

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 5

Artikel: Neuere Erkenntnisse bei der Anwendung acetylierter Papiere in der Elektrotechnik

Autor: Dieterle, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916688>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

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

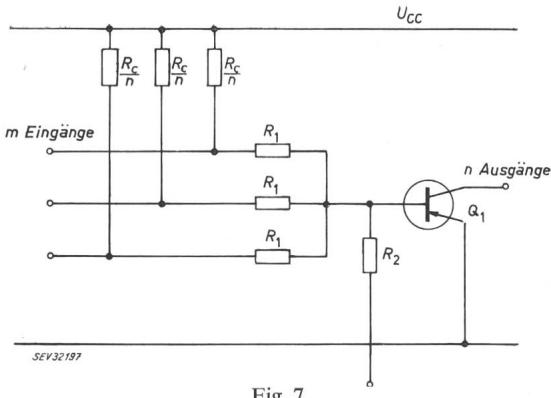


Fig. 7
Modifizierte NOR-Einheit
 R_c/n Kollektorwiderstand

aus maximaler Sättigungsspannung und dem Spannungsabfall der Gatterdiode.

Da der nichtleitende Zustand mit Gatter höhere Anforderungen stellt als ohne Gatter, sollen die Parameter der Gl. (9) und (10) der Stufe mit Gatter entsprechen. Für $U_{o max}$ ist also $U_{S max} + U_D$ zu wählen, wobei U_D die Diodenspannung ist.

Der maximale Strom, der im Kollektor des Transistors fliessen kann, ist [da der Kollektorstrom nicht nur durch R_4 , sondern auch durch n Gatterwiderstände ($R_4 = n'R_3$) fliessen kann]:

$$I_{C max} \approx \frac{U_{CC}(1 + \varepsilon)(n + n')}{R_3(1 - \Delta)n'} \\ \frac{1}{h_{FE}} = \frac{1 - \Delta}{(n + n')(1 + \varepsilon)} [(V_a - V_b)^2 - c] \quad (12)$$

Die Stromverstärkung mit Gatter muss also mindestens zweimal so hoch sein als ohne Gatter.

Beispiel:

$m = n = 3$	$U_{CC} = -24 \text{ V}$
$\varepsilon = 0,1$	$U_{BB max} = U_{BB min} = 12 \text{ V}$
$\Delta = 0,1$	$R_c = 6 \text{ k}\Omega$
$U'_{BE} = -0,6 \text{ V}$	$U_{o max} = -0,7 \text{ V}$
$U'_{BE} = 0,2 \text{ V}$	$U_{o min} = -0,15 \text{ V}$
$I_{BO} = O$	

Neuere Erkenntnisse bei der Anwendung acetylierter Papiere in der Elektrotechnik

Von W. Dieterle, Basel

621.315.614.6

Als Fortsetzung früherer Arbeiten [1; 2; 3]¹⁾, worin vor allem die grundlegenden Eigenschaften von acetyliertem Papier (Isocel) beschrieben wurden, wird über den heutigen Stand der Verwendung dieses hochwertigen Isoliermaterials berichtet. Das Anwendungsgebiet der Schichtstoffe wird — neben den klassischen Kombinationen mit Harzen vom Bakelitypus — durch neuere Kombinationen mit Harzen vom Typus Epoxyd, Polyester, Hydrocarbon usw. in interessanter Weise bereichert.

Es folgen Resultate vergleichender Alterungsversuche. Die Acetylierung erhöht die Wärmebeständigkeit von Papier in einem technisch interessanten Masse. Dank der damit erreichten starken Reduktion der Feuchtigkeitsaufnahme ist die Massbeständigkeit erhöht, die Trocknung erleichtert und wird eine höhere Ionisationseinsatz-Spannung erreicht.

Die chemische Stabilität von acetyliertem Papier steigt mit zunehmendem Reinheitsgrad und mit zunehmendem Acetylierungsgrad der Faser oder des Faserverbandes. Der Einfluss verschiedener in der Elektrotechnik verwendeter Metalle auf die Alterung wurde untersucht. Kupfer und Blei haben den grössten Einfluss auf die Alterung von Cellulose. Erstmals werden auch Zahlen des Verlustfaktors, welche an sogenannten Carbonblack-Papieren, jedoch auf Basis von acetyliertem Papier gemessen

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Diesmal ist

$$a = 0,82; b = 0,15; c = 0$$

und damit

$$h_{FE} \geq 29,1 \text{ bei } R_1 = 15,5 \text{ k}\Omega$$

Diese Stromverstärkung ist für praktische Anwendungen, die hohe Zuverlässigkeit erfordern, etwas hoch. Eine Lösung kann in einer Änderung des Kopplungskreises gefunden werden (Fig. 7). Wird nämlich der Kollektorwiderstand der nächsten Stufe zugeschlagen, dann sinkt — wie man sich leicht überzeugen kann — der maximale Kollektorstrom auf:

$$I_{C max} \approx \frac{U_{CC}(1 + \varepsilon)}{R_c(1 - \Delta)}$$

also auf den gleichen Wert wie für ODER-NICHT-Einheiten ohne UND-Gatter. Damit sinkt auch die kleinste zulässige Stromverstärkung auf die Hälfte, also auf ca. 14, ein Wert, der durchaus realisierbar ist.

7. Zusammenfassung

Eine allgemeine Gleichung für widerstandsgekoppelte logische Elemente wurde abgeleitet und zur Berechnung der kleinsten zulässigen Stromverstärkung für ein ODER-NICHT-(NOR-)Element, das mit einem UND-Gatter kombiniert wurde, benutzt. Dabei zeigte es sich, dass widerstandsgekoppelte ODER-NICHT-Elemente ohne UND-Gatter mit 4 Eingängen und Ausgängen und mit UND-Gatter mit 3 Eingängen und Ausgängen ohne besonderen Aufwand realisierbar sind.

Literatur

- [1] Bachmann, A. E.: Logische Schaltungen mit Transistoren und Dioden. Bull. SEV 53(1962)18, S. 840...846.
- [2] Pierre, D. A.: Switching Circuit Optimization. Solid State Design 3(1962)10, S. 43...46.
- [3] Veith, P.: Grundlagen und Anwendungen der Widerstands-Transistor-Schaltlogik. Elektronik 12(1963)1, S. 3...8.

Adresse des Autors:

Dr. H. Schaffner, Ingenieurbüro für angewandte Elektronik, Luzernstrasse 118, Solothurn.

Faisant suite à des articles publiés ces dernières années [1, 2, 3]¹⁾, où nous exposons plus particulièrement les propriétés fondamentales du papier acétylé (Isocel), nous décrivons dans le présent exposé l'état actuel de l'emploi de ce matériau isolant de haute qualité. Dans le secteur des produits stratifiés, où le papier acétylé permet d'obtenir des résultats remarquables, de nouvelles combinaisons avec des résines époxydes, polyesters, hydrocarbures, etc. offrent d'intéressantes possibilités, autre les combinaisons habituelles ou classiques avec résines du type bakélite.

Les résultats de mesures comparatives détaillées indiquent les conditions relatives au vieillissement. Par l'acétylation du papier une résistance à la chaleur est atteinte qui est techniquelement intéressante. Grâce à la réduction de l'absorption d'humidité la stabilité aux dimensions des papiers acétylés est meilleure, le séchage est plus rapide et on obtient une tension d'ionisation plus élevée. La stabilité chimique du papier acétylé augmente avec le degré de pureté et avec le degré d'acétylation des fibres ou amas de fibres. On a examiné l'influence de divers métaux utilisés fréquemment en électrotechnique sur le vieillissement du papier. Le cuivre et le plomb ont une influence extrêmement mauvaise sur le vieillissement des papiers. Pour la première fois, il nous a été possible d'indiquer des chiffres pour le facteur de pertes, mesuré avec des papiers au noir de fumée, mais à base de papier

werden, wiedergegeben. Dieses hat gegenüber gewöhnlichem Carbonblack-Papier stark reduzierte dielektrische Verluste.

Als Nachteil von acetyliertem Papier sind der durch ein kompliziertes Herstellungsverfahren bedingte höhere Preis sowie die gegenüber gutem Kabelpapier etwas reduzierten mechanischen Daten zu erwähnen. Es bestehen aber Möglichkeiten, diese durch geeignete Nachbehandlung zu verbessern.

1. Einleitung

Acetyliertes Papier wird seit dem Jahre 1955 von der Sandoz AG, Basel, hergestellt und unter dem Namen Isocel vertrieben. Seine Eigenschaften sind weitgehend bekannt und in verschiedenen Arbeiten beschrieben [1, 2, 3, 4] ¹⁾.

Seither ist das Anwendungsgebiet grösser und breiter geworden. Allein auf dem Sektor der Elektrotechnik wird es auf den Gebieten der Fernmeldetechnik, der Hochfrequenztechnik, der Hochspannungs- und Starkstromtechnik gebraucht. Dementsprechend liegen auch die Probleme, die in den Entwicklungs- und Applikationslaboratorien zu lösen sind. Da, wo man es mit anderen Stoffen zusammen verwendet und wo Fragen der Alterung usw. zu untersuchen sind, werden naturgemäss auch chemische Fragen berührt. Dass bei allen diesen Untersuchungen auch die Physik mitspielt, macht diese Probleme besonders interessant.

Die vorliegende Arbeit soll über einige neuere Anwendungen von Isocel in der Elektrotechnik orientieren, wobei hauptsächlich über Resultate, gemessen am Material selbst, d. h. aus eigenen Versuchen, berichtet wird. Daneben werden aber auch Resultate aus z. T. ganz verschiedenen Anwendungsgebieten, welche von der Industrie oder in gemeinsamer Zusammenarbeit mit Interessenten des In- und Auslandes erarbeitet wurden, wiedergegeben. Wo immer möglich, wurden die Versuche vergleichend durchgeführt, wobei den acetylierten Papieren, entsprechend dem jeweiligen Anwendungsgebiet, die geeignetsten Isolierpapiere gegenübergestellt wurden.

Was die Herstellung bzw. die Chemie des acetylierten Papiers und dessen Eigenschaften betrifft, sei hier auf die diesbezügliche Veröffentlichung [1] verwiesen. An dieser Stelle sei lediglich nochmals und mit aller Deutlichkeit festgehalten, dass es sich dabei nicht nur um eine Imprägnation der Papierbahn oder dergleichen, sondern um eine grundlegende Veränderung des Cellulosemoleküls handelt. Man spricht von einer chemischen Umwandlung des Papierblattes unter Erhaltung der Faserstruktur, wobei im besonderen die Umwandlung eine Acetylierung ist. Das Resultat dieser Acetylierung ist schliesslich eine teilweise bis vollständige Blockierung der Hydroxylgruppen. Diese sind weitgehend für das Verhalten der Cellulose, insbesondere gegenüber Feuchtigkeit, verantwortlich. Durch die Blockierung dieser Gruppen werden die Eigenschaften der Cellulose weitgehend verändert. Wenn man sich gleichzeitig die ausserordentlich grosse Oberfläche eines Papierblattes vorstellt, dann ist auch sofort begreiflich und klar, welche Bedeutung der Blockierung der vielen Hydroxylgruppen zukommt.

Die wohl wichtigste Beeinflussung als Folge der Acetylierung bezieht sich auf das Feuchtigkeitsverhalten des Faserbandes. Da die meisten elektrischen Eigenschaften durch die Feuchtigkeit sehr stark, und zwar immer nachteilig beeinflusst werden, kommt dieser Behandlung, dank der damit erzielten Verbesserung der elektrischen Eigenschaften, das

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

acetylé. L'Isocel au noir de fumée présente des pertes nettement plus faibles que le papier au noir de fumée normal.

Les inconvénients du papier acetylé sont son prix plus élevé, motivé par le procédé de fabrication relativement compliqué, et ses caractéristiques mécaniques un peu moins bonnes que celles du papier pour câbles. Un traitement approprié permettra toutefois d'y remédier.

Hauptgewicht zu. Durch das Procedere der Acetylierung wird aber nicht nur der Feuchtigkeitseinfluss ausgeschaltet, sondern es werden — da die Struktur des Cellulosemoleküls grundlegend verändert worden ist — auch im trockenen Zustand die elektrischen Daten günstig beeinflusst. In diesem Zusammenhang sei im besonderen auf die Reduktion der Dielektrizitätskonstante und des dielektrischen Verlustfaktors im Gebiet höherer Frequenzen oder höherer Temperaturen hingewiesen. Diese Vorteile werden an anderer Stelle besprochen. Als Folge der geringeren Aufnahme von Feuchtigkeit wird ein wesentlich leichteres und schnelleres Trocknen und eine in interessantem Masse erhöhte Dimensionsbeständigkeit einer mit acetyliertem Papier aufgebauten Isolation erreicht. Gleichzeitig darf hier bemerkt werden, dass sich acetyliertes Papier in technologischer Hinsicht wie gewöhnliches Papier verarbeiten lässt. Es lässt sich mit allen in Frage kommenden Mitteln, wie Mineralölen, chlorierten Ölen, Gasen, Kunstarzten etc. imprägnieren. Insbesondere in chlorierten Ölen bietet es vorzügliche Beständigkeit, und die Kombination mit Harzen wie z. B. vom Typus Bakelit, Melamin, Polyester, Epoxy, Hydrocarbon usw. ergibt interessante Resultate.

Je nach der gewünschten Anwendung wird Isocel bis heute in ca. 12 verschiedenen Qualitäten hergestellt, mit denen, wie die Praxis bestätigt hat, die gebräuchlichsten Anforderungen weitgehend befriedigt werden können.

Die Herstellung von Isocel setzt ein sehr kompliziertes Verfahren, lange Erfahrung und hohe Investitionen voraus. Deshalb bedingt dieses Material gegenüber Kabelpapier einen höheren Preis. Daraus geht hervor, dass acetyliertes Papier hauptsächlich für Spezialanwendungen verwendet wird, nämlich für solche Fälle, wo neben den sehr guten elektrischen Eigenschaften eine vorzügliche Dimensionsbeständigkeit, hohe Klimabeständigkeit, beste Fungusbeständigkeit, hohe Alterungsbeständigkeit und dergleichen verlangt werden.

2. Neuere Anwendungen von Isocel

Es sollen nun einige wenige, aber typische Anwendungen von Isocel beschrieben werden:

2.1 Anwendung für Schichtpreßstoffe

Isocel wird hauptsächlich als Trägermaterial für Hartpapiere einer verbesserten Klasse IV oder einer verbesserten Klasse XXXP oder XXXPC verwendet. Die damit erreichten Vorteile sind im wesentlichen:

Hoher Isolationswiderstand;
Reduzierte Dielektrizitätskonstante;
Kleinere dielektrische Verluste;
Geringe Abhängigkeit dieser Grössen von Feuchtigkeit und Temperatur.

