

Das dielektrische Verhalten von Öl-Papier-Isolationen unter der Wirkung von Grenzflächen-, Material- und Prüfparametern

Andreas Küchler, Frank Hüllmandel und Konrad Böhm, FHWS Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt
 Norbert Koch, HSP Hochspannungsgeräte Porz GmbH, Köln
 Peter Brupbacher und Christoph Krause, Weidmann Transformerboard Systems AG, Rapperswil, Schweiz

Kurzfassung

Das dielektrische Verhalten von ölprägniertem Papier (OIP) beeinflusst das Verhalten von Isolationssystemen im Betrieb, es kann außerdem als Indikator für den Materialzustand (Alterung, Befeuchtung, Leitfähigkeitsanstieg) dienen. Im Beitrag werden Einflüsse von Grenzflächen, Feuchtigkeit, Alterungsprodukten, Ölleitfähigkeit, Temperatur und Feldstärke betrachtet. Es wird über Polarisations- und Depolarisationsstrom- (PDC-) Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen und Feldstärken an vakuumimprägnierten und definiert sowie homogen befeuchteten Papierproben berichtet. Dabei wird ein neues Auswerteverfahren mit verkürzten Messintervallen eingesetzt, das gespeicherte und nicht gespeicherte Ladungen ermittelt. Erstere sind mit Ölleitfähigkeit, Grenzflächenpolarisation sowie mit Alterungsphänomenen korreliert, letztere v.a. mit dem Feuchtigkeitsgehalt, teilweise aber auch mit dem Alterungszustand. Es wurden Abweichungen von bisher angenommenen Zusammenhängen sowie Einflüsse von Feuchtigkeit und Ölleitfähigkeit auf Leitfähigkeitsendwerte festgestellt. Die Temperaturabhängigkeit entspricht im betrachteten Feuchtebereich dem üblichen exponentiellen Verlauf. Fortgeschrittene Alterung ist an hohen und rasch abklingenden Polarisationsströmen bereits bei Umgebungstemperatur erkennbar. Dies erlaubt eine Identifizierung thermisch kritischer OIP-Isolierungen, bei denen der netzfrequente Verlustfaktor i.d.R. erst bei Betriebstemperatur auffällig ansteigt.

1 Einführung

Dielektrische Eigenschaften von ölprägniertem Papier (OIP) beeinflussen Feldverteilungen in Transformatoren, bestimmen thermische Grenzen in Durchführungen oder stellen Indikatoren für Leitfähigkeit, Alterung und Befeuchtung dar. Ihre Messung kann im Zeit- oder Frequenzbereich erfolgen, wobei Sprungantwortmessungen im Zeitbereich praktische Vorteile bieten, weil die gesamte Systeminformation in einer einzigen Messung enthalten ist [1], [2].

2 Einflussgrößen

Das dielektrische Verhalten von OIP erfordert die Verwendung von Materialersatzschaltbildern, die neben der hochfrequenten Kapazität und dem Gleichstromwiderstand auch RC-Glieder enthält, die Polarisationserscheinungen in den Materialien beschreiben. Geometrisch komplexe Isolationsstrukturen, wie z.B. in Transformatoren, erfordern die Kombination von Ersatzschaltbildern für unterschiedliche Komponenten, **Bild 1**, wie z.B. für Ölspalte (Ö), Transformerboard-

