Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 46 (1955)
Heft: 22

Artikel: Acetyliertes Papier als Isoliermaterial für die Elektrotechnik
Autor: Dieterle, W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058175

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 16.05.2025

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

46e année N° 22 Samedi, le 29 octobre 1955

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

ORGANE COMMUN
DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS (ASE) ET
DE L'UNION DES CENTRALES SUISSES D'ELECTRICITE (UCS)

Acetyliertes Papier als Isoliermaterial für die Elektrotechnik [1])

Von *W. Dieterle*, Basel

621.315.614.6

Ausgehend von der Tatsache, dass die vorzüglichen dielektrischen Eigenschaften von trockenem Papier durch die spezifische Hygroskopizität dieses Materials stark beeinträchtigt werden, wird die weitgehende Herabsetzung der Wasser-Adsorption durch Blockierung der OH-Gruppen im Cellulose-Molekül als Folge der Acetylierung beschrieben. Die elektrischen Daten acetylierter Papiere werden erklärt. Als besonders wichtiges Kriterium wird der Verlauf der Verlustfaktor-Temperatur-Kurve erwähnt. Die Wichtigkeit der Forderung nach einem Trägermaterial mit möglichst niederen dielektrischen Verlusten wird dargelegt und gezeigt, dass acetyliertes Papier diese Bedingungen ideal erfüllt. In Kombination mit chlorierten Ölen höherer Dielektrizitätskonstante kann mit dem leicht imprägnierbaren acetylierten Papier eine optimale Feldverteilung erreicht werden. Die Abhängigkeit der Durchschlagfestigkeit von der Dichte und das elektrische Verhalten acetylierter Papiere bei thermischer und elektrischer Beanspruchung werden eingehend untersucht, und auf die erhöhte Wärmebeständigkeit wird hingewiesen. In einem letzten Abschnitt werden Beispiele für eine vorteilhafte Verwendung acetylierter Papiere angeführt.

Après une brève récapitulation des caractéristiques du papier dont les excellentes propriétés diélectriques à l'état sec sont rapidement annihilées par son hygroscopicité spécifique, l'auteur décrit les phénomènes d'adsorption de l'eau par la fibre cellulosique et l'inhibition de cette adsorption par la modification chimique de la cellulose, expliquant ainsi les bonnes propriétés électriques des papiers acétylés. La courbe du coefficient des pertes électriques en fonction de la température est particulièrement explicite. L'auteur fait ressortir l'importance d'un porteur à faibles pertes diélectriques comme il se trouve réalisé dans le papier acétylé et démontre qu'en combinaison avec les huiles chlorées à constant diélectrique relativement élevée, les papiers acétylés très facilement imprégnables permettent d'arriver à un optimum de la répartition du champ. L'article traite également de la rigidité diélectrique par rapport à la densité, et la constance des propriétés électriques sous l'influence de la température et de la tension est étudiée très soigneusement. La stabilité des propriétés mécaniques aux traitements thermiques est supérieure à celle du papier ordinaire. Dans un dernier chapitre l'auteur expose les prémisses pour une application avantageuse du papier acétylé en citant quelques exemples.

I. Einleitung

Papier wird in der Elektroindustrie vielseitig und in sehr grossen Mengen verwendet. Obwohl eines der ältesten, ist es eines der wichtigsten elektrotechnischen Isoliermaterialien. Es hat seine Bedeutung trotz der grossen Entwicklung der Kunststoffe, welche auch in der Elektroindustrie starken Eingang gefunden haben, behalten. Dies ist vor allem seinen guten elektrischen und technologischen Eigenschaften zuzuschreiben sowie dem Umstand, dass seine physikalischen Daten in weiten Grenzen variiert werden können. Papier zeigt auch gute chemische Stabilität und Reissfestigkeit sowie ausserordentliche Flexibilität, besonders wenn es in sehr dünnen Schichten vorliegt. Ausserdem besitzt es nicht die nachteilige Eigenschaft des Kaltfliessens.

Wohl gibt es Anwendungsgebiete, bei denen Papier vorteilhaft durch Kunststoffe ersetzt werden kann, doch hat sich die Entwicklung in der Richtung vollzogen, dass jede der verschiedenen Klassen von Isoliermaterialien bestimmte Anwendungsgebiete behalten, bzw. neue gefunden hat oder dass durch geeignete Kombination von Papier mit Kunststoffen besonders wertvolle Eigenschaften resultieren. Vor allem im Gebiet hoher und höchster Spannungen ist imprägniertes Papier das unentbehrliche Dielektrikum.

Nun sind aber alle Papiere stark hygroskopisch, d. h. sie nehmen aus ihrer Umgebung, meist also aus der sie umgebenden Luft, grosse Mengen Feuchtigkeit auf. Dabei entspricht diese Feuchtigkeitsaufnahme nicht der Feuchtigkeit der Umgebung, sondern ist je nach Hygroskopizität grösser als die Feuchtigkeit der Luft. Die Hygroskopizität — d. h. also das Mass der Konzentration von Feuchtigkeit im betreffenden Material — ist stark von der Umgebungstemperatur abhängig. Ausserdem variiert die Wasseraufnahme mit dem Wasserdampfdruck (Fig. 1). Dieser Zusammenhang kann aber vereinfacht werden, wenn man die Feuchtigkeitsaufnahme in Funktion des relativen Wasserdampfdruckes darstellt. Dann fällt der Temperatureinfluss praktisch dahin, und man erhält die bekannten Kurven der Feuchtigkeitsaufnahme in Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit (Fig. 2).

Feuchtigkeit ist der grösste Feind jeder elektrischen Isolation. Sie beeinflusst die dielektrischen Eigenschaften der Isolation ausserordentlich nachteilig und fördert die chemische Zerstörung der Cellulose und des zur Imprägnierung verwendeten Isolieröles. Das Problem des Einflusses von Feuchtigkeit auf Papierisolationen oder ganz allgemein auf Dielektrika, welche Cellulose in irgendeiner Form

[1]) Unter Strukturerhaltung acetylierte Papiere werden unter den Namen Isocel für elektrotechnische Zwecke, Fibrax und Cartax für nicht elektrische Verwendung von der Sandoz A.-G., Basel, hergestellt. Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird im folgenden der Hinweis auf die Strukturerhaltung weggelassen.

enthalten, ist Gegenstand verschiedener Untersuchungen [1; 2; 3; 4; 5; 40] [2]). Während die Abhängigkeit der dielektrischen Daten von der Feuchtigkeit messtechnisch bestimmt werden kann, ist die Frage der Alterung und Zerstörung der Isolation von reichlich komplexer Natur. In jedem Fall aber ist der schädliche Einfluss der Feuchtigkeit vorhanden und klar festzustellen.

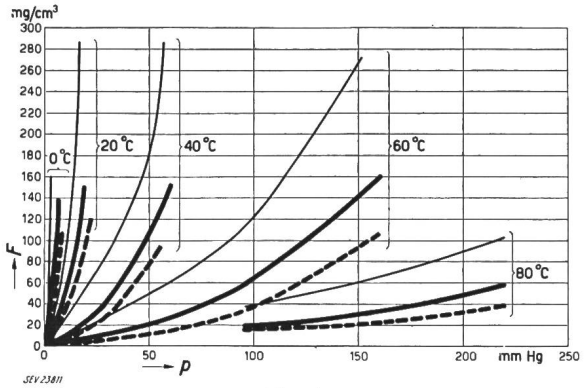


Fig. 1

Feuchtigkeitsaufnahme F in Funktion des Wasserdampfdruckes p (Quellungsisotherme) von acetyliertem Papier, acetylierter Baumwolle und Kabelpapier

—— AP-35 acetyliertes Papier (35 % AcOH)
– – AB-60 acetylierte Baumwolle (60 % AcOH)
—— P Kabelpapier

(Der Acetylierungsgrad, d. h. der Gehalt an chemisch gebundener Essigsäure, wird durch die Abkürzung AcOH angegeben)

Die Bemühungen zur Erreichung und Erhaltung eines einwandfreien Papier-Dielektrikums gingen und gehen denn auch immer dahin, das Papier gut zu trocknen und durch Imprägnierung, Lackierung oder gar luftdichten Abschluss der Isolation die Feuchtigkeitsaufnahme zu verhindern. Hiezu ist festzustellen, dass allein der luftdichte Abschluss durch dicht verschlossene metallische Schutzüberzüge (metallischer Kabelmantel, Apparategehäuse

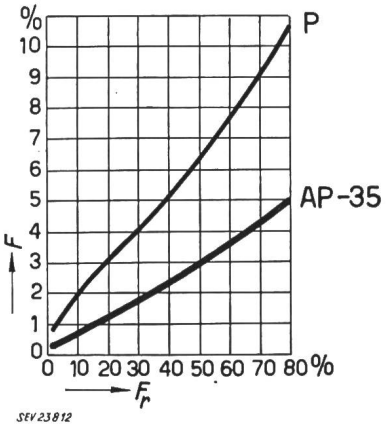


Fig. 2

Feuchtigkeitsaufnahme F (in Prozenten des Trockengewichtes) von acetyliertem Papier und Kabelpapier in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit F_r (Absorptionskurven)

Bezeichnungen siehe Fig. 1

usw.) einen wirksamen Feuchtigkeitsschutz gewährleistet. Das Imprägnieren, Lackieren oder Überziehen einer Isolation vermag hingegen deren Feuchtigkeitsaufnahme nur zu verzögern, indem durch eine solche Imprägnierung oder Lackierung die Poren oder Kapillaren der Papierbahn verstopft werden. Trotzdem gelangt Feuchtigkeit entweder infolge Diffusion von Wasser (als Wasserdampf) durch die Imprägnierschicht oder durch Absorption

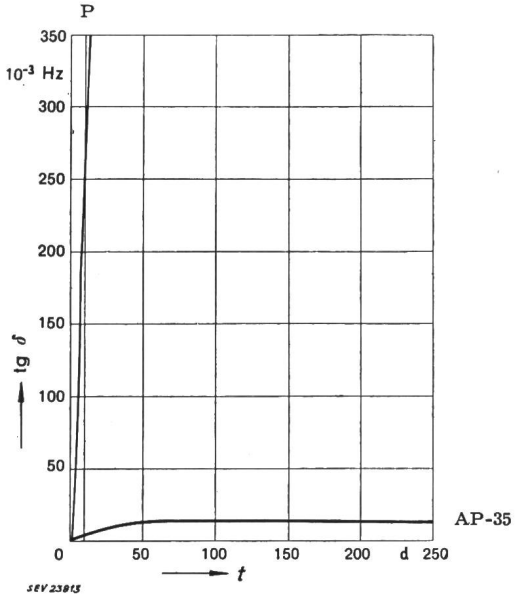


Fig. 3

Verlauf des dielektrischen Verlustfaktors tg δ von acetyliertem Papier und Kabelpapier unter dem Einfluss (Zeit t der Lagerung bei 80 % F_r) diffundierter Feuchtigkeit

Trockenes acetyliertes Papier AP-35 und Kabelpapier P — jedes als Dielektrikum zwischen gelochten plattenförmigen Elektroden — wurden gemeinsam zwischen 0,02 mm dicken Polyäthylenfolien verpackt und in einem Gefäss von 80 % F_r aufgehängt

d Tage

aus der umgebenden Imprägnierflüssigkeit zu der Papierfaser. Im allgemeinen überlagern sich diese beiden Vorgänge zeitlich, wobei unter Umständen noch der Vorgang der Feuchtigkeitsaufnahme durch das Imprägniermittel oder durch den Schutzüberzug zu berücksichtigen ist. Diese verzögernde Wir-

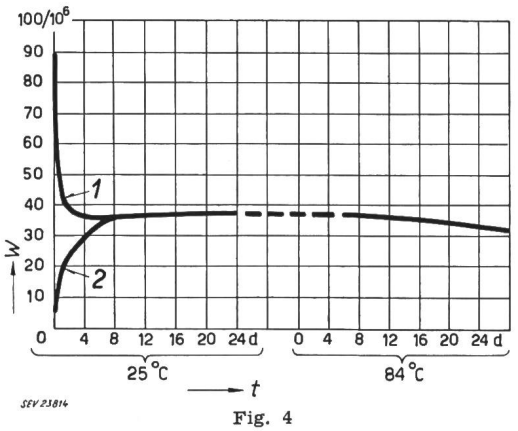


Fig. 4

Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen Isolieröl (mineralischer Herkunft) und imprägnierter Kraftpapier-Isolation

Wassergehalt W des Isolieröles (in Teilen pro 10^6) in Funktion der Zeit t der Lagerung von Papier in Öl [3]

1 feuchtes Öl, trockenes Papier
2 trockenes Öl, feuchtes Papier

kung kann je nach Material, Anordnung, Zustand der Isolation und Feuchtigkeitszustand der Umgebung zwischen Stunden, Tagen und Monaten variieren. Resultate vergleichender Messungen über den Einfluss diffundierter Feuchtigkeit auf acetyliertes

[2]) siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

bzw. nicht acetyliertes Papier sind in Fig. 3 wiedergegeben. Papier absorbiert Feuchtigkeit ausserordentlich intensiv aus mineralischem Isolieröl (Fig. 4). Man ist der Auffassung, dass durch das Öl als Imprägniermittel das Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen Cellulose und Luftfeuchtigkeit kaum verändert, sondern lediglich sein Aufbau durch das Öl verzögert wird [6]. Hier hat denn auch die Entwicklung von acetyliertem Papier eingegriffen.

II. Struktur und chemische Umwandlung der Cellulose

Die Sandoz A.-G. entwickelte u. a. ein Verfahren, das erstmals die industrielle Herstellung von niedrig acetylierten Fasercellulosen ermöglichte [7; 8]. Sie erkannte die vorzügliche Eignung dieser Materalien als elektrische Isolierstoffe [9]. Seit kurzem bringt diese Firma nun auch acetylierte Papiere auf den Markt. Dank der chemischen Umwandlung weisen diese Papiere eine wesentlich verminderte Tendenz zur Feuchtigkeitsaufnahme auf. Neben der dadurch gewonnenen Verbesserung der dielektrischen Daten konnten weitere Vorteile erreicht werden. Die besonderen Eigenschaften acetylierter Papiere werden anschliessend besprochen[3]).

Für das weitere Verständnis scheint es jedoch nützlich, die Struktur der Cellulose und den «Mechanismus» der Wasseranlagerung kurz zu besprechen.

Papier stellt einen mehr oder weniger willkürlichen Verband, d. h. ein Gewirr von Fasern dar. Dieser Faserverband hat eine ausserordentlich grosse Oberfläche. Je nach Art, bzw. Reinheitsgrad des Papieres bestehen diese Papierfasern aus einem mehr oder weniger grossen Anteil reiner Cellulose. Über den Aufbau der Cellulose und deren Molekülstruktur kann hier kurz folgendes gesagt werden:

Cellulose ist in der Weise aus Glukosemolekülen aufgebaut, dass eine grosse Zahl von Glukoseresten miteinander durch sogenannte glukosidische Bindung kettenförmig verbunden sind («Fadenmoleküle» mit einem Molekulargewicht von einigen 10000). Durch Gruppierung (wahrscheinlich in der

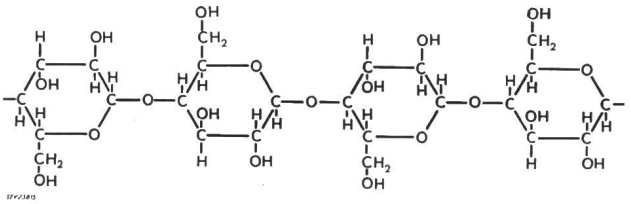


Fig. 5
Strukturformel der Cellulose als «Fadenmolekül» [7]

Hauptsache eine Nebeneinanderlagerung oder Bündelung mehrerer solcher Fadenmoleküle) wird eine Micelle gebildet. Mehrere Micellen bilden die kleinsten Elementarfäserchen, welche unter dem Mikroskop dem Auge bereits sichtbar sind (Fig. 5).

Das Verhalten der Cellulose — besonders gegenüber Wasser — wird weitgehend von den zahlreichen Hydroxylgruppen (OH-Gruppen) bestimmt. Wie noch gezeigt wird, sind diese für viele nachteilige Eigenschaften der Cellulose verantwortlich.

Die chemische Umwandlung (Acetylierung) resultiert denn auch in einer vollständigen oder teilweisen Blockierung der OH-Gruppen.

III. Feuchtigkeitsaufnahme von Cellulose

Bei der Aufnahme von Feuchtigkeit durch die Cellulose kann einerseits eine chemische Anlagerung, andererseits eine physikalische Einlagerung festgestellt werden. Die vom Chemiker als «Hydratation» bezeichnete Anlagerung spielt sich im molekularen Bereich der Hydroxylgruppen ab, die befähigt sind, zusammen mit den Wassermolekülen sog. Wasserstoffbrücken zu bilden. (*P. Henninger* [10] vertritt die Meinung, dass von den OH-Gruppen mindestens 6% Wasser adsorbiert werden.) Die als physikalischer Vorgang charakterisierte Wasseraufnahme ist ein kapillares Geschehen. Durch Oberflächeneffekte (Kapillaraktivität) reduziert sich der Dampfdruck im Innern der Kapillarräume, wodurch das Wasser eingesogen wird (Quellung). Die Grösse dieses Effektes gestattet im übrigen, auf die Dimensionen der Kapillaren zu schliessen. Die Kurve der Wasseraufnahme in Funktion der Feuchtigkeit der Umgebung (Fig. 2) ist als eine Überlagerung beider Erscheinungen zu betrachten.

Wie mittels röntgenographischer Untersuchungen gezeigt werden konnte, ist im kristallinen Bereich im Innern der Micellen kein Wasser vorhanden [11; 12].

Wenn man sich die ausserordentlich grosse Oberfläche des Faserverbandes z. B. eines Papierblattes vorstellt, dann ist ohne weiteres klar, welche Bedeutung die OH-Gruppen für die Wasseranlagerung im Papier haben. Während man nämlich das kapillar eingelagerte Wasser durch Auffüllen der Kapillaren, d. h. durch Imprägnieren mit geeigneten Mitteln, weitgehend eliminieren kann, ist es äusserst schwierig, das durch Hydratation adsorbierte Wasser zu entfernen. Das erklärt die ausserordentlich grosse Hygroskopizität von Papier, welche, wie wir gesehen haben, selbst durch Imprägnieren und andere Füllungen nicht verhindert, sondern bestenfalls verzögert werden kann [5; 13; 15; 44].

