

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 74 (1983)

**Heft:** 13

**Artikel:** Erniedrigung der Dielektrizitätskonstanten fester Isolationen

**Autor:** Dahinden, V.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904835>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.10.2024

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

# Erniedrigung der Dielektrizitätskonstanten fester Isolationen

V. Dahinden

Die starke Verschiedenheit der Dielektrizitätskonstanten (DK) von Pressspan und Öl im Transformator führt beim Mischdielektrikum zu einer schlechten Ausnutzung der Eigenschaften des Pressspans. Es wird über Untersuchungen zur Angleichung der DK berichtet.

La grande différence entre les constantes diélectriques de l'huile et du presspan donne lieu à une mauvaise utilisation diélectrique de celui-ci dans un transformateur. Des recherches en vue d'une harmonisation des permittivités sont décrites.

## 1. Einleitung

Durch die Erniedrigung der Dielektrizitätskonstanten (DK) von festen Isolationen von Transformatoren und durch deren Anpassung an diejenige des Öls wird eine ausgeglichene Belastung und bessere Ausnutzung des Mischdielektrikums erzielt, ohne die Belastung der Ölkanäle zu erhöhen. Kleinere Isolationsabstände erlauben eine kompaktere Bauweise und eine Senkung der am höchsten bewerteten Leerlaufverluste. Feste Isolationen mit niedrigerer DK erbringen somit Ersparnisse bei der Konstruktion und im Betrieb von Transformatoren. Deshalb wurden über die Erniedrigung der DK von festen Isolationen umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, über die nachfolgend berichtet wird.

## 2. Bedeutung der Anpassung der Dielektrizitätskonstanten

Im Zweistoffdielektrikum Öl/Pressspan stellen sich immer wieder Probleme der dielektrischen Verschiebung infolge der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten. Gemäss der allgemeinen Formel des Verschiebungsflusses für homogene Felder

$$E_1 / E_2 = \epsilon_2 / \epsilon_1$$

bilden sich bei Wechselspannung die Feldstärken in den in Serie liegenden Teil-Dielektrika umgekehrt proportional zu deren Dielektrizitätskonstanten aus. Bei Anlegung einer Spannung  $U$  an ein Zweischichtdielektrikum ergibt sich die Aufteilung in die Teilspannungen  $U_1$  und  $U_2$ :

$$U_1 / U_2 = E_1 d_1 / E_2 d_2 = \epsilon_2 d_1 / \epsilon_1 d_2$$

$d_1$  = Schichtdicke Dielektrikum 1  
 $d_2$  = Schichtdicke Dielektrikum 2

Für Mehrschichtdielektrika gilt allgemein

$$U_n = U \cdot \frac{d_n / \epsilon_n}{\sum d_i / \epsilon_i}$$

Im Falle des Mischdielektrikums Öl/Transformerboard mit  $\epsilon = 2,2$  bzw.  $\epsilon = 4,4$  ergibt sich ein Feldstärkeverhältnis von 2:1, wobei das höher belastete Öl zudem eine weit geringere elektrische Festigkeit aufweist. Daraus folgt das Bedürfnis nach Anpassung der DK der Dielektrika, um so mehr als die Teilentladungseinsatzspannung von Öl je nach Ölstrecke nur etwa  $1/3$  bis  $1/4$  von Transformerboard erreicht.

Diese Anpassung der DK, also die bessere Ausnutzung der ausgezeichneten Isoliereigenschaften von Zellulose ohne Mehrbelastung der Ölkanäle, bringt beträchtliche Ersparnisse durch kompaktere Bauweise bzw. höhere Belastbarkeit bestehender Systeme und reduzierte Leerlaufverluste.

