

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: 65 (1974)

Heft: 13

Artikel: Öl und Ölpapier unter dem Einfluss von Gleich- und Wechselstromspannung bei Überlagerung beider Spannungsarten

Autor: Taschner, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915431>

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: 18.03.2025

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

Öl und Ölpapier unter dem Einfluss von Gleich- und Wechselspannung bei Überlagerung beider Spannungsarten

Von W. Taschner

Es wird das grundsätzliche Verlustverhalten von Öl und Ölpapier unter Mischspannungsbeanspruchung untersucht, wie sie in HGÜ-Anlagen auftreten kann. Bei der Überlagerung von Gleich- und Wechselspannung bei Öl-Dielektrikum überwiegen zunächst Raumladungsauswirkungen, dann die dissoziierende Wirkung der Feldstärke auf die im Öl vorhandenen Grossionen und kolloidalen Verschmutzungen. Als Folge davon wird der Verlustfaktor zunächst kleiner als bei reiner Wechselspannung (bei Betriebsölen Senkung des Verlustfaktors um etwa 30 %, bei Neuölen um 50...70 %), der $\tan \delta$ steigt aber schliesslich auf einen Wert an, der bei gleicher effektiver Wechselfeldstärke gemessen worden wäre.

Wegen der starken Barrierenwirkung ist bei Öl-Papier-Dielektrikum der elektrolytische (Ohmsche) Anteil an den Verlusten gering. Raumladungsercheinungen spielen hier die entscheidende Rolle. Der Verlustfaktor kann durch eine Gleichspannungsüberlagerung sowohl bei Altöl-Papier- als auch bei Neuöl-Papier-Dielektrikum um etwa 60 % gesenkt werden. Dies gilt allerdings nur, solange die unterlagerte Wechselfeldstärke 1...2 kV/mm nicht überschreitet, die günstigen Verhältnisse werden dann ab etwa 3...4 kV/mm Gleichfeldstärke erreicht. Bei grösseren Wechselfeldstärken sind die Reduktionen des Verlustfaktors kleiner.

Allgemein kann man bei Öl-Papier-Dielektrikum unter Mischspannungsbeanspruchung mit wesentlich kleineren dielektrischen Verlusten als bei gleicher effektiver Wechselfeldstärke rechnen.

1. Einleitung

Obwohl in dem letzten Jahrzehnt eine Reihe neuer Isoliermedien entwickelt worden sind, haben die «klassischen» Materialien Öl und Ölpapier in der Hochspannungstechnik auch heute noch grosse Bedeutung. Dies gilt vor allem dann, wenn neben Isolierproblemen auch noch Kühlprobleme gelöst werden müssen. Ihre dielektrischen Eigenschaften unter nur Gleich- oder nur Wechselspannungsbeanspruchung können als weitgehend bekannt vorausgesetzt werden, dagegen liegen noch keine Ergebnisse über das Verhalten bei Mischspannungsbeanspruchung vor, wie sie in HGÜ-Anlagen (z. B. in Transformatoren und Kabeln) auftreten können. Diese Beanspruchungsart wird hier in erster Näherung durch die Überlagerung von Gleichspannung und sinusförmiger netzfrequenter Wechselspannung nachgebildet.

Als Prüflinge dienten ein Altöl aus einem Reparaturtransformator, mit diesem Altöl imprägniertes Papier, verschiedene Neuöle und neuölimprägniertes Papier.

2. Mischspannungsbeanspruchung bei Öl

Bevor die Untersuchungen an Isolieröl unter Mischspannungsbeanspruchung diskutiert werden, sollen noch einige Bemerkungen zum Leitungsmechanismus gemacht werden.

Allgemein gibt man für die Abhängigkeit der Ölleitfähigkeit γ von der Temperatur die Formel an

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{a}{kT}}$$

mit a als ölabhängige Konstante, k als Boltzmannkonstante und T als absolute Temperatur. Diese Formel beschreibt die Leitfähigkeit als Folge der Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur, vernachlässigt jedoch, dass vor allem bei Betriebs-

621.315.614.64 : 621.315.615 : 621.3.017.1

Etude du comportement fondamental d'huile et huile-papier, en ce qui concerne les pertes, sous sollicitation par tension mixte, comme dans le cas des installations HTCC. Lors de la superposition de tensions continue et alternative, ce sont tout d'abord les effets des charges spatiales qui prédominent dans le diélectrique huile, puis l'effet dissociant du champ sur les gros ions et salissures colloïdales présents dans l'huile. Il s'ensuit que le facteur de pertes est tout d'abord plus faible que sous tension alternative pure (réduction d'environ 30 % pour huiles en service, et de 50 à 70 % pour huiles neuves). Toutefois, la $\tan \delta$ augmente finalement à une valeur qui aurait été mesurée pour la même intensité effective de champ en alternatif.