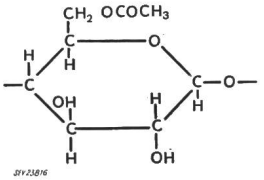


Fig. 6
Strukturbild acetylierter Cellulose, Stufe Monoacetat

Durch den chemischen Vorgang der Acetylierung werden entsprechend dem Acetylierungsgrad[4]) mehr oder weniger OH-Gruppen der Hydratation verschlossen, indem anstelle der beweglichen Wasserstoffatome die grösseren und zur Bildung von Wasserstoffbrücken nicht befähigten Acetylgruppen treten. Dadurch wird die Adsorptionsfähigkeit der Cellulose herabgesetzt (Fig. 6).

[3]) Sämtliche Angaben und Daten in dieser Arbeit beziehen sich auf Messungen, durchgeführt an Isocel.

[4]) Der Acetylierungsgrad (Gehalt an gebundener Essigsäure in %) kann in weiten Grenzen variiert werden. Wo der Acetylierungsgrad nicht besonders erwähnt wird, beziehen sich die Angaben auf die Standardqualität Isocel-35.

IV. Elektrische Eigenschaften acetylierter Cellulose

Welchen Einfluss hat die Acetylierung auf die elektrischen Eigenschaften des Papiers? Um dies zu beurteilen, stellen wir am besten die Daten von acetyliertem Papier denen von gewöhnlichem Papier gegenüber. Bei beiden handelt es sich um heterogenes Material, das zum mindesten aus zwei Komponenten, nämlich aus der Faser und ihrer Umgebung (Luft, Feuchtigkeit, Imprägnierung), besteht, so dass man es mit einem komplizierten Gefüge zu tun hat. Es ist nicht möglich, aus einem faserigen Material ein homogenes Dielektrikum zu bilden. Bei Untersuchungen im Rahmen der Forschung von porösen faserigen Stoffen arbeitet man deshalb nach folgenden Verfahren:

a) die Faser wird in ein Material mit gleichen Eigenschaften eingebettet;

b) die Faser wird untersucht unter weitgehender Vernachlässigung ihrer Umgebung (der Luft);

c) die Faser wird in einen bekannten Stoff eingebettet, d. h. mit einem Stoff von bekannten Eigenschaften imprägniert.

Für die Untersuchungen im Rahmen der Forschung, Entwicklung und Applikation faserförmiger Dielektrika werden mehrheitlich die beiden Möglichkeiten b) und c) angewandt, da das Verfahren nach a) offensichtlich zu Komplikationen führt und zudem den praktischen Verhältnissen nicht entspricht. Das zweite Verfahren eignet sich für reine Materialuntersuchungen im Hinblick auf Anwendungen, bei denen die Faserbahn ohne Füllung oder Imprägnierung verwendet wird. Diese Methode eignet sich auch zur Bestimmung der Eigenschaften der Komponenten. Dabei ist es notwendig, die Eigenschaften jeweils auf ein bestimmtes Raumgewicht, bzw. auf einen bestimmten Faseranteil zu beziehen.

Bezüglich des Feuchtigkeitsverhaltens interessiert im allgemeinen nicht in erster Linie die unter verschiedenen Bedingungen aufgenommene Feuchtigkeit, sondern — entsprechend den verschiedenen elektrischen Anwendungsgebieten — die Abhängigkeit der elektrischen Grössen von der aufgenommenen Feuchtigkeitsmenge, bzw. von den äusseren Bedingungen, welche die Feuchtigkeitsaufnahme bewirken.

A. Gleichstromverhalten

Man nimmt an, dass die an den Micellen haftende Wasserhaut (adsorbiertes Wasser) zusammen mit Spuren von Elektrolyten die Leitfähigkeit verursacht. *Veith* [12] vertritt ausserdem die Ansicht, dass auch OH^- und H^+-Ionen als Dissoziationsbestandteile des gebundenen Wassers zur Stromleitung beitragen.

Es ist bekannt, dass z. B. Hadernpapiere — wofür Baumwolle als Ausgangsmaterial Verwendung findet, und die zudem eine sorgfältigere, schonendere Fabrikation erfahren — dank ihrer grösseren Reinheit (hohem Gehalt an reiner, sog. Alpha-Cellulose), bessere elektrische Daten aufweisen als z. B. die weniger reinen Sulfit- und Sulfatpapiere, bei denen zum Aufschluss der Cellulose Natronlauge, Natriumsulfat oder schweflige Säure verwendet werden. Diese hinterlassen gewisse elektrolytische Beimengungen, die kaum vollständig entfernt werden können.

Um die Vorteile von acetyliertem Papier, speziell bei Feuchtigkeitseinfluss, zu überblicken, ist es vorteilhaft, sich die Abhängigkeit des Isolationswiderstandes vom Feuchtigkeitsgehalt zu vergegenwärtigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmendem Acetylierungsgrad die Feuchtigkeitsaufnahme zurückgeht (Fig. 7).

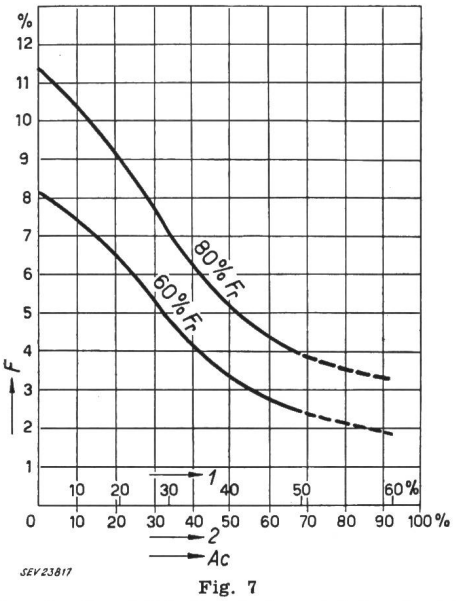


Fig. 7

Reduktion der Feuchtigkeitsaufnahme infolge Acetylierung

Feuchtigkeitsgehalt F (in Prozenten des Trockengewichtes) in Abhängigkeit vom Acetylierungsgrad Ac

1 Gehalt an chemisch gebundener Essigsäure (% AcOH)
2 Acetylierungsgrad in Prozenten der total möglichen Acetylierung

Für hygroskopische Faserprodukte besteht zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt und dem Isolationswiderstand (Widerstand im Innern, gemessen in Richtung der Faser) eine Relation folgender Form [17; 18; 19]:

$$\log R_i = -m \cdot \underset{0...3\%}{F} + A \qquad (1)$$

$$\log R_i = -n \cdot \log \underset{3...10\%}{F} + B \qquad (2)$$

worin

R_i Isolationswiderstand im Innern in Ωcm;
F Feuchtigkeitsgehalt in % des Trockengewichtes;
m, n, A, B Materialkonstanten.

Gl. (1) gilt für kleinen Feuchtigkeitsgehalt von 0...3 %, während Gl. (2) für einen mittleren Feuchtigkeitsgehalt von 3...10 % Gültigkeit hat. Die Konstanten nehmen je nach Material verschiedene Werte an. Diese wurden für die verschiedenen Faserprodukte von *Hearle* [17] bestimmt. Dabei lässt sich feststellen, dass für ganz verschiedene Fasermaterialien die Werte von n und B um einen mittleren Wert entsprechend der Geraden

$$n = 2/3 \cdot (B - 1) \qquad (3)$$

liegen. Nach Hearle gilt $8{,}4 < n < 28{,}2$ und $11{,}4 < B < 37{,}4$ für eine ganze Reihe von untersuchten Fasern. In Tabelle I sind diese Zahlen für einige Fasermaterialien wiedergegeben und durch entsprechende Werte an Kabelpapier und acetylierten Fa-

serprodukten, gemessen in den Laboratorien des Verfassers, ergänzt.

Materialkonstanten von Fasermaterialien

Tabelle I

Gültigkeit	$F = 0...3\%$		$F = 3...10\%$		Bemerkungen
Gleichung	$\log R_i = -mF + A$		$\log R_i = -n \log F + B$		
Konstanten	m	A	n	B	
Baumwolle	1,9	16	—	—	[17]
Baumwolle			9,3	9,1...14,4	[18]
Baumwolle gereinigt			10,7	16,7	[17]
Baumwolle, +10 % KCl			8,4	11,4	[17]
Wolle			15,8	26,2	[17]
Wolle			16,4	26	[18]
Wolle +10 % KCl			13,4	20	[17]
Seide	0,15	14	17,6	26,6	[17]
Seide, +12,7 %KCl			13,4	19,3	[17]
Baumwolle	2	16	9	15	[3])
Cotopa-30 [2])	1,2...1,6	17...18	6,5	16,5	[3])
Cotopa-60 [2])	0,8...1,0	17,5...18,5	6	18	[3])
Papier	0,6	17,5	—	—	[12][1])
Papier	0,5	17,5	—	—	[12][1])
Kabelpapier	0,8	16,5	4,5...7,5	16...17	[3])
Isocel-35	0,7	17,0...17,5	4	16,5...17	[3])

[1]) *Veith* [12] findet für einen Feuchtigkeitsgehalt von 0...12 % einen linearen Zusammenhang zwischen $\log R_i$ und F. Diese lineare Abhängigkeit konnte vom Verfasser nicht festgestellt werden

[2]) Cotopa ist unter Strukturerhaltung acetylierte Baumwolle.

[3]) Messungen des Verfassers.

Bisher sind für Papier keine entsprechenden Zahlen veröffentlicht worden. Dies mag daher rühren, dass Papier, entsprechend seinen technologischen Eigenschaften und der praktischen Verwendung, im allgemeinen nicht längs den Fasern, sondern transversal zur Blattbahn gemessen wird, so dass ein viel unregelmässigeres Gebilde zwischen den Messelektroden liegt. Ausserdem ist der Reinheitsgrad der Papiere so stark verschieden (Art der Papiere, Ursprung und Aufschluss der Cellulose, Verunreinigungen usw.), dass deswegen ziemlich schwankende Werte zu erwarten sind. Trotzdem konnten aus einer grossen Zahl von Messungen an ganz verschiedenen Papierqualitäten die Resultate im Hinblick auf die Erstellung einer empirischen Formel ausgewertet werden. Alle diese Messungen wurden transversal zum Blatt durchgeführt. Die Resultate sind in Tabelle I eingetragen, und es kann festgestellt werden, dass die Streuung in engen Grenzen liegt. Hingegen ergaben die Messungen im Gegensatz zu *Veith* [12] in der Darstellung $\log R$ als Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes nicht den linearen Zusammenhang, sondern — in Anlehnung an die Kurven von *Hearle* [17] und *Murphy* und *Walker* [18] — einen annähernd linearen Zusammenhang in beidseitig logarithmischer Darstellung.

Aus der Differentiation der Gl. (2)

$$\frac{d R_i}{R_i} = -n \frac{dF}{F} \tag{4}$$

ergibt sich die grosse Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von der Feuchtigkeit. So wirkt sich beispielsweise bei einem Wert $n = 10$ für Baumwolle eine Änderung von 2 % des Feuchtigkeitsgehaltes (5 % ± 0,1 %) in einer Abweichung von ± 20 % des Isolationswiderstandes aus. Auch mit Rücksicht auf die Hysterese ist es deshalb unumgänglich, bei vergleichenden Isolationsmessungen sämtliche Proben miteinander — d. h. gleichzeitig und im selben Raum bei guter Luftumwälzung — zu konditionieren.

Bei der Darstellung gemäss Gl. (2) sieht man, dass die Werte der Konstanten n und B für Papier wie auch für die acetylierten Produkte dem Zusammenhang gemäss Gl. (3) nicht mehr folgen. Bei diesen Fasermaterialien sind die Werte von n kleiner, d. h. die Feuchtigkeitsabhängigkeit des Isolationswiderstandes ist geringer, was bei den acetylierten Produkten wohl nur mit der eingangs geschilderten Wasseranlagerung (keine zusammenhängende Oberflächenhaut) erklärt werden kann.

Eine andere Darstellung des Isolationswiderstandes in Funktion der Feuchtigkeit gibt Veith [12]:

$$\left.\begin{aligned} &R_i\,(F, 20\,°C) = R_i\,(\text{trocken}, 20\,°C) \cdot e^{-\beta F} \\ &\text{oder} \\ &\log R_i\,(F, 20\,°C) = \log R_i\,(\text{trocken}, 20\,°C) - NF \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

worin:

R_i der Isolationswiderstand im Innern;
F der Feuchtigkeitsgehalt in % des Trockengewichtes;
β eine Materialkonstante, für die im allgemeinen[5]) gilt: $100 < \beta < 200$;
N eine Materialkonstante, für die im allgemeinen gilt: $45 < N < 85$.

Für die Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von der relativen Feuchtigkeit der Umgebung gilt folgende Näherungsformel [12], indem der der Quellungsisotherme entsprechende Zusammenhang (s. Fig. 1) zwischen relativer Feuchtigkeit (F_r) und Wasseraufnahme näherungsweise durch einen linearen: $F \approx h\,F_r$ ersetzt wird.
Dann erhält man

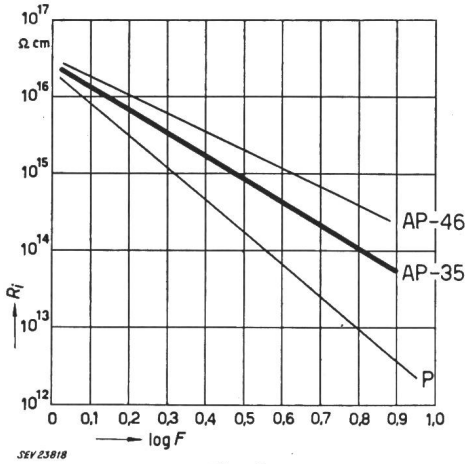


Fig. 8

Isolationswiderstand R_i (Widerstand im Innern, gemessen transversal zur Blattebene) von acetyliertem Papier und Kabelpapier in Funktion des absoluten Feuchtigkeitsgehaltes F (in Prozenten des Trockengewichtes)

AP-46 acetyliertes Papier, 46 % AcOH
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier

[5]) sofern keine starken Verunreinigungen elektrolytischer Natur vorhanden sind.

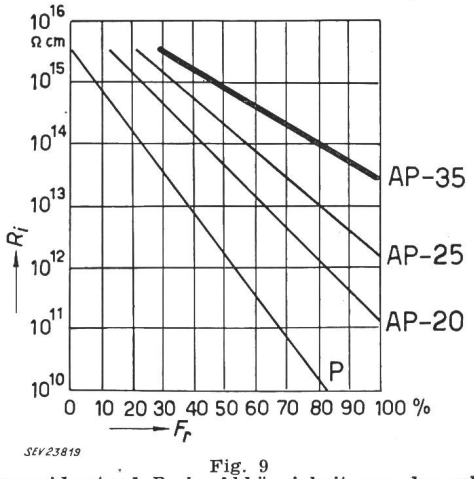


Fig. 9
Isolationswiderstand R_i in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit F_r für verschiedene Acetylierungsgrade von Kabelpapier

AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
AP-25 acetyliertes Papier, 25 % AcOH
AP-20 acetyliertes Papier, 20 % AcOH
P Kabelpapier

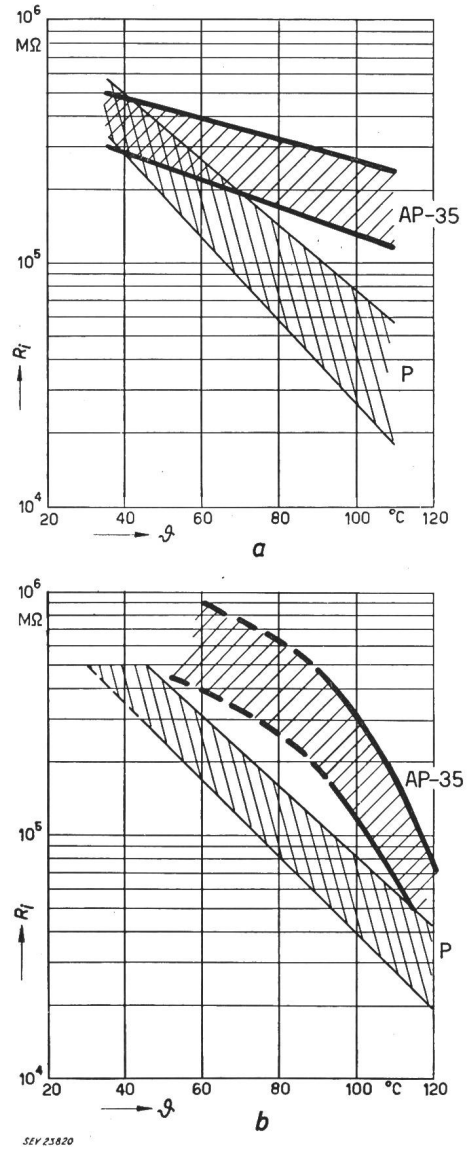


Fig. 10
Isolationswiderstand R_i in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ

a von getrocknetem, nicht imprägniertem acetyliertem Papier und Kabelpapier
b von ölimprägniertem acetyliertem Papier und Kabelpapier
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier

$$R_i\,(F, 20\,°C) = R_i\,(\text{trocken}, 20\,°C) \cdot e^{-\beta h F_r} \quad (6)$$

worin:

h ein Mass für die Hygroskopizität:
0,1...0,2 für Papier;
0,03/0,05...0,06/0,1 für acetylierte Produkte, je nach dem Acetylierungsgrad;

β wie bei (5) = 100...200, im allgemeinen 150.

Die Frage nach der durch die Acetylierung bedingten Verbesserung des Isolationswiderstandes, d. h. nach dem Verhalten und Verlauf des Isolationswiderstandes von acetyliertem Papier bei Feuchtigkeitseinfluss, wird durch Fig. 8 eindeutig beantwortet: bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt (bezogen auf das Trockengewicht) steigt der Isolationswiderstand mit zunehmendem Acetylierungsgrad.

