darin alle wichtigen Elemente schematisch vereinigt sind. Es ist somit möglich, eine erste Zuordnung der Imprägniermittel zu den Basis-Dielektrika vorzunehmen:

Papier
- Mineralöle mit oder ohne Inhibitoren.
- Polychlorierte Diphenyle; in gewissen Fällen mit Stabilisatoren.
- Mineralwachse, mikrokristalline Wachse.
- Synthetische, chlorierte oder nichtchlorierte Wachse.
- Vaseline.
- Rizinusöl.
- Flüssige Silikone.
- Synthetische, warmhärtende Harze.

Metallpapier
- Mineralöle mit oder ohne Inhibitoren.
- Mineralwachse, mikrokristalline Wachse.
- Nichtchlorierte synthetische Wachse.
- Vaseline.
- Flüssige Silikone.
- Polyisobutylene.
- Synthetische, warmhärtende Harze.

Polyesterfolien (Polyäthylen-Terephtalat)
- Mineralöle.
- Mineralwachse, mikrokristalline Wachse.
- Flüssige Silikone.
- Polyisobutylene.
- Warmhärtende, synthetische Harze.

Polystyrenfolien
- Mineralwachse, Paraffin.

Glimmer
- Mineralöle.
- Warmhärtende, synthetische Harze.

5.1 Imprägnierung von Papierkondensatoren

Um lange, der Einheit des Stoffes abträgliche Ausführungen vermeiden zu können, sei zum vorneherein angenommen, dass der Kondensatorenkonstrukteur über die Eigenschaften und Werte dieses sehr wichtigen Basis-Dielektrikums genau im Bilde sei und dass ferner für sorgfältige und regelmässige Fabrikationsbedingungen Gewähr bestehe. Eine erste Trennung kann vorgenommen werden zwischen Leistungskondensatoren mit grosser Energie und «kleinen» Kondensatoren, gekennzeichnet durch kleine Leistungen (gewöhnlich unter 100 Var) und mässige Betriebsspannungen (Wechselspannung, 50 Hz, oder Gleichspannung). Die erste Kategorie ist fast immer entweder mit Mineralöl oder polychlorierten Diphenylen imprägniert, während für die zweite Kategorie alle andern erwähnten Imprägniermittel in Frage kommen.

Der Wettbewerb zwischen den polychlorierten Diphenylen und den Mineralölen war schon verschiedentlich Gegenstand von Untersuchungen [3, 7, 8] und häufigen Kontroversen, welche sowohl über die Vor- wie auch die Nachteile der damit imprägnierten Kondensatoren Aufschluss gaben.

5.1.1 Stabilität der Kapazität

Sie kann durch die Dichte des gewählten Papiers beeinflusst werden; die Überlegenheit der Mineralölkondensatoren in einem weiten Temperaturbereich (mindestens von — 30 bis + 100 °C) kann hier nicht bestritten werden.

5.1.2 Stabilität des Verlustfaktors

Die mit polychlorierten Diphenylen imprägnierten Kondensatoren sind weniger stabil als die Mineralöl-Kondensato-

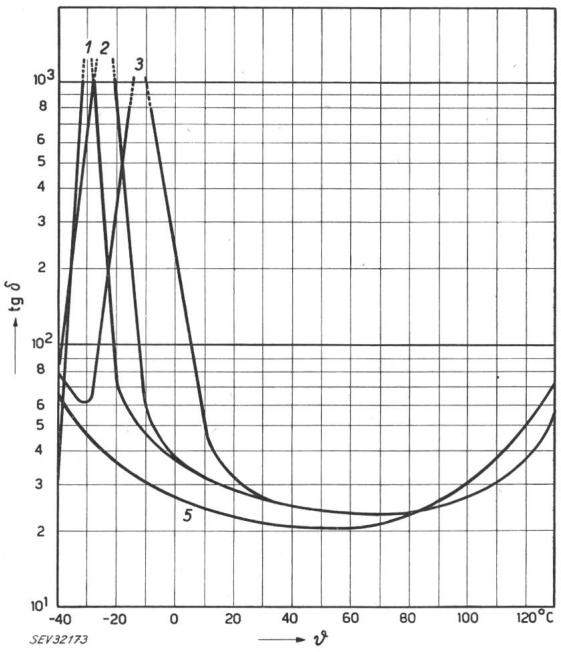

Fig. 10
Verlustfaktor tg δ (bei 50 Hz) von Papierkondensatoren mit der Dichte 1,0 in Funktion der Temperatur ϑ, imprägniert in drei verschiedenen chlorierten Diphenylen und einem Mineralöl
Kapazität der Kondensatoren ca. 4 µF, Feldstärke bei der Messung: 14 kV/mm, 50 Hz
Erklärungen siehe Fig. 6

ren, bedingt durch die anomal starke Streuung, welche bei tiefen Temperaturen eintritt und die Eigenschaften des Imprägniermittels selbst (Fig. 10). Diese oft hinderliche Schwierigkeit kann durch verschiedene Massnahmen gegen tiefere Temperaturen hin verschoben werden: Mischen von hochchlorierten Diphenylen mit Trichlorobenzen, womit durch Verdünnung der Stockpunkt verschoben wird, oder (und diese Lösung ist vorzuziehen) durch Verwendung weniger stark chlorierter Diphenyle (Tetra- oder Trichlordiphenyle).