Du fait du net effet de barrière, la part électrolytique (résistive) des pertes est faible pour le diélectrique huile-papier, les phénomènes dus aux charges spatiales jouant un rôle prépondérant. Par superposition de tension continue, le facteur de pertes peut être réduit d'environ 60 %, aussi bien pour vieille huile-papier, que huile neuve-papier, mais seulement tant que l'intensité de champ en alternatif ne dépasse pas 1 à 2 kV/mm, les conditions les plus favorables étant alors atteintes à partir de 3 à 4 kV/mm d'intensité de champ en continu. Pour de plus fortes intensités de champ en alternatif, les réductions du facteur de pertes sont moindres.

D'une manière générale, pour un diélectrique huile-papier sollicité sous tension mixte, on peut compter, avec des pertes diélectriques nettement moindres que dans le cas d'une même intensité effective de champ en alternatif.

ölen die Ladungsträgerkonzentration nicht konstant ist, sondern von der elektrischen Feldstärke abhängt. Diese Tatsache kann man leicht mit Hilfe der sog. Waldenschen Regel nachweisen. Sie besagt, dass das Produkt aus Leitfähigkeit und Viskosität $\gamma \eta$ bei konstanter Ladungsträgerkonzentration eine Konstante ist.

Bei den in der Literatur angegebenen Leitfähigkeitswerten wird nur sehr selten die Messfeldstärke angegeben, ausserdem sind die Messungen meist bei äusserst kleinen Feldstärken gemacht worden [z. B. 100 V/mm in [3]¹⁾]. Die Messfeldstärken liegen fast immer wesentlich unter den in der Praxis üblichen Betriebsfeldstärken. Erweitert man obige Formel für die Ölleitfähigkeit γ zu

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{a}{k(T+gE)}}$$

mit E als elektrische Feldstärke, so gelingt es, die Temperatur- und Feldstärkeabhängigkeit in einer Kurve darzustellen. Der Faktor g sagt dabei aus, wie stark die dissoziierende Wirkung der Feldstärke auf die im Öl vorhandenen Grossionen ist, d. h. wie leicht sie in kleinere beweglichere Teilchen aufgespalten werden können. Neben diesem als Dissoziation bezeichneten Vorgang kann man auch annehmen, dass die im Öl vorhandenen geladenen Verunreinigungen sich teilweise mit einer Hülle neutraler Moleküle (Komplexe, Solvatationen [4]) umgeben. Bei kleinen Feldstärken schleppen sie diese mit (sie sind gross und träge), bei grösseren werfen sie diese ab: es entstehen kleinere beweglichere Teilchen. Der Faktor g macht also über die Ölqualität eine Aussage. Bei Neuöl ist g nahezu gleich Null; g wächst mit zunehmender Alterung.

Vergleicht man die bei Gleichspannung gemessene Leitfähigkeit mit der aus dem gemessenen Verlustfaktor errechnete

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

ten Wechselspannungsleitfähigkeit, so kann man feststellen, welchen Anteil die elektrolytische Leitung an den Gesamtverlusten hat.

Wie die in diesen Untersuchungen in grosser Zahl unter gleichen Versuchsbedingungen bei nur Gleich- und nur Wechselspannungsbeanspruchung gemachten Versuche gezeigt haben, ist die Wechselstromleitfähigkeit von Neuöl im Neuzustand etwa 5...10mal so gross wie die gemessenen Gleichstromleitfähigkeit. Dieses Verhältnis strebt jedoch mit zunehmender Alterung schnell gegen 1.

Bei Altöl ergibt sich für die Wechselstromleitfähigkeit für grosse Elektrodenabstände (10 mm) ein etwa um 10 % grösserer Wert als die gemessene Gleichstromleitfähigkeit. Bei kleinen Elektrodenabständen (1 mm) liegt die Wechselstromleitfähigkeit zwischen dem 1,5fachen und dem doppelten Wert der Gleichstromleitfähigkeit. Der Grund hierfür ist die unmittelbar vor jeder Elektrode ausgebildete Raumladungszone. Diese fällt bei kleineren Elektrodenabständen stärker ins Gewicht. Wie die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, wird bei Betriebsölen der wesentliche Anteil der Verluste durch elektrolytische Leitung hervorgerufen. Ausdehnung und Ladungsinhalt der Raumladungszonen konnten durch ein besonderes Messverfahren abgeschätzt werden. Dabei stellte sich heraus, dass die Ladungen sich ausserordentlich dicht vor den Elektroden befinden müssen (etwa $\frac{1}{1000}$ mm). Die Entstehung derartiger Raumladungszonen kann man sich folgendermassen erklären: es gibt im wesentlichen zwei Typen von Ionen, beide gehorchen den allgemeinen physikalischen Gesetzen, während sich jedoch der eine Ionentyp leicht an den Elektroden entladen kann, ist der andere dazu nur langsam oder gar nicht in der Lage. Durch Annahme dieser beiden Ionentypen kann auch die Zeitabhängigkeit der Gleichstromleitfähigkeit erklärt werden.

