Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 72 (1981)

Heft: 13

Artikel: Entwicklungstendenzen bei den Isolationssystemen für Transformatoren

Autor: Moser, H. P. / Dahinden, V. / Friederich, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905126

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: 10.12.2025

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

Entwicklungstendenzen bei den Isolationssystemen für Transformatoren [1])

Von H. P. Moser, V. Dahinden, H. Friederich, K. Lennarz, O. Potocnik

621.314.21;

Nach einer zusammenfassenden Darstellung der zurzeit aktuellen Isolationsmethoden von Transformatoren werden die Isolationsmöglichkeiten mittels Zellulose mit anderen Dielektrika als Mineralöl sowie denkbare Mischformen bis hin zur reinen Kunststoffisolation besprochen. Dabei kann die Kunststoff-Drahtisolation resp. die Lagenisolation als gelöst betrachtet werden. Es werden daher die Randisolations- und die Kurzschlussprobleme, soweit sie die Isolation betreffen, behandelt. Auf derzeit laufende ausgedehnte Versuche wird verwiesen.

Après description générale des méthodes d'isolement des transformateurs actuelles, l'isolement à la cellulose avec d'autres diélectriques que l'huile minérale est examinée, de même que des formes mixtes jusqu'à l'isolation uniquement en matière synthétique. L'isolation des fils en matière synthétique et l'isolation entre couches peuvent être considérées comme résolues. Les auteurs traitent, par conséquent, les isolations marginales et les problèmes de courts-circuits concernant l'isolement. Des essais étendus en cours sont mentionnés.

1. Einleitung

Seit etlichen Jahren wird intensiv an neuen Isolationssystemen für Transformatoren gearbeitet, welche eine kompaktere und ökonomischere Bauweise erlauben. Stand früher der Ersatz von Zellulose durch die damals unbeschränkt und billig zu erhaltenden Kunststoffe im Vordergrund, so hat sich seit der Ölkrise ein deutlicher Trendwechsel bemerkbar gemacht. Der Umstand, dass Holz einer der wenigen Rohstoffe ist, der innerhalb einiger Jahre ersetzt wird und somit auch in Zukunft immer zur Verfügung stehen wird, hat hier einer etwas realistischeren Betrachtungsweise Platz gemacht.

Dazu kommt, dass es zwar relativ einfach ist, Lagenwicklungen durch Folien zu isolieren, dass aber für die Lösung der Randprobleme in Verbindung mit einer kurzschlussicheren Konstruktion bei erhöhten Temperaturen die meisten Kunststoffe wegen mangelnder thermischer Stabilität ausser Betracht fallen oder dann aber preislich und meist auch verarbeitungsmässig für den normalen Anwendungsfall im Leistungstransformator uninteressant werden. Hingegen lässt sich wohl denken, dass eine kombinierte Anwendung von Kunststoffen und Zellulose neue Möglichkeiten eröffnet.

Gerade die intensive Beschäftigung mit der Substitution von Zellulose durch Kunststoffe hat zu den erwähnten etwas gedämpften Erwartungen geführt. Man sieht immer deutlicher, wie schwer es ist, ein Naturprodukt als Ganzes zu übertreffen.

2. Aktuelle Isoliertechniken

Die Entwicklung der bisherigen Transformatorentechnik ist gekennzeichnet durch eine kontinuierliche Erhöhung der Nennspannungen und Nennleistungen (Fig. 1). Bis zum Jahr 2000 werden nach amerikanischen Angaben [1] folgende Entwicklungen für die Leistungstransformatoren erwartet:

- Höhere Übertragungsspannungen (bis 1200 kV und höher)
- Grössere Einheitsleistungen pro Transformator
- Verminderung der Verluste
- Verminderung der spezifischen Transportgewichte resp. Transportmasse
- Verbesserung der Zuverlässigkeit im Betrieb
- Verminderung des Geräuschniveaus.

Nicht aufgeführt in [1] ist die Entwicklung in Richtung spezifischer Kostenreduktion pro MVA, die jedoch als dominierende Resultante im Schwerpunkt der genannten Punkte zu erkennen ist.

[1]) Kurzfassung von Vorträgen, die von den Verfassern am 11. März 1981 am Interkantonalen Technikum Rapperswil (ITR) gehalten worden sind.