Es ist sehr interessant, in diesem Zusammenhang die Wasseraufnahme derartiger Platten und deren elektrische Daten zu betrachten. Im allgemeinen erreicht man mit Hartplatten auf Basis Isocel eine stark reduzierte Wasserauf-

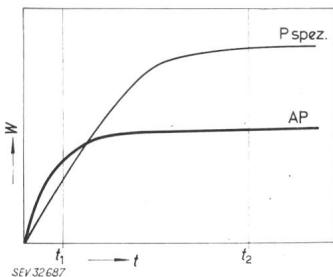


Fig. 1
Genereller Verlauf der Wasseraufnahme W in Funktion der Konditionierungsdauer t
(Wasserlagerung 20°C)
für Hartplatten, welche auf Spezialpapier P spez. bzw. auf acetyliertem Papier AP (Isocel-35) als Trägermaterial basieren
Harze: Bakelittypus, modifiziert

nahme. Dabei ist es allerdings möglich, dass nach kurzzeitiger Feuchtlagerung an den mit Isocel als Träger gefertigten Platten ein höherer Wassergehalt gemessen wird gegenüber solchen Platten, welche beispielsweise Baumwollpapier als Träger haben. Wird hingegen die Messung nach längerer Klimatisierungszeit durchgeführt, dann ist der Wassergehalt in der Hartplatte auf Basis Isocel ein kleinerer. Um eine Platte mit vorzüglicher Stanzbarkeit zu erhalten, kann bei Verwendung von Isocel als Träger eine Hartplatte mit geringerem Harzgehalt und trotzdem besten dielektrischen Werten gefertigt werden. An solchen Platten kann dann der Verlauf des Wassergehaltes in Funktion der Konditionierungsdauer, gemäss Fig. 1, gemessen werden.

Wird der Wassergehalt nach der Zeit t_1 (t_1 sei beispielsweise nach 24, eventuell aber auch noch nach 96 h) gemessen, so wird in der Platte mit Isocel im allgemeinen ein höherer Wassergehalt als in der Platte mit Spezialpapier festgestellt werden. Man hat sich dabei zu überlegen, dass der Vorgang der Wasseraufnahme einer Diffusion durch das verwendete Imprägnierharz gleichkommt. Bis zur Erreichung des Feuchtigkeitsgleichgewichtes durch Diffusion wird natürlich eine gewisse Zeit benötigt. Wird aber nach längerer Konditionierungsdauer gemessen, beispielsweise zur Zeit t_2 , dann werden die Verhältnisse umgekehrt, indem dann die mit Isocel hergestellte Platte gegenüber der Platte mit Papier oder Spezialpapier einen kleineren Wassergehalt aufweist.

In diesem Zusammenhang sei aber auch noch auf einen anderen interessanten Umstand hingewiesen. In letzter Zeit wurden, im Rahmen umfangreicher Versuche, Hartplatten verschiedener Fabrikate des In- und Auslandes vergleichend geprüft. Dabei hat sich gezeigt, dass selbst bei Hartplatten, hergestellt einerseits mit Isocel, anderseits mit Spezialpapier, die aber gleichen Wassergehalt haben (weil der Harzgehalt verschieden war), die mit Isocel gefertigte Platte wesentlich bessere elektrische Daten aufweist (Fig. 2 und Tabelle I).

Feuchtigkeitsgehalt und dielektrische Eigenschaften (Isolationswiderstand im Innern R_i und dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$) von Hartplatten mit Spezialpapier P spez. und acetyliertem Papier AP (Isocel-35)

Tabelle I

	Feuchtigkeitsgehalt F %	R_i $\Omega \text{ cm}$	$\tan \delta$ bei 100 Hz $\times 10^{-3}$
AP-35/70	3,8	$7,5 \cdot 10^{12}$	38
P spez. 1 (α -Cell.)	3,7	$1 \cdot 10^9$	> 600
P spez. 2 (α -Cell.)	3,8	$4 \cdot 10^8$	> 600

Harz: Typus Epoxy: Harzgehalt; Platte mit P spez. 50%
Platte mit AP 35%

Daraus geht hervor, dass in der Isocelplatte die Art der Wasseranlagerung oder -bindung anders sein muss als in

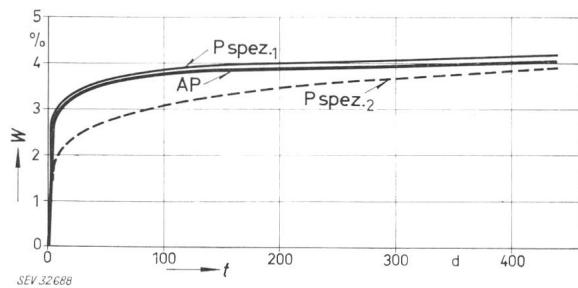
einer Platte mit nicht acetyliertem Papier. Mit den Fig. 1 und 2 sei versucht, die allzu grosse Bedeutung, welche man der Wasseraufnahme primär entgegenbringt, zu entkräften. Es wäre richtiger, die Folgen der Wasser- oder Feuchtigkeitsaufnahme und deren Einfluss auf Isolationswiderstand, Oberflächeneigenschaften, Dielektrizitätskonstante, Verlustfaktor, elektrische Korrosion, Dimensionsänderung (Quellung) usw. zu beachten.

Dank den typischen Eigenschaften der mit Isocel gefertigten Platten, haben diese besonders für gedruckte Schaltungen Interesse gefunden. Auf diesem Gebiet dürfte bisher die grösste Anwendung von Isocel liegen. Durch ein besonderes Verfahren, wobei zwischen Kupferfolie und Isolation eine feine Glasmatte eingelegt wird, kann eine besonders hohe Haftfestigkeit der Kupferfolie und eine sehr gute Lötfestigkeit erreicht werden. Es ist gelungen, mit Isocel gefertigte, kupferkaschierte Hartplatten herzustellen, welche eine Kupferhaftfestigkeit von 4...6 kg/2,5 cm Streifenbreite und eine Lötfestigkeit bei 250 °C von 5 s erreicht haben.

Während die meisten Anwendungen für Hartplatten immer noch in Kombination mit einem Harz vom Typus Bakelit, natürlich in verschiedenen Modifikationen, bestehen, wurden in letzter Zeit aber auch andere Harze erfolgreich mit Isocel verarbeitet (Melaminharze, Epoxyharze, Polyesterharze und in jüngster Zeit auch Harze vom Typus Hydrocarbon). Besonders die Anwendungen in Kombination mit Epoxy ergaben interessante Werte (Tabellen II und III).

Neben der möglichen Verwendung als Klasse-IV-Platten haben solche Hartpapierprodukte speziell für Hochspannungszwecke Interesse gefunden. In diesem Zusammenhang sei an Resultate erinnert, gemessen an Durchführungen, welche auf Basis Isocel gefertigt wurden (Fig. 3).

Nachdem sich nun auch auf dem europäischen Kontinent die Möglichkeit der Einführung des Farbfernsehens abzu-



Verlauf der Wasseraufnahme W in Funktion der Dauer t der Lagerung in Wasser für Hartplatten, welche auf Spezialpapier P spez., bzw. auf acetyliertem Papier AP (Isocel-35) als Trägermaterial basieren

Harzgehalt der auf Isocel basierenden Platten: ca. 40%
Harzgehalt der auf Spezialpapier (Baumwollpapier) basierenden Platten: ca. 50...55%. Harz: Bakelittypus, modifiziert.

Trägermaterial	$\tan \delta$ bei 100 Hz $\times 10^{-3}$	R_i $\Omega \text{ cm}$
	nach 440 Tagen in H_2O dest.	
Pspez.1	> 600	$7,7 \cdot 10^9$
AP	90	$8,2 \cdot 10^{12}$
Pspez.2	> 600	$1,4 \cdot 10^{10}$

Entsprechend dem verschiedenen Harzgehalt haben die Platten am Ende der Wasserlagerung etwa gleich viel Wasser aufgenommen. Trotzdem zeigen die mit acetyliertem Papier gefertigten Platten wesentlich bessere elektrische Eigenschaften

Vergleichende Messungen an Hartpapierplatten mit acetyliertem Papier AP (Isocel-35), Papier P bzw. Spezialpapier P spez. und Epoxyharz.

Derart aufgebaute Hartpapierplatten ergeben eine gute Kaltstanzarkeit, Kennwert 2 nach DIN 53488

Wasseraufnahme und Biegefestigkeit nach Kochen in Wasser, Einfluss einer Konditionierung auf die dielektrischen Daten. (Versuche der Ciba AG und der Sandoz AG)

Tabelle II

Träger Material	Zusammensetzung der Laminierharzmischung			Harzgehalt %	Dicke mm	Biegefestigkeit nach Dynstat			Durchgangswiderstand Ωcm	Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3}$			
	Araldit-Harz	Härter	Be-schleu-niger			An-geliefert	nach 1 h in kochendem Wasser	Erhalte-ne-gebliebe-ne Bi-gefestig-keit %		10 ² Hz trocken	65 Tage in 80 % r.F. trocken	10 ⁶ Hz trocken	65 Tage in 80 % r.F. trocken
Isocel-35/70 AP ₁	A	C	F	36	1,67	1625	1516	93	2,5	$> 5 \cdot 10^{14}$	$7,3 \cdot 10^{13}$	4,3	28
Isocel-35/70 AP ₁	B	D	G	35	1,92	1516	1428	94	3,6	$> 5 \cdot 10^{14}$	$1,4 \cdot 10^{14}$	6,5	22,8
Isocel-35/70 AP ₁	A	E	—	35	1,5	1184	1214	102	2,9	$> 5 \cdot 10^{14}$	$7,3 \cdot 10^{12}$	7,3	38
Isocel-35/70 HC AP ₁	A	E	—	32	1,6	1234	1129	91	2,8	$> 5 \cdot 10^{14}$	$7,3 \cdot 10^{12}$	7,2	33
Isocel-35/70 gebl. AP ₂	A	E	—	38	1,55	1464	1388	95	2,7	$> 5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{12}$	7,7	55
Isocel-35/50 C AP ₃	A	E	—	34	1,19	924	924	100	3,5	$> 5 \cdot 10^{14}$	$8,9 \cdot 10^{12}$	7,5	38
Isocel-35/50 CHC AP ₃	A	E	—	32	1,13	1243	1118	90	3,9	$> 5 \cdot 10^{14}$	$7,2 \cdot 10^{12}$	7,5	44
Kraft-Papier P ₁	A	E	—	25	1,14	1581	697	44	19,6	$3 \cdot 10^{13}$	$2,8 \cdot 10^8$	37	> 600
Kraft-Papier P ₂	A	E	—	39	1,45	1733	1183	68	13,4	$5,9 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^8$	26	> 600
Kraft-Papier P ₃	A	E	—	42	1,37	1611	1239	76	9,5	$1,1 \cdot 10^{14}$	$7,6 \cdot 10^8$	14,6	> 600
Spez.-Papier P spez. 1 (α -Cell.)	A	E	—	49	1,34	1293	926	75	6,0	$2 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^9$	16,8	> 600
Spez. paper P spez. 1 (α -Cell.)	A	E	—	45	1,7	1469	1140	78	5,6	$3,9 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^8$	33	> 600

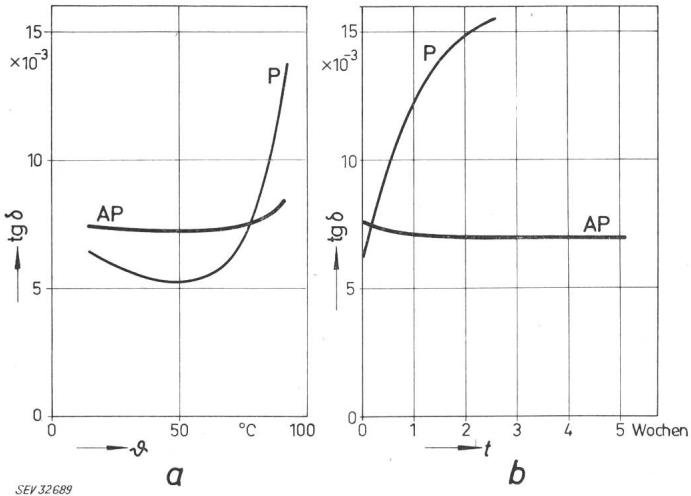


Fig. 3

Vergleichende Verlustmessungen an Hochspannungsdurchführungen, gewickelt mit acetyliertem Papier AP (Isocel-35) und Kabelpapier P

a Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ in Funktion der Temperatur θ , gemessen bei 30 kV, 50 Hz, unter Öl

b Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ in Funktion der Dauer t der Konditionierung (90% r. F.) gemessen bei 30 kV, 50 Hz, unter Öl [4]

Vergleichende Messungen von Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ und Durchschlagfestigkeit $U_{S/d}$ an Hartpapierplatten aus Isocel und Epoxy bzw. Baumwollpapier und Epoxy

Tabelle III

Elektrische Eigenschaften	Einheit	1 mm Dicke Epoxy Hartplatten (Araldit F + 972) mit	
		Acetyliertem Papier Isocel-35 AP	Spezial-Papier P spez.
$\operatorname{tg} \delta$, 50 Hz, 5 kV	$\cdot 10^{-3}$	13,4...14,8	23
$\operatorname{tg} \delta$, 50 Hz, 10 kV	$\cdot 10^{-3}$	12,7...15,7	—
Durchschlagfestigkeit 50 Hz momentan	kV/cm	820...845	550
nach 1 min. Belastung	kV/cm	445...470	350

zeichnen beginnt, sind bereits erste Anfragen erfolgt, ob und mit welchem Resultat acetyliertes Papier als Trägermaterial für verlustarme Hartplatten bei sehr hohen Frequenzen —

man hat mit etwa 1000 MHz zu rechnen — verwendet werden könnten. Diese Anfragen beziehen sich zweifelsohne auf die bisher an Isocel gemessenen und publizierten Werte des Verlustfaktors und der Dielektrizitätskonstante in Funktion der Frequenz. Tatsächlich sind diese Werte bei acetyliertem Papier und bei hohen und höchsten Frequenzen kleiner als bei gewöhnlichem Papier und anderen in Frage kommenden Trägermaterialien. Orientierungshalber wurden deshalb erste entsprechende Versuche zur Herstellung von verlustarmen Hartplatten durchgeführt, wobei allerdings die Messungen aus apparativen Gründen bei 3000 MHz durchgeführt werden mussten. Tabelle IV gibt einen Auszug dieser Messungen wieder.