Dass Raumladungseinflüsse bei Neuöl eine grosse Rolle spielen, ist weitgehend bekannt, dagegen werden sie bei Betriebsölen stets als vernachlässigbar klein angenommen. Um ein Bild von dem Einfluss der Raumladungen zu geben, wenn kolloidale Grossionen vorhanden sind, soll ein recht anschau-

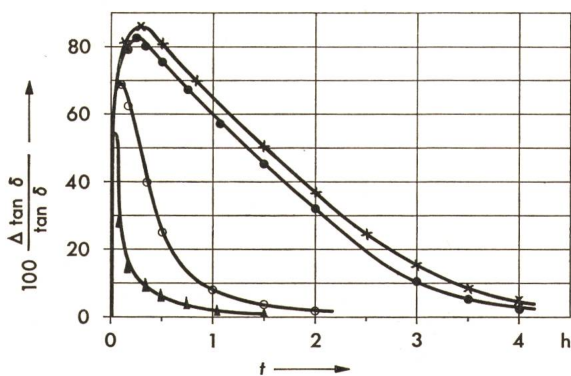


Fig. 1 Prozentuale Änderung des Verlustfaktors $\tan \delta$ eines Altöls nach einer 5 min dauernden Gleichspannungsbeanspruchung mit 8 kV/mm

Bezugswert ist der Verlustfaktor ohne vorherige Gleichspannungsbeanspruchung.

Angaben:

Plattenkondensator

Elektrodenabstand 1 mm, Messtemperatur 53 °C

Symbole für die Wechselfeldstärke:

\times 0,5 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, \bullet 1 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, \circ 4 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, \blacktriangle 8 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$

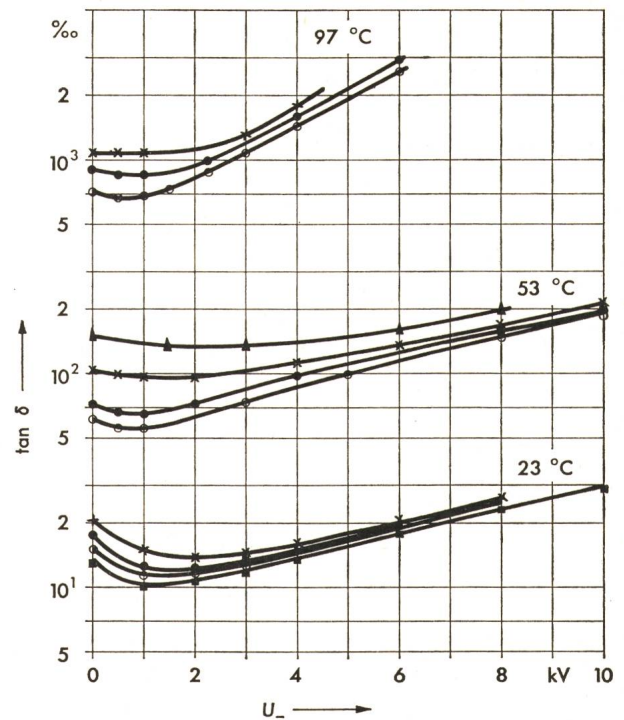


Fig. 2 Abhängigkeit des Verlustfaktors $\tan \delta$ von Altöl von der überlagerten Gleichspannung bei jeweils konstanter Wechselspannung

Angaben:

