Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 21

Artikel: Ein neues Kondesator-Dielektrikum mit Gasimprägnierung

Autor: Georg, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915617

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: 09.07.2025

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

Ein neues Kondensator-Dielektrikum mit Gasimprägnierung [1])

Von *G. Georg*

621.319.4:621.315.61

Um das bereits bei niederer Spannung einsetzende Glimmen der in den Kondensatorwickeln eingeschlossenen Luft zu verhindern, wird mit einem Tränkmittel imprägniert. Kunststoffolien müssen von Papiereinlagen begleitet sein, damit die Flüssigkeit den Wickel voll durchdringt. Einfacher ist eine Imprägnierung mit SF_6 unter Überdruck. Um dem Gas zum Wickelinneren Zutritt zu verschaffen, wird in die Aluminiumfolie ein Raster paralleler Linien geprägt.

An kleinen, wenig gepressten Versuchswickeln wurde für die Dielektrizitätskonstante (DK) der Wert 1,32 gemessen. Bei SF_6 begann der Teilentladungs-(TE-) Einsatz bei 500 V und stieg mit dem Druck. Im Gegensatz zu einer N_2-Füllung wuchs die TE-Intensität bei SF_6 mit steigender Spannung nur langsam. Formieren bei N_2 führte zu einer erheblichen Verbesserung des TE-Verhaltens. 50-Hz-Durchschläge traten erst oberhalb 125 kV/mm auf.

Mit diesem Dielektrikum wurde ein Kondensator 400 V, 10 kvar, gebaut. Trotz höherer Wickelpressung betrug die DK nur 1,39. Es muss noch besser, d.h. faltenfrei gewickelt werden. Dazu wurde gemessen: Verlustfaktor $< 0{,}3\,^0/_{00}$, Übertemperatur 2 °C, 50-Hz-Durchschläge bei 120 kV/mm.

Das untersuchte Trockendielektrikum ist umweltfreundlich, erwärmt sich kaum und führt zu einem einfachen Gehäuse mit billiger Montage.

Pour empêcher l'effluvage qui se produit, déjà sous une faible tension, dans des occlusions d'air de rouleaux de condensateurs, ceux-ci sont imprégnés. Les films en matière synthétique doivent être accompagnés d'un papier intercalaire, de manière que le liquide d'imprégnation pénètre complètement. Le plus simple est une imprégnation avec du SF_6 sous pression. Pour que ce gaz puisse pénétrer dans le rouleau, une trame de lignes parallèles est gravée dans la feuille d'aluminium.

A des rouleaux d'essai peu comprimés, on a mesuré pour la constante diélectrique une valeur de 1,32. Avec du SF_6, les décharges partielles commençaient sous 500 V et augmentaient avec la pression. Contrairement à un remplissage de N_2, l'intensité des décharges partielles dans le cas du SF_6 n'augmentait que lentement avec l'élévation de la tension. La formation avec du N_2 améliorait nettement le comportement aux décharges partielles. Des perforations à 50 Hz ne se produisaient qu'à partir de 125 kV/mm.

Un condensateur pour 400 V, 10 kvar, a été construit avec ce diélectrique. Malgré une plus forte compression du rouleau, la constante diélectrique n'atteignait que 1,39. Il faut enrouler encore mieux, c'est-à-dire sans plis. On a mesuré en outre un facteur de puissance de $0{,}3\,^0/_{00}$, une surélévation de température de 2 °C et des perforations à 50 Hz à partir de 120 kV/mm.

Le diélectrique sec examiné n'est pas polluant, il s'échauffe à peine et permet un montage peu coûteux dans un boîtier simple.

1. Flüssig-imprägnieren von Kondensatorwickeln

Ein Kondensatorwickel, der in seiner einfachsten Form aus zwei Metallbelägen und einer oder mehreren festen Isolierschichten aufgebaut ist, kann nur mit mässiger Spannung betrieben werden. Von einer bestimmten Einsatzspannung ab beginnt die zwischen den Belägen eingeschlossene Luft zu glimmen. Diese Teilentladungen (TE) bewirken nicht nur störendes Rauschen, sondern kürzen die Lebensdauer des Kondensators drastisch. Für manche Kondensatoren in elektronischen Schaltungen, die an nur mässiger Spannung betrieben werden, mag dieser einfachste Aufbau durchaus genügen.

Sind höhere Spannungen anzulegen, was wohl bei Leistungskondensatoren immer der Fall sein wird, muss die Luft entfernt und das Dielektrikum mit einem flüssigen Tränkmittel imprägniert werden. Damit steigt der TE-Einsatz erheblich. Zudem besteht die Möglichkeit, ein Tränkmittel mit einer hohen DK wählen zu können, so dass zusätzlich ein nennenswerter Kapazitätsgewinn erzielt werden kann.

Dieses Verfahren ist dann erfolgreich, wenn die feste Zwischenschicht aus Papier besteht oder wenn bei tränkbaren Kunststoffolien eine Papierschicht zugefügt ist bzw. wenn eine nicht tränkbare Kunststoffolie auf beiden Seiten mit je einer Papierschicht abgedeckt ist. Liegen glatte Oberflächen von Metallbelägen und nicht tränkbaren Kunststoffolien aufeinander, gelingt es nicht, die eingewickelte Luft durch Unterdruck zu entfernen und durch ein Tränkmittel zu ersetzen. Eine Ausnahme ist nur dann möglich, wenn locker gewickelt wird oder wenn im Falle tränkbarer Folien der Wickel nicht breiter als ca. 100 mm ist. Lockeres Wickeln ist ein wenig definierter und kaum reproduzierbarer Prozess. Es besteht keine Gewähr, dass in begrenzten Bereichen nicht doch Luft eingeschlossen bleibt. Auf der Grundlage lockeren Wickelns Seriengeräte herzustellen, erscheint kaum gangbar. Dass eine tränkbare Folie (z.B. Polypropylen) in schmalen Wickeln durchimprägniert werden kann, ist nachgewiesen [1][2]). Das Imprägnieren von breiten Wickeln benötigt zu viel Zeit und ist daher nicht wirtschaftlich. Breite Wickel sind aber nicht zu umgehen, wenn höhere Spannungen und Leistungen erreicht werden sollen. Daher wird auch tränkbaren Folien eine Papierschicht beigegeben [2]. Diese Papierschicht mag im elektrischen Feld oder ausserhalb desselben liegen [3], die rauhe Oberfläche und die Kanäle durch den Papierfilz öffnen Luft und Tränkmittel den Weg.