5.1.3 Stabilität des Isolationswiderstandes

Die mit Mineralöl imprägnierten Kondensatoren haben einen etwas tieferen Isolationswiderstand als die mit chlorierten Diphenylen imprägnierten. Bei diesen kann es vorkommen, dass je nach Sorgfalt bei der Kondensatorenherstellung das Produkt $R_{isol} \times C$ in einem Temperaturbereich von 20...130 °C für Imprägnierungen mit Hexa- und Penta-Chlordiphenylen höher ausfällt als für solche mit Tetra- oder Trichlordiphenylen.

5.1.4 Masse und im Betrieb zulässige elektrische Beanspruchungen

Die Überlegenheit der in polychlorierten Diphenylen imprägnierten Kondensatoren, prinzipiell derjenigen mit schwachem Chlorierungsgrad, ist offensichtlich. Der beträchtliche Volumengewinn und vor allem die höhere Betriebsfeldstärke sowohl bei Wechselspannung von 50 Hz (16 kV/mm gegenüber 12 kV/mm bei Mineralölkondensatoren) wie auch bei Gleichspannung sind entscheidende Argumente.

5.1.5 Beanspruchung mit Wechselspannung 50 Hz; Ionisations-Einsatzpunkt

Obwohl die Technik des Trocknens und Imprägnierens von Kondensatoren mit polychlorierten Diphenylen eine längere Erfahrung voraussetzt (die Anforderungen steigen progressiv beim Übergang von Hexa- auf Trichlordiphenyle), mehr Aufwand bei den Konstruktionsmaterialien und den prophylaktischen Massnahmen zur Verhütung von Hautkrankheiten benötigt und eine komplexere Ausrüstung erfordert als die analoge Technik für Mineralölkondensatoren, muss anerkannt werden, dass der Aufwand durch die grösseren spezifischen Leistungen der Kondensatoren kompensiert wird. Trotz den in der Aufbereitung von Mineralölen erzielten Fortschritten, welche eine Verbesserung der Alterungsstabilität durch Hinzufügen von Inhibitoren (deren Wirksamkeit noch nicht abgeklärt ist) brachten, und trotzdem das Gasabsorptionsvermögen als günstig zu beurteilen ist, scheint es doch mehr und mehr, dass ihr Ersatz durch polychlorierte Diphenyle eine wesentliche Verbesserung der Beanspruchbarkeit und der Lebensdauer der Papierkondensatoren bringt. Dies gilt sowohl für hohe Temperaturen (Erwärmung des aktiven Teils des Kondensators oder hohe Umgebungstemperatur) als für tiefe Temperaturen (— 25...— 40 °C), wo als Folge des Wiedereinschaltens vollständig abgekühlter Kondensatoren gefürchtete Effekte auftreten können. Dies bestätigt sich auch für Kondensatoren bis zu 10 kHz durch den Vergleich der Ionisations-Einsatzpunkte eines mit Mineralöl und eines mit polychloriertem Diphenyl imprägnierten Kondensators (Fig. 11), [8]. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte fällt der Vergleich, mit Ausnahme einiger Spezialtypen, nicht zugunsten des Mineralöls aus, auch dann nicht, wenn mit den heutigen Fabrikationsanlagen das Risiko der X-Wachsbildung, welche einer Art Polymerisation des Mineralöls zugeschrieben wird, kaum mehr besteht.

5.1.6 Stossbetrieb

Diese Betriebsart kann normal (Stoßspannungsgeneratoren), anomal oder periodisch auftreten (Ein- und Ausschaltvorgänge, vorübergehende Überspannungen in den Netzen) und bedingt besonders widerstandsfähige Kondensatoren. Das Dielektrikum sollte einen hohen Ionisationseinsatzpunkt haben und dafür Gewähr bieten, dass rasch wieder normale Betriebswerte erlangt werden. Mit polychlorierten Diphenylen imprägnierte Kondensatoren halten gewöhnlich höhere Beanspruchungen aus als solche gleiche Ausführung, jedoch mit Mineralölimprägnierung.