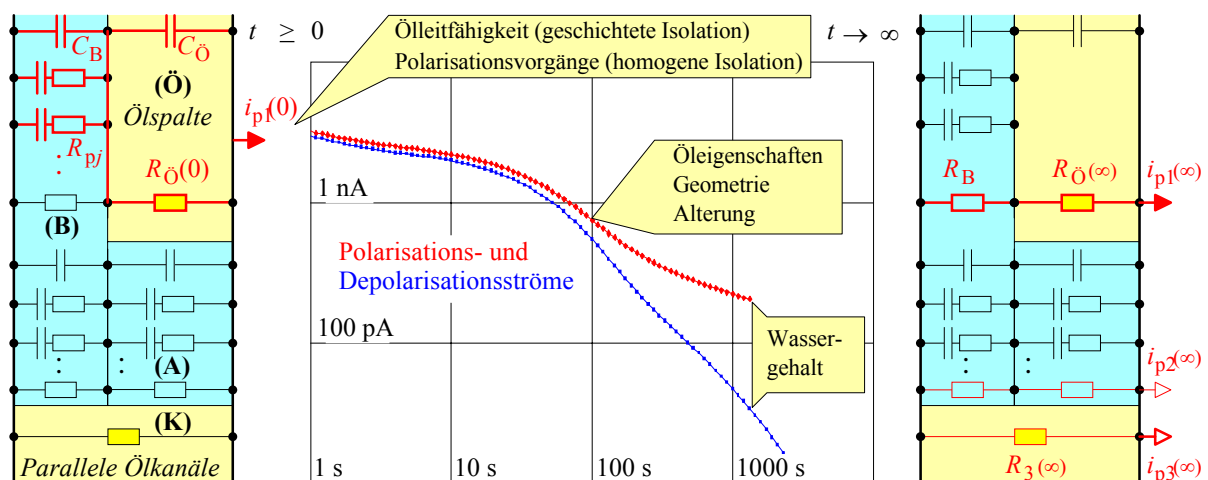


Bild 1 Differenzierung charakteristischer Materialeigenschaften durch unterschiedliche Messzeitpunkte [1], [2].

Barrieren (B), Abstütungen (A) und parallele Ölkanäle (K). Sprungantwortmessungen ergeben Polarisationsströme, die zu verschiedenen Zeiten von unterschiedlichen Ersatzelementen bestimmt werden. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Ersatzelemente durch unterschiedliche Messzeitpunkte zu differenzieren. Hierfür ist es vorteilhaft, einen möglichst frühen ($t \geq 0$) und einen möglichst späten ($t \rightarrow \infty$) Zeitpunkt zu betrachten, Bild 1 links und rechts:

An den hervorgehobenen, jeweils wirksamen Ersatzelementen ist erkennbar, dass der **Anfangsstrom** vom Anfangswert der Ölleitfähigkeit, den Kapazitäten und den Polarisationserscheinungen in den Barrieren bestimmt wird. Bei geschichteten Isolationen dominiert i.d.R. der Einfluss der *Ölleitfähigkeit*, bei homogenen

Isolationen, wie in Durchführungen der summierte Einfluss aller *Polarisationserscheinungen* [1].

Der **Endwert** des Stromes wird vor allem von den Gleichstromwiderständen bestimmt, er enthält deshalb Aussagen über *Leitfähigkeiten*.

Durch eine Netzwerkanalyse wurde gezeigt, dass das **charakteristische Stromverhältnis** $i_p(t \geq 0)/i_p(t \rightarrow \infty)$ mit dem *Leitfähigkeitsverhältnis* $\kappa_0(\infty)/\kappa_B(\infty)$ in Beziehung steht [1], [2].

Neben den geschilderten Zusammenhängen sind v.a. die nachfolgend betrachteten Einflüsse von Feldstärke und Temperatur, sowie das Zusammenwirken von Feuchte, Ölleitfähigkeit und Alterung von Interesse.

3 Auswertung von Messungen

Für die Auswertung von Polarisations- und Depolarisationsstrom- (PDC-) Messungen hat sich die Analyse durch „**Kurven-Fitting**“ bewährt. Dabei werden aus einer Materialbibliothek (z.B. für unterschiedliche Befuchtungszustände des OIP) dielektrische Systemantworten bzw. die zugehörigen Ersatzbilder ausgewählt und in ein die Isolationsgeometrie repräsentierendes Netzwerk eingebracht. In einem iterativen Prozess werden simulierte und gemessene Kurven zur Übereinstimmung gebracht, wobei die passende Materialkurve den vorliegenden Materialzustand repräsentiert [3]. Dabei muss man jedoch beachten, dass erhöhte Ströme sowohl von Feuchtigkeit als auch von Alterungsprodukten verursacht sein können [4]. Es werden deshalb weitere Größen betrachtet:

1.) Der Polarisationsstrom

$$i_p(t) = \frac{U}{R_\infty} + \sum_j \left(\frac{U}{R_j} e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right) \quad (1)$$

strebt für große Zeiten gegen den von der Gleichstromleitfähigkeit κ bestimmten Wert U/R_∞ , **Bild 2** oben. Die Zeitkonstanten $\tau_j = R_j \cdot C_j$ stehen dabei für unterschiedliche Polarisationsmechanismen.