Vergleichende Messungen der Dielektrizitätskonstante ϵ_r und des Verlustfaktors $\operatorname{tg} \delta$ von Hartplatten mit verschiedenem Aufbau für sehr hohe Frequenzen

Tabelle IV

Aufbau	Dielektrizitätskonstante ϵ_r	Dielektrische Verlustziffer $\epsilon_r \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3}$	
		bei 3000 MHz	
Spezial Papier (P spez.) + Phenol	2,8...3,1	112...150	
Isocel-35 (AP) + Phenol	2,8...3,1	71...80	
Spezial Papier (P spez.) + Epoxy	2,8...2,9	88...101	
Isocel-35 (AP) + Epoxy	2,9...3,0	71...86	
Cotopa-60 (AC) + Polystyrol	2,7	39	
Glas + Epoxy	3,7...4,3	56...76	
Glas + Melamin	4,0	96	
Glas + Silicon	4,0	24	
Glas + Hydrocarbon	4,1	25	
Glas + Terylene	2,7	8	
Polystyrol	2,5	3	
Teflon	1,9	0,25	
Polyaethylen	2,3	0,9	
Isocel + verlustarmes Harz (z.B. Hydrocarbon)	2,5...3	25...30 ¹)	

Die Messungen erfolgten im lufttrockenen Zustand der Prüflinge.

¹) Solche niederen Werte der Verlustziffer $\epsilon_r \operatorname{tg} \delta$ bei Verwendung von Isocel und einem verlustarmen Harz sind möglich, wobei aber stets zu bedenken ist, dass Isocel — als organisches Produkt — eine dementsprechend beschränkte Temperaturbeständigkeit hat.

2.2 Isocel für Transformerboard

Über die Anwendung von Isocel in Transformatoren wird an anderer Stelle dieser Arbeit berichtet. Dabei findet, nebst anderen Vorteilen, vor allem die erhöhte Wärmebeständigkeit grosses Interesse. Im Anschluss an die erwähnte Herstellung von Hartplatten mit Isocel dürfte es jedoch angebracht sein, das Anwendungsgebiet «Transformerboard» an dieser Stelle zu behandeln.

Sofern in Transformatoren ein thermisch höher beständiges Papier oder generell eine thermisch höher beständige Isolation erfolgreich verwendet werden soll, muss dieses Prinzip — optimale Wärmeverteilung innerhalb des Transformators vorausgesetzt — konsequenterweise für alle Isolationsteile angewendet werden. Es lag daher nahe, Transformerboard, wie er für die Distanzstücke und die grossen Isolierzylinder verwendet wird, ebenfalls aus Isocel herzustellen. Nun ist aber bekannt, dass Transformerboard seine mechanische Festigkeit dank der Wasserstoffbindung der Cellulose erreicht. Das übliche Verfahren zur Herstellung von Transformerboard mit acetylierter Cellulose ist wegen der spezifischen Eigenschaften von Isocel — vor allem seiner stark reduzierten Feuchtigkeitsaufnahme — nicht anwendbar. Man hat deshalb nach einer anderen Herstellungsart für Transformerboard und transformerboardähnlichem Material zu suchen. Eine Möglichkeit liegt in der punktweisen Lackierung und anschliessenden, der Herstellung von Hartpapierplatten ähnlichen, Aushärtung und Verklebung. Dieses Material ist dank seiner nur punktweisen Verklebung ohne weiteres mit Ölen und anderen gebräuchlichen Imprägniermitteln imprägnierbar. Je nach der verwendeten Faserbahn, d. h. nach deren Dichte und Luftdurchlässigkeit, kann ein eher weiches bis ein klingend hartes Material erhalten werden. Seine Herstellung ist sowohl in Form von Platten als auch in Form von Rohren möglich. Fig. 4 zeigt einige auf Basis Isocel nach diesem Verfahren herge-

stellte Produkte. Derart gefertigte Platten oder Rohre haben Eigenschaften, welche zwischen denen des Trägers und einer mit diesem Träger gefertigten Hartplatte liegen. Besondere Kennzeichen dieses Materials sind, neben den guten elektrischen Daten, die erhöhte Dimensionsbeständigkeit und die Möglichkeit einer leichteren, rascheren und besseren Trocknung. Selbstverständlich können für die Fertigung alle möglichen Harztypen verwendet werden. Die bisherigen Versuche wurden auf Basis Bakelitharz durchgeführt, doch dürfte speziell die Kombination mit Epoxyharzen gute Resultate ergeben.

2.3 Isocel als Isolation in Transformatoren

2.3.1 Messtransformatoren

Für kleinere Typen von Messtransformatoren bis zu einer Spannung von etwa 20...30 kV wird Isocel als Lagenisolation, hergestellt im Paralellwickelverfahren, mit trockener Imprägnation verwendet. Dafür kommen hauptsächlich Epoxyharze in Frage. Die Verhältnisse liegen ähnlich wie bei der generellen Anwendung von Isocel in Hartplatten:

Im speziellen werden gute Dimensionsbeständigkeit, rasches und leichtes Trocknen sowie gute Konstanz der elektrischen Werte unter Einfluss äusserer Bedingungen, insbesondere von Feuchtigkeit und Temperatur, verlangt. In grösseren Typen von Messtransformatoren, wo zu ölimprägniertem Papier übergegangen wird, liegen die Verhältnisse in elektrischer Hinsicht ähnlich wie sie später für die Isolation in Gross- und Leistungstransformatoren beschrieben werden.

2.3.2 Isocel als Isolation in Leistungs- und Grosstransformatoren

Während bei dieser Anwendung einige der typischen Eigenschaften von Isocel erwünscht sind, hat sich in den letzten Jahren, besonders angeregt durch die Entwicklungen in den USA, das Verlangen nach einem besonders wärmebeständigen Papier vermehrt gestellt. In Europa wird der Forderung nach höherer Temperatur und Alterungsbeständigkeit noch nicht diese Bedeutung beigemessen, wie das in den USA der Fall zu sein scheint. Man verhält sich eher beobachtend, verfolgt alle Entwicklungen, macht auch Alterungsversuche, um auf dem laufenden zu sein und um gegebenenfalls im richtigen Moment in diese Entwicklung eingreifen zu können. Daneben wird aber der steten Verbesserung der Isolation, d. h. auch den kleineren Details, besondere Aufmerksamkeit geschenkt. So werden beispielsweise einer geringeren Feuchtigkeitsaufnahme, einer leichteren und besseren Trocknung, einer erhöhten Dimensionsbeständigkeit (wobei insbesondere die Dimensionsbeständigkeit in transversaler Richtung in Frage kommt), einer guten Ölauflnahme und Durchimprägnierung, guten dielektrischen Eigenschaften und insbesondere auch den Fragen der Ionisation vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt. Die Praxis der verschiedenen Fabrikanten ist dabei recht verschieden, indem der eine vor allem grosses Gewicht auf bessere Dimensionsbeständigkeit legt, ein anderer vielleicht die leichtere und bessere Trocknung in den Vordergrund stellt, weil die für Grosstransformatoren erforderlichen Anlagen vielleicht gerade einen Engpass in seiner Fabrikation darstellen, usw.

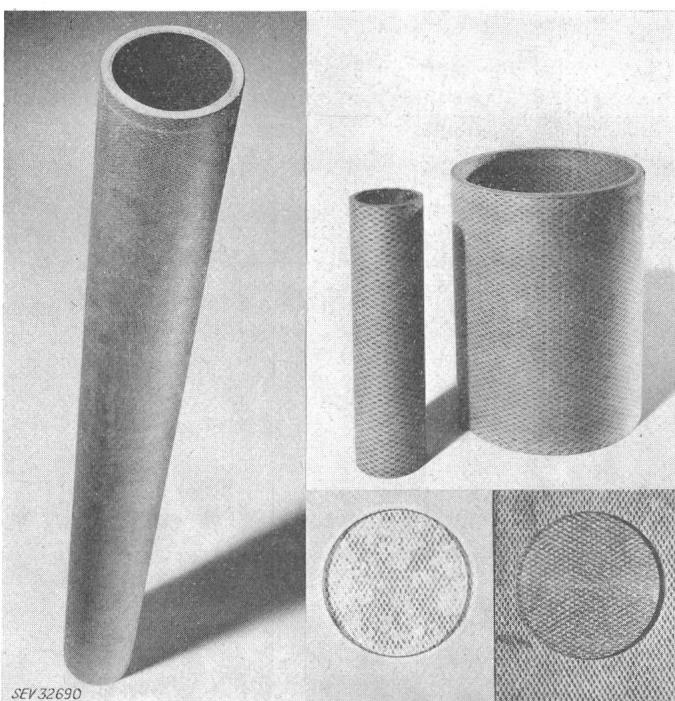


Fig. 4

Punktweise verklebte (imprägnierbare) Platten und Rohre
Hergestellt mit Isocel-35

3. Isocel als wärmebeständiges Papier

Als Herstellerin der acetylierten Papiere hat Sandoz AG, Basel, die Entwicklung der «thermally upgraded papers»

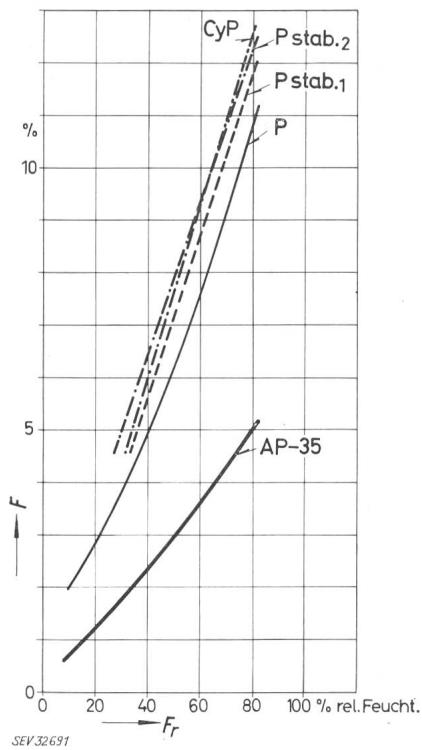


Fig. 5
Feuchtigkeitsaufnahme F von Isolierpapier und wärmebeständigen Papieren in Funktion des Konditionierungsgrades F_r
Bezeichnungen siehe im Text

verfolgt. Nachdem die ersten Muster solcher Papiere zur Verfügung standen, konnten vergleichende Messungen über die Alterungsbeständigkeit durchgeführt werden.

Es darf in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass die Wärmebeständigkeit acetylierter Produkte schon frühzeitig erkannt wurde. Acetylierte Garne und Gewebe werden wegen ihrer höheren Hitzebeständigkeit und geringeren Braunfärbung beispielsweise als Überzüge für elektrische Mängeln usw. verwendet.

Zur Frage der Wärme- oder Alterungsbeständigkeit seien nun einige Resultate vergleichender Messungen wiedergegeben, welche an verschiedenen Papiere durchgeführt wurden. In allen Figuren sind die gleichen Bezeichnungen für das gleiche Produkt verwendet, nämlich

- P für Kabelpapier;
- Pspez. für spezielles Isolierpapier, wie z. B. α -Papier, Baumwollpapier usw.;
- AP für acetyliertes Papier, normalerweise, wo nichts anderes vermerkt ist, die handels-übliche Qualität mit 35 % gebundener Essigsäure (Isocel-35);

Massbeständigkeit von Isolierpapieren und wärmebeständigen Papieren gemessen in der Laufrichtung der Papiermaschine (längs) und quer dazu

Tabelle V

Konditionierung	Gemessen in Richtung	Dimensionsänderung bezogen auf die Dimension im trockenen Zustand ¹⁾ %				
		AP	P	P stab1	CyP	P stab2
4 Tage bei 65 % r. F.	längs	0,5...1,0	2...3	—	—	—
	quer	1...4	2...8	—	—	—
6 Tage bei 80 % r. F.	längs	0...2	3...4	1,4	2,6	1,1...1,8
	quer	1...4	6...16	11	13	25,5
6 Tage bei 98 % r. F.	längs	0,7...3,0	3,2...4,6	2,2	2,6	1,8...2,5
	quer	5...7	15...31	27	30	61,5
2 min in H ₂ O, dest.	längs	0,5...3,5	5...10	2,2	2,5	1,5
	quer	5...14	10...80	40	63	89,5

¹⁾ Minimal- bis Maximalwerte, welche an den verschiedenen Qualitäten und Mustern gemessen wurden.

CyP für cyanoäthyliertes Papier, ein ebenfalls chemisch modifiziertes Papier (mit 2,6 % N) [5; 6]; Pstab. für chemisch stabilisierte, meist mit Melamin, Dicyandiamid und Polyacrylamid in bestimmten Verhältnissen behandelte Papiere [6; 7; 8], wobei es sich offensichtlich um eine Weiterentwicklung und Verbesserung eines früher versuchten Verfahrens handelt, bei welchem solche stabilisierenden Produkte in Öl gelöst wurden. Die Indices 1...4 weisen auf verschiedene Verfahren und Hersteller hin.

An diesen Papiere, soweit sie im Zeitpunkt der Durchführung der Versuche jeweils zur Verfügung standen, wurden vorerst in vergleichenden Messungen Feuchtigkeitsaufnahme, Dimensionsbeständigkeit und dielektrische Eigenchaften unter dem Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur bestimmt. Fig. 5 zeigt den Verlauf der Feuchtigkeitsaufnahme in Funktion des Konditionierungsgrades, und Fig. 6 gibt die Verhältnisse über die Dimensionsbeständigkeit der verschiedenen Papiere in transversaler Richtung — was wohl als die wichtigste für die Verwendung in Transformatoren anzusprechen ist — wieder. Über die Massbeständigkeit in Richtung längs und quer der Papierbahn gibt Tabelle V Aufschluss. Die Kurven der Fig. 7...10 zeigen das dielektrische Verhalten der verschiedenen wärmebeständigen Papiere.

Fig. 7 enthält die Darstellung des Verlustfaktors und Fig. 8 den Verlauf des spezifischen Isolationswiderstandes in Funktion des Konditionierungsgrades. Fig. 9 und 10 zeigen Verlustfaktor und Isolationswiderstand in Funktion

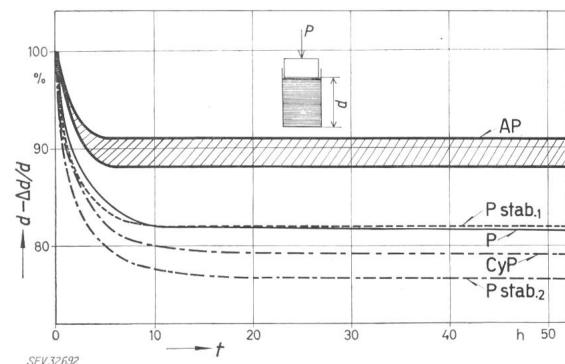


Fig. 6
Dimensionsbeständigkeit in transversaler Richtung von Isolierpapieren und wärmebeständigen Papieren

Δd Abnahme der Dicke d einer Isolation während des Trocknungsvorganges; t Dauer der Trocknung; P konstante Kraft (Feder); d totale Dicke der Isolation (etwa 100 mm bei Beginn der Messung). Bis zum Beginn der Trocknung wurden die Papiere bei 80 % relativer Feuchtigkeit konditioniert; Trocknungstemperatur: 110 °C

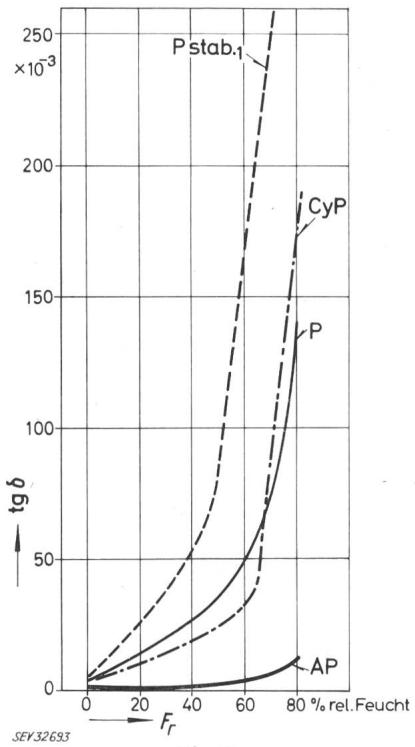


Fig. 7
Dielektrische Eigenschaften von Isolierpapieren und wärmebeständigen Papieren

Papiere nicht imprägniert. Dielektrischer Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ (bei 100 Hz und 20°C) in Funktion des Konditionierungsgrades F_r
Bezeichnungen siehe im Text

der Temperatur und Fig. 11 das Verhalten betreffend Durchschlagfestigkeit sowohl bei 50 Hz (momentan) als auch bei Stoß in Funktion der Luftdurchlässigkeit der verschiedenen Papiere.