5.1.7 Beanspruchung mit Gleichspannung

Der Fall der statischen Kondensatoren oder gleichartiger Ausführungen ist vollständig anders gelagert. Obwohl Mineralölkondensatoren im normalen Betrieb bei Gleichspannung keine sehr hohen Feldstärken aushalten (siehe unter Ziff. 5.1.4), ist ihr Verhalten günstiger als dasjenige von Konden-

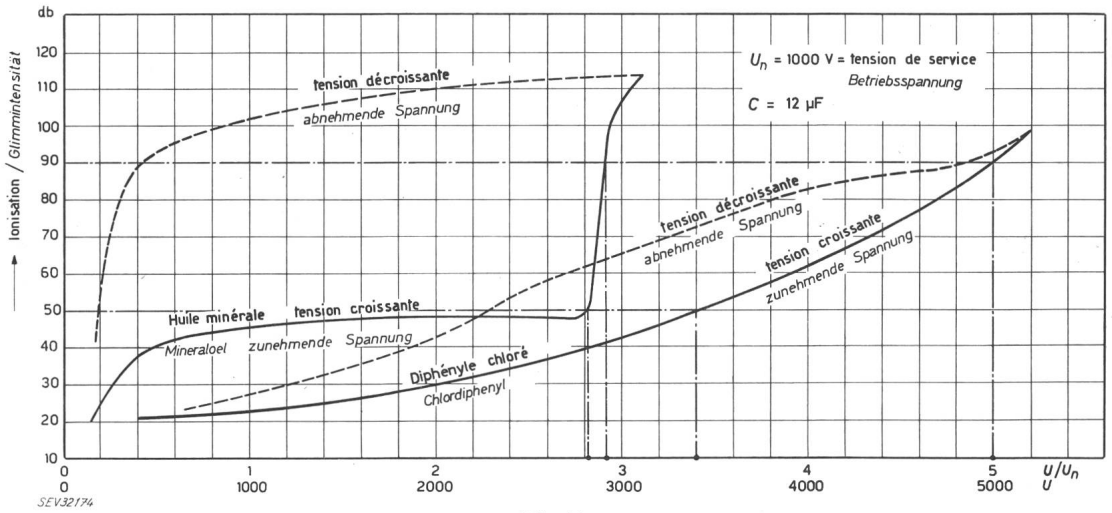

Fig. 11
Bestimmung des Ionisationseinsatzpunktes eines mit Mineralöl und eines mit chloriertem Diphenyl imprägnierten Kondensators
U Wechselspannung von 50 Hz

Zusammenhänge zwischen verschiedenen Betriebsbedingungen mehrerer Typen, Kondensatoreigenschaften und den wichtigsten Imprägnanten

Die sich auf Papier beziehenden Eigenschaften sind mit P, jene von Metallpapier mit MP und die von synthetischen Folien mit F bezeichnet

Tabelle V

Kondensatorentyp	Wichtigste Anwendungen	Betriebs-spannung V	Betriebs-frequenz Hz	Leistung	Umgebungstemperaturen min. °C	Umgebungstemperaturen max. °C	Basisdielektrikum	Wichtigste Imprägniermittel
Leistungskondensatoren für Starkstromanlagen	Verbesserung des Leistungsfaktors	>1000	16 2/3 bis 100	>0,5 kVar (Einheiten von 15, 20, 25, 50, selbst 100 kVar und mehr)	—10 —20 —30	40 45 50	Papier, Metallpapier	Mineralöle (P, MP), polychlorierte Diphenyle (P) polychlorierte Diphenyle mit Trichlorobenzen (P)
Kopplungskondensatoren, Überspannungs-schutzkondensatoren, Spannungsteiler-kondensatoren Seriekondensatoren für Starkstromanlagen	Ankopplung von Fernmeldeapparaturen oder Mess- und Regelapparaturen in Hochspannungsnetzen; Sperrkreise für Netzkommandoanlagen, Schutz gegen Überspannungen	>1000	16 2/3 50 60	Klein	— 5 —10 —25	30 35 40	Papier, Metallpapier	Mineralöle (P, MP), polychlorierte Diphenyle (P) Polychlorierte Diphenyle mit Trichlorobenzen (P)
Mittelfrequenzkondensatoren mit natürlicher oder forcierter Luftkühlung, oder mit Wasserkühlung	Induktionsofen (Giessereien, Schmieden usw.) Schweissen und Schmelzen; Serie- oder Parallelkondensatoren je nach Montage	Max. 1000 (mit Wasserkühlung) 3000 mit Luftkühlung	400 bis 10 000 25 000	Variiert je nach Anlage: pro Einheit max. 100...250 kVar für Wasserkühlung, 25 kVar für Luftkühlung	—10	40 45 50	Papier, synthetische Folien (gerichtetes Polystyren)	Mineralöle (P), polychlorierte Diphenyle (P), Mineralwachse (Paraffine) (F)
Kondensatoren für Frequenzen über 10 kHz, für hohe Leistungen und Spannungen	Sender und HF-Generatoren	> 1000	> 10 kHz bis 20 MHz u. darüber	10, 20...bis 100 kVar	—25 —40	85 100	Glimmer	Mineralöle, Warmhärtende synthetische Harze
Kondensatoren für Entladungslampen, im besonderen für Fluoreszenzlampen, Serie- und Shuntkondensatoren	Verbesserung des Leistungsfaktors; Kurzzeitige Spannungserhöhung; Strombegrenzung; Funktionen je nach Schaltung verschieden	250 380 500	50 bis 500	Max. 1,5 kVar	—10 —20 —30	70 (P, MP) 85 (P, MP) 100 (P) und mehr (P)	Papier, Metallpapier	Mineralöle (P, MP), polychlorierte Diphenyle (P), polychlorierte Diphenyle mit Trichlorobenzen (P), flüssige Silikone (P, MP)
Kondensatoren für Motoren, dauernd oder intermittierend eingeschaltet	Anlauf und/oder Verbesserung der Betriebseigenschaften von einphasigen Induktionsmotoren	Max. 600	50 60	Max. 1,5 kVar	—40	85	Papier, Metallpapier	Mineralöle (P, MP), Verbindungen von Wachsen und Mineralölen (MP), polychlorierte Diphenyle (P), synthetische Wachse