Nun interessiert aber in den wenigsten Fällen diese Abhängigkeit, sondern wir fragen nach dem Isolationswiderstand in Abhängigkeit des äusseren, direkt wahrnehmbaren Feuchtigkeitseinflusses, d.h. zum Beispiel der relativen Luftfeuchtigkeit. Man erhält dann die Darstellung gemäss Fig. 9.

Die Temperatur-Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von acetyliertem und nicht acetyliertem Kabelpapier zeigt Fig. 10.

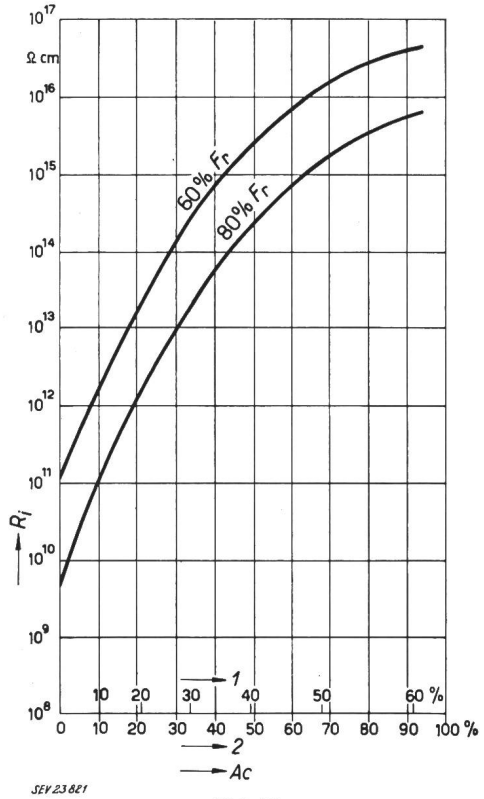


Fig. 11
Isolationswiderstand R_i in Funktion des Acetylierungsgrades Ac

1 Gehalt an chemisch gebundener Essigsäure (% AcOH)
2 Acetylierungsgrad in Prozenten der total möglichen Acetylierung

Ein hoher Isolationswiderstand ist bekanntlich für Betriebssicherheit und Stabilität imprägnierter Isolationen von Bedeutung. Es ist daher interessant, dass auch im imprägnierten Zustand der Isolationswiderstand von acetyliertem Papier höher liegt als der von Kabelpapier (Fig. 10b).

Diese Überlegenheit acetylierter Papiere kann z. B. auch bei Verwendung als Isolation in Gleichstrom-Höchstspannungskabeln von Interesse sein. Die Abhängigkeit des Isolationswiderstandes vom Acetylierungsgrad ist in Fig. 11 dargestellt.

B. Wechselstromeigenschaften

1. Allgemeines Verhalten

Zwischen dem Isolationswiderstand von trockenem Papier und dessen dielektrischen Verlusten besteht praktisch keine Beziehung. Errechnet man nämlich die dem Isolationswiderstand entsprechenden dielektrischen Verluste, dann sieht man, dass diese im allgemeinen um Grössenordnungen kleiner sind als die tatsächlich durch eine Wechselstrommessung ermittelten Werte. Ausserdem fällt in einem bestimmten Temperaturbereich der Verlustfaktor, während im gleichen Bereich der Isolationswiderstand ebenfalls mit der Temperatur abnimmt.

Die Ursache der dielektrischen Verluste von trokkenem Papier ist in der Struktur des Cellulosemoleküls begründet. Wohl ist bei Papier mit grossem Feuchtigkeitsgehalt und im Gebiet niederer Frequenzen eine gewisse Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Feuchtigkeit festzustellen, jedoch in viel geringerem Masse als beim Gleichstromverhalten. *Henninger* [10] vertritt die Ansicht, dass im Gebiet niederer Frequenzen neben dem Feuchtigkeitseinfluss auch die Leitfähigkeit der Fasern zur Erhöhung der dielektrischen Verluste beiträgt. Im Gebiet höherer Frequenzen, etwa ab $10^4 ... 10^5$ Hz, handelt es sich aber um rein dielektrische Verluste infolge dielektrischer Absorption. Dabei hat sich gezeigt [10], dass die für polare Flüssigkeiten geltenden Gesetze offenbar im wesentlichen auch auf die Papierfaser angewendet werden dürfen, indem hier die Verlustfaktor-Frequenz-Kurve mit ihrem typischen Charakter gemessen werden kann. Die Relaxationszeit (entsprechend der Phasenverschiebung zwischen Dipol und äusserem Wechselfeld) wird mit wachsender Temperatur kleiner, und damit verschiebt sich das Maximum der Verlustwinkelkurve mit steigender Temperatur nach höheren Frequenzen. Als Ursache der dielektrischen Absorption kommt die Beweglichkeit der polaren OH-Gruppen des Cellulosemoleküls und sehr wahrscheinlich auch diejenige der Bausteine der Cellulose-Kette in Frage [11]. Durch die Acetylierung (wie ganz allgemein durch die Veresterung oder Verätherung) werden diese Hydroxyl-Gruppen durch Ester oder Äther-Gruppen ersetzt (siehe z. B. Fig. 6). Diese Gruppen sind grösser und schwerer beweglich als die ursprünglichen OH-Gruppen, d. h. die Relaxationszeit ist grösser, und damit verschiebt sich das Verlustfaktor-Maximum nach tieferen Frequenzen. Ausserdem verflacht sich die Frequenzabhängigkeit, d. h. die dielektrischen Verluste werden kleiner. Bei hohem Acetylierungsgrad ist praktisch keine Frequenzabhängigkeit mehr festzustellen [11; 19].

Man kann folgende Ursachen für die Entstehung der dielektrischen Verluste von Papier unterscheiden:

a) Einfluss der Leitfähigkeit (Ionen-Wanderung), wobei die Ansicht besteht, dass hiefür vor allem das an den Micell-Grenzflächen adsorbierte Wasser die Ursache dieser Leitfähigkeit ist [11, 20]. Unter Umständen ist die Eigenleitfähigkeit der Faser zu berücksichtigen.

b) Einfluss der Dipol-Beweglichkeit, vor allem der OH-Dipole und der Kettenglieder. Diese Verluste sind allein durch die Natur des Cellulosemoleküls mit seinen 3 polaren Hydroxyl-Gruppen verursacht.

c) Atomresonanz.

d) Elektronenresonanz.

Die beiden Erscheinungen in c) und d) liegen oberhalb des uns hier interessierenden Frequenzgebietes und können im Rahmen dieser Arbeit ausser Betracht gelassen werden.

2. Die dielektrischen Verluste acetylierter Papiere

Bei der Beurteilung von Verlustfaktor und Dielektrizitätskonstante hat man die Einflüsse von Feuchtigkeit, Temperatur und Frequenz zu berücksichtigen. Dabei resultiert wegen des nicht ganz einfachen Aufbaues der Cellulose und der nicht homogenen Struktur des Papierblattes eine schwer zu übersehende Kurvenschar. Mit Rücksicht auf gewisse Anwendungen, wobei meist der Einfluss einer oder mehrerer der Variablen ausgeschaltet ist, können wir uns hier auf eine einfachere Darstellung der Zusammenhänge beschränken.

a) Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Verluste

In *trockenem* Zustand steigt der Verlustfaktor von Papier mit der Frequenz. Dasselbe gilt für acetyliertes Papier (Fig. 12), doch ist hier die Zunahme des Verlustfaktors wesentlich langsamer. So beträgt z. B. bei 10^6 Hz der Verlustfaktor von acetyliertem Papier im allgemeinen etwa die Hälfte desjenigen von unbehandeltem Papier. Unterhalb etwa 10^4 Hz ist jedoch keine bemerkenswerte Reduktion des Verlustfaktors infolge Acetylierung mehr festzustellen (Fig. 12a).

In *feuchtem* Zustand ist der Verlustfaktor von unbehandeltem Papier stark frequenzabhängig (Fig. 12b). Im Bereich niederer Frequenzen ist er ausserordentlich gross, fällt dann mit wachsender Frequenz, um bei etwa $10^5 ... 10^6$ Hz einen minimalen Wert zu durchlaufen und anschliessend wieder anzusteigen. Es ist anzunehmen, dass die Kurve einem maximalen Wert zustrebt, entsprechend der Relaxationszeit, welche der Phasenverschiebung zwischen Dipol und äusserem Feld entspricht. Mit der Änderung der Relaxationszeit verschiebt sich dieses Maximum mit der Temperatur, d. h. es fällt mit sinkender Temperatur ins Gebiet niederer Frequenzen oder steigt mit zunehmender Temperatur nach höheren Frequenzen. Demgegenüber ist der Verlustfaktor des acetylierten Papiers ausserordentlich stark reduziert und zeigt nur sehr geringe Frequenzabhängigkeit (Fig. 12b).

b) Feuchtigkeitsabhängigkeit des Verlustfaktors

Der Verlustfaktor steigt mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt. Dank der stark reduzierten Feuchtigkeitsaufnahme des acetylierten Papiers wird dessen Verlustfaktor durch die Feuchtigkeit der Umgebung nur wenig beeinflusst (Fig. 13). Bei 50 Hz kann hiefür etwa die folgende empirische Formel (gültig für Cellulose-Produkte) angewendet werden:

$$\operatorname{tg}\delta\Big]_{\substack{50\,\mathrm{Hz}\\20\,^\circ\mathrm{C}}} = \mathrm{Konst.}_0 + \mathrm{Konst.}_1 \cdot F + \mathrm{Konst.}_2 \cdot F^4; \qquad (7)$$

Darin sind:

F = Feuchtigkeitsgehalt in % des Trockengewichts

Konstante$_0$ = 2...3 · 10^{-3} [6])
Konstante$_1$ = 3 · 10^{-3} für Papier
Konstante$_2$ = 2,5 · 10^{-5}

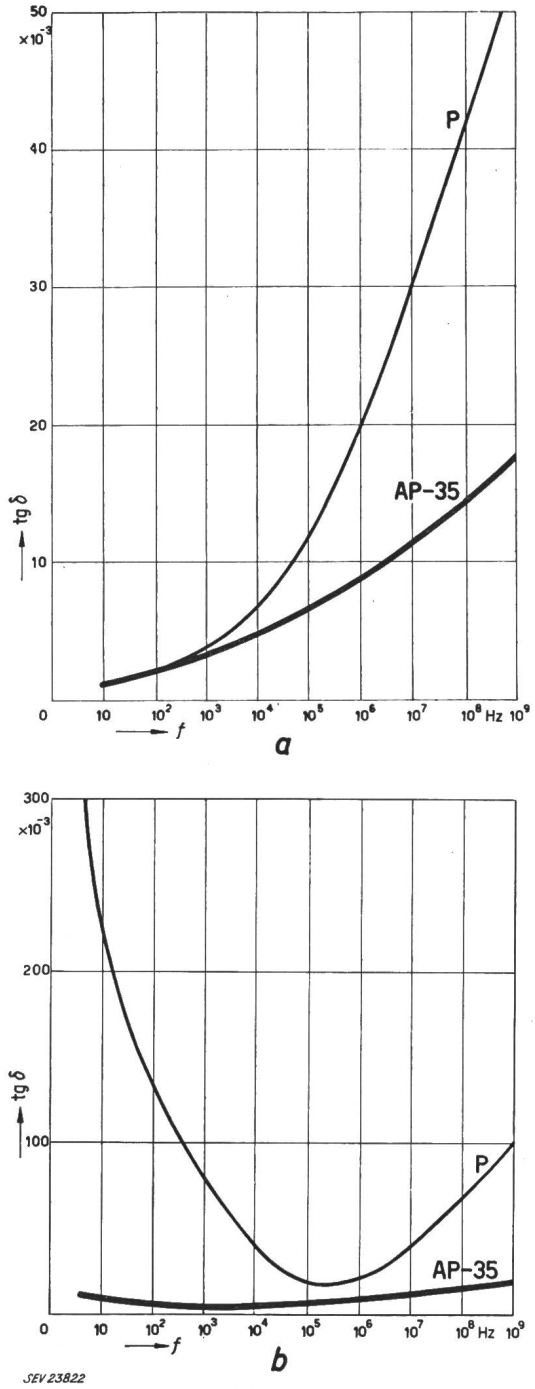


Fig. 12
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ von acetyliertem Papier und Kabelpapier in Abhängigkeit von der Frequenz f
a Papiere getrocknet; *b* Papiere gesättigt, F_r = 80 %
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier

Im allgemeinen kann die Feuchtigkeitsabhängigkeit des Verlustfaktors von acetyliertem Papier in der Darstellung entsprechend Gl. (7) beschrieben werden, doch muss man für die Konstanten folgende Werte einsetzen, weil bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt (in Prozenten des Trockengewichtes) acetyliertes Papier kleinere Verlustwerte aufweist:

Konstante$_0$ = 1,5...2 · 10^{-3} [7]) für
Konstante$_1$ = 2,5 · 10^{-3} acetyliertes
Konstante$_2$ = 1 ...1,5 · 10^{-5} Papier

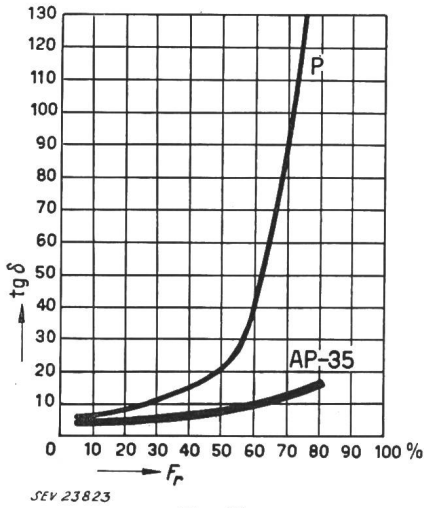


Fig. 13
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ (bei 10^3 Hz) von acetyliertem Papier und Kabelpapier in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit F_r, bei welcher die Muster (bis zur Sättigung) klimatisiert wurden
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier

c) Temperaturabhängigkeit des Verlustfaktors

Die Temperaturfunktion des Verlustfaktors darf als Mass für die Qualität des Isoliermaterials bezeichnet werden. Jedes Papier hat eine für seine «Entstehungsgeschichte» typische Temperatur-Verlust-Kurve. Dabei spielt der Reinheitsgrad eine bedeutende Rolle, wobei unter Reinheitsgrad vor allem der Gehalt an reiner, sog. Alpha-Cellulose zu verstehen ist. Aber auch andere Verunreinigungen — wie Begleitstoffe (herrührend aus dem Aufschlussverfahren oder aus einer eventuellen Nachbehandlung mit Chemikalien), physikalisch und chemisch gebundene, sowie mechanische Beimengungen (Russ, Staub usw.) — spielen eine Rolle. Bei sorgfältigster und systematischer Herstellung des Papierbreies konnten Verlustwerte von Papier (gemessen trocken bei 60 °C) von 1 · 10^{-3} gemessen werden. *H. F. Miller* [21] zeigte, dass durch eine Modifikation des Papierbreies (für Kondensatorenpapiere), insbesondere durch eine bestimmte Reduktion des Gehaltes an Hemicellulosen, eine Reduktion des Verlustfaktors erreicht werden kann.

Der Verlustfaktor in Funktion der Temperatur durchläuft ein Minimum, welches mit steigender Frequenz bei höheren Temperaturen liegt. Dieser Verlauf ist ausserordentlich wichtig, insbesondere bei allen Anwendungen der Starkstrom- und Hochspannungstechnik. Es ist ein glücklicher Umstand, dass für die technischen Frequenzen dieses Minimum

[6]) Abhängig vom Raumgewicht des Papierblattes.

[7]) Abhängig vom Raumgewicht des acetylierten Blattes; gültig bis ca. 5 % Feuchtigkeitsgehalt.

im allgemeinen im Temperaturbereich von 50...80 °C liegt, wodurch entsprechend der Betriebstemperatur von meist derselben Grösse ein stabiler Zustand der Isolat on überhaupt erst möglich wird (Fig. 14).

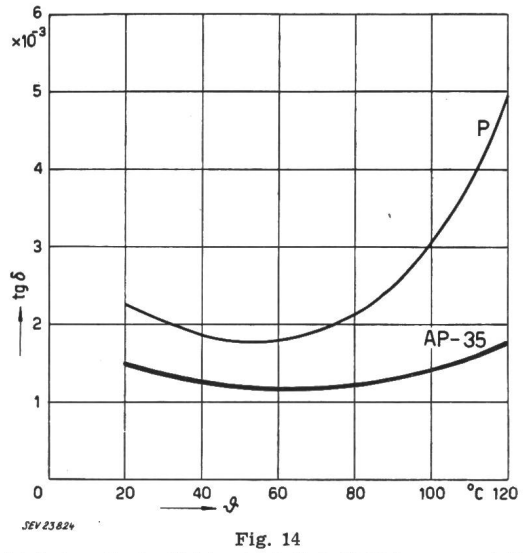


Fig. 14
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ (bei 50 Hz) von acetyliertem Papier und Kabelpapier (gute Hochspannungsqualität), beide mit Isolieröl imprägniert, in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Hochspannungskabelpapier

Analysieren wir die Verlustfaktor-Temperatur-Kurve, dann können wir die dielektrischen Verluste folgenden Ursachen zuschreiben:

Im Temperaturgebiet unterhalb des Minimums hat man es mit reinen dielektrischen Verlusten infolge Dipol-Polarisation zu tun. Oberhalb dieses Minimums sind die Verluste in erster Linie den Erscheinungen, welche bei heterogenen Dielektrika auftreten und die man mit «interfacial polarisation» kennzeichnet, zuzuschreiben. Das Minimum der Verlustfaktorkurve ist somit aus dem Zusammenwirken der beiden eben genannten Ursachen zu erklären. Dazu überlagert sich bei höheren Temperaturen (im allgemeinen etwas ab 70 °C) der Einfluss der Leitfähigkeit. Dieser ist jedoch ausserordentlich klein, solange die Isolation trocken ist. Unter dem Einfluss allfälliger Feuchtigkeit kann sie sich jedoch im Gebiete niederer Frequenzen und besonders bei höheren Temperaturen stärker bemerkbar machen.