2.1 Gasisolierte Transformatoren

Eine Vielzahl von Einzeluntersuchungen an Modellen wurden durchgeführt, welche erfolgversprechende Resultate zeigen. Es wird aber eingeräumt, dass für einen projektierten Grosstransformator von 500 MVA/500 kV noch eine Anzahl wichtiger Probleme gelöst werden müssen. Folgendes Konzept liegt diesem Projekt zugrunde:

- Alle Wicklungen werden als selbsttragende Folienwicklungen ausgeführt
- Windungsisolation aus Kunststoffolien, imprägniert mit SF_6
- Gesamtisolation SF_6, 5 bar, mit adäquater Endisolation
- Abgeschlossenes Wicklungskühlsystem mit vertikalen Kühlkanälen innerhalb der Folienwicklungen
- Zuführungsleitungen des Kühlmediums aus PTFE (z. B. Teflon).

Figur 2 zeigt die schematische Darstellung der geprüften Wicklungsanordnung. Bezeichnenderweise ist in der angeführten Arbeit weder das Randproblem noch die Abstützung der Wicklung gegen Erde im Detail ausgeführt, weil deren Lösung mit Kunststoffisolationen das zentrale und ungelöste Problem grosser Leistungstransformatoren darstellt.

Der Vorteil der vorgeschlagenen Lösung liegt offensichtlich in der hohen dielektrischen Beanspruchbarkeit der Windungsisolation, die eine beachtliche Reduktion der Wicklungsabmessungen ermöglicht. Ein besonderes Problem liegt in der Isolationsgestaltung an den Folienenden. Der vorgeschlagene Transformator 500 kV verlangt in diesem Bereich eine sorgfältige Abschirmung.

Die Vorteile eines solchen Grosstransformators werden insbesondere bei einer höheren zulässigen Wärmebelastung gesehen. Höhere Betriebstemperaturen erlauben bei konstanten Kühlungsbedingungen ein Heraufsetzen der Stromdichten in den Wicklungen, wodurch neben einer Reduktion an aktivem Material ebenfalls die Transportgewichte und Transportmasse

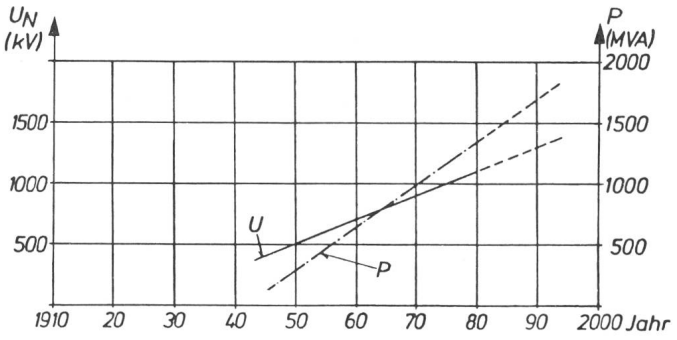

Fig. 1 Einheitsleistung P und Einheitsspannung U_N von Leistungstransformatoren im Laufe der Jahre

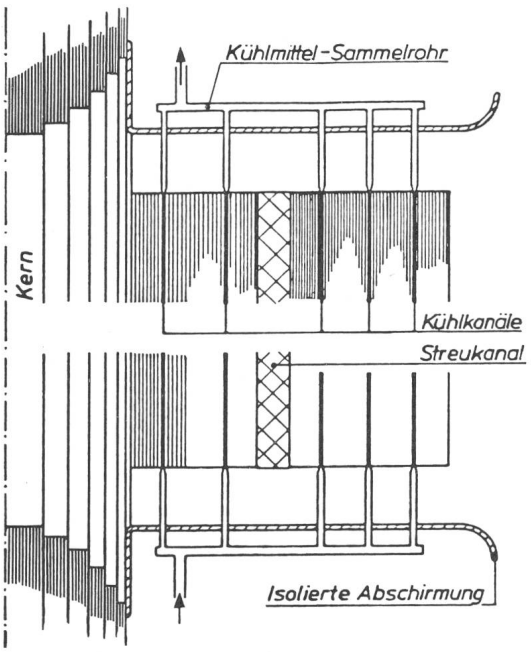

Fig. 2 Schematischer Schnitt durch eine Folienwicklung
Isolationsniveau BIL 200 kV, entsprechend einer Reihenspannung von ca. 80 kV

herabgesetzt werden können. Keineswegs reduzieren sich hierbei die elektrischen Verluste. Infolge zunehmendem ohmschem Widerstand bei höheren Temperaturen innerhalb der Wicklungen steigen die spezifischen Verluste beträchtlich an. Bezüglich der Kurzschlussfestigkeit werden der Folienwicklung grosse Vorteile zugeschrieben.

Ein besonderes Problem für die Art des vorgeschlagenen Transformators ist die Kesselausführung, da diese einem Betriebsdruck von z. B. 5 bar und mehr standhalten muss. Bis zur Realisierung des vorgeschlagenen Prototyps sind noch eine Vielzahl Probleme sowohl in elektrischer als auch in mechanischer Hinsicht zu lösen.