Die Ersparnis lässt sich anhand eines Beispiels eines 200-MVA/500-kV-Transformators errechnen, wo in den USA die Leerlaufverluste mit etwa 5700 \$/kW bewertet werden. Eine Reduktion der DK auf 3,3 und damit der Verluste von ursprünglich 211 kW um 26 kW ergibt somit eine Ersparnis von 148 000 \$, was gegenüber den Gesamtkosten von 1,5 Mio \$ einer Reduktion von rund 10% entspricht. Gelingt eine Reduktion der DK auf 2,6, verringern sich die Verluste um 46 kW, wodurch sich die Ersparnis fast verdoppelt. Nicht berücksichtigt ist die Ersparnis durch bessere konstruktive Ausnutzung der Isolierstoffe.

Dieser Kostenreduktion ist die Verteuerung durch den Einsatz eines modifizierten festen Dielektrikums entgegenzusetzen. Bei einer angenommenen Verteuerung der Isolationskosten von 20 \$/kg ergeben sich bei 3000 kg Anteil fester Isolation Zusatzkosten von 60 000 \$, wodurch sich die Gesamter-

Die Arbeit ist im Rahmen eines Projektes des Department of Energy DOE (USA) entstanden.

### Adresse des Autors

V. Dahinden, dipl. Chem., H. Weidmann AG, Rapperswil.  
Mitautoren sind: H. G. Fischer, EHV-Weidmann Ltd., St. Johnsbury (USA), sowie R. Ammann, P. Brupbacher, H. Hummel, H. Weidmann AG, 8640 Rapperswil.

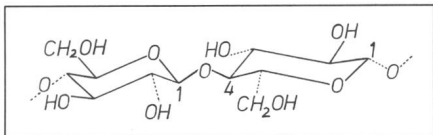


Fig. 1 Aufbau der Zellulosemoleküle

sparsnis bei einer DK der festen Isolation von 3,3 auf etwa 6% reduziert.

### 3. Möglichkeiten zur Beeinflussung der Permittivität

Das Zellulosemolekül weist von seinem Aufbau her eine gewisse Orientierung auf, zumal die Konstellation der O- und OH-Gruppen am Molekül mit ihrer Elektronegativität eine Symmetrie ausschliessen (Fig. 1).

Das Resultat ist eine DK von etwa 5 von reiner Zellulose. Transformerboard enthält durch seine Faserstruktur einen kleinen Anteil Hohlräume, welche im Zweistoffdielektrikum mit Öl gefüllt werden. Die Dielektrizitätszahl naphtenischer und paraffinischer Isolieröle liegt dank ihrem nach aussen neutralen Kohlenwasserstoffaufbau bei 2,2.

Je nach Raumgewicht von Transformerboard ergeben sich grössere und kleinere Zwischenräume im Fasergemisch, welche mit Öl niedriger DK ausgefüllt werden. Es entsteht also eine Mischdielektrizitätszahl von öl-impregniertem Transformerboard, welche von 4,4 für hochdichtes pre-compressed Transformerboard bis 3,6 für formbare Qualitäten niedriger Dichte (0,8) reicht.

Die DK des öl-impregnierten Feststoffdielektrikums hängt somit vom Raumgewicht ab. Allerdings lässt sich dieses nicht ohne Einbusse von mechanischer und elektrischer Festigkeit beliebig reduzieren. Das Dichteminimum liegt bei etwa 0,8, was einer DK von etwa 3,6 entspricht. Die Spanne von 3,6 zu 2,2 von reinem Öl ist immer noch relativ gross, so dass andere Massnahmen zur weiteren Reduktion der Dielektrizitätszahl wünschenswert sind.

3.1 Die Auswahl verschiedener Zellulosesorten wurde als erstes in Betracht gezogen. Damit lassen sich jedoch nur geringfügige Unterschiede der DK erzielen.

3.2 Gemäss diversen Publikationen erfolgt nach Behandlung von Zellulosemolekülen mit Silanen eine erhebliche Reduktion der DK. Diese Metho-

den wurden auf verschiedenste Art nachvollzogen, jedoch ohne die gewünschte Wirkung zu erhalten. Offensichtlich war der Effekt nur temporär; die für die Silanisierung erforderlichen Chemikalien liessen sich nicht genügend in die Faserstruktur des Transformerboards einbringen. An der Einzelfaser vorgenommene Silanisierungsversuche führten ebenfalls nicht zum Ziel.