Koaxialer Messkondensator

Elektrodenabstand 1 mm, Messtemperaturen 23 °C, 53 °C, 97 °C

\blacksquare 0,5 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, \circ 1 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, \bullet 2 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, \times 4 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, \blacktriangle 8 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$

licher Versuch beschrieben werden. Das untersuchte Altöl wurde in einem geheizten koaxialen Messkondensator (53 °C) für nur 5 min mit einer Gleichfeldstärke von 8 kV/mm (1 mm Ölpalt) beansprucht. Sofort im Anschluss daran wurde die relative Änderung des Verlustfaktors in Abhängigkeit von der Zeit bei verschiedenen Wechselfeldstärken verfolgt (Fig. 1). Man sieht, dass die vorherige Gleichspannungsbeanspruchung bis zu 4 h in der relativen Verlustfaktoränderung erkennbar bleibt (ähnliche Zeitverläufe erhält man bei Abschaltung des Gleichanteils bei einer Mischspannungsbeanspruchung des Isolieröls). Die vor den Elektroden ausgebildete Raumladungszone wird um so schneller wieder aufgelöst, je grösser die Wechselfeldstärke ist. Dies geschieht durch die entsprechend intensive Durchmischung der Ölstrecke durch Bewegung von Ladungsträgern am Ort (herrscht am Ort des Ions mit der Ladung q die Feldstärke E , so wirkt auf das Ion die Kraft $F = qE$).

Die von der Gleichspannungsbeanspruchung im Ölraum zusätzlich erzeugten Ladungsträger können erst nach einer gewissen Zeit, und zwar nach Durchdringung der vor der Elektrode liegenden Schicht schwer entladbarer Ionen, zu den Elektroden gelangen, dort ihre Ladung abgeben und so zu einer scheinbaren Verlustfaktorvergrösserung führen.

Bei Mischspannungsbeanspruchung spielen alle bisher erwähnten Vorgänge eine Rolle, sie überlagern sich und beeinflussen sich gegenseitig. Raumladungszonen können sich bei Mischspannungsbeanspruchung wegen der durchmischenden Wirkung der Wechselfeldstärke um so schwächer auswirken, je höher der Wechselspannungsanteil an der Gesamtspannung ist. Dies kann man leicht durch Vergleich des zeitlichen Ver-

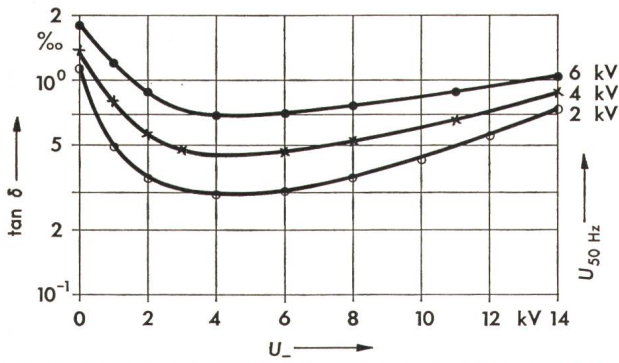


Fig. 3 Verlustfaktor $\tan \delta$ eines Neuöls in Abhängigkeit von der überlagerten Gleichspannung bei jeweils konstanter Wechselfspannung

Angaben:

Plattenkondensator

Elektrodenabstand 2 mm, Messtemperatur 90 °C

laufs des Nachentladestroms nach einer Gleichspannungsbeanspruchung mit dem nach einer Mischspannungsbeanspruchung zeigen.

Untersucht man den Verlustfaktor von Isolieröl unter Mischspannungsbeanspruchung, so ergeben sich bei bestimmten Verhältnissen von Gleichspannung zu Wechselfspannung minimale Werte. Leider hängen diese Verhältnisse nicht nur von der Temperatur, sondern auch von den Absolutwerten der Feldstärken ab, so dass keine allgemein gültigen Angaben gemacht werden können. Qualitativ ergeben sich jedoch für Altöl und Neuöl gleiche Abhängigkeiten (Fig. 2 und 3). Man erkennt aus den dargestellten Kurven, dass der Verlustfaktor von Altöl durch eine überlagerte Gleichspannung um etwa 30 % gesenkt werden kann. Dies gilt allerdings nur für Temperaturen in der Nähe der Raumtemperatur; für höhere Temperaturen beschränkt sich die Reduzierung auf wenige Prozent. In Übereinstimmung hiermit konnte durch getrennte Untersuchungen festgestellt werden, dass bei höheren Temperaturen (≈ 90 °C) die Raumladungsausbildung schwächer als bei etwa Raumtemperatur ist. Die günstigste Gleichfeldstärke für eine möglichst grosse Verlustfaktorreduktion liegt zwischen 1...2 kV/mm.

Bei Neuöl wurden die Untersuchungen nur bei 90 °C durchgeführt, da die Absolutwerte des Verlustfaktors selbst bei dieser Temperatur nur bei etwa 10^{-3} lagen und durch die Gleichspannungsüberlagerung auf die Hälfte, zum Teil sogar auf ein Drittel gesenkt werden konnte.