Bei Verwendung von Isocel besteht die Möglichkeit, damit eine höhere Ionisationseinsatzspannung zu erreichen. Entsprechende Messungen wurden beispielsweise in England

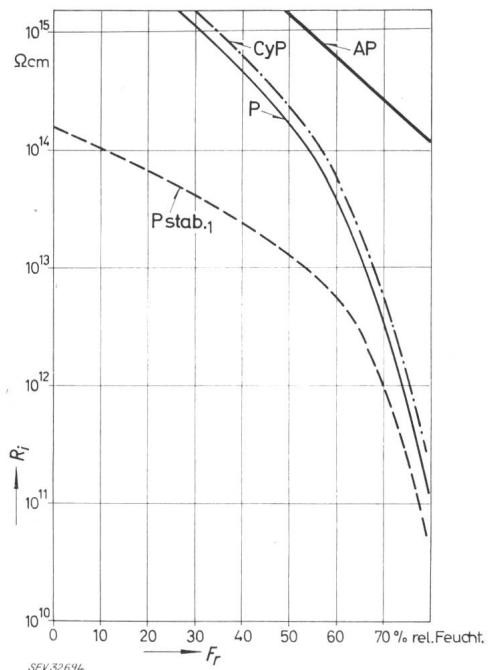


Fig. 8
Dielektrische Eigenschaften von Isolierpapieren und wärmebeständigen Papieren

Papiere nicht imprägniert. Spezifischer Isolationswiderstand R_i (bei 20°C) in Funktion des Konditionierungsgrades F_r
Bezeichnungen siehe im Text

(Electrical Research Association) durchgeführt [9]. Diese Autoren haben als Resultat ihrer Untersuchungen, kurz zusammengefasst, folgendes gefunden:

In einer gut imprägnierten, von Luft oder Gaseinschlüssen freien Ölspapierisolation beginnt die Entwicklung von Gasen bei einer kritischen Feldstärke. Diese ist deutlich abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt des Papiers. Das zuerst entwickelte Gas stammt von einer Zersetzung des an den Cellulosemolekülen angelagerten Wassers, wobei das Imprägniermittel praktisch keinen Einfluss hat. Die weitere Entwicklung von Gasen, welche aus der Zersetzung des Öls stammt, ist ein sekundärer Effekt, welcher von der Ionisation in Gasbläschen, die vorher (primär) entstanden sind, abhängt. Untersuchungen des grundlegenden primären Vorganges lassen vermuten, dass das von der Cellulose absorbierte Wasser in Gebieten hoher Feldstärke durch Elektronenbombardement ionisiert und dann elektrochemisch zerstört wurde.

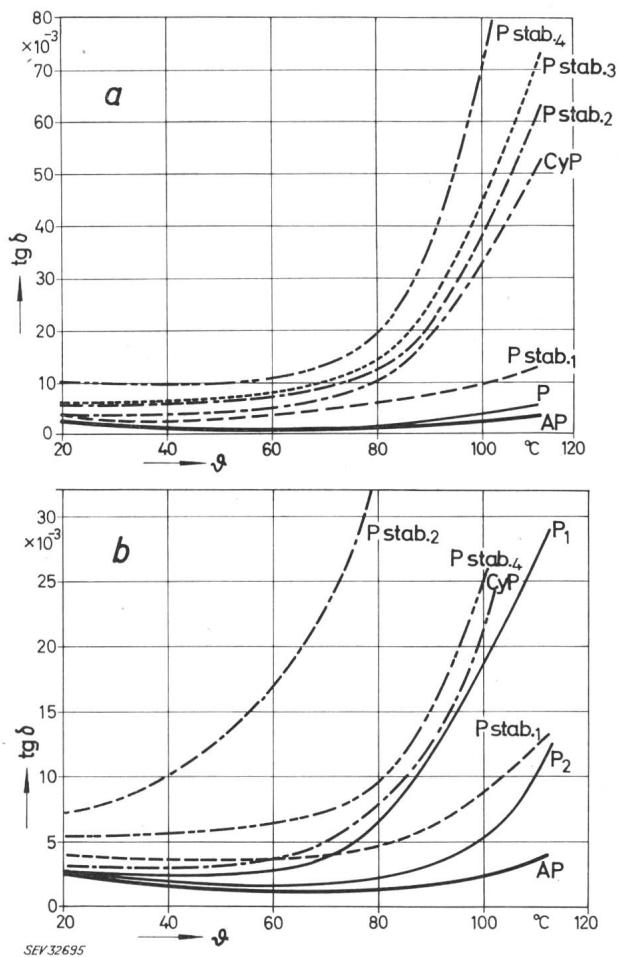


Fig. 9
Dielektrische Eigenschaften von Isolierpapieren und wärmebeständigen Papieren

a dielektrischer Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ (bei 60 Hz) in Funktion der Temperatur θ . Papiere nicht imprägniert

b dielektrischer Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ (bei 60 Hz) in Funktion der Temperatur θ . Papiere ölimprägniert

Bezeichnungen siehe im Text

Daraus wurde gefolgert, dass bei Verwendung von imprägniertem acetyliertem Papier, welches entsprechend seinem Gehalt an gebundener Essigsäure einen niederen Feuchtigkeitsgehalt hat, dieses nach Erreichung des Feuchtigkeitsgleichgewichtes mit der Umgebung eine höhere Ionisationseinsatzspannung haben sollte.

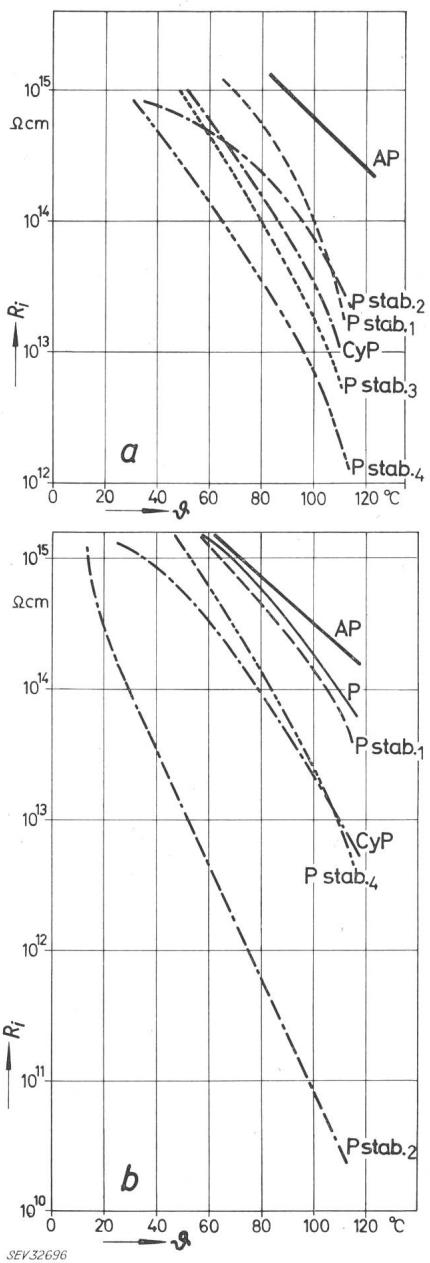


Fig. 10

Dielektrische Eigenschaften von Isolierpapieren und wärmebeständigen Papieren

- a spezifischer Isolationswiderstand R_i in Funktion der Temperatur θ .
Papiere nicht imprägniert
 - b spezifischer Isolationswiderstand R_i in Funktion der Temperatur θ .
Papiere ölimprägniert
- Bezeichnungen siehe im Text

Tatsächlich konnte dieses Verhalten durch die Autoren der genannten Arbeit bestätigt werden, indem nach einer Konditionierung bei 75 % r. F. bei Isocel eine 4mal höhere Ionisationseinsatzspannung als bei Papier gemessen wurde. Dieser Konditionierungsgrad ist zugegebenermaßen sehr hoch und dürfte den praktisch vorkommenden Verhältnissen nur in seltenen Fällen entsprechen. In weiteren Versuchen ist deshalb abzuklären, wie sich die Verhältnisse bei kleinen Feuchtigkeitsgraden verhalten. Es ist noch festzustellen, welcher Anteil der Erhöhung der Ionisationseinsatzspannung bei der Verwendung von Isocel dem reduzierten Feuchtigkeitsgehalt und welcher der besseren Feldverteilung zuzuordnen ist. Die Dielektrizitätskonstante der acetylierten Faser ist gegenüber derjenigen der nicht acetylierten Cellulosefaser in einem Verhältnis von etwa 6 auf 4,75 entsprechend

einem Grad von 35 % geb. Essigsäure reduziert. Diese Reduktion gilt für trockene Fasern [1]. Dass dabei aber allfällig vorhandene Feuchtigkeit, welche an der Faser angelagert ist und dabei eine weitere Erhöhung der Dielektrizitätskonstante der Faser und damit des Papierblattes verursacht, auf die Feldverteilung einen nachteiligen Einfluss hat, ist bekannt. Die Verhältnisse der Beeinflussung der Dielektrizitätskonstante eines Papierblattes und eines Isocelblattes gehen aus Fig. 12 hervor. Den Fragen der Ionisation wird denn auch tatsächlich vermehrte Bedeutung beigegeben und der kritische Punkt einer hochbeanspruchten Öl-Papierisolation scheint eher bei der Ionisation als bei der Stoßfestigkeit oder bei der kurzzeitigen elektrischen Festigkeit zu liegen.

Acetylierte Papiere haben eine höhere Trocknungs geschwindigkeit. Da bei einer acetylierten Faserbahn praktisch nur noch das Kapillarwasser entfernt werden muss, das chemisch gebundene Wasser, dessen Beseitigung bekanntlich mehr Mühe und Aufwand verursacht, jedoch als Folge der Acetylierung stark reduziert worden ist, kann eine derart aufgebaute Isolation wesentlich leichter, rascher und mit geringerem Energieaufwand getrocknet werden. Da die Bedeutung einer guten Trocknung für die Qualität der Isola-

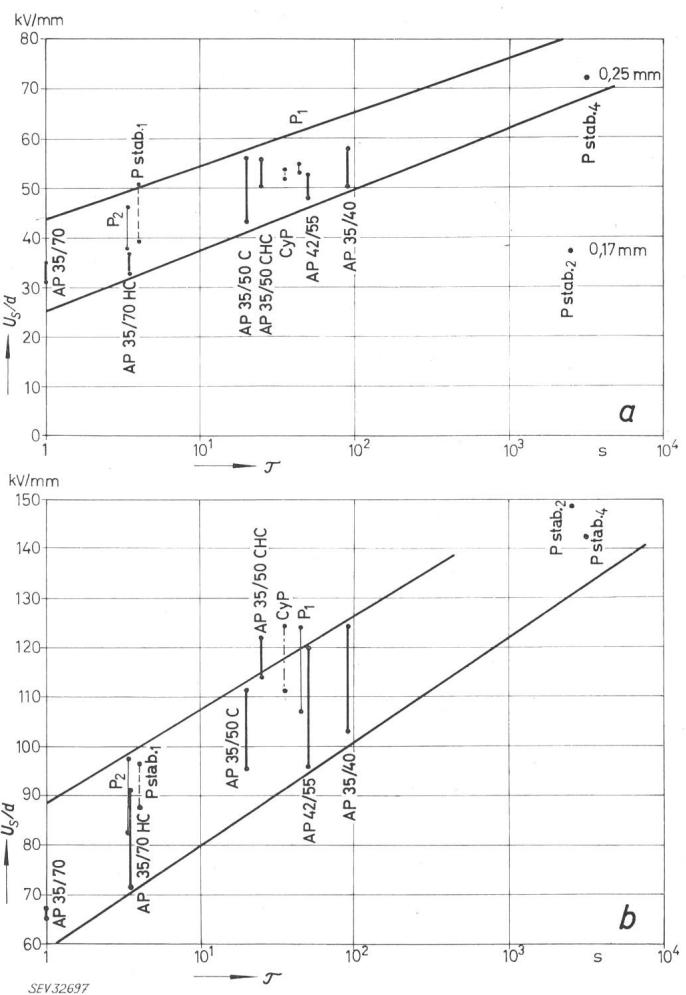


Fig. 11

Elektrische Festigkeit U_s/d von Isolierpapieren und wärmebeständigen Papieren

in Funktion ihrer Luftdurchlässigkeit τ (nach Bekk), gemessen bei 0,2 mm und 0,4 mm totaler Isolationsdicke. (Pstab.2 0,17 mm, Pstab.4 0,25 mm)

- a Durchschlagsfestigkeit bei 50 Hz; b Stoßfestigkeit 1|50
- Bezeichnungen siehe im Text

tion, besonders für deren Alterung, allgemein bekannt ist, wird auch diesem Punkt entsprechendes Gewicht beigemessen. Ein Fabrikant von Grosstransformatoren, der den Trocknungsvorgang durch dielektrische Messungen verfolgt und kontrolliert hat (Fig. 13), stellte fest, dass die Trocknungszeit für die mit acetyliertem Papier gewickelte Isolation etwa 10mal kürzer ist als die Zeit, die zur Trocknung einer mit Papier gleich aufgebauten Wicklung notwendig ist bei sonst gleichen Bedingungen betreffend Vakuum und Temperatur. Selbstverständlich hängt der Gewinn beim Trocknen von Fall zu Fall von den Trocknungsbedingungen, ganz besonders aber auch vom Aufbau der Isolation ab.