2.2 Silikonölisolierte Transformatoren

Seit einiger Zeit wird man sich weltweit der gesundheitsschädlichen Wirkungen von PCB (Polychlorierte Biphenyle, wie z. B. Clophen) bewusst, so dass die Anwendung dieser Stoffe industriell mehr und mehr verboten wird. Als Ersatz für die PCB wird seit einigen Jahren schwer entflammbares Silikonöl eingesetzt [2; 3]. In der Zwischenzeit sind umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, um das Verhalten spezifischer Silikonöle genauer kennenzulernen.

Ein grosser Nachteil von Silikonölen besteht in der Unverträglichkeit gegenüber verschiedenen Kunststoffen, gegenüber gewissen Metallen (z. B. Messing) und zahlreichen in Metallen vorkommenden Verunreinigungen. Die heutige Anwendung liegt im Ersatz von PCB resp. in der Anwendung bei Lokomotivtransformatoren, die mit höherer Temperatur betrieben werden. Eine generelle Anwendung in grossen Leistungstransformatoren wird als wenig wahrscheinlich angesehen.

2.3 Dampfgekühlte (vapor cooled) Transformatoren

Zur Intensivierung der Kühlung wurden in den USA kleinere Verteiltransformatoren entwickelt, deren Kühlung durch Verdampfung eines Kühlmittels erfolgt.

3. Neue Isolationssysteme

Unter diesem Titel ist weniger an Folien gedacht, die bereits in grosser Anzahl zur Verfügung stehen, als an solche feste Isolierstoffe, die grössere mechanische Kräfte im Transformator, vor allem mit Rücksicht auf den Kurzschluss, übernehmen können. Gerade diese Forderung, verbunden mit Temperaturen um und über 100 °C, lassen die meisten Kunststoffe von vornherein ausscheiden.

3.1 Transformerboard in SF_6

Schwefelhexafluorid unter 5 bis 8 bar Druck wird im Transformatorenbau intensiv erprobt. Sauber bearbeitetes, d. h. gefrästes, gut getrocknetes Transformerboard zeigt unter SF_6 ein gutes Verhalten. Figur 3 zeigt die Durchschlagsspannung von hartem Transformerboard in SF_6. Die dielektrische Festigkeit von ölimprägniertem Transformerboard entspricht den Festigkeitswerten bei 3 bar.

Alle Erkenntnisse der Barrieren-Isolation können mit Transformerboard in SF_6 voll ausgenützt werden. Dies um so eher, als zu erwarten ist, dass die *Alterung* von Transformerboard in einer sauerstofffreien Atmosphäre günstig verlaufen wird (Fig. 4 und 5). In den USA sind einige solcher Transformatoren in Betrieb und haben sich gut bewährt. Über die Wirtschaftlichkeit kann aber heute noch kein abschliessendes Urteil gefällt werden.

3.2 Transformerboard in Silikonöl

Im Gegensatz zu SF_6 hat das Silikonöl im Transformatorenbau bereits heute schon einige Bedeutung. Eingehende Alterungsversuche ergaben für Transformerboard beim Polymerisierungsgrad (Fig. 6) und der Zugfestigkeit (Fig. 7) ähnliches Verhalten wie im Mineralöl. Hingegen bleiben die Eigenschaften des Silikonöles nach der Alterung unverändert

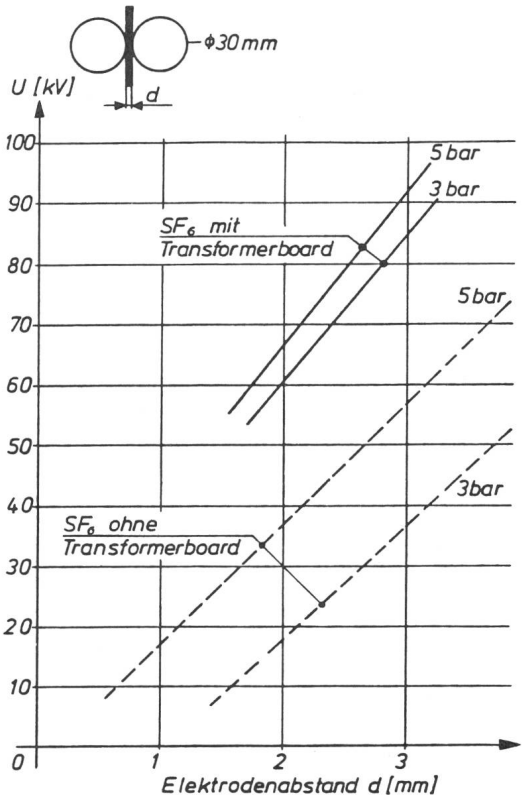

Fig. 3 Durchschlagsspannung 50 Hz in SF_6 von getrocknetem Transformerboard precompressed

