

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 51 (1960)
Heft: 13

Artikel: Beitrag zur Kenntnis der Stossfestigkeit von Isolierpapieren
Autor: Dieterle, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-917040>

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: 21.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Beitrag zur Kenntnis der Stossfestigkeit von Isolierpapieren

Von W. Dieterle, Basel

621.317.333.8 : 621.315.614.6

Die erfolgreiche Anwendung acetylierter Papiere [Isocel]¹⁾ auf verschiedenen Gebieten der Elektrotechnik, insbesonders als Trägermaterial für Schichtpreßstoffe, veranlasste in letzter Zeit eine Anzahl Firmen der Hoch- und Höchstspannungstechnik, sich mit der Einsatzmöglichkeit dieses Isolermaterials näher zu befassen.

Die vorliegende Arbeit orientiert über das Stossverhalten von acetylierten Papieren im Vergleich zu anderen Isolierpapieren. Aus der Gegenüberstellung der Messresultate und deren Auswertung ergibt sich, dass die Stossfestigkeit von Papier und acetyliertem Papier primär durch die Luftdurchlässigkeit der Blätter bestimmt wird, und dass der bekannten Abhängigkeit von Dicke, Lagenzahl usw. nur sekundäre Bedeutung beizumessen ist.

Grundbedingung für eine hohe Stossfestigkeit ist eine niedrige Luftdurchlässigkeit und grösstmögliche Homogenität der verwendeten Papiere bzw. acetylierten Papiere. Acetyliertes Papier von geringer Durchlässigkeit ist in bezug auf Stossfestigkeit einem Hochspannungspapier ebenbürtig. Durch Satinieren kann das Papier verdichtet und weniger durchlässig gemacht werden. Neben den in einer früheren grundlegenden Arbeit des Verfassers [15]²⁾ erwähnten Vorteilen acetylierter Papiere treten bei entsprechend verdichten Qualitäten die geringere Dielektrizitätskonstante und der bei höheren Betriebstemperaturen wesentlich geringere Verlustfaktor besonders in Erscheinung. Abschliessend werden Resultate vergleichender Messungen der momentanen Durchschlagsfestigkeit bei Industriefrequenz von 50 Hz wiedergegeben. Auch hier ist der Einfluss der Luftdurchlässigkeit festzustellen, wenn auch nicht so deutlich wie bei der Stossfestigkeit.

In einem Anhang wird die Luftdurchlässigkeit behandelt und für die Umrechnung der verschiedenen gebräuchlichen Systeme eine Relation angegeben.

1. Allgemeines

Papier in Öl gehört zu den hochwertigsten und meist angewendeten Isolierstoffen der Hoch- und Höchstspannungstechnik [1...14]²⁾.

Die vorzüglichen allgemeinen Eigenschaften von acetylierten Papiern und deren Überlegenheit gegenüber den besten bisher verwendeten gewöhnlichen Papiere in bezug auf Feuchtigkeitsaufnahme, Formbeständigkeit, inneren Widerstand, dielektrische Verluste und Temperatur, niedrige und gleichmässige Dielektrizitätskonstante sicherten diesen, speziell auf dem Gebiet der geschichteten Isolierstoffe, eine relativ rasche Aufnahme und weckten auch das Interesse für deren Verwendung in der Hoch- und Höchstspannungstechnik.

Mit dem Übergang zu immer höheren Betriebsspannungen kommt der Stossfestigkeit der Isolation

Les remarquables résultats obtenus avec des papiers acétés [Isocel]¹⁾ dans différents domaines de l'électrotechnique, notamment comme supports de stratifiés, ont incité récemment plusieurs entreprises de la technique des hautes et très hautes tensions à étudier de plus près les possibilités de ce matériau isolant.

Le présent exposé renseigne sur le comportement au choc électrique de papiers acétés, comparativement à d'autres papiers isolants. La comparaison des résultats de mesures et leur interprétation montrent que la résistance au choc du papier acétisé ou non dépend principalement de la perméabilité à l'air des feuilles et que l'épaisseur, le nombre de couches, etc. n'ont qu'une importance secondaire.

Les conditions essentielles pour une grande résistance au choc sont une faible perméabilité à l'air et une homogénéité aussi grande que possible des papiers utilisés. Le papier acétisé peu perméable est équivalent à un papier pour haute tension, en ce qui concerne la résistance au choc. Un satinage peut rendre le papier moins perméable. Outre les avantages des papiers acétés indiqués dans un article précédent de l'auteur [15]²⁾, les qualités satinées présentent une constante diélectrique nettement plus faible et un facteur de pertes également beaucoup plus faible aux températures de service élevées. Pour terminer, l'auteur indique les résultats de mesures comparatives de la rigidité diélectrique à la fréquence industrielle de 50 Hz. Dans ce cas également, on constate l'influence de la perméabilité à l'air, bien qu'elle ne soit pas aussi nette que pour la résistance au choc.

Dans une annexe, la perméabilité à l'air est étudiée et une relation est indiquée pour la conversion des différents systèmes usuels.

eine vermehrte Bedeutung zu. Gleichzeitig wird auch eine hohe Durchschlagsfestigkeit, sowohl momentan als auch in Funktion der Zeit (Wärmedurchschlag), verlangt, da die Tendenz besteht, neben der elektrischen Beanspruchung auch die Betriebstemperatur der Isolation ständig zu erhöhen. Der von Verbraucherseite mehrfach geäusserte Wunsch nach ausführlichen Daten über die Stossfestigkeit acetylierter Papiere ist deshalb durchaus verständlich.

Das vorzügliche Verhalten ölimprägnierter Papierisolation ist u. a. der «Barrierefunktion» des Papierblattes zuzuschreiben. Man hat sich darunter ein Verhindern oder Erschweren der zum Durchschlag führenden Wanderung von Ionen oder festen Teilchen in Öl vorzustellen. Da acetylierte Papiere nahezu die gleiche Struktur wie gewöhnliche Isolierpapiere aufweisen, war zu erwarten, dass sie ein ähnliches Stossverhalten zeigen würden.

¹⁾ Geschützter Handelsname der Sandoz AG, Basel.
²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Nun sind aber auch beim Papier die Zusammenhänge nicht vollständig abgeklärt; die beiden Komponenten Öl und Papier eines ölimprägnierten Dielektrikums zeigen ein sehr komplexes Verhalten. Um zuverlässige Vergleiche anstellen zu können, wurden deshalb systematische Stossversuche unter streng identischen Bedingungen an ölimprägnierten Lagen von Isolierpapier (P) und acetyliertem Isolierpapier (AP) im Laboratorium durchgeführt. Hiebei traten einige besondere physikalische Zusammenhänge deutlich zutage, weshalb eine Veröffentlichung und Zur-Diskussion-Stellung dieser Arbeiten als Beitrag zur Kenntnis des Stossverhaltens von Isolierpapieren von Interesse und Nutzen sein dürfte.

Es ist bekannt, dass bei kurzzeitiger Spannungsbeanspruchung, insbesondere bei Stoss mit einer Normalwelle $1|50 \mu\text{s}$, die Durchschlagfestigkeit von ölimprägniertem Papier u. a. vom Raumgewicht des Papierblattes abhängt. Daneben spielen aber noch andere Faktoren wie Isolationsdicke, Blattdicke, Gleichmässigkeit des Faserverbandes, Trocknungsgrad, Imprägniermittel, Qualität der Imprägnierung usw., eine Rolle. Erst in neueren Arbeiten [16; 17] ist auch der Luftdurchlässigkeit (Porosität) ein gewisser Anteil zuerkannt worden.

Der vielfach verwendete Ausdruck Porosität anstelle von Durchlässigkeit ist insofern ungenau, als es stark poröse Stoffe gibt (z. B. Schaumplastik), die keinerlei Luft- und andere Durchlässigkeit aufweisen, weil die einzelnen Poren oder Kammern nicht miteinander in Verbindung stehen. Aus diesem Grunde ist in dieser Arbeit stets von Durchlässigkeit — gemeint ist Luftdurchlässigkeit (z. B. nach Bekk) — statt von Porosität die Rede.

Nach *Hall* und *Kelk* [16] sollen
die Blattdicke mit 2 %,
das Raumgewicht mit 60 % und
die Luftdurchlässigkeit mit 19 %

an der Beeinflussung der Stossfestigkeit beteiligt sein.

So ergab z. B. die Erhöhung des Raumgewichtes (Verdichtung) eines Papiers von 0,7 auf 1,0 g/cm³ eine Steigerung der Stossfestigkeit von 103 auf 118 kV/mm bei Imprägnierung mit «low viscosity oil» und von 155 auf nur 162 kV/mm bei Imprägnierung mit «high viscosity oil».

P. Gazzana Priaroggia und *G. Palandri* geben im Rahmen einer eingehenden Arbeit [17], die sich allerdings hauptsächlich mit Fragen des Ionisations-einsatzes in den Wickelzwischenräumen befasst, u. a. eine Darstellung der Stossfestigkeit in Abhängigkeit von der Blattdicke und Luftdurchlässigkeit, sprechen aber auf Grund neuerer Messungen der Luftdurchlässigkeit für Stossfestigkeit und Ionisations-einsatz wenig Einfluss zu.

Aus der Literatur sind folgende Zusammenhänge bekannt:

- a) Höhere Viskosität des verwendeten Imprägniermittels ergibt höhere Werte der Stossfestigkeit [16; 17].
- b) Der Einfluss von Raumgewicht und Luftdurchlässigkeit des Papiers auf die Stossfestigkeit ist geringer, wenn hochviskose Öle verwendet werden [16].

c) Der Einfluss der Temperatur (und damit der Viskosität des Imprägniermittels) auf die Stossfestigkeit ist wesentlich geringer, wenn Papiere mit hohem Raumgewicht (was gleichzeitig geringe Luftdurchlässigkeit bedeutet) verwendet werden [12].

d) Die Resultate der Stossversuche sind unabhängig von der Polarität der Stosswelle und vom Elektrodenmaterial [16; 17].

Um eine möglichst hohe Stossfestigkeit zu erzielen, müsste man aus dem oben Gesagten nur sehr dichte Papiere und hochviskose Imprägniermittel verwenden.

Dies ist aber mit Rücksicht auf den Ionisations-einsatz nicht ohne weiteres möglich, weil mit zunehmender Verdichtung des Papierblattes (wachsendes Raumgewicht ist zwangsläufig mit einer Abnahme der Durchlässigkeit verbunden) auch dessen Dielektrizitätskonstante und damit die elektrische Beanspruchung des Ölkanals sowie der $\tan \delta$ und ε und somit auch die Verlustziffer $\varepsilon \tan \delta$ erhöht werden, und bei hoher Viskosität des Imprägniermittels eine einwandfreie vollständige Imprägnierung der Faserisolation in Frage gestellt sein kann.