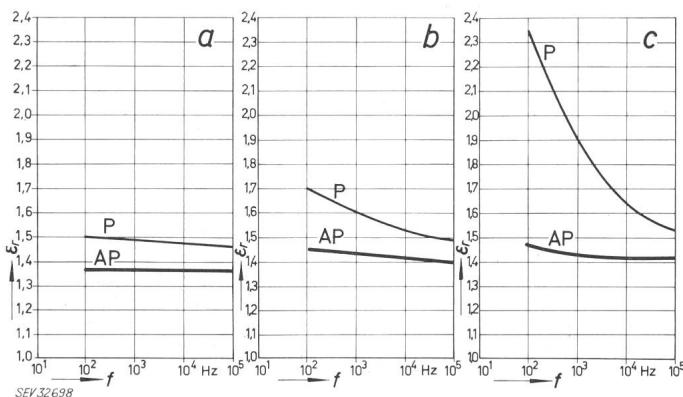


Fig. 12

Erhöhung der Dielektrizitätskonstante ϵ_r infolge Feuchtigkeitseinfluss

Dielektrizitätskonstante ϵ_r (bei 20°C) von acetyliertem Papier AP (Isocel-35) und Kabelpapier P in Funktion der Frequenz f für verschiedene Konditionierungsgrade. Generelles Verhalten
a Isolation trocken; b Isolation bei 50 % r.F. konditioniert; c Isolation bei 80 % r.F. konditioniert

Schliesslich sei noch kurz das Verhalten von acetylierten Produkten in chlorierten Ölen erwähnt. Solche Versuche wurden von Herstellern chlorierter Öle selbst durchgeführt und ergaben, dass acetylierte Produkte gleiche, eher aber bessere Beständigkeit in chlorierten Ölen haben als nicht acetylierte Cellulose. Als Beispiel kann folgender Test angeführt werden (Tabelle VI).

Verhalten acetylierter Produkte in chlorierten Ölen

Tabelle VI

a) Acetylierte Baumwolle AC (Cotopa) in Pyroclor			
Eine Woche bei 100°C. gelagert (Messungen Monsanto, England)			
	Spezifischer Durchgangswiderstand Pyroclor $\Omega \text{ cm}$	Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ Pyroclor $\cdot 10^{-3}$	Aussehen Pyroclor
Pyrocolor-Kontroll-Test	$2,6 \cdot 10^{12}$	1,2	unverändert
Cotopa Q-30 (AC-30)	$5,1 \cdot 10^{11}$	10	unverändert
Cotopa Q-60 (AC-60)	$8,2 \cdot 10^{11}$	5	unverändert

b) Acetyliertes Papier AP (Isocel-35) und Papier P, Presspan P spez. und Glas-Seide in Pyralen	
13 ccm des zu prüfenden Musters in 500 ccm chloriertem Öl (Pyralen) während 96 h bei 100°C gelagert (Messungen Prodelec, Lyon)	
	Verlustfaktor $\text{tg } \delta$, 50 Hz 100°C Pyralen $\cdot 10^{-3}$
Isocel AP ₁	29
Isocel AP ₂	26,5
Kabel Papier P ₁	42
Kabel Papier P ₂	31,5
Kabel Papier P ₃	177
Presspan P spez. 1	21,5
Presspan P spez. 2	27,5
Glas-Seide	nicht messbar

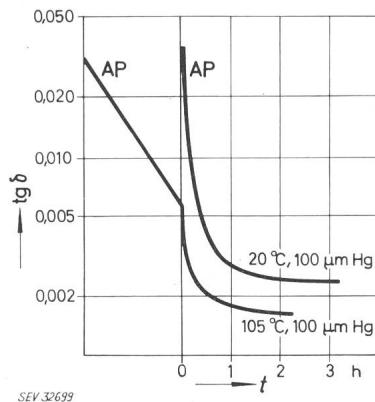


Fig. 13
Dielektrischer Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ (bei 50 Hz) in Funktion der Trocknungszeit t

Kurve links: Trocknung bei 105°C, anschliessend bei 105°C und 100 $\mu\text{m Hg}$

Kurve rechts: Trocknung bei 20°C und 100 $\mu\text{m Hg}$
Isolation: Acetyliertes Papier (AP); Isolationsdicke 1 mm

4. Alterungsverhalten von Isolierpapieren

Unter Alterung sei dabei ganz allgemein die Erfassung der Veränderung (Zerstörung) der Isolation als Resultat von chemischen, physikalischen, elektrischen und mechanischen Beeinflussungen während des Betriebes verstanden. Es dürfte nützlich sein, hier einige ganz allgemeine Bemerkungen betreffend Alterung ölimprägnierter Cellulose festzuhalten. Eine elektrische Isolation wird im allgemeinen durch Feuchtigkeit, Wärme, elektrisches Feld, mechanische Beanspruchung und chemische Einflüsse, wie z. B. korrosive Gase, Dämpfe, Verschmutzung etc. gealtert. Dabei ist es wohl möglich, durch besondere Massnahmen einige dieser Entwicklungen ganz oder teilweise zu beseitigen, man kann aber nicht den Einfluss der Wärme von der Isolation fernhalten. Dieser Einfluss kann sowohl reversibel sein — wie z. B. die Beeinflussung der elektrischen oder physikalischen Größen mit der Temperatur — als auch irreversibel, wobei im Speziellen an die Oxydation, Zersetzung, Depolymerisation, Gewichtsabnahme etc. zu denken ist. Wer sich mit diesem Problem beschäftigt, weiss, dass die Alterungsvorgänge eher unübersichtlich, ja sogar recht komplex sein können. Dieser Umstand wird bei Transformatoren z. B. noch dadurch erhöht, dass das heisse und damit meist dünnflüssige Transformatorenöl, welches ja zugleich Isolier- und Kühlmedium und in grossen Mengen vorhanden ist, durch seine zwangsläufige Umlaufung mit den verschiedensten festen und flüssigen Materialien in innigen Kontakt kommt.

Die Forderung nach höherer Temperaturbeständigkeit für die Isolation von Leistungstransformatoren ist verständlich, wenn man sich überlegt, dass mit steigender Transformatormasse die Beherrschung des Wärmeproblems immer schwieriger wird, da die in einem Transformatormasse erzeugten Verluste letzten Endes vom Gewicht und damit von der dritten Potenz der linearen Abmessungen des Transformatormasse abhängen, die Kühlung aber nur durch die wirksame Oberfläche und damit nur von der zweiten Potenz der linearen Abmessungen beeinflusst wird. Mit dem Übergang zur festen Isolation ist das Interesse für die Erhöhung des Wärmedurchschlages, der Alterungsbeständigkeit und der Lebensdauer der Transformatorenisolation nochmals weiter gestiegen. Dabei scheint es vor allem die mechanische Beanspruchung zu sein, welcher vor der thermischen Bela-

stung, beispielsweise im Falle eines Kurzschlusses, vermehrte Beachtung zu schenken ist, weil im Zuge der Alterung der Isolierstoffe die Vorspannkräfte und damit die Kurzschlussfestigkeit der Isolation nachlassen. Die Massnahmen bezüglich Spannungssicherheit, kurzzeitig und langfristig, können dabei u. U. etwas in den Hintergrund treten. Die Übertemperatur des Öles hat einen starken Einfluss auf die örtliche Erwärmung einer Wicklung. Ausserdem findet zwischen dem freien Öl, wenn es als Kühlmittel funktioniert, und dem Öl im Papier ein Ausgleich durch Diffusionsvorgänge statt, wobei vor allem die feste Isolation durch Ein- und Anlagerung von Alterungsprodukten zusätzlich gefährdet werden kann. Alle diese Probleme sind ja reichlich bekannt, weshalb hier nicht weiter auf dieses Alterungsverhalten einer Transformatorenisolation eingegangen werden soll.

Zusammenfassend und um die weiteren Ausführungen verständlich zu machen, sollen aber die folgenden Punkte in Erinnerung gerufen werden:

a) Der Einfluss verschiedener Temperaturbehandlung und der damit verbundenen Alterungserscheinung ist additiv.

b) Die Alterungsprodukte verschiedener Komponenten können die Alterung der anderen Komponenten beeinflussen. An diese Tatsache ist besonders bei der Anwendung des Lebensdauergesetzes für Klasse-A-Produkte (nach Montsinger) zu denken, welches diesem Umstand nicht Rechnung trägt.

c) Cellulose kann sowohl als Folge einer Oxydation wie auch durch eine pyrochemische Zersetzung zerstört werden. Meistens sind beide Ursachen an der Zerstörung beteiligt.

d) Bei der Oxydation von Cellulose entstehen u. a. wasserlösliche, organische Säuren.

e) Die Hydroxylgruppen des Cellulosemoleküls können zu COOH-Gruppen oxydiert und bei genügender thermischer Behandlung u. a. als Wasser abgespalten werden.

f) Der schädliche Einfluss der Oxydation von Cellulose auf die mechanischen Eigenschaften bezüglich Depolymerisation ist wesentlich verstärkt, wenn Feuchtigkeit — selbst in kleinsten Spuren — in der Cellulose vorhanden ist. Die thermische Zersetzungsgeschwindigkeit von Papier ist dem Feuchtigkeitsgehalt proportional.

g) Wasser oder Feuchtigkeit hat im Vergleich zu Sauerstoff einen stärkeren Einfluss bezüglich Depolymerisation einer ölimprägnierten Cellulose-Isolation, weil das Öl nur den Sauerstoff, nicht aber das Wasser von der Papierfaser abzuhalten vermag.

h) Die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit sind gelegentlich, weil die Feuchtigkeit mit zunehmender Temperatur abnimmt. Es ist daher zu überlegen, ob — entgegen der allgemeinen Ansicht — es nicht möglich ist, dass an Stelle der Temperatur des «hottest-spot» eine mittlere Temperatur für die Alterung verantwortlich ist.

i) Ionisation und andere Einflüsse können die Zersetzungsprodukte von Cellulose aktivieren und damit deren Zersetzung beschleunigen. Meistens aber führen diese Erscheinungen zu einem starken Ansteigen des Verlustfaktors und damit zum vorzeitigen Durchschlag.

k) Bezuglich Oxydation kann ein deutlicher Unterschied festgestellt werden zwischen imprägnierter (beispielsweise lackierter) und nicht imprägnierter Cellulose, was selbstverständlich auf den Kontakt der Cellulosefasern mit dem die Isolation umgebenden und die Oxydation verhindern Medium zu erklären ist.

l) Eine anfängliche thermische Behandlung der Cellulose kann u. U. deren elektrische Eigenschaften vorerst bis zu einem gewissen Grade verbessern. Eine weitere Behandlung führt schliesslich zum Zerfall der Molekülstruktur, wobei aber im allgemeinen die Zerstörung in mechanischer Hinsicht wesentlich rascher erfolgt als in elektrischer Hinsicht, d. h. eine solche Isolation kann in mechanischer Hinsicht bereits ganz oder nahezu zerstört sein und doch sind ihre ursprünglichen elektrischen Eigenschaften noch erhalten, so lange ihr geometrischer Aufbau noch intakt ist.

m) Cellulose kann auch beim Fehlen von Sauerstoff oder bei Abschluss von einer die Oxydation fördernden Atmosphäre zerstört werden. Bei ölimprägnierter Cellulose z. B. ist die Oxydation von untergeordneter Bedeutung. Die Zerstörung erfolgt hauptsächlich als pyrochemische Zersetzung. Bei der Erhitzung

ölimprägnerter Cellulose entstehen proportional der Temperatur und der Zeit H_2O und CO_2 , wobei die Bildung von Säuren u. a. abhängig ist vom Reinheitsgrad (Gehalt an α -Cellulose) der Faser.

n) Die Zerstörung kann dabei direkt als Folge dieser pyrochemischen Zersetzung als auch indirekt durch den Einfluss der Zersetzungsprodukte eintreten.

Die Stabilität einer ölimprägnierten Papierisolation kann demzufolge sowohl von der Komponente Öl als auch von der Seite Papier, wie aber natürlich auch durch gleichzeitige Verbesserung beider Komponenten erzielt werden.

Alle diese Massnahmen sind aber nur dann sinnvoll, wenn die Isolation sorgfältig getrocknet, entgast und imprägniert wird. Die grosse Bedeutung einer einwandfreien, sorgfältigen und nicht allzu stark forcierten Trocknung ist heute allgemein anerkannt und beschrieben [11].

Von der Ölseite her zu treffende Massnahmen, wie richtige Auswahl des Öles, optimaler Raffinationsgrad, sorgfältige Entgasung und Trocknung sowie Verwendung inhibitorischer Öle seien hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Weitere Möglichkeiten zur Verbesserung einer ölimprägnierten Papierisolation liegen in der Erhöhung der Altersbeständigkeit des Papiers, was durch chemische Modifikation, d. h. durch Blockierung der für die Alterung hauptsächlich verantwortlichen Hydroxylgruppen [1; 5] oder durch eine Behandlung mit stabilisierenden Mitteln erreicht werden kann [6; 7; 8].

Bei der Herstellung von Isocel, welches — wie eingangs erwähnt wurde — ein chemisch umgewandeltes, verestertes Papier ist, wurde der erste Weg gewählt. Über die dadurch erreichte Erhöhung der Wärmebeständigkeit geben einige Alterungsversuche Bescheid. Dabei wurde, in Anlehnung an die allgemein gebräuchliche Praxis, als Alterungskriterium die Beeinträchtigung mechanischer Eigenschaften verwendet. Dies darf ohne weiteres getan werden, nachdem gezeigt werden konnte, dass die Abnahme einer mechanischen Größe — man verwendet vorwiegend und vorteilhafterweise die Reissfestigkeit — mit der Depolymerisation sinngemäss in gleicher Richtung verläuft (Fig. 14a).