2.) Eine schnellere Konvergenz ergibt sich durch Bildung der **Betragsdifferenz** mit dem Depolarisationsstrom, weil der Exponent der e-Funktion durch die Polarisations- bzw. Ladezeit t_L vergrößert wird [1]:

$$i_p(t) - i_d(t + t_L) = \frac{U}{R_\infty} + \sum_j \left(\frac{U}{R_j} e^{-\frac{t+t_L}{\tau_j}} \right) \quad (2)$$

Insbesondere für kurze Zeiten werden jedoch kleine Differenzen aus großen Strömen gebildet. Das Ergebnis unterliegt deshalb großen Schwankungen, v.a. auch wenn die Stromsignale in einer stark gestörten Umgebung erfasst werden müssen, Bild 2 oben.

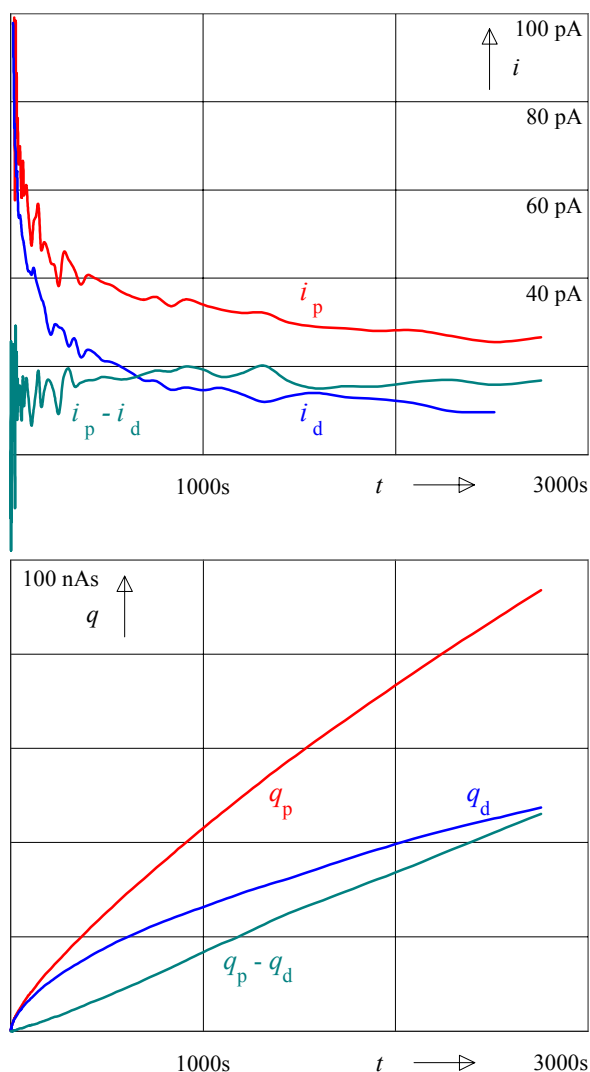


Bild 2 Auswertung von P- und D-Strommessungen durch Bildung von Stromdifferenzen (oben) und Berechnung von Gesamtladung q_p , gespeicherter Ladung q_d und nicht gespeicherter Ladung $q_p - q_d$ für eine 420 kV-OIP-Durchführung in gestörter Umgebung. Dargestellt sind Strom- und Ladungsbeträge sowie Betragsdifferenzen.

3.) Eine alternative und störungsunempfindlichere Auswertung besteht in der Betrachtung der durch Stromintegration ermittelten Ladungen, Bild 2 unten. Durch Integration von Gl. (1) folgt für die beim Polarisieren geflossene **Gesamtladung**

$$q_p(t) = \frac{U}{R_\infty} \cdot t + U \cdot \sum_j C_j \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}}) \quad (3)$$

Aus dem Endwert der Steigung ergibt sich wiederum die *Gleichstromleitfähigkeit*.

4.) Die beim Depolarisieren nach der Polarisations- bzw. Ladezeit t_L freiwerdende Ladung

$$q_d(t) = U \cdot \sum_j C_j \cdot (1 - e^{-\frac{t_L}{\tau_j}}) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}}) \quad (4)$$

strebt gegen einen konstanten Wert, der gesamten zuvor **gespeicherten Ladung**.