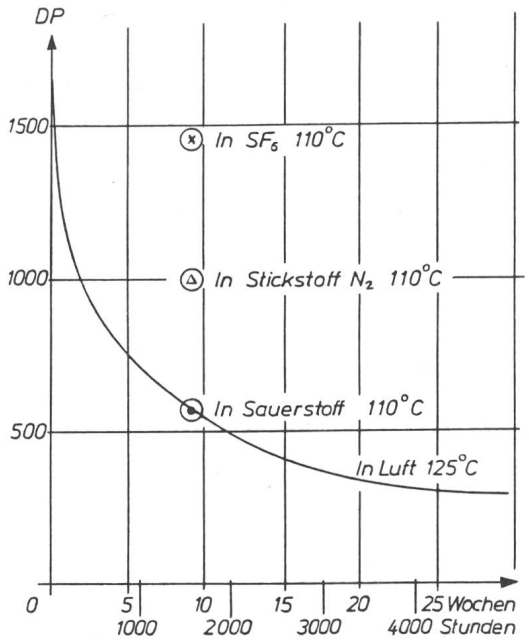

Fig. 4 Durchschnittlicher Polymerisationsgrad von hartem Transformerboard precompressed bei der Wärmealterung in verschiedenen Gasen

Der noch relativ kurzzeitige Vergleich von SF_6 mit der bekannten Luftkurve deutet bereits eine ganz geringe Alterung an

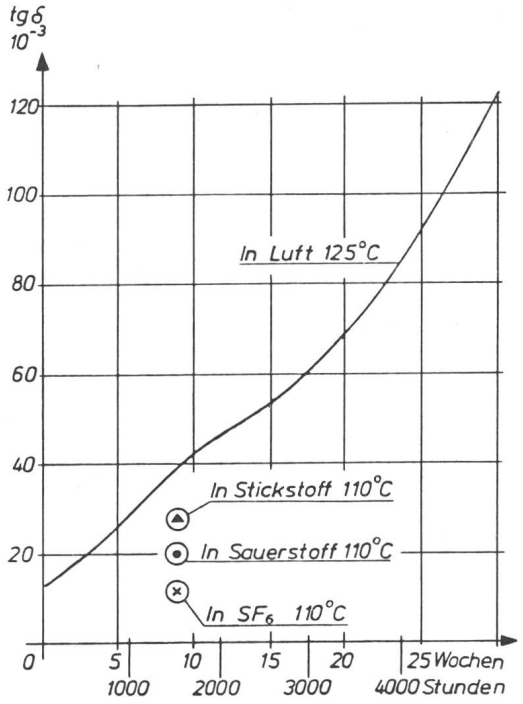

Fig. 5 Dielektrischer Verlustfaktor (tg δ) von hartem Transformerboard precompressed bei der Wärmealterung in verschiedenen Gasen

In knapp 10 Wochen hat sich der tg δ in SF_6 praktisch nicht verändert

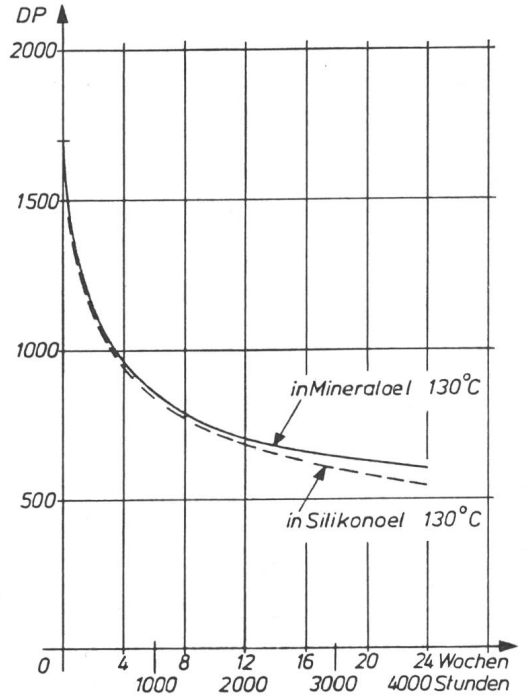

Fig. 6 Durchschnittlicher Polymerisationsgrad von hartem Transformerboard precompressed bei Alterung in Mineralöl- und Silikonöl