2. Flüssig-imprägnieren ohne begleitende Papierschicht

Hersteller von Kondensatoren höherer Spannung und Leistung, die wegen der grossen Ströme nicht mit metallisierten Belägen arbeiten können, haben schon immer die Papiereinlage in das elektrische Feld als einen unerwünschten, zum Zwecke der Tränkung zunächst jedoch nicht vermeidbaren Ballast aufgefasst. Auswege sind darin gesehen worden, die Kunststoffolie [1] oder den Metallbelag aufzurauhen oder zu prägen. Die Tränkung eines solchen Wickels gelingt sehr zuverlässig und beansprucht vergleichsweise wenig Zeit. Solche Kondensator-Einheiten befinden sich in regulärem Einsatz. Serienmässige Fertigungen sind bis heute noch nicht bekannt. Die Ursache mag sein, dass der Hersteller einem Dielektrikum den Vorzug geben möchte, das nur noch Kunststoffolien ohne Flüssigkeitsschichten verwendet, weil er sich daraus eine höhere Volumen-

[1]) Anlässlich des Symposiums «Elektrische Isolationstechnik 1972 des SEV» eingereichte Arbeit.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

ausnutzung erhofft. Wichtiger erscheint aber, dass zuerst nachgewiesen werden muss, ob hohe Lebensdauer auch ohne Gegenwart von Papierfasern erhalten wird. Z. B. ist bekannt, dass als Polymerisations-Katalysatoren von Polypropylen Metallverbindungen Verwendung finden. Es ist zu vermuten, dass die Zellulose Überschüsse solcher Katalysatoren bindet, die von den Epoxy-Zusätzen im Polychlordiphenyl nicht gebunden werden. Ähnliche Zusammenhänge sind auch bei den Desoxydatoren und weiteren Zusätzen im Polypropylen denkbar. Wie diese Fragen auch zu beantworten sein mögen: Es ist nicht einfach bei einem flüssigkeitsgetränkten reinen Kunststoffdielektrikum hohe Lebensdauer zu erreichen.

3. Imprägnieren mit Gas

Zu Beginn der Abhandlung ist dargelegt worden, dass die Tränkung eines Wickels mit einer dielektrischen Flüssigkeit sinnvoll ist, weil damit die TE-Einsatzspannung wesentlich angehoben werden kann. (Dass sich gleichzeitig die Kapazität erhöhen lässt, sei hier nicht weiter beachtet.) Die Frage ist berechtigt, ob nicht der anfängliche Gasanteil eines Dielektrikums mit fester Trennschicht so modifiziert werden kann, dass die TE-Einsatzspannung angehoben wird, ohne dass zur Tränkung mit einer Flüssigkeit geschritten werden muss. Offensichtlich gibt es zwei Wege: Der Luftdruck wird erhöht, oder es wird ein anderes Gas gewählt. Es ist bekannt, dass mit wachsendem Druck die TE-Einsatzspannung steigt. Allerdings bedarf es – wie noch gezeigt wird – erheblicher Überdrücke, um einen nennenswerten Anstieg der TE-Einsatzspannung zu erzielen. Die Folge sind schwere druckfeste Gehäuse, die aus Kostengründen nicht in Betracht kommen. Der Wechsel der Gasart drängt sich auf. Im Schwefelhexafluorid (SF_6) steht ein elektronegatives Gas mit günstigen Eigenschaften und niedrigem Preis zur Verfügung. Voraussetzung ist jedoch, dass die im Wickel enthaltene Luft evakuiert und einheitlich durch SF_6 ersetzt werden kann.

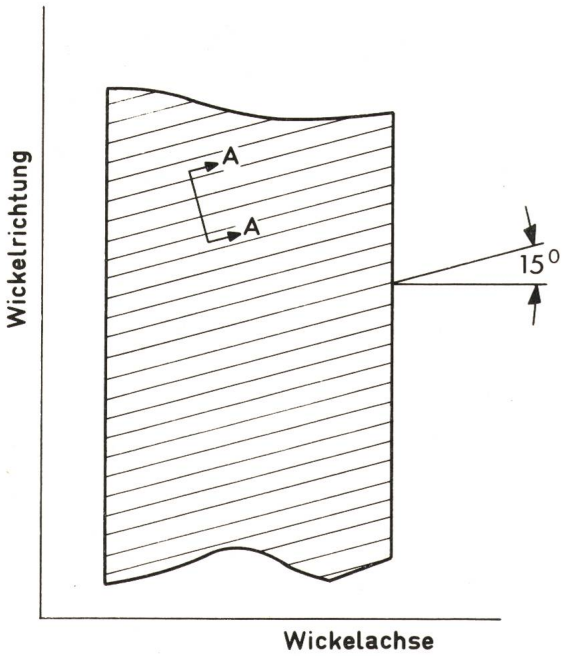


Fig. 1
Mit einem System paralleler Linien geprägte Aluminiumfolie, als Belag zu einem Dielektrikum, das aus einer Kunststoffolie und einem elektronegativen Gas besteht