Filterkondensatoren Kondensatoren für Stossspannungsgeneratoren Kondensatoren zur Speicherung grosser Energien	Filterung der Wechselkomponente in Gleichspannungsanlagen, sowie analoge Anwendungen: Schweissapparate, Röntgenanlagen, Wiedergabe kurzzeitiger Vorgänge, Kernfusion	> 600 bis 150 kV—	—	0,2...500 Ws und mehr	5 —10 —25 —40	40 55 70	Papier, Metallpapier, Polyesterfolien	Mineralöle (P, MP, F), Polychlorierte Diphenyle (P), (stabilisiert oder nicht), Polyisobuthylene (P, MP, F)
Kondensatoren für Gleichspannungen unter 1000 V und Wechselspannungen unter 500 V	Telephonie; Fernmeldetechnik	<1000 V— < 500 V~	50 je nach Anwendung	<314 Var	5 —10 —25 —40 —55	55 (P, MP, F) 70 (P, MP, F) 85 (P, MP, F) 100 (P, F) 125 (F)	Papier, Metallpapier, Polyesterfolien	Prinzipiell alle in Tabelle II aufgeführten Imprägniermittel
Störschutzkondensatoren für Gleich- und vor allem für Wechselspannungen	Entstörung von Motoren, Apparaten und Anlagen; Funkenlöschung usw.	<1000 V~	Meistens 50	<314 Var	5 —10 —25	70 (P, MP, F) 85 (P, MP, F) 100 (P, F) 125 (F)	Papier, Metallpapier, Polyesterfolien	
Berührungsschutzkondensatoren	In Apparaten zur Verbindung mit dem Nulleiter, mit der Erde oder zum Berührungsschutz des Kondensatorgehäuses	<1000 V~	Meistens 50	< 314 Var	5 —10 —25	70 (P, MP, F) 85 (P, MP, F) 100 (P, F) 125 (F)	Papier, Metallpapier, synthetische Folien	
Kondensatoren für elektronische Schaltungen; Zylinderkondensatoren für Gleichspannungen	Anwendung in der allgemeinen Elektronik, hauptsächlich in der professionellen Technik	< 160 V— 160... 1600 V—	—	< 5 Ws	—25 —40 —55	85 (P, MP, F) 100 (P, F) 125 (F)	Papier, Metallpapier, Polyesterfolien, gemischte Dielektrika	
Glimmerkondensatoren für die Fernmeldetechnik, analoge Anwendungen	Niederspannungs-HF-Filter Schwingkreise, Hoch-, Mittel- und Niederfrequenzkreise, Hochpräzisionsmessapparate	300...500 V—, jedoch auch bis 4 kV—, kleine HF-Spannungen bis 600 V~	<10 kHz	Kleine Energien und Leistungen bis max. 2 kVar	—25 —40	70 85 100 125	Glimmer	Mineralwachse und mikrokristalline Wachse, Warmhärtende synthetische Harze