Da durch die Acetylierung die Struktur des Blattes praktisch erhalten bleibt, anderseits aber sowohl ε als auch $\tan \delta$ für die in Frage kommenden Betriebsbedingungen (Frequenz, Temperatur usw.) bei acetylierten Papiere wesentlich niedriger sind, so bietet die Verwendung dieser Papiere ein besonderes Interesse, wo es gilt, hohe Stossfestigkeit mit hohem Ionisationseinsatz und kleinen Verlusten zu vereinen.

Die durch die Acetylierung bedingte Verbesserung der verschiedenen charakteristischen Daten, insbesondere von ε und $\tan \delta$ ist in eigenen Versuchen [15] und durch verschiedene Verbraucher nachgewiesen worden, so dass zur weiteren Abklärung der Einsatzmöglichkeiten von acetylierten Papiere für Hochspannungsisolationen hier nur das Stossverhalten zu untersuchen war.

2. Durchführung der Versuche, Versuchsanordnung

Wie bereits erwähnt, hat acetyliertes Papier im wesentlichen die gleiche Struktur wie gutes Kabelpapier. Die Versuche wurden deshalb unter identischen Bedingungen an Kabelpapier und acetyliertem Papier in Blattform durchgeführt in der Weise, dass die zu untersuchenden Papiere — als Einzelblatt oder in mehreren Lagen — nach sorgfältiger Trocknung und Imprägnierung als Dielektrikum von Plattenkondensatoren geprüft wurden.

Es sei an dieser Stelle festgehalten, dass bei dieser Versuchsanordnung die bei einer Kabelisolation zwischen einzelnen Streifen und Lagen auftretenden Zwischenräume nicht nachgebildet und die damit zusammenhängenden Fragen wie Ionisations-einsatz, von dem letzten Endes die Lebensdauer des Kabels abhängt, nicht unmittelbar erfasst werden konnten. Da jedoch die gegenüber Kabelpapier niedrigere Dielektrizitätskonstante acetylierter Papiere eine Entlastung des Ölkanals mit sich bringt, wie an anderer Stelle nachgewiesen wurde, konnte dieser Punkt bei der Versuchsanordnung vernachlässigt werden.

Die nach [16] bestehende Relation zwischen Stossversuchen, durchgeföhrt an einzelnen Blättern und solchen an spiraling mit Überlappung gewickelten Kabelnachbildungen (Modellkabeln) von durchschnittlich 100 : 60 bis 100 : 70, dürfte eine etwas allzu weitgehende Vereinfachung der Verhältnisse darstellen. Anderseits bildet der einfache Plattenkondensator ein äusserst praktisches Instrument für Stossuntersuchungen zur Prüfung des Einflusses von Papier bzw. dessen Struktur auf die Qualität der Isolation.

2.1 Elektroden

Die Elektroden der Versuchsanordnung hatten die Form gemäss Fig. 1 und waren ganz aus Chromstahl ausgeführt.

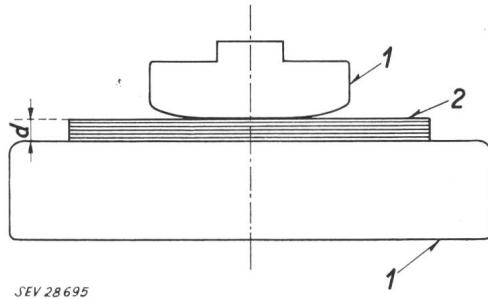


Fig. 1

Elektroden der Versuchsanordnung zur Prüfung der Stossfestigkeit und der Durchschlagfestigkeit
1 Elektroden; 2 Prüfling; d Dicke des Prüflings

Die Messung des Elektrodenabstandes und damit der Isolationsdicke erfolgte als Mittelwert aus 20 Dickenmessungen jeder Papierqualität und ausserdem am fertigen Prüfling mittels Dickenmessers (Tesa-Tastuhr).

2.2 Papiere

Es war von Anfang an schwer einzusehen, weshalb nur einem erhöhten Raumgewicht der Haupteinfluss auf die Verbesserung der Stossfestigkeit einer ölimprägnierten Papierisolation zugeschrieben werden sollte. Physikalisch gesehen wäre in erster Linie eine Abhängigkeit von der «Barrierefunktion» wahrscheinlicher. Mit höherem Raumgewicht steigt bekanntlich auch die Dielektrizitätskonstante des Blattes und damit die elektrische Beanspruchung der zwischen den einzelnen Blättern und Streifen vorhandenen mit Öl gefüllten Spalten. Logischerweise sollte deshalb bei gleichbleibender Durchlässigkeit des Papiers ein Abfallen der Stossfestigkeit gemessen werden können [17]. Während diese Schlussfolgerung von Salvage [18] bestätigt wird, wird ein solches Verhalten von Hall und Skipper [12] wohl in Erwägung gezogen, jedoch nicht als zutreffend beurteilt. Diese gegensätzlichen Ansichten röhren wohl daher, dass die beiden Einflüsse von Raumgewicht (und damit von ϵ) und der Durchlässigkeit (und damit der «Barrierefunktion») nicht ohne weiteres von einander getrennt beurteilt werden können.

Eine Erhöhung des Raumgewichtes durch Satinage schliesst den Faserverband des Papiers und reduziert dessen Durchlässigkeit. Die Relation Raumgewicht zu Durchlässigkeit kann während der Papierfabrikation durch geeignete Auswahl der

Rohmaterialien, Mahlgrad, Satinierung usw. in weiten Grenzen variiert werden. Auch bei acetylierten Papieren können analog Qualitäten mit einer Durchlässigkeit nach Bekk von einer Sekunde und weniger bis zu 100...200 s bei gleichbleibendem Raumgewicht hergestellt werden.

Der Einfluss einer Verdichtung auf die Durchlässigkeit ist für die diversen Qualitäten aus Fig. 2 ersichtlich.

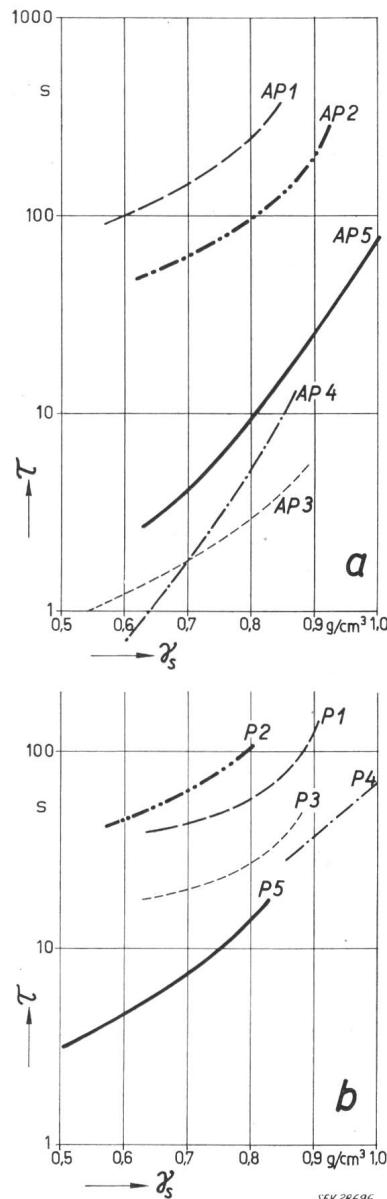


Fig. 2
Raumgewicht γ_s in Funktion der Luftdurchlässigkeit τ der verschiedenen bei der Prüfung verwendeten Blätter
a acetyliertes Papier; b Kabelpapier
AP1...AP5 und P1...P5 Prüflinge (s. Tab. I)

Es dürfte nützlich sein, in diesem Zusammenhang einmal mehr auf die Luftdurchlässigkeit (Porosität) einzugehen, um zu versuchen, die verschiedenen Systeme und Prüfmethoden miteinander in Einklang zu bringen. Dies wird im Anhang zu dieser Arbeit unternommen.

Um im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die Abhängigkeit des kurzzeitigen Durchschlags von beiden Grössen zu erfassen, musste eine sorgfältige Auswahl der zu untersuchenden acetylierten und

nicht acetylierten Papierqualitäten getroffen werden in dem Sinne, dass stets Papiere von meist ähnlichem Raumgewicht, jedoch unter systematischer Verkleinerung der Durchlässigkeit miteinander verglichen wurden. Da es sich hiebei zum Teil um Papiere mit ganz verschiedenen Verwendungszwecken handelte, liess es sich nicht vollkommen vermeiden, dass im allgemeinen auch die Dicke der einzelnen Blätter etwas verschieden war. Von jeder Papierqualität wurden 3 Satinierungsgrade hergestellt:

- a) Maschinenglatt ohne weitere Nachbehandlung.
- b) Satinage 1 Nachbehandlung auf *kaltem* Kalander, 2 Passagen für jede Blattseite bei starkem Druck zwischen Stahl- und Baumwollwalze.
- c) Satinage 2 Nachbehandlung auf *heissem* Kalander (120 °C), Papier feucht, 2 Passagen für jede Blattseite bei starkem Druck zwischen Stahl- und Baumwollwalze.

der Faseranteil pro Volumen des Papierblattes steigt, so ist damit auch eine nachteilige Beeinflussung der dielektrischen Daten verbunden [15]. Das Ausmass dieser Verschlechterung von $\tan \delta$ und des Isolationswiderstandes ist aus der Tabelle I ebenfalls ersichtlich. Gleichzeitig sind die Werte des Verlustfaktors, gemessen bei 10² Hz und nach einer Konditionierung bei 80 % relativer Feuchtigkeit, wiedergegeben, obwohl für Hochspannungsanwendungen nur Messungen in imprägniertem Zustand und gegebenenfalls bei höheren Temperaturen von Bedeutung sind. Dies, um einerseits auch die Wirkungen einer allfälligen, unzulässigen Faserschädigung durch die Satinage aufzudecken, und anderseits, um den ausschliesslich auf die Verdichtung zurückzuführenden Einfluss auf den $\tan \delta$ ebenfalls deutlich zu erfassen. Eine Faserschädigung durch Satinage war in keinem Falle festzustellen.