Der Durchschnitts-Polymerisationsgrad DP gibt die mittlere Zahl von Glukoseringen des Cellulosemoleküls an. Übliche Isolerpapiere haben etwa 1000...1500 Glukoserringe. Baumwollpapier und Linters haben jedoch wesentlich höhere Werte. Bei der Prüfung bzw. bei der Bestimmung des Polymerisationsgrades (gem. Norm AFNOR NF T

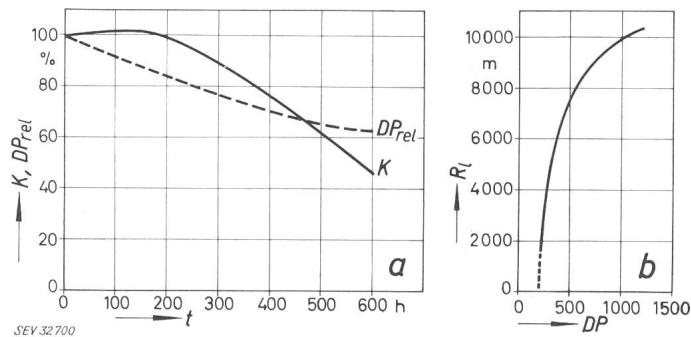


Fig. 14
Abbau des Zellulosemoleküls

(Durchschnitts-Polymerisationsgrad)

- a) erhalten gebliebene Reissfestigkeit K und Depolymerisation (Durchschnitts-Polymerisationsgrad) DP_{rel} (relative Werte, bezogen auf den Ausgangszustand) in Funktion der Dauer t der Alterung. Alterungstemperatur 130°C, Papiere ölimprägniert
- b) Zusammenhang zwischen Reissfestigkeit (Reisslänge R_i) und Durchschnitts-Polymerisationsgrad DP (genereller Verlauf) [12]

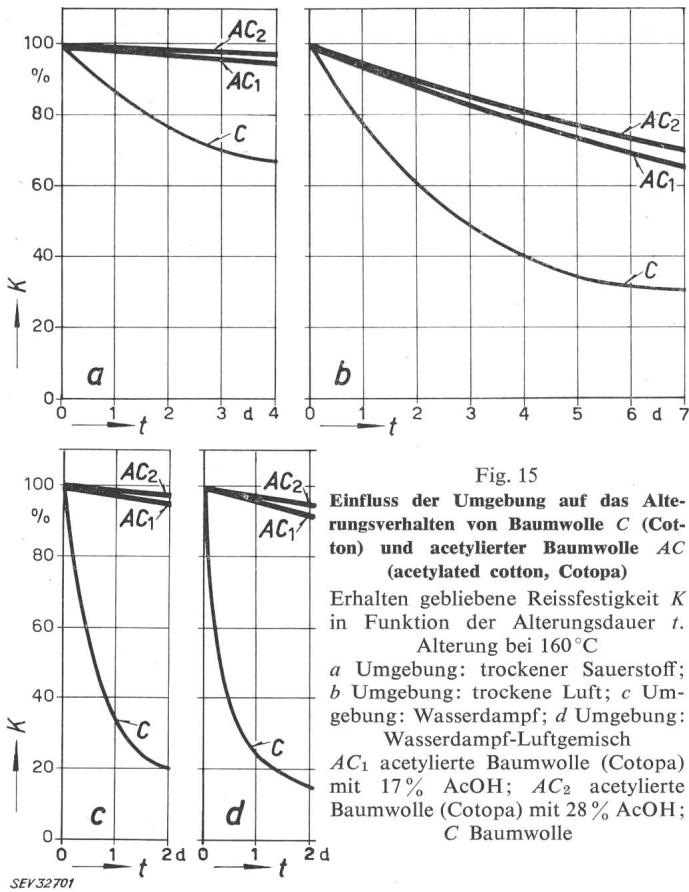


Fig. 15
Einfluss der Umgebung auf das Alterungsverhalten von Baumwolle C (Cotton) und acetylierter Baumwolle AC (acetylated cotton, Cotopa)
Erhalten gebliebene Reissfestigkeit K in Funktion der Alterungsdauer t .
Alterung bei 160°C
a Umgebung: trockener Sauerstoff;
b Umgebung: trockene Luft; c Umgebung: Wasserdampf; d Umgebung: Wasserdampf-Luftgemisch
AC₁ acetylierte Baumwolle (Cotopa) mit 17% AcOH; AC₂ acetylierte Baumwolle (Cotopa) mit 28% AcOH;
C Baumwolle

12005) werden die Papiere in Cupriäthylendiamin gelöst und die Viskosität der Lösung bestimmt [12]. Aus der Viskosität kann das Molekulargewicht des gelösten Stoffes bestimmt werden. Mit dem Abbau der Celluloseketten ist eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften verbunden Fig. 14b).

Die Verwendung der Reissfestigkeit als Alterungskriterium hat aber den grossen Vorteil, dass diese ausserordentlich einfach und mit nicht allzu grosser Streuung durchgeführt werden kann, sofern gewisse Vorsichtsmassnahmen beachtet werden. Solche Messungen werden deshalb auch zur Beurteilung der Alterung der Isolation von Hochspannungskabeln verwendet [13].

Alterungsverhalten von acetylierten Papieren AP (Isocel-35) und Isolierpapieren P und P spez. Einfluss der Umgebung

Tabelle VII

	Kabelpapier P ₁		Kabelpapier P ₂		Papier P ₃ Hartplatten- qualität		Papier P ₄ Hartplatten- qualität		Kraftpapier P spez. I gebleicht		Hadernpapier P spez. 2	
	P ₁	AP ₁	P ₂	AP ₂	P ₃	AP ₃	P ₄	AP ₄	P spez. I	AP spez. I	P spez. 2	AP spez. 2
Alterung 15 h bei 180°C, Papiere nicht imprägniert												
In freier Luft	72	94	—	—	48	97	—	—	—	—	—	—
Zwischen Glasplatten	60	89	58	84	40	83	55	84	61	81	—	—
Zwischen Al-Platten	60	90	—	—	34	78	—	—	—	—	—	—
Zwischen Fe-Platten	—	—	60	86	—	—	38	91	67	93	—	—
Zwischen Cu-Platten	52	40	56	40	27	17	43	14	51	61	15	92
bei Luftabschluss	—	—	—	—	78	91	—	—	—	—	—	—
Alterung 65 h bei 170°C, Papiere ölimprägniert												
zwischen Glasplatten	—	—	—	—	64	92	—	—	—	—	—	—
zwischen Cu-Platten	—	—	—	—	64	92	—	—	—	—	—	—

Die Werte der erhaltenen Reissfestigkeit sind in % der vor der Alterung gemessenen Werte angegeben.
Während des Alterungsprozesses hatten die Papiere Kontakt mit Glas oder mit den erwähnten Metallen (Ausnahme: in freier Luft).

Dass — je nach Anwendung — u. U. auch elektrische Daten als Alterungskriterien beigezogen werden, ist selbstverständlich. So kann z. B. die Bestimmung des Isolationswiderstandes und des Verlustfaktors — durchgeführt vor, während und/oder nach einer Alterung — wertvolle Schlüsse bezüglich des Alterungsverhaltens einer Isolation ermöglichen.

An Hand einiger Resultate verschiedener Alterungsversuche werden die Verhältnisse und verschiedenen Einflüsse näher dargestellt.

Fig. 15 zeigt, diesmal am Beispiel von Baumwolle bzw. acetylierter Baumwolle (Cotopa), den Einfluss der Umgebung bei der Alterung nicht imprägnierter Cellulose, während Fig. 16 den Einfluss von Zeit und Temperatur und Fig. 17 zudem den Einfluss des Acetylierungsgrades wiedergibt. Man ersieht daraus, dass die Alterung bzw. Depolymerisation von reiner Cellulose (Baumwolle) bzw. von acetylierter Cellulose (Cotopa) proportional der Zeit und der Temperatur, aber umgekehrt proportional dem Acetylierungsgrad erfolgt.

Tabelle VII enthält Resultate verschiedener Alterungsversuche, durchgeführt an verschiedenen Isolierpapieren und den daraus hergestellten acetylierten Papieren (Acetyl-

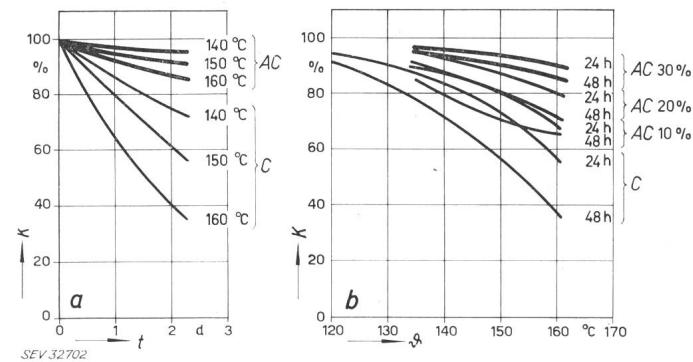


Fig. 16
Alterungsverhalten von Baumwolle C und acetylierter Baumwolle AC (Cotopa) in freier Luft

- a erhalten gebliebene Reissfestigkeit K in Funktion der Dauer t der Alterung bei verschiedenen Temperaturen für AC 30% AcOH
b erhalten gebliebene Reissfestigkeit K in Funktion der Temperatur θ für verschiedene Acetylierungsgrade (10, 20 und 30% AcOH) und verschiedene Dauer der Alterung

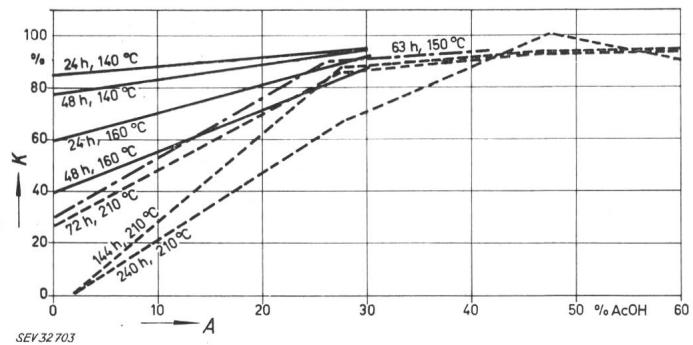


Fig. 17

Alterungsverhalten von Baumwolle und verschiedenen hoch acetylierter Baumwolle (Cotopa) in freier Luft

Erhalten gebliebene Reissfestigkeit K in Funktion des Acetylierungsgrades A für verschiedene Temperaturen und verschiedene Dauer der Alterung

lierungsgrad 35 %). Bei diesen Versuchen hatten die Papiere während der Alterung Kontakt mit verschiedenen Werkstoffen, insbesondere mit verschiedenen Metallen, und zwar im nicht imprägnierten wie aber auch teilweise im ölimprägnierten Zustand. Man sieht, dass diese Einflüsse außerordentlich gross sein können und daher in jedem Fall zu berücksichtigen sind.

Tabelle VIII enthält Resultate von Alterungs- bzw. Stabilitätsversuchen, wobei acetylierte Baumwolle, Kabelpapiere und Spezialpapiere (höheren Reinheitsgrades bzw. mit höherem Gehalt an α -Cellulose) sowie die daraus hergestellten acetylierten Produkte im geschlossenen Raum einer thermischen Alterung ausgesetzt wurden. Nach der Wärmebehandlung wurde die auf dem Faserverband vorhandene freie

Stabilität von Isolierpapieren

Freie Säure (als Essigsäure bestimmt) und pH-Wert des wässrigen Auszuges von acetylierter Baumwolle AC (Cotopa), Papieren P und acetylierten Papieren AP (Isocel) verschiedenen Reinheitsgrades und verschiedenen Acetylierungsgrades

Tabelle VIII

Material	Acetylierungsgrad	Alterungs-Bedingungen: Lagerung 70 Tage bei 60 °C in verschlossenen Mylarbeuteln	
		Freie Essig- säure %	pH
AC Cotopa (aus roher Baumwolle)	28 % AcOH	0	6,5
AC Cotopa (aus gebeuchter und gebleichter Baumwolle)	28 % AcOH	0	6,6
AC Super Cotopa (aus gebeuchter und gebleichter Baumwolle)	62,5 % AcOH	0	7,0
P Papier, Kraft	—	0,043	6,5
AP aus Kraft Papier	35 % AcOH	0,108	4,0
	42 % AcOH	0,100	4,7
	50 % AcOH	0,029	6,1
P _K Papier, Kraft (Hartplatten Qualität)	—	0,007	6,8
AP aus Kraft Papier (Hart- platten Qualität)	35 % AcOH	0,064	4,7
P _K Papier, Kraft, Sulfat 94 % α -Cellulose	—	0,007	5,6
AP aus Kraft Papier 94 % α -Cellulose	32 % AcOH	0,004	5,5
P spez., Hadern gebleicht	—	0,014	5,4
AP aus Hadern gebleicht	32 % AcOH	0	6,5

Säure (bestimmt als Essigsäure) sowie der pH-Wert des wässrigen Auszuges ermittelt. Aus diesen Zahlen ist die Erhöhung der chemischen Stabilität von Cellulose mit zunehmendem Gehalt an α -Cellulose einerseits sowie mit zunehmendem Acetylierungsgrad anderseits deutlich zu erkennen.

In Fig. 18 und 19 wird die Alterung — wiederum dargestellt durch die nach der Alterung noch erhaltengebliebene Reissfestigkeit in Funktion der Alterungszeit — für verschiedene Temperaturen wiedergegeben. Dabei wurde versucht, alle zur Verfügung gestandenen Resultate möglichst vergleichbar darzustellen.

Fig. 20 ist ein Versuch der Auswertung der zur Verfügung gestandenen Versuchsresultate.

Jeder im Kurvenzug eingetragene Messpunkt ist das Resultat eines — angeblich unter gleichen Bedingungen durchgeföhrten — Alterungsversuches, dargestellt am Beispiel einiger weniger Muster. Daraus geht deutlich hervor, welche Unsicherheiten bei solchen Messungen, die nicht streng unter gleichen Bedingungen durchgeföhrten werden, möglich sind und welche Vorsicht bei der Interpretation angewandt werden muss. Um für eine bestimmte Anwendung brauchbare Resultate zu erhalten, müssen die Bedingungen von Fall zu Fall den tatsächlich im Betrieb vorliegenden Verhältnissen möglichst eng angepasst werden.

Die Resultate gehen teilweise außerordentlich stark auseinander. Die Differenzen zwischen den einzelnen Messungen sind — nebst der Komplexität der Materie selbst — auf die Vernachlässigung der Einhaltung genau gleicher Versuchsbedingungen in verschiedenen Laboratorien zurückzuführen. Die z. T. grossen Abweichungen zwischen den verschiedenen Resultaten dürften auf die verschiedenen Ölqualitäten, die äusseren Bedingungen (ob mit Luftabschluss, mit Stickstoffpolster, mit Sauerstoffzutritt usw. zu rechnen ist und nicht zuletzt, welche Kontakte und weiteren Materialien mit dem Öl oder mit dem Papier in Berührung standen) zurückzuföhren sein.