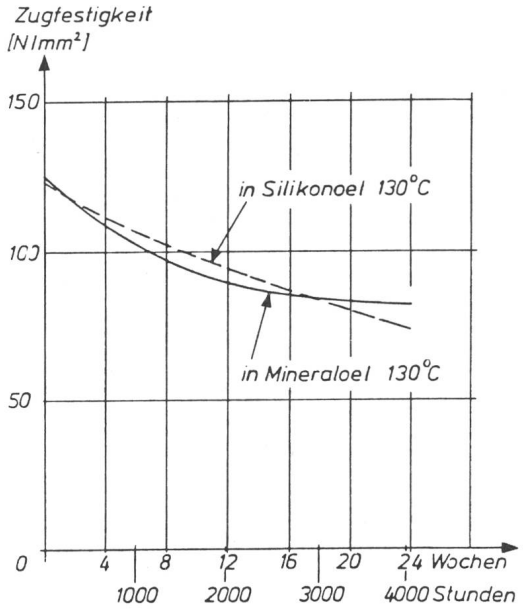

Fig. 7 Zugfestigkeit von hartem Transformerboard precompressed bei Alterung in Mineral- und Silikonöl

(Fig. 8). Die gegenüber Mineralöl um rund 25% höhere Dielektrizitätskonstante wirkt sich günstig auf die Spannungsverteilung innerhalb der Barrierenisolation aus. Somit bietet die Verwendung von Transformerboard in Silikonöl keine besonderen Probleme.

3.3 Transformerboard in dampfgekühlten (vapor cooled) Transformatoren

Transformerboard hat sich hier als feste Isolation ebenfalls gut bewährt.

3.4 Transformerboard bei tiefen Temperaturen

Die Anwendbarkeit von Transformerboard als alternativer Isolierstoff im kryogenen Bereich wurde besonders im Hinblick auf die zunehmenden Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung überprüft. Als Material mit hygroskopischem Charakter sind dem Transformerboard für den Tieftemperaturbereich nicht auf Anhieb grössere Chancen zuzumessen. Anderseits ergeben sich positive Aspekte, da Transformerboard mit flüssigem Tieftemperaturisoliermedium wie z. B. flüssigem Stickstoff imprägnierbar ist. Flüssiger Stickstoff besitzt, wie Studienarbeiten am ITR zeigten, erhebliche Vorteile gegenüber Mineralöl, verglichen mit dessen Eigenschaften bei Zimmertemperatur, insbesondere eine höhere Durchschlagsfestigkeit und niedere Viskosität. Ein praktischer Versuch führte zum Ergebnis, dass Transformerboard in flüssigem Stickstoff ein ähnliches dielektrisches Verhalten aufweist wie z. B. Kunststoffe mit gutem Isolierverhalten. Die Erfassung des mechanischen Verhaltens, insbesondere bei Druck und Zugbelastung, ist sehr aufwendig. Die Messungen wurden am Institut für Technische Physik des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt (Tabelle I). Die Resultate überstiegen die Erwartungen, konnten doch rund 20% höhere Zugwerte, verglichen zu Messungen bei Raumtemperatur in Öl, erreicht werden.

3.5 Transformerboard mit Kunststoffzusätzen

Ziel umfangreicher Studien ist die Reduktion der Dielektrizitätskonstanten ε fester Dielektrika wie z. B. von Transformerboard gegenüber Mineralöl. Das Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten unveränderter Systeme Öl/Transformerboard erreicht gegenwärtig je nach Raumgewicht der festen Isolation bis 1:2, was in Anbetracht der bedeutend höheren elektrischen Belastbarkeit von Transformerboard eine eindeutige Begrenzung von Isoliersystemen durch die Ölkanäle bedeutet.

Die Lösung dieser Aufgabe ist nicht naheliegend und erfordert einen enormen Aufwand. Eine Grosszahl von Alternativen musste zur Erreichung des gesteckten Zieles in Betracht gezogen werden. Auch Kombinationen traditioneller Zellulosefasern mit organischen-synthetischen Fasern waren Gegenstand intensiver Untersuchungen. Die über zweijährige Forschungsarbeit auf diesem Gebiet wird in Kürze ihren Abschluss finden.

Ein ähnliches Projekt betrifft die Herabsetzung des elektrischen Durchgangswiderstandes von Transformerboard mit dem Ziel, dessen Anpassung an den Durchgangswiderstand von Mineralöl bei Prüftemperatur zu erreichen. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entlastung von Zwischenräumen in der festen Isolation bei Belastung mit Gleichspannungen in HGÜ-Umrichtertransformatoren (Figur 9, 10).