Wesentliche Daten der untersuchten Papiere

Tabelle I

Bezeichnung des Prüflings	Satinage	m ² -Gewicht g/m ²	Dicke mm	Dichte g/cm ³	Durchlässigkeit nach Bekk ¹⁾ s	$\tan \delta$ bei 80% relativer Feuchtigkeit und bei 10 ² Hz %	Widerstand bei 1 mm Plattenabstand MΩ
AP 1 a	—	40	0,064	0,58	90	19,5	215 000
b	1		0,051	0,72	150	24	196 000
c	2		0,045	0,83	300	26	367 000
AP 2 a	—	55	0,088	0,64	50	6,5	>10 ⁶
b	1		0,073	0,77	80	7,3	>10 ⁷
c	2		0,061	0,93	250	8,8	>10 ⁷
AP 3 a	—	70	0,13	0,54	1	15,0	266 000
b	1		0,10	0,70	1,8	15,5	345 000
c	2		0,08	0,88	5	23,5	210 000
AP 4 a	—	50	0,087	0,60	0,7	9,7	700 000
b	1		0,073	0,71	2,0	11,6	420 000
c	2		0,061	0,86	11	17,0	380 000
AP 5 a	—	98	0,150	0,65	3	29,0	63 000
b	1		0,130	0,77	7	30,0	67 000
c	2		0,097	1,00	70	31,0	66 000
P 1 a	—	71	0,110	0,64	39	214	46
b	1		0,096	0,74	45	—	—
c	2		0,079	0,90	124	—	—
P 2 a	—	30	0,059	0,59	44	335	33
b	1		0,042	0,71	66	—	—
c	2		0,038	0,79	98	—	—
P 3 a	—	42	0,066	0,64	17,8	168	87
b	1		0,052	0,81	28	—	—
c	2		0,049	0,87	44	—	—
P 4 a	—	88	0,011	0,88	31	360	58
b	1		0,098	0,90	40	—	—
c	2		0,089	0,99	60	—	—
P 5 a	—	40	0,077	0,52	3,4	535	13
b	1		0,059	0,68	6,6	—	—
c	2		0,049	0,82	16,4	—	—

AP: Acetyliertes Papier «Isocel»

P: Papier (Kabelpapier)

¹⁾ Die Durchlässigkeit nach Bekk wurde pro Blatt gemessen oder berechnet.

Allfällige Ungleichmässigkeiten in der Struktur der Blätter wurden durch die Verwendung mehrerer Lagen weitgehend zu kompensieren versucht.

Die wesentlichen Daten der untersuchten Papiere sind in Tabelle I wiedergegeben. Da mit der Satinage

2.3 Öl

Um den Einfluss der Papiere möglichst eindeutig erfassen zu können, wurde nur eine einzige Qualität Öl niedriger Viskosität mit folgenden Eigenschaften für die Imprägnierung verwendet:

Spezifikation des verwendeten Isolieröles
(nach Angaben des Lieferanten)

Tabelle II

		Testmethode nach:
Spezifisches Gewicht	0,88 g/cm ³	IP 1) 59/49
Viskosität bei 60 °C	7 cSt	IP 71/47
Viskosität bei 38°C	14,5 cSt	IP 71/47
Flammpunkt	160 °C	IP 34/47
Stockpunkt	≤ 40 °C	IP 15/42
Säurezahl	0,01 mg KOH/g	IP I/46
Dielektrizitätskonstante bei 20 °C	2,2	
Durchschlagfestigkeit	30 kV bei 4 mm BS 2)	BS 148/1951
tg δ bei 100 °C	0,003	
tg δ bei 60 °C	0,0005	
tg δ bei 20 °C	< 0,0002	
Isolationswiderstand bei 60 °C	100 · 10 ¹² Ωcm	
tg δ nach Oxydation von 48 h bei 120 °C mit Cu-Katalysator	0,02	

1) IP = Institute of Petroleum, London.

2) BS = British Standards Institution, London.

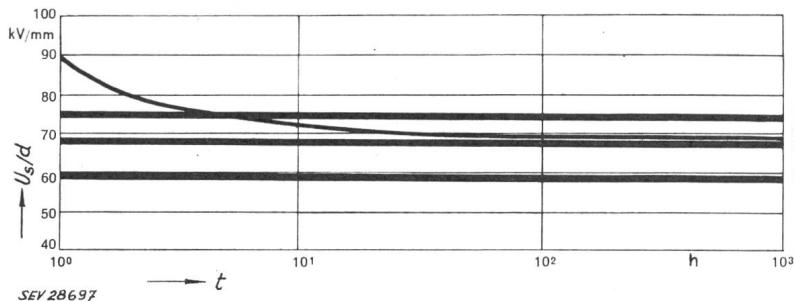
Die niedrige Viskosität dieses Öles gestattete, die Versuche bei Raumtemperatur (20...25 °C) durchzuführen.

Das zur Imprägnierung verwendete Öl wurde vorher sorgfältig entgast und getrocknet. Die im Hochvakuum getrockneten und mit dem derart vorbereiteten Öl imprägnierten Papiere wurden nach Abkühlung auf Raumtemperatur bei ununterbrochener Belassung unter Öl zwischen die polierten und gereinigten Elektroden geschoben und geprüft.

Im Rahmen dieser Arbeit erübrigte es sich, näher auf diesen Punkt einzugehen, weil dafür Sorge getragen wurde, den Feuchtigkeitseinfluss überhaupt auszuschalten, indem sowohl die Papierblätter als auch das Imprägnieröl vorher gut getrocknet wurden.

Als Spannungsquelle wurde ein 50-kV-Kleinstossgenerator der Condensateurs Fribourg S. A. verwendet, welcher sich für solche Prüfungen vorzüglich eignet. Er ermöglicht die Prüfung von Apparaten und Installationsmaterialien mit Kapazitäten bis zu 3000 pF; bei Objekten mit kleinerer Eigenkapazität wird die genormte Stosswelle 1|50 durch Zuschalten von mitgelieferten Belastungskondensatoren erzielt. Sämtliche Bestandteile sind in einem Gehäuse von bescheidenen Abmessungen eingebaut. Besondere Merkmale dieses Kleinstossgenerators sind: Regelbare Funkenstrecke mit Stellungsanzeige, Polaritätsumschalter, Kadenzeinstellung, Voltmeter zur Messung der Ladespannung und Distanzauslösung.

Gestossen wurde mit einer Normalwelle 1|50. Die wiedergegebenen Werte sind Mittelwerte aus im allgemeinen 6...10 Stossdurchschlägen. Nach jedem Stoss wurden die Elektroden gereinigt und — sofern notwendig — nachpoliert. Die Messungen wurden bei einer Feldstärke, welche etwa 20...30 % unterhalb der zu erwartenden Durchschlagfeldstärke lag, begonnen und die Spannung jeweils um 1 kV (2...5 kV/mm) gesteigert.



Auf eine einwandfreie Trocknung wurde ganz besondere Aufmerksamkeit gerichtet, weil frühere Versuche — durchgeführt von einer bedeutenden Fabrik für Grossmaschinen und Apparate — gezeigt haben, dass die Stossfestigkeit von Isolierpapier unter Feuchtigkeitseinfluss stark fällt, während im Gegensatz hiezu diejenige von acetyliertem Papier keine Einbusse erleidet (Fig. 3).

Ein Vergleich von Fig. 3 mit den in der vorliegenden Arbeit wiedergegebenen Resultaten zeigt, dass schon bei nicht klimatisierten Isolationen durchwegs niedrigere Werte gemessen wurden. Dies dürfte hauptsächlich auf die Verschiedenheit der Versuchsanordnung zurückzuführen sein. Klarheit könnte nur eine eingehende Untersuchung darüber ergeben, ob die Feuchtigkeit (Wasser) als weitere Phase des Mischdielektrikums einen direkten Einfluss ausübt oder ob sich dieser Einfluss über die Veränderung physikalischer (z. B. Leitfähigkeit) oder mechanisch-physikalischer Größen (wie Quellung und daraus resultierende Veränderung des Fasergefüges und der Durchlässigkeit usw.) sekundär auszuwirken vermag.

Fig. 3
Stossfestigkeit U_s/d verschiedener ölimprägnierter Isolationen aus acetyliertem Papier, verglichen mit ölimprägniertem Kabelpapier bei Einfluss normaler Luftfeuchtigkeit
Normalstoss 1|50
1 ISOCEL-35, $\gamma_s = 0,84 \text{ g/cm}^3$, $\tau = 5,6 \text{ s}$
2 ISOCEL-35, $\gamma_s = 0,60 \text{ g/cm}^3$, $\tau = 4,5 \text{ s}$
3 ISOCEL-35, $\gamma_s = 0,50 \text{ g/cm}^3$, $\tau = 3,0 \text{ s}$
4 Kabelpapier, $\gamma_s = 0,60 \text{ g/cm}^3$, $\tau = 18,0 \text{ s}$
t Zeit; γ_s Raumgewicht; τ Luftdurchlässigkeit (Bekk)

Allfällige Durchschläge, welche am Rand bzw. außerhalb des planparallelen Teiles der Elektroden erfolgten, wurden nicht berücksichtigt.

3. Resultate

Die nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewerteten Resultate der zahlreichen Messungen sind in den Fig. 4...10 für sämtliche in Tab. I aufgeführten Kabelpapiere und acetylierten Papiere (Isocel) dargestellt.

Der bekannte Zusammenhang — zunehmende Stossfestigkeit mit zunehmendem Raumgewicht — ist aus den Figuren 4 und 5 gut erkennbar, obwohl jede der geprüften Qualitäten von acetyliertem Papier und Kabelpapier ein individuelles Kurvenbild zeigt. Eine für sämtliche Qualitäten allgemein gültige Relation kann aus obigen Figuren nicht abgeleitet werden.

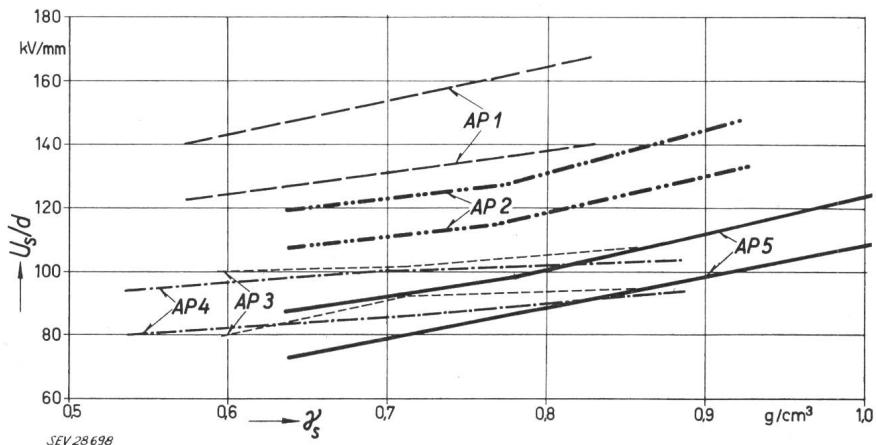
Dagegen ist festzustellen, dass eine nachträgliche Verdichtung sich um so stärker auswirkt, je weniger durchlässig die Papiere im Ausgangszustand waren. Dies ist wohl damit zu erklären, dass bei diesen

Blättern die weitere Schliessung der kleineren Poren schneller und leichter erfolgen kann.