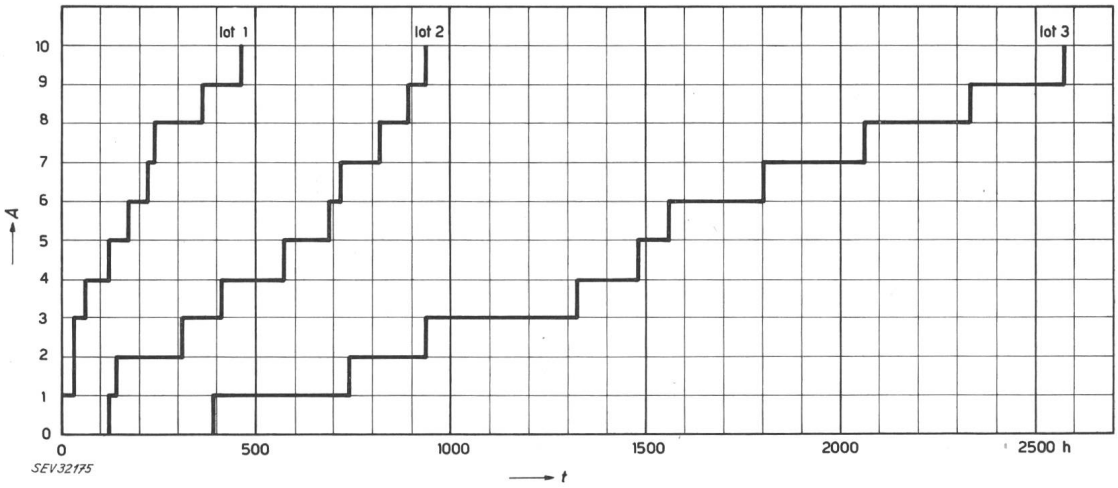

Fig. 12

Lebensdauer t unter Gleichspannung bei 60 °C, von vier Serien Kondensatoren gleicher Abmessungen (ca. 200 cm³)

A Ausfälle (auf 10 Stück)

Serie (lot) 1: Papierkondensatoren, imprägniert in pentachloriertem Diphenyl, C = 5 µF, Prüffeldstärke 60 kV/mm;
Serie (lot) 2: Papierkondensatoren, imprägniert in Mineralöl, C = 3,8 µF, Prüffeldstärke 60 kV/mm;
Serie (lot) 3: Papierkondensatoren, imprägniert in stabilisiertem, pentachloriertem Diphenyl, C = 5 µF, Prüffeldstärke 60 kV/mm:
Serie (lot) 4: Polyesterfolienkondensatoren, imprägniert in Mineralöl, C = 5 µF, Prüffeldstärke 90 kV/mm
Die Serie (lot) 4 erlitt während 3000 h Versuchsdauer keinen Ausfall

satoren mit polychloriertem Diphenyl, unter der Voraussetzung, dass keine Stabilisatoren oder Inhibitoren angewendet wurden. In Fig. 12 ist die Lebensdauer verschiedener Kondensatorenserien aufgetragen. Der stabilisierende Effekt des Anthraquinons im pentachlorierten Diphenyl ist bemerkenswert. Diese wirksame, die elektrochemische Zerstörung verzögernde «Bremse», ist indessen noch nicht die endgültige Lösung dieses heiklen Problems [10]. Die erstaunlich gute Stabilität der mit Mineralöl imprägnierten Kondensatoren aus Polyäthylen-Terephtalat-Folien scheint hier sehr günstig zu sein.

Die Auswahl der für die Imprägnierung der «kleinen» Kondensatoren zur Verfügung stehenden Imprägniermittel ist vergleichsweise grösser. Die klassischen Imprägniermittel (hauptsächlich Mineral- und mikrokristalline Wachse, Vaseline) haben in letzter Zeit keine entscheidenden Fortschritte aufzuweisen.

Die mit Rizinusöl imprägnierten Kondensatoren sind in Europa wenig verbreitet, trotzdem ihre Abmessungen klein und die Stabilität der Kapazität bis zu —40 °C hervorragend sind. Die übrigen Eigenschaften dieser Kondensatoren sind allerdings weniger hervorragend.

Die Imprägnierung «kleiner» Papierkondensatoren oder solcher mit synthetischen Folien mittels flüssiger Silikone ist nur für Kondensatoren, die bei kleinem Volumen höchsten Anforderungen genügen müssen, erforderlich. Dies bezieht sich auf den Temperaturbereich (von —55...+125 °C), auf die mechanischen Eigenschaften (Dichtigkeit, Stossfestigkeit, Vibrations- und Rüttelfestigkeit) und auf die elektrischen Eigenschaften. Da auch diese Kondensatorenkategorie, die meist mit Gleichspannung beansprucht wird, der folgenschweren elektrochemischen Beschädigung des komplexen Dielektrikums unterliegen kann, ist es empfehlenswert, dem Imprägniermittel ein stabilisierendes Element zuzusetzen.

Die mit chlorierten Wachsen oder mit einem synthetischen Material kombinierten Mischungen imprägnierten Kondensatoren sollen hier noch besonders erwähnt werden. (Chlorierte Wachse: Polychloronaphtalene, gebildet durch eine Mischung von Isomeren, deren Werte und Mischverhältnisse die elektrischen und chemisch-physikalischen Eigenschaften des Wachses und damit des Kondensators bestimmen.) Unter Gleichspannung $\leqq$ 1000 V ist das Verhalten dieser Kondensatorenklasse nur dann befriedigend, wenn der Hersteller sich die Mühe nimmt, unter genau überwachten Bedingungen [10] dem Imprägniermittel einen Stabilisator beizufügen, damit die elektrochemische Zerstörung verhindert werden kann, und wenn ferner der aktive Teil des Kondensators durch einen dichten Verschluss oder eine dichte Umhüllung vor Feuchtigkeit geschützt wird. Die dielektrische Festigkeit dieser Kondensatoren ist nur wenig besser als diejenige klassischer, mit mikrokristallinen Wachsen imprägnierten Kondensatoren. Der Konstrukteur wird indessen für ein gleiches Volumen den Vorteil der höheren Dielektrizitätskonstante der chlorierten Wachse dazu benützen, die Isolation des Basisdielektrikums bedeutend zu verstärken und damit diese Kondensatorenart höher zu klassieren. Für Wechselspannung von 50 Hz (Störschutzkondensatoren und Kondensatoren für Vorschaltgeräte) stellen die mit chlorierten Wachsen imprägnierten Kondensatoren gegenüber gleichen, in chloriertem Öl oder Mineralöl imprägnierten Typen keine ernsthafte Konkurrenz dar. Sie sind denn auch üblicherweise nur mit schwachen Feldstärken beanspruchbar (Grössenordnung ca. 10 kV/mm bei 50 Hz) infolge der rasch einsetzenden Ionisation. Diese beginnt in den unvermeidlichen Inhomogenitäten des Dielektrikums bei selten mehr als 60 °C.