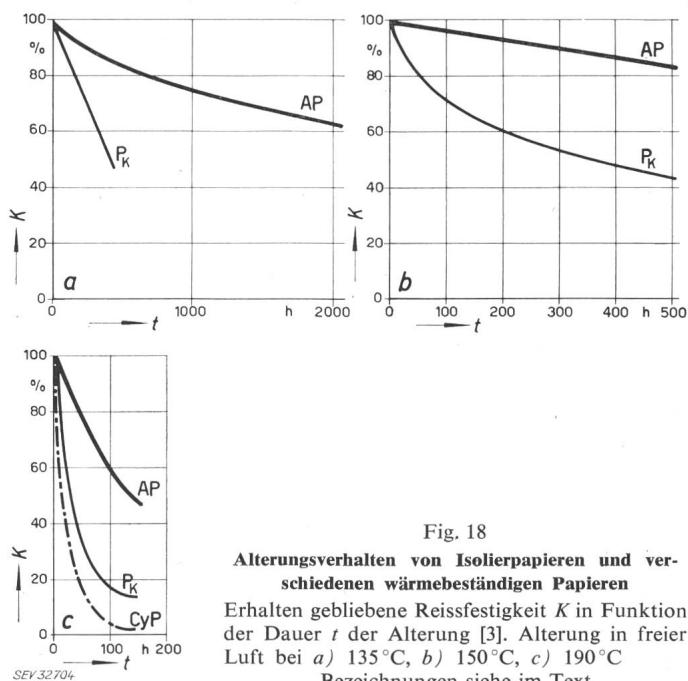


Fig. 18

Alterungsverhalten von Isolierpapieren und verschiedenen wärmebeständigen Papieren

Erhalten gebliebene Reissfestigkeit K in Funktion der Dauer t der Alterung [3]. Alterung in freier Luft bei a) 135 °C, b) 150 °C, c) 190 °C
Bezeichnungen siehe im Text

Alterung von ölimprägiertem acetyliertem Papier AP (Isocel-35) und Papier P. Beeinflussung der dielektrischen Eigenschaften
Vergleichende dielektrische Messungen an Öl und an den unterschiedlich — in Kontakt mit Glas und verschiedenen Metallen — gealterten
Papieren und acetylierten Papieren

Tabelle IX

Muster	Alterungsbedingungen: Alterung 100 h bei 155°C, in Kontakt mit:	Zustand des Öles nach der Alterung								Imprägiertes Papier AP oder P nach der Alterung						Erhalten gebliebene Reiss- fertigkeit K %	
		tg δ bei 50 Hz und bei 4 kV/mm × 10 ⁻³			R_i 10 ³ MΩ			mg KOH/ g Öl	tg δ bei 50 Hz × 10 ⁻³			R_i 10 ³ MΩ					
		20°C	60°C	90°C	20°C	60°C	90°C		20°C	60°C	90°C	20°C	60°C	90°C	20°C	60°C	
Öl	—	0,5	6,8	21,9	85	5	—	0,07	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl	Glas	0,3	4,4	13,3	170	17	—	0,07	2,2	2,3	6,2	405	13,6	93	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		0,25	1,6	8,0	260	52	11	0,06	3,0	5,1	19,0	117	28	85	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		0,4	2,3	11,9	520	52	11	0,08	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl	Al	0,5	7,2	17,3	100	7	—	0,06	2,4	6,0	16,0	—	10,3	38	95	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		1,2	6,7	25,4	64	10	2,4	0,12	3,3	17,6	61,0	—	8	4	95	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		0,6	6,0	28,6	85	83	1,6	0,11	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl	Fe	2,2	25,2	54	25	2	—	0,09	2,5	9,8	30,0	800	65	22	91	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		0,8	7,8	26,4	51	8	2	0,18	3,5	13,8	45,5	21	4	92	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		0,7	9,0	34,4	7,3	6	1	0,09	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl	Cu lackiert	0,5	10,0	20,0	100	6	—	0,08	2,3	7,1	18,0	—	78	32	98	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		0,5	3,7	15,1	255	16	4	0,09	3,6	73	165	540	17	1	92	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		0,5	4,9	27,0	86	9	2	0,08	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl	Cu	2,7	28,4	79,0	25	4	—	0,09	2,5	5,9	22,5	820	€4	28	93	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		1,4	23,6	94,5	27	5	2	0,13	4,3	14,0	45,0	440	30	7	90	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl		4,0	44,2	>111	17	2,5	0,5	0,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Öl AP (35/50) + Öl P + Öl	Pb	4,3	39	86	15,5	4	—	0,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		1,1	11,7	23,1	24	4,6	2,0	0,15	2,8	28,5	34,5	800	37	3	91	—	—
		3,1	53,5	>111	12	2,6	1,0	0,14	4,7	28,5	50	530	33	10	92	—	—

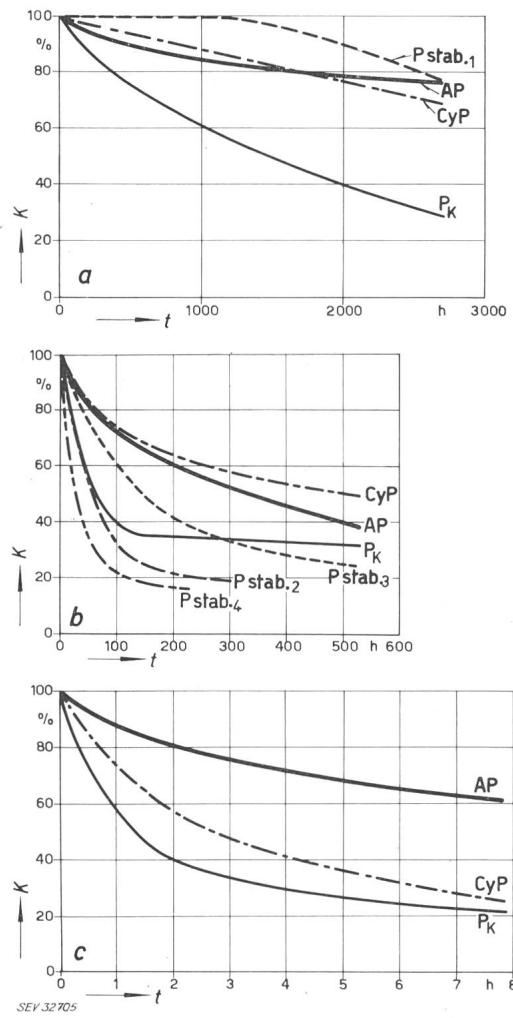


Fig. 19

Wie Fig. 18, aber die Alterung wurde unter Öl durchgeführt
a) bei 135°C; b) bei 190°C; c) bei 240°C

Die Messungen zur Erfassung der Depolymerisation als Alterungskriterium wurden ergänzt durch Messungen, welche die Beeinflussung der dielektrischen Daten im Verlauf des Alterungsvorganges festhalten (Tabelle IX).

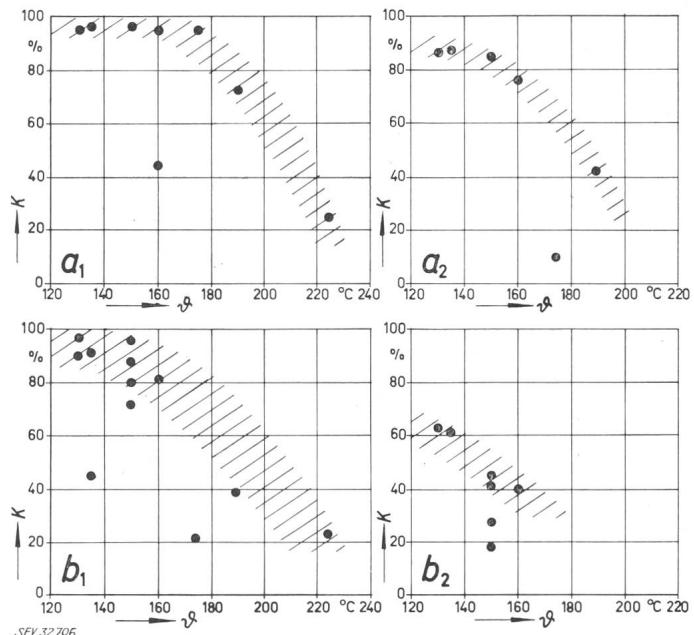


Fig. 20

Darstellung der Divergenz zwischen verschiedenen (scheinbar) gleich durchgeföhrten Alterungsversuchen

Auswertung der Resultate aus verschiedenen Laboratorien und verschiedener Autoren
Alterung in Öl, erhalten gebliebene Reissfestigkeit K in Funktion der Alterungstemperatur θ
a₁, a₂ am Beispiel von cyanoäthyliertem Papier CyP für eine Alterungsdauer von 100 h bzw. 1000 h
b₁, b₂ am Beispiel von Kraftpapier P_K für eine Alterungsdauer von 100 h bzw. 1000 h

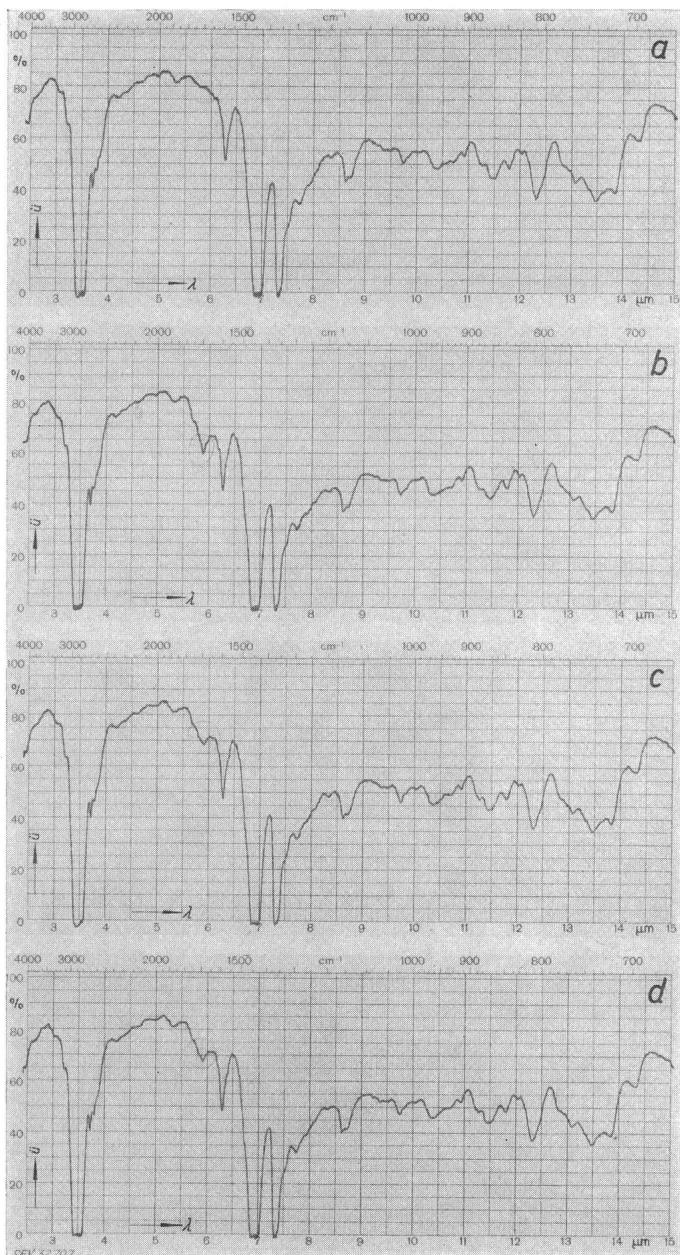


Fig. 21

Infrarotspektrophotogramme von Isolierölen

ii Transmission; λ Wellenlänge

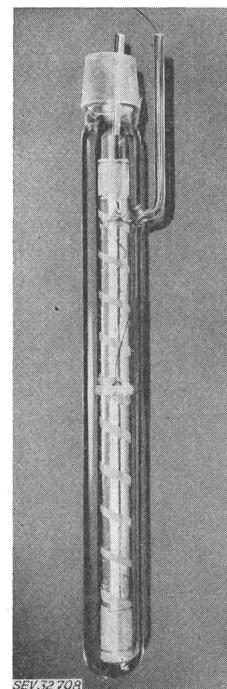
a Isolieröl frisch; b Isolieröl gealtert, ohne Isolierpapier; c Isolieröl gealtert, mit Hochspannungskabelpapier; d Isolieröl gealtert, mit acetyliertem Papier

Alterung durchgeführt an Modellkabeln (siehe Fig. 22)
6 g Papier bzw. acetyliertes Papier (für c und d), 200 cm³ Isolieröl,
135 g Cu (300 cm² Oberfläche); Temperatur 90°C, 10 h pro Tag; Dauer
90 Tage; Oberfläche in Kontakt mit Luft (siehe Fig. 22)

Es handelt sich hier hauptsächlich um Messungen, die durchgeführt wurden, als die in den USA entwickelten «thermally upgraded papers», noch nicht zur Verfügung standen. Es wäre interessant, entsprechende Messungen auch auf diese Papiere auszudehnen, doch dürften auch die vorliegenden Resultate, insbesondere der überraschend grosse Einfluss von Kupfer und Blei auf die Depolymerisation von Papier, allgemein Interesse finden.

Eine sehr wertvolle zusätzliche Möglichkeit, die Alterung des Isolieröles zu verfolgen, liegt in der Verwendung von Infrarotspektrophotogrammen. Ohne an dieser Stelle nochmals näher auf diese außerordentlich wertvolle und elegante Untersuchungsmethode einzugehen [14; 15], mögen an Hand

Fig. 22
Modellkabel, bereit zur Imprägnierung



einiger typischer Spektrogramme die Verhältnisse bei der Alterung von Isolieröl mineralischer Herkunft generell gezeigt werden (Fig. 21).

Im Rahmen einer anderen Anwendung — es handelt sich um Versuche zur Abklärung des Verhaltens von Isocel als Isolation von Hoch- und Höchstspannungskabeln — wurden Versuche an Kabelnachbildungen, an sog. Modellkabeln, durchgeführt. Die Masse eines solchen Kabels sind etwa die folgenden (Fig. 22):

Durchmesser des den Leiter darstellenden Kupferrohres: 12 mm, Länge der aktiven äusseren Elektrode: 15 cm, Länge der ganzen Anordnung: 30 cm.