Allgemein kann man sagen, dass bis zum Minimum des Verlustfaktors (Fig. 2 und 3) Raumladungseinflüsse überwiegen, während auf dem rechten ansteigenden Kurvenast die Dissoziation infolge Feldeinwirkung die entscheidende Rolle spielt; sie ist wegen der im Altöl in grosser Zahl vorhandenen Verunreinigungen deutlicher ausgebildet. Überschreitet also die Gleichspannungsfeldstärke den günstigsten Wert, so kann der Verlustfaktor bei Mischspannungsbeanspruchung grösser werden als bei reiner Wechselfspannungsbeanspruchung.

3. Mischspannungsbeanspruchung bei Ölpapier

Der Verlustmechanismus bei Ölpapier-Dielektrikum ist wesentlich verwickelter als der bei einer reinen Ölstrecke. Neben dem Ionengehalt des Imprägniermittels und der temperaturabhängigen Beweglichkeit der Ionen (Viskosität des Öls), spielen auch die Ionen des Papiers eine Rolle. Ausserdem gibt

es Wechselwirkungen zwischen den Ionen des Öls und des Papiers. Besonders ungünstig wirkt sich hier die stark hygroskopische Eigenschaft des Papiers aus. Wasser ist wegen seiner hohen relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r in der Lage, Ionen zu dissoziieren. Daher ist erklärlich, dass die spezifische Leitfähigkeit von Papier unter Feuchtigkeitseinfluss um mehrere Zehnerpotenzen steigen kann. Hier spielen 3 wichtige Faktoren eine Rolle:

1. Adsorption eines Teils des Wassers an den OH-Gruppen der Zellulose;
2. Speicherung eines Teils des Wassers durch Kapillarkräfte der Zellulose;
3. Aufnahme und Dissoziation von Verunreinigungen innerhalb der Zellulosefasern.

Bei den hier vorgetragenen Untersuchungen wurde jedoch nur vakuumgetrocknetes Papier untersucht. Zu der Feldstärkeabhängigkeit der Leitfähigkeit von Ölpapier-Dielektrikum muss gesagt werden, dass bei kleinen und mittleren Feldstärken Ionen in die Papierporen eindringen und dort teilweise adsorbiert werden (der Verlustfaktor sinkt), während bei grösseren Feldstärken ($E > 10$ kV/mm) diese Haftkräfte überwunden werden, was zu einem Anstieg des Verlustfaktors führt. Eine einheitliche Feldstärkeabhängigkeit des Verlustfaktors von Ölpapier kann daher nicht angegeben werden. In der Literatur (z. B. [1]) wird dagegen meist vereinfachend angenommen, dass die Feldstärke stets eine Vergrösserung der Leitfähigkeit

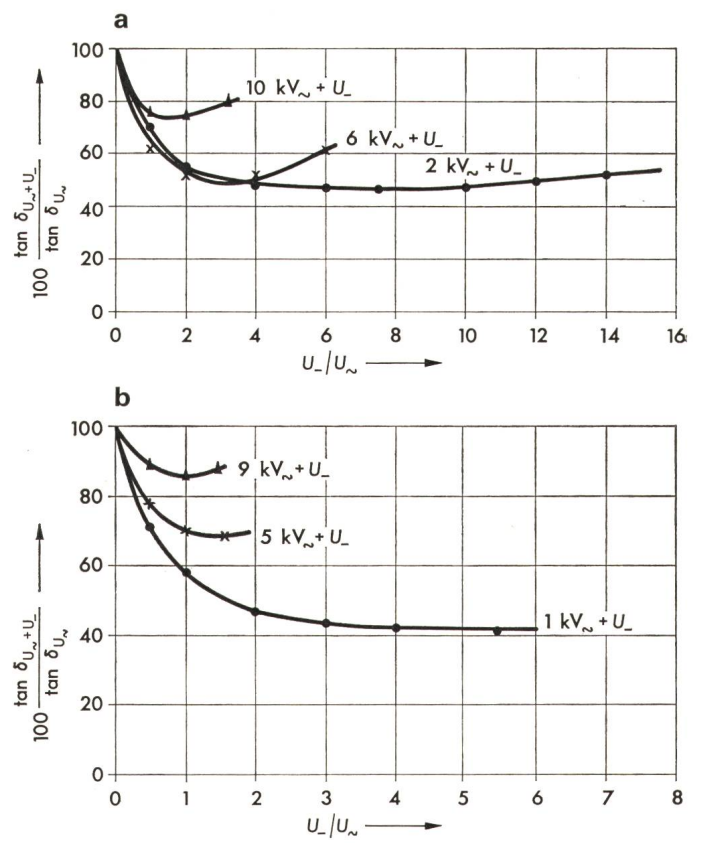


Fig. 4 Prozentuale Änderung des Verlustfaktors von 8 Blatt Kabelpapier neuölgetränkt unter gleichzeitiger Gleich- und Wechselfspannungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Verhältnis von Gleich- und Wechselfspannung

a koaxialer Messkondensator; Elektrodenabstand 0,5 mm; Messtemperatur 90 °C

$U_~$ Wechselfspannung 50 Hz

U_- Gleichspannung

b koaxialer Messkondensator; Elektrodenabstand 1 mm; Messtemperatur 90 °C

zur Folge hat; dies trifft in der Regel erst für Feldstärken ab etwa 10 kV/mm zu.