Die «kleinen», in warmhärtenden synthetischen Harzen imprägnierten Papierkondensatoren erfreuen sich bei den Konstrukteuren elektronischer Apparate grosser Beliebtheit. Diese ist grösstenteils dem Umstand zuzuschreiben, dass der Miniaturisierungsgrad und die kompakte Bauweise der in einem Temperaturbereich von —55...+125 °C oder —40...+100 °C verwendbaren Typen den heutigen Anforderungen entsprechen. Ebenso ermöglicht diese Bauweise den Einsatz in feuchter Umgebung oder bei kleinen atmosphärischen Drücken, bei gleichzeitig hoher mechanischer Festigkeit

gegenüber Stössen, Erschütterungen und Vibrationen. Die Herstellung der Kondensatoren verlangt grosse Erfahrung in der Anwendung der warmhärtenden Harze zur Imprägnierung der entsprechend gewählten Papiere. Alle diese Voraussetzungen könnten nun den Verbrauchern als genügend erscheinen, um von dieser Kondensatorenklasse einen hohen Sicherheitsgrad fordern zu können. Demgegenüber sind einige Vorbehalte anzubringen. Bei Gleichspannungsbeanspruchung ist die dielektrische Festigkeit bisweilen ungenügend, was sich bei den relativ hohen Betriebsspannungen von 630 und 1000 V_ am meisten auswirkt und mit der zu wenig homogenen Struktur des komplexen Dielektrikums und einer progressiven, chemisch-physikalischen Veränderung des Basis-Dielektrikums (Papier) oder des Imprägniermittels zusammenhängt. Diese Unregelmässigkeiten können zum Teil durch besondere fabrikatorische Massnahmen, meist jedoch durch eine mehr oder weniger spürbare Verminderung der Feldstärke des gesamten Dielektrikums behoben werden. Bei Wechselspannung (meist 50 Hz) ist die Stabilität, aus den früher genannten Gründen, noch unbefriedigender als diejenige der mit chlorierten Wachsen imprägnierten Kondensatoren; es ist deshalb grosse Vorsicht geboten. Die mögliche Überlagerung einer Wechsel- auf eine Gleichspannung ergibt ähnliche Verhältnisse, die übrigens in den nationalen oder internationalen Normen genau umschrieben sind (z. B. Publ. 80 der CEI). Normalerweise liegt die Wechselspannungsbeanspruchung so tief, dass die Ionisationsschwelle des betreffenden Kondensators mit Sicherheit unterschritten bleibt.

5.2 Imprägnierung von Metallpapierkondensatoren

Die Anwendung der polychlorierten Diphenyle für die Imprägnierung von Metallpapierkondensatoren ist trotz den beachtlich scheinenden Vorteilen normalerweise ausgeschlossen. Der Aufbau dieser Kondensatoren ermöglicht eine Regeneration der schwachen Punkte des Basis-Dielektrikums und damit eine quasi vollständige «Rettung» des Kondensators. Im Moment der «Selbstheilung» verdampft der elektrische Lichtbogen die aus Zink, Aluminium oder einem andern Metall mit gleichen Eigenschaften bestehende sehr dünne Schicht (zwischen 0,1 und 0,01 μm), welche um die Fehlerstelle liegt. Dadurch wird zwar die leitende Stelle vom aktiven Teil des Kondensators getrennt, gleichzeitig aber, zwar örtlich begrenzt, das Imprägniermittel zersetzt. In Tabelle III sind die bei der Zersetzung auftretenden Produkte der Mineralöle und der chlorierten Öle aufgeführt. Das von den chlorierten Dielektrika stammende Salzsäuregas würde sofort die unter Vakuum aufgedampfte Metallschicht zersetzen.