3.3 Da die Modifikation von Zellulosemolekülen durch chemische Substanzen im allgemeinen zu keinen ermutigenden Resultaten führten, mussten andere Lösungen in Betracht gezogen werden. Zur Wahl stand die Substitution der Zellulose gemeinhin oder die Vermischung von Zellulose mit anderen Fasern oder Substanzen.

Die Substitution der Zellulose durch Kunststoffe wurde schon öfter erwogen, scheiterte jedoch immer wieder an der mangelnden Festigkeit solcher Substitute gegen thermische und mechanische Einwirkung. Auch die vorliegende Studie bestätigte frühere Erkenntnisse bezüglich mangelnder Beständigkeit reiner Kunststoffe einerseits gegen thermisch-mechanische Belastung, andererseits gegen chemische Einwirkung durch Mineralöle und Silikonöle.

### 4. Beimischungen von Fremdfasern

Die Vermischung von Zellulosefasern mit Fremdstoffen schien somit die einzig gangbare Lösung zu sein. Durch Anwesenheit eines Prozentsatzes von Zellulosefasern war der für feste Isolierstoffe erforderliche mechanische Zusammenhalt gewährleistet, allerdings mit erhöhtem Anteil Fremdfasern in abnehmendem Masse. Dies ist verständlich, da die Zellulosefasern durch ihre Hydroxylgruppen mit be-

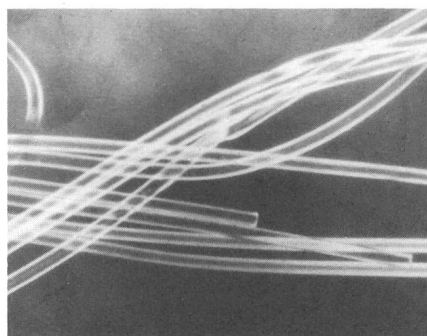


Fig. 2 PP-Fasern im ungealterten Zustand  
Vergrössert 125 : 1

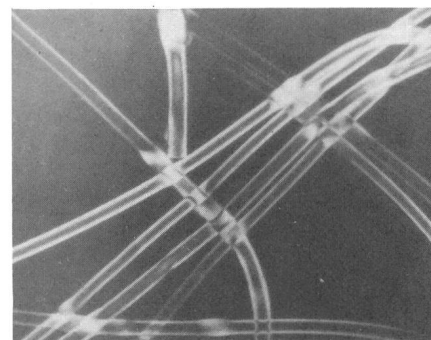


Fig. 3 PP-Fasern nach 4 h in 120 °C heissem Mineralöl (Transformatoröl)  
Verdickte Stellen deuten auf Angriff durch das Öl hin.

nachbarten Fasern starke Sekundärbindungen eingehen können, was bei Kunststofffasern in ungeschmolzenem Zustand nicht der Fall ist.

Es war also zu erwarten, dass mit zunehmendem Anteil Fremdfasern die Bindung von Faser zu Faser abnimmt und dadurch die mechanische Festigkeit leidet, die Dichte reduziert wird und die Ölaufnahme steigt. Durch diesen Effekt wird die DK gemeinhin reduziert. Setzt man zudem einen Faserstoff mit geringerer DK ein, so erfolgt eine weitere Reduktion der DK. Es resultiert immer eine Mischdielektrizitätskonstante.

Unter den verschiedenen zur Auswahl stehenden Faserbeimischungen stand das Polypropylen (PP) als geeignetster Vertreter der Polyolefine im Vordergrund. Einerseits die niedrige DK von 2,2, andererseits der relativ günstige Preis liessen diese Faser als vielversprechend erscheinen.