Wegen der Barrierenwirkung der Papierschichten ist die Gleichstromleitfähigkeit stark eingeschränkt, Raumladungserscheinungen spielen hier die entscheidende Rolle. Wie der Vergleich zwischen der gemessenen Gleichstromleitfähigkeit und der Wechselstromleitfähigkeit, die aus dem gemessenen Verlustfaktor errechnet worden ist, gezeigt hat, betragen die Gleichspannungsverluste des Altölpapier-Dielektrikums bei Raumtemperatur weniger als 1% der Wechselspannungsverluste; sie wachsen bei 90 °C auf etwa 15% der Wechselspannungsverluste an.

Bei Neuölpapier-Dielektrikum liegen die Gleichspannungsverluste selbst bei 90 °C bei etwa 1% der Wechselspannungsverluste. Die Gleichstromleitfähigkeit stellt also wegen der starken Raumladungsausbildung kein Mass für die Gesamtverluste dar. Es war daher zu erwarten, dass bei Ölpapier-Dielektrikum unter Mischspannungsbeanspruchung besonders grosse Reduktionen des Verlustfaktors erreichbar sind.

Die prozentuale Reduktion des Verlustfaktors durch Gleichspannungsüberlagerung bewegte sich bei Altöl- und bei Neuölpapier-Dielektrikum in gleicher Grössenordnung. Ist der Absolutwert der Wechselfeldstärke klein genug, so dass die Wirkung durch Felddissoziation vernachlässigt werden kann (maximal 1...2 kV/mm), so kann der Verlustfaktor bei den günstigsten Gleichfeldstärken (etwa 3...4 kV/mm) um etwa 60% gesenkt werden. Die angegebene Reduktion bezieht sich auf eine Temperatur von 90 °C, bei kleineren Temperaturen sind teilweise noch günstigere Werte erreichbar (Fig. 4a und b).

Die Stilllegung der in den Tränkmittelspalten beweglichen Ionen durch die überlagerte Gleichspannung konnte in anschaulicher Weise durch die Beobachtung der Veränderung der Kurvenform des nicht sinusförmigen Verluststromes verfolgt werden (vergleiche hierzu [5]). Als Beispiel sind in Fig. 5 die Verlustströme einer Kabelpapierprobe (8 Blatt je 0,0625 mm) bei 90 °C unter dem Einfluss von Mischspannung bei konstant gehaltener Wechselspannung oszillographiert.

Ist bei Mischspannungsbeanspruchung die Wechselfeldstärke allein schon so gross, dass ihre dissoziierende Wirkung

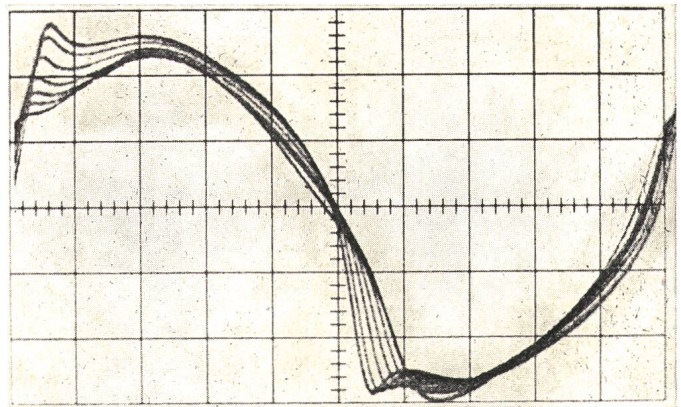


Fig. 5 Verluststromoszillogramm einer Kabelpapierprobe (8 Blatt je 0,0625 mm) bei gleichzeitiger Gleich- und Wechselspannungsbeanspruchung

Messwerte des Verlustfaktors: 9 kV + 0 kV: 208 ‰

9 + 1 kV: 202 ‰; 9 + 3 kV: 196 ‰

9 + 5 kV: 192 ‰; 9 + 7 kV: 188 ‰

9 + 9 kV: 185 ‰; 9 + 11 kV: 185 ‰

Wechselspannung konstant 9 kV; überlagerte Gleichspannung 0...11 kV, Messtemperatur 90 °C

merklich ist, so wird diese durch die überlagerte Gleichspannung noch mehr vergrössert. Die Verkleinerung des Verlustfaktors, bezogen auf den Wert bei reiner Wechselspannungsbeanspruchung, erreicht dann je nach Grösse der Wechselfeldstärke nur noch 40...10%.