5.) Die Betragsdifferenz der Ladungen ergibt die **nicht gespeicherte Ladung**:

$$q_p(t) - q_d(t + t_L) = \frac{U}{R_\infty} \cdot t + U \cdot \sum_j C_j \cdot e^{-\frac{t_L}{\tau_j}} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}}) \quad (5)$$

Wie die Erfahrung zeigt, ergibt sich schon nach sehr kurzen Depolarisationszeiten eine glatte Kurve für $q_p - q_d$, mit weitgehend konstanter Steigung, lange bevor der Endwert der Steigung für q_p bzw. der Ladungsendwert für q_d erkennbar sind und früher als aus $i_p - i_d$ ein zuverlässiger Endwert ermittelt werden kann, Bild 2 unten.

Aus den **Steigungen von Ladungsdifferenzkurven** (5) werden nachfolgend *Gleichstromleitfähigkeiten* berechnet und mit den Parametern Feuchtigkeit, Temperatur und Feldstärke in Beziehung gesetzt.

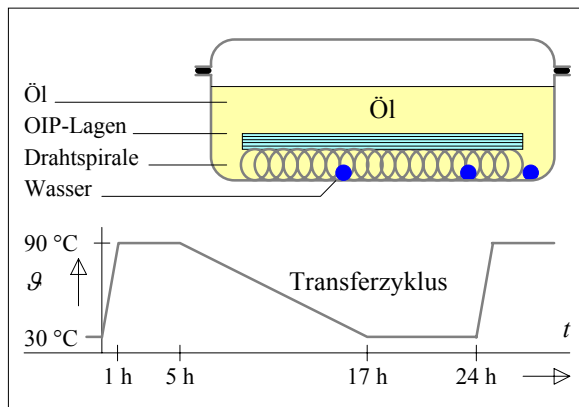


Bild 3 Definierte und homogene Befeuchtung vakuumimprägnierter OIP-Proben durch Feuchtetransfer.

4 Experimentelles Vorgehen

Sinnvolle Ergebnisse ergeben sich nur, wenn die Materialproben dem *vakuumimprägnierten* Zustand originaler Isolierungen entsprechen und außerdem *definiert und homogen befeuchtet* sind. Zu diesem Zweck wurden ebene Isolationsmodelle aus 12 jeweils 100 μm starken Isolierpapierlagen unter Vakuum und Temperatur getrocknet, imprägniert und in einem Gefäß aus Edelstahl auf einer Edelstahldrahtspirale unter Öl gelagert. Die Befeuchtung erfolgte durch Zugabe definierter Wassermengen mittels einer μl -Spritze auf den Gefäßboden, **Bild 3**. Der *Feuchtigkeitstransfer* erfolgte in dem hermetisch geschlossenen Gefäß durch Temperaturzyklen mit schneller Aufheizung zur Aufnahme von Wasser ins Öl und langsamer Abkühlung zur Abgabe des Wassers an die Zellulose, gefolgt von einer Ausgleichsphase bei 60 °C zur Einstellung eines Gleichgewichts [5].

In Voruntersuchungen wurde geklärt, dass durch eine entsprechende Anzahl von Transferzyklen ein *vollständiger Feuchtigkeitstransfer* und eine *homogene Befeuchtung* in alle drei Raumrichtungen möglich ist. Im Gegensatz zu festem Transformerboard erlaubt die Schichtung der Papiere dabei eine sehr feinstufige Untersuchung des Feuchtigkeitsprofils durch Karl-Fischer-Titration.

Vor jeder Messreihe wurden die äußeren Lagen für Feuchtigkeitsbestimmungen entnommen. 10 Lagen wurden dann in Schutzringanordnung unter dem Öl, in dem die Probe zuvor gelagert war, mit einem PDC-Analyser vermessen [3]. Eine Messreihe bestand für jede der Proben aus den Temperaturschritten Raumtemperatur (RT), 50 °C und 90 °C. In jedem Schritt erfolgten zwei PDC-Messungen bei 0,1 und 1 kV/mm. Nach Abschluss der Messreihe wurde der Feuchtigkeitsgehalt der innersten Lage kontrolliert.