Aus Fig. 6 und 7 erkennt man, dass die graphische Darstellung der Messresultate sowohl bei den Kabelpapieren einerseits als auch bei den acetylierten Papieren anderseits sich als relativ eng begrenztes Band präsentiert.

Fig. 4
Stossfestigkeit U_s/d von acetyliertem Papier in Funktion des Raumgewichtes γ_s

Die Versuche wurden mit einem Normalstoss 1|50 durchgeführt
Mittelwerte der Messresultate, welche an einer bis mehreren Lagen und bis zu einer totalen Isolationsdicke von 0,5 mm bei den verschiedenen Qualitäten gemessen wurden
Bezeichnung der Prüflinge nach Tab. I



Vergleicht man einerseits die Kurvenbilder der Stossfestigkeit in Funktion des Raumgewichtes (Fig. 4 und 5) mit denjenigen der Stossfestigkeit in Funktion der Durchlässigkeit (Fig. 6 und 7), so erkennt man, dass die Stossfestigkeit primär von der Luftdurchlässigkeit abhängt. Die aus der Darstellung von

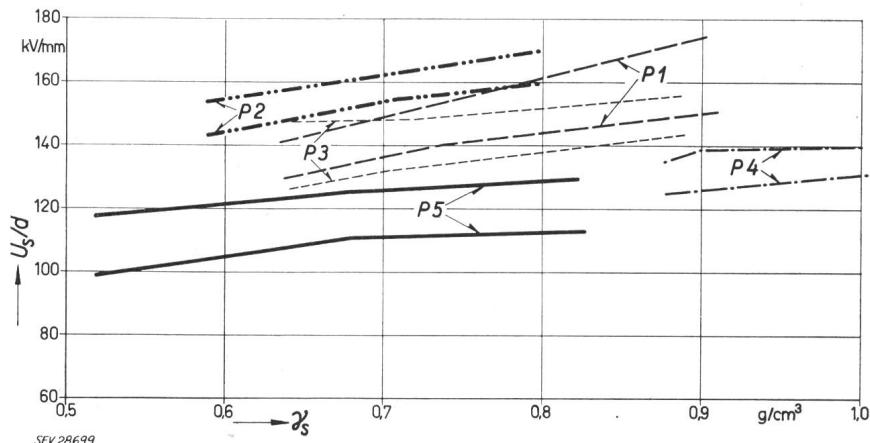


Fig. 4 und 5 für die einzelnen Papierqualitäten ebenfalls ersichtliche, mit zunehmendem Raumgewicht ansteigende Stossfestigkeit erklärt sich aus dem engen, zwischen Raumgewicht und Durchlässigkeit bestehenden Zusammenhang, der in früheren Untersuchungen vielfach dazu verleitete, dem Raumgewicht auch den weit grösseren Einfluss der Durchlässigkeit zuzuschreiben. Tatsächlich wirkt sich jedoch das Raumgewicht erst in zweiter Linie und additiv zur Luftdurchlässigkeit als Verbesserung der Stossfestigkeit aus.

Die eingangs erwähnte «Barrierenwirkung» des Papierblattes bei kurzzeitiger Spannungsbeanspruchung zeigt somit einen parallelen Verlauf mit dessen Luftdurchlässigkeit und kann deshalb durch Durchlässigkeitsmesszahlen ausgedrückt werden. Dies ist mit andern Worten auch die physikalische Erklärung für die Feststellung, dass die Luftdurch-

lässigkeit als hauptsächlich verantwortliche Grösse für die Stossfestigkeit eines Faserverbandes anzusehen ist.

Wenn also Gazzana Priaroggia und Palandri [17] festgestellt haben — sofern bei ihren Versuchen die Einflüsse von Raumgewicht und Durchlässigkeit wirklich getrennt beurteilt werden konn-

ten —, dass mit zunehmendem Raumgewicht die Stossfestigkeit abnimmt, weil dabei die Dielektrizitätskonstante und damit die in den Ölspalten auftretende elektrische Beanspruchung ansteigen, so liegt in dieser Feststellung ebenfalls die Bestätigung unserer hier gemachten Folgerung. Denn der in

Fig. 4 und 5 wiedergegebene Verlauf der Kurven kann nur bei Vorherrschen des Durchlässigkeitseinflusses über denjenigen des Raumgewichtes auf die Stossfestigkeit erklärt werden.

Fig. 5
Wie Fig. 4, aber für Kabelpap.
Bezeichnungen siehe Fig. 4 und Tab. I

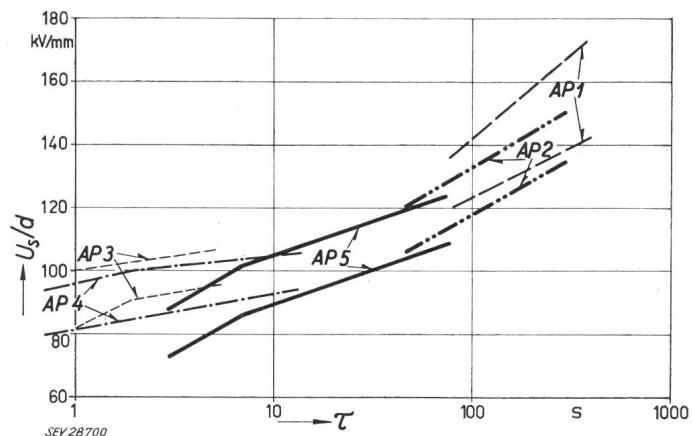


Fig. 6
Stossfestigkeit U_s/d von acetyliertem Papier in Funktion der pro Blatt gemessenen Luftdurchlässigkeit τ (nach Bekk)
Bezeichnungen siehe Fig. 4 und Tab. I

In Fig. 6 und 7 wurde die Stossfestigkeit in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit, wie sie pro Einzelblatt bestimmt wurde, dargestellt. Streng genommen wird dies den tatsächlichen Verhältnissen nicht ganz gerecht, da hier Papiere verschiedener Dicke verwendet wurden (siehe Tab. I) und die Durchlässigkeit umgekehrt proportional der Dicke bzw. der Lagenzahl ist (Fig. 8).

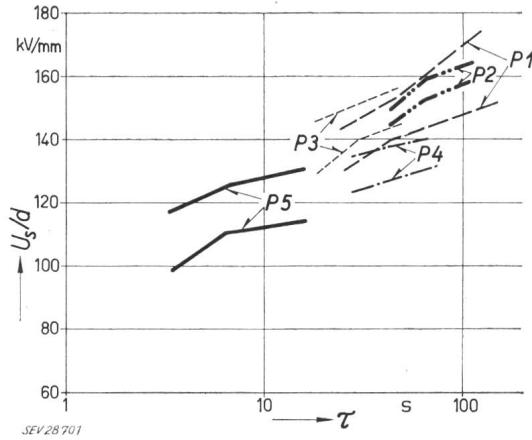
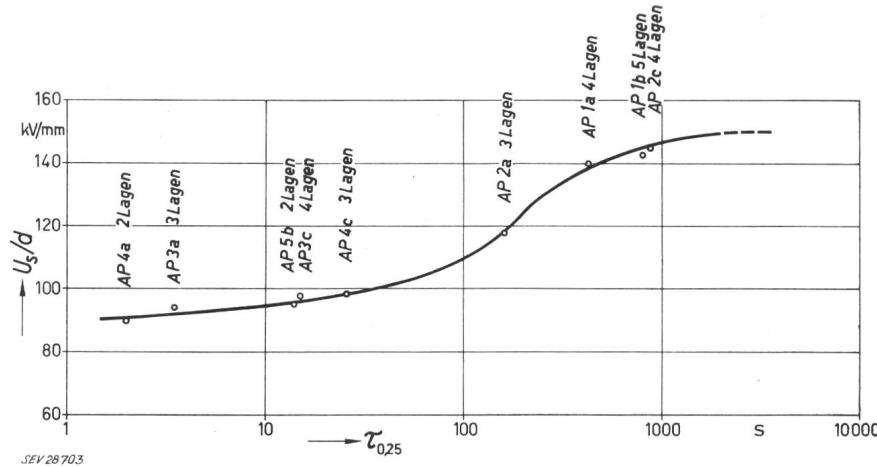


Fig. 7

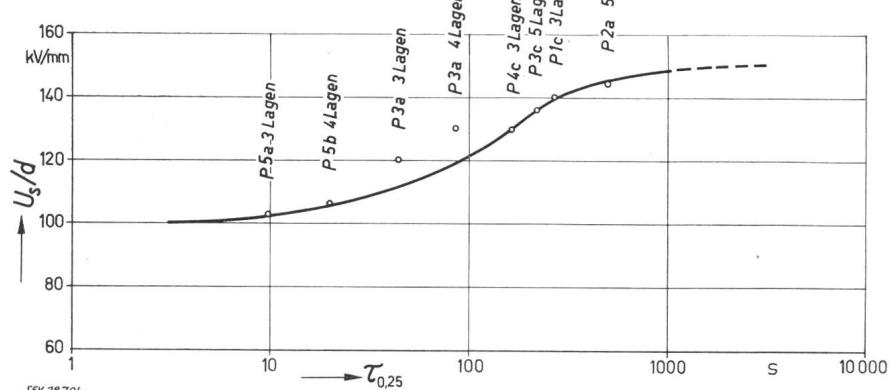
Wie Fig. 6, aber für Kabelpapier
Bezeichnungen siehe Fig. 4 und Tab. I

Da die Struktur durch die Acetylierung praktisch nicht verändert wird, darf ein gleiches Verhalten, d. h. Proportionalität zwischen Luftdurchlässigkeit und Lagenzahl, auch für Kabelpapier angenommen werden, so dass unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs Fig. 6 und 7 korrigiert und die Stossfestigkeit in Abhängigkeit von der für genau gleiche



Isolationsdicke aller Muster errechneten Durchlässigkeit umgezeichnet werden können. Dies ist in Fig. 9 und 10 durchgeführt worden, und man ersieht, dass nun eine ganz eindeutige Abhängigkeit der Stossfestigkeit zutage tritt. Beide Kurven, d. h. sowohl die von Kabel-

Fig. 10
Wie Fig. 9, aber für Kabelpapier
Bezeichnungen siehe Fig. 9
und Tab. I



papier als auch die von acetyliertem Papier zeigen einen ähnlichen Verlauf, mit einem flachen Teil im Gebiet höherer Durchlässigkeit, dem Ansatz zu flachem Verlauf im Gebiet niedriger Durchlässigkeit und einem relativ stark geneigten Anstieg für

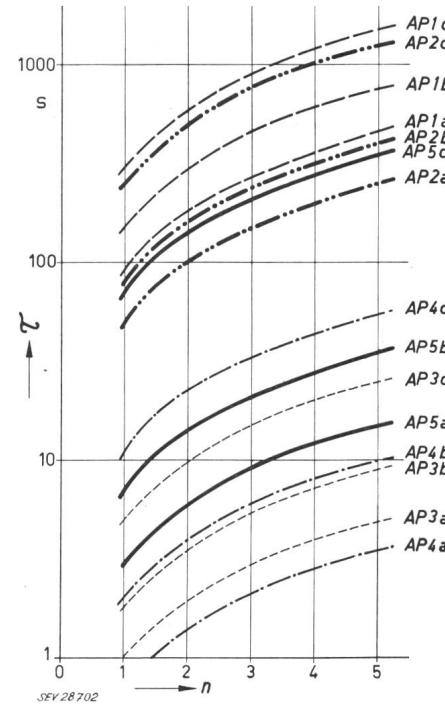


Fig. 8
Luftdurchlässigkeit τ (nach Bekk) verschiedener Qualitäten
von acetyliertem Papier in Funktion der Lagenzahl n
Bezeichnung der Prüflinge nach Tab. I

mittlere Durchlässigkeit von 100...
500 s (nach Bekk).