Diverse Beimischungen von PP-Fasern unterschiedlicher Kristallinität wurden erprobt. Die Dichte nahm mit zunehmendem Beimischungsgrad schnell ab und praktisch linear dazu die mechanische Festigkeit. Obwohl es gelang, durch thermische Behandlung von Zellulose-PP-Mischungen die fehlende Faser-Faser-Bindung durch Anschmelzen des PP herzustellen und mit einem eigentlichen Verbund zu erhalten, misslang dieses Experiment. Mangelnde Beständigkeit gegen heisses Mineralöl oder äquivalente Kühlmedien wie Silikonöl, Estermischungen usw. verunmöglichten den Einsatz von PP und seinen Homologen in Transformatoren.

Bei Temperaturen um 130 °C löst sich Polypropylen in Mineralöl vollständig auf. Auch strahlungsvernetzte Typen brachten nicht den gewünschten Erfolg (Fig. 2, 3, 4).

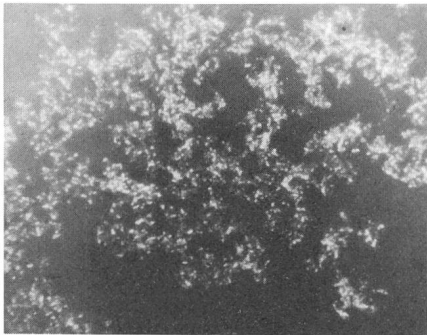


Fig. 4 PP-Fasern nach 4 h in 150 °C heissem Mineralöl

Alle Fasern sind zerstört. Nach Abkühlung bilden sich Kristalle.

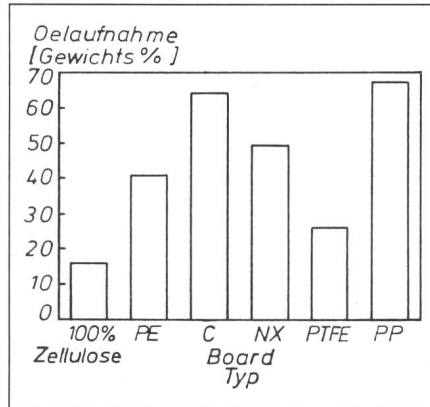


Fig. 6 Ölaufnahme verschiedener Fasern 50% synthetische Fasern im Board

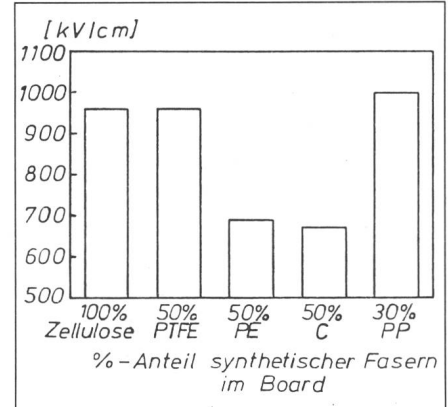


Fig. 7 Stossfestigkeit verschiedener Fasern

Weitere Möglichkeiten für Faserbeimischungen boten sich mit Aramid, Keramikfasern, Polyesterfasern, Polysulfonfasern und PTFE.

Das Aramid erwies sich als sehr beständig, allerdings mit einem geringen Effekt auf die Erniedrigung der DK, da reines Aramid  $\epsilon = 3,2$  besitzt und der Unterschied zu Zellulose zu gering ist (Fig. 5). Zudem ergäben sich Probleme, einen festen Faserverbund zu erhalten.

Keramikfasern erniedrigten die DK, jedoch unter beträchtlicher Abnahme der mechanischen und elektrischen Eigenschaften.

Auch Polysulfonfasern (PS) erbrachten eine Verbesserung. Allerdings waren diese Fasern schwer erhältlich, und die Ermittlung detaillierter Werte war aus diesem Grunde nicht möglich.

