

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 60 (1969)
Heft: 17

Artikel: Leistungssteigerung der mit Askarels imprägnierten Kondensatoren mittels geeigneter Zusätze
Autor: Boyer, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916172>

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: 03.04.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Leistungssteigerung der mit Askarels imprägnierten Kondensatoren mittels geeigneter Zusätze

Von P. Boyer, Fribourg

140 - 148

621.319.4 : 621.315.616.96
(Übersetzung)

Die beachtlichen Fortschritte der letzten Jahre auf dem Gebiet der Kondensatorenimprägnierung mit Askarels wurden durch eine bessere Einsicht in die Alterungsvorgänge ermöglicht, die bei verschiedenen Beanspruchungen, entweder mit Gleichspannung oder mit Wechselspannungen bei Netzfrequenz, auftreten. Im Falle von Gleichspannung führten das erweiterte und vertiefte Verstehen der elektrochemischen Zerfallerscheinungen und ihre nuancierte Auslegung zu einer Verbesserung von Kondensatorleistungen, nicht zuletzt auch dank den hohen Anforderungen der Verbraucher. Bei Wechselspannung sind die erreichten Ziele noch viel erstaunlicher; denn die Beimischung von Epoxyharzen zu den Askarels und die Kenntnis der Eigenschaften der übrigen Bestandteile dieser Isolationsysteme übertrafen alle Erwartungen.

Die Lösung solcher komplizierter Probleme wie die Askarelimprägnierung von Metallpapierkondensatoren mit Zwischenlagen aus Papier- oder Kunststofffolien erlaubt einen gewissen Optimismus für die Zukunft der Kondensatoren.

Les progrès remarquables réalisés au cours de ces dernières années dans la conception des condensateurs imprégnés dans les Askarels sont dus à une meilleure connaissance des mécanismes de dégradation survenant sous les différentes contraintes applicables soit sous tension continue, soit sous tension alternative aux fréquences industrielles. Sous tension continue, une extension et un approfondissement des connaissances relatives aux phénomènes de dégradation électrochimique a permis d'améliorer les performances des condensateurs grâce à une appréciation nuancée des effets de dégradation et à l'épreuve de solutions pouvant satisfaire divers degrés de sévérité requis par les utilisateurs. Sous tension alternative, les réalisations ont été beaucoup plus spectaculaires grâce à l'introduction des additifs à base de résine époxyde dans les Askarels et, simultanément, à une meilleure connaissance des caractéristiques des autres constituants de ces systèmes d'isolation.

De nouvelles perspectives sont donc ouvertes puisque des problèmes aussi complexes que celui de l'imprégnation des condensateurs au papier métallisé dans les Askarels ont pu être résolus d'une façon remarquable par la conjonction de moyens efficaces.

1. Einführung

Die Leistungen von Kondensatoren werden hauptsächlich durch die angelegte elektrische Spannung beeinträchtigt. Die Temperaturabhängigkeit spielt dagegen eine weniger wichtige Rolle, obwohl ihre Auswirkungen, vor allem in der kritischen Zone des Wärmeknickes auf keinen Fall vernachlässigt werden dürfen.

Wie der Physiologe *Claude Bernard* einmal ganz richtig bemerkte, ist es nicht möglich, die Lebensfunktionen eines Organismus zu gewährleisten, ohne eine bessere Kenntnis und Verständnis seiner verwickelten Vorgänge zu besitzen. Dasselbe gilt auch für Isolierungssysteme. Da sich die heutigen Kenntnisse über die Veränderung des Dielektrikums von Kondensatoren bei verschiedenen Temperaturen und besonders bei elektrischen Beanspruchungen wesentlich gebessert haben, konnten im letzter Zeit beträchtliche Fortschritte in der Herstellung von Kondensatoren erreicht werden.

Die Gründe dieser Fortschritte sind natürlich vielseitig und von unterschiedlicher Bedeutung:

a) Verbesserung der Homogenität, der dielektrischen Festigkeit, Verringerung der dielektrischen Verluste und Erhöhung der Alterungsbeständigkeit der festen Isolierstoffe (Papier, Kunststofffolien).

b) Verbesserung der Oberflächengüte des Belages.

c) Qualitätsverbesserung der Imprägnierungsmittel.

d) Bessere Fabrikationsmethoden: staubfreie und klimatisierte Fabrikationsräume, funktionelle und rationelle Trocknungs- und Imprägnierungsverfahren.

e) Bemühungen nach Vereinheitlichung.

Systematische Studien der Alterungsvorgänge und des Durchschlages von Kondensatoren, bei Gleich- und Wechselspannungen, sind seit Jahren im Gange.

Während die Veränderungen bei Gleichspannung die Folge elektrochemischer Vorgänge sind, die seit langem mehr oder weniger bekannt sind, werden die Alterungerscheinungen bei Wechselspannung durch Teilentladungen verursacht, deren Rückstände besonders gefährlich sind, falls sie nicht durch Absorption oder durch eine chemische Reaktion in kürzester Zeit gebunden werden. Dieser Vorgang wurde seit mehreren Jahren vermutet und konnte kürzlich auch nachgewiesen werden.

Es dürfte daher interessant sein zu verfolgen, wie man es erreicht hat, solche Schäden zu verhüten oder wenigstens zu verringern, bzw. die wesentlichen, darauffolgenden Vorteile kennenzulernen.

2. Entwicklung und Verhinderung von Schädigungen bei Gleich- und Wechselspannung

Der Schädigungsmechanismus unterscheidet sich, je nach dem man eine Gleich- oder Wechselspannung am Kondensator anlegt.

2.1 Gleichspannung

Die elektrochemische Veränderung in Kondensatoren, welche sich in einem elektrischen Feld befinden, verursachte seit jeher grosse Sorgen. Ihr Widerstand gegen Alterungser-

schädigen können. In den Zonen von grosser Leitfähigkeit oder von erhöhter Feldverzerrung führen die Teilentladungen zu lokalen Zerstörungen der Isolation. Flüssige Isoliermittel sind diesem Phänomen gegenüber ganz besonders empfindlich.

Die zur Imprägnierung verwendeten Askarels verursachen auch solche Erscheinungen.

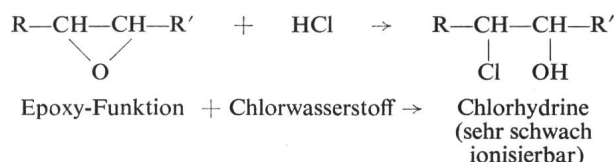
Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Auswirkungen von Teilentladungen mit jenen vergleichen lassen, die durch Ultraschall hervorgerufen werden. Es ist bekannt, dass sich eine organische, aus einer grösseren Anzahl von Isomeren bestehende Flüssigkeit infolge von Dissoziation depolymerisieren kann. Auf diese Weise wird z. B. die Stärke durch Einwirkung von Ultraschall zu Dextrinen abgebaut. Versuche über die Wirkung von Ultraschall auf die meisten Imprägnierungsmittel von Kondensatoren hat gezeigt, dass Askarels sehr schnell zerstört werden können. Bei den Versuchen wurde während weniger Minuten ein Ultraschallfeld von 4 W/cm^2 bei einer Frequenz von 20 kHz verwendet, was lokalen Druckschwankungen von 0...7 at bei einer maximalen Verschiebungsgeschwindigkeit von ungefähr 25 cm/s entspricht. Das hauptsächlichste Abfallprodukt, Chlorwasserstoff, verursachte eine erhebliche Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften des geprüften Materials.

Die elektronische Bombardierung, wie sie im Verlauf der Teilentladungen stattfindet, führt zu der gleichen, lokal jedoch begrenzten, Erscheinung, wie die Anwendung von Ultraschall. Verfügen die Elektronen über genügend hohe Energie, so vermag, in einem starken Feld, wie es sich am Rande der Elektroden entlang einer Feldlinie von charakteristischer Länge [6] bildet, der wiederholte Aufprall, ausser einer mechanischen Erosion, auch eine thermische Zersetzung des Isoliermittels bei Freisetzung von Chlorionen und anschliessender Bildung von Chlorwasserstoff herbeiführen. Die Auswirkungen eines solchen Vorganges auf eine Kunststoffolie mit oder ohne Papier sowie auf die Aluminiumbeläge kann man sich ohne weiteres vorstellen; reine Papierisolationen dagegen besitzen eine grössere Resistenz.

Der Mechanismus der Zerfallsverhinderung in den Isolationssystemen von Kondensatoren kann bei Wechselspannung also nicht der gleiche sein wie jener bei Gleichspannung. Die Beigabe von wasserstoffabsorbierenden Mitteln bleibt in solchen Fällen praktisch wirkungslos. Die Zugabe von aktivierter Aluminiumoxydcharge in der gewünschten Feinheit zum Imprägnierungsmittel oder zum Papier und der Isolation, welche den aktiven Teil umgeben, wirkt eher als Reinigungseffekt auf die ionisierbaren Unreinheiten als eine Schutzwirkung gegen die unerwünschten Folgen der Teilentladungen, seien sie noch so unscheinbar. Wie zahlreiche und langjährige Untersuchungen in Europa und in den Vereinigten Staaten gezeigt haben, gehören die besten Zusatzmittel, welche den durch Teilentladungen gebildeten Chlorwasserstoff schnell und vollständig binden, zu der Familie der Epoxyharze.

Es sind auch noch weitere Substanzen bekannt (Tetra-phenylzinn, Phenoxypropylenoxyd, Di-oxy-di-pentan), doch sind deren Schnelligkeit und Wirksamkeit geringer und die Nebenprodukte lassen sich leicht ionisieren. Stabilisierenden Epoxyverbindungen sind daher heute allgemein verbreitet.

Man erklärt sich den Mechanismus der Chlorwasserstoffbindung schematisch wie folgt:



Der Gehalt an Zusatzmitteln muss im Hinblick auf eine sichere Schutzwirkung zu Beginn der Inbetriebnahme des Kondensators und bei Überspannungen bestimmt werden, wobei der Ausführung und den Ausmassen der Kondensatoren Rechnung getragen werden soll, ohne dabei die dielektrische Charakteristik des aktiven Teils zu vermindern.

Sorgfältig ausgewählte Epoxyharzzusätze haben sich in den mit askarelimprägnierten Kondensatoren aus Kunststoffolien mit oder ohne Papier unerlässlich erwiesen und ergänzen ausserdem das natürliche Vermögen des imprägnierten Papiers, Chlorwasserstoff zu absorbieren.

Infolgedessen können die Spannungsgradienten merklich und mit aller Sicherheit erhöht werden, denn die Ausfälle, die man bei den dielektrischen Festigkeitsprüfungen während der Herstellung oder bei späteren Kontrollen feststellt, sind ohne weiteres tolerierbar.

Berücksichtigt man den erwähnten Reinigungseffekt des Aluminiumoxyds, so ist es nicht ausgeschlossen, Isolationssysteme zu entwerfen, die sowohl aktiviertes Aluminiumoxyd als auch stabilisierende Epoxyharzverbindungen enthalten, da sich diese Zusätze nur teilweise ergänzen und verschiedene Wirkungsbereiche haben.

3. Analyse der Alterungsversuche

Es ist von grosser Wichtigkeit, die Ergebnisse der Alterungsversuche möglichst genau analysieren zu können. Die modernen, immer mehr angewandten Methoden, die den einzelnen Bestandteilen eines Systems Zuverlässigkeitsgrenzen zuschreiben, erfordern die grundlegende Kenntnis der Entstehung der Ausfälle. Die Bestimmung der Lebensdauer eines Bauelementes ist für den Fachmann unbedingt notwendig. Diese Prüfung erlaubt eine ziemlich genaue Feststellung jener Zeit, während der das Bauelement einwandfrei funktioniert. Dabei kann die Wahrscheinlichkeit eines plötzlichen Ausfalles durch Abnutzung in den vorher für die Zuverlässigkeit bestimmten Grenzen gehalten werden.

Die Ausfälle der Bauelemente während der Betriebsdauer streuen und sind zufällig. Man kann sie durch eine Exponentialfunktion darstellen. Die Wahrscheinlichkeit des guten Funktionierens ist gross, wenn die tatsächliche Betriebsdauer sehr klein ist im Verhältnis zur mittleren Dauer des guten Funktionierens (MTBF).

Die Ausfälle infolge Alterung sind wesentlich anders. Die Wahrscheinlichkeit einer Alterung ist äusserst gering bis zur Annäherung der entsprechenden Lebenserwartung; dabei darf jedoch die dieser Entwicklung anhaftende Dispersion nicht vernachlässigt werden. Die Abnutzungerscheinungen folgen andern als dem Exponentialgesetz:

a) Dem Gesetz von Laplace-Gauss, wo die Variable das Ergebnis einer Vielzahl unabhängiger Ursachen ist, wobei jedoch jede dieser Ursachen gegenüber dem Ganzen eine zu vernachlässigende Wirkung hat.

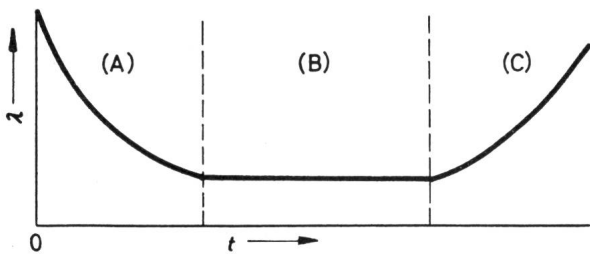


Fig. 1

Ausfallrate λ in «Wannenform» in Funktion der Zeit t nach Empfehlung Nr. 271 (1969) der CEI

A Bereich der Frühhausfälle; B Bereich mit praktisch konstanter Ausfallrate; C Bereich der Ausfälle infolge Alterung

b) Dem log-normalen oder Galtonschen Gesetz, wo die Variable ebenfalls das Ergebnis einer Vielzahl unabhängiger Ursachen von positiv multiplikativem Charakter darstellt, wobei aber jede dieser Ursachen gegenüber dem Ganzen eine zu vernachlässigende Wirkung haben kann.

Somit entspricht die Summierung der Effekte, die zum ersten Gesetz (Laplace-Gauss) führt, zur Proportionalität der Effekte beim zweiten Fall (Galton). Das Gesetz von Laplace-Gauss eignet sich besser, um die Verteilung der Ausfälle durch Abnutzung in einer praktisch homogenen Gruppe von Kondensatoren darzustellen.

Es dürfte zum Schluss interessant sein zu erwähnen, dass sich die obigen Funktionen in die experimentelle Funktion von Weibull einbauen lassen, je nach den Grössen, die man den Weibullischen Parametern zuschreibt:

Es sei:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{(t-t_0)^\beta}{\alpha}}$$

Weibullische Verteilungsfunktion.

und

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta(t-t_0)^{\beta-1}}{\alpha} e^{-\frac{(t-t_0)^\beta}{\alpha}}$$

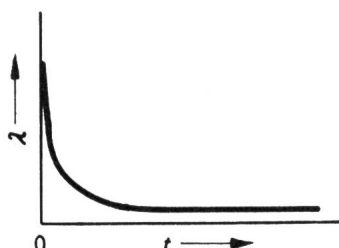
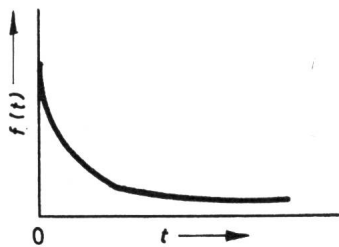
Funktion der entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichte

wobei

α Skalenparameter; β Formparameter; t_0 Lokalisationsparameter.

Fig. 1 zeigt die 3 typischen Ausfallserscheinungen von Bauelementen in Abhängigkeit von der Zeit.

- A) Frühzeitige Ausfälle;
- B) Zufällige Ausfälle mit praktisch konstanter Häufigkeit;
- C) Ausfälle infolge Abnutzung.



Die Fig. 2, 3, 4 zeigen nacheinander die Funktionen der Wahrscheinlichkeitsdichte, und die entsprechenden Ausfallraten gemäss der Weibullischen Funktion mit den Parametern $t_0 = 0$ und $\alpha = 1$ für die drei typischen oben erwähnten Fälle, also für:

Fig. 2
Charakteristische Weibullverteilung für Frühhausfälle
 $f(t)$ Dichtefunktion; λ Ausfallrate bei $t_0 = 0$;
 $\alpha = 1$; $\beta = 1/2$;
 t wirkliche Gebrauchsdauer

- $\beta = 1/2$ frühzeitige Ausfälle (die Ausfallrate nimmt ab);
- $\beta = 1$ zufällige Ausfälle, wobei die Weibullische Funktion zu einer Exponentialfunktion wird (die Ausfallrate ist praktisch konstant);
- $\beta = 3,25$ Ausfälle durch Alterung; die Weibullische Funktion verwandelt sich in eine Funktion von Laplace-Gauss (die Ausfallrate nimmt zu).

4. Dauerversuch unter Gleichspannung bei stufenweiser Belastung

Die Benützung der Methode der stufenweisen Belastung erlaubt eine vergleichende Untersuchung von neuen Materialien und Isolationssystemen in verhältnismässig kurzen Zeiträumen und unter günstigen Bedingungen. Bei gleichbleibenden Belastungen dagegen ist eine genaue Kenntnis der Daten der Prüfgruppe notwendig, denn sie müssen so exakt wie möglich bestimmt werden (Beschleunigungsfaktoren). Andererseits erschweren die Versuche mit progressiver Belastung [7] das Wahrnehmen einer Änderung im Abnutzungsmechanismus.

Versuche mit stufenweiser Belastung sind gekennzeichnet durch die sukzessive Anwendung mehrerer Stufen einer gleichen Belastung an einer gleichen Prüfgruppe während gleichbleibenden Zeitabschnitten. Normalerweise ist das Initialniveau der Belastung genügend niedrig, um ein Anwachsen mit konstanten Stufen im Verlaufe der weiteren Zeitabschnitte zu gewährleisten.

Die Mechanismen des elektrochemischen Zerfalls konnten im Verlaufe eines grossangelegten Versuches systematisch untersucht werden. Bei einer konstanten Temperatur von 70 °C wurden jeweils für jede Variante ein Satz von 20...30 Kondensatoren mit gleicher Kapazität (2 μ F) und gleichen Ausmassen Gleichspannungen in Stufen von 120 zu 120 V—, angefangen bei 900 V—, ausgesetzt; jede Belastungsperiode dauerte 500 h. Die Angaben der Prüflinge sind in Tabelle I zusammengestellt.

Der Gehalt an Zusatzmitteln, der für jede Prüfgruppe identisch war, wurde so bestimmt, dass an den elektrischen Charakteristiken der zu vergleichenden Gruppen praktisch nichts geändert wurde und dennoch eine spezifische Inhibitionswirkung festgestellt werden konnte. So konnte die Anwesenheit von Anthrachinon nur bei der Messung des Isolationswiderstandes bei einem mit Trichlordiphenyl imprägnierten Kondensator nachgewiesen werden. Epoxyharze sind leichter feststellbar; die dielektrischen Verluste der Gruppen, die mit Tetrachlor-, besonders aber mit Trichlordiphenyl imprägniert waren, zeigten eine leichte Erhöhung; gleichzeitig verminderte sich auch der Isolationswiderstand.

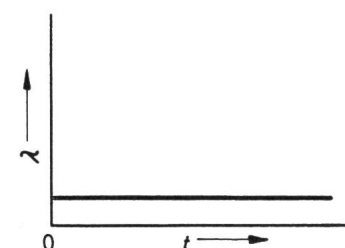
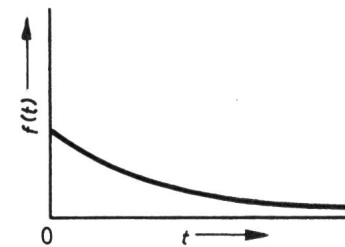


Fig. 3
Charakteristische Weibullverteilung für die normale Arbeitsperiode
 $f(t)$ Dichtefunktion; λ Ausfallrate bei $t_0 = 0$;
 $\alpha = 1$; $\beta = 1$;
 t wirkliche Gebrauchsdauer

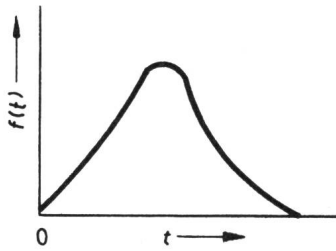
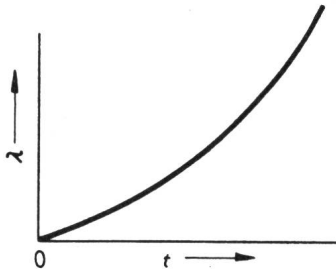


Fig. 4
Eigenartige Weibullverteilung für die Alterungsperiode
 $f(t)$ Dichtefunktion; λ Ausfallrate bei $t_0 = 0$;
 $\alpha = 1$; $\beta = 3,25$;
 t wirkliche Gebrauchsdauer



Die Verteilung der Ausfälle in Abhängigkeit von der Versuchsdauer ist in Fig. 5 (nach Galton) und Fig. 6 (abgeändertes Weibullisches Nomogramm) graphisch dargestellt. Die Ergebnisse mit den verschiedenen Arten von Pyralene sind

gruppiert, um zu zeigen, dass die Leistungsunterschiede der einzelnen Pyralene unbedeutend sind, obwohl die Stabilisierung mit Anthrachinon für die Gruppen, die mit den flüchtigsten Askarels imprägniert wurden, vergleichsweise stärker war. Diese Feststellung spräche für die Hypothese der primären Chlorwasserstoffbildung im Rahmen der Erklärungsversuche des elektrochemischen Zerfallsvorganges, da sich die chlorierten Diphenyle um so leichter dissoziieren (Freisetzung von Chlorionen) je mehr sie substituiert sind.

Eine vergleichende Analyse der Fig. 5 und 6 hebt deutlich die Leistungsunterschiede jeder Variante hervor. Im Fall des imprägnierten Papiers sind die Epoxyharzzusätze eindeutig weniger wirksam als Anthrachinon. Die Hypothese der primären Wasserstoffbildung nach Abschn. 2.1.2 scheint sich zu bestätigen. Die Prüfgruppe mit imprägniertem Papier ohne jeglichen Zusatz fällt unbestreitbar am schnellsten aus. Die in Mineralöl imprägnierten Kunststoffolien, besonders jene aus Polyäthylenterephthalat, bürgen für eine sehr grosse Lebensdauer der Kondensatoren, bei notwendigerweise höheren Spannungsbelastungen als jenen, die für die papierimprägnierten Kondensatoren angewendet werden, da sich

Angaben der Prüflinge

Tabelle I

Prüfgruppe	Dielektrikum	Lagenzahl	Dicke einer Lage μm	Imprägniermittel	Zusatz
1	Papier ($d = 1,2$)	2	10	Pyralen ¹⁾	kein
2	Papier ($d = 1,2$)	2	10	Pyralen ¹⁾	Epoxyharz
3	Papier ($d = 1,2$)	2	10	Pyralen ¹⁾	Anthrachinon
4	Makrofol KG ²⁾	2	6	Mineralöl	kein
5	Mylar C ³⁾	2	6	Mineralöl	kein

¹⁾ Polychlordiphenyle (bei dieser Prüfung sind folgende Typen in Betracht genommen: Pyralen 1482, 1476, 1498 und 1499 bzw. Hexa-Hepta-, Penta-, Tetra- und Trichlordiphenyle)
²⁾ Isolierfolie aus Polycarbonat.
³⁾ Isolierfolie aus Polyäthylenterephthalat.

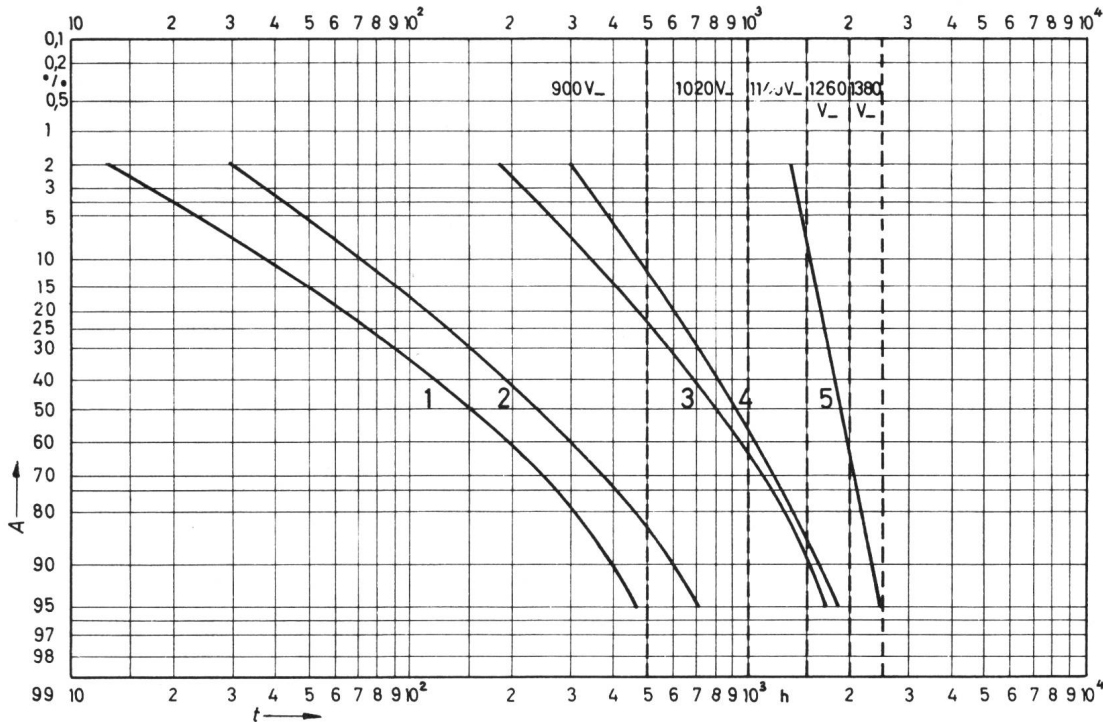


Fig. 5
Gleichspannungslebensdauerprüfung bei 70 °C mit stufenweiser Belastung
Verteilung der Ausfälle in Funktion der Prüfzeit im Galtonischen Nomogramm

0... 500 h bei 900 V_
501...1000 h bei 1020 V_
1001...1500 h bei 1140 V_
1501...2000 h bei 1260 V_
2001...2500 h bei 1380 V_

1 Pyralenimprägnierung, ohne Zusatz, Papier als Dielektrikum; 2 Pyralenimprägnierung, mit Epoxyharzzusatz, Papier als Dielektrikum; 3 Pyralenimprägnierung, mit Anthrachinon, Papier als Dielektrikum; 4 Mineralölimprägnierung, ohne Zusatz, Polycarbonatfolie als Dielektrikum; 5 Mineralölimprägnierung, ohne Zusatz, Polyäthylenterephthalatfolie als Dielektrikum; A prozentuale Zahl der defekten Prüflinge (Ausfall infolge Alterung); t Prüfdauer

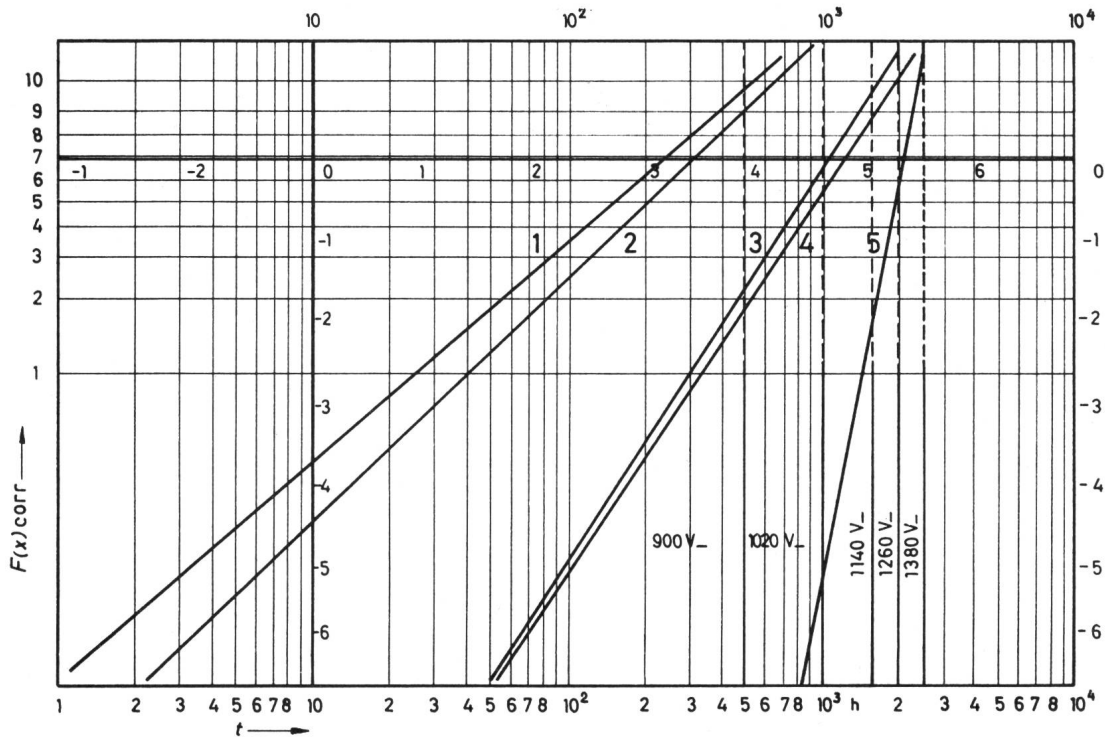


Fig. 6

Wie Fig. 5, aber Verteilung der Ausfälle in Funktion der Prüfdauer im Weibull'schen Nomogramm

$F(x)_{corr}$ angepasste Summenhäufigkeit der Weibull'schen Funktion für kleine Stichproben; t Prüfdauer

Spannungsbeanspruchungen und relative Dielektrizitätskonstanten der Prüfgruppen

Tabelle II

Prüfperiode h	Entsprechende Prüfspannung V	Entsprechende Spannungsbeanspruchungen der Prüfgruppen	
		1, 2 und 3 ¹⁾	4 und 5 ²⁾
0... 500	900	45	75
501...1000	1020	51	85
1001...1500	1140	57	95
1500...2000	1260	63	105
2001...2500	1380	69	115

¹⁾ Resultierende Dielektrizitätskonstante der Gruppen 1, 2 und 3 bei 20 °C und 50 Hz: 5,2...5,8.
²⁾ Resultierende Dielektrizitätskonstante der Gruppen 4 und 5 bei 20 °C und 50 Hz: 2,5...2,8.

ihre resultierenden relativen Dielektrizitätskonstanten um einiges unterhalb jener des im Pyralen imprägnierten Papiers befinden (Tabelle II).

Wenn die thermischen und elektrischen Belastungen jene Werte nicht übersteigen, die in der Praxis für solche Kondensatoren normalerweise vorkommen, ist es möglich, die Lebensdauer vorauszusagen (Tabelle III).

Die Verteilung der Ausfälle jeder Gruppe wurde mit Hilfe der Gausso-logarithmischen Darstellung und der abgeänderten Weibull'schen Nomogramme berechnet.

Die Verteilung der Ausfallerscheinungen nach einer Kurve im Galtonschen Nomogramm ist bedeutsam, besonders für die Variante mit relativ kurzer Lebensdauer. Das Weibull'sche Nomogramm besitzt gegenüber jenem von Galton den Vorteil einer graphischen Analyse der Vielfalt oder der Änderung der Ursachen. Fig. 7 veranschaulicht auf einfache Art diesen Vorteil. Die «Gerade» von Weibull, welche der

Gruppe 5 entspricht, kann in der Tat in zwei Segmente von verschiedener Steigung (Gerade 5' und 5'') aufgeteilt werden. Die Steigung dieser Geraden wurde im gleichen Zeitpunkt geändert wie die Erhöhung der Spannungsbelastung nach 2000 Versuchsstunden. Man darf somit annehmen, dass der Veränderungsprozess unter dieser neuen Belastung beschleunigt wurde.

Im vorliegenden Fall wurde die graphische Darstellung der Ausfälle durch das stufenweise Anwachsen des Spannungsgradienten nur wenig gestört. Die Kurven 3 und 4 von Fig. 5 wurden durch diese Versuchsbedingung am meisten betroffen (Krümmung).

Schliesslich ergab die Berechnung nach Galton eine zwar pessimistischere, dafür aber sicherere mittlere Lebenserwartung als die Interpretierung nach Weibull, mit Ausnahme der relativ kurzen Lebensdauern, wo es sich gerade umgekehrt verhält.

5. Dauerversuche bei Wechsellspannung bei Netzfrequenz

Die Einführung von geeigneten Zusätzen in die Askarels, die zur Imprägnierung von Wechsellspannungs-Kondensato-

Berechnete Lebensdauer von Kondensatoren

Tabelle III

Prüfgruppe	Dielektrikum	Imprägniermittel	Zusatz	Berechnete Lebensdauer mit statistischer Sicherheit von	
				90 %	60 %
1	Papier	Pyralen	kein	¼ Jahr	½ Jahr
2	Papier	Pyralen	Epoxyharz	½ Jahr	1 Jahr
3	Papier	Pyralen	Anthrachinon	3 Jahre	5 Jahre
4	Makrofol KG	Mineralöl	kein	3,5 Jahre	6 Jahre
5	Mylar C	Mineralöl	kein	15 Jahre	25 Jahre

ren verwendet werden, erbrachte spektakuläre Erfolge. Um dazu zu kommen, musste man sich mit einer empirischen Methode behelfen, welche erlaubte, genügend viele Anhaltspunkte zu sammeln, unter ihnen eine Auswahl zu treffen und Wechselbeziehungen herzuleiten. Diese Methode führt rasch zum gesuchten Ziel, wenn dazu ein geeignetes Versuchsinstrument verwendet wird. Gleichzeitig wurden die Dauerversuche mit abgestuften Spannungsgradienten in Betracht gezogen. Bald stellte man fest, dass die Ausfälle sehr frühzeitig und zufällig auftraten, ohne dass bei den restlichen noch unbeschädigten Prüflingen eine typische Alterung beobachtet werden konnte. Der Prozentsatz der frühzeitigen und zufälligen Ausfälle war gelegentlich sehr hoch. Eine Analyse der elektrischen Eigenschaften der an den Dauerversuchen beteiligten und nicht ausgefallenen Prüflingen ergab zwei Kategorien: In der ersten sind jene Kondensatoren vereinigt, deren Eigenschaften im Vergleich zu den Eingangswerten praktisch unverändert geblieben waren, in der zweiten befanden sich jene, deren Isolierung beschädigt wurde. Die Kondensatoren dieser Kategorie wurden wahrscheinlich durch lokale Teilentladungen beschädigt. Die Beigabe von Anthrachinon zu den Askarels verbesserte niemals die Lage, im Gegenteil, in gewissen Fällen wirkte sie sogar verschlimmernd. Dagegen erwiesen sich die Mittel, welche durch Teilentladungen geformten Chlorwasserstoff binden, als wirksam. Dank der Kraft und der Schnelligkeit ihrer Schutzwirkung kann den Epoxyharzen als Beigabe der Vorzug gegeben werden.

Der Hemmechanismus der Epoxyharze wurde auch systematisch untersucht. Es konnte bewiesen werden, dass sich die elektrischen Eigenschaften der damit behandelten

Daten von 6 Prüfgruppen von Kondensatoren (A, A', B, B', C und C') vor einer Lebensdauerprüfung bei 25 V~/µm und 115 °C

Tabelle IV

Gemeinsame Daten:

Anzahl Prüflinge pro Gruppe: 10

Kapazität pro Kondensator: 5 µF

Dielektrikum: 2 × 10 µm-Papierlagen in der Rohdichte (air dry) = 1,20

Imprägniermittel: Pyralen 1499 (Trichlordiphenyl) mit Epoxyharzzusatz für die Prüfgruppen A, B, C
ohne Epoxyharzzusatz für die Prüfgruppen A', B', C'

Kondensatorabmessungen: 45 × 35 × 100 mm

Elektrische Eigenschaften des Papiere im trockenen Zustand:

Prüfgruppen	Durchschlagfestigkeit in 2 Lagen bestimmt V~/µm		Leitende Teile (nach ASTM) Anzahl/10 dm ²	Fehler beim Quecksilbertest unter Gleichspannung in V				
	Mittelwert	Streuung		10	20	30	40	110
A + A'	135	12	1,2	30	20	20	10	30
B + B'	100	13	1,0	10	20	80	300	3000
C + C'	105	10	0,4	20	20	20	20	450

Dielektrischer Verlustfaktor tg δ bei 50 Hz und bei 13 V~/µm in %:

Messungen an Kondensatoren der einzelnen Prüfgruppen bei verschiedenen Temperaturen:

Prüfgruppen	Temperaturen in °C					
	20	40	60	80	100	120
A + A' ¹⁾	0,35	0,30	0,27	0,27	0,29	0,33
B + B' ¹⁾	0,35	0,29	0,25	0,24	0,25	0,30
C + C' ¹⁾	0,35	0,30	0,26	0,25	0,26	0,31

¹⁾ Die Prüfgruppen A', B' und C' (mit Epoxyharzzusatz) hatten anfangs 5...10 % höhere Verlustfaktoren als jene der Prüfgruppen A, B und C (ohne Epoxyharzzusatz).

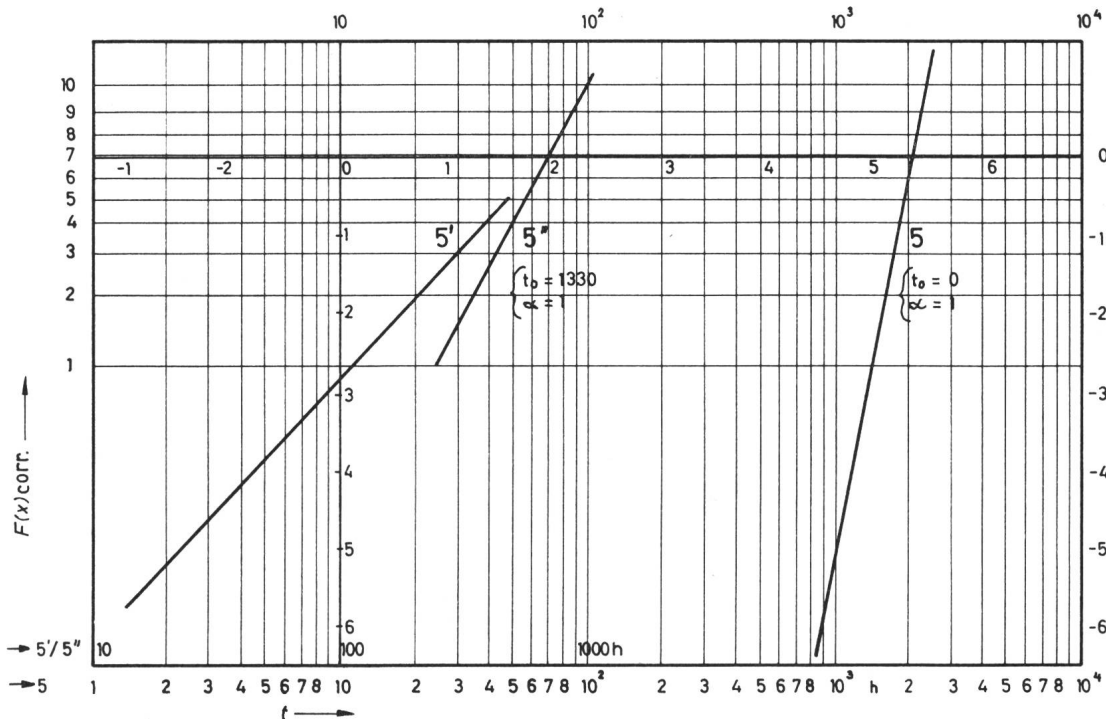


Fig. 7

Graphische Darstellung des Verhaltens der Prüfgruppe 5 aus den Fig. 5 und 6 mit dem abgeänderten Weibullischen Nomogramm

Einfluss der Änderung eines Prüfungsparameters

t_0 Skalenparameter der Weibullischen Verteilungsfunktion; α Lageparameter der Weibullischen Verteilungsfunktion

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

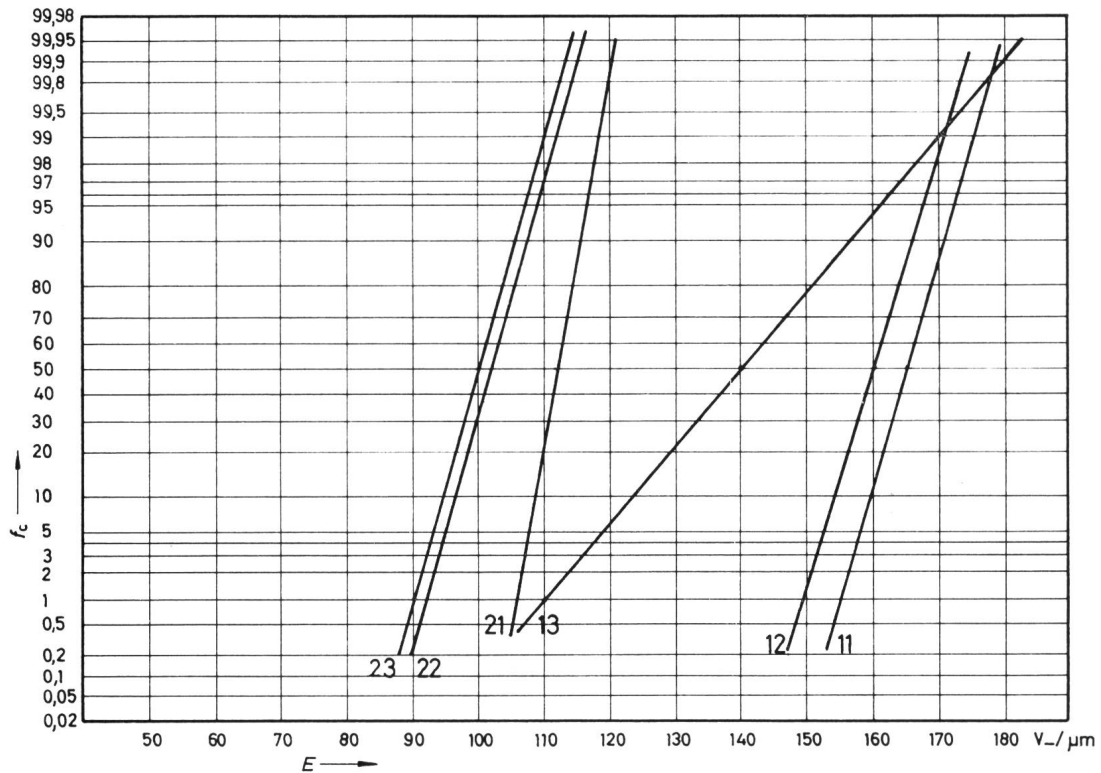


Fig. 8

Änderung der dielektrischen Festigkeit von Papierkondensatoren (2 Lagen) bei 20 °C von mit Pyralen 1499 (Trichlordiphenyl) imprägnierten, zweilagigen Papierkondensatoren nach einer 2000stündigen Alterung unter Wechselspannung bei 115 °C

Prüflinge 11 dielektrische Festigkeit der Kondensatoren vor der Alterung mit 20 V~/μm (Rohdichte des Papiers «air dry» = 1,20); *Prüflinge 12* dielektrische Festigkeit nach der Alterung der Prüflinge 11 (mit Epoxyharzzusatz im Imprägniermittel); *Prüflinge 13* dielektrische Festigkeit nach der Alterung der Prüflinge 11 (kein Epoxyharzzusatz im Imprägniermittel); *Prüflinge 21* dielektrische Festigkeit der mit 12...14 V~/μm beanspruchten Prüflinge (Rohdichte des Papiers «air dry» = 0,8); *Prüflinge 22* dielektrische Festigkeit nach Alterung der Prüflinge 21 (mit Epoxyharzzusatz im Imprägniermittel); *Prüflinge 23* dielektrische Festigkeit nach Alterung der Prüflinge 21 (kein Epoxyharzzusatz im Imprägniermittel)

f_c Summenhäufigkeit der Durchschläge bei der Spannungsprüfung; E Durchschlagsfeldstärke

Kondensatoren allmählich verbesserten (Herabsetzung der dielektrischen Verluste und Verstärkung des Isolationswiderstandes), selbst wenn diese ursprünglich ungünstiger waren als jene der nicht mit Epoxyharzen behandelten Kondensatoren. Überdies stellte man fest, dass die dielektrische Festigkeit der Kondensatoren selbst nach sehr langen Dauer- versuchen bei extremen thermischen und elektrischen Belastungen praktisch unverändert blieb (Fig. 8). Eine Prüfserie mit 3 Gruppen von Kondensatoren (11, 12, 13) deren Dielektrikum aus 2 Papierlagen, mit Pyralen 1499 (Trichlordiphenyl) imprägniert war, und die während mehr als 2000 h einer höheren Belastung als 20 V~/μm unter einer Raumtemperatur von 115 °C widerstanden, wiesen eine praktisch unveränderte dielektrische Festigkeit auf (11), wenn sie eine gewisse Menge von Epoxyharzen enthielten (12). Die dritte Gruppe, deren Imprägnierungsmittel keine Zusätze beigegeben wurden (13), zeigte ausser den Versagern während des Versuches eine bedeutende und bleibende Abnahme der dielektrischen Festigkeit der scheinbar noch einwandfreien Einheiten. Eine weitere Serie von 3 Gruppen von Prüflingen (21, 22, 23) deren Dielektrikum aus 2 Papierschichten von schwacher Dichte bestand, verhielt sich unter einer verhältnismässig niedrigeren Belastung (12...14 V~/μm) und bei sonst gleichbleibenden Bedingungen wie in den Prüflingsgruppen 11, 12, 13 merklich verschieden. Änderung in der dielektrischen Festigkeit wurde sowohl bei der Gruppe mit

(22), als auch bei jener ohne Zusatz (23) beobachtet. Die Abnahme der dielektrischen Festigkeit war indessen weniger schwerwiegend, was als Beweis dafür gelten darf, dass Teilentladungen im Verlaufe dieses Dauerversuches nur noch spärlich auftraten, und dass die Abnahme der dielektrischen Festigkeit der mehr oder weniger totalen Zerstörung des Dielektrikums der Kondensatoren vor allem durch die thermische Beanspruchung zuzuschreiben ist.

Darauf wurde eine Serie von 6 Gruppen (A, A', B, B', C, C'), deren wichtigsten Daten in der Tabelle IV zusammengestellt sind, einem Dauerversuch mit konstanter thermischer und elektrischer Belastung unterzogen. Die Unterschiede des Prüfungsmaterials beruhten vor allem auf der hohen Zahl von Homogenitätsfehlern, welche dank dem Quecksilbertest mittels dem Paper Flaw Tester Type 277 der F.C. Robinson Gesellschaft nachgewiesen wurden. Die Kondensatoren der 6 Prüfgruppen wurden bis zur totalen Zerstörung einem Spannungsgradienten von 25 V~/μm bei einer Raumtemperatur von 115 °C ausgesetzt. Nach jeder Periode von 500 h wurden die gebräuchlichsten elektrischen Eigenschaften wie Kapazität, dielektrischer Verlustfaktor, $\text{tg } \delta$, Isolationswiderstand, dielektrische Festigkeit der jeweils noch intakten Kondensatoren jeder Gruppe gemessen, und zwar in Abhängigkeit von der Temperatur- und, wenn nötig, von der Spannung, um die entsprechenden Alterungsparameter gemäss [8] zu bestimmen.

Die Weibullschen «Geraden», die die Verteilung der Ausfälle eines jeden Satzes darstellen, zeigt Fig. 9. Die Resultate sind sehr aufschlussreich. In allen Fällen war die Zugabe von gleichen Mengen von Epoxyharzen für das zu vergleichende Prüfungsmaterial nur von Vorteil. Diese Wirkung war um so bedeutender, je besser die Qualität des Dielektrikums war (Fall A). Die Gruppen mittlerer Qualität können zu Fehlschlüssen führen, wenn die Analyse nur oberflächlich durchgeführt wird. So enthält z. B. der Fall C keine Zusätze und ist dennoch dem Fall B überlegen (dessen Prüflinge Zusätze enthalten), obwohl sie eine gleiche dielektrische Festigkeit und einen ähnlichen Verlauf des Verlustwinkels in Abhängigkeit von der Temperatur aufweisen. Sie unterscheiden sich nur im Homogenitätsgrad ihrer Papierstruktur (Quecksilbertest). Folglich können die Zusatzmittel ihre Wirkung nur entfalten, wenn die Leistungen der Bestandteile des Isolationssystems ausreichend sind. Die absichtliche und bedeutende Erhöhung der elektrischen Beanspruchung solcher Kondensatoren, wie es im Betrieb und Versuch geschieht, ist nur möglich, wenn man allen diesen Bedingungen Rechnung trägt.

Die Tatsache, Chlorwasserstoffbildung in den Mikrozonen dank den Epoxyharzen, die den Askarels beigemischt sind, rasch und gründlich unterbinden zu können, erlaubte es, das Imprägnierungsproblem bei Kondensatoren mit metallisiertem Papier für diese Klasse von Imprägnierungsmittel neu zu überdenken. Trotz besonderen Vorkehrungen in der Konstruktion wurde diese Hoffnung praktisch immer zerstört [5]. Zahlreiche Forschungsergebnisse der letzten Jahre bewiesen jedoch, dass die Imprägnierung von Metallpapierkondensatoren erreichbar ist, wenn gewisse Voraussetzungen eingehalten werden können. Es sind dies in erster Linie:

- a) Zweckdienliche Wahl der festen Isolationsmittel (mit Zwischenlagen aus Papier oder Kunststoffolie), deren Strukturhomogenität und Sicherheit der dielektrischen Festigkeit, eventuell deren physiko-chemischen Verträglichkeit mit den Imprägnierungsmitteln besonderen Spezifikationen entsprechen müssen;
- b) Einfluss des unter Vakuum aufgedampften Oberflächenbelages (Zink, Aluminium);
- c) Wahl des geeigneten Zusatzes im Imprägnierungsmittel und die Bestimmung seiner optimalen Konzentration, die sich von einem Kondensatormodell zu ändern, von einer Anwendung zur andern ändern kann.
- d) Zweckmässigkeit der Beigabe eines physikalischen Absorbierungsmittels zum aktiven Teil der Kondensatoren oder in seine nächste Umgebung;
- e) Ausarbeitung einer zweckmässigen Behandlungsmethode der Kondensatoren, entweder im Verlaufe des Trocknungsverfahrens oder während der Imprägnierungsphase bzw. anschliessend an diese Hauptarbeitsgänge.

Die Verwirklichung von Kondensatoren mit metallisiertem Papier und einer Zwischenlage aus Papier oder Kunststoffolie gestattet es, dank einer ausgeglichenen Verteilung der Belastungen auf die verschiedenen Elemente der aktiven Oberfläche, die Spannungsgradienten, wie sie bis heute bei den in nicht chlorhaltigen Flüssigkeiten imprägnierten Kondensatoren geläufig angewendet wurden, praktisch zu verdoppeln. Gleichzeitig stieg die Volumenkapazität der Kondensatoren um mehr als 20 % an, da die Dielektrizitätskonstante der Askarels grösser ist als die der nichtchlorhaltigen Flüssigkeiten. Auch die erstaunliche Widerstandskraft und die überraschende Zuverlässigkeit dieser neuen Kondensatorarten bilden schliesslich gern gesehene Vorteile.

6. Schlussfolgerungen

Die beachtlichen Fortschritte der letzten Jahre auf dem Gebiet der Kondensatorimprägnierung mit Askarels wurden durch eine bessere Einsicht in die Zerfallsvorgänge ermög-

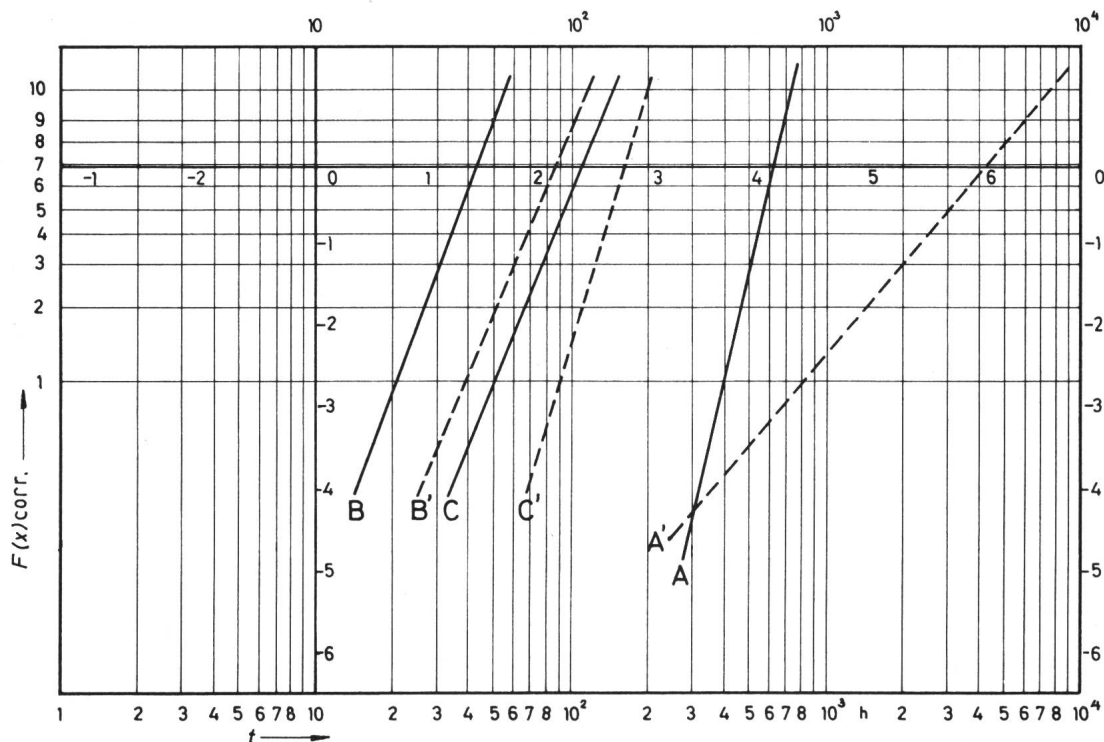


Fig. 9
Lebensdauerprüfung bei 25 V~/ μm , 50 Hz, und 115 °C von 6 Gruppen A, A', B, B', C, C'
(siehe auch Tabelle IV)

Verteilung der Ausfälle in Abhängigkeit von der Prüfdauer im abgeänderten Weibullschen Nomogramm $F(x)_{\text{corr}}$ angepasste Summenhäufigkeit der Weibullschen Funktion für kleine Stichproben; t Prüfdauer

licht, die bei verschiedenen Beanspruchungen, entweder mit Gleich- oder mit Wechselspannungen bei Netzfrequenz, auftreten.

Im Falle der Gleichspannung führten das erweiterte und vertiefte Verstehen der elektrochemischen Zerfallserscheinungen und ihre nuancierte Auslegung zu einer Verbesserung der Kondensatorleistungen, nicht zuletzt auch dank den hohen Anforderungen der Verbraucher.

Im Falle von Wechselspannung sind die erreichten Ziele noch viel verblüffender; denn die Beimischung von Epoxyharzen zu den Askarelen und die Interpretierung der Eigenschaften der übrigen Bestandteile dieser Isolierungssysteme übertrafen alle Erwartungen.

Die Lösung so verzwickter Probleme wie die Askarelimprägnierung von Metallpapierkondensatoren, wo dank der Verwendung aller brauchbaren Mittel und dem Wettbewerb der Produzenten sehr gute Resultate erzielt wurden, erlaubt, über die Zukunft der Kondensatoren optimistisch zu sein.

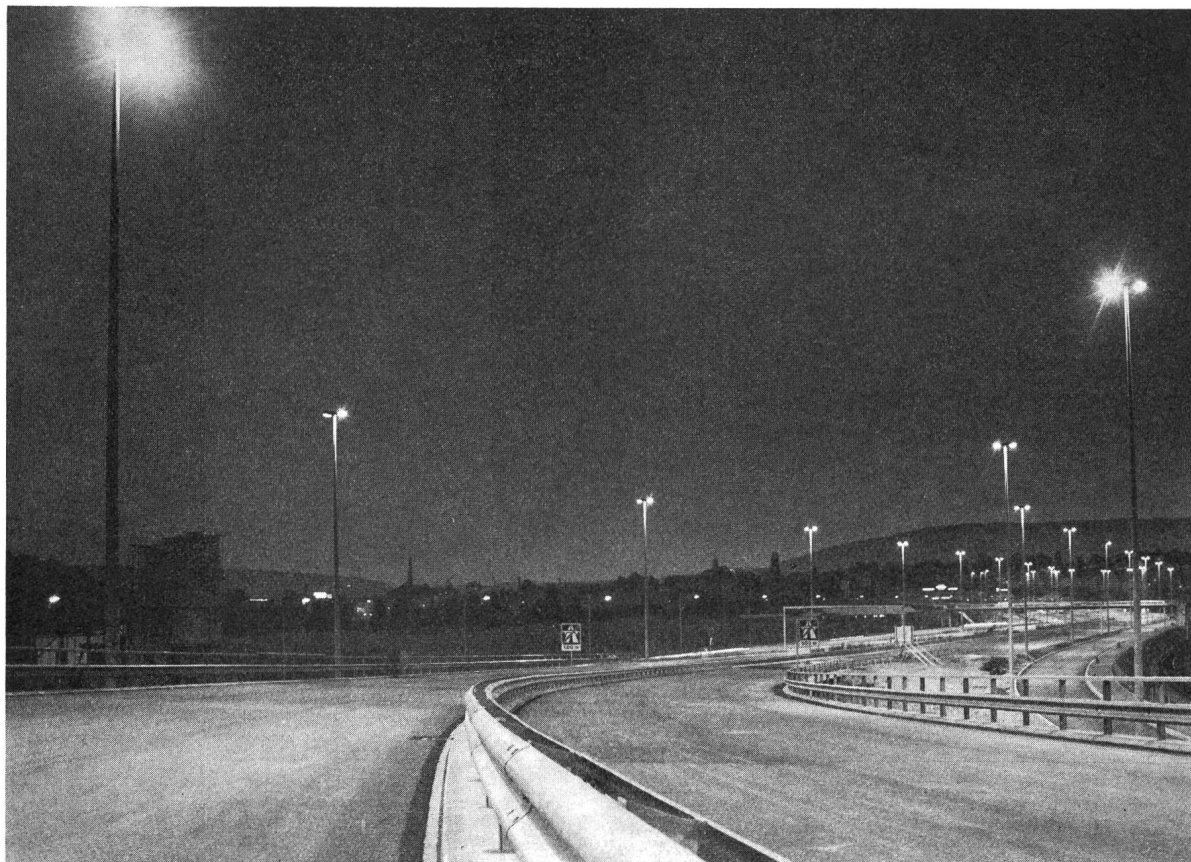
Literatur

- [1] *L. J. Berberich and R. Friedmann*: Stabilization of chlorinated diphenyl in paper capacitors. *Industrial and Engineering Chemistry* 40(1948)1, p. 117...123.
- [2] *H. A. Sauer, D. A. McLean and L. Egerton*: Stabilization of dielectrics operating under direct current potential. *Industrial and Engineering Chemistry* 44(1952)1, p. 135...140.
- [3] *H. F. Church and C. G. Garton*: Electrochemical deterioration of dielectrics and the action of stabilizing substances. ERA technical report L/T196. London, The british electrical and allied industries research association, 1948.
- [4] *P. Boyer*: Papierkondensatoren, imprägniert mit stabilisierten, chlorierten Dielektrika. *Bull. SEV* 52(1961)20, S. 801...804.
- [5] *P. Boyer*: Die Bedeutung der Wahl des Imprägniermittels für die Konstruktion und die Anwendung von Kondensatoren. *Bull. SEV* 55(1964)3, S. 100...112.
- [6] *M. Fox, K. W. Plessner and M. M. J. Hall*: Theory of discharges at the foil edge in capacitors. *Proc. IEE* 115(1968)7, p. 1027...1033.
- [7] *W. T. Starr and H. S. Endicott*: Progressive stress — a new accelerated approach to voltage endurance. *Trans. AIEE Power Apparatus and Systems* 80(1961)55, p. 515...523.
- [8] *P. Boyer et T. Praehauser*: Vieillessement de condensateurs industriels. *Rapport CIGRE* No. 120, 1966.
- [9] *H. F. Church et Z. Krasucki*: Vieillessement des condensateurs de puissance. Influence des ions et de la structure du papier. *Rapport CIGRE* No. 112, 1966.

Adresse des Autors:

P. Boyer, dipl. Phys., Condensateurs Fribourg S. A., 1700 Fribourg.

287



Beleuchtung des N3-Anschlusses in der Brunau, kurz vor der Eröffnung der Autobahn

So zeigt sich dem Benutzer der N3 in den Abendstunden die Einfahrt nach Zürich in der Brunau. Auffallend ist die gleichmässige, taghelle Ausleuchtung der unterschiedlich breiten Strassenstücke zwischen Brunau und Entlisberg