Mechanische Messungen an Transformerboard bei tiefen Temperaturen — Tabelle I

	Transformerboard precompressed Oberfläche rauh	Transformerboard kalandriert Oberfläche glatt
Zug-E-Modul 77 K 293 K	$256{,}0 \cdot 10^4$ N/cm²	$209 \cdot 10^4$ N/cm² $120{,}3 \cdot 10^4$ N/cm²
Zug-Bruch-Spannung 77 K	$1{,}36 \pm 0{,}2 \cdot 10^4$ N/cm²	$1{,}06 \pm 0{,}15 \cdot 10^4$ N/cm²
Dilatation $\frac{\Delta L}{L}$ 293 bis 4,2 K	$-172{,}3 \cdot 10^{-5}$	$-73{,}8 \cdot 10^{-5}$
Druck-Bruch-Spannung 77 K	$1{,}1 \cdot 10^4$ N/cm²	

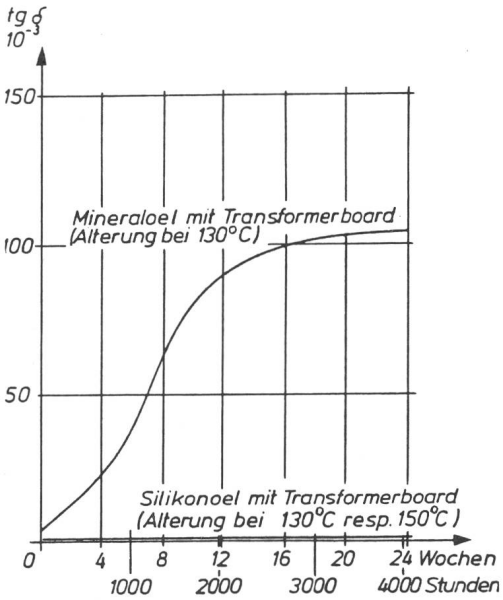

Fig. 8 Verlustfaktor bei 90 °C von Mineral- und Silikonöl nach Alterung mit Transformerboard

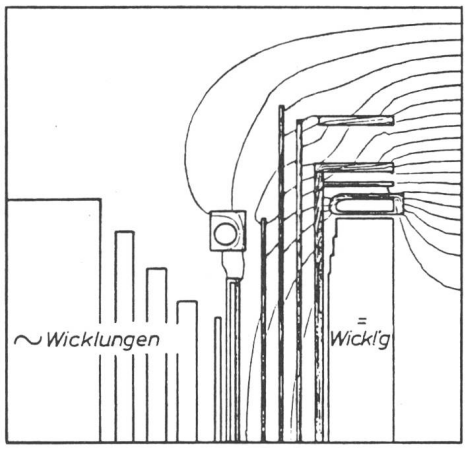

Fig. 9 Gleichspannungsfeldbild bei einem Widerstandsverhältnis Transformerboard zu Öl von 20:1

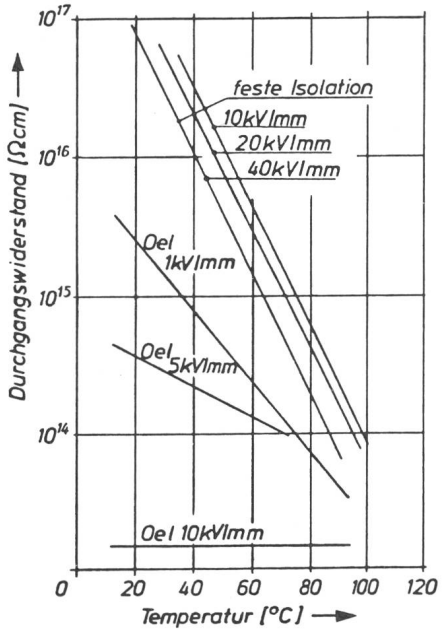

Fig. 10 Gleichspannungsdurchgangswiderstand von Öl bzw. ölimprägniertem Papier

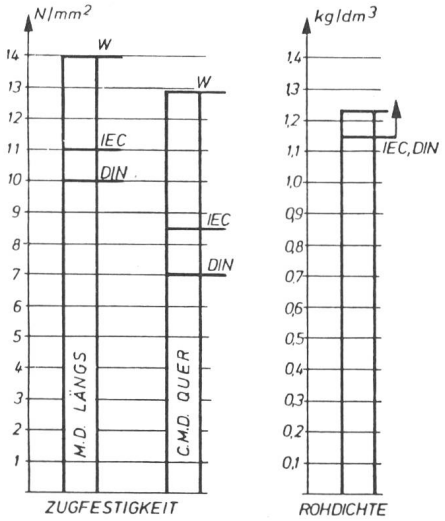

Fig. 11 Zugfestigkeit und Rohdichte von ausgeführtem Transformerboard precompressed im Vergleich mit der IEC- und DIN-Norm
W Praktisch erreichte Werte

3.6 Transformerboard aus Aramidfasern

Aramidfasern, das sind aromatische Polyamidfasern mit sehr hohem Temperatureinsatzbereich, finden in Form von Papieren bereits Anwendung als Kernpaket-Isolation, zur Isolation der Ober- gegen die Unterspannung, sowie als Lagenisolation in Trockentransformatoren und bei mit höheren Temperaturen betriebenen flüssigkeits- und gasgekühlten Transformatoren. Die Entwicklung spezieller Verarbeitungsverfahren auf dem Zellstoffgebiet brachte es mit sich, dass nun auch synthetische Fasern wie Aramid zu verdichteten Tafeln und stabilen Formteilen grösserer Wandstärken verarbeitet werden können.