Man darf wohl annehmen, dass man sich im Gebiet hoher Durchlässigkeit, d. h. dort, wo die «Barrierefunktion» des Papierblattes nicht mehr gross ist, den Werten der Stossfestigkeit von reinem Öl und im Gebiet niedriger Durchläs-

Fig. 9
Stossfestigkeit U_s/d von acetyliertem Pa-
per in Funktion der Durchlässigkeit $\tau_{0,25}$
für eine totale Isolationsdicke von 0,25 mm
Bezeichnung der Prüflinge nach Tab. I

sigkeit den Werten der Stossfestigkeit des nicht mehr porösen Trägermaterials, somit etwa dem von Cellulose- bzw. Acetylcellulose-Filmmaterial nähern würde.

Interessant ist die Feststellung, dass mit höherer Luftdurchlässigkeit die Stossfestigkeit von acetyliertem Papier rascher abnimmt als diejenige von nicht acetyliertem Papier. Dieses Verhalten ist nicht ohne weiteres zu verstehen, besonders wenn man berücksichtigt, dass die Dielektrizitätskonstante der acetylierten Papierfaser bzw. des acetylierten Papierblattes kleiner ist als die entsprechenden Daten eines nicht acetylierten Isolierpapiers. Dieses Verhalten steht auch im Widerspruch zu der von *Gazzana*

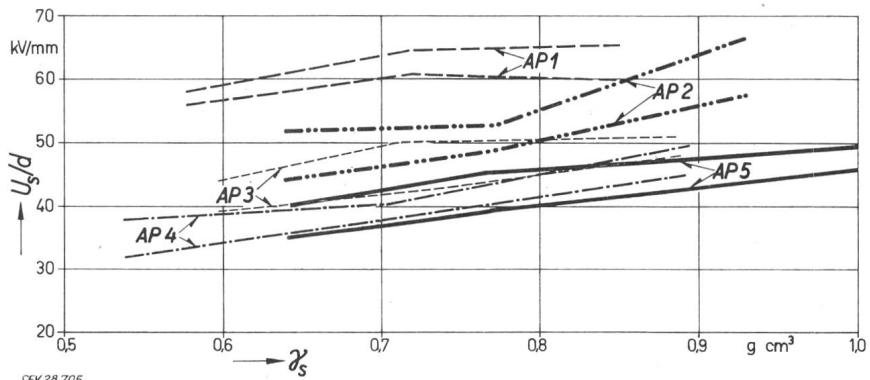
Die Resultate der vorliegenden Messungen können folgendermassen zusammengestellt werden:

Es ist möglich, acetylierte Papiere herzustellen, welche die Stossfestigkeit eines guten Hochspannungskabelpapiers erreichen. Man hat dazu Papiere mit möglichst niederer Durchlässigkeit und grösstmöglicher Homogenität zu verwenden. Bisher wurde für Hochspannungs- und Kondensatorenpapiere bekanntlich schon eine strenge Auswahl hinsichtlich Homogenität und Raumgewicht der Papiere getroffen, ohne dass jedoch der Forderung nach möglichst kleiner Durchlässigkeit besonderes Gewicht beigegeben wurde.

Fig. 11
Durchschlagfestigkeit U_s/d von acetyliertem Papier in Funktion des Raumgewichtes γ_s

Mittelwerte der Messresultate, welche an einer bis mehreren Lagen und bis zu einer totalen Isolationsdicke von 0,5 mm bei den verschiedenen Qualitäten gemessen wurden

Bezeichnung der Prüflinge nach Tab. I



Priaroggia und *Palandri* [17] gemachten Feststellung, wonach die Erhöhung der Dielektrizitätskonstante des Blattes (hier allerdings infolge Verdichtung) eine Reduktion der Stossfestigkeit zur Folge hat. Man könnte deshalb aus den vorliegenden Messungen an acetyliertem und nicht acetyliertem Papier den Schluss ziehen, dass der Ölkanal bzw. die Komponente Öl bei Stoss einen kleineren Anteil der elektrischen Beanspruchung übernimmt als dies auf Grund der Dielektrizitätskonstante beider Komponenten zu errechnen wäre.

Der Forderung nach einer niedrigen Durchlässigkeit kann weitgehend durch die Struktur Rechnung getragen werden. Eine nachträgliche Satinierung ist aber anzustreben.

Da bei gleichem Raumgewicht acetyliertes Papier gegenüber Isolierpapier eine niedrigere Dielektrizitätskonstante und einen kleineren Verlustfaktor aufweist, die zudem von den Faktoren Feuchtigkeit, Temperatur und Frequenz praktisch nicht beeinflusst werden, und überdies speziell bei höheren Temperaturen einen höheren Spannungsgradienten der «stress-time»-Kurve hat, bietet dessen Verwendung auch auf dem Gebiete der Hoch- und Höchstspannungstechnik wesentliche Vorteile. Diese sind mit wachsendem Raumgewicht von ganz besonderem Interesse.

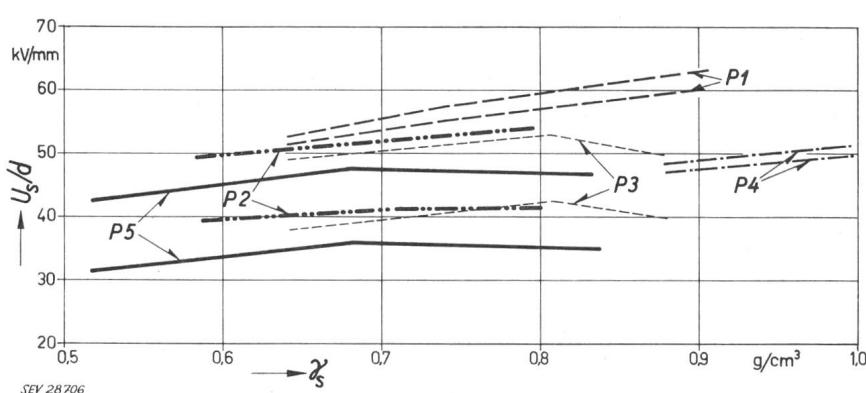


Fig. 12
Wie Fig. 11, aber für Kabelpapier
Bezeichnungen siehe Fig. 11
und Tab. I

Die Kurven der Fig. 9 und 10 zeigen einen ähnlichen Verlauf wie diejenigen in [17]. In den absoluten Werten der Stossfestigkeit sind hingegen gewisse Differenzen festzustellen, die aber der Versuchsanordnung — diese Autoren haben mit grösseren Lagenzahlen und damit mit einer totalen Isolationsdicke von 1,0 mm geprüft — zuzuschreiben sein dürften.

Zur Vervollständigung der Messergebnisse wurden abschliessend an den gleichen Mustern von acetyliertem Papier und Kabelpapier Messungen der momentanen Durchschlagfestigkeit bei Industriefrequenz von 50 Hz unter Verwendung der gleichen Apparaturen und Versuchsanordnung durchgeführt. Die Resultate sind in den Fig. 11...14 wiedergegeben, aus denen man im wesentlichen — wenn auch nicht

so deutlich ausgeprägt — die gleichen oder analoge Zusammenhänge, wie sie vorstehend für die Stossfestigkeit formuliert worden sind, ableiten kann.

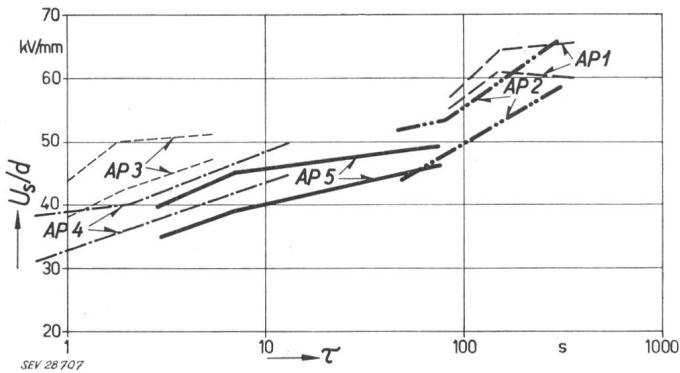


Fig. 13

Durchschlagfestigkeit U_s/d von acetyliertem Papier in Funktion der pro Blatt gemessenen Luftdurchlässigkeit τ (nach Bekk)
Bezeichnungen siehe Fig. 11 und Tab. I

Auch die Durchschlagfestigkeit bei 50 Hz ist in weit höherem Masse von der Durchlässigkeit der Papiere als von deren Raumgewicht abhängig. Die Versuche erweisen, dass bei gleicher, niedriger Durchlässigkeit auch acetylierte Papiere die Durchschlagwerte eines guten Kabelpapiers erreichen.

Die vorliegende, in den Applikations- und Forschungslaboratorien der Isolierstoffindustrie durchgeführte Arbeit erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern ist als Diskussionsbeitrag zu betrachten.

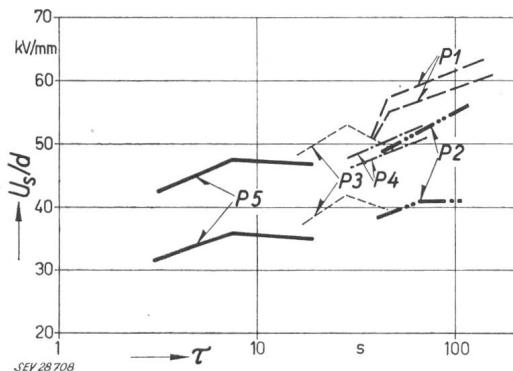


Fig. 14

Wie Fig. 13, aber für Kabelpapier
Bezeichnungen siehe Fig. 11 und Tab. I

Als nächster Schritt wäre zu prüfen, inwieweit die vorliegenden Resultate auch auf fertige, nach dem sog. «Kabelverfahren» aufgebrachte Isolationen übertragen und verwertet werden dürfen. Diese Untersuchungen waren mangels der hiefür notwendigen Einrichtungen dem Autor nicht möglich und sollten deshalb von der Verbraucherseite durchgeführt werden.