Ist dem Ölpapier-Dielektrikum noch ein Ölspalt vorgeschaltet, so ist die erreichbare Verlustfaktorverkleinerung nicht so gross, da ein gewisser Anteil der Verlustfaktorverbesserung durch die in dem Ölspalt voll wirksame dissoziierende Feldstärke sofort wieder aufgehoben wird. Ausserdem muss berücksichtigt werden, dass die Beanspruchung des Ölspaltes um etwa 30% grösser als die des Ölpapiers ist ($\epsilon_{r\text{Öl}} / \epsilon_{r\text{Ölpapier}}$).

In einer besonderen Messanordnung (Fig. 6) wurde gleichzeitig zur Verlustfaktormessung die Gleichstromleitfähigkeit bestimmt. Es zeigte sich, dass die Gleichstromleitfähigkeit durch die überlagerte Wechselspannung nur im Bereich der Raumtemperatur deutlich zunimmt. Bei höheren Temperatu-

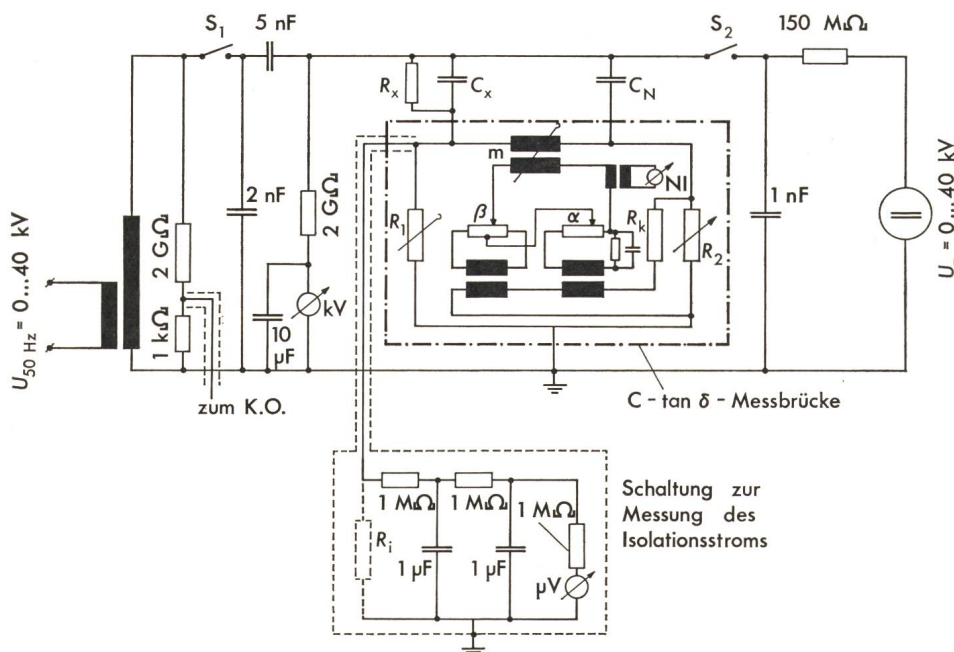


Fig. 6

Schaltung zur gleichzeitigen Erfassung von Verlustfaktor und Isolationsstrom eines Prüflings

R_x, C_x Ersatzgrössen des Prüflings

C_N Normalkondensator

NI Nullindikator

R_k Vorwiderstand des komplexen Kompensators

R_1, R_2, \dots, R_i einstellbare Widerstände in Reihe zu C_N bzw. C_x für den Brückenabgleich

Ohmscher Innenwiderstand der Messbrücke zwischen Brückeneckpunkt und Erde [$R_i \ll 1 \text{ M}\Omega$]

ren beträgt der Einfluss der überlagerten Wechselspannung auf die Gleichstromleitfähigkeit nur wenige Prozent.

4. Bedeutung der Ergebnisse unter Mischspannungsbeanspruchung für die Praxis

Zur Beurteilung eines Dielektrikums in der Praxis ist in erster Linie massgebend, welche Verluste in ihm umgesetzt werden und ob die Gefahr des Wärmedurchschlags gegeben ist.