4. Entwicklungsmöglichkeiten beim Transformerboard

4.1 Heutiger Entwicklungsstand

Transformerboard wird heute aus 100% hochwertigem ungebrauchtem und ungebleichtem Sulfatzellstoff hergestellt. Man unterscheidet:

Formbare Qualität für entsprechende Isolierteile
Kalandrierte Qualität für Standardanwendungen
Heissgepresste harte Qualität, welche im Transformerbau die grösste Bedeutung und Verbreitung gefunden hat (Fig. 11).

Die theoretisch erreichbare Maximaldichte eines Körpers aus Zellulosefasern ist rund 1,5 kg/dm³ im trockenen Zustand. Als solche ist sie in Form von Preßspan nicht erreichbar und auch nicht erwünscht. Die notwendige Imprägnierbarkeit mit Isolieröl verlangt ein Porenvolumen und entsprechende Kapillarräume in der Grössenordnung von 10...20% entsprechend einer Dichte von 1,2...1,3 kg/dm³. Die Anzahl der Fasern pro Gramm Transformerboard ist sehr hoch: 4...8 Millionen bei einer durchschnittlichen Faserdimension von 1...3 mm Länge und 10...20 µm Durchmesser. Die Festigkeit des Endproduktes kommt ohne Verwendung von Bindemitteln zustande.

4.2 Entwicklungstendenzen

Das beschriebene Transformerboard genügt den meisten Ansprüchen der Verbraucher vollauf. Es kommt jedoch vor, dass spezielle Eigenschaften gesteigert werden müssen. In diesem Falle werden entweder synthetische Fasern mit entsprechenden Eigenschaften dem Zellstoff in geeigneter Form beigemischt oder es werden Isoliertafeln völlig aus synthetischen Fasern hergestellt. In Frage kommen PP, PTFE, Carbon, Aramid und Polyimid. Die Kosten dieser Produkte sind sehr hoch und stehen einer grösseren Anwendung im Wege.

4.3 Verbesserte Druckfestigkeit

Im Vordergrund der Überlegungen zur Materialverbesserung steht die Lebensdauer von Transformatoren, welche durch die Druckfestigkeit der horizontalen Distanzierungen massgeblich beeinflusst wird. Die Aufbereitung solcher Distanzierungen mit dem Ziel, die Wicklungspressverluste auf ein Minimum zu reduzieren, war Mittelpunkt weiterer Untersuchungen. Über die Verbesserung des Kompressionsverhaltens von Transformerboard-Distanzierungen wurde in [4] ausführlich berichtet: Durch die Aufbereitung unter relativ hohem Druck von 8...10 N/mm² wird der Effekt der Ölschrumpfung fast vollständig ausgeschaltet; nach der Trocknung wird die Ölimprägnierung einige Tage lang unter konstantem Druck durchgeführt. Auch bei entspannter Lagerung ohne speziellen Schutz und späterer konventioneller Aufbereitung ist die Ölschrumpfung auf ein Minimum reduziert.

Auch die *dynamische Kompression* ist Gegenstand von Untersuchungen. Durch die Verwendung eines elektronischen Kompressionsmessgerätes, mit dem Kurzschlussbeanspruchungen simuliert werden, können gesicherte Aussagen über das dynamische Kompressionsverhalten verschiedener Distanzierungsqualitäten gemacht werden (Fig. 12). Erste Resultate zeigen, dass die plastische Kompression bei den unter Druck aufbereiteten Transformerboardproben während bis zu 10 Kurzschlüssen praktisch konstant ist und unter 1‰ liegt.

5. Schlussfolgerungen

Bei der Beurteilung neuer Isolationssysteme muss zwischen kleinen Verteiltransformatoren und grossen Leistungstransformatoren unterschieden werden.

Bis zu einigen MVA Leistung bestehen heute bereits einige Alternativen zur konventionellen Isolation, wie z.B. der Trockentransformator oder der mit Silikonöl gefüllte Transformator, der dampfgekühlte sowie der gasisolierte Transformator. Sofern höhere Betriebstemperaturen, z.B. aus Gewichtsgründen wie beim Lokomotivtransformatoren, erwünscht sind, stehen heute schon Isolationsteile aus hochtemperaturfesten Kunstfasern zur Verfügung.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen aber auch die vorläufigen Grenzen dieser neuen Systeme auf. Zudem haben sich zwei für die Entwicklung von neuen Isolationssystemen massgebende Prämissen grundlegend geändert: die im Verhältnis zu konventionellen Rohstoffen überaus starken Preissteigerungen für Kunststoffe und deren in Zukunft weniger sicher gewordene Versorgung.