4. Anhang

Bestimmung der (Luft-)Durchlässigkeit von Papier

4.1 Allgemeines

Die Durchlässigkeit ist für alle Papiere, ob diese nun für elektrische oder andere Zwecke verwendet werden, eine wichtige Größe.

Prinzipiell kann die Durchlässigkeit für verschiedene gasförmige oder flüssige Medien bestimmt werden. Meistens wird aber Luft verwendet, weil sich derart die Bestimmung am einfachsten durchführen lässt. Flüssigkeiten würden langsamer durch das Blatt hindurchtreten, und zudem werden fast alle Fasern von den meisten Flüssigkeiten beeinflusst. Wir beschränken uns deshalb nachfolgend auf den Begriff der *Luftdurchlässigkeit*. Das grundlegende Prinzip bei deren Bestimmung ist folgendes:

Eine bestimmte Menge Luft wird unter der Wirkung einer Druckdifferenz durch eine bestimmte Fläche des zu prüfenden Blattes gesaugt oder gedrückt. Dabei wird entweder die pro Zeiteinheit durchgetretene Luftmenge oder die Durchtrittszeit für eine bestimmte Luftmenge gemessen.

Der Durchtritt von Luft durch ein Papierblatt folgt — gewisse Bedingungen vorausgesetzt — dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz für stationäre, laminare Gasströmung durch Kapillarsysteme [19]:

$$V = k \frac{A t (p_e - p_a) (p_e + p_a)}{2 \eta d p} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

V Gasvolumen

A Prüffläche

t Prüfdauer

p_e Gasdruck auf der Eintrittsseite des Blattes

p_a Gasdruck auf der Austrittsseite des Blattes

η Viskositätskoeffizient des Gases

d Dicke des Kapillarsystems

p Druck im Volumenmessraum

k Konstante, welche die Kapillarstruktur berücksichtigt.

Dieses Gesetz ist gültig, sofern

a) die Porengröße innerhalb bestimmter Grenzen liegt,

b) laminare Strömung vorliegt,

c) keine Änderung der Kapillarstruktur stattfindet, und

d) der mittlere Gasdruck nicht zu niedrig ist.

Im Allgemeinen treffen diese Bedingungen für die meisten Papiere zu.

Somit kann man sagen, dass, physikalisch betrachtet, die Luftdurchlässigkeit von Papiere, dar gestellt durch die pro Zeiteinheit durch das Blatt durchgetretene Luftmenge,

a) der Prüffläche, der wirksamen Druckdifferenz, der Prüfdauer und der Kapillarstruktur direkt proportional und

b) der Dicke des Papierblattes und der Viskosität des Mediums umgekehrt proportional ist.

Bei der Prüfung und Beurteilung sind ferner folgende physikalischen Einflüsse zu berücksichtigen:

a) Durch die Einwirkung des Gasdruckes kann die Probe eine Veränderung ihres Gefüges im Sinne einer Verdichtung oder Auflockerung erfahren. Verdichten bewirkt eine Verkleinerung, Flächendehnung (Beanspruchung auf «Bersten») hingegen eine Vergrößerung der Kapillaren. Je nach Papiersorte kann dabei der eine oder der andere Einfluss überwiegen.

b) Die Größe der Prüffläche hat einen Einfluss, weil proportional mit der Fläche auch deren Dehnung ansteigt und größere Luftdurchlässigkeit verursacht. Ferner aber ist der Anteil von eventuell seitlich eintretender Luft bei kleinen Flächen relativ größer als bei großen Flächen.

c) Die Luftfeuchtigkeit, welche die Fasern zu quellen und damit die Struktur zu beeinflussen vermag, kann deshalb einen wesentlichen Einfluss auf die Luftpurchlässigkeit ausüben.

Definiert man als Durchlässigkeit oder Permeabilität p_d — eine das Kapillarsystem beschreibende Grösse —, das Luftpolumen in ml von 1 kg/cm², welches durch eine Fläche von 1 cm² innerhalb 1 s beim Druckunterschied 1 dyn/cm² hindurchtritt, dann kann man schreiben:

$$V = p_d A t (p_1 - p_2) \quad (2)$$

Dabei ist wiederum eine geringe Druckdifferenz ($p_1 - p_2$) vorausgesetzt, d. h. die Luft darf nicht zusammengedrückt werden, da sonst das Luftpolumen auf den beiden Seiten des zu prüfenden Blattes nicht mehr dasselbe wäre.

In Zusammenarbeit mit Verbrauchern von Pappieren aus verschiedenen Anwendungsbereichen und Ländern kann man feststellen, dass die Luftpurchlässigkeit nach völlig verschiedenen Systemen gemessen wird. Dabei ist es oft sehr erschwerend und unbefriedigend, dass für die Umrechnung der Messergebnisse des einen Apparates in jene, welche mit einem andern erzielt wurden, Relationen fehlen, denn die Fachliteratur enthält nur wenige solche Angaben.

4.2 Verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Luftpurchlässigkeit

Die verschiedenen gebräuchlichsten Verfahren zur Bestimmung der Luftpurchlässigkeit können nach Tabelle III unterteilt werden.

Unterteilung der Verfahren zur Bestimmung der Luftpurchlässigkeit

Tabelle III

Zur Bestimmung verwendetes Messinstrument	Messmethode nach...	Kurzzeichen
Aspirations-Instrument	Schopper	S ₁ ...S ₅
	Sheffield	Sh
	AFNOR ¹⁾	A
Kompressions-Instrument	Gurley	G
	Gurley-Hill SPS	G—H
Kapillar-Instrument	Bekk	B
	Emanueli	E

¹⁾ AFNOR = Association Française de Normalisation

Aspirations-Instrumente arbeiten mit konstantem Druck und ergeben demzufolge die genauesten Messungen, insbesondere jene, welche nur kleine Druckdifferenz benötigen.

Physikalische Bedingungen der verschiedenen Meßsysteme zur Bestimmung der Luftpurchlässigkeit

Tabelle IV

Messverfahren	Literatur	Prüffläche <i>A</i> cm ²	Prüfdruck <i>P</i> g/cm ²	Prüfdauer <i>t</i> s	Prüfvolumen <i>V</i> cm ³	Konditionierung	Einheit
Schopper S ₁ DIN 53120 BS 698	19, 24 19	10	10	60	1)		cm ³ /min
Schopper S ₂		10	54 ³⁾	60	zu bestimmen	15—25 °C 65 % rel. F. 18 h ²⁾	cm ³ /min
S ₃		10	100 ⁴⁾	60			cm ³ /min
S ₄		10	135 ⁶⁾	60			cm ³ /min
S ₅		100	10 ⁷⁾	60	5)		cm ³ /min
Sheffield Sh	23	6,5 ⁹⁾	70	60	zu bestimmen	gem. Tappi-Standards	cm ³ /min
Afnor A	37	10	10	60	zu bestimmen	20 ± 2 °C 65 ± 2 % rel. F.	$A = \frac{f V}{F p t}$; ¹²⁾ cm ³ /s, cm ²
Gurley G ASTM	19, 30 31, 32 33, 38	6,5 ⁹⁾	12,4 ¹⁰⁾				
Gurley-Hill SPS G—H	19, 20 23, 25 ¹¹⁾	6,5 ⁹⁾	12,4	zu bestimmen	100		s/100 cm ³
Bekk B	19 24 35	1	500			20 ± 2 °C 65 ± 2 % rel. F.	s/100 cm ³
Emanueli- Impermeabilität E	19 21, 22 31 28	1	500	unbestimmt	100		[1/cm ²] ¹³⁾ Vergleich mit bekannten Kapillaren

Die Kurzbezeichnungen der Messmethoden sind fett gedruckt.

¹⁾ bis 4 l/min

⁸⁾ bis 15 ml/min

²⁾ siehe [23]

⁹⁾ 1 square inch

³⁾ 40 mm Hg

¹⁰⁾ 124 mm WS anfänglich, gem. [40], am Schluss 121 mm WS

⁴⁾ 0 bis 100 g/cm²

¹¹⁾ SPS: Softness, Porosity, Smoothness

⁵⁾ bis 1 l/min

¹²⁾ f in g/cm² (Flächen- oder m²-Gewicht), F in cm²,

⁶⁾ 100 mm Hg

p in g/cm², t in s

⁷⁾ 0 bis 10 g/cm²

¹³⁾ die Impermeabilität nach Emanueli wird meist als reine Zahl angegeben

Die einfachsten Verfahren benützen Kompressionsinstrumente, wobei allerdings die Druckdifferenz zwischen beiden Seiten des zu prüfenden Blattes nicht konstant gehalten werden kann, sondern im Verlauf der Messung abnimmt, was die Genauigkeit — meist allerdings in zu vernachlässigendem Rahmen — beeinträchtigt.

Schliesslich wäre noch das Verfahren mit Kapillar-Instrumenten zu nennen, welches auf dem Vergleich des Luftdurchgangs mit einer bekannten Normalkapillaren und der Messung der Druckdifferenz auf beiden Seiten des zu messenden Blattes, bzw. der Normalkapillaren beruht.

Auf eine nähere Beschreibung der einzelnen Verfahren und Apparaturen wird hier nicht eingegangen, sondern auf die einschlägige Literatur verwiesen.

4.3 Relationen zwischen den verschiedenen Verfahren

Sofern die bei den einzelnen Meßsystemen zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit vorgeschriebenen Bedingungen bekannt sind, kann anhand von Gl. (2) eine Umrechnung zwischen den verschiedenen Verfahren durchgeführt werden. Dies wurde in den Tab. IV und V getan, wobei die erhaltenen Relationen durch praktische Messresultate ergänzt und wenn immer möglich durch Messungen aus ganz verschiedenen Laboratorien (z. B. aus eigenen, solchen der in- und ausländischen Papier-, wie aber auch der Kabelindustrie), gemessen an den jeweils gleichen Papierqualitäten, aber nach verschiedenen Meßsystemen, verwendet wurden.

Die wenigen bekannten und veröffentlichten Zusammenhänge wurden ebenfalls in den Tabellen IV und V aufgeführt und nach Möglichkeit solchen von praktischen Luftdurchlässigkeitsmessungen gegenübergestellt.