Die beste Lösung ergab sich aus einer Zumischung von Fasern aus Po-

lytetrafluoräthylen (PTFE, beispielsweise Teflon). PTFE besitzt einen sehr hohen Schmelzpunkt und ist durch seine extreme Kristallinität weitgehendst lösungsmittelbeständig. PTFE-Proben in 130 °C heissem Transformieröl ergaben keine Anlösung oder Quellung.

Im Gegensatz zu Polypropylen veränderte PTFE das Raumgewicht und die Ölaufnahme im Faserverband mit Zellulose verhältnismässig geringfügig (Fig. 6). Die Stossfestigkeit wurde bei Mischungsrelationen bis 50% PTFE nicht verringert (Fig. 7), während die DK bei 50% PTFE auf einen Wert von 3,08 reduziert wurde. Reine Zellulose ergab unter denselben Bedingungen  $\epsilon = 4,25$  (Fig. 8, 9). Wie erwartet, litt bei zunehmender Konzentration von PTFE-Fasern in der Zellulose die mechanische Festigkeit. Von ursprünglichen etwa 100 N/mm<sup>2</sup> Zugfestigkeit mit reiner Zellulose verblieben noch 70 N/mm<sup>2</sup> bei 30% und 40 N/mm<sup>2</sup> bei 50% PTFE-Zumischung.

Ähnlich wie PTFE verhielten sich Polyesterfasern (PE). Ein markanter Nachteil gegenüber PTFE besteht jedoch in der erheblich gesteigerten Ölaufnahme, welche die Ursache für die

Reduktion der DK als fragwürdig erscheinen lässt.

## 5. Anpassung mittels anderer Isolierflüssigkeiten

Die Beimischung von Kunstfasern ist sicher eine gangbare Lösung zur Reduktion der DK fester Dielektrika. Das Problem der Angleichung der DK zwischen festem und flüssigem Dielektrikum lässt sich aber auch über die flüssige Komponente erreichen, durch Substitution des Mineralöls mit Stoffen höherer DK. Seit längerer Zeit sind Isolierflüssigkeiten auf der Basis von Estergemischen bekannt, welche hauptsächlich zur Substitution der gefährlichen und giftigen polychlorierten Bisphenyle im Kondensatorenbau Anwendung finden.

Solche Flüssigkeiten wurden näher untersucht, wobei sich besonders OC 4200 von Bayer (BRD) als geeignet erwies. Mit einer Dielektrizitätskonstanten von 4,8 kommt dieses Gemisch relativ nahe an Transformieröl heran. Echte Probleme stellte die Aufbe-

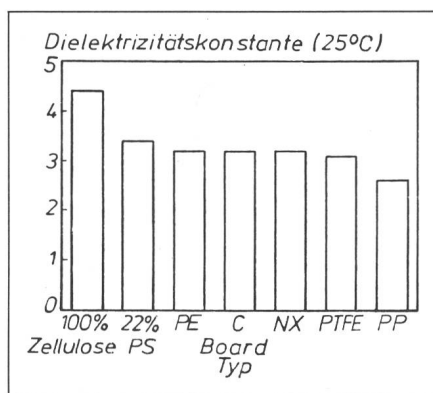


Fig. 5 DK verschiedener Fasern 50% synthetische Fasern im Board

PS Polysulfon  
PE Polyester  
C Keramik  
NX Aramid  
PTFE Polytetrafluoräthylen  
PP Polypropylen