Der grösste Teil der übrigen hier erwähnten Imprägniermittel für Papierkondensatoren ist auch für Metallpapierkondensatoren geeignet. Es sind sogar günstige Kombinationen möglich. So die mikrokristallinen Wachse oder die Wachse mit hoher Dielektrizitätskonstante, die, verbunden mit gewissen Mineralölen, die Hohlräume und Risse, welche beim Schrumpfen des sich verfestigenden Wachses auftreten können, ausfüllen. Die Vor- und Nachteile dieser Imprägniermittel können verglichen werden mit denjenigen der ausführlich beschriebenen Papierkondensatoren, welche in starker Konkurrenz zu den MP-Kondensatoren stehen. Diese unterscheiden sich vor allem durch ihre kleineren Abmessungen und die Eigenschaft, sich zu regenerieren oder regeneriert zu werden. Diese «Selbstheilung» ist heute für die Verbraucher nicht mehr von entscheidender Bedeutung, nachdem man erkannt hat, dass sie leider nicht immer mit der erhofften Wirkung eintritt. Die grösste Gefahr, die grossen und hoch beanspruchten Metallpapierkondensatoren erwachsen kann, ist die Ausserbetriebsetzung anschliessend an eine starke Gasbildung (siehe Tabelle III), die von der Zersetzung des Imprägniermittels (meist Mineralöl) durch die Entladungen im Betrieb herrührt. Ferner tritt eine rasche Alterung der Imprägniermittel, hervorgerufen durch den Lack, welcher von der Metallisierung auf das Papier gebracht wird oder andere Konstruktionselemente häufiger ein, als man annehmen könnte. Der kritische Ionisationseinsatz sinkt dadurch beträchtlich. Die Verwendung von Polyisobutylenen als Imprägniermittel eröffnet interessante Aussichten; es ist lediglich eine Anpassung des Imprägnierprozesses an die Viskosität des Imprägniermittels notwendig.

5.3 Imprägnierung von Polyesterfolien-Kondensatoren

Die im Prinzip nicht imprägnierbaren Basis-Dielektrika sind anders und vor allem nicht mit der gleichen Gesetzmässigkeit mit den Imprägniermitteln verbunden, wie die bis jetzt erwähnten Beispiele. Dies ist der Fall für Kondensatoren mit Polyesterfolien. Die Imprägnierung ist hier eher ein Ausfüllen von luft- oder gasgefüllten Hohl- oder Zwischenräumen mittels eines Isoliermittels. Auch sind dadurch einige besondere Anwendungen, die eine hohe Stabilität verlangen, in den Bereich des Möglichen gerückt (siehe z. B. Fig. 3).

5.4 Imprägnierung von Kondensatoren mit «gerichteten» Polystyrenfolien

Die Imprägnierung von Kondensatoren mit gerichteten Polystyrenfolien wird äusserst selten angewandt. Sie kann für gewisse Fälle einen willkommenen Schutz bringen und verbessert vor allem die Feldverteilung im Innern von Leistungskondensatoren für mittlere Frequenzen. Es gibt nur wenige hiefür in Frage kommende Imprägniermittel und ihre Wahl ist demzufolge leichter. Am besten geeignet sind die Mineral- und mikrokristallinen Wachse.

5.5 Imprägnierung von Glimmerkondensatoren

Die modernen Konstruktionsprinzipien dieser Kondensatorenart könnten zur Annahme verleiten, dass die Anwendung von komplexen Imprägnier-Dielektrika, wie Mineralöle oder warmhärtende, synthetische Harze, praktisch nicht notwendig sei. Die Imprägniermittel tragen indessen dazu bei, die im Kondensator erzeugte Wärme abzuleiten und störende Auswirkungen der ausserhalb des aktiven Teils von Leistungskondensatoren auftretenden heterogenen elektrischen Felder zu verhindern. Ferner verzögern und verhindern sie das Eindringen von Feuchtigkeit ins Innere des Kondensators. Mineralöle oder flüssige Isoliermittel mit guten elektrischen Eigenschaften werden gegenwärtig eher weniger gebraucht, an ihre Stelle tritt eine kompakte Konstruktion mit warmhärtendem Harz,

Die kleinen Glimmerkondensatoren werden allgemein mit warmhärtenden synthetischen Harzen imprägniert, wodurch sowohl die mechanische Festigkeit wie auch der Schutz gegenüber den mehr oder weniger gefährlichen klimatischen Einflüssen entscheidend verbessert wird.

6. Schlussfolgerungen

Die Technologie der elektrischen Kondensatoren umfasst eine Vielzahl, heterogen scheinender, Gesichtspunkte; die Synthese des einen oder andern, verbunden mit einer gewissermassen schematischen Darstellung seiner Elemente, trägt zu einer Ausweitung, besser noch, zu einer Revision von gemachten Meinungen bei: Meinungen, die durch einseitige Erfahrungen oder durch oft unrichtige Informationen beeinflusst wurden. Das Hauptziel dieser Studie ist deshalb eine von den Grundlagen ausgehende Orientierung in der Form einer Information für den Verbraucher bzw. einer Orientierung für den Kondensatorenkonstrukteur. Es wurde gezeigt, dass die Imprägniermittel mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften auf das Verhalten der Kondensatoren einen entscheidenden Einfluss ausüben, und dass ihre Wahl schlussendlich nicht richtig erfolgen kann, ohne die genauen Verwendungsbedingungen zu kennen. Die korrekte, technisch begründete Anwendung dieser Konstruktionsprinzipien zwecks Erfüllung der von den Verbrauchern aufgestellten Bedingungen soll zur Verwirklichung des angestrebten Zieles beitragen: «The right condenser in the right place.»