Die Umrechnungsfaktoren von einem System in jedes der anderen Systeme können der Tab. V (siehe S. 648 und 649) entnommen werden, wobei die Grundlagen für die einzelnen Systeme und der Umrechnung zu Grunde gelegten Prüfbedingungen in Tab. IV festgehalten sind.

4.4 Genauigkeit

Die dem Autor bekannten und von der Kabel- und Papierindustrie zur Verfügung gestellten Unterlagen über die Genauigkeit der Luftdurchlässigkeitsmessungen sind sehr verschieden. Als Anhaltspunkt und für normale Papiere unter Voraussetzung der Beachtung konstanter Bedingungen (gute Einspannung, Konditionierung der Proben sowie der Luft usw.) kann bei Messung an der gleichen Stelle jedes Blattes mit einer Reproduzierbarkeit von etwa $\pm 10\%$ gerechnet werden. [31] gibt für Luftdurchlässigkeitsmessungen (nach Gurley) sogar Werte von $\pm 5\%$ (bei 40 s) bis $\pm 10\%$ (bei 300 s) an.

Bei Messungen an verschiedenen Stellen eines einzelnen Blattes muss unter Umständen jedoch mit Ungenauigkeiten bis zu $\pm 100\%$ gerechnet werden, wobei damit gleichzeitig die Ungleichmässigkeit des Blattes erfasst werden kann. Man ist deshalb gut beraten, wenn die Luftdurchlässigkeit nicht nur an einzelnen Blättern, sondern auch an einer Kombination von mehreren Blättern und jeweils an verschiedenen Stellen gemessen wird.

Aus der vorstehenden Arbeit «Beitrag zur Kenntnis der Stossfestigkeit von Isolierpapieren» ist ersichtlich, dass die Luftdurchlässigkeit zwischen den einzelnen Qualitäten wie auch durch entsprechende Nachbehandlung (Satinage) an Blättern der gleichen Qualität in weiten Grenzen variiert werden kann. Die bei der Bestimmung der Luftdurchlässigkeit auftretenden, z. T. relativ grossen Streuungen sind deshalb in diesem Zusammenhang nicht allzu schwerwiegend.

Literatur

- [1] Roth, A.: Papier in Mineralöl in «Hochspannungstechnik», 3. Aufl.; Wien: Springer 1950. S. 55 ff.
- [2] Imhof, A.: Isolierstoffprobleme bei 380-kV-Anlagen; Papier in Mineralöl in «Fortschritte der Hochspannungstechnik», hg. von W. O. Schuhmann und H. Prinz, Bd. 2; Leipzig: Geest & Portig 1954. S. 346 ff.
- [3] Imhof, A.: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der elektrischen Isolationstechnik. Sci. electr. Bd. 2(1955), Nr. 1, S. 37...45.
- [4] Ringier, W.: Messgruppen in Hochspannungsnetzen. Bull. SEV Bd. 48(1957), Nr. 26, S. 1153...1161.
- [5] Ritz, H.: 380-kV-Messwandler; Innenisolation und Imprägnierung in «Fortschritte der Hochspannungstechnik», hg. von W. O. Schuhmann und H. Prinz, Bd. 2; Leipzig: Geest & Portig 1954. S. 203 ff.
- [6] King, A. und V. H. Wentworth: Raw Materials for Electric Cables; London: Benn 1954. Kapitel 2: Paper, S. 15 ff.
- [7] Höglberg, H.: Kunststoffanwendung in der Elektroindustrie. Kunststoffe Bd. 46(1956), Nr. 12, S. 557...562.
- [8] Norris, E. T.: Transformers, Regulators and Reactors. Proc. IEE Bd. 105(1958), Part A, Nr. 21, S. 241...249.
- [9] Hansson, B.: Diskussionsbeitrag zu [17]. Trans. AIEE Bd. 74 (1955), Part 3: Power App. and Syst., Nr. 22, Febr. 1956, S. 1357...1358.
- [10] Blankenburg, W.: Spulen- oder Lagenwicklung bei Höchstspannungen? Dtsch. Elektrotechn. Bd. 12(1958), Nr. 4, S. 112...118. (bes. S. 114).
- [11] Halperin, H.: Insulated Electric Power Cables. Electr. Engng. Bd. 78(1959), Nr. 5, S. 604...614.
- [12] Hall, H. C. und D. J. Skipper: The Impulse Strength of Lapped Impregnated Paper Dielectric. Proc. IEE Bd. 103(1956), Part A, Nr. 12, S. 571...582.
- [13] Vogel, W.: Zur Physik der Hochspannungskabel. F & G Rdsch. Bd. -1950, Nr. 29, S. 78...88. (bes. S. 79...80).
- [14] Garton, C. G.: Physics, Chemistry and Insulation. J. IEE Bd. 1(1955), Nr. 9, S. 576...580. (bes. S. 580).
- [15] Dieterle, W.: Acetyliertes Papier als Isoliermaterial für die Elektrotechnik. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 22, S. 1045...1065.
- [16] Hall, H. C. und E. Kelk: Physical Properties and Impulse Strength of Paper. Proc. IEE Bd. 103(1956), Part A, Nr. 12, S. 564...570.
- [17] Gazzana Priaroggia, P. und G. Palandri: Research on the Electric Breakdown of Fully Impregnated Paper Insulation for High-Voltage Cables. Trans. AIEE Bd. 74(1955), Part 3: Power App. and Syst., Nr. 22, Febr. 1956, S. 1343...1365.
- [18] Salvage, B.: Discussion on Impulse Strength of Oil-Impregnated Paper. Proc. IEE Bd. 103(1956), Part A, Nr. 12, S. 591...592.
- [19] Korn, R. und F. Burgstaller: Papier- und Zellstoff-Prüfung. 2. Aufl.; Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1953. — Handbuch der Werkstoffprüfung, hg. v. E. Siebel, Bd. 4. 1. Teil, Kap. C, XI: Physikalische Papierprüfung, Luftdurchlässigkeit; S. 298...308.
- [20] Staff of the Institute of Paper Chemistry: Instrumentation Studies XXXVI: The Gurley-Hill S-P-S Tester. Paper Trade J. Bd. 110(1940), Nr. 23, Tappi Sect. S. 303...308.
- [21] Emanueli, L.: Ein Apparat zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Papiers. Technol. u. Chem. Papier- u. Zellstoff-Fabrikation Bd. 25(1928), Nr. 4, S. 49...51.
- [22] Emanueli, L.: The Emanueli Porosity Tester. An Instrument for Measuring the Porosity of Paper. Paper Trade J. Bd. 85(1927), Nr. 10, Tappi Sect., S. 98...100.
- [23] Chesley, K. G., E. D. Jones und R. L. Truax: Correlation of the Sheffield Porosimeter and the Gurley Densometer. Tappi Bd. 42(1959), Nr. 4, S. 299...300.
- [24] Tollenaar, D. und A. H. H. van Royen: Vergleich der Luftdurchlässigkeitsmessung nach Bekk und nach Schopper. Papier Bd. 11(1957), Nr. 23/24, S. 562...567.
- [25] Grant, J.: A Laboratory Handbook of Pulp and Paper Manufacture. London: Arnold 1942. Kap. VII/(3): Paper Testing-Physical Methods, Gas Porosity (Air Permeability) Tests; S. 220...222.
- [26] Anonym: La porosité et sa détermination. Le papier Bd. 32 (1929), Nr. 11, S. 1197...1198.
- [27] Micoud, H.: Des qualités physiques des papiers. Le papier Bd. 32(1929), Nr. 11, S. 1143...1149.
- [28] Emanueli, L.: High Voltage Cables. London: Chapman & Hall 1929. S. 10...13.
- [29] Brown, J. C., Jr.: Determination of the Exposed Specific Surface of Pulp Fibers from Air Permeability Measurements. Tappi Bd. 33(1950), Nr. 3, S. 130...137.

Umrechnungstabelle für die verschiedenen Meßsysteme zur Bestimmung der

	Schopper S₁ (und S₂...S₅)¹¹⁾ DIN 53120, BS 698	Sheffield Sh	AFNOR A
S₁ (S₂...S₅) siehe¹¹⁾	1 ¹⁾	$\log S_1 \approx 1,08 \log Sh - 0,23$	$S_1 = \frac{6000}{f} A^{1, 3, 4})$
Sh	$\log Sh = 0,93 \log S_1 + 0,21$	1	$\log Sh = 0,94 \log \frac{A}{f} + 3,74$ bis $1,05 \log \frac{A}{f} + 4,3$
A	$A = \frac{f}{6000} S_1^{1, 3, 4})$	$\log \frac{A}{f} = 1,07 \log Sh - 4$ bis $1,13 \log Sh - 3,96$	1
G	a) $G \geq 7500 \frac{1}{S_1}^{1, 4, 7})$ b) $G = 8500 \frac{1}{S_1}^{1, 3})$ c) $\log G \approx -\log S_1 + 4,0$ oder $G \approx 10^4 \frac{1}{S_1}$	$\log G = -1,13 \log Sh + 4,11$ bis $\log Sh + 4,3$	a) $G = 1,15 f \frac{1}{A}^{4})$ b) $G \geq 1,24 f \frac{1}{A}^{1, 7})$ c) $G = 1,42 f \frac{1}{A}^{3, 1})$
G—H	$\log G—H = -1,02 \log S_1 + 4$ oder $G—H \approx 10^4 \frac{1}{S_1}$	a) $\log G—H = -1,16 \log Sh + 4,34 [23]$ b) $\log G—H = -0,85 \log Sh + 3,9$ bis $-0,91 \log Sh + 4,2$	a) $G—H \approx \frac{10}{6} f \frac{1}{A}^{1})$ b) $\log G—H \approx -1,03 \log \frac{A}{f} + 1,22$
B	a) $B \geq 1200 \frac{1}{S_1}^{2, 6})$ b) $B = 1550 \frac{1}{S_1} [24]$	$\log B = -1,08 \log Sh + 3,4$	a) $B \geq 0,2 f \frac{1}{A}^{6})$ b) $B = 0,26 f \frac{1}{A}^{1})$
E	$\log E \approx -0,83 \log S_1 + 7,3^{5)}$	$\log E \approx -1,1 \log Sh + 8,3$ bis $-0,97 \log Sh + 8,05$	$\log E \approx -0,83 \log \frac{A}{f} + 4,2$
	S₁	Sh	A

Die Kurzbezeichnungen der Messmethoden sind fett gedruckt.

¹⁾ errechnet auf Grund der physikalischen Grundlagen gemäss Tab. IV.

²⁾ gemäss eigenen Messungen in den Laboratorien des Autors.

³⁾ gemäss Angaben und Messungen der Kabelindustrie.

⁴⁾ gemäss Angaben und Messungen der Papierindustrie.