Betrachten wir nun den Verlauf der Verlustfaktor-Temperatur-Kurve von acetyliertem Papier

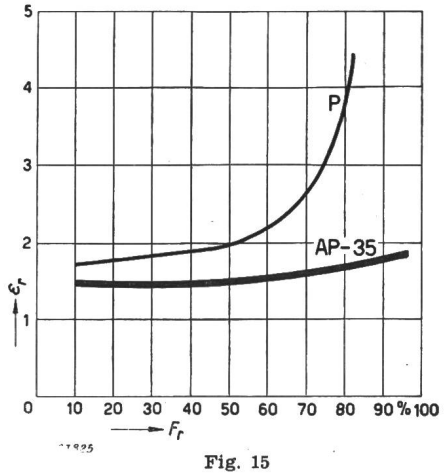


Fig. 15
Charakteristischer Verlauf der Dielektrizitätskonstante ε_r (bei 50 Hz) von acetyliertem Papier und Kabelpapier in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit F_r, bei welcher die Muster (bis zur Sättigung) klimatisiert wurden
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier

(Fig. 14), dann sieht man, dass als Folge der Acetylierung und der damit erreichten Verringerung der Polarisation die Temperaturabhängigkeit des Verlustfaktors geringer ist. Das Minimum hat sich etwas nach tieferen Temperaturen verschoben, und die Werte des Verlustfaktors sind kleiner, speziell in dem oberhalb des Minimums liegenden Gebiet, wo der Anstieg der Verlustfaktor-Temperatur-Kurve wesentlich flacher ist als bei Papier. Der Leitfähigkeitsanteil verschwindet vollständig. Entsprechend dem ganz verschiedenen Verhalten der Papiere erhält man auch nach der Acetylierung verschieden verlaufende Kurven. In jedem Fall aber ist eine deutliche Verminderung des Verlustfaktors im beschriebenen Sinne festzustellen. Für die Lage des Verlustfaktor-Minimums von acetyliertem Papier können folgende Werte als Anhaltspunkt genannt werden:

50 Hz	60... 80 °C
100 Hz	70... 90 °C
1 000 Hz	100...110 °C
10 000 Hz	120...130 °C
100 000 Hz	130...150 °C

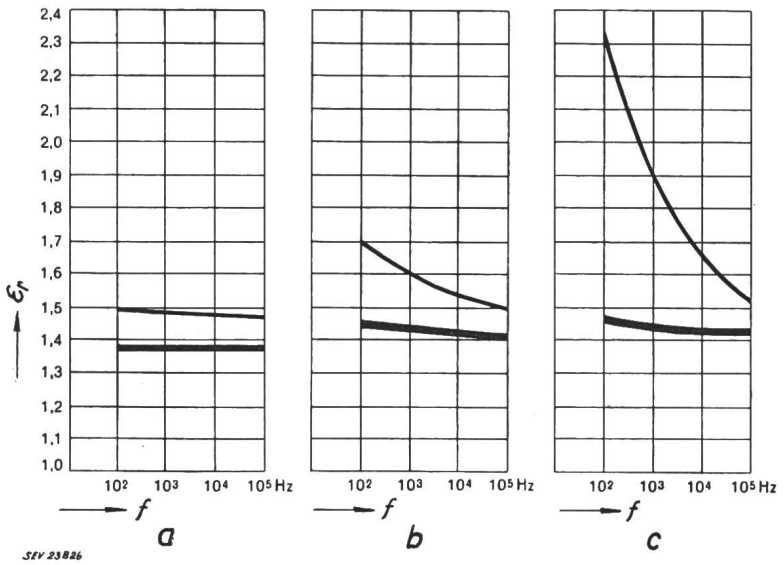


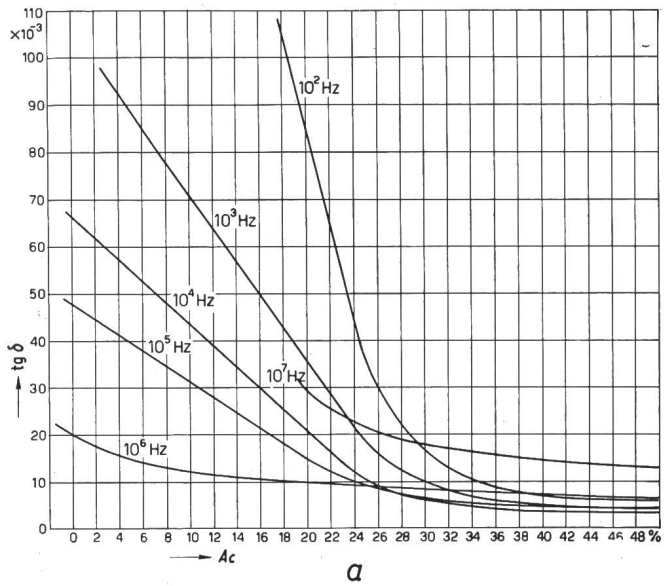
Fig. 16
Dielektrizitätskonstante ε_r von acetyliertem Papier und Kabelpapier in Funktion der Frequenz f, für verschiedene Klimatisierungsgrade
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier
a Papiere getrocknet 24 h bei 60 °C, 48 h über P_2O_5
b Papiere gesättigt in Luft von F_r = 50 %
c Papiere gesättigt in Luft von F_r = 80 %

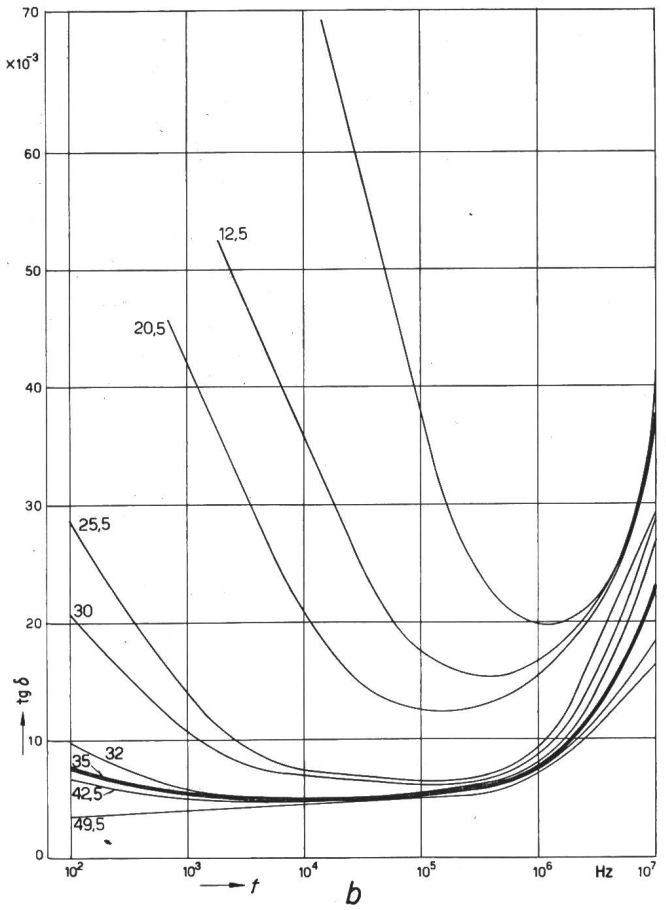
3. Dielektrizitätskonstante acetylierter Papiere

Was hier bezüglich des Verlustfaktors gesagt wurde, gilt entsprechend auch für die Dielektrizitätskonstante. Diese wird durch die Acetylierung kleiner und durch äussere Einflüsse wie Feuchtigkeit, Frequenz und Temperatur weniger verändert (Fig. 15, 16, 17).

4. Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften vom Acetylierungsgrad

In diesem Zusammenhang soll kurz die Abhängigkeit der Wechselstromeigenschaften vom Acetylierungsgrad behandelt werden. Obwohl, in erster Linie aus technologischen Gründen, bei Papier ein bestimmter Acetylierungsgrad eingehalten wird (vorderhand entsprechend der Qualitätsbezeichnung Isocel-35 bis Isocel-40), ist mit Rücksicht auf eine eventuelle weitere Entwicklung dieser Zusammenhang von Interesse. Acetylierte Baumwolle, welche als Cotopa (Garn) oder Crestose (Gewebe) im Handel ist, kann mit höherem Acetylierungsgrad geliefert





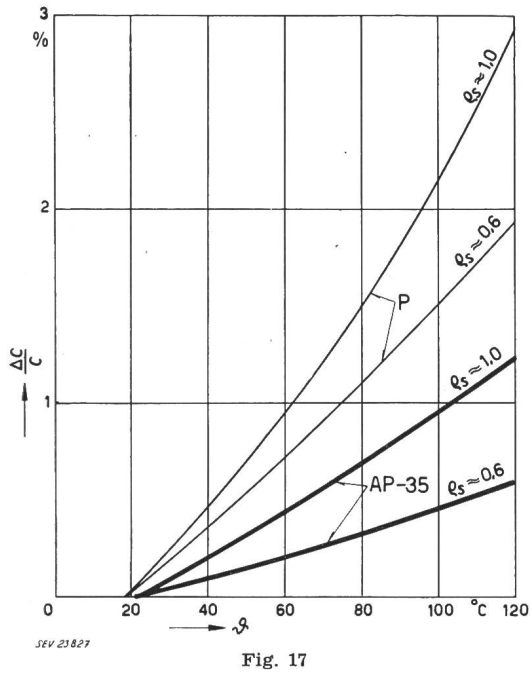


Fig. 17

Relative Kapazitätsänderung $\frac{\Delta C}{C}$ von Zylinder-Kondensatoren in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ, bei Verwendung von acetyliertem Papier bzw. Kabelpapier als Dielektrikum

AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier
ϱ_s Rohdichte der Blätter in g/cm³

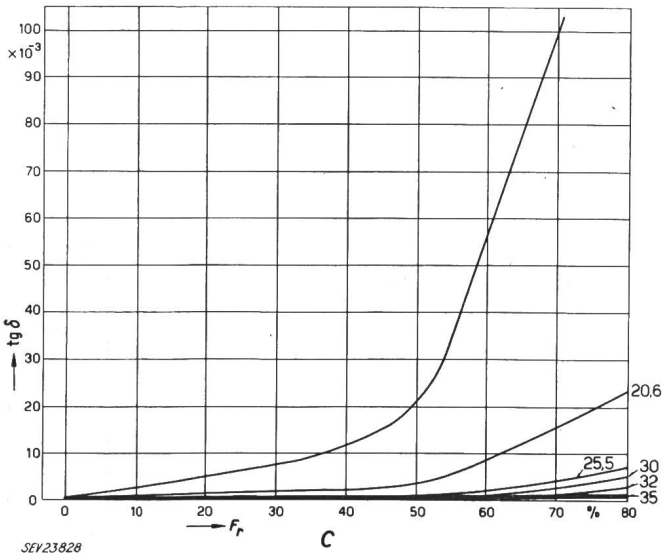


Fig. 18

Dielektrischer Verlustfaktor tg δ, bei 20 °C

in Funktion

a des Acetylierungsgrades *Ac* (Gehalt an chemisch gebundener Essigsäure in Prozenten AcOH) (Papiere feucht, gesättigt entsprechend F_r = 80 %)

b der Frequenz *f* (Papiere feucht, gesättigt entsprechend F_r = 80 %)

c der relativen Luftfeuchtigkeit F_r bei 100 Hz (klimatisiert bis zur Sättigung)

Die Zahlen bei den Kurven von *b* und *c* weisen auf den Acetylierungsgrad AcOH in Prozenten hin

werden, beispielsweise Cotopa-60, das seinerzeit dank seiner vorzüglichen elektrischen Eigenschaften unter anderem als Dielektrikum in Form einer Kordel im Koaxialkabel London–Birmingham–Manchester verwendet wurde [22; 23; 24] (Fig. 18a, b, c).

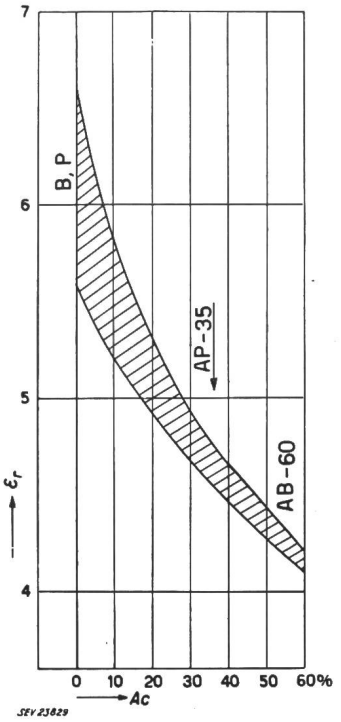


Fig. 19
Reduktion der Dielektrizitätskonstante ε_r von Cellulosefaserprodukten infolge Acetylierung in Funktion des Acetylierungsgrades *Ac*
AP-35 acetylierte Papierfaser 35 % AcOH
AB-60 acetylierte Baumwollfaser 60 % AcOH
P Papierfaser
B Baumwollfaser

Bei vollständiger Acetylierung ist die Feuchtigkeitsabhängigkeit praktisch verschwunden, und auch die Frequenzabhängigkeit ist ausserordentlich stark reduziert. Die Dielektrizitätskonstante der reinen Faser wird durch die Acetylierung stark herabgesetzt (Fig. 19).

V. Mischdielektrikum-Papier und Imprägniermittel

A. Allgemeines

Der Faserverband des Papierblattes wird nur in den wenigsten Fällen in der ursprünglichen Form als Dielektrikum verwendet. Meist wird das Papier, welches einen lockeren Verband von Fasern mit sehr viel Lufteinschlüssen und grosser Faseroberfläche darstellt, mit flüssigen oder festen Stoffen gefüllt, d. h. imprägniert. Je nach dem verfolgten Zweck dient die Imprägnierung dem Feuchtigkeitsschutz, der Erhöhung der elektrischen Festigkeit, zur Schaffung genügender mechanischer Festigkeit oder bestimmter technologischer Eigenschaften. Meist ist eine Kombination all dieser Einflüsse erwünscht. Als Füll- oder Imprägniermittel werden hauptsächlich Harze, Kunststoffe, Wachse und Öle verwendet. In neuester Zeit gewinnen die synthetischen Isolierflüssigkeiten, dank ihrer hohen Stabilität und Betriebssicherheit, an Bedeutung.

Papier in Blattform ist ein Mischdielektrikum, bestehend aus Faser, Luft und einem mehr oder weniger grossen Feuchtigkeitsanteil. Um die Vorteile von Papier voll zur Geltung zu bringen, muss die Feuchtigkeit entfernt und — bei den meisten Anwendungen — das Blatt anschliessend imprägniert werden.

Neben den Eigenschaften der Komponenten, im wesentlichen der Faser und des Imprägniermittels, entscheidet die Qualität einer Imprägnierung über das Dielektrikum und seine Lebensdauer. Dabei wird aber der Idealfall einer Imprägnierung, bei welcher also ein vollständiger Trocknungsgrad erreicht und alle Zwischenräume durch das Imprägniermittel ausgefüllt werden, praktisch kaum verwirklicht.

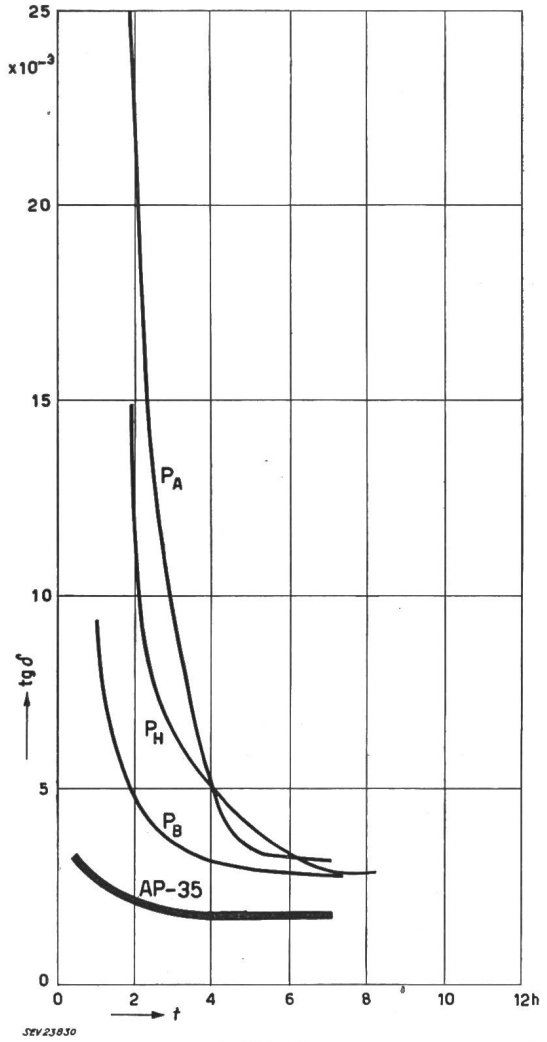


Fig. 20
Verlauf des dielektrischen Verlustfaktors tg δ (bei 50 Hz) von verschiedenen Kondensator-Dielektrika während der Dauer *t* ihrer Trocknung bei 110 °C
Die Anfangswerte entsprechen dem raumfeuchten Zustand ($F_r \approx 65$ %). Die Messungen wurden durchgeführt an Kondensator-Wickelelementen
Ap-35 acetyliertes Kondensatorpapier, 35 % AcOH
P_A Kondensatorpapier, Fabrikat A
P_B Kondensatorpapier, Fabrikat B
P_H Kondensatorpapier, Hadern

Einer guten Imprägnierung hat eine möglichst vollständige Trocknung voranzugehen. Der Trocknungsvorgang folgt den Gesetzen von Diffusion und Kapillarität, während die eigentliche Imprägnierung vor allem durch die Kapillarität bestimmt wird. Die Frage der guten Trocknung im Zusammenhang mit einer einwandfreien Imprägnierung ist von ausserordentlicher Bedeutung. Es ist bekannt, dass selbst geringe Spuren von Feuchtigkeit zu einer beschleunigten Alterung und Zerstörung (infolge Zersetzung)

der Cellulose-Isolation führen können. Hievon wird später im Zusammenhang mit den Fragen der Stabilität noch die Rede sein. Bei grossen Isolationsdikken, wie man dies z. B. bei Hochspannungskabeln, ölimprägnierten Durchführungen oder Verbindungsmuffen findet, oder in Fällen, wo die Feuchtigkeit nur seitlich durch einen relativ kleinen Querschnitt entweichen kann, wie z. B. im Kondensator (wegen dessen eingelegten Metallfolien), verursacht eine gute Trocknung grosse Mühe.

Bei Verwendung von acetyliertem Papier liegen die Verhältnisse weitaus günstiger, indem dank dessen stark reduzierter Feuchtigkeitsaufnahme eine wesentlich raschere Trocknung bei entsprechend geringerem Energieaufwand erreicht werden. kann. Ausserdem ist es zufolge der höheren Wärmebeständigkeit gewisser Spezialqualitäten möglich, mit hoher Trockentemperatur zu arbeiten (Fig. 20).

Im Zusammenhang mit dem Trocknen ist auch die Frage der Form- oder Dimensionsbeständigkeit zu behandeln. Mit jeder Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes ist bei Papier eine Formveränderung verbunden. Das Papier quillt oder schwindet sowohl in Richtung der Blattbahn als auch senkrecht dazu (Dickenänderung, siehe auch Fig. 25). Dieses Verhalten ist bei elektrischen Isolationen ausserordentlich nachteilig, sei es in elektrischer oder mechanischer Hinsicht. Das Schwinden führt zu Hohlraumbildung oder zu einer Lockerung der Isolation, welche bei Hochspannungsisolationen ausserordentlich gefährlich werden kann. So war es beispielsweise bei der Herstellung des 380-kV-Kabels für Harsprånget (Isolationsdicke 28 mm, bestehend aus 500 Papierlagen) notwendig, die Papiere beim Wickeln auf der Maschine sukzessive zu trocknen, um zu vermeiden, dass die Isolation infolge Schwindens beim Trocknen des Kabels porös wird [33]. *Race* [34] beschreibt ein Verfahren zur Herstellung eines Hochspannungskabels (Isolationsdicke ca. 25 mm), wobei das Wikkeln unter maximal möglichem Zug der Papierbänder durchgeführt wurde, mit dem Zweck, dass die Isolation auch nach erfolgtem Schwinden (infolge Trocknen des Kabels) doch noch eine bestimmte Festigkeit aufweist. Um diesen maximalen Zug auf die Bänder ausüben zu können, musste der ganze Raum klimatisiert werden, weil bei einer bestimmten Klimatisierung optimale Festigkeitseigenschaften erreicht werden können. Solche zusätzliche Arbeitsgänge sind bei der Verwendung von acetyliertem Papier nicht mehr notwendig, da dieses praktisch nicht schwindet.

Bei der Beurteilung eines Mischdielektrikums ruft man sich zuerst die Eigenschaften der Komponenten in Erinnerung. Davon ausgehend, dass imprägniertes Papier eine unbekannte Anordnung von Papierfasern und den mit dem Imprägniermittel gefüllten Zwischenräumen bildet, kann angenommen werden, dass man es mit einer Serie- und Parallel-Schaltung von Komponenten mit verschiedenen elektrischen Eigenschaften zu tun hat. Ausserdem spielt noch das gegenseitige Verhalten der Faser und des Imprägniermittels zueinander eine Rolle. Die Papierfaser z. B. kann gewisse Verunreinigungen absorbieren, während Öl einzelne Teile aus dem Papier herauslösen kann, so dass unter Umständen die Eigenschaften der Komponenten vor und nach der Imprägnierung nicht mehr die gleichen sind.

Ausserdem zeigt Papier das Verhalten der dielektrischen Absorption und besitzt im allgemeinen eine sehr geringe Leitfähigkeit, während die meisten Imprägniermittel sowohl die Einflüsse der dielektrischen Absorption als auch der Leitfähigkeit aufweisen. Mineralöle zeigen in dem uns interessierenden Bereich nur den Einfluss der Leitfähigkeit. Man sieht daraus, dass man bezüglich der Komponenten nicht mit konstanten Werten oder einfachen Funktionen rechnen kann, so dass das ganze Problem ausserordentlich komplex wird. Die Resultate dürfen deshalb nur qualitativ gewertet werden.

Über das Mischdielektrikum existieren verschiedene theoretische Arbeiten, und es ist wegen des mehr oder weniger willkürlichen Aufbaues des Papierblattes nicht ohne weiteres vorauszusagen, welche Formel der Papierstruktur am besten zu genügen vermag. Systematische Untersuchungen, vor allem von *A. Büchner* [25] haben ergeben, dass Papier sowohl der Serie- als auch der Parallelschaltung entspricht, im allgemeinen aber mit grosser Annäherung der Serieformel genügt, und zwar um so besser, je höher das Raumgewicht des Papierblattes ist. Danach würde sich imprägniertes Papier wie eine Serieschaltung eines homogenen, der Faser entsprechenden Materials mit einer homogenen Schicht Imprägniermittel verhalten.

Eingehende Untersuchungen zeigten, dass die Serieformel in gleichem Masse auch auf acetyliertes Papier angewendet werden darf, weil die Faserstruktur durch die Acetylierung (unter Strukturerhaltung) nicht verändert wird.

Im Gebiet, innerhalb welchem das Imprägniermittel Leitfähigkeit zeigt, sind die grössten Abweichungen von der Theorie zu erwarten, weil mit zunehmendem Raumgewicht von Papier dessen sog. Barrierenwirkung ebenfalls wächst und somit nur ein unbekannter Teil der Leitfähigkeit des Imprägniermittels zum Verlustfaktor des ölimprägnierten Blattes beiträgt. Umgekehrt sind Ölpfade möglich, wo diese Barrierenwirkung des Papieres nicht zur Geltung kommt, da die totale Ionenbewegung als Addition der Ionenbewegungen der einzelnen Pfade zu bewerten ist. Es ist möglich, dass dabei der Leitfähigkeitsanteil des Verlustfaktors des imprägnierten Blattes dem Leitfähigkeitsanteil des Imprägniermittels allein entsprechen kann.

B. Rechnerische Behandlung des Mischdielektrikums

Die rechnerische Behandlung des Mischdielektrikums, bestehend aus zwei Komponenten (Faser und Luft bzw. Faser und Imprägniermittel), gemäss der Serieschaltung ergibt folgenden Zusammenhang:

$$\varepsilon_{12} = \frac{\varepsilon_1 \, \varepsilon_2}{V_1 \, \varepsilon_2 + V_2 \, \varepsilon_1} \tag{8}$$

$$\operatorname{tg} \delta_{12} = \frac{V_1 \, \varepsilon_2 \cdot \operatorname{tg} \delta_1 + V_2 \, \varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg} \delta_2}{V_1 \, \varepsilon_2 + V_2 \varepsilon_1} \tag{9}$$

worin:

Index 1 auf die Faser hinweist;
Index 2 auf das die Faser umgebende Medium (z. B. Luft oder Imprägniermittel) hindeutet;

Index 12 auf das Mischdielektrikum (1 + 2) hinweist;
V_1, V_2 sind die Volumenanteile der Komponenten, wobei gilt: $V_1 + V_2 = 1$;
ε_1; tg δ_1 Dielektrizitätskonstante bzw. dielektrischer Verlustfaktor der Faser;
ε_2; tg δ_2 Dielektrizitätskonstante bzw. dielektrischer Verlustfaktor des die Faser umgebenden Mediums (z. B. Luft oder Imprägniermittel);
ε_{12}; tg δ_{12} Dielektrizitätskonstante bzw. dielektrischer Verlustfaktor des (imprägnierten) Blattes.

P. Henninger [10] hat die Richtigkeit dieser Formeln bewiesen, indem er die Papierfaser in ein Medium gleicher Dielektrizitätskonstante (Clophen A50 + Nitroanisol, Dielektrizitätskonstante einstellbar von 4,8...8,0) einbettete (imprägnierte) und aus den dielektrischen Eigenschaften des Mischdielektrikums die Daten der Faser ermittelte. Auch A. Büchner[25] hat die Übereinstimmung durch Messungen belegt und sieht die Erklärung für die vorherrschende Gültigkeit der Reihenformel darin, dass die Papierfaser in dünne, breite Lamellen aufgespalten ist, welche sich bei den verschiedenen Bearbeitungsverfahren parallel der Oberfläche der Papierbahn orientieren.

Die ideale Isolation für die Hochspannungstechnik ist mit geeigneten Mitteln imprägniertes Papier. In der Praxis werden Imprägniermittel verwendet, deren dielektrische Verluste in den uns interessierenden Bereichen von Temperatur und Frequenz klein sind und gegenüber den dielektrischen Verlusten der Faser im allgemeinen vernachlässigt werden dürfen. Im besonderen Masse trifft dies für Mineralöle zu, welche heute in vorzüglicher Qualität zur Verfügung stehen.

Papier, imprägniert mit Öl, darf als die beste Isolation bezeichnet werden, wobei in neuerer Zeit, wie schon kurz angeführt wurde, die Verwendung der synthetischen «Öle» wegen deren chemischer Beständigkeit, Unbrennbarkeit und zum Teil infolge ihrer höheren Dielektrizitätskonstante (Kondensatoren) von besonderem Interesse ist. Sowohl die Kurzzeit- als auch die Dauerdurchschlagsfestigkeit von imprägniertem Papier übertreffen die entsprechenden Werte anderer Isolierstoffe. Imprägniertes Papier gestattet bei kleinstem Volumen höchste elektrische Beanspruchung.

Für den Fall verlustfreier Imprägniermittel vereinfacht sich Gl. (9) wie folgt:

$$\operatorname{tg} \delta_{12}\Big]_{\operatorname{tg}\delta_2 \approx 0} = \frac{V_1\, \varepsilon_2 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{V_1\, \varepsilon_2 + V_2\, \varepsilon_1} \qquad (10)$$

Fragen wir nach der Erhöhung der Dielektrizitätskonstante und des Verlustfaktors des Papierblattes infolge Imprägnierung, dann erhält man mit den Gl. (8) und (9) die Gl. (11):

$$\frac{\varepsilon_{12\,impr.}}{\varepsilon_{12\,nicht\,impr.}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{12\,impr.}}{\operatorname{tg} \delta_{12\,nicht\,impr.}} = \varepsilon_2 \frac{V_1 + V_2\, \varepsilon_1}{V_1\, \varepsilon_2 + V_2\, \varepsilon_1} \qquad (11)$$

Man sieht daraus, dass man aus der durch die Imprägnierung bedingten Erhöhung der Dielektrizitätskonstante bzw. der Kapazität auf die Erhöhung des Verlustfaktors schliessen kann.

McLean [35] und *Race* [34] benützen die Gl. (11), um damit ein Mass für die Leitfähigkeit der imprägnierten Isolation zu definieren, indem nämlich für ein verlustfreies Imprägniermittel

$$\frac{\operatorname{tg} \delta_{12\,impr.}}{\operatorname{tg} \delta_{12\,nicht\,impr.}} \cdot \frac{\varepsilon_{12\,nicht\,impr.}}{\varepsilon_{12\,impr.}} = k \approx 1 \qquad (12)$$

erfüllt sein muss. (Für den idealen Fall vollständiger Verlustfreiheit des Imprägniermittels ist obige Gleichung streng erfüllt.) Im allgemeinen aber kann der Wert k von 1 etwas verschieden sein. Im Falle von Isolieröl findet man $k = 0{,}9...1{,}0$ und für Chlornaphtaline z. B. etwa den Wert $k = 0{,}9$. Auf Grund bisheriger Messungen wird dieser Faktor bei Verwendung acetylierter Papiere nicht merklich beeinflusst.

Aus den Gl. (8)...(10) kann ohne weiteres die Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante und des Verlustfaktors vom Raumgewicht des trockenen, d. h. nicht imprägnierten Papierblattes abgeleitet werden, wobei in diesem Falle Luft an die Stelle des Imprägniermittels tritt.

Es gilt daher:

$$\varepsilon_2 = 1, \quad \operatorname{tg} \delta_2 \approx 0$$

und man erhält

$$\frac{\varepsilon_{12}''}{\varepsilon_{12}'}\Big]_{nicht\,impr.} = \frac{\varrho_{s12}'}{\varrho_{s12}'' - (\varrho_{s12}'' - \varrho_{s12}')\, \varepsilon_{12}'} \qquad (13)$$

$$\frac{\operatorname{tg} \delta_{12}''}{\operatorname{tg} \delta_{12}'}\Big]_{nicht\,impr.} = \frac{\varepsilon_{12}'' \cdot \varrho_{s12}''}{\varepsilon_{12}' \cdot \varrho_{s12}'} \qquad (14)$$

Darin sind:

ε_{12}' bzw. tg δ_{12}'

Dielektrizitätskonstante bzw. Verlustfaktor des Papierblattes mit dem Raumgewicht ϱ_{s12}',

ε_{12}'' bzw. tg δ_{12}''

Dielektrizitätskonstante bzw. Verlustfaktor des Papierblattes mit dem Raumgewicht ϱ_{s12}''.

Cocquillion [36] hat den Einfluss des Raumgewichtes auf die Dielektrizitätskonstante und den Verlustfaktor experimentell ermittelt und gute Übereinstimmung mit diesen Formeln gefunden. Man erkennt in diesem Zusammenhang, dass man bei Angaben über den Verlustfaktor und die Dielektrizitätskonstante von trockenem, nicht imprägniertem Papier das Raumgewicht des Blattes angeben muss. Andernfalls sind die dielektrischen Daten auf ein bestimmtes Raumgewicht zu beziehen.

Vergleicht man acetyliertes Papier mit gewöhnlichem Papier, so ist ausserdem die geringere Dichte der acetylierten Faser (Faser Isocel-35: 1,41 g/cm³, Cellulosefaser: 1,56 g/cm³) zu berücksichtigen.

Diese für das Mischdielektrikum durchgeführten Überlegungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der Verlustfaktor von imprägniertem Papier ist grösser als die Summe der Verlustfaktoren der Komponenten. Bei Verwendung von Imprägniermitteln, deren Verluste so klein sind, dass sie vernachlässigt werden dürfen, sind der Verlustfaktor des Faseranteils und die Dielektrizitätskonstante des Imprägniermittels für die dielektrischen Verluste des Mischdielektrikums verantwortlich, d. h. bei der Verlustfaktor-Temperaturkurve von imprägniertem Papier

bleibt der Charakter der für das betreffende Papier ermittelten Kurve erhalten. Um die dielektrischen Verluste von imprägniertem Papier zu reduzieren, ist es notwendig und bleibt als einzige Möglichkeit, die dielektrischen Verluste des Papiers zu reduzieren.

Dass diese Bedingung bei Verwendung von Imprägniermitteln mit polarem Charakter und demzufolge mit hoher Dielektrizitätskonstante von besonderer Bedeutung ist, geht ohne weiteres aus den vorstehenden Formeln hervor. So folgert u. a. Cocquillion [36] im Zusammenhang mit der Anwendung von Pyralen als Imprägniermittel:

«... pour un imprégnant à forte constante diélectrique comme le Pyralène, il faut employer des papiers à faibles pertes et de densité relativement basse ...»

Acetyliertes Papier ist dank seiner Eigenschaften, insbesondere seiner geringen dielektrischen Verluste (kleiner Verlustfaktor und kleinere Dielektrizitätskonstante) berufen, diese Bedingungen zu erfüllen (Fig. 12...20).

Der starke Einfluss der Dichte des Blattes und auch der Eigenschaften des Imprägniermittels auf das imprägnierte Dielektrikum sind aus Gl. (8)...(11) ohne weiteres ersichtlich. Sofern ein Dielektrikum mit besonders kleinen dielektrischen Verlusten benötigt wird, sind poröse Blätter, d. h. solche mit möglichst kleinem Faseranteil zu verwenden. Wird dagegen bei extremen elektrischen und thermischen Bedingungen gearbeitet, so dass mit einer Alterung des Öls infolge Leitfähigkeit, Zunahme elektrolytischer Verunreinigungen usw. zu rechnen ist, dann kann der Beitrag des Öles an die dielektrischen Verluste grösser sein als der des Papierblattes, und dann empfiehlt es sich, ein möglichst dichtes Blatt zu verwenden.

Die Frage, ob dichte oder poröse Blätter zu verwenden sind, kann aber nur im Zusammenhang mit dem Verhalten des Mischdielektrikums im elektrischen Feld beurteilt werden. Beim Papier-Öl-Dielektrikum ist die Feldverteilung eine recht ungünstige, da die Papierfaser eine Dielektrizitätskonstante von ca. 6 und das Öl eine solche von ca. 2,2 besitzt (Tabelle II), womit das Öl eine wesentlich grössere Beanspruchung im elektrischen Feld zu übernehmen hat (im allgemeinen etwa das 2,7fache der Papierfaser). Bei Verwendung von acetyliertem Papier liegen die Verhältnisse schon wesentlich günstiger, da die Dielektrizitätskonstante der acetylierten Faser 4,75 beträgt, wodurch das Öl nur noch etwa die 2,1fache Feldstärke der Faser zu übernehmen hat. Man erkennt daher leicht, dass die Feldverteilung eine ausserordentlich grosse Rolle für die Beständigkeit einer ölimprägnierten Isolation spielt. Die schwächsten Stellen einer geschichteten Papier-Öl-Isolation liegen sowohl in den Ölkanälen der Kapillaren als auch zwischen den einzelnen Papierlagen. Ausserdem hat das Öl eine geringere elektrische Festigkeit, und es zeigt bei höheren Temperaturen, im allgemeinen etwa ab 60...70 °C, einen Anstieg des Verlustfaktors mit der Temperatur, welcher fast ausschliesslich dem Leitfähigkeitsanteil zuzuschreiben ist. Infolge dieses erhöhten Verlustfaktors des Öls ist der Ölkanal zusätzlich gefährdet.

Dielektrizitätskonstanten verschiedener faserförmiger und flüssiger Dielektrika

Tabelle II

Dielektrikum	Komponenten ε_1 bzw. ε_2	Misch-Dielektrikum ε_{12}		Literaturhinweis
	Faser oder Imprägniermittel trocken	Blatt oder Film nicht imprägniert	Blatt oder Film imprägniert	
Hadernpapier	5,3			[25]
Natron-Cellulose	5,6			[25]
Sulfit-Cellulose	5,8			[25]
Cellophan getrocknet glycerinfrei, 60 Hz		7,7		[26]
10^6 Hz		6,7		
Papier kleines bis grosses Raumgewicht		2...2,5	3,5...4,3[1])	[27]
Papier, dicht		4,91		[28]
Papier, weniger dicht		3,78		
Papier, imprägniert mit Öl (ε_2 = 2,2)			4,05[1])	
reine Cellulose	6,1			[29]
Papierfaser	5,5			[29]
Papierfaser	6,6			[30]
Papierfaser	6,24			[29]
100 % Cellulose	8,1			
regenerierte Cellulose	7,5			[31]
Papier		1,2...4,0		
Kabelpapier	6,1			[29]
Cellulosetriacetat, 60 Hz		4,1		[26]
10^6 Hz		3,7		
Isocel-35, ex Hadern	4,5	—	3,08[1])	
ex Kabelpapier	4,75			
Cotopa-30[2])	4,6...4,8			
Cotopa-60[2])	4,0...4,1			
Öl	2,3			[32]
Öl	2,2			[28]
Öl, mit kleiner Viscosität	2,2			[4]
Kabelöl (synthetische Öle Tri-...Hexa-Chlor-diphenyl) 20°	5,7...4,5			[4]
60°	5,4...4,25			[4]
90°	4,8...4,0			[4]

[1]) mit öl.
[2]) siehe gleiche Fussnote der Tabelle I.

Die Zerstörung nimmt denn auch tatsächlich jeweils ihren Anfang in den Ölkanälen, wie aus verschiedenen Untersuchungen eindeutig festgestellt werden konnte.

Acetyliertes Papier bietet für die Imprägnierung besondere Vorzüge. Auf die leichtere, raschere und bessere Trocknung dank der geringeren Feuchtigkeitsaufnahme und höherer Wärmebeständigkeit wurde schon hingewiesen. Gleichzeitig zeigt acetyliertes Papier ein wesentlich verbessertes Ölansaugvermögen und eine bessere Öldurchlässigkeit, so dass bei gleichem Aufwand eine bessere Imprägnation erreicht wird oder diese in kürzerer Zeit durchgeführt werden kann. Die Qualität der Imprägnation kann unter anderem dadurch festgestellt werden, dass bei einer schlechten Isolation, welche also Luft- oder Gaseinschlüsse aufweist, die Dielektrizitätskonstante des imprägnierten Blattes sich mit der Änderung des äusseren Druckes ebenfalls verändert, während bei einer guten, einwandfreien Imprägnation eine solche Änderung nicht festzustellen ist.

Die ausserordentliche Bedeutung niederer dielektrischer Verluste und deren günstiger Verlauf mit

der Temperatur für die Lebensdauer einer imprägnierten Isolation sind bekannt. Ein kleinerer Verlustfaktor ermöglicht einen höheren Spannungsgradienten der Durchschlag-Zeit-Kurve im Gebiet des reinen Wärmedurchschlages. Besonders bei Spannungsgradienten in der Nähe des Durchschlages kann infolge dielektrischer Verluste die Temperatur im Innern einer Isolation sehr stark ansteigen und die Isolation damit ausserordentlich gefährdet werden. Schon Bruchteile eines W/cm³ können zu Wärmestauungen und damit zu hohen Temperaturen im Innern einer Isolation führen. Ganz besondere Bedeutung hat dieses Problem bei Kondensatoren und Hochspannungskabeln. Bei Grosskondensatoren mit Papier-Öl-Isolation z. B. kann der Anteil der dielektrischen Verluste bis 90 % und mehr der totalen Verluste betragen. *H. F. Miller* [21] zeigte, dass durch Reduktion der dielektrischen Verluste von Papier der Anteil der dielektrischen Verluste in einem Kondensator (Imprägniermittel Pyranol) um 25 % reduziert werden konnte.

Acetyliertes Papier, mit Isolierölen mineralischer Herkunft imprägniert, zeigt gegenüber gleich imprägniertem Kabelpapier einen um etwa 10...25 % (bei 20...80 °C) erhöhten Spannungsgradienten (Fig. 21).

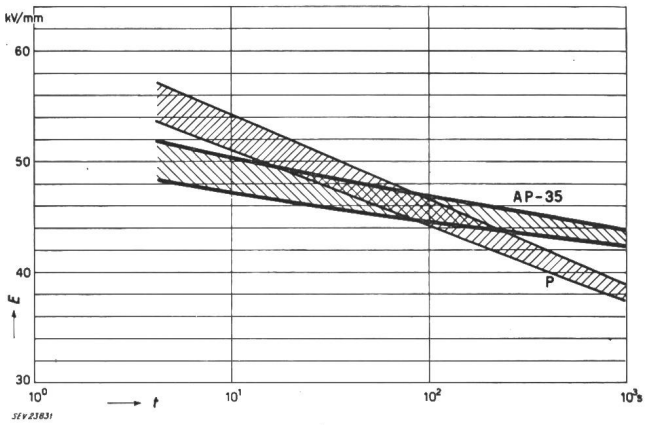


Fig. 21
Durchschlagfeldstärke *E* (bei 60 °C) in Funktion der Zeit *t* der elektrischen Beanspruchung des Dielektrikums von acetyliertem Papier und Kabelpapier (beide ölimprägniert)
AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier

Zur Erreichung hoher momentaner Durchschlagsfestigkeit und hoher Stossfestigkeit muss man ein möglichst dichtes Blatt verwenden. Dasselbe Verhalten gilt bezüglich Gleichspannungsfestigkeit, wobei vor allem der Isolationswiderstand massgebend ist. Imprägniertes acetyliertes Papier hat bei Betriebstemperaturen von 60...90 °C gegenüber imprägniertem Kabelpapier einen höheren Isolationswiderstand (siehe Fig. 10), welcher im allgemeinen etwa zwei Grössenordnungen über demjenigen von Öl liegt.

Dagegen sind zur Erreichung hoher Ionisationsfeldstärke eine grosse Lagenzahl, d. h. viele und dünne Blätter, sowie eine geringe Dielektrizitätskonstante, erforderlich. (Siehe auch *Oudin* [37], welcher diese Forderung aus der Theorie der Ionisation in Hohlräumen für Papier abgeleitet hat.)

Der Forderung nach einem hohen Spannungsgradienten der Durchschlags-Zeit-Kurve, die ein geringes Raumgewicht des Papierblattes zur Voraussetzung hat, stellt sich diejenige nach einer hohen Gleichstrom-, Stoss- und momentanen Durchschlagsfestigkeit entgegen, da letztere nur durch höchste Verdichtung des Papiers erreicht werden kann.

Dank der Tatsache, dass acetyliertes Papier eine günstigere Verlust-Temperaturkurve besitzt, eine gleichmässigere, bessere Feldverteilung bewirkt und bei gleichem Raumgewicht die momentane Durchschlagsfestigkeit von Papier erreicht, eröffnet sich der technisch interessante Ausblick, mit acetyliertem Papier eine Isolation zu erhalten, welche die Kurzzeit-Durchschlagsfestigkeit von Papier erreicht bei gleichzeitig erhöhter Wärmedurchschlagsfestigkeit, indem man infolge der geringen dielektrischen Verluste des acetylierten Papiers in der Lage ist, ein dichteres Blatt zu verwenden, ohne dass dabei die dielektrischen Verluste diejenigen von Papier erreichen oder überschreiten, da dieses dichtere acetylierte Papier immer noch geringere Verluste aufweist als ein gleich dichtes nicht acetyliertes Isolier-Papier.

Entsprechende Versuche zusammen mit den im nächsten Abschnitt besprochenen sind zurzeit im Gange.

C. Die Verwendung chlorierter Kohlenwasserstoffe

Chlorierte Kohlenwasserstoffe befinden sich mit verschiedenen Chlorierungsgraden (Di-, Tri-, Tetra-, Penta- und Hexa-Chlordiphenyl) und unter diversen Handelsnamen auf dem Markte. Sie werden dank ihrer besonderen Vorteile (Unbrennbarkeit, keine Explosionsgefahr, grosse chemische Stabilität und höhere Dielektrizitätskonstante) in zunehmendem Masse gebraucht. Es handelt sich fast durchwegs um Isolieröle, welche als Folge ihres Molekülaufbaues (Chloratome an Stelle der H-Atome) polaren Charakter zeigen. Damit weisen sie die nachteilige Erscheinung der Dispersion und der dielektrischen Absorption auf, die eine wesentlich erhöhte Dielektrizitätskonstante bewirkt. Es ist gelungen, die Dispersionsgebiete im allgemeinen ausserhalb der in Betracht fallenden Arbeitsbedingungen zu verlegen, so dass diese Öle im eigentlichen Arbeitsgebiet gute dielektrische Daten aufweisen, was ihnen den Eingang in die Elektrotechnik erst ermöglicht hat. Diese Flüssigkeiten haben je nach dem Grad ihrer Chlorierung Werte der Dielektrizitätskonstante, welche im allgemeinen zwischen 4 und 5 liegen.

Im normalen Arbeitsbereich hat dabei die Dielektrizitätskonstante einen negativen Temperaturkoeffizienten. Man erkennt leicht, dass chlorierte Kohlenwasserstoffe für die Imprägnierung von Papier eine wesentlich ausgeglichenere Feldverteilung ergeben und dass bei der Imprägnierung von acetylierten Produkten (Dielektrizitätskonstante im allgemeinen etwa 4...5, siehe Fig. 19) der ideale Fall einer gleichmässigen Feldverteilung tatsächlich erreicht werden kann, indem es möglich ist, die acetylierte Faser in ein Medium gleicher Dielektrizitätskonstante einzubetten. Man kann sogar die Faser

acetylierter Produkte mit einem Medium höherer Dielektrizitätskonstante umgeben. Welche Feldverteilung optimale Verhältnisse ergibt, ist noch zu bestimmen. Trotzdem dürften — im Anschluss an die bisherigen Ausführungen — folgende Hinweise als Ausblick weiterer Möglichkeiten von Interesse sein:

Prüfungen, durchgeführt von verschiedenen Herstellern synthetischer Isolieröle haben ergeben, dass acetylierte Produkte, im Gegensatz zu gewissen nicht behandelten Celluloseprodukten, sehr gute Verträglichkeit und Beständigkeit mit chlorierten Diphenylen besitzen. Die acetylierten Faserprodukte wurden dabei in keiner Weise verändert und beeinflussen auch nach langer Wärmebeanspruchung die dielektrischen Eigenschaften der Flüssigkeiten nicht.

Die aus der Kombination acetylierter Fasercellulose und chlorierter Diphenyle zu erwartenden Vorteile sind zusammengefasst die folgenden:

a) Aus der theoretischen Betrachtung des Mischdielektrikums wurde gefolgert, dass bei Verwendung von Imprägnierflüssigkeiten mit hoher Dielektrizitätskonstante ein verlustarmes Papier oder Gewebe mit relativ geringer Dichte verwendet werden sollte. Beide Bedingungen vermögen acetylierte Fasercellulosen gut zu erfüllen.

b) Der ideale Fall der Feldstärkeverteilung kann vollständig erreicht werden. Damit liegt ein geringerer Anteil der Feldstärke in der flüssigen Komponente, woraus eine höhere Ionisationsfeldstärke und schliesslich eine langsamere Alterung zu erwarten sind.

c) Der Nachteil des geringeren spezifischen Isolationswiderstandes von chlorierten Ölen gegenüber Mineralölen wird durch den höheren Isolationswiderstand von acetyliertem Papier ganz oder teilweise kompensiert.

Die Vorteile, die sich bereits aus der Kombination von Papier mit Chlordiphenylen ergaben, sind bei Verwendung von acetyliertem Papier in gleichem oder stärkerem Masse zu erwarten, insbesondere:

a) Die durch den polaren Charakter der synthetischen «Öle» bedingte grössere Affinität zur Papierfaser lässt eine leichtere oder bessere Imprägnierung erwarten, welche sich in einer höheren Ionisationsspannung auswirkt und damit der Alterung weniger unterliegt.

b) Der Spannungsgradient (asymptotischer Wert der Durchschlags-Kurve) liegt näher an der Ionisationsspannung als dies bei Imprägnation mit Öl der Fall ist.

c) Wegen der grösseren chemischen Stabilität der synthetischen Isolieröle sind Oxydationserscheinungen stark reduziert.

VI. Stabilität acetylierter Papiere

Die guten elektrischen Eigenschaften einer elektrischen Isolation sollen während ihrer Lebensdauer möglichst erhalten bleiben, d. h. die Isolation soll stabil sein.

Die Bedingungen, unter welchen elektrische Isolationen ihre Aufgabe zu erfüllen haben, sind naturgemäss, je nach Verwendung, ganz verschieden. So sind z. B. viele offen mit der Luft in Kontakt, wodurch Oxydationserscheinungen als Ursache einer chemischen Zerstörung möglich werden, während andere Isolationen mit dem Luftsauerstoff nicht in Berührung kommen (Kondensatoren, Kabel, wasserstoffgekühlte Generatoren usw.), bei genügend hoher Temperatur aber doch einer Zerstörung unterliegen.

Alle Cellulose-Produkte erfahren unter dem Einfluss von Zeit und Temperatur eine Alterung. Bei höheren Temperaturen und unter dem Einfluss des elektrischen Feldes findet eine elektrochemische und thermische Zersetzung der Cellulose infolge Elektrolyse und Ionenbombardement statt, wobei organische Säuren, Aldehyde, H, CO, CO_2 und H_2O entstehen können. Diese Zerstörung kann nicht aufgehalten werden und wird durch Verunreinigungen (katalytisch) beschleunigt. Der schädliche Einfluss allfälliger Feuchtigkeitsreste auf die Stabilität, besonders von ölimprägnierten Isolationen, ist bekannt (z. B. [1; 2; 3; 4; 5]). Ebenso kennt man die Gefahr allfälliger Lufteinschlüsse infolge schlechter Imprägnierung, welche infolge Ionisation zum Glimmen kommen und dadurch zur allmählichen Zerstörung der Isolation führen können.

Über die Lebensdauer von Cellulose-Isolationen sind verschiedene Arbeiten und Testmethoden veröffentlicht worden, und das Verhalten ist weitgehend bekannt, doch weiss man über die chemischen Reaktionen noch verhältnismässig wenig.

Auch Papier erfährt unter gewissen Einflüssen eine Alterung; umgekehrt hat es aber seine Brauchbarkeit und Nützlichkeit unter den verschiedensten Bedingungen, wie noch kein anderes Material bewiesen. Es ist somit angezeigt, im Vergleich hiezu die Stabilität von acetyliertem Papier zu untersuchen und die Grenzen der Beanspruchung infolge der diversen Einflüsse genau kennenzulernen.

Als Kriterium für die qualitative Bewertung der chemischen Stabilität können folgende Angaben herangezogen werden:

a) Die Mengen eventuell abgespaltener Zersetzungsprodukte.

b) Die Veränderung der mechanischen Eigenschaften (Reissfestigkeit, Dehnung, Falzzahl und Berstdruck).

c) Die Beeinflussung der elektrischen Eigenschaften, vor allem des dielektrischen Verlustfaktors infolge elektrischer und thermischer Beanspruchung der Isolation.

Bei der Veränderung der mechanischen Daten hat man zu unterscheiden, ob eine Oxydation (z. B. durch den Sauerstoff der Luft) vorliegt, oder ob eine Zersetzung unter Abspaltung und gleichzeitiger katalytischer Wirkung der Zersetzungsprodukte bei Luftabschluss stattfindet. Im zweiten Fall kann man die Resultate unter Umständen auch als Stabilitätstests auswerten, doch sind damit gewisse Ungenauigkeiten verbunden, weshalb diese Prüfungen besser als Wärmebeständigkeitstests durchgeführt werden.

Im Zusammenhang mit elektrischen Anwendungen eignen sich Verlustfaktor-Messungen vorzüglich als Stabilitätstests. Ganz besonders gilt dies für ölimprägniertes Papier, weil dieses allfällige Oxydations- und Zersetzungsprodukte absorbiert. Solche Produkte haben meist polaren Charakter und werden durch das elektrische Feld beeinflusst, d. h. sie werden in Gebieten grosser Feldstärke konzentriert und verursachen dadurch eine starke Erhöhung des Verlustfaktors. Besonders Essigsäure (allfälliges Zersetzungsprodukt acetylierter Cellulose, aber auch eines der Zersetzungsprodukte von Papier) wird vom Papier stark absorbiert. Das Absorptionsvermögen ist so gross, dass z. B. Essigsäure aus Öl vom Papier zu 95...98 % aufgesogen und an der Faser angelagert wird. Dabei geht die Leitfähigkeit des Öles zurück, aber der Verlustfaktor des Papierblattes steigt stark an (Fig. 22).

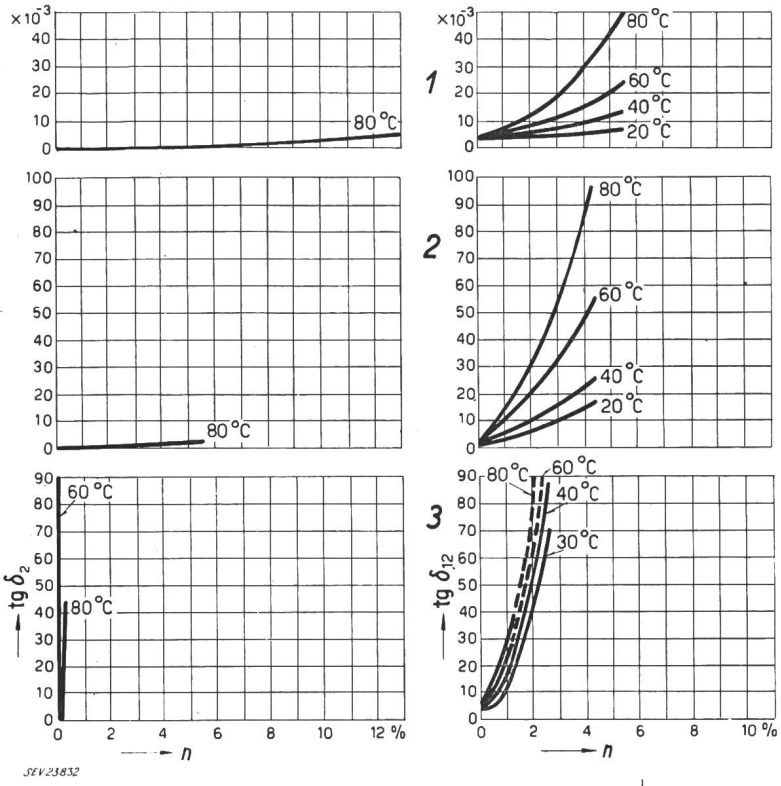


Fig. 22

Erhöhung des Verlustfaktors tg δ von Paraffinöl *(links)* und von Papier, welches mit Paraffinöl imprägniert ist *(rechts)* durch schwache organische Säuren, dargestellt durch deren Konzentration *n* im Öl in Gewichtsprozenten bei 60 Hz und 2 kV/mm [31]

1 Einfluss der Propionsäure
2 Einfluss der Essigsäure
3 Einfluss der Ameisensäure

Aber auch bei gleichem Gehalt von gelösten organischen Säuren in Öl und in ölimprägniertem Papier wird der Verlustfaktor des Öles gegenüber dem des imprägnierten Papieres kaum erhöht [31]. Der Einfluss organischer Säure auf die Erhöhung des Verlustfaktors ist um so grösser, je kleiner deren Molekulargewicht ist, wird aber in jedem Fall um so ausgeprägter, je höher die Temperatur steigt.

Wie aus eingehenden Absorptionsversuchen festgestellt werden konnte, ist das Absorptionsvermögen von acetyliertem Papier für Essigsäure um ein Mehrfaches grösser als das von Kabelpapier. Damit ist die Brauchbarkeit der Verlustmessungen, durchgeführt in vergleichenden Messungen an acetyliertem und nicht acetyliertem Papier, als Stabilitätstests erwiesen.

Die Stabilitätstests wurden an Zylinder-Kondensator-Anordnungen (Kupferrohre, bewickelt mit den zu prüfenden Proben) durchgeführt.

Diese Anordnungen wurden einzeln sorgfältig mit Kondensatorenöl imprägniert und anschliessend unter genau gleichen Bedingungen dem Stabilitätstest bei folgenden Bedingungen unterzogen:

Pro Test während 4 Monaten:
90 % der Zeit bei 60 °C
10 % der Zeit bei 90...120 °C

bei einer elektrischen Belastung entsprechend 10...12 kV/mm während je 8 h täglich.

An den Proben wurden periodische Verlustfaktor- und Isolationsmessungen (bei 20, 60 und 90 °C) durchgeführt. Gleiche Messungen wurden von Zeit zu Zeit auch an dem Öl, in welches die Proben einzeln eingetaucht waren, vorgenommen. Als Resultat zeigte sich, dass während der Dauer der Versuche kein Unterschied in Bezug auf Alterung oder Instabilität zwischen acetyliertem und nicht acetyliertem Papier festgestellt werden konnte.

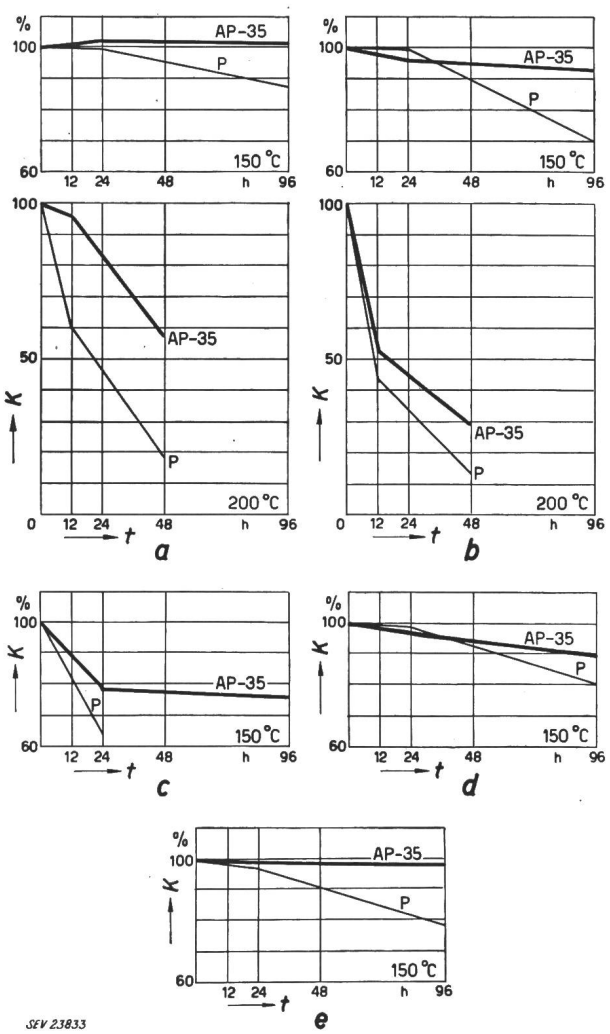


Fig. 23

Wärmebeständigkeit von acetyliertem Papier und von Isolierpapier

Reissfestigkeit *K* (in Prozenten des Wertes vor der Wärmebehandlung) in Funktion der Zeit *t* der Wärmebehandlung

a Papiere an der Luft, raumfeucht
b Papiere an der Luft, ölgetränkt
c Papiere in Öl
d Papiere zwischen den Cu-Platten, raumfeucht
e Papiere zwischen den Cu-Platten, ölgetränkt

AP-35 acetyliertes Papier, 35 % AcOH
P Kabelpapier

VII. Wärmebeständigkeit

Unter Wärmebeständigkeit wird hier die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften infolge einer Wärmebehandlung verstanden. Die Wärmebehandlung kann dabei an freier Luft oder in geschlossenem Raum, aber auch unter Bedingungen erfolgen, die einer Kombination beider Beanspruchungen entspricht. Im ersten Falle ist die Oxydation der Cellulose als Ursache der Alterung, d. h. der Beeinflussung der verschiedenen Eigenschaften, verantwortlich, während bei der Wärmebehandlung in geschlossenem Raum vor allem eine teilweise Zersetzung der Cellulose bei gleichzeitig katalytischer Wirkung gewisser Zersetzungsprodukte stattfindet. Die Wärmebeständigkeit, gemessen nach einer Wärmebehandlung in freier Luft, ist bei acetyliertem Papier wesentlich grösser als bei gewöhnlichem Papier. Im allgemeinen ist sie bei einer Behandlung von 100 h bei 200 °C etwa 5mal grösser als bei Papier, indem acetyliertes Papier noch 60 % der Ausgangsfestigkeit, gewöhnliches Papier hingegen nur noch 12 % seiner ursprünglichen Reissfestigkeit besitzt. Bei der Wärmebehandlung unter anderen Bedingungen hängt es wesentlich von der Qualität und dem Herstellungsverfahren ab, wie sich das Papier nach der Acetylierung bezüglich Wärmebeständigkeit verhält. Einige Resultate von Wärmebeständigkeitsprüfungen einer speziell wärmebeständigen Qualität sind in Fig. 23 wiedergegeben.

Obwohl die erhöhte Wärmebeständigkeit acetylierter Papiere in erster Linie für nicht elektrische Anwendungen von besonderem Interesse ist, gewinnt sie auch auf elektrischem Gebiet immer mehr an Bedeutung, so z. B. für Kabelisolationen, entweder unmittelbar auf dem Leiter von Starkstromkabeln oder für die Umwicklung der Seele unmittelbar unter dem Kabelmantel von Starkstrom- wie auch von Fernmeldekabeln, insbesondere bei bleimantellosen Kabeln (z. B. bei Kabeln mit Aluminiummantel, welcher eine höhere Verarbeitungstemperatur bedingt).

VIII. Anwendungen

Dank der beschriebenen Eigenschaften wäre acetyliertes Papier berufen, auf allen Gebieten der Elektrotechnik gewöhnliches Papier vorteilhaft zu ersetzen. Dem steht jedoch der durch die Acetylierung bedingte höhere Preis entgegen. Acetyliertes Papier muss deshalb sinnvoll, d. h. dort eingesetzt werden, wo seine Vorteile voll zur Geltung gelangen. Die Voraussetzungen sind gegeben, wo es beispielsweise auf besonders gute Feuchtigkeits- und Formbeständigkeit (geringe Quellung, bzw. geringes Schwinden), sowie auf gute Wärmebeständigkeit bei gleichzeitig verbesserten elektrischen Daten ankommt oder wo verbesserte elektrische Eigenschaften der Isolation resultieren, welche mit Papier oder anderen Materialien nicht erreicht werden können.

Als eine besonders erfolgreiche Anwendung sei hier acetyliertes Papier als Trägermaterial für Hartplatten und -Rohre etwas eingehender besprochen:

Bei praktisch unveränderter Verarbeitung gegenüber Papier, werden bei Verwendung von acetyliertem Papier Hartplatten erhalten, welche sich durch einen ausserordentlich hohen Isolationswiderstand, sehr gute Formbeständigkeit, d. h. geringe Quellung bei Feuchtigkeitseinfluss, kleine dielektrische Verluste und sehr gute Hochspannungseigenschaften auszeichnen. Solche Platten übertreffen die bisherigen tropenbeständigen und Hochspannungs-Qualitäten (Fig. 24, 25, 26).

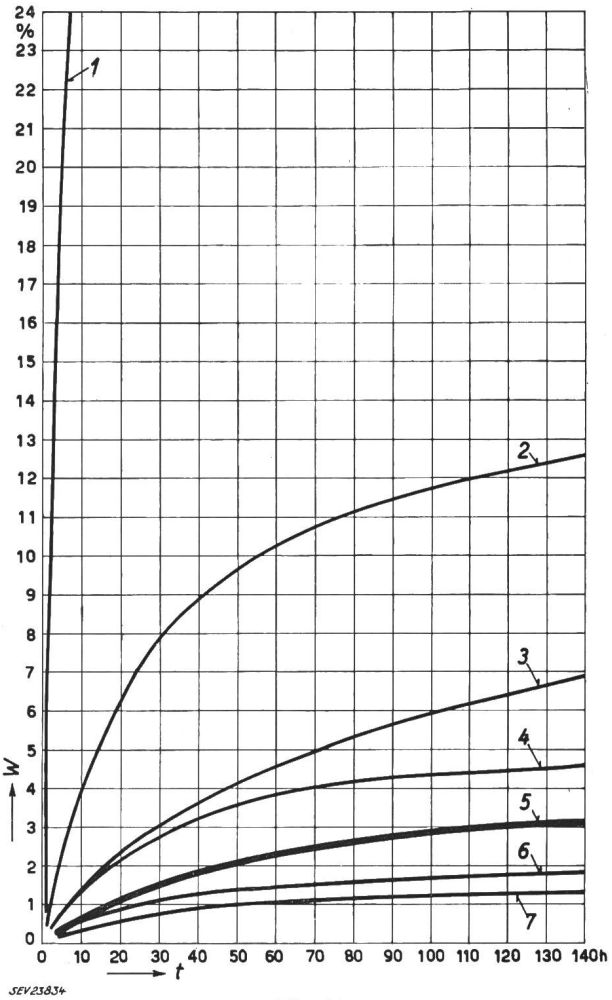


Fig. 24

Wasseraufnahme *W* (in Prozenten des Trockengewichtes) geschichteter Isolierstoffe in Abhängigkeit von der Zeit *t* ihrer Lagerung in Wasser [39]

1 Preßspan; *2* Papier, Fabrikat A; *3* Papier, Fabrikat B; *4* Hadernpapier; *5* acetyliertes Papier (35 % AcOH); *6* Glasseide; *7* Asbest

Während schon im Anlieferungszustand die Vorteile einer mit acetyliertem Papier hergestellten Hartplatte deutlich in Erscheinung treten, wird die Überlegenheit mit zunehmendem Feuchtigkeitseinfluss immer deutlicher (Tabelle III).

Selbst bei besonders guten Hartplatten, bei denen eine sehr gute Durchimprägnierung der Fasern mit einem modifizierten Harz erfolgte, findet eine äusserst langsame Feuchtigkeitsdiffusion statt. Dadurch stellt sich der Zustand der Sättigung erst nach verhältnismässig langer Zeit ein. Aus diesem Grunde tritt nach den normal üblichen Testmethoden mit relativ kurzer Klimatisierung oder Wasserlagerung die grosse Überlegenheit der Hartplatten mit acetyliertem Papier nicht so deutlich in Erscheinung, wie

Daten verschiedener Hartplatten Tabelle III

	Einheit	Plattendicke	Acetylierte Faserbahn			Gewöhnliche (nicht acetylierte) Faserbahn			Bemerkungen
			Gewebe		«Papier»	Gewebe	Papier		
			Crestose		Isocel	Baumwolle	Normalqualität	Spezialqualität	
		mm	30	60	35				
1. *Harz oder Lack* Typ[1])	—	—	A	A	A	A	A	B	[1])
Anteil	Gew. %	—	35...45	35...45	35...45	35...45	35...45	60...65	
2. *Spezifisches Gewicht*	g/cm³	—	1,3	1,25	1,25...1,3	—	1,35...1,4	—	
3. *Biegefestigkeit* längs	kg/mm²	—	13,4	11,2	15	12,7	15/17/18 12[2])		[2])
4. *Schlagbiegefestigkeit* längs ⊥ Schicht	cmkg/	—	—	—	26...32	—	—	—	[3])
‖ Schicht	cm²	—	—	—	23...26	—	—	—	
5. *Stanzbarkeit*	—	—	gut	gut	gut...s. gut	gut	gut	gut	
6. *Wärmebeständigkeit*									
a) Eintritt von Blasenbildung —10°C	°C	1,5	—	—	120...140	—	110...150	—	
b) Einfluss von Wärme (5d 150°C, 11d 180°C) auf Reissfestigkeit: Reduktion um	%	—	—	65	—	79	—	—	
7. *Wasseraufnahme*									
a) nach 96 h Lagerung in Wasser von 20°C	Gew. %	1,0			1,3...3,0		8,8...10		
b) nach 300 h Lagerung in Wasser von 20°C	Gew. %	1,0			3,8		14	9	
8. *Quellung* (prozentuale Dickenzunahme) nach 300 h Lagerung in Wasser von 20°C	%	1,0			2,5		15,2	5,2	
9. *Durchschlagsfestigkeit:*									
⊥ Schicht a) in Luft, 20°C	kV/mm	1,5			21...23		22...24		
b) in Öl, 20°C	kV/mm	1,5			28...35		30		
c) in Öl, 90°C	kV/mm	1,5			32...40		12		
‖ Schicht d) unter Öl, 20°C	kV	25,4(1″)		>67		25...40			
e) unter Öl, 90°C	kV	25,4(1″)	40	>60	>36	5...20	20...25		
f) unter Öl, 90°C[4])	kV	25,4(1″)	35 (28s)	37 (—)	—	20 (15s)			[4])
			30 (34s)	37 (—)	—	15 (60s)			
10. *Isolationswiderstand im Innern* (bei 20°C)									
a) Anlieferungszustand[5])	Ωcm	1			$>5 \cdot 10^{14}$		$2 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^{12}$	[5])
b) nach Klimatisierung bei 80 % *Fr:*									
12d	Ωcm	1			$4{,}5 \cdot 10^{13}$		$1 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{12}$	
122d	Ωcm	1			$3 \cdot 10^{13}$		$5 \cdot 10^{8}$	$4 \cdot 10^{11}$	
c) getrocknet	Ωcm	1			$>5 \cdot 10^{14}$		$5 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{14}$	
d) nach Lagerung in Wasser von 20°C:									
1 h	Ωcm	1			$>5 \cdot 10^{14}$		$9 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{14}$	
24 h	Ωcm	1			$>5 \cdot 10^{14}$		$2 \cdot 10^{9}$	$8 \cdot 10^{13}$	
96 h	Ωcm	1			$6{,}5 \cdot 10^{13}$		$1 \cdot 10^{8}$	$3 \cdot 10^{12}$	
312 h	Ωcm	1			$1 \cdot 10^{13}$		$1{,}5 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{11}$	
11. *Dielektrischer Verlustfaktor* $tg\delta$ (bei 20°C)									
a) Anlieferungszustand[5]) 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1	40...50[6])	10...30	10...12	200...350	160		[5]) [6])
10^6 Hz	$\times 10^{-3}$	1		10...15		280			
$3 \cdot 10^8$ Hz	$\times 10^{-3}$	1		11		300			
b) nach Klimatisierung bei 80 % F_r									
12d 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1		16			436	43	
122d 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1		18			>550	136	
c) getrocknet 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1	12		6,1	345	58	5,1	
d) nach Lagerung in Wasser von 20°C:									
1 h 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1			7,5		205	6	
24 h 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1			10		>550	15	
96 h 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1			18		>550	45	
312 h 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1			32		>550	98	
e) unter Öl: bei 60°C: 5 kV/mm, (trocken) 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1			9...12		16...19	12,5	
f) unter Öl: bei 90°C: 5 kV/mm, (trocken) 50 Hz	$\times 10^{-3}$	1			10...13		34...48	23	
12. *Dielektrizitätskonstante* (bei 20°C)									
a) Anlieferungszustand 50 Hz	—	—	4,2	4,5	4,9	5...8	6,5		
10^3 Hz				3,6...4,3			4,9		
$3 \cdot 10^8$ Hz				3,5...3,8			4,6		

Bei den in dieser Tabelle wiedergegebenen Zahlen handelt es sich um Mittelwerte vergleichender Messungen an Hartplatten verschiedener Fabrikate. Die in einer Zeile gegenübergestellten Daten wurden jeweils unter streng vergleichbaren Bedingungen ermittelt. Hingegen sind einige der unter 1...12 geprüften Eigenschaften nicht an der gleichen Probe ermittelt worden.

[1]) Harz-Typ: A: Phenol-Formaldehyd; Harz-Typ B: Phenol-Formaldehyd, modifiziert.

[2]) Biegefestigkeit: Werte entsprechend den Vorschriften für die Klassen I, II, III, IV.

[3]) Vergleichswerte fehlen.

[4]) Durchschlag ‖ Schichtrichtung: Durchschlags-Spannung (kV), wobei der Durchschlag nach (... s) erfolgte bzw. kein (—) Durchschlag eintrat.

[5]) Anlieferungszustand: Die Bedingungen vor der Anlieferung sind nicht bekannt und können für die gemessenen Proben verschieden sein, d. h. die entsprechenden Vergleichszahlen dürfen nicht ohne weiteres mit den nachfolgenden Resultaten in Beziehung gebracht werden.

[6]) Werte für Crestose-25 (25 % AcOH).

dies nach langdauernder Klimatisierung, entsprechend den tatsächlichen Betriebsverhältnissen, der Fall ist.

In Tabelle III sind vergleichsweise einige Eigenschaften von Hartplatten mit acetyliertem Papier

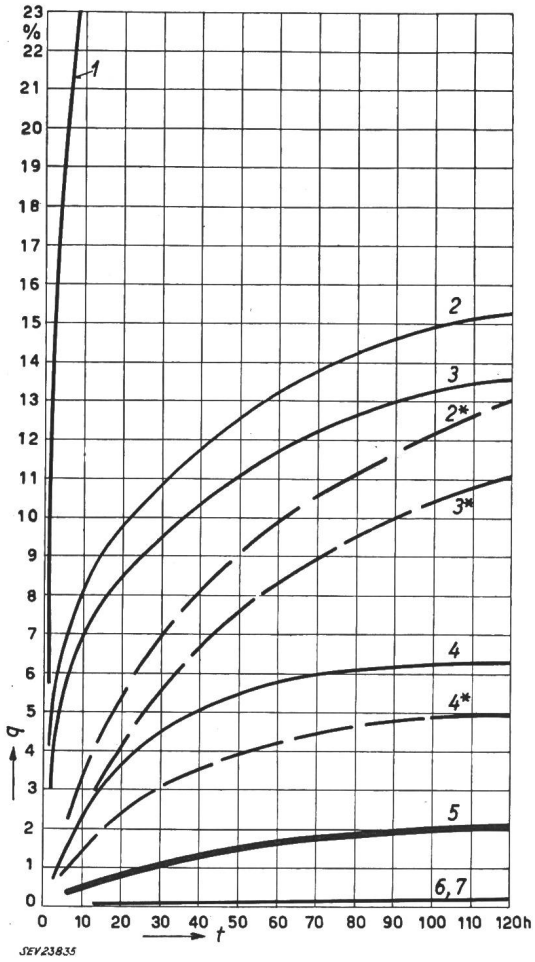


Fig. 25
Quellung q geschichteter Isolierstoffe in Abhängigkeit von der Zeit t ihrer Lagerung in Wasser [39]
1 Preßspan; *2* Papier, Fabrikat A; *3* Papier, Fabrikat B; *4* Hadernpapier; *5* acetyliertes Papier (35 % AcOH); *6* Glasseide; *7* Asbest
Die mit * bezeichneten Kurven beziehen sich auf Platten, deren Schnittflächen mit Lack nachimprägniert wurden

denen von gewöhnlichen Hartplatten bester Qualität gegenübergestellt.

Durch Imprägnierung acetylierter Papiere mit verlustarmen Kunststoffen werden ausserordentlich verlustarme und gut wärmebeständige Hartplatten erhalten.

Sofern besonderer Wert auf hervorragende mechanische Eigenschaften gelegt werden muss, so können selbstverständlich, in Analogie zu den Hartgeweben, auch Hartplatten mit Crestose-Geweben hergestellt werden.

Aus Fig. 12 und 13 ist ersichtlich, dass bei normalen Temperaturen, in trockenem Zustand und bei Frequenzen unterhalb etwa 10^4 Hz, die acetylierten Papiere keine grossen Vorteile bieten (siehe auch [43]). Hingegen ist ihre Anwendung als Kabelisolation von Interesse bei Spezialkabeln (für höhere Betriebsfrequenzen) und bei Kabeln, bei welchen der Bleimantel durch einen Thermoplastmantel ersetzt wird.

Bei vergleichenden elektrischen Messungen unter gleichzeitiger Diffusion von Wasserdampf durch Thermoplaste hat sich überraschenderweise gezeigt, dass die durch die Acetylierung erreichte Verbesserung des Isolationswiderstandes und des Verlustfaktors grösser ist, als auf Grund der allgemeinen Eigenschaften erwartet werden konnte, wenn unter dem Thermoplastmantel nach erreichtem Diffusions-

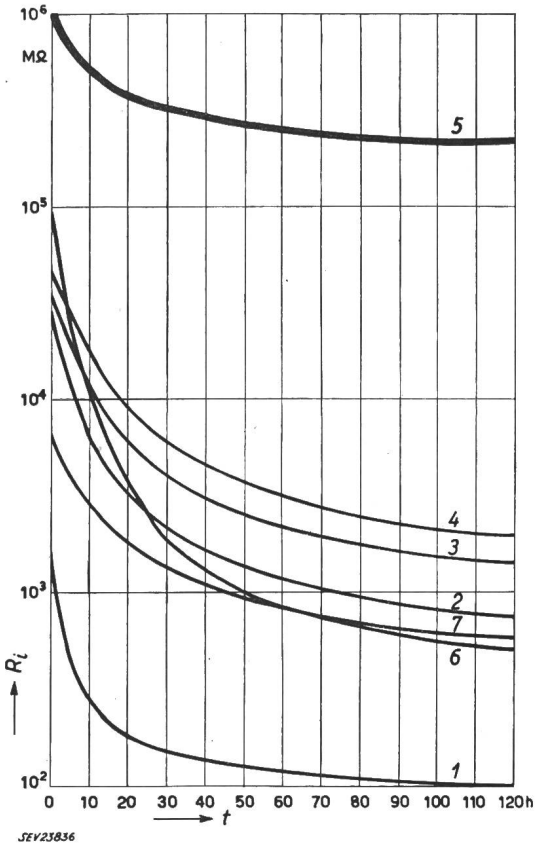


Fig. 26
Isolationswiderstand R_i geschichteter Isolierstoffe in Abhängigkeit von der Zeit t ihrer Lagerung in Luft von 80 % F_r [39]
1 Preßspan; *2* Papier, Fabrikat A; *3* Papier, Fabrikat B; *4* Hadernpapier; *5* acetyliertes Papier (35 % AcOH); *6* Glasseide; *7* Asbest

gleichgewicht gemessen wird. Diese Tatsache wurde bei der Isolation eines bleimantellosen Trägerkabels ausgenützt. Ein solches Trägerkabel normaler Ausführung, jedoch isoliert mit Isocel und Cotopa (Cotopa als Luftraumkordel), wurde mit einem doppelten Mantel aus Polyaethylen (als Feuchtigkeitsschutz) und Polyvinylchlorid (als mechanischer Schutz) umspritzt. Das Kabel zeigte verbesserte elektrische Daten; bei 250 kHz konnte eine um 15 % reduzierte Dämpfung gemessen werden. Ein Stück dieses Kabels wurde sodann vollständig unter Wasser gelegt unter gleichzeitiger periodischer Überwachung der elektrischen Daten der in Reihe geschalteten Adern. Die bisherigen Messungen — die Versuche erstrecken sich bereits über ein Jahr — zeigen keinen Einfluss einer allfälligen Feuchtigkeitsdiffusion.

Literatur

[1] *Whitehead, J. B.:* Impregnated Paper Insulation. New York: Wiley 1935.
[2] *Clark, F. M.:* Factors Affecting the Mechanical Deterioration of Cellulose Insulation. Trans. AIEE Bd. 61(1942), Oktober, S. 742...749.

[3] *Clark, F. M.:* Water Solution in High-Voltage Dielectric Liquids. Trans. AIEE Bd. 59(1940), August, S. 433...441.
[4] *Coquillion, J.:* Le phénomène de dispersion anormale chez les diphényles chlorés. Rev. gén. Electr. Bd. 58(1949), Nr. 1, S. 30...34.
[5] *Clark, F. M.:* Moisture in Oil-Treated Insulation. Industr. & Engng. Chem. Bd. 44(1952), Nr. 4, S. 887...893.
[6] *Piper, J. D.:* Moisture Equilibrium between Gas Space and Fibrous Materials in Enclosed Electric Equipment. Trans. AIEE Bd. 65(1946), Dezember, 791...797; Discussion S. 1152...1155.
[7] *Rheiner, A.:* Die niedrig acetylierten Fasercellulosen. Annuaire des Anciens Elèves E.C.M., année 1933, S. 121...165. Mülhausen.
[8] *Rheiner, A.:* Über niedrig acetylierte Fasercellulosen. Angew. Chemie Bd. 46(1933), Nr. 43, S. 675...681.
[9] *US Pat. 1 861 320,* May 31, 1932. Process for the Preparation of Effect Threads.
US Pat. 1 926 498, September 12, 1933. Process for the Preparation of Effect Threads.
US Pat. 2 017 607, October 15, 1935. Insulated Electrical Conductor.
[10] *Henninger, P.:* Dielektrische Untersuchungen an der Papierfaser. Frequenz Bd. 4(1950), Nr. 7, S. 167...177.
[11] *Stäger, H., B. Frischmuth* und *F. Held:* Beitrag zur Kenntnis der organischen Isolierstoffe der Elektrotechnik. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. Bd. 12(1946), Nr. 12, S. 372...390.
[12] *Veith, H.:* Die Abhängigkeit des Gleichstromwiderstandes und des Verlustwinkels von Papier von dessen Trocknungszustand und Temperatur. Frequenz Bd. 3(1949), Nr. 6, S. 165...173; Nr. 7, S. 216...223.
[13] *Meister, R.:* Luftfeuchtigkeit und Isoliervermögen organischer Isolierstoffe der Hochspannungstechnik. ETZ Bd. 70 (1949), Nr. 12, S. 360...364.
[14] *Meister, R.:* Die Bedeutung des Wärmegleichgewichts bei organischen Isolierstoffen der Hochspannungstechnik. Elektrotechnik, Berlin Bd. 1(1947), Nr. 6, S. 183...186.
[15] *Nauk, G.:* Über den physikalischen Aufbau von Kondensatoren. ETZ Bd. 56(1935), Nr. 13, S. 371...374.
Nauk, G.: Beziehungen zwischen der Temperaturabhängigkeit der Verluste und der Durchschlagsfestigkeit bei Papierkondensatoren. ETZ Bd. 56(1935), Nr. 19, S. 539...541.
[16] *Bletzinger, J. C.:* Effect of Acetylation on Water Binding Properties of Cellulose. Rag. Stock. Industr. & Engng. Chem. Bd. 35(1943), Nr. 4, S. 474...480.
[17] *Hearle, J. W. S.:* The Electrical Resistance of Textile Materials. J. Text. Inst. Bd. 44(1935), Nr. 4, T 117...198.
[18] *Murphy E. J.* und *A. C. Walker:* Electrical Conduction in Textiles. J. phys. Chem. Bd. 32(1928), Nr. 12, S. 1761...1786.
[19] *New, A. A.:* Recent developments in Esterified Fibrous Insulants. Electr. Commun. Bd. 19(1940), Nr. 2, S. 71...93.
[20] *Astbury, W. T.:* Fundamentals of Fibrestructure. Oxford. University Press 1933.
[21] *Miller, H. F.* und *R. J. Hopkins:* A New Kraft Capacitor Paper. Gen. Electr. Rev. Bd. 50(1947), Nr. 12, S. 20...24.
[22] *Mumford, A. H.:* The London-Birmingham Coaxial Cable System. Part. 1: Description of the System. P. O. electr. Engrs. J. Bd. 30(1937), Part. 3 S. 206...214.
[23] *Deloraine, E. M.:* Les câbles coaxiaux haute fréquence. Rev. Téléph. Télégr. T. S. F. Bd. 15(1937), Nr. 155, S. 137...141.
[24] *Deloraine, E. M.:* Conducteur de retour à diamètre constant pour câbles coaxiaux. Rev. Téléph. Télégr. T. S. F. Bd. 15(1937), Nr. 157, S. 321...324.
[25] *Büchner, A.:* Das Mischkörperproblem in der Kondensatorentechnik. Wiss. Veröff. Siemens Werk. Bd. 18(1939), Nr. 2, S. 84...96.
[26] *Stoops, W. N.:* The Dielectric Properties of Cellulose. J. Amer. chem. Soc. Bd. 46(1934), Nr. 7, S. 1480...1483.
[27] *Stamm, H.:* Über den Einfluss der Schichtpreßstoffe auf die Entwicklung der Hochspannungstechnik und über einige Entwicklungsaufgaben. Dtsch. Elektrotechn. Bd. 6 (1952), Nr. 11, S. 558.
[28] *Whitehead, J. B.:* Radial and Tangential Stresses in Impregnated Paper Insulation. Trans AIEE Bd. 70(1951), Part. 1, S. 56...59.
[29] *Luca, H. A. de, W. B. Campbell* und *O. Maass:* Measurement of the Dielectric Constant of Cellulose. Canad. J. Res. Bd. 16, Sec. B(1938), Nr 8, S. 273...288
[30] *Endicott, H. S.:* Electrical Testing of Capacitor Paper. Gen. Electr. Rev. Bd. 52(1949), Nr. 9, S. 28...35.
[31] *Kohman, G. T.:* Cellulose as an Insulating Material. Industr. & Engng. Chem. Bd. 31(1939), Nr. 7, S. 807...817.
[32] *Hansson, B.:* The Dielectric Strength of Oil Impregnated Paper. Asea Research Bd. (1945), S. 106...110.
[33] *Hansson, B., B. Bjurström, R. Johansson* und *G. Axelsson:* The first 380 kV Power Cable in Sweden. Asea J. Bd. 26 (1953), Nr. 5/6, S. 87...96.
[34] *Race, H. H., R. J. Hemphill* und *H. S. Endicott:* Important Properties of Electrical Insulating Papers. Gen. Electr. Rev. Bd. 43(1940), Nr. 12, S. 492...499.
[35] *McLean, D. A., L. Egerton* und *C. C. Houtz:* Paper Capacitors Containing Chlorinated Impregnants. Effects of Sulphur. Industr. & Engng. Chem. Bd. 38(1946), Nr. 11, S. 1110...1116.
[36] *Coquillion, J.:* Condensateurs au papier imprégné de pyralène pour courant alternatif. Facteurs influençant la capacité et les pertes. Rev. gén. Electr. Bd. 61(1952), Nr. 5, S. 205...213.
[37] *Oudin, J.* und *H. Thévenon:* Influence de l'épaisseur des papiers sur l'ionisation des câbles à haute tension. Rev. gén. Electr. Bd. 62(1953), Nr. 12, S. 581...587.
[38] *Guthmann, R.:* Die Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors bei Folien-Papierkondensatoren. ETZ-A Bd. 75 (1954), Nr. 2, S. 45...48.
[39] *Wolf, J.:* Die Isolation in der Nachrichtentechnik. Bull. SEV Bd. 40(1949), Nr. 12, S. 381...390.
[40] *Gerber, Th.:* Sicherungsserien für Hitzdrahtpatronen mit verbesserter Isolation. Techn. Mitt. PTT Bd. 35(1955), Nr. 9.
[41] *Imhof, A.:* Das Hartpapier und die Thermoplaste. Micafil-Nachr. Bd. —(1945), S. 11...14.
[42] *Kappeler, H.:* Fortschritte im Bau von Kondensator-Durchführungen. Micafil-Nachr. Bd. —(1945), S. 1...6.
[43] *Keller, H.:* Das Papier als Dielektrikum in Fernsprechkabeln. Techn. Mitt. PTT Bd. 24(1946), Nr. 2, S. 49...55.

Adresse des Autors:

W. Dieterle, Dr. sc. techn., Wissenschaftliche Laboratorien der Abteilung für chemische Faserumwandlung der Sandoz A.-G., Basel.

Les conditions rencontrées dans les réseaux suisses à 150 kV relatives aux puissances de court-circuit et aux fréquences propres

Rapport d'une enquête entreprise pour le Comité des Interrupteurs de la CIGRE auprès des centrales suisses d'électricité,

par *H. Schiller* et *P. Baltensperger*

621.311.1.027.1 (494) : 621.3.014.3 : 621.3.018.41

I. Introduction

On proposa, lors de la session en 1952 du Comité des Interrupteurs de la CIGRE, d'étudier, pour les différents pays, les conditions déterminant la sollicitation des disjoncteurs existant dans les différents réseaux. Depuis, une première enquête sur les réseaux à 50 kV a été achevée en Suisse, ainsi que le rapport qui en a déjà été publié [1] [1]). En Allemagne, également, la «Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen» a terminé une enquête analogue relative aux réseaux allemands de 50 à 65 kV [2]. De pareilles études sont aussi en cours dans d'autres pays.

En Suisse, le problème relatif aux réseaux de 150 kV a été le sujet de nouvelles études. Il n'est pas nécessaire de donner ici de plus grands éclaircissements sur le caractère même du problème, ce point ayant déjà été traité d'une façon détaillée dans le rapport précédent [1]. Comme auparavant un questionnaire a été soumis aux services des réseaux considérés. Les questions qu'il contient sont semblables à celles de la première enquête. Toutefois, pour les puissances de court-circuit, on a prévu une autre classification. Il n'est donc pas nécessaire de répéter la description du procédé suivi, et seuls les résultats de cette nouvelle enquête sont indiqués ici.

II. Résultat et interprétation de l'enquête

Les résultats de l'enquête se trouvent rassemblés dans le tableau I.

Il est particulièrement intéressant de considérer le nombre des points du réseau, pour lesquels le pourcentage local de la puissance de court-circuit est grande, de même que le nombre des disjoncteurs installés, c'est-à-dire le nombre des disjoncteurs qui ont à déclencher un pourcentage important de leur puissance nominale de coupure, simultanément avec une fréquence propre élevée. On entend dans ce

[1]) voir bibliographie en fin d'article.