Ein derart gewickeltes Modellkabel wird bei einer Temperatur von 105...110 °C sorgfältig getrocknet und evakuiert. Dann wird der Verlustfaktor der Isolation im trockenen, nicht imprägnierten Zustand in Funktion der Temperatur

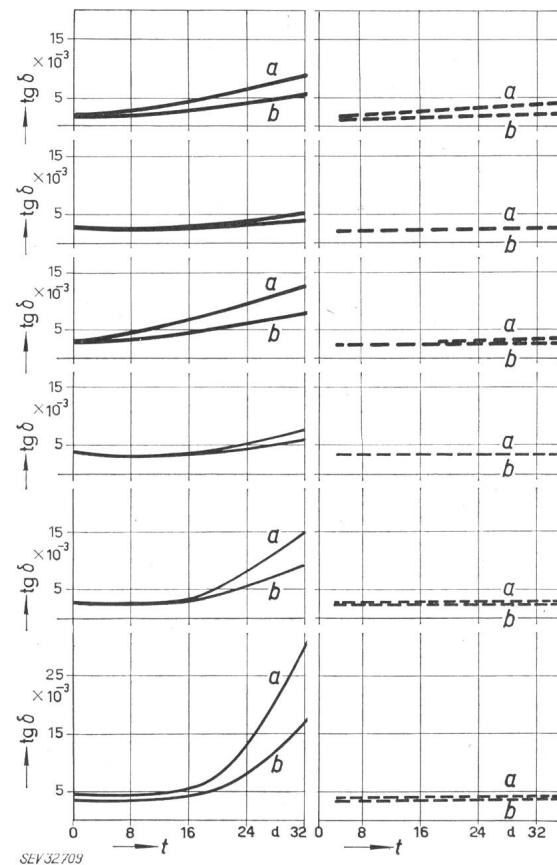


Fig. 23
Vergleichende Alterungsversuche an Modellkabeln mit acetyliertem Papier AP (Isocel-35) und Hochspannungskabelpapier P als Isolation auf Kupfer- bzw. Aluminiumelektroden

Genereller Verlauf der Alterung, gemessen durch fortlaufende Messung des Verlustfaktors $\text{tg } \delta$ in Funktion der Alterungsdauer t . Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ gemessen a bei 3 und b bei 7 kV/mm, 50 Hz, 75°C
Die Modellkabel wurden einzeln in Glaskolben ölimprägniert und hatten an der Oberfläche des Kolbens Kontakt mit der Luft

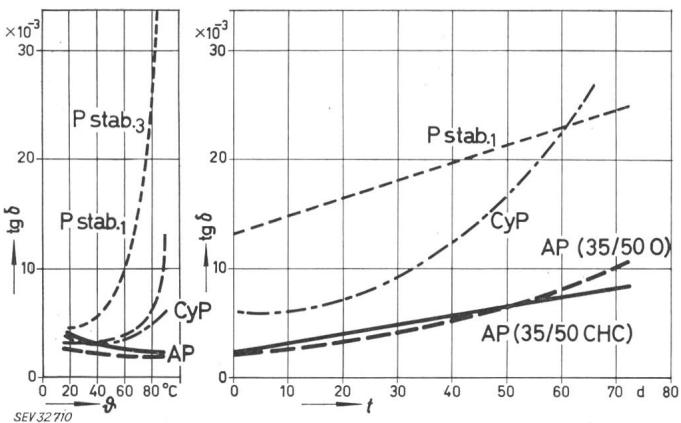


Fig. 24

Vergleichende Alterungsversuche an Modellkabeln mit acetyliertem Papier AP (Isocel-35) und anderen wärmebeständigen Papiere

tg δ in Funktion der Temperatur θ , anschliessend Verlauf der Alterung, gemessen durch fortlaufende Messung des Verlustfaktors tg δ in Funktion der Alterungsdauer t . Die Modellkabel waren ölimprägniert und hatten an der Oberfläche des Kolbens Kontakt mit Luft
Verlustfaktor gemessen bei 8 kV/mm, 50 Hz, 90°C

gemessen. Wenn dieser Wert den Erwartungen entspricht, wird eine Imprägnierung mit einem niederviskosen Öl durchgeführt, und am frisch imprägnierten Kabel werden Isolationswiderstand und Verlustfaktor in Funktion der Temperatur gemessen. Anschliessend erfolgt die Alterung während mehreren Monaten. Aus diesen Versuchen kann auf die Stabilität in elektrischer Hinsicht eines derart aufgebauten Kabels geschlossen werden.

In Fig. 23 sind entsprechende Alterungskurven wiedergegeben, vergleichend einerseits zwischen verschiedenen Isocelqualitäten und verschiedenen Kabelpapierqualitäten und andererseits zwischen Kupfer- und Aluminiumelektroden. Aus diesen Kurven erkennt man die wesentlich höhere Stabilität der Isolation bei der Verwendung von Aluminium als Elektrodenmaterial.

Zusammen mit den Zahlen der Tabellen VII und IX erkennt man den ausserordentlich starken Einfluss von Kupfer, der eben nicht nur, wie bekannt, auf das Öl, sondern auch auf das Papier einen schädlichen Einfluss hat. Dieser ist so gross, dass sich für gewisse Anwendungen das Studium der Möglichkeit einer vermehrten Verwendung von Aluminium oder von lackiertem Kupfer als lohnend abzuzeichnen beginnt.

Es lag nun nahe, die Modellkabelversuche im Rahmen der Untersuchungen verschiedener «thermally upgraded papers» auch auf diese zu erstrecken. Modellkabel mit den verschiedenen, seinerzeit zur Verfügung gestandenen «thermally upgraded papers», spiralförmig isoliert, wurden den gleichen Prüfungen unterzogen (Fig. 24).

Damit ist eine Übersicht über die bisherigen Arbeiten betreffend die Verwendung von acetylierten Papiere, im besonderen als «thermally upgraded papers», gegeben. Wohl sind in den Versuchen noch Lücken und Mängel vorhanden. Bestimmt ist noch dieser oder jener Punkt näher zu beleuchten, dieses oder jenes Verhältnis und spezielle Anwendungen abzuklären. Dank der geschilderten technischen Daten aber kann Isocel in elektrischer Hinsicht als Konstruktionsmaterial für die Isolation in Transformatoren Interesse finden und Vorteile bieten.

Bedingt durch den höheren Preis von Isocel gegenüber den anderen «thermally upgraded papers» muss dieses dafür

auch gewichtige Vorteile zu bieten vermögen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in thermischer Hinsicht, d. h. bezüglich Alterungsbeständigkeit, Isocel mindestens dasselbe Verhalten wie die zur Zeit im Handel erhältlichen wärmebeständigen Papiere bietet. Als weitere Eigenschaften gegenüber diesen dürfen aber die, dank einer wesentlich geringeren Feuchtigkeitsaufnahme höhere Dimensionsbeständigkeit: raschere und leichtere Trocknung, wesentlich bessere dielektrische Daten und die Möglichkeit, eine höhere Ionisationseinsatzspannung zu erreichen, hervorgehoben werden.

Korrekt erweise soll auch auf die Nachteile hingewiesen werden: Da wäre zu erwähnen, dass durch die Acetylierung etwa 20...25 % an mechanischer Festigkeit verloren gehen. In dieser Hinsicht bleibt nichts anderes übrig, als das Verfahren auf möglichst hochwertige, d. h. hochreissfeste Papiere anzuwenden, so dass daraus noch immer ein Isocel mit genügenden mechanischen Daten resultiert. Es ist aber auch möglich, diese durch spezielle Nachbehandlungsverfahren zu verbessern.

5. Carbonblackpapier auf Basis Isocel

Mit der zunehmenden Anwendung von Isocel wuchs auch das Interesse für ein Carbonblackpapier auf der Basis acetylierter Fasern. Nebst der Wirkung als halbleitende Schicht besteht ja einer der Hauptvorteile von Carbonblack in der chemischen Aktivität des Russes, indem der feinver-

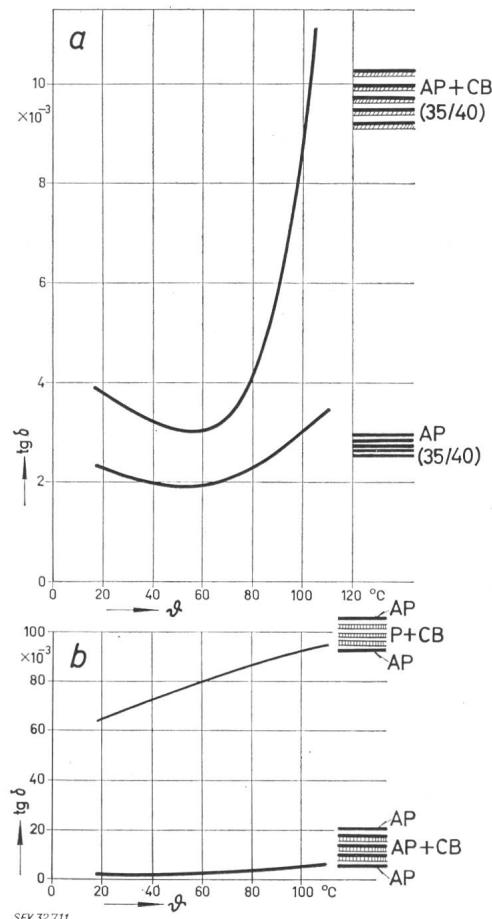


Fig. 25

Carbonblack (CB) Isolierpapiere

- a Einfluss von Carbonblack auf Isocel. Verlustfaktor tg δ bei 60 Hz in Funktion der Temperatur θ
 b Carbonblack-Isocel im Vergleich zu gewöhnlichem Carbonblack-Papier. Verlustfaktor tg δ bei 60 Hz in Funktion der Temperatur θ

teilte Kohlenstoff als Absorber für chemische Produkte dient, welche an seiner Oberfläche festgehalten und daher unschädlich gemacht werden. Vor allem die polaren Reaktionsprodukte, welche an der Oberfläche des metallischen Leiters entstehen, werden dabei mehr oder weniger weitgehend absorbiert. Aber auch mechanische Verunreinigungen können festgehalten und damit schliesslich eine höhere Betriebssicherheit, höhere Stossfestigkeit, längere Lebensdauer und bessere Alterungsbeständigkeit einer Isolation erreicht werden.

Angeregt durch Anfragen seitens der Verbraucher von Isocel wurde die Frage der Herstellung von Carbonblack auf Basis acetylierter Fasern geprüft und an dem entsprechenden Material erste Versuche durchgeführt. Die Herstellung von Carbonblack-Isocel kann natürlich nur auf dem Wege einer nachträglichen Imprägnierung des Isocelblattes mit einer Russ-Schicht erfolgen. Das Resultat erster Versuche war folgendes: Die Ölfestigkeit wurde erreicht, die Porosität oder besser die Luftdurchlässigkeit ging durch die Imprägnierung mit Carbonblack zurück, das Absorptionsvermögen des mit Carbonblack imprägnierten Isocels entsprach demjenigen eines normalen Carbonblackpapiers, indem z. B. in einem gebrauchten Öl eine deutliche Reduktion des Verlustfaktors gemessen werden konnte, wenn Carbonblackpapier bzw. Carbonblack-Isocel dem Öl zugegeben wurde. Als überraschendstes Moment aber darf wohl die starke Reduktion des Verlustfaktors eines Carbonblack-Isocels gegenüber einem normalen Carbonblackpapier erwähnt werden (Fig. 25).

6. Isocel für Hochspannungskabel

Acetyliertes Papier wäre für die Verwendung in Hochspannungskabeln besonders hoher Betriebsspannung prädestiniert, weil die Anforderungen gerade beim Kabel für Hoch- und Höchstspannungen derart sind, dass dort das Problem der dielektrischen Verluste, der Trocknung und der Massbeständigkeit von besonderer Wichtigkeit sind. Umgekehrt aber steigen die Materialpreise in einem Kabel rapid mit der Betriebsspannung des Kabels an, so dass das Problem der Anwendung von acetyliertem Papier für Hoch-

und Höchstspannungskabel zu einer Preisfrage wird. Deshalb ist dafür Isocel nur versuchsweise und für ausgesprochene Spezialfälle verwendet worden. Nun konnten aber in letzter Zeit die Preise für Isocel beträchtlich reduziert werden, und es scheint, dass das Interesse nun auch für diese Anwendung wiederum erwacht und gestiegen ist, ganz besonders für Fragen, die mit den Gleichstromkabeln in Zusammenhang stehen. Hier ist nicht mehr die Frage der dielektrischen Verluste, sondern vor allem der Verlauf des Isolationswiderstandes in Funktion der Temperatur von Bedeutung. Praktische Versuchsresultate liegen noch keine vor.

Literatur

- [1] Dieterle, W.: Acetyliertes Papier als Isoliermaterial für die Elektrotechnik. Bull. SEV 46(1955)22, S. 1045...1065.
- [2] Dieterle, W.: Beitrag zur Kenntnis der Stossfestigkeit von Isolierpapieren. Bull. SEV 51(1960)13, S. 637...650.
- [3] Dieterle, W.: Insulation features of acetylated papers. Insulation. June 1962, S. 19...22.
- [4] Haldimann, R. und Richon, E.: Isoliermaterial für Hochspannungs-Innenraumanlagen. Bull. SEV 52(1961)4, S. 121...126.
- [5] Beavers, M. F., Raab, E. L. und Leslie, J. C.: Permalex — A New Insulation System. AIEE Conference Paper 59—952.
- [6] Mutschler, W. H. und Farneth, W. C.: Temperature Capabilities of a Modern Transformer Insulation System. AIEE Conference Paper 60—921.
- [7] Ford, J. G., Lockie, A. M. und Leonard, M. G.: A New and Improved Heat-Stabilized Insulation. AIEE Conference Paper 60—936.
- [8] Brummet, B. D. und Sadler, F. S.: A New Transformer Insulation. AIEE Conference Paper 61—1127.
- [9] Krasucki, Z., Church, H. F. und Garton, C. G.: A New Explanation of Gas Evolution in Electrically Stressed Oil-Imprägnated Paper Insulations. J. Electrochem. Soc. 107(1960)7, S. 598...602.
- [10] Mannitherm — Heat Stable Transformer Insulation. John A. Manning Paper Company, Inc., Troy, New York. 17. 1. 1962.
- [11] Moser, H. P.: Trocknung und Entgasung der in Hochspannungsleistungstransformatoren verwendeten Isolierstoffe. ETZ-A 81(1960)2, S. 41...47.
- [12] Fabre, J. und Pichon, A.: Bericht CIGRE 1960, No. 137.
- [13] Gazzana-Priaroggia, P., Palandri, G. L. und Pelagatti, U. A.: The influence of ageing on the characteristics of oil-filled cable dielectric. Proc. IEE 108(1961)A, S. 467...479.
- [14] Dieterle, W.: Hochfrequenz im Dienste physikalisch-chemischer Untersuchungsmethoden. Bull. SEV 51(1960), S. 943...952.
- [15] Rey, E. und Erhart, L.: Die Beurteilung von inhibitierten und nicht-inhibitierten Isolierölen für Hochspannungsleistungstransformatoren und Wandler. Bull. SEV 52(1961), S. 401...413.

Adresse des Autors:

Dr. W. Dieterle, Prokurist, Sandoz AG, Basel.

Anwendung von Radionukliden in der Elektrotechnik

Von K. Detzer, Frankfurt/M.

621.039.8

An Hand der physikalischen Eigenschaften von Radionukliden werden einige typische Anwendungsbeispiele von Radionukliden als Indikatoren, in der Radiographie, der Aktivierungsanalyse, der Dicke- und Dichtebestimmung, Feuchtigkeitsmessung, als Leuchtfarben, in Isotopenbatterien u.a.m. erläutert. Die Beispiele sind soweit als möglich aus dem Bereich der Elektroindustrie genommen.

1. Allgemeine Übersicht

Die Anwendung von radioaktiven Isotopen (Radionukliden) in der industriellen Forschung und betrieblichen Praxis nahm ihren Anfang nach dem zweiten Weltkrieg, als durch den Betrieb von Kernreaktoren radioaktive Isotope in grösseren Mengen zum Teil als zunächst unerwünschte Nebenprodukte anfielen. Die beiden von den Vereinten Nationen in den Jahren 1955 und 1958 in Genf veranstalteten Kon-

ferenzen über die friedliche Nutzung der Atomenergie, in deren Rahmen auch über die Isotopenanwendung verhandelt wurde, trugen nicht unwesentlich zur raschen Verbreitung der bereits bekannten und zur weiteren Erschliessung neuer Isotopentechniken in den hochentwickelten Industriestaaten der Welt bei. Nach Ansicht von Isotopenfachleuten aus aller Welt ist jedoch seit Jahren eine gewisse Stagnation der Entwicklung unverkennbar; die von der gewerblichen Wirt-