⁵⁾ aus der Gegenüberstellung in ³⁾ und ⁴⁾.

⁶⁾ errechnet ohne Berücksichtigung der grossen Druckdifferenz bei Bekk (Expansion der Luft beim Austritt).

⁷⁾ errechnet für konstanten Druck von 12,4 mm Hg, d. h. unter Vernachlässigung des Druckabfalles.

Gurley G	Gurley-Hill SPS G—H	Bekk B	Emanuelli- Impermeabilität E prakt. Einh. ⁹⁾	
a) $S_1 \geq 7500 \frac{1}{G}$ ^{1, 4, 7)} b) $S_1 = 8500 \frac{1}{G}$ ^{1, 3)} c) $\log S_1 \approx -\log G + 4,0$ oder $S_1 \approx 10^4 \frac{1}{G}$	$\log S_1 \approx -0,98 \log G—H + 3,9$ oder $S_1 \approx 10^4 \frac{1}{G—H}$	a) $S_1 \geq 1200 \frac{1}{B}$ ^{2, 6)} b) $S_1 = 1550 \frac{1}{B}$ ^[4]	$\log S_1 = -1,21 \log E + 8,85$ ⁵⁾	
$\log Sh \approx -0,95 \log G + 3,9$ bis $-\log G + 4,3$	a) $\log Sh = -0,87 \log G—H + 3,75$ ^[23] b) $\log Sh = -1,08 \log G—H + 4,6$ bis $-1,10 \log G—H + 4,6$	$\log Sh = -0,93 \log B + 3,15$	$\log Sh = -0,93 \log E + 7,5$ bis $-1,03 \log E + 8,3$	Sh
a) $A = 1,15 f \frac{1}{G}$ ⁴⁾ b) $A \geq 1,24 f \frac{1}{G}$ ⁷⁾ c) $A 1,42 = f \frac{1}{G}$ ³⁾	a) $A \approx \frac{10}{6} f \frac{1}{G—H}$ ¹⁾ b) $\log \frac{A}{f} \approx -0,98 \log G—H + 0,12$	a) $A \geq 0,2 f \frac{1}{B}$ ⁶⁾ b) $A = 0,26 f \frac{1}{B}$ ¹⁾	$\log \frac{A}{f} = -1,21 \log E + 5,1$	A
1	a) $G \approx G—H [19; 20]$ b) $\log G = 0,93 \log G—H + 0,08$ bis $1,01 \log G—H - 0,15$	$\log G = 0,98 \log B + 0,78$	a) $\log B \approx \log E - 3,8$ ¹⁰⁾ b) $\log G \approx \log E - 4,22$ bis $1,44 \log E - 5,55$ ^[31] c) $G = \frac{60}{10^6} E d_{mil} =$ $= 0,024 E d_{cm}$ ¹²⁾ d) $G = 0,022 \dots 0,024 E d_{cm}$ ³⁾	G
a) $G—H \approx G [19; 20]$ b) $\log G—H = 1,08 \log G - 0,08$ bis $0,99 \log G + 0,14$	1	$\log G—H \approx 1,02 \log B + 0,78$	$\log G—H \approx \log E - 4,3$ bis $1,18 \log E - 4,6$	G—H
$\log B \approx 1,01 \log G - 0,79$	$\log B = 0,98 \log G—H - 0,77$	1	$\log B \approx 1,2 \log E - 5,5$ bis $1,78 \log E - 7,8$ ⁸⁾	B
a) $\log E \approx \log G + 3,8$ ¹⁰⁾ b) $\log E \approx \log G + 4,22$ bis $0,7 \log G + 3,86$ c) $E = \frac{10^6}{60} \frac{1}{d_{mil}} G = \frac{G}{0,024 d_{cm}}$ [31] ¹²⁾ d) $E = \frac{G}{0,022 \dots 0,024 d_{cm}}$ ³⁾	$\log E = \log G—H + 4,3$ bis $0,85 \log G—H + 3,9$	$\log E = 0,53 \log B + 4,4$ bis $0,84 \log B + 4,66$ ⁸⁾	1	E
G	G—H	B	E	

Das > Zeichen gilt bei Berücksichtigung des Druckabfalles.
⁸⁾ aus Vergleichsmessungen gemäss ²⁾ und ³⁾.

⁹⁾ Emanueli - Impermeabilität ist in praktischen Einheiten angegeben. 1 praktische Einheit = 10^{-5} abs. Einheit.

¹⁰⁾ aus [17] errechnet.

¹¹⁾ die Umrechnung nach Messungen gemäss Schopper S_2 bis S_5 erfolgt auf Grund folgender Beziehung:

$$S_1 = 0,185 S_2 = 0,10 S_3 = 0,075 S_4 = 0,1 S_5$$

¹²⁾ 1 mil = 1/1000 Zoll = 25,4/1000 mm.

- [30] Jackson, W.: The Insulation of Electrical Equipment. London: Chapman & Hall 1954. Kap. 7.3.6: Power Cables and Capacitors, Paper; S. 180...185.
- [31] King, A. und V. H. Wentworth: Raw Materials for Electric Cables. London: Benn 1954. Kap. 2: Paper; S. 32...33.
- [32] ASTM, D. 202-45 T, Sampling and Testing of Paper Used in Electrical Insulation.
- [33] Anonym: High Pressure Gurley Densometer. Paper Trade J. Bd. 110(1940), Nr. 13, S. 14.
- [34] VSPPF-EMPA C 1301, Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Papier.
- [35] VSPPF-EMPA C 1019, Bestimmung der Porosität bzw. Porositätszahl nach Bekk.
- [36] Tappi T 460 m — 49.
- [37] NF Q 03-001, März 1958, Essais des papiers et cartons. III, C: Texture, Permeabilité à l'air; S. 6...7.
- [38] Clapperton, R. H.: Modern Paper-Making. Oxford: Blackwell 1952. Air Permeability; S. 457...459.
- [39] Labarre, E. J.: Dictionary and Encyclopaedia of Paper and Paper-Making. S. 73: Densometer; S. 189...190: Permeability of Paper.
- [40] Coupe, R. R.: Proc. Techn. Section, Brit. Paper and Board Makers Ass. Bd. 31, Part 2(1950), Juni, S. 383...454.

Adresse des Autors:

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

Une pratique périmée: La marche au limiteur

Communication de la Commission d'études de l'ASE pour le réglage des grands réseaux, rédigée
par M. Tiercy, Lausanne

621.316.726 + 621.316.728 : 621.311.161

L'auteur expose les raisons qui, indépendamment de toute considération purement théorique, militent en faveur de l'abandon de la marche au limiteur d'ouverture pratiquée à l'heure actuelle et à l'encontre de l'intérêt général des réseaux par la quasi totalité des groupes au fil de l'eau.

Fast alle Laufwerke betreiben ihre Turbine-Generator-Gruppen heute im Gegensatz zu den allgemeinen Interessen des Verbundbetriebes mit Öffnungsbegrenzung. Der Autor legt die Gründe dar, welche unabhängig von jeder rein theoretischen Betrachtung dafür sprechen, diese Betriebsart aufzugeben.

La notion de solidarité entre grands réseaux interconnectés est maintenant admise par tous leurs exploitants et ne semble plus devoir être mise en cause. Elle implique que chaque participant est prêt à offrir les mêmes services que ceux qu'il attend des autres partenaires pour le maintien de la fréquence en marche normale et en cas de perturbation. Ce principe de réciprocité constitue la base morale indispensable au fonctionnement harmonieux d'un ensemble interconnecté.

Les études nées du développement généralisé des interconnexions et de l'introduction du réglage fréquence-puissance ont démontré la nécessité de faire participer au réglage secondaire le plus grand nombre possible de groupes génératrices. Le développement actuel des réseaux particuliers exige qu'il s'y développe un même esprit de solidarité, ce qui pose le problème de l'utilisation du limiteur d'ouverture pour les groupes à réglage primaire et de l'aide que ces derniers doivent apporter à ceux qui assument le réglage fréquence-puissance et par conséquent les obligations du réseau général à ses points d'interconnexion.

L'examen objectif des trois critères: Qualité — Sécurité — Economie conduit invariablement à proscrire l'emploi du limiteur d'ouverture.

Qualité: Les fluctuations de la fréquence ne dépassent actuellement jamais les limites de $\pm 0,1$ à $0,2$ Hz en marche normale. Avec un statisme fixé généralement à 5 à 6 %, le maintien d'un programme est assuré avec une précision largement suffisante. L'utilisation du limiteur est contraire à l'intérêt général; son abandon dans les conditions actuelles n'entraîne qu'une prestation insignifiante pour chacun des groupes à réglage primaire, mais la somme de ces prestations représentera une aide bienvenue aux unités réglantes et contribuera encore à améliorer la tenue de la fréquence.

Sécurité: La sécurité d'exploitation repose entièrement sur les usines réglantes si les autres fonctionnent sur limiteur. La pratique a montré les

inconvénients qu'un tel état de fait peut entraîner en cas de perturbation, surtout si les usines réglantes ne disposent pas d'une réserve suffisante pour réagir en plus ou en moins.

Economie: Les réserves nécessaires pour assurer une sécurité d'exploitation suffisante vis-à-vis des perturbations sont généralement beaucoup plus importantes que celles nécessaires au réglage. La réserve tournante supplémentaire nécessitée par la sécurité apparaît immédiatement, sous forme de groupes synchrones ou à charge partielle, comme une charge onéreuse et stérile pour les usines réglantes. L'ensemble des groupes à réglage primaire présentera toujours une marge de surpuissance bien-vue et gratuite s'ils ne sont pas limités.

L'abandon du limiteur d'ouverture n'entraînera qu'une prestation insignifiante des groupes à réglage primaire. Les petites corrections du réglage de la charge ne nécessiteront ni une marge de sécurité importante dans les bassins, ni des interventions trop fréquentes du personnel de quart. De même, lors de perturbations graves, qui sont d'ailleurs rares et de courte durée, les éventuels déversements ou pertes momentanées de chute n'auront pratiquement que des conséquences financières négligeables.

Il apparaît donc que l'emploi du limiteur d'ouverture peut, sans inconvénients et avec de grands avantages, être abandonné comme mode de fonctionnement normal et limité strictement à des situations exceptionnelles. Le limiteur retrouvera ainsi son but originel d'organe de sécurité en cas de défaillance du régulateur.

La marche au limiteur appartient à une époque révolue. S'il est un domaine où les hommes doivent se tourner résolument vers l'avenir, c'est bien celui de l'exploitation des réseaux électriques.

Nous avons l'impression que cette question, qui prendra toujours plus d'importance, est généralement mal comprise, voire ignorée et laissée à l'appréciation du personnel d'usine. Ce dernier pense s'assurer une plus grande quiétude en marchant au