Bei Neuöl sind die dielektrischen Verluste und ihre Veränderung durch eine überlagerte Gleichspannung für den Betrieb ohne Bedeutung. Zwar kann der Verlustfaktor bei Mischspannungsbeanspruchung bis auf weniger als die Hälfte gesenkt werden, der Absolutbetrag der Wechselspannungsverluste und erst recht der Betrag der Gleichspannungsverluste ist jedoch so klein, dass er in der Regel vernachlässigbar ist.

Bei einem stark gealterten Betriebsöl liegen die Verhältnisse anders. Es zeigt sich, dass die bei (nur) Wechselspannung und bei (nur) Gleichspannung auftretenden Verluste gleiche Grössenordnung haben können. Bei der Überlagerung von Gleich- und Wechselspannung werden zwar die Wechselfeldverluste zunächst verkleinert, sie steigen aber dann bei grösseren Wechselfeldstärken über die Verluste bei nur Wechselspannung hinaus an. Zusätzlich kommen noch die in gleicher Grössenordnung liegenden Gleichspannungsverluste hinzu. Die Summe aus beiden Anteilen ist jedoch nicht grösser als die Wechselspannungsverluste, die bei einer Wechselspannungsbeanspruchung mit gleicher effektiver Feldstärke aufgetreten wären. Es muss von Fall zu Fall entschieden werden, ob die auftretende Erwärmung noch vertretbar ist oder nicht. Eine Gefahr des Wärmedurchschlags ist bei einer reinen Ölstrecke nicht gegeben, da eventuell vorhandene Gebiete erhöhter Verluste sofort durch beschleunigte Konvektion, unterstützt durch eine elektrophoretische Strömung bei hohen Feldstärken, beseitigt werden. Sog. «Wärmenester» können sich nicht ausbilden.

Auch bei dem Ölpapier-Dielektrikum sind die Verluste so lange vernachlässigbar, wie es sich um den Neuzustand han-

delt. Auch für diesen Fall ist die beträchtliche Reduktion der Wechselfeldverluste bei Mischspannungsbeanspruchung im Vergleich zu denen bei nur Wechselspannungsbeanspruchung nur von theoretischer Bedeutung. Anders liegen jedoch die Verhältnisse nach einigen Betriebsjahren. Je nach Papierdicke können im Papier ähnlich hohe Verlustfaktorwerte wie im Öl erreicht werden. Wegen der mit der Temperatur exponentiell ansteigenden Verluste ist dann die Gefahr des Wärmedurchschlags gegeben. Durch die Überlagerung einer Gleichspannung können die Wechselspannungsverluste bis auf die Hälfte und weniger gesenkt werden. Die Vergrösserung der Gesamtverluste durch die zusätzlichen Gleichspannungsverluste bleibt selbst bei 90 °C unter 15%. Bei kleineren Temperaturen ist die Zunahme noch wesentlich kleiner. Durch die Mischspannungsbeanspruchung bei Ölpapier-Dielektrikum ergibt sich folglich durch eine deutliche Senkung der Gesamtverluste eine erhöhte Sicherheit gegenüber einem Wärmedurchschlag.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen an Ölen, bei denen eine Zeitabhängigkeit des Verlustfaktors festgestellt worden war (allerdings nur bei Ölen, die kolloidale Verunreinigungen enthielten), wurden bei Ölpapier keine bleibenden Veränderungen im Verlustfaktor nach Abschaltung des überlagerten Gleichanteils festgestellt.

Literatur

- [1] U. Kull: Das Verhalten des geschichteten Öl-Papier-Dielektrikums bei hoher Gleichspannung. *Brown Boveri Mitt.* 55(1968)4/5, S. 215...221.
- [2] K.-H. Holle: Über die elektrischen Eigenschaften von Isolierölen, insbesondere über den Einfluss von Wasser auf deren Temperaturverhalten. Dissertation der Technischen Hochschule Braunschweig, 1966.
- [3] J. Pautz: Über die elektrischen Eigenschaften von chlorierten Diphenylen und deren Messung im Ionenleitungsbereich. Dissertation der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970.
- [4] G. Mierdel: Die Stromleitung in Flüssigkeiten. *Elektrie* 20(1966)10, S. 408...411, Nr. 11, S. 443...445 + Nr. 12, S. 479...481.
- [5] F. Liebscher: Über die dielektrischen Verluste und die Kurvenform der Ströme in geschichteten Isolierstoffen bei hohen Wechselfeldstärken (50 Hz). *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens Konzern* 21(1943)2, S. 214...248.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. W. Taschner, ak. Oberrat am Institut für Hochspannungs- und Messtechnik der Technischen Hochschule Darmstadt, Schlossgraben 1, D-61 Darmstadt.