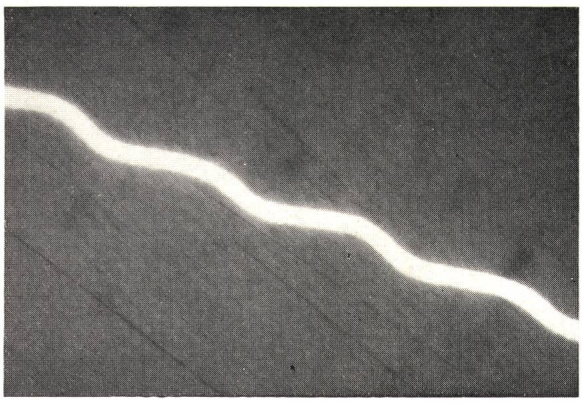


Fig. 2
Mikroschliff
entlang Schnitt A-A in Fig. 1; 250fache Vergrösserung
Dicke der Folie 8 µm
Tiefe der Prägung 6 µm
Länge der Periode 83 µm

4. Prägen von Folien oder Belägen als Voraussetzung der Gasimprägnierung

Das in Abschnitt 2 erwähnte Aufrauhen oder Prägen ermöglicht den Gasaustausch im ganzen Wickel. Grundsätzlich kommt es nicht darauf an, ob die Kunststoffolie oder der Metallbelag geprägt ist. Über das Prägen einer Kunststoffolie ist bereits berichtet worden [1]. Offensichtlich bedarf es über das Prägen hinaus eines thermischen Prozesses, um die Folie wieder zu stabilisieren. Solche Folien sind im Handel noch nicht erhältlich, bzw. es ist noch nicht bekannt, mit welchen Zusatzkosten zu rechnen ist. Es stellt sich aber doch die Frage, ob es richtig und sinnvoll ist, die auf höchste Durchschlagfestigkeit gezüchtete Kunststoffolie nachträglich einem weiteren mechanisch/thermischen Prozess zu unterwerfen. Der Nachweis, dass die elektrischen Festigkeitseigenschaften nicht leiden, müsste erst noch erbracht werden.

Daneben ist die Aluminiumfolie, aus der die Metallbeläge in der Regel bestehen, leicht und mit geringen Kosten zu prägen. Vom Aufrauhen der Oberfläche, z. B. durch Ätzen, ist abzuraten. Konvexe Erhebungen mit kleinen Krümmungsradien sind Anlass zu Feldverdichtungen und bieten erste Ansatzstellen für Teilentladungen.

Aus diesem Grunde wurde für den Kondensator, über den hier berichtet wird, eine definierte, aus parallelen Linien bestehende Prägung gewählt. Fig. 1 zeigt, dass die Linien einen Winkel von 15° mit der Wickelachse einschliessen. Der Belag der Gegenelektrode wird dann so eingelegt, dass die beiden Liniensysteme sich kreuzen. Auf diese Art wird ein stabiler Wickelaufbau erzielt. Das Grundmaterial besteht aus einer 8 µm dicken Aluminiumfolie. Ein dem Schnitt A-A in Fig. 1 folgender Mikroschliff (Fig. 2) zeigt, dass die Kontur der Prägung weitgehend einer harmonischen Schwingung folgt und frei von Kanten und Ecken ist. Die Tiefe der Prägung beträgt ca. 6 µm. Es gelang, 12 Linien auf 1 mm unterzubringen, so dass sich eine Periode von 83 µm ergibt (Fig. 3).

5. Bau von kleinen Versuchskondensatoren

Fig. 4 zeigt einen 30,2 mm dicken Flachwickel, der in einen Becher eingesetzt wurde. Dieser Wickel bestand aus 78 mm breiten, geprägten Aluminiumfolien und dazwischen 15,2 µm dicken, 90 mm breiten Folien aus Polypropylen. Dieses Mate-

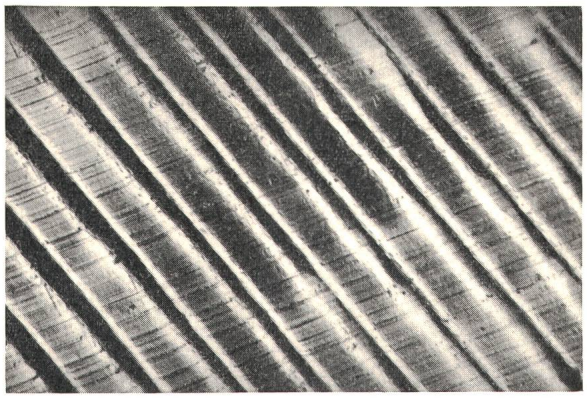


Fig. 3
Flächenbild der Folie
100fache Vergrösserung
Weitere Angaben siehe Fig. 2

rial wurde gewählt, weil es wirtschaftlich interessant ist [2]. Zur Kontaktierung wurden Streifen aus verzinnter Kupferfolie eingelegt. Bei Spannungen > 400 V geben sie keinen Anlass zu sog. current noise.

Die eine Variante wurde auf maximale Kapazität gewickelt. Hier liessen sich 216 Windungen unterbringen. Bei der anderen Variante wurden nur $3^3/_4$ aktive Windungen angeschlossen und damit die Kapazität beschränkt, um den TE-Einsatz empfindlicher messen zu können.