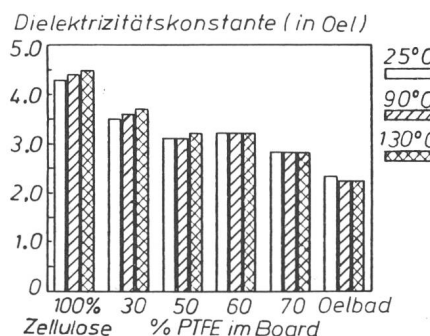


Fig. 8 DK bei verschiedenen PTFE-Anteilen im Board

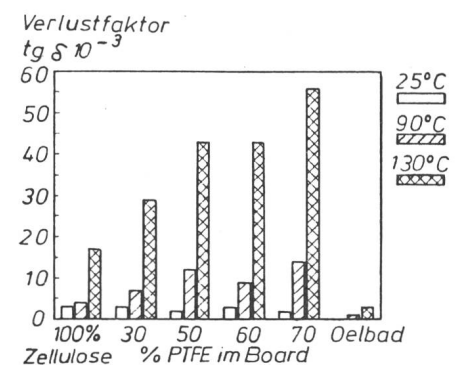


Fig. 9 Verlustfaktor bei verschiedenen PTFE-Anteilen im Board

reitung der Gemische, insbesondere die Entfernung des Wassers. Die Löslichkeit von Wasser ist in Estergemischen höher als in Mineralöl, was sich auch auf die Servicebedingungen in Transformatoren negativ auswirken dürfte. Bei sämtlichen Messungen stellte sich ein rapider Anstieg des Verlustfaktors ein, was auf ausgeprägte Hygroskopizität schliessen lässt. Auf jeden Fall wären Isoliersysteme auf der Basis Zellulose mit Estergemischen hermetisch gegen Wasseraufnahme zu verschliessen. Ebenfalls ist das Problem der Wasserbildung durch thermischen Abbau der Zellulose und dadurch erhöhten Wassergehalt in den Estergemischen, verbunden mit einem Anstieg der dielektrischen Verluste, zurzeit noch ungelöst. Diese Alternative lässt sich sicher weiter erforschen,

zumal interessante Teilresultate erzielt werden konnten.

## 6. Schlussbemerkung

Weitere Schritte in Richtung der Angleichung der Dielektrizitätskonstanten zwischen festen und flüssigen Dielektrika sind sicher erst nach Verfügbarkeit industriell gefertigter Isolierstoffe denkbar. Die erzielten Resultate entstanden ausnahmslos an Handmustern, die auf Laboratoriumsanlagen in Einzelschritten erzeugt worden waren.

Die Weiterführung der Versuche, die Erprobung von mittleren und grossen Modellen sowie der prototypmässige Einsatz solcher neuartiger Isolierstoffe in Transformatoren sind Gegenstand weiterer Projekte.

## Literatur

- [1] Méthodes recommandées pour la détermination de la permittivité et du facteur de dissipation des isolants électriques aux fréquences industrielles, audibles et radioélectriques (ondes métriques comprises). Publication de la CEI 250, 1969.
- [2] P. Henninger: Dielektrische Untersuchungen an der Papierfaser. Frequenz 4(1950)7, S. 167...177.
- [3] D.E. Kane: A study of the relationship between the dielectric constant and accessibility of cellulose. Lawrence, Institute of Paper Chemistry, 1953.
- [4] A. Venkateswaran: Formulas for the dielectric constant and dissipation factor of mixtures and their application to the cellulose system. Journal of Polymer Science 9(1965)3, p. 1127...1138.
- [5] J. W. S. Hearle: The relation between structure, dielectric constant, and electrical resistance of fibres. Journal of the Textile Institute - Proceedings 48(1957)1, p. 40...54.
- [6] A. A. Maryott and E. R. Smith: Table of dielectric constants of pure liquids. NBS-Circular 514. Washington, National Bureau of Standards, 1951.
- [7] H. Fujita and H. Itoh: Synthetic polymer papers suitable for use in EHV underground cable insulation. IEEE Trans PAS 95(1976)1, p. 130...139.
- [8] H. P. Moser: Transformerboard. Scientia Electr. 25(1979)3, p. 1...120.
- [9] H. P. Moser: Die Entwicklung von Pressspan zum Transformerboard. Bull. SEV/VSE 68(1977)24, p. 1285...1288.
- [10] V. Dahinden: Das Verhalten von Transformerboard bei Kurzschlussbeanspruchung. Bull. SEV/VSE 74(1983)7, S. 356...359.