Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 23

Artikel: Alterung und Lebensdauer von Leistungskondensatoren

Autor: Held, W. / Rolvien, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916300

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: 28.12.2025

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

Alterung und Lebensdauer von Leistungskondensatoren

Von *W. Held* und *W. Rolvien*, Berlin

621.319.4 : 620.193.918

Den wichtigen Fragen der Alterung und Lebensdauer von Leistungskondensatoren war im Rahmen des Cigre-Studienkomitees Nr. 18 «Kondensatoren» ein Symposium gewidmet, wo über umfangreiche Untersuchungen dieser Probleme berichtet wurde. Im folgenden wird versucht, die wesentlichen Ergebnisse darzustellen, über die in 15 Arbeiten berichtet wurde, und einige Empfehlungen für die Weiterarbeit zu geben.

Dans le cadre du Comité d'Etudes de la CIGRE No. 18 «Condensateurs», un symposium a été consacré aux questions essentielles du vieillissement et de la durée de vie des condensateurs de puissance; des rapports concernant des recherches approfondies sur ces problèmes y furent présentés. Le présent article tente d'exposer les résultats principaux de 15 travaux, et de présenter quelques recommandations en vue des recherches ultérieures.

Einleitung

Zum Symposium des Cigre-Studienkomitees 18 «Kondensatoren» im Juni 1964 in Paris über Fragen der Alterung und Lebensdauer von Leistungskondensatoren wurden insgesamt 15 Berichte eingereicht und diskutiert. Die Arbeiten stammen von den Herstellern und Anwendern von Kondensatoren, aber auch von den Herstellern der Rohstoffe, so dass die Probleme von sehr verschiedenen Gesichtspunkten her behandelt wurden. Die meisten Autoren befassten sich mit der Alterung des Kondensatordielektrikums unter dem Einfluss von Temperatur und Feldstärke. Weiterhin wurde untersucht, wie sich verschiedene Papierqualitäten und Tränkmittel, verschiedene Evakuier- und Tränkbedingungen oder auch ionische Verunreinigungen auf die Lebensdauer auswirken. In den meisten Fällen wird die Änderung des Verlustfaktors und seines Verlaufes über Temperatur oder Spannung als Alterungskriterium herangezogen. Als nützliches Mittel zur Beurteilung des Dielektrikums hat sich auch die Infrarot-Spektrographie erwiesen.

Folgende Berichte wurden vorgelegt:

S1	W. Held W. Rolvien	Aging of clophen-impregnated capacitors
S2	F. Liebscher	Problems associated with the aging of clophen-impregnated capacitors due to short-time overvoltage stressing
S3	E. Trümper	a) Aging of paper dielectric power capacitors b) Heutiger Stand der Leistungskondensatoren
S4	R. Fournie Y. Le Gall C. Roulet	Etude de la dégradation des papiers de condensateurs sous l'influence de contraintes thermiques et électriques par spectrographie infrarouge
S5	G. Bäumlein	Endurance test of paper in capacitors
S6	J. Coquillion	Essai de vieillissement de condensateurs aux askarels sous un gradient de tension alternative 50 Hz de 24 volts par micron à température ambiante
S7	R. D. McClain	Major determinants in capacitor aging
S8	G. R. Menkart P. L. Waldon	New set formula uses temperature and voltage as key to longer-life capacitors
S9	P. Boyer	Système d'épreuves de vieillissement de condensateurs témoins au papier imprégné de préférence dans les askarels
S10	T. Yoshimoto u.a.	Influence of thermal aging on the characteristics of oil-filled insulating materials
S11	J. Courtet A. Liziard	Etude du comportement des condensateurs à la surtension à température ambiante
S12	P. Valkeila	Description of some aging and life tests carried out with trichlorodiphenyl impregnated capacitor windings
S13	S. Nowak	Some results of investigation on the aging of power capacitors
S14	G. Mochi	Present knowledge on power capacitors life duration and aging characteristics. A manufacturer's view
S15	Z. Krazucki	Ionic impurities in chlorodiphenylimpregnated paper capacitors

Eine ausführliche Behandlung des umfangreichen Materials war aus Platzgründen nicht möglich. Die Berichter haben sich bemüht, unter Verzicht auf theoretische Ableitungen jeweils das wesentliche und allgemein Interessierende herauszuheben, durch Beispiele und den Originalarbeiten entnommene Bilder zu veranschaulichen; zu einigen Fragen sei kritisch Stellung genommen.

S 1

Es werden die Ergebnisse von Alterungsuntersuchungen an Kondensatoren, die mit Clophen A 30 imprägniert waren, mitgeteilt.

Untersucht wurden:

a) Einfluss der Temperatur, ohne Spannungsbeanspruchung;
b) Lebensdaueruntersuchungen mit erhöhter Spannung;
c) Einfluss von Verunreinigungen auf die Alterung von Leistungskondensatoren.

Fig. 1 zeigt die Veränderung der tan-δ-Kurve über der Temperatur nach 1000 h Alterung bei 60...110 °C ohne gleichzeitige Spannungsbeanspruchung. Während der Verlustfaktor, gemessen bei 20 °C, mit zunehmender Alterungsdauer immer weiter ansteigt, und zwar umso mehr, je höher die Alterungstemperatur ist, nimmt tan δ bei 60 °C nur sehr langsam zu. Überraschenderweise nehmen dagegen die Verluste bei einer Messtemperatur von 120 °C zunächst sogar ab, steigen aber nach 2000...3000 h wieder an. Möglicherweise ist dieses Verhalten durch den Abbau der Zellulose (Depolymerisation) zu erklären, der insbesondere bei höheren Temperaturen eintritt.

Aufschlussreicher für das Betriebsverhalten von Kondensatoren sind Alterungs- und Lebensdaueruntersuchungen unter gleichzeitiger Anwendung erhöhter Temperatur und Feldstärke, deren Ergebnis Fig. 2 zeigt. Bei derartigen Versuchen

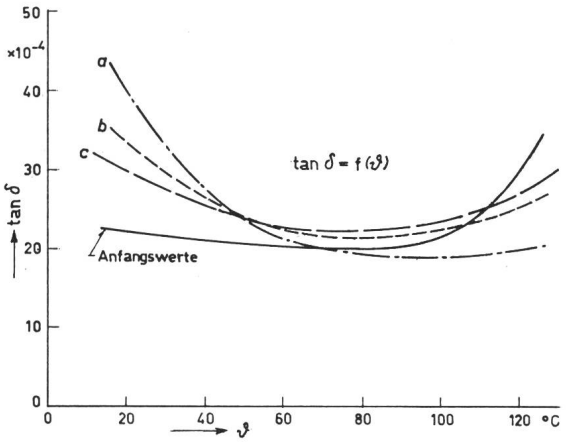


Fig. 1
Alterung bei 60, 90 und 110 °C
Ohne Spannung nach 1000 h
a gealtert bei 110 °C; *b* bei 90 °C; *c* bei 60 °C; gemessen bei 10 V/µm
tan δ Verlustfaktor; ϑ Temperatur

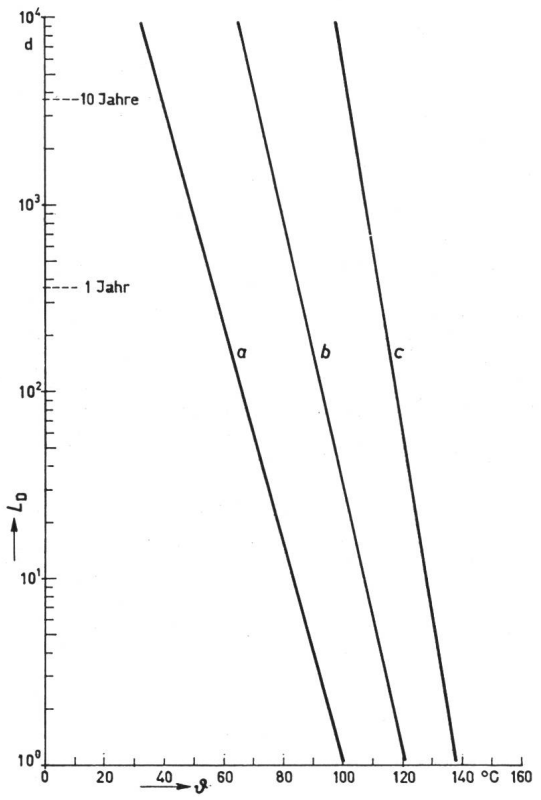


Fig. 2
Lebensdauer L_D als Funktion der Wickeltemperatur ϑ und der Feldstärke
a 26 V/µm; *b* 20 V/µm; *c* 15 V/µm

dürfen sich die Prüflinge in ihren wesentlichen Eigenschaften, besonders im Aufbau des Dielektrikums, nicht von Kondensatoren aus der Produktion unterscheiden, ausserdem muss, wegen des statistischen Charakters von Alterungs- und Durchschlagvorgängen, das Versuchsmaterial genügend umfangreich sein. Die Kurven von Fig. 2 wurden aus Lebensdaueruntersuchungen an 300 grossen Leistungskondensatoren aus den Jahren 1935 bis 1960 gewonnen.

Verunreinigungen durch bestimmte Substanzen können eine ausserordentlich rasche Alterung des gesamten Dielektrikums zur Folge haben. Fig. 3 zeigt tan-δ-Messungen an 25-kvar-Kondensatoren im Neuzustand und nach kurzzeitiger Spannungsbeanspruchung mit 17 V/µm. Der Kippfaktor sank rapide ab, so weit, bis die Kondensatoren auch bei Nennleistung thermisch nicht mehr stabil waren und Wärmedurchschlag erlitten. Diese Alterung kam jedoch nur zustande, wenn der Kondensator an Spannung lag; reine Temperaturalterung führte

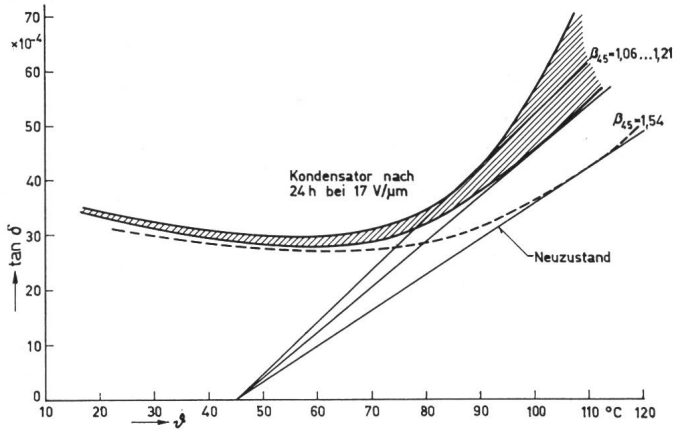


Fig. 3
Verlustfaktor tan $\delta = f(\vartheta)$, **gemessen bei** 14 V/µm **an 6 Kondensatoren**
β_{45} Faktor der thermischen Grenzleistung; ϑ Temperatur

zu keiner Veränderung der tan-δ-Temperatur-Kurve. Verursacht wurde die Alterung durch Verunreinigungen, die aus den erstmals verwendeten Entladewiderständen (Massewiderstände) austraten und nicht nur das Tränkmittel verschmutzten, sondern auch das Papier selbst angriffen.

S 2

Angesichts der in den letzten Jahren beachtlich erhöhten Betriebsfeldstärke bei Leistungskondensatoren liegt die Frage nahe, in welchem Masse kurzzeitige Spannungserhöhungen bei Seriekondensatoren oder Schaltüberspannungen bei Parallelkondensatoren irreversible Schäden durch Glimmentladungen verursachen.

F. Liebscher berichtet über Belastungsversuche mit Feldstärken bis zu 44 V/µm an Wickeln, getränkt mit Clophen A 50. Das Dielektrikum war 60 µm dick. Die Versuche wurden bei 20...80 °C ausgeführt; bei der zweiten Versuchsgruppe wurde der Druck auf 11 at erhöht, wobei sich die Wickel in einem mit Stickstoff gefüllten Druckgefäss befanden. Wie zu erwarten war, nimmt der Verlustfaktor bei 11 at weniger zu als bei 1 at. Durch den hohen Druck wird offenbar die Glimmeinsatzfeldstärke erheblich heraufgesetzt und die Glimmintensität stark reduziert. Besonders deutlich erkennt man dieses Verhalten an Fig. 4 und 5. Während sich der Verlustfaktor nach den Überlastungen bei 11 at nur sehr wenig gegenüber dem Ausgangszustand verändert hat (Fig. 5), ist bei Atmosphärendruck eine umso stärkere Veränderung eingetreten, je niedriger die Temperatur bei Überlastungen war. Der Grund für dieses Ver-

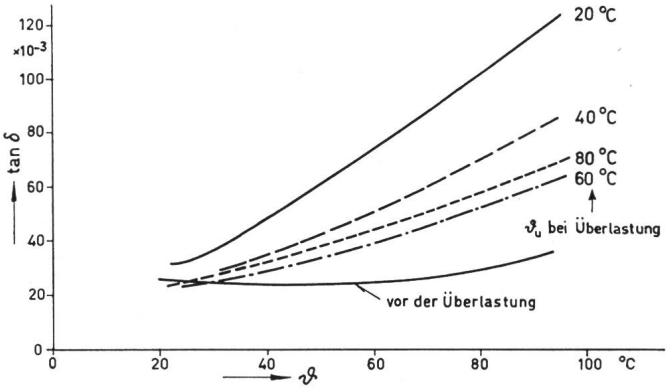


Fig. 4
Verlustfaktor tan $\delta = f(\vartheta)$, **gemessen an kurzseitig überlasteten Clophen-Kondensatoren bei 1 at und 800 V**
ϑ Temperatur

halten liegt in dem bekannten Ansteigen der Glimmeinsatzspannung zwischen 20 und 100 °C bei Clophen A 50.

Parallel zu den tan-δ-Messungen wurden die äusseren Windungen der Wickel, die in Glasgefässe eingebaut waren, im Dunkelraum beobachtet. Sichtbares Glimmen trat bei 60 °C erst ab ca. 3000 V auf. Die Glimmentladungen waren auch bei der höchsten Überlastungsspannung noch relativ schwach.

Die Überlastung von Leistungskondensatoren mit hoher Wechselspannung wirkt sich also umso schädlicher aus, je zähflüssiger das Tränkmittel, d.h. je niedriger die Temperatur ist. Der Überdruck reduziert dagegen die schädigende Wirkung der Überlastung.

S 3

Zur Beurteilung des Alterungsverhaltens von Leistungskondensatoren, insbesondere zur Untersuchung des Einflusses

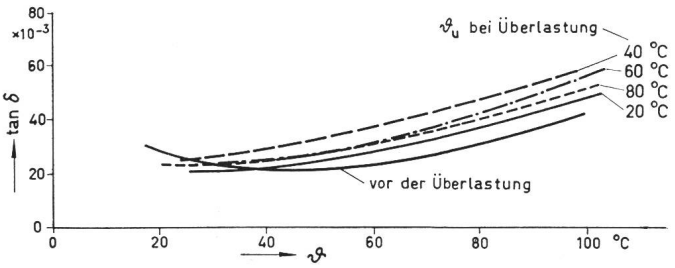


Fig. 5
Wie Fig. 4, aber gemessen bei 11 at und 800 V

der Betriebsfeldstärke, der Papierqualität und wichtiger Fertigungseinflüsse stellt der Verfasser kleine Papierkondensatoren mit ca. 4,5 µF mit einem Dielektrikum von 2×9 µm her und unterwirft sie einer «Kurzalterungsprüfung». Die Fertigungsbedingungen wurden in folgender Weise variiert:

Temperatur im Vakuumkessel	100...115 °C
Vakuum im Kessel (nahe am Pumpstutzen) . .	10^{-1}...10^{-3} Torr
Evakuierungszeit	24...130 h
Zahl der Kondensatoren pro Tränkung	10...3000
Imprägnierungsdauer	12...36 h

Als Tränkmittel wurde stets Clophen A 50 verwendet, die Kondensatortemperatur betrug 32...39 °C während der Prüfung. Prüfkriterium war jeweils die Zeit bis zum Durchschlag des Einzelkondensators.

Zur Beurteilung der Prüfergebnisse benutzt *E. Trümper* das dafür besonders geeignete «Lebensdauernetz» nach *K. Stange*[1]) (Fig. 6). Nach *Stange* sinkt bei technischen Gebrauchsgütern, die einem natürlichen Abnützungsvorgang unterliegen, der

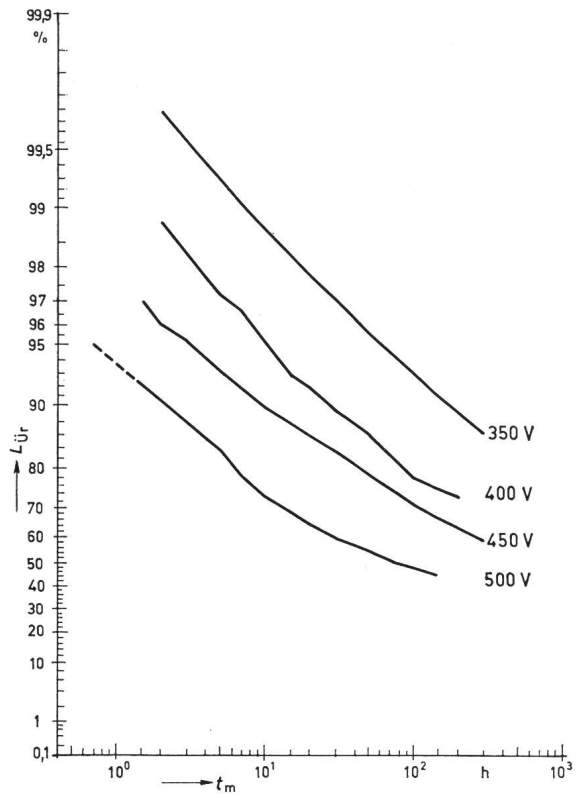


Fig. 6
Lebensdauer in Abhängigkeit von der Betriebsspannung für Leistungskondensatoren (nach *Stange*)
C = 4,5 µF; 2×9 µm-Papier; Clophen A 50
$L_{Ür}$ Überlebensrate; t_m Betriebszeit

[1]) *K. Stange:* Zur Ermittlung der Abgangslinie für wirtschaftliche und technische Gesamtheiten. Mitteilungsblatt für Math. Stat. 7(1955)2, S. 113...151.

Bestand N zur Zeit t, bezogen auf den Anfangsbestand N_0, nach der Funktion

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{\alpha}} \tag{1}$$

ab («Abgangslinie»). Für den Exponenten α fand *Stange* nach umfangreichen statistischen Untersuchungen Werte von α = 0,5...5. Schreibt man Gl. (1) in der Form

$$\ln \ln \frac{N_0}{N} = \alpha \ln \frac{t}{T} \tag{2}$$

und benützt das Lebensdauernetz nach *Stange* (Ordinate $y = \ln \ln N_0/N$; Abszisse $x = \ln t$), so strecken sich die Abgangslinien im Normalfall zu Geraden, dann nämlich, wenn bezüglich des Abgangs einheitliche Ursachen vorliegen. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, z. B. bei Lebensdauerversuchen

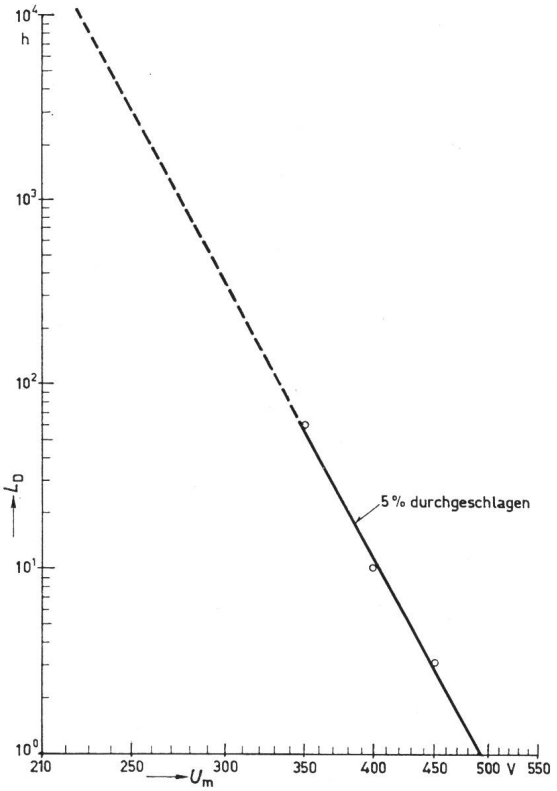


Fig. 7
Lebensdauer L_D von Leistungskondensatoren in Abhängigkeit von der Betriebsspannung U_m

schon nach dem Ausfall von wenigen % die gesamte Abgangslinie bestimmen zu können.

In Fig. 6 sind die Abgangslinien von 4 Gruppen gleicher Kondensatoren eingetragen, die mit 350, 400, 450 und 550 V bis zum Durchschlag betrieben wurden. Trägt man jetzt für alle 4 Kurven die Betriebszeit, bis zu der 5 % aller Kondensatoren durchgeschlagen sind, über der zugehörigen Betriebsspannung auf, so ergeben sich in doppelt-logarithmischem Papier Geraden (Fig. 7). Daraus folgt für die Lebensdauer ein Potenzgesetz:

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^{-12} \tag{3}$$

E. Trümper vermutet, dass der Exponent umso grösser ist, je dünner das Dielektrikum ist. Bei weiteren Untersuchungen an Papieren verschiedener Herkunft, teils mit normalem, teils mit voll entsalztem Wasser hergestellt, kommt der Verfasser

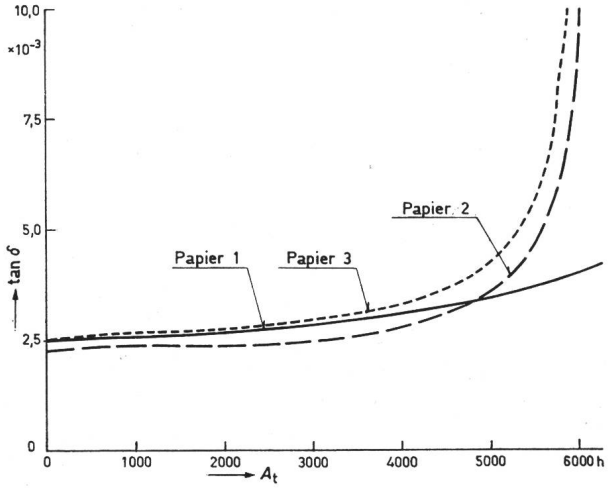


Fig. 8
Verlustfaktor tan $\delta = f(t)$
Alterung ohne Spannung bei 130 °C
A_t Alterungsdauer

zu dem Ergebnis, dass besonders verlustarme Papiere keine Überlegenheit in der Lebensdauer zeigen, und dass der Einfluss der Evakuierbedingungen erheblich ist.

S 4

Die Verfasser beschreiben zunächst Aufbau und Herstellung von Kondensatorpapier und Askarel. Für die Alterungsuntersuchungen wurden zum Teil auch die im Netz der EdF seit langem eingesetzten 20-kvar-Mittelspannungskondensatoren benützt, deren Dielektrikum aus 4...5 Papierlagen mit 13...15 V/µm beansprucht wird. Zur Beurteilung des Alterungszustandes hat sich die Infrarot-Spektroographie als geeignet erwiesen, ferner auch die Untersuchung des Polymerisationsgrades. Die Messungen wurden mit einem Perkin-Elmer-Gerät ausgeführt und dabei der Wellenlängenbereich von 2,5...15 µm untersucht. Die Infrarot-Spektrographie ermöglicht die Analyse der Schwingungen von Gruppen, wie z.B. $-C=O$, $-COOH$, OH und $C-H$, die dem Zellulosemolekül angelagert sind.

Anhand von Infrarot-Spektrogrammen wird gezeigt, wie sich der Aufbau des Komplexes Papier-Tränkmittel ändert, wenn das Dielektrikum übermässiger Erwärmung ausgesetzt wird. Dabei tritt eine Verminderung des mittleren Polymerisationsgrades der Zellulose ein, und zwar infolge der Unterbrechung der Ketten und der Bildung von Ketonen und Aldehyden. Bei zunehmender Alterung verschwinden diese Gruppen zugunsten von Karboxylen. Der Säuregehalt des Papiers nimmt dann stark zu. Ausserdem werden Gase, wie H_2O, CO_2 und CO freigesetzt.

Das Ergebnis einer Alterungsuntersuchung bei 130 °C ohne Spannung zeigt Fig. 8 bei drei verschiedenen Papieren. Die tan-δ-Messungen wurden jeweils bei 80 °C ausgeführt. Der Verlustfaktor steigt bei zwei Papieren zunächst langsam und nach etwa 4000 h sehr rasch an. Es wurde nachgewiesen, dass damit eine rasche Zunahme der Zahl der stark polaren Karboxyl-Gruppen verbunden war. Aldehyd- und Keton-Gruppen erhöhen den Verlustfaktor kaum, Karboxyl-Gruppen dagegen erheblich, besonders bei höherer Temperatur. Ergänzende Versuche, bei denen gleichzeitig Spannung angelegt wurde, führten bereits nach 1000...2000 Betriebsstunden zum Durchschlag. Dabei stellte sich heraus, dass die Gesamtheit des Dielektrikums kaum gealtert war, dass vielmehr eine *örtliche* Verschlechterung an Schwachstellen zum Durchschlag geführt hat. Ein ähnliches Resultat ergab sich auch bei der Untersuchung von Kondensatoren, die mit 1,5 U_n betrieben wurden und nach 3 Jahren durchschlugen. Der Polymerisationsgrad war 900...1000, also praktisch wie im Neuzustand. Unter dem Einfluss von Glimmentladungen hatten sich jedoch gelbe Flecken auf dem Papier gebildet, an denen spektrographisch eine beschleunigte Oxydation des Papiers nachgewiesen wurde. Ein Infrarot-Spektrogramm an braunen Flecken im Papier von Kondensatoren, die im normalen Netzbetrieb gealtert waren, zeigt Fig. 9 im Vergleich zum Neuzustand. Vermutlich gehen auch diese Flecken auf den Einfluss von Entladungen zurück.

Die Autoren sind der Meinung, dass durch die Infrarot-Spektrographie in Verbindung mit den herkömmlichen Analyse-Methoden eine bessere Beurteilung der Papiereigenschaften und der Veränderung der Gefügemerkmale der Zellulose unter dem Einfluss von Spannung und Temperatur möglich ist.

S 5

G. Bäumlein geht, wie viele andere Autoren, davon aus, dass der Durchschlag eines Kondensators stets an einer diskreten Stelle, an einer «Schwachstelle» erfolgt. Er nimmt an, dass Alterungsvorgänge an solchen Stellen eine immer stärkere Erhöhung der Leitfähigkeit und Erwärmung zur Folge haben, so dass zum Schluss ein Wärmedurchschlag eintritt, wie er etwa von *K. W. Wagner* beschrieben wird. Der Autor lässt dabei offen, ob dieser Vorgang wesentlich in der Papierfaser oder aber in Tränkmittelkanälen erfolgt. Auch im zweiten Fall wird die Papierfaser mittelbar erhitzt, spaltet im Tränkmittel lösliche Zersetzungsprodukte ab und trägt so zur Beschleunigung des Vorgangs bei.

Von dieser Vorstellung der örtlichen Erhitzung des Papiers bis zur Verkohlung ausgehend, wurde versucht, durch Erhitzung des trockenen Papiers einen Einblick in die am Durchschlagsort möglichen Vorgänge zu erhalten (Erhitzung vor dem Tränken auf 180 °C, 16 h lang). Die hohe Temperatur bewirkte eine starke Bräunung des Papiers, die aber nicht zur völligen Zerstörung der Papierstruktur führte. Eine deutliche Veränderung der Durchschlagfestigkeit war nicht feststellbar, da bei dieser Prüfung die Luftporenräume entscheidend sind, die sich durch die Temperaturbehandlung nicht verändern (Fig. 10). Bruch-

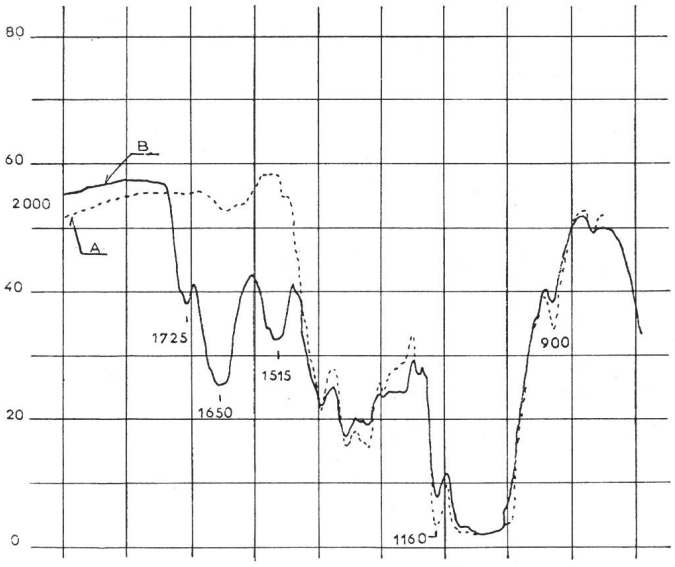


Fig. 9
Infrarot-Spektrogramme
A Papier im Neuzustand; *B* gealtertes Papier

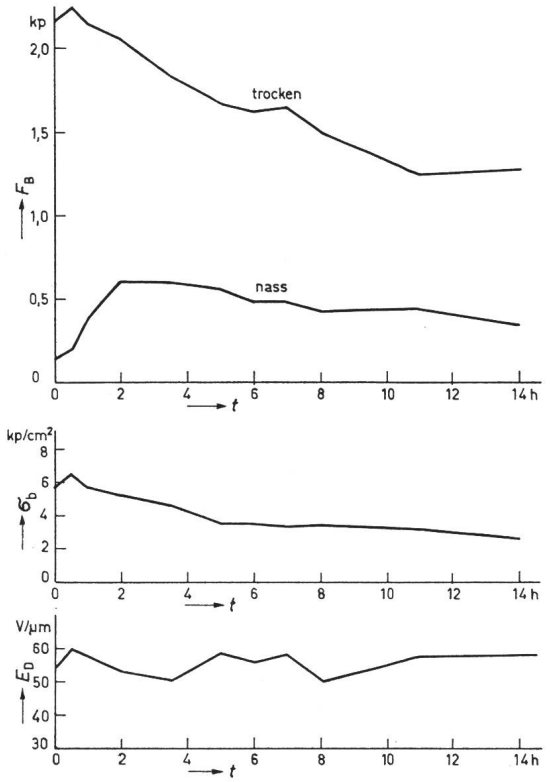


Fig. 10
Änderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Kondensatorpapier durch Wärmevorbehandlung im trockenen Zustand (180 °C an Luft)
F_B Bruchlast; σ_b Berstdruck; E_D Durchschlagfeldstärke; t Zeit

last F_B und Berstdruck σ_b sinken erwartungsgemäss mit der Dauer der Temperatureinwirkung auf etwa 50 % ihres Anfangswertes ab, während die Nassreissfestigkeit zunächst ansteigt und dann schwach abfällt.

Fig. 11 zeigt den Verlustfaktor getränkter und verschieden vorbehandelter Kondensatorwickel in Funktion der Temperatur. Aufschlussreich ist die Tatsache, dass sich die dargestellten Kurven kaum unterscheiden. Auch bei den stark getrockneten Wickeln mit tiefbraunem, brüchig gewordenem Papier trat keine Erhöhung des Verlustfaktors tan δ auf, jedenfalls nicht im Neuzustand. Damit konnte also die Hypothese von einem sich langsam entwickelnden Wärmedurchschlag nicht bestätigt werden, umso mehr als Alterungsversuche mit 24 V/µm an den verschiedenen Wickeln keine Unterschiede in der Ausfallrate ergaben.

S 6

Coquillion untersucht den Einfluss des Tränkemittels auf die Alterung von Versuchskondensatoren, die bei Raumtemperatur

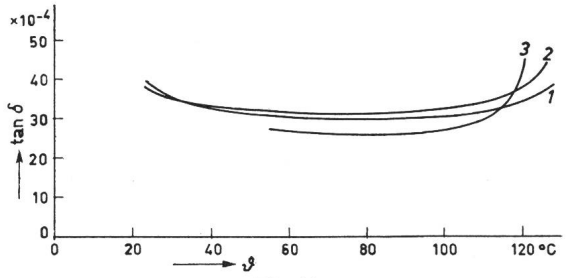


Fig. 11
Vergleich von verschiedenen getrockneten zweilagigen Wickeln
(Papier: Tuko W, 18 µm, 1,0 g/cm³; Clophen A 30)
tan δ Verlustfaktor; ϑ Temperatur
1 Meßspannung 12,2 V/µm } 13,5 h bei 160 °C, an Luft
2 Meßspannung 4,0 V/µm }
3 Meßspannung 13,0 V/µm, 36 h bei 120 °C, 10^{-3} Torr

mit 24 V/µm etwa 3000 h lang betrieben wurden. Er benützte dazu 3-lagige Wickel mit Delta-M-Papier und die Askarelsorten Pentachlordiphenyl und Trichlordiphenyl. Bei Trichlordiphenyl wurden auch Zusätze von 0,5 % Anthrachinon und bei einer anderen Versuchsgruppe 2 % aktiviertes Al_2O_3 in Pulverform erprobt.

Zum Nachweis der Alterung diente wie üblich der Verlustfaktor, der alle 200 h bei 100 °C gemessen wurde. Die Messergebnisse in Funktion der Betriebszeit, zeigen Fig. 12 und 13. Auffällig ist bei allen 4 Versuchsserien, dass die Verluste in den ersten 550 h beachtlich ansteigen, besonders bei kleiner Messspannung, und zwar am stärksten bei der Versuchsserie 3 mit einem Zusatz von Anthrachinon. Offenbar enthält dieser Stoff selbst sehr viele Verunreinigungsionen, wie dies auch von anderen Autoren schon festgestellt worden ist. Angesichts der Tatsache, dass das mit Anthrachinon versetzte Pyralen vor Beginn der Untersuchung einer ionenabsorbierenden Behandlung unterzogen wurde, ist allerdings das Ausmass der tan-δ-Erhöhung bis auf $850 \cdot 10^{-4}$ erstaunlich gross. Die anfängliche Zunahme des Verlustfaktors der übrigen Serien könnte auf die

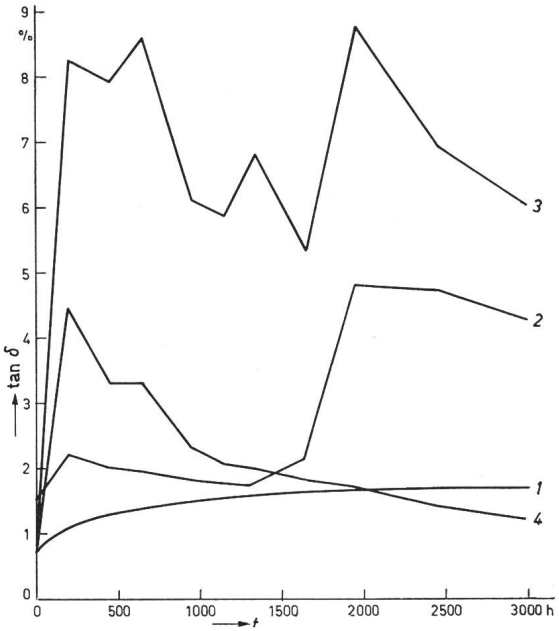


Fig. 12
Verlustfaktor tan $\delta = f(t)$, **gemessen bei 25 V** (0,74 V/µm)
t Betriebsdauer (24 V/µm bei RT)
1 Kondensator mit Pentachlordiphenyl; *2* Kondensator mit Trichlordiphenyl; *3* Kondensator mit Trichlordiphenyl und 0,5 % Antrachinon; *4* Kondensator mit Trichlordiphenyl und 2 % Al_2O_3

Lösung von Verunreinigungen aus dem Papier zurückzuführen sein, vielleicht auch auf Ionisationserscheinungen zu Beginn des Dauerversuchs, wie der Autor vermutet. Interessant ist der Kurvenverlauf bei der Versuchsserie 4. Der Verlustfaktor ist hier bereits nach etwa 1500 h kleiner als bei allen anderen Kondensatoren, was zweifellos auf die ionenabsorbierende Wirkung des Al_2O_3 zurückzuführen ist. Diese Eigenschaft von Al_2O_3 ist bekannt; sie kommt noch stärker zur Wirkung, wenn es dem Papier unmittelbar zugesetzt wird.

S 7

McClain zählt die Ursachen auf, die zum Ausfall von Leistungskondensatoren führen können, darunter auch solche, die mit den im Studienkomitee behandelten Alterungsproblemen nicht unmittelbar zusammenhängen, so z. B. äussere Einwirkungen, wie Steinwurf und Gewehrfeuer oder auch kalter Regen

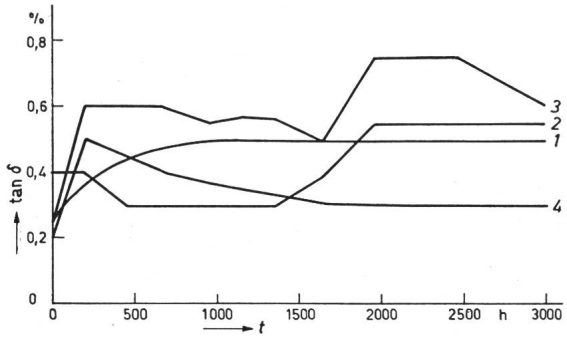


Fig. 13
Verlustfaktor tan $\delta = f(t)$, **gemessen bei 450 V** (13,3 V/µm)
t Betriebsdauer (24 V/µm bei RT)
1 Kondensator mit Pentachlordiphenyl; *2* Kondensator mit Trichlordiphenyl; *3* Kondensator mit Trichlordiphenyl und 0,5 % Antrachinon; *4* Kondensator mit Trichlordiphenyl und 2 % Al_2O_3

auf heisse Durchführungen. Er stellt fest, dass Glimmentladungen die Lebensdauer des Leistungskondensators reduzieren können, wenn sie dauernd auftreten. Kurzzeitiges Glimmen ist dagegen nicht schädlich, allerdings sind die Auswirkungen vieler Einzelentladungen kumulativ. *McClain* unterscheidet zwei Formen der Verschlechterung von Kondensatoren: kontinuierliche Erhöhung der dielektrischen Verluste, die im Extremfall thermische Instabilität und Wärmedurchschlag zur Folge haben können, und elektrochemische Prozesse, z.B. infolge von Glimmentladungen, welche die elektrische Festigkeit herabsetzen und zum elektrischen Durchschlag führen. Diese Prozesse laufen um so schneller ab, je höher die Temperatur ist, stehen also insofern im Zusammenhang mit tan-δ-Erhöhungen.

S 8

Seit 1940, besonders in den letzten 10 Jahren, sind Tränkmittel und Kondensatorpapiere beträchtlich verbessert worden. Fig. 14 zeigt den Verlauf der Verluste des askeralimprägnierten Kondensatordielektrikums über der Temperatur bei Papieren aus den Jahren 1940...1959. Die Verbesserung betrifft sowohl die absolute Höhe von tan δ bei ca. 60 °C als auch den bei modernen Papieren weit geringeren Anstieg mit der Temperatur. Dadurch wurde es möglich, das spezifische Volumen des Leistungskondensators beachtlich zu verkleinern und ihn bei höherer Temperatur thermisch stabil zu betreiben.

Auch bei Leistungskondensatoren steht heute die Frage der Wirtschaftlichkeit viel stärker im Vordergrund als früher. Nach Ansicht der Autoren soll die Lebenserwartung 20...30 Jahre bei einer Überlebensrate von 90 % sein. Grössere Lebensdauer

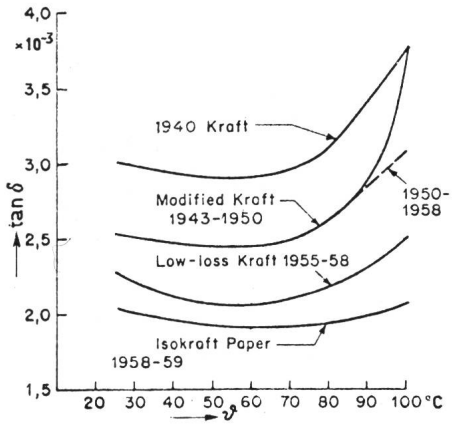


Fig. 14
Verbesserung des Kondensatorpapiers
tan δ Verlustfaktor; ϑ Temperatur

vergrössert den Wert des Kondensators weniger als den erforderlichen Mehraufwand und damit die Kosten und umgekehrt. Damit ergibt sich die Notwendigkeit, die Lebenserwartung in Abhängigkeit von den Haupteinflussgrössen, der Betriebsfeldstärke E und der Betriebstemperatur δ, möglichst genau zu ermitteln. Aus früheren Untersuchungen war bekannt, dass die Lebensdauer gemäss dem Gesetz von *Arrhenius* exponentiell mit der Temperatur abnimmt, wobei für die Halbierung der Lebensdauer eine Temperaturerhöhung um 5...10 °C angegeben wurde. Weiterhin war ermittelt worden, dass die Lebensdauer L bei Gleichspannungskondensatoren nach einem Potenzgesetz von der Feldstärke E abhängt ($L \approx E^{-n}$, wobei $n = 4...8$).

Zur Klärung dieser Zusammenhänge bei Wechselspannungskondensatoren war es erforderlich, umfangreiche Dauerversuche anzusetzen. Zunächst wurden kleine Kondensatoren (ballast-type) untersucht. Es ergaben sich Exponenten $n \leqq 11$. Darüber hinaus wurden weitere Versuche (vermutlich an Leistungskondensatoren) über einen Zeitraum von 6 Jahren ausgeführt. Die Ergebnisse lassen sich in der Form darstellen:

$$L = \left(\frac{K}{E\vartheta}\right)^n, \quad L \text{ in Jahren} \tag{4}$$

K ist eine Konstante, für die sich der Wert 2170 in V/µm · °C ergab, und zwar gültig für denjenigen Wert des Produktes $E\vartheta$,

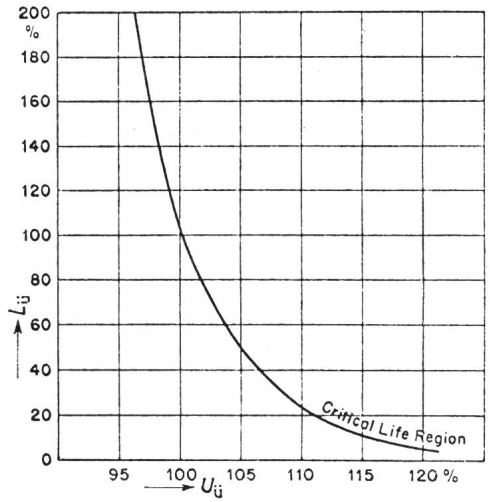


Fig. 15
Lebensdauer in Abhängigkeit von der Überspannung
$L_ü$ Überlebensrate; $U_ü$ Spannung am Kondensator

der sich bei der Prüfung auf Wärmegleichgewicht (gemäss NEMA) einstellt. Dabei ist E auf Werte unterhalb der Glimmeinsatzfeldstärke, ϑ auf den Bereich zwischen den Temperaturen im Normalbetrieb und bei der thermischen Grenzbelastung beschränkt.

Die angegebene Formel gilt nur für den kontinuierlichen Betrieb ohne Schalthandlungen. Wird der Kondensator bei höherer Feldstärke betrieben, geht die Lebensdauer beträchtlich zurück (Fig. 15). Bei Betrieb mit schwankender Spannung kann die Gesamtlebensdauer nach Gl. (4) und Fig. 15 aus den Einzelbeanspruchungen und der zugehörigen Betriebszeit ermittelt werden. (Bei anderen zum Teil nicht veröffentlichten Untersuchungen sind für den Exponenten n sehr verschiedene Werte gefunden worden, die zwischen 6...22 schwanken. Es wäre ausserordentlich interessant zu erfahren, wie n von den Materialeigenschaften, vom Aufbau des Dielektrikums und vom Tränkmittel beeinflusst wird.)

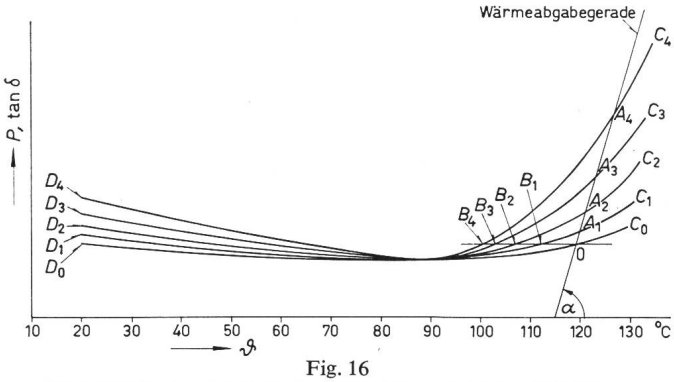


Fig. 16
Verlustfaktor tan δ **und Verluste** P **bei Dauerbetrieb mit** 14 V/µm **bei 115 °C über der Temperatur, gemessen bei** 10 V/µm

Die Indizes 0 (Anfangszustand), 1, 2...n beziehen sich auf die Alterungsdauer (250 h, 500 h, ..., $n \cdot 250$ h)
A Schnittpunkte der Kurven C mit der Wärmeabgabegerade
B Schnittpunkte der Kurven C mit der Gerade OB
D P, tan δ-Werte bei 20 °C

S 9

Zum Studium des Alterungsverhaltens führte *Boyer* Dauerversuche an 2- und 3-lagigen Leuchtstofflampen-Kondensatoren aus, und zwar bei:

A 18,5 V/µm, 115 °C
B 14 V/µm, 115 °C
C 23 V/µm, —20, —30, —40 °C

Die Kondensatoren wurden mit Mineralöl und verschiedenen Askarelsorten getränkt. Die Zeit bis zum Durchschlag und die Veränderung des Verlustfaktors mit der Zeit dienten als Alterungskriterien. Derartige Dauerversuche erweisen sich besonders für die Beurteilung der Rohstoffe, vor allem des Kondensatorpapiers, neuer Fertigungsverfahren und neuentwickelter Kondensatoren als geeignet; die «klassischen» Verfahren, wie tan-δ- und Kapazitätsmessungen, Wärmestabilitätsproben und Durchschlagsversuche, reichen dazu nicht aus. Die Temperatur von 115 °C wurde nach umfangreichen Vorversuchen auf diesen Wert festgelegt. Bei niedrigerer Temperatur war die Zeit bis zum Durchschlag zu lang, bei 120...125 °C zu kurz. Kapazität, tan δ und Isolationswiderstand wurden zu Beginn und alle 500 h gemessen. Jede Versuchsgruppe umfasste mindestens 4 Kondensatoren.

Der Verfasser weist auf die bedeutende Rolle der leitenden Einschlüsse hin, die wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer eines Kondensators haben. In diesem Zusammenhang kann auch Aluminiumoxyd, das als Ionenadsorber dient, von nachteiligem Einfluss auf die Durchschlagfestigkeit sein. Interessant ist auch der Hinweis auf die Gefahr, dass versucht werden könnte, durch Zusätze von Aluminiumoxyd Einflüsse einer mangelhaften Fertigung zu verdecken. Insgesamt hatten Kondensatoren mit Aluminiumoxyd-Papieren eine grössere Lebensdauer als Kondensatoren mit normalem Papier.

Die Mehrzahl der Durchschläge war *thermischen* Ursprungs. Dies steht im Gegensatz zu den bisher vorliegenden Erfahrungen im praktischen Betrieb, wo Wärmedurchschläge nur ganz selten vorkommen. Möglicherweise ist eine Umgebungstemperatur von 115 °C für Kurzalterungsversuche doch schon zu hoch. Überraschend ist ferner, dass bei Versuchen nach Gruppe A eine um so grössere Lebensdauer ermittelt wurde, je kleiner die Papierdichte war (bei Tränkung mit Askarel) und dass häufig Ionisationsspuren am Folienrand auftraten. (Die Glimmeinsatzfeldstärke müsste bei den untersuchten Dielektriken grösser als ca. 40 V/µm gewesen sein.)

Zur Beurteilung der Alterung definiert *Boyer* aus Fig. 16 drei «Alterungsindizien»:

$$V_1 = \tan\delta_0 \frac{\Theta(B_n) - \Theta(0)}{\Delta t_n} \tag{5}$$

$$V_2 = \frac{\Delta \tan\delta_n}{\Delta t_n} \tag{6}$$

$$V_3 = \frac{\Delta \tan\delta_n}{\Delta t_n \cdot \tan\delta_0} \tag{7}$$

von denen sich V_1, V_2 auf das thermische Gleichgewicht und V_3 auf die tan-δ-Änderung bei 20 °C beziehen. Der Autor teilt die Ergebnisse vieler Alterungsversuche mit und deutet sie mit Hilfe der Alterungsindizien V_1, V_2, V_3.

S 10

Es wurde die thermische Alterung ölgetränkter Dielektrika untersucht und zwar ohne gleichzeitige elektrische Beanspruchung. Dabei wurde die Änderung der wesentlichen elektrischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften beobachtet. In regelmässigen Abständen wurden gemessen:

Kapazität (Dielektrizitätskonstante), Verlustfaktor, Isolationswiderstand, Durchschlagspannung; Polymerisationsgrad DP, Alkalilöslichkeit, Wasseraufnahme; Zugfestigkeit, Reissfestigkeit, Biegezahl, Berstdruck.

Darüber hinaus wurde am Isolieröl gemessen:

Gesamte Säurezahl (pH-Wert), Molekulargewicht, Flammpunkt, Brechungsexponent, Dichte, Viskosität.

Folgende Isolierstoffe, die mit Transformatoröl getränkt waren (a und b), wurden untersucht:

a) Kondensatorwickel mit 5 · 100 µm Kondensatorpapier;
b) Kondensatorpreßspan, 0,25 mm dick;
c) Transformatoröl.

Alle Prüflinge waren in öldichte Behälter eingebaut und standen so mit der äusseren Atmosphäre nicht in Verbindung.

Die weitaus grössten Veränderungen im Verlauf der Temperatureinwirkung zeigten beim ölimprägnierten Papier tan δ, der Polymerisationsgrad und die Zugfestigkeit. Fig. 17 stellt die Veränderung dieser Eigenschaften in % des Neuwertes über der Alterungsdauer bei drei verschiedenen Alterungstemperaturen (110, 125, 140 °C) dar. Erwartungsgemäss ist die Verschlechterung bei 140 °C am grössten und bei 110 °C am kleinsten. So steigt z. B. tan δ schon nach etwa 150 Tagen auf den

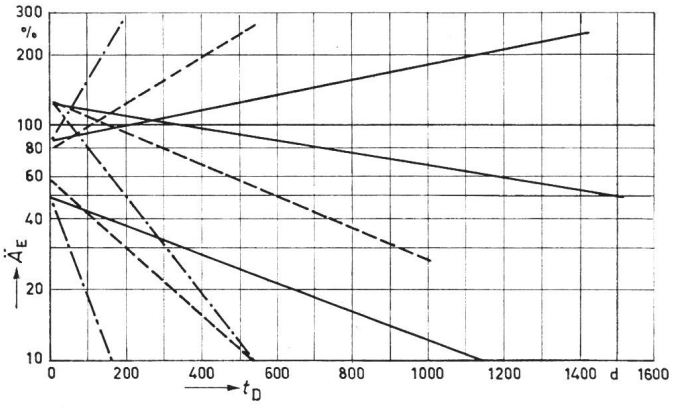


Fig. 17
Änderung der verschiedenen Eigenschaften von Kondensatorpapier bei Temperatureinwirkungen

$\ddot{A}_E$ Änderung der Eigenschaften;
——— bei 110 °C; — — — bei 125 °C; —·— bei 140 °C
t_D Dauer der Temperatureinwirkung

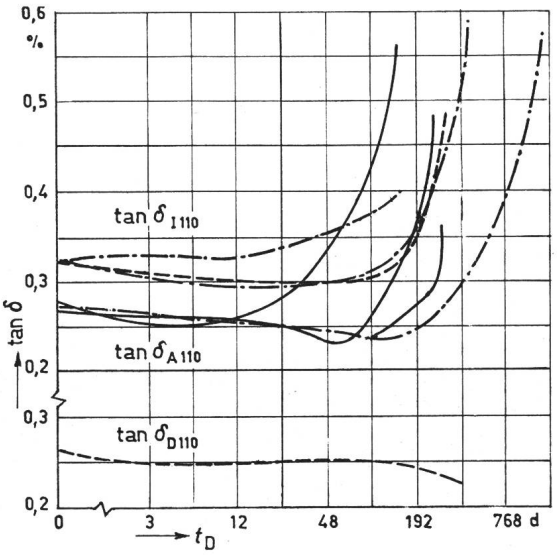


Fig. 18
Änderung des Verlustfaktors tan δ durch Temperatureinwirkung, gemessen bei 110 °C
t_D Dauer der Temperatureinwirkung
—— Typ A; —·— Typ B, imprägniert; – – – Typ B, trocken

doppelten Wert, bei 110 °C dagegen erst nach 3 Jahren. Im einzelnen zeigen Fig. 18 den Verlauf des Verlustfaktors und Fig. 19 den der mechanischen Eigenschaften über die Dauer der Temperatureinwirkung.

Die Autoren berichten über die Ursachen dieser Veränderungen wichtiger Eigenschaften des Kondensatordielektrikums. Sie bestätigen im wesentlichen die Gültigkeit des Montsingergesetzes, finden jedoch, dass die Temperaturerhöhung, die nötig ist, um die Lebensdauer z. B. zu halbieren, ihrerseits temperaturabhängig ist[1]).

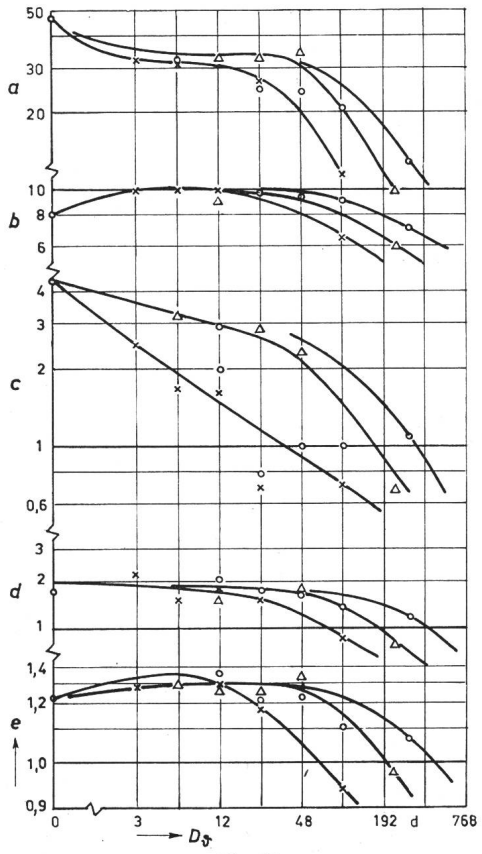


Fig. 19
Änderung der mechanischen Eigenschaften von Kondensatorpapier durch Temperatureinwirkung
a Zerreisfestigkeit [p/16 Lagen]; *b* Zugfestigkeit [kp/mm²]; *c* Biegewechselfestigkeit [Anzahl]; *d* Berstdruck [kp/cm²]; *e* Dehnung [%]
D_ϑ Dauer der Temperatureinwirkung
∘ 110 °C; △ 125 °C; × 140 °C

Es hat sich gezeigt, dass der Polymerisationsgrad des Papiers, der sehr leicht an einer 1-g-Probe zu messen ist, noch besser geeignet ist, die Schädigung des Dielektrikums erkennen zu lassen als die Zugfestigkeit. Wenn der Polymerisationsgrad, der zu Beginn etwa 2000 ist, einen Wert von 300...400 unterschreitet, hat getränktes Papier praktisch kein Isoliervermögen mehr; mit dem baldigen Durchschlag im Betrieb ist zu rechnen.

S 11

72 Probekondensatoren, je zur Hälfte mit Tri- und mit Pentachlordiphenyl getränkt, wurden bei einer Dielektrikumstemperatur von 40 °C bei einer Feldstärke von 30 V/µm betrieben. Aufbau des Dielektrikums: 2×15 µm, Dichte 0,8 g/cm³.

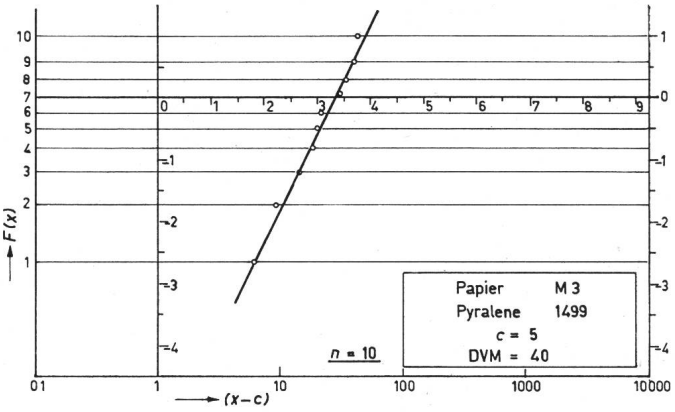


Fig. 20
Lebensdauerkurve für Leistungskondensatoren (nach *Weibull*)

Drei Papierqualitäten wurden verwendet: M (Fertigung von 1960; chemisch nicht sehr sauber, relativ viele leitende Einschlüsse), N (neuere Fertigung, jedoch gleicher Rohstoff wie bei M) und P (neuere Fertigung aus anderem Rohstoff, sehr sauber, geringe Zahl leitender Einschlüsse). Die 6 Gruppen von je 12 Kondensatoren wurden jeweils bis zum Durchschlag von 10 Kondensatoren betrieben, 2 wurden auf ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften untersucht. Dabei ergab sich folgendes: Die Alterung durch hohe Feldstärke führt zum Absinken des pH-Wertes, zum Anwachsen der Leitfähigkeit und zu einer Verringerung der mechanischen Festigkeit.

Die Ergebnisse der Lebensdauer untersuchung werden ausführlich dargestellt und interpretiert. Die mittlere Lebensdauer ist wegen der hohen Beanspruchung des schwach bemessenen Dielektrikums sehr gering (13...760 h). Von überwiegendem Einfluss dürften Schwachstellen, insbesondere leitende Einschlüsse sein, so dass das Ergebnis nicht ohne weiteres auf reale Leistungskondensatoren übertragbar ist, wo eine Lebensdauer von 20 Jahren erwartet wird. In diesem Zusammenhang ist zunächst nicht verständlich, wieso die Papiere P eine annähernd gleich lange Lebensdauer erreichen wie die der Art N, bei denen die Zahl der *messtechnisch erfassten* leitenden Ein-

[1]) Aus Lebensdauerversuchen bei gleichzeitiger elektrischer und thermischer Beanspruchung kommen *G. R. Menkart* und *P. L. Waldon* (s. S. 8) zu einem ähnlichen Ergebnis. Aus der dort angegebenen Lebensdauerformel ergibt sich, dass die Lebensdauer L nach einer Funktion

$$\frac{I\,\mathrm{d}L}{L\,\mathrm{d}\vartheta} = -\frac{n}{\vartheta} \qquad (8)$$

abnimmt. Die relative Abnahme von L ist also nicht konstant, wie es das Montsingergesetz an sich fordert, sondern wird um so kleiner, je höher die Temperatur ist.

schlüsse fast 8 mal grösser war. Das Versuchsergebnis gibt einen wichtigen Hinweis, dass die Untersuchungsmethode des Papiers auf Fehlerstellen dringend verbessert werden muss, mit dem Ziel, die Zahl der für die Ausbildung von Schwachstellen im getränkten Mehrlagen-Dielektrikum verantwortlichen Fehlerstellen im Papier quantitativ hinreichend genau zu bestimmen. Bemerkenswert ist die relativ geringe Lebensdauer der Kondensatoren mit dem schlechten Papier M (13...20 h), ferner die überraschende Tatsache, dass die mit Pentachlordiphenyl getränkten Wickel mit den besseren Papieren N und P eine 4...6mal längere Lebensdauer erreicht haben als die mit Trichlordiphenyl.

Bei allen Kondensatoren fällt die starke Zunahme des Verlustfaktors besonders bei hoher Temperatur und niedriger Feldstärke am Ende der Lebensdauerversuche auf. Diese tan-δ-Erhöhung ist bei den Kondensatoren mit Trichlordiphenyl wesentlich grösser und wird von den Autoren durch das grössere Lösevermögen dieses Tränkmittels für Verunreinigungen erklärt. Die chemische Untersuchung des Papiers ergab, dass durch die Alterung bei hoher Feldstärke (im Gegensatz zu der bei hoher Temperatur) keine Depolymerisation der Zellulose eingetreten ist, wohl aber eine Vermehrung der H-Ionen. Diese Säurebildung erklären die Autoren durch Oxydation von Alkohol- und Aldehydgruppen. Sie kommt um so schneller zustande, e mehr mineralische Verunreinigungen das Papier enthält.

Die zeitliche Folge der Ausfälle wurde nach *Weibull* dargestellt (Fig. 20 und 21). Für die Serien M3, M5, N3 und P3 (3 = Tri-, 5 = Pentachlordiphenyl) ergab sich jeweils eine einzige Gerade (deren Steigung der Alterungsgeschwindigkeit entspricht), also ein einheitliches Kollektiv (Fig. 20). Für die anderen Serien erhielt man 2 Geraden (Fig. 21): die linke Gerade kennzeichnet die «Frühausfälle», die rechte entspricht der «Abgangslinie» nach Ausscheiden von Kondensatoren mit wesentlichen Fehlern.

S 12

Es wird das Ergebnis von Alterungsuntersuchungen an Wickeln mit 2 und 3 Papierlagen, getränkt mit Trichlordiphenyl, beschrieben. Untersucht werden 5 verschiedene Papierqualitäten mit und ohne Zusatz von Aluminiumoxyd. Die Versuche wurden bei Temperaturen zwischen 100...125 °C und Feldstärken bis zu 30 V/µm ausgeführt. Als Alterungskriterium diente die Zunahme des Verlustfaktors, gemessen bei 1,0 und 10 V/µm. Es zeigte sich, dass tan δ nach einer Alterungsdauer von 3000 h bei 100 °C nicht wesentlich grösser wird, solange die Feldstärke 20...22 V/µm nicht überschreitet. Bei Feldstärken oberhalb 25 V/µm steigt der Verlustfaktor merklich an. Fig. 22 und 23 zeigen, wie sich die tan-δ-Kurve unter dem Einfluss von hoher Temperatur (125 °C) und Feldstärke (28 V/µm) ändert. Im Gegensatz dazu steigt tan δ bei reiner Temperaturalterung (ohne Spannung) im Bereich 20...60 °C um 3...5 · 10^{-4} an, bei Temperaturen oberhalb 100 °C bleibt der Verlustfaktor nahezu konstant oder sinkt sogar ab.

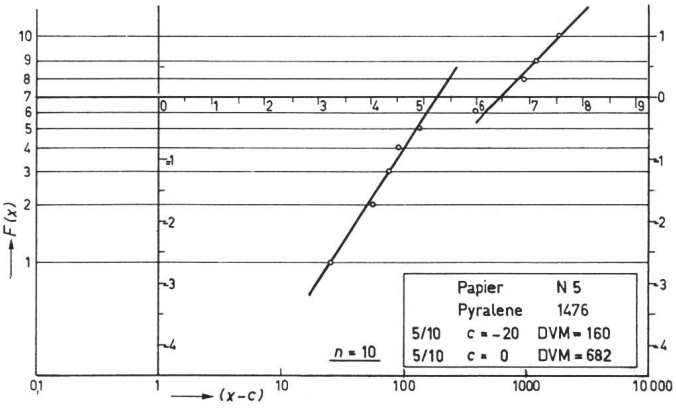


Fig. 21
Lebensdauerkurve für Leistungskondensatoren (nach *Weibull*)

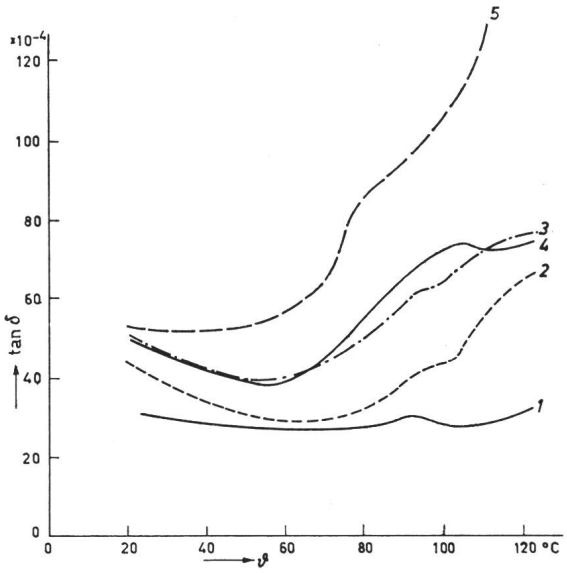


Fig. 22
Einfluss der Alterung auf den tan-δ-Verlauf
Papierqualität «DX», 2 × 15-µm-Papier, 0,8 g/cm³
1 Neuzustand; *2* nach 1000 h bei 125 °C, 28 V/µm, 50 Hz; *3* nach 1650 h bei 125 °C, 28 V/µm, 50 Hz; *4* nach 2150 h bei 120 °C ohne Spannung; *5* nach 2500 h bei 125 °C, 28 V/µm, 50 Hz gemessen bei 1 V/µm, 50 Hz

Bei einem weiteren Versuch wurden Wickel mit je zwei Papierlagen (2 · 15 µm, Dichte 0,8 g/cm³) bei 120 °C mit 25 V/µm beansprucht. Es sollte bei 5 verschiedenen Papierqualitäten der Zusammenhang zwischen Papiereigenschaften und mittlerer Lebensdauer geklärt werden. Dabei ergab sich, dass Porosität, Löcherzahl und Durchschlagfestigkeit (bestimmt am lufttrockenen Papier) kaum Schlüsse auf die Lebensdauer zulassen. Ein gewisser Zusammenhang besteht dagegen zwischen Lebensdauer und Zahl der Fehlerstellen (gemessen im Quecksilberbad) sowie der Durchschlagfestigkeit des imprägnierten Papiers. Anderseits fällt aber auf, dass sich die erreichten Lebensdauerwerte nur wie 1 : 2,5 verhalten, während das schlechteste Papier etwa 10mal so viele Fehlerstellen hat wie das beste. Der Autor schliesst daraus, dass es offenbar noch keine Prüfmethode oder Kombination von Prüfungen gibt, die zuverlässige Aussagen über die Lebenserwartung eines Kondensators zu machen gestatteten.

S 13

S. Nowak beschreibt Alterungsuntersuchungen an Leistungskondensatoren mit Mineralöl, wobei auch der Einfluss der Evakuier- und Tränkbedingungen studiert werden sollte. Als Alterungskriterium dient der Verlustfaktor und sein Verlauf über der Temperatur (Fig. 24), der Frequenz und der Betriebszeit (Fig. 25). Der Autor weist auf die besondere Bedeutung der tan-δ-Temperaturcharakteristik hin. Bei immer stärkerer Zunahme des Verlustfaktors und der Temperatur als Folge von Alterungsprozessen heizt sich der Kondensator langsam hoch und erleidet schliesslich einen Wärmedurchschlag. (Bei früher bekannt gewordenen Schäden dieser Art an Kondensatoren mit Mineralöl wurde als Ursache die Bildung von

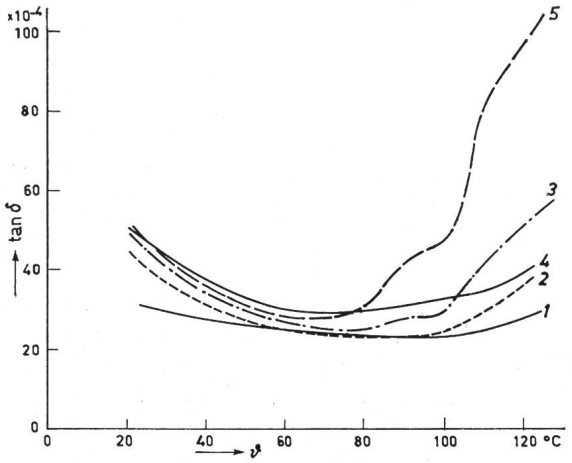


Fig. 23
Einfluss der Alterung auf den tan-δ-Verlauf
Papierqualität «DX», 2 × 15-µm-Papier, 0,8 g/cm³
ϑ Temperatur
1 Neuzustand; *2* nach 1000 h bei 125 °C, 28 V/µm, 50 Hz; *3* nach 1650 h bei 125 °C, 28 V/µm, 50 Hz; *4* nach 2150 h bei 120 °C, ohne Spannung; *5* nach 2500 h bei 125 °C, 28 V/µm, 50 Hz
gemessen bei 10 V/µm, 50 Hz

Gas und X-Wachs als Folge von Glimmentlandungen festgestellt. Ähnliche Vorgänge dürften bei dem stark gealterten Kondensator nach Fig. 25, Kurve 2, eingetreten sein.)

Fig. 24 zeigt tan-δ-Messungen in Funktion der Temperatur an zwei Kondensatoren. Kondensator *1* wurde bei einem Druck von 10^{-3} mm Hg evakuiert, Kondensator *2* bei 10^{-1} mm Hg, beide 72 h lang bei 120 °C. Kurve 2 steigt viel stärker an als Kurve 1; der Autor führt das auf die im Papier verbliebene Restfeuchtigkeit des schlechter getrockneten Kondensators *2* zurück und erwartet eine beschleunigte Alterung dieses Kondensators.

Mineralöl altert unter dem Einfluss von Temperatur und Sauerstoff, wobei der Anstieg der dielektrischen Verluste von der Zusammensetzung des Öls abhängt. *Nowak* vergleicht die dafür bestimmten Prüfmethoden nach *Dussek* und nach «Polish Industrial Standard» ZN 63/MPCh/NF-79. Er findet, dass die zweite Methode den Beanspruchungen des Öls im Kondensator besser entspricht als die zu milde Prüfung nach *Dussek*.

In Fig. 25 ist der Verlustfaktor von zwei Kondensatoren in Funktion der Zeit bei Dauerbetrieb mit 1,4 U_N aufgetragen. Kondensator *1* wurde einwandfrei evakuiert und getrocknet (Daten wie in Fig. 24, Kondensator *1*), Kondensator *2* dagegen nicht vollständig durchtränkt; nach dem Öffnen des Tränkkessels, also an Luft, wurde lediglich Öl nachgegossen. Entsprechend niedrig war die Glimmeinsatzspannung und als Folge davon alterte der Kondensator sehr stark.

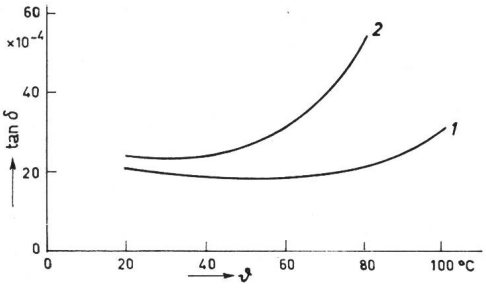


Fig. 24
Temperaturabhängigkeit des Verlustfaktors tan δ
1 Kondensator unter normalen Fertigungsbedingungen im Vakuum von 10^{-3} mm Hg getrocknet; *2* Versuchskondensator in einem Vakuum von 10^{-1} mm Hg getrocknet
Trocknungsdauer 72 h bei 120 °C

S 14

E. G. Mochi stellt fest, dass sich die Güte von Leistungskondensatoren in den letzten 10 Jahren so verbessert hat, dass aus früheren Jahren stammende Erfahrungen zu falschen Schlüssen über die Lebensdauer moderner Kondensatoren führen und dass diese eine Lebenserwartung von mindestens 20 Jahren haben, wenn auch Frühausfälle trotz strenger Materialkontrolle vorkommen können, weil die Lebensdauer vieler gleichartiger Kondensatoren stets statistisch verteilt ist. Die Frage, ob beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen eine zuverlässige Abschätzung der Lebenserwartung im Betrieb ermöglichen, wird verneint. Darüber hinaus hält der Autor formelmässige Zusammenhänge zwischen Lebensdauer, Temperatur und Spannung, wie sie andere Autoren gefunden haben, nur bei Gleichspannungskondensatoren für sinnvoll, nicht aber bei Wechselspannungskondensatoren.

Ob der im Neuzustand gemessene Verlustfaktor ein Mass für die zu erwartende Lebensdauer ist und ob durch tan-δ-Messungen nach längerem Betrieb Aussagen über das Alterungsstadium möglich sind, ist eine oft diskutierte Frage. Der Autor meint, dass ein niedriger Verlustfaktor bei hoch beanspruchten Kondensatoren lediglich aus thermischen Gründen erforderlich sei. Dennoch könne man daraus nicht auf eine längere Lebensdauer schliessen, wie auch umgekehrt nicht aus höheren tan-δ-Werten eine *Verkürzung* der Lebensdauer vorausgesagt werden kann. tan-δ-Messungen nach längerer Betriebszeit können zwar Aussagen über eine Verschmutzung des Tränkmittels (tan-δ-Erhöhung bei kleiner Spannung) oder über einen langsamen Abbau der Zellulose (tan-δ-Erhöhung bei Nennspannung) machen, im allgemeinen jedoch erfolgt der Durchschlag an Schwachstellen, ohne dass der Verlustfaktor des gesamten Kondensators vorher merklich angestiegen wäre.

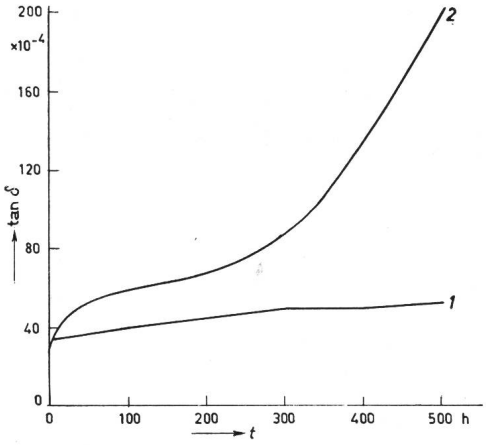


Fig. 25
Verlustfaktoranstieg in Abhängigkeit von der Zeit
Kondensatoren gealtert bei 1,4 U_n und 70 °C
1 Kondensator mit einer Glimmeinsatzspannung von $U_i = 3{,}5\ U_n$; *2* Kondensator mit einer Glimmeinsatzspannung von $U_n < U_i < 1{,}4\ U_n$

Glimmentladungen spielen bei Kondensatoren, die keinen häufig auftretenden Schaltüberspannungen ausgesetzt werden, als Ausfallursache keine wesentliche Rolle mehr. Messungen der Glimmeinsatzspannung dienen jedoch weiterhin als wichtiges Hilfsmittel bei der Material- und Fertigungskontrolle.

S 15

Z. Krasucki untersucht die Alterung von Kondensatoren, die mit den Aroclorsorten 1242 und 1254 getränkt waren und

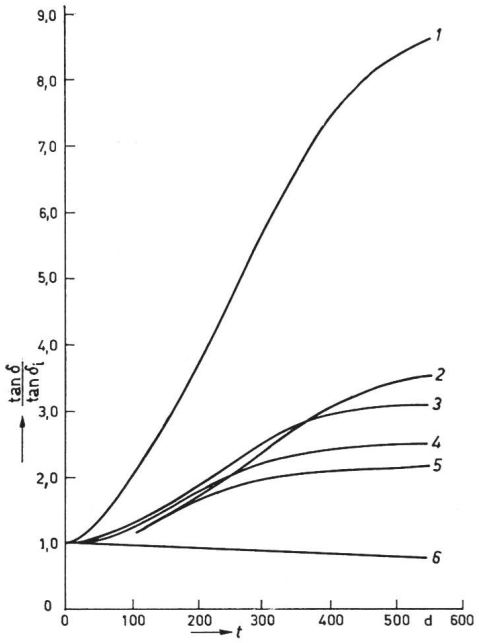


Fig. 26
Änderung des Verlustfaktors tan δ, **bezogen auf den Anfangswert, bei Kondensatoren der Gruppe A**
Alterung ohne Spannung bei 70 °C
t Zeit
1 tan δ_i = 0,00381; *2* tan δ_i = 0,00519; *3* tan δ_i = 0,00447; *4* tan δ_i = 0,00503; *5* tan δ_i = 0,00522; *6* tan δ_i = 0,00795

von verschiedenen Herstellern stammten. Die Kondensatoren lagen dabei nicht an Spannung und waren 3 Jahre lang einer Temperatur von 70 °C ausgesetzt. Zur Beurteilung des Alterungszustandes wird die seit langem bekannte Erscheinung des «Garton-Effektes» herangezogen. Danach steigt tan δ bei abnehmender Feldstärke infolge von Ionenbewegung in den Tränkmittelspalten, und zwar um so mehr, je mehr Ionen das Tränkmittel enthält.

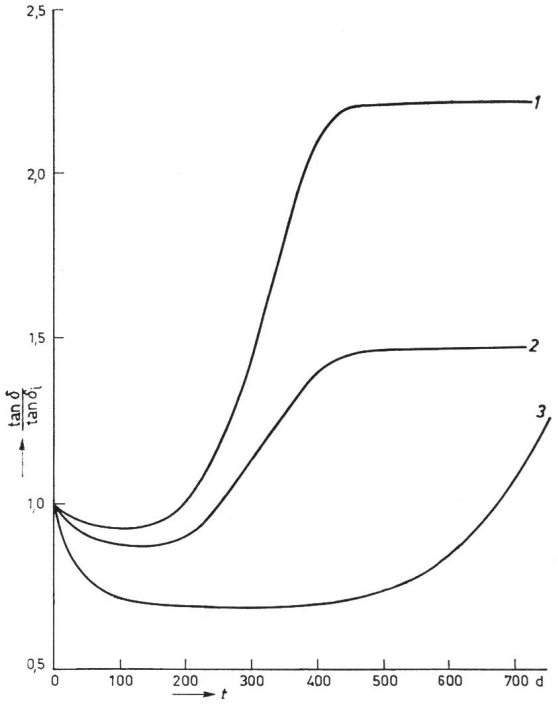


Fig. 27
Änderung des Verlustfaktors tan δ, **bezogen auf den Anfangswert, bei Kondensatoren der Gruppe B**
Alterung ohne Spannung bei 70 °C
t Zeit
1 tan δ_i = 0,00343; *2* tan δ_i = 0,00356; *3* tan δ_i = 0,02963

Fig. 26 und 27 zeigen den Verlustfaktor, bezogen auf den Anfangswert, aufgetragen über der Alterungsdauer. Gemessen wurde jeweils mit einer Spannung von 100 V bei einer Kondensatortemperatur von 70 °C. Das Dielektrikum der untersuchten Kondensatoren bestand aus 3 und 4 Lagen Papier von je 10 µm Dicke, über dessen Dichte keine Angaben gemacht werden. Die Kurven nach Fig. 26 steigen stetig an, während tan δ bei den Kurven nach Fig. 27 zunächst absinkt und erst nach 200...400 Tagen wieder zunimmt. Eine physikalische Deutung des sehr verschiedenen Kurvencharakters unter Hinweis auf die Verschiedenheiten im Aufbau des Dielektrikums, Art und Sauberkeit des Tränkmittels und der Evakuier- und Tränkbedingungen wäre für den Leser sehr aufschlussreich. Der Autor gibt lediglich an, dass bei etwa 50 % aller Prüflinge tan δ mit der Alterungsdauer anstieg und dass dieser Anstieg bei Kondensatoren mit Trichlordiphenyl grösser war als bei denen mit Pentachlordiphenyl.

Kondensatoren desselben Fertigungsloses verhalten sich sehr verschieden (vgl. Kurven 4, 5 und 6 in Fig. 26). Der Autor

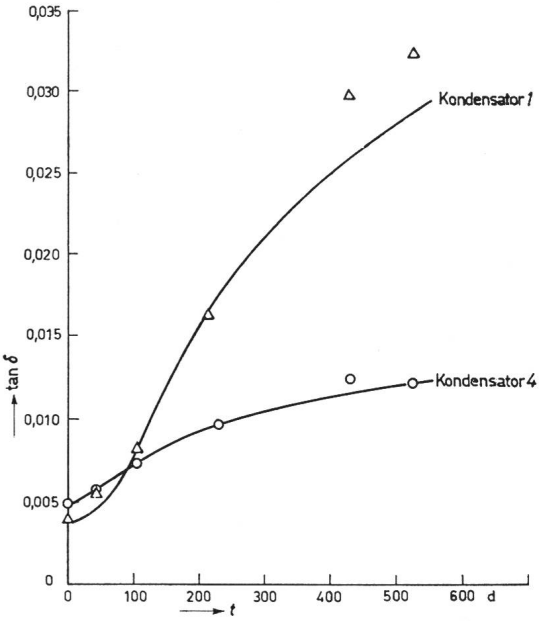


Fig. 28
Berechnete Änderung des Verlustfaktors tan δ **in Abhängigkeit von der Zeit** t **für die Kondensatoren** *1* **und** *4* **aus Fig. 26 im Vergleich zu den Messwerten**
—— errechnete Werte; △ ○ Messwerte

schliesst daraus, dass die offensichtlich eingetragene Vergrösserung der Ionenkonzentration nicht durch chemische Veränderungen des Tränkmittels oder Diffusion von Ionen aus dem Papier in das Tränkmittel zu erklären ist. Vielmehr müssen ionische Verunreinigungen von aussen in die Wickel eindiffundiert sein.

Aus theoretischen Überlegungen, die aus Platzgründen hier nicht wiedergegeben werden können, folgt, dass sowohl die Ionenbeweglichkeit μ als auch die Diffusionskonstante κ aus den tan-δ-Messungen in Abhängigkeit von der Spannung berechnet werden können. Für Kondensator 4 in Fig. 26 ergibt sich z. B.

$$\mu = 0{,}033 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{cm^2\,V^{-1}\,s^{-1}} \tag{9}$$

$$\kappa = 9{,}9 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{cm^2\,s^{-1}} \tag{10}$$

Der Autor leitet eine Gleichung ab, die den Verlauf des Verlustfaktors über der Zeit zu berechnen gestattet, wenn die aus den Experimenten bestimmten Werte für μ und κ einge-

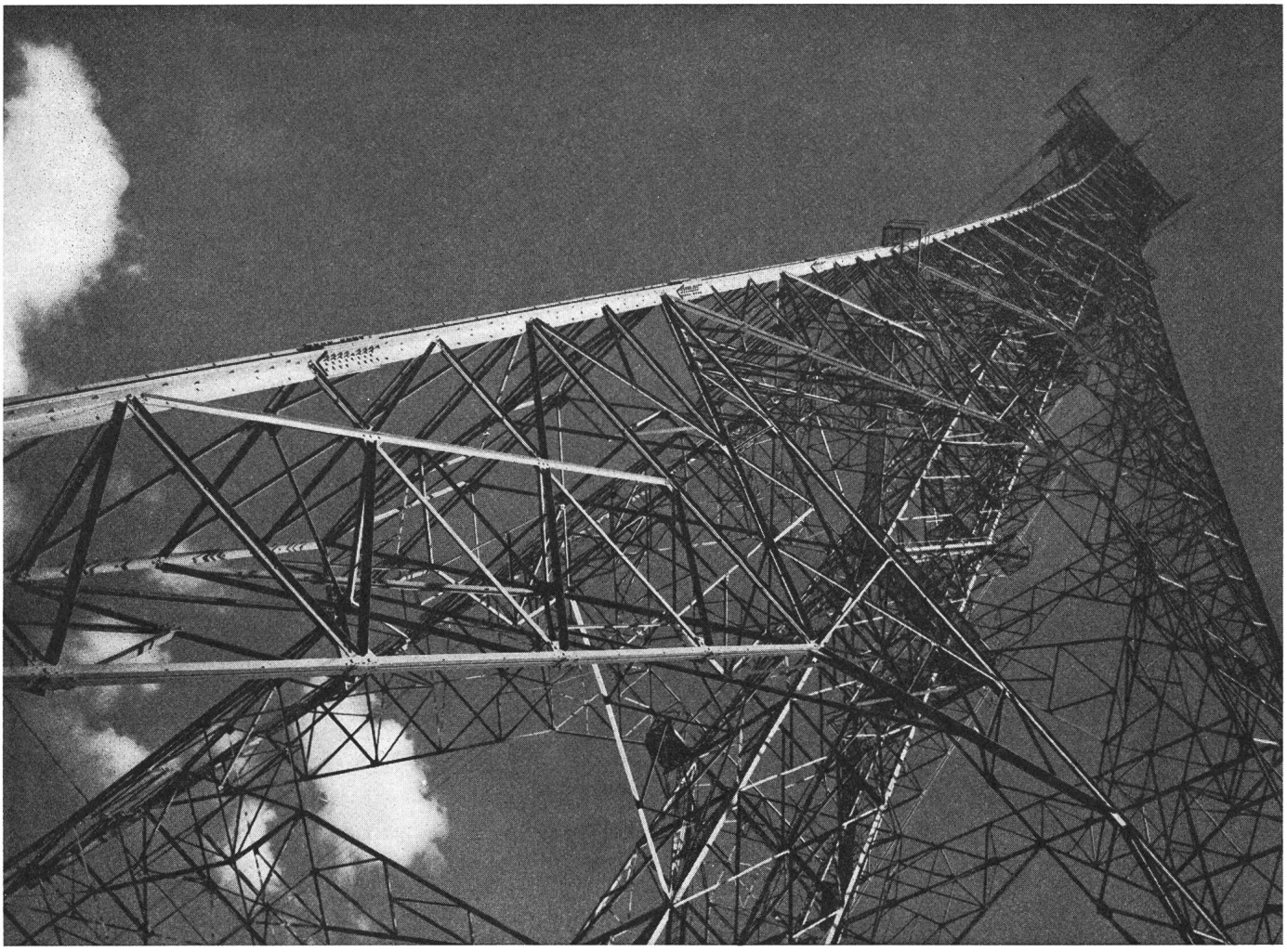
setzt werden. In Fig. 28 sind die gemessenen Werte und die theoretisch gewonnenen Kurven eingetragen; sie stimmen mit den Messwerten gut überein.

Schlussbemerkungen

Die Alterung von Leistungskondensatoren und deren Lebensdauer ist von zahlreichen und sehr verschiedenartigen Einflussgrössen abhängig, in erster Linie jedoch, wie die vorgelegten Berichte gezeigt haben, von Feldstärke und Temperatur sowie vom Aufbau des Dielektrikums und von der Qualität der verwendeten Rohstoffe. Die Berichte S 1 bis S 15 liefern zwar kein einheitliches Bild, da die Untersuchungsbedingungen sehr verschieden waren, sie zeigen aber, dass heute durch die erfolgreiche Zusammenarbeit von Anwendern, Rohstoff- und Kondensatorherstellern Leistungskondensatoren hoher Betriebszuverlässigkeit gebaut werden können.

Eine allgemeine Alterung des Dielektrikums — durch intensive Glimmentladungen oder durch Verschmutzung — wodurch $\tan \delta$ im Laufe der Betriebszeit unzulässig ansteigt, scheint heute vermeidbar zu sein. Damit dürften Alterungsvorgänge, die nach langer Betriebsdauer einen elektrischen Durchschlag zur Folge haben können, im wesentlichen auf diskrete Stellen im Dielektrikum beschränkt bleiben, wo z.B. durch Überlappung leitender Einschlüsse in mehreren Papierlagen bedeutend höhere Feldstärken auftreten als an jeder anderen Stelle. Die Eigenschaften solcher (im Prinzip unvermeidlichen) Fehlerstellen im Papier und die physikalischen Vorgänge an Überlappungsstellen, die langsam ablaufen und das Dielektrikum immer mehr schwächen können, müssten noch genauer studiert werden. Diese Untersuchungen hätten zum Ziel, Prüfverfahren für das Kondensatorpapier und zuverlässige Prüfkriterien auszuarbeiten und die Papiere auch bezüglich der Zahl der Fehlerstellen weiter zu verbessern.

Adresse der Autoren:
Dr. *Wolfgang Held* und Dipl. Ing. *Walter Rolvien,* Siemens AG, Dynamowerk, D–Berlin 13.



Hochspannungsmast in Frankreich