6. Betrieb der Versuchskondensatoren

6.1 Versuchsanordnung

Zur Verfügung stand ein Autoklav, der nach Evakuierung auf 0,05 Torr mit SF_6 gefüllt und nach Bedarf geheizt werden konnte. Bei einem SF_6-Druck von 1 ata war dann der Luftanteil $< 10^{-4}$. Gas- und Druckwechsel wurden dem Dielektrikum der Versuchskondensatoren sehr schnell mitgeteilt. Bei der nachfolgenden Messung der TE-Einsatzspannung stellten sich bei jeder Druckstufe die neuen Werte innert weniger Sekunden ein. Die Durchlüftung der Wickel infolge der geprägten Aluminiumfolien war also ausgezeichnet.

6.2 Ermittlung der DK aus der gemessenen Kapazität

Bei 6 Versuchskondensatoren hoher Kapazität betrug bei 22 °C, 400 V und SF_6-Füllung 4 ata der Mittelwert der Kapazität 1,784 µF ± 2,4 %. Dem noch unbekannten Gasspalt kann Rechnung getragen werden, indem die Dicke d_f der Kunststoffolie mit dem Raumfaktor k_{sp} multipliziert wird. Die Wickelhöhe ist dann

$$h_w = 4\,N\,(k_{sp}\,d_f + d_{al\,res}) + \text{Korrektur} \qquad (1)$$

Die Korrektur ergibt sich aus den Anfangs- und Schlusswindungen je nach Wickeltechnik. In diese Formel werden die Zahlwerte in µm eingesetzt:

$$30200 = 4 \cdot 216\,(k_{sp} \cdot 15{,}24 + 14) + (579\,k_{sp} + 126) \qquad (2)$$

$$k_{sp} = 1{,}31 \qquad (3)$$

Damit kann aus der Messung die DK bestimmt werden, wobei die mittlere Windungslänge mit l_m bezeichnet wird.

$$C = \varepsilon_0\,\varepsilon\,\frac{(2\,N - 0{,}5)\,l_m\,b_{al}}{k_{sp}\,d_f} \qquad (4)$$

$$1{,}784 = 8{,}86 \cdot 10^{-4}\,\varepsilon\,\frac{(2 \cdot 216 - 0{,}5) \cdot 9 \cdot 7{,}8}{1{,}13 \cdot 15{,}2} \qquad (5)$$

$$\varepsilon = 1{,}32 \qquad (6)$$

Wegen des hohen Raumfaktors von 1,31 bleibt die DK wesentlich unter derjenigen des Polypropylens von 2,2. Mit faltenfreiem Wickeln und konsequenter Pressung sollte k_{sp} auf 1,1 gesenkt werden, so dass die Prägung der Belagsfolie sich im ganzen Wickel auswirken könnte. Damit liessen sich DK und Volumenausnutzung steigern.

6.3 Messungen der Kapazität

Zwei Versuchsreihen bei Veränderung der Parameter zeigten kleine systematische Variationen. Basis für die relativen Änderungen sind die gemessenen Kapazitätswerte bei den unterstrichenen Parameterwerten.

5 Probekondensatoren bei Raumtemperatur:

Bei SF_6 und	$\underline{1}$ – 4 ata	$\Delta C = +0{,}34$ %
	$\underline{100}$ – 500 V	$\Delta C = +0{,}62$ %
Bei N_2 und	$\underline{1}$ – 4 ata	$\Delta C = +0{,}06$ %
	$\underline{100}$ – 500 V	$\Delta C = +0{,}56$ %
Bei N_2 anstelle SF_6 und	1 ata	$\Delta C = -0{,}12$ %
	4 ata	$\Delta C = -0{,}34$ %

1 Probekondensator bei variabler Temperatur mit SF_6:

$\underline{1}$ – 4 ata	$\Delta C = +0{,}40$ %
$\underline{100}$ – 400 V	$\Delta C = +0{,}54$ %
$\underline{25}$ – 98 °C	$\Delta C = +1{,}50$ %

Den grössten Einfluss hat somit die Temperatur mit $205 \cdot 10^{-6}$ pro °C. Es folgen die Spannung und endlich der Druck. Mit N_2 anstelle von SF_6 nimmt die Kapazität weniger zu, besonders bei höherem Druck.

6.4 Messungen des Verlustfaktors

Der Verlustfaktor war bei den niedrigeren Werten schwer zu messen. Die relative Genauigkeit innerhalb einer Messreihe in Abhängigkeit der Spannungen und Drücke genügte, hingegen war sie reduziert, sobald 8 bis 15 Stunden bis zum Einspielen einer neuen Temperatur abgewartet werden mussten. Deshalb fehlt noch die übliche Verlustfaktorkurve $\tan\delta = f(\vartheta)$ für SF_6. Immerhin wurde festgestellt, dass die Variationen nicht gross sind. Viel stärker ausgeprägt ist gemäss Fig. 5 die

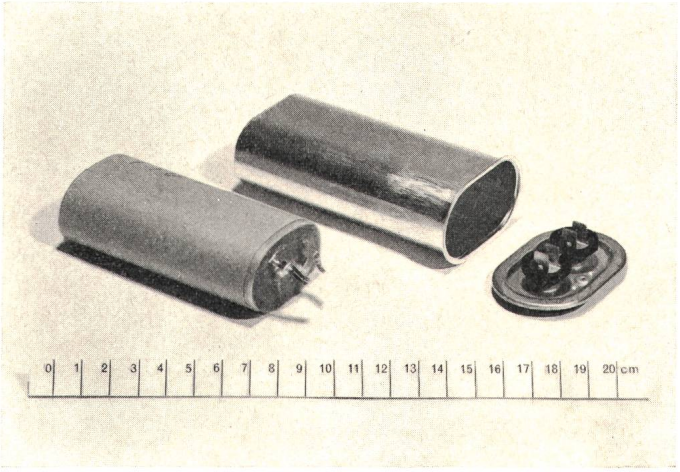


Fig. 4
Versuchskondensator

Abhängigkeit von der Spannung. Dieses Diagramm zeigt ausserdem, dass der Druck den Verlustfaktor nur geringfügig beeinflusst. Allgemein werden 0,3 ‰ nicht überschritten. Bei Stickstoff ist das Verhalten ganz ähnlich, wobei die Verlustfaktoren durchweg etwas niedriger liegen als bei SF_6.