Literatur

[1] *Boyer, P.:* Aspects de la recherche dans une fabrique suisse de condensateurs. Bull. SEV 53(1962)24, S. 1170...1178.

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

[3] *Pierson, M.:* Rapport sur les travaux du Comité d'Etudes n° 18 «Condensateurs»; Annexe I: Rapport sur l'activité du Groupe de Travail «Papiers» de 1958 à 1961. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 17. Session 1962, Bd. II, Rapp. 159, S. 4...9.

[4] *Samoden, R. A.:* Increasing Corona Thresholds in Dielectriques. Electronics 35(1962)45, S. 80 u. 82.

[5] *Baldwin, L. V.:* Corona Considerations with «Mylar» Polyester Film. AIEE Conference Paper No CP 59—277.

[6] *Anonym:* Mosanto Dielectric Fluids: Aroclors Pyroclor. Form. No P151 — E 1 — 5801.

[7] *Elsner, H.:* Alterung und Verluste von Imprägniermitteln für Kondensatoren. Bull. SEV 51(1960)15, S. 733...739.

[8] *Soulages, G.:* Evolution dans la technique des condensateurs. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Serie, 9(1959)104, S. 449...460.

[9] *Meier, K.:* Elektrische Eigenschaften von Starkstromkondensatoren. Bull. SEV 49(1958)2, S. 37...45.

[10] *Boyer, P.:* Papierkondensatoren, imprägniert mit stabilisierten, chlorierten Dielektrika. Bull. SEV 52(1961)20, S. 801...804.

Adresse des Autors:

P. Boyer, dipl. Physiker, Condensateurs Fribourg S. A., Fribourg.

MAX DÉRI

1854 — 1938

Der am 27. Oktober 1854 geborene Max (Karl) Déri studierte an der Technischen Hochschule in Wien, die er als Wasserbauingenieur verliess. Er interessierte sich aber für Elektrotechnik und kam als 23jähriger zu Ganz & Co. in Budapest. Neben ihm wirkten O. T. Bláthy und Karl Zipernowsky. Dieses Trio arbeitete ausserordentlich gut zusammen; viele ihrer Entwicklungen stellen Gemeinschaftswerke dar.

Es war die Zeit, da man vorwiegend Gleichstrom verwendete, aber auch erkannt hatte, dass dem Gleichstrom engere Grenzen gesetzt sind. Aber ob man für Gleichstrom oder Wechselstrom eintrat, schien beinahe Glaubenssache zu sein. An der Turiner Ausstellung von 1884 hatte der Franzose *Gaulard* [1]) seine «Générateurs secondaires» gezeigt. Mit den in Serie geschalteten Transformatoren konnte erstmals eine elektrische Kraftübertragung mit Wechselstrom über eine grössere Distanz verwirklicht werden.

Déris grosser Verdienst bestand im Gedanken eines Hochspannungsnetzes mit annähernd gleicher und konstanter Spannung an allen Punkten und der Spannungswandlung durch parallel geschaltete Transformatoren. Déri gab den sog. «Induktionsvorrichtungen», die übrigens erstmals einen geschlossenen, magnetischen Kreis aufwiesen, auch den heute noch gebräuchlichen Namen «Transformatoren». Zusammen mit seinen erwähnten Kollegen, von denen Bláthy den Transformator noch wesentlich verbesserte, setzte sich Déri energisch und zielbewusst für die neue Lösung ein. Erste Anlagen entstanden 1886 in Luzern (Thorenberg) und Rom.

Um die gleiche Zeit entwickelte er zusammen mit Zipernowsky den selbsterregenden Synchronmotor, etwas später (1888) den Einankerumformer. Seine eigene Leistung war schliesslich der Einphasen-Wechselstrom-Repulsionsmotor mit verdrehbaren Bürsten, der unter dem Namen Déri-Motor bekannt wurde und eine Zeitlang im Bahnbetrieb eine grosse Rolle zu spielen versprach.

Déris Verdienste um die Elektrotechnik wurden gebührend gewürdigt. Er erhielt auch den Ehrendoktor der technischen Wissenschaften.

Später verliess Déri das Ganzsche Unternehmen, um Direktor der Internationalen Elektrizitätsgesellschaft in Wien zu werden. Hochbetagt starb er am 3. März 1938 in Meran. *H. W.*

[1]) Siehe Bull. SEV 55(1964)2, S. 61.