Anstelle der Sollwerte 0, 1, 2, 3, 4 und 5% ergaben sich die in **Bild 4** genannten leicht abweichenden Werte, jedoch bei homogener Verteilung. Ursache der Abweichungen sind möglicherweise Ungenauigkeiten bei der Dosierung kleiner Wassermengen oder ein geringer Feuchtigkeitsverlust durch Diffusion.

5 Ergebnisse

Die Messungen zeigen erwartungsgemäß einen Anstieg der Ströme mit dem **Wassergehalt**, Bild 4 oben. Im Bereich mittlerer Feuchtigkeitsgehalte ergibt sich ein *Sättigungseffekt*, die Feuchtigkeitswerte durch Polarisationsstrommessungen sind weniger gut zu unterscheiden. Eine wesentlich bessere Unterscheidung ergibt sich aber im Bild der *Ladungsdifferenzen*, Bild 4 unten.

Temperaturerhöhungen führen zu einem exponentiellen Anstieg der Polarisationsströme sowie zu einer Verschiebung von Zeitkonstanten zu kürzeren Zeiten,

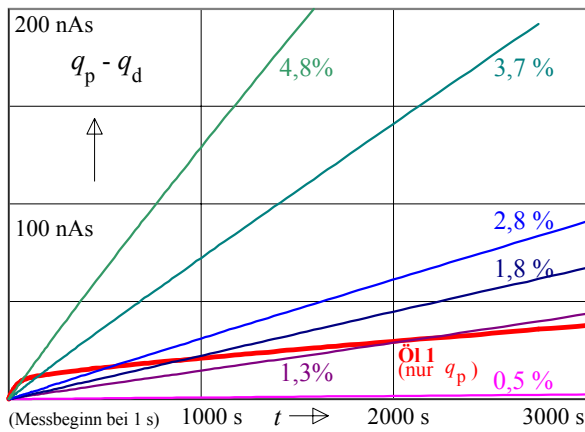
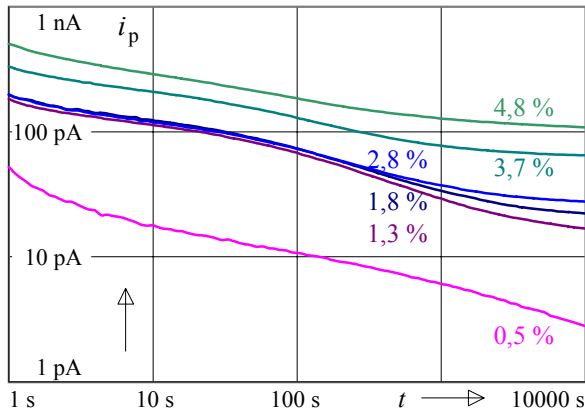


Bild 4 Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes in OIP auf die Polarisationsströme (oben) sowie auf die Ladungsdifferenzen (unten).

Bild 5 links. Die hier nicht dargestellte Temperaturabhängigkeit des Öles ist schwächer ausgeprägt. Interessant ist dabei v.a., dass die aus den Ladungsdifferenzen bestimmte Leitfähigkeit sehr genau der durch die Arrhenius-Beziehung

$$\kappa = \kappa_0 \cdot e^{-\frac{W_a}{k \cdot T}} \quad (5)$$

beschriebenen Temperaturabhängigkeit über den gesamten betrachteten Feuchtigkeitsbereich folgt, Bild 5 rechts, W_a steht für die Aktivierungsenergie, k für die Boltzmannkonstante. Erkennbar ist dieser Zusammenhang an den aus 50 °C- und 90 °C-Messungen errechneten Leitfähigkeitswerten für Raumtemperatur, die genau mit den bei Raumtemperatur direkt gemessenen Leitfähigkeiten übereinstimmen. PDC-Messungen für OIP dürfen deshalb einer Temperaturkorrektur unterzogen werden.

Weiterhin wurde der Einfluss der **Ölleitfähigkeit** auf die Leitfähigkeitsendwerte des OIP untersucht: Die o.g. Imprägnierungen und Messungen erfolgten mit einem *hochohmigen Öl* („**Öl 1**“, Leitfähigkeitsendwert $8 \cdot 10^{-15}$ S/m bei 0,1 kV/mm). Zum Vergleich dienen Imprägnierungen und