6.5 Messungen des TE-Einsatzes

Alle folgenden Messungen des TE-Einsatzes und der TE-Intensität sind mit dem discharge detector nach *Mole* [4] ausgeführt worden. Ganz allgemein ist das Messen von TE-Vorgängen nicht einfach und steht unter dem subjektiven Erkennungsvermögen des Beobachters. Die in Fig. 6 angegebenen Werte sind deshalb mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren. Deutlich ist aber, dass sowohl für N_2 als für SF_6 der TE-Einsatz so niedrig liegt, dass zunächst an der technischen Realisierbarkeit dieses dielektrischen Systems zu zweifeln ist. Eindeutig konnte hingegen bestätigt werden, dass die Temperatur auf den TE-Einsatz bei SF_6 keinen Einfluss hat.

6.6 Messungen der TE-Intensitäten

Wenn schon in Abschnitt 6.5 die TE-Einsatzwerte starke Streuungen aufwiesen, so ist die Messung der TE-Intensität durch Vergleich der Impulsamplituden mit einem Testsignal mühsam und enthält grosse Unsicherheiten. Trotzdem erlauben die gemessenen Intensitäten ziemlich einwandfreie Tendenzen zu erkennen. Die in Fig. 7 gezeigten Messungen sind an neuwertigen Probekondensatoren vorgenommen worden, die in Stufen von 100 V, 50 Hz, innert ca. 5 min bis zum Durchschlag beansprucht wurden. Festgestellt wurde folgendes:

– Bei N_2 steigt die TE-Intensität vom Einsatz her ziemlich rapid bis zum Sättigungswert.
– Bei SF_6 steigt die TE-Intensität über einen weiten Spannungsbereich nur langsam an, jedoch steil bei Intensitäten ab ca. 30 pC.

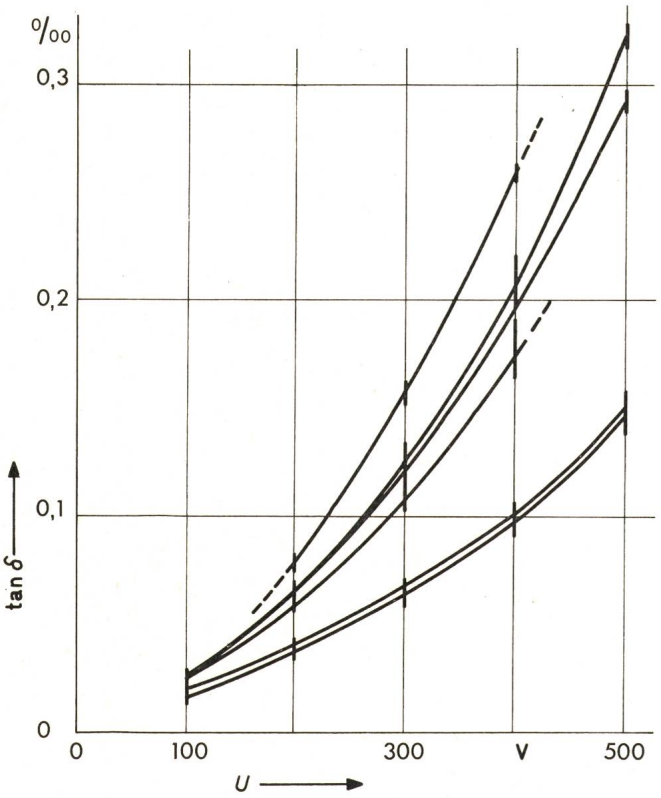


Fig. 5
Verlustfaktor tan δ **in Funktion der Spannung** U **bei 6 Versuchskondensatoren**
Mittelwerte bei Variation des Druckes 1...6 mit SF_6

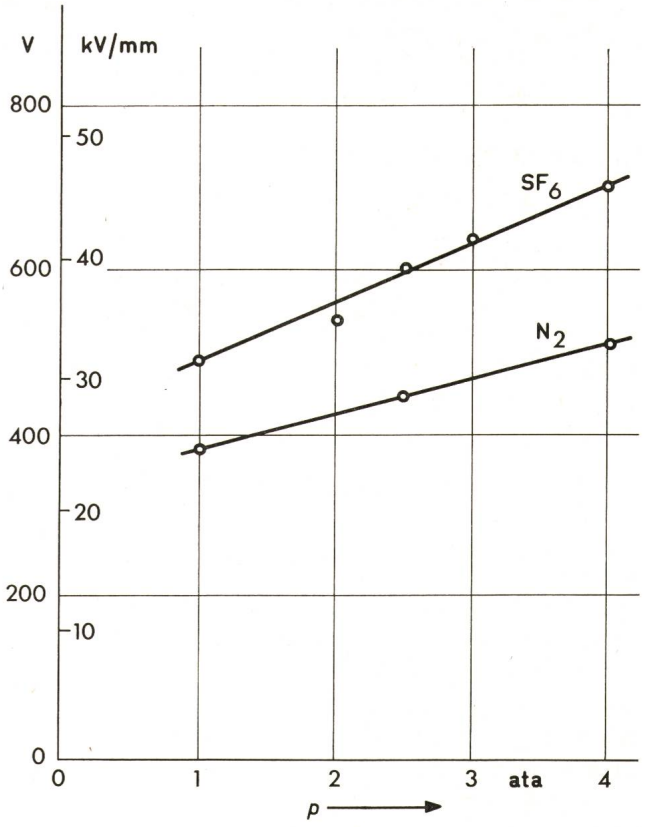


Fig. 6
TE-Einsatz in Abhängigkeit vom Druck p **für** SF_6 **und** N_2 **bei Raumtemperatur**