Dem gegenüber stehen die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte des aus reiner Zellulose hergestellten Transformerboards. Man ist sich auch bewusst, dass die elektrischen und mechanischen Vorzüge von Transformerboard noch lange nicht völlig ausgeschöpft sind.

Die konventionelle Barrierenisolation hat sich bis zu Betriebs-Spannungen von 1500 kV als problemlos erwiesen. Diverse Studien zeigen auch, dass Spannungen bis über 2 MV keine neuen Probleme aufwerfen. Dabei wird die Sicherheit insbesonders von Grosstransformatoren dank den in Jahrzehnten gewonnenen Erfahrungen in kalkulierbaren Grenzen gehalten.

Erst in einem zweiten Schritt, nach umfassenden und daher auch zeitraubenden Langzeituntersuchungen, bestehen Aussichten, modifizierte Zellulose erfolgreich einzusetzen, die, elektrisch dem Öl angepasst, eine bessere Ausnützung erlaubt. In der Zwischenzeit werden die bei weniger exponierten Verteiltransformatoren gewonnenen Erfahrungen auch bei grösseren Leistungen u.U. nutzbar gemacht werden können.

Somit können die Entwicklungstendenzen der Transformatorenisolation wie folgt zusammengefasst werden:

– Erprobung völlig neuer Systeme in Prototypen und anschliessend in Versuchstransformatoren kleinerer Leistung,

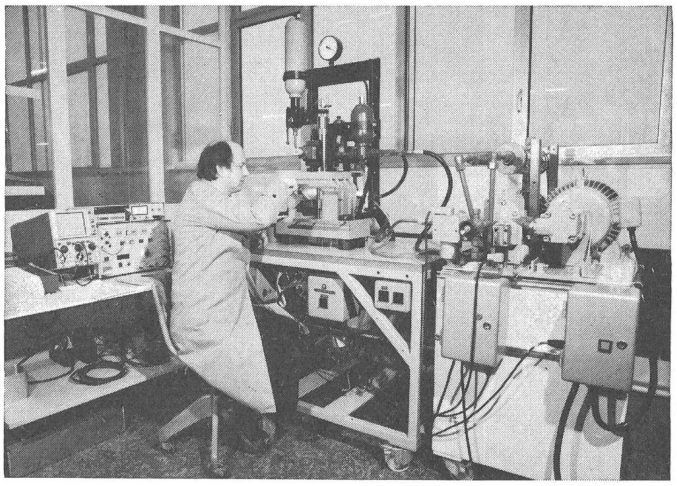

Fig. 12 Dynamische Kompressionsmessanlage

– Abklärung, inwieweit die bestehenden Nachteile der Zelluloseisolation (Wärmeverhalten, Dielektrizitätskonstante, Gleichstromwiderstand) durch Modifikation resp. Zusätze gemildert werden können,

– Entwicklung völlig neuartiger Faserstoffe und Abklärung, inwieweit ein wirtschaftlicher Ersatz der heutigen Zellulose in Zukunft möglich ist.

– In der Zwischenzeit bestehen jedoch, speziell beim grossen Leistungstransformator, noch zahlreiche Möglichkeiten durch die weitere Entwicklung der konventionellen Transformatorenisolation in Richtung Formstabilität, gesichertem Kurzschlussverhalten und vor allem feldkonformer Konstruktion.

Literatur

[1] Transformer requirements for the year 2000. DoE Report. Washington, Department of Energy, 1980.

[2] *R.E. Miller, R. Hediger* und *P. Lonsky:* Silicon-Transformatorflüssigkeit. Einsatz, Wartung und Sicherheitsaspekte. Bull. SEV/VSE 72(1981)3, S. 137...141.

[3] *C. Gandillon* et *P. Boss:* Utilisation des fluides silicones dans les transformateurs de distribution en vue du remplacement des Askarels. Bull. ASE/UCS 72(1981)3, p. 142...146.

[4] *H.P. Moser:* Transformerboard. Scient. Electr. 25(1979)3, P. 1...120.

Adresse des Autors

H.P. Moser, dipl. Ing. ETH, Leiter des Geschäftsbereiches Transformerboard, *V. Dahinden, H. Friederich, K. Lennarz, O. Potocnik*, H. Weidmann AG, 8640 Rapperswil.