– Die Abhängigkeit der TE-Intensität vom Druck ist deutlich.
– SF_6 erträgt höhere Spannungen als N_2.
– Die Steilheiten vor der Sättigung könnten für beide Gase und alle Drücke gleich sein.
– Der Sättigungswert liegt einheitlich in einem Band zwischen 1500 und 5000 pC. Ob diese Sättigung auf versuchs- oder messtechnische Gegebenheiten zurückzuführen ist, wurde noch nicht abgeklärt.

Abermals ist festzustellen, dass messbare TE-Intensitäten bereits in niedrigen Spannungsbereichen auftreten, so dass die technische Realisierbarkeit dieses dielektrischen Systems unsicher erscheint.

6.7 Verbesserung des TE-Verhaltens durch «Formieren»

Durch einen Zufall stellte sich heraus, dass Formieren, d.h. intensive Vorbelastung, die TE-Intensitäten erheblich reduziert und ihre Kurve in höhere Spannungsbereiche verschiebt. In Fig. 8 ist dies für N_2 und SF_6 bei 4 ata dargestellt. Kurven 1 und 3 sind der Fig. 7 entnommen. Ihnen liegen Messungen an verschiedenen Kondensatoren zugrunde, die bis zum Durchschlag geführt wurden. Kurven 2 und 4 wurden am gleichen Kondensator ermittelt, und zwar entsprechend Kurve 2 zuerst bei N_2-Füllung mit einer Belastung bis 1000 V und starken TE-Intensitäten. Die Zeitdauer der Vorbelastung mag sich auf 5 min insgesamt belaufen haben. Anschliessend wurde evakuiert und auf SF_6 umgefüllt. Eine Stunde später wurde Kurve 4 gemessen. Der Durchschlag erfolgte bei 2400 V.

Der Vergleich der Kurven 3 und 4 zeigt, dass die TE erheblich später einsetzen. Die Verbesserung ist so beträchtlich, dass die in Abschnitt 6.5 und Abschnitt 6.6 geäusserten Bedenken gegen die technische Realisierbarkeit hinfällig werden.

6.8 Durchschlagsverhalten

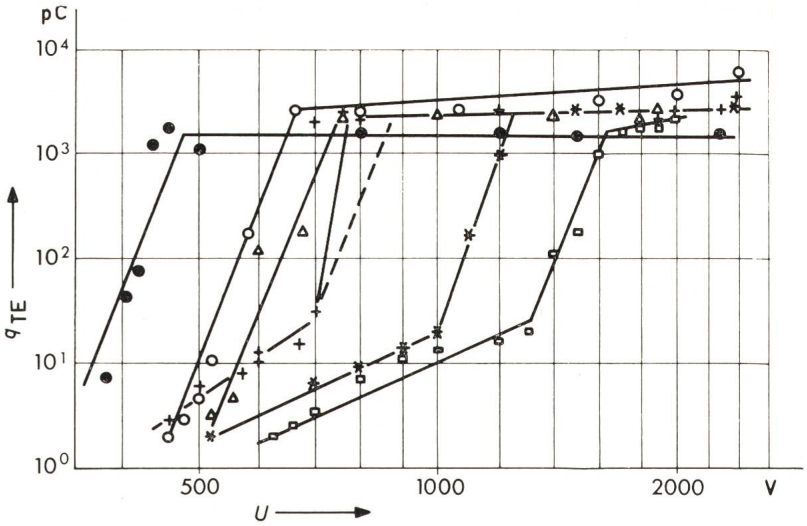
Es mag einige Bedenken erwecken, mit einer einzigen Kunststofflage genügende Durchschlagsfestigkeiten zu erzie-

Fig. 7
TE-Intensität $q_{TE} = f(U)$ bei 50 Hz

● N_2 1 ata ✚ SF_6 1 ata

○ N_2 2,5 ata ✱ SF_6 2,5 ata

△ N_2 4 ata □ SF_6 4 ata



len. Denn obgleich die biaxial gereckten Folien grosse Homogenität aufweisen, sind sie nicht frei von Schwachstellen. Der Lieferant der verwendeten Kunststoffolie toleriert mit < 0,5 leitenden Stellen pro 10 dm².

Nun ist aber beim hier untersuchten Isolationssystem die zusätzliche schützende Wirkung des Gaspuffers zu beachten. Stellen, an denen der Film beidseitig dem Metallbelag anliegt, treten nur mit einer reduzierten Wahrscheinlichkeit auf. Die Auswirkung der sich gekreuzt gegenüber stehenden Linienprägung der Metallbeläge zu untersuchen, ist verfrüht, solange nicht bessere Raumfaktoren als 1,31 erreicht werden. Vorerst werden in Fig. 9 die Daten von Durchschlägen angegeben, die im Laufe der verschiedenen Versuche teils absichtlich herbeigeführt wurden, teils am Ende der Messreihen von TE-Intensitäten auftraten.

Es zeigt sich, dass 50-Hz-Durchschläge erst oberhalb 1900 V, d.h. in einem Band von 130...160 kV/mm erfolgen. Eine Abhängigkeit vom Druck besteht hier nicht. Das Gleichspannungsverhalten ist mit Durchschlägen zwischen 240 und 340 kV/mm schlecht, wenn man bedenkt, dass der Lieferant 600 kV/mm, gemessen nach ASTM, garantiert. Es lässt sich nachweisen, dass infolge des hohen Oberflächenwiderstandes der Kunststoffolie beträchtliche Raumladungen auftreten und Schwachstellen nicht mehr unter dem Schutz ihrer statistischen Verteilung stehen. Das hier untersuchte dielektrische System wird somit für Gleichspannung nicht verwendet werden können.

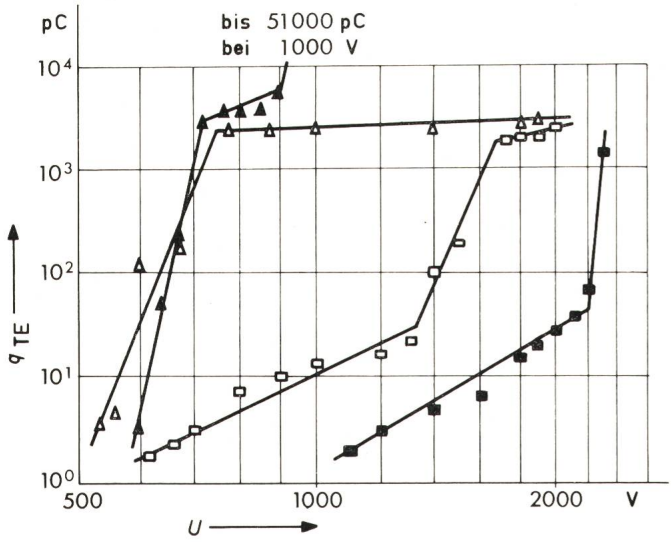


Fig. 8
TE-Intensität $q_{TE} = f(U)$ bei 50 Hz

△ N_2 bei 4 ata

▲ N_2 bei 4 ata, während der Formierung

▭ SF_6 bei 4 ata

▬ SF_6 bei 4 ata, formiert

6.9 Lebensdauer

Messungen wurden noch nicht durchgeführt.

7. Bau eines Leistungskondensators

Bei Verlustfaktoren < 0,3 ‰ war nicht zu erwarten, dass sich eine grössere Einheit erheblich erwärmen würde. Es war aber doch vorzuziehen, eine solche Einheit zu bauen und festzustellen, wie sie sich bei fabrikmässigem Aufbau verhalten würde.

Zum Einbau dienten Stapel und Gehäuse eines normalen Niederspannungskondensators. Einzig das System der internen Wickelsicherungen war vollständig einzukapseln. Die Nennspannung wurde mit 400 V und der Druck mit 2,5 ata gewählt. Bei vorhergehender Formierung wäre dann gemäss Fig. 8 der TE-Einsatz weit über der 50-Hz-Prüfspannung (2,15 · 400 = 860 V) gelegen.

Die Anfertigung der 30 Flachwickel in den Abmessungen 315 × 121 mm bot auf einem modernen Wickelautomaten keine Schwierigkeiten, wenngleich sich schwache Falten in der Aluminiumfolie nicht ganz vermeiden liessen. Der Stapel konnte bis dicht an die berechnete Stapelhöhe einwandfrei gepresst werden. Unter einem Pressdruck von ca. 50 kg/cm² wurden alle Wickel mit 400 V, 50 Hz, bei Luftdruck 1 ata und 70 % Feuchtigkeit vorgeprüft. Wider Erwarten ergab sich bei der beachtlichen Fläche 270 m² kein einziger Durchschlag.

8. Kurzzeitbetrieb des Leistungskondensators

8.1 Ermittlung der DK aus der gemessenen Kapazität

Aus verschiedenen Messungen ergibt sich der Mittelwert der Wickelkapazität (bei 20 °C, 400 V und SF_6-Füllung 2,5 ata) zu 6,82 µF. Bei gleichem Vorgehen wie in Abschnitt 6.2 wird erhalten:

$$\text{Raumfaktor: } k_{sp} = 1{,}26 \quad \text{und} \quad DK\text{: } \varepsilon = 1{,}39$$

Bei den kleinen, nur von Hand zusammengedrückten Versuchswickeln gemäss Abschnitt 6.2 hatten die betreffenden

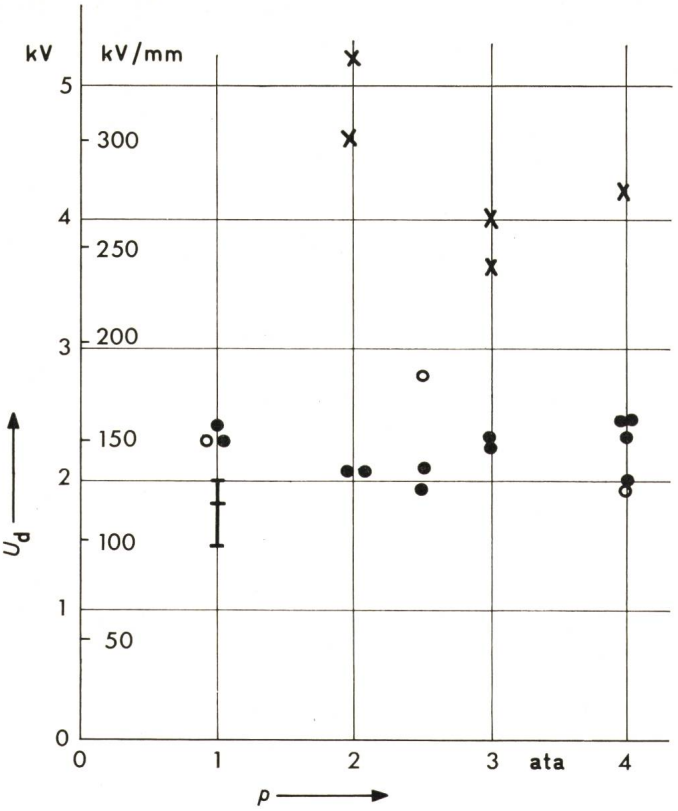


Fig. 9
Durchschlagspannung U_d bei 0 und 50 Hz in Abhängigkeit von Druck p bei 1 Lage Polypropylen 15,2

● SF_6 bei 50 Hz

○ N_2 bei 50 Hz

× SF_6 bei 0 Hz

I Luft bei 50 Hz (bei Kondensatoreinheit gemäss Abschnitt 8.3)

Werte auf 1,31 und 1,32 gelautet. Die in eine bessere Pressung gesetzten Erwartungen haben sich also nicht erfüllt. Offensichtlich ist es notwendig, die breiten Wickel besser, d. h. faltenfrei zu wickeln.

8.2 Messung von Kapazität und Verlustfaktor

Diagramme können noch nicht vorgelegt werden; doch wurde festgestellt:

- tan δ ist bei 40 V kleiner als bei 400 V;
- tan δ nimmt mit steigender Temperatur zu, bleibt aber $< 0{,}3\ ^0/_{00}$;
- C ist wahrscheinlich nur wenig temperaturabhängig.

8.3 Thermisches Verhalten

Bei 40 °C Umgebungstemperatur stellte sich im Wickelinneren eine höchste Übertemperatur von 2 °C ein. Wie zu erwarten, ergeben sich also keine thermischen Probleme, und es ist damit zu rechnen, dass auch ein Einsatz bei höheren Frequenzen in Frage kommt.

8.4 Leistung und Volumenleistung

Werden die 30 parallelen Wickel von je 6,82 µF an 400 V angeschlossen, ist die Blindleistung der Einheit 10 kvar. Die Leistung pro Volumeneinheit ist bei dem gewählten Kondensatoraufbau 0,59 kvar/dm³. Es ist klar, dass dieser Wert mit den 1,75 kvar/dm³ einer regulären Papier/Chlordiphenyl-Einheit nicht konkurrieren kann.

8.5 Durchschlagsverhalten

Nach Öffnen der Einheit wurden sechs nicht benachbarte Wickel in Luft bis zum Durchschlag belastet. Als Mittelwert ergaben sich, wie in Fig. 9 eingetragen, 1820 V (−20...+10 %).

9. Bewertung der Ergebnisse

Das untersuchte Trockendielektrikum zeichnet sich durch eine Reihe interessanter Eigenschaften aus, die zu einer einfachen Technologie führen. Diese ist wie folgt gekennzeichnet:

- Umweltfreundlichkeit durch die Verwendung des inerten SF_6-Gases;
- Bei hoher Leistung extrem niedriger Verlustfaktor und deshalb bei 50 Hz vernachlässigbare Übertemperatur;
- Trotz Verwendung nur einer Kunststoffschicht gute Durchschlagfestigkeit;
- Wegen geringen Anstieges der TE-Intensität mit der Spannung gute Schaltspannungsfestigkeit zu erwarten;
- Einfache starre Gehäuse für lageunabhängige Montage;
- Wegfall der Nassimprägnierung. Formieren und Füllen mit SF_6 bedingt einfache Anlagen mit kurzer Durchlaufzeit.

Folgende Punkte sind noch abzuklären:

- Verbesserung der Gleichförmigkeit beim Wickeln (Reduktion des Raumfaktors, Anhebung der DK);
- Untersuchung der Lebensdauer in Abhängigkeit des Formierungszustandes.

Literatur

[1] *Z. Krasucki* et *H. F. Church:* Condensateurs de puissance à film plastique imprégné. Rapport Cigré N° 15-01, 1970.

[2] *G. Georg:* Kunststoff-Filme in Leistungskondensatoren. Bull. SEV 60(1968)14, S. 630...634.

[3] *H. Preissinger:* Durchschlagfeldstärke dünner Isolierölschichten beim MKV-Kondensator. Siemens Z. 45(1971)2, S. 107...110.

[4] *F. H. Kreuger:* Discharge detection in high voltage equipment. London, Temple Press Books, 1964, Chapter 2: Detection of discharges, p. 47...105.

Adresse des Autors:
Gerhardt Georg, dipl. Elektroingenieur ETH, Oberassistent am Institut für Hochfrequenztechnik der ETHZ, Sternwartstrasse 7, 8006 Zürich.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des CE 52, Circuits imprimés, vom 4. bis 9. Juni 1973 in Stockholm

Die letzten Sitzungen des CE 52 fanden vom 4.–9. Juni 1973 in Stockholm statt. Aus 12 Ländern waren 24 Delegierte anwesend; die Schweiz war durch den Berichterstatter vertreten. Die Sitzungen wurden von H. J. Schulz (Deutschland) präsidiert und als Sekretär amtete H. W. Stawski (Italien). Das Protokoll der Sitzungen von London (Dezember 1971) *RM 1481/TC 52* wurde mit ganz geringfügigen Änderungen genehmigt.

Seit der letzten Sitzung wurden die folgenden Dokumente zur Abstimmung vorgelegt. Die Abstimmungsresultate und Entscheide lauten:

1. Dokumente unter dem 2-Monate-Verfahren

52(Bureau Central)86, Additions à la publication 249-1, Matériaux de base à recouvrement métallique pour circuits imprimés (Méthode d'essai) ergab 17 annehmende Stimmen gegen eine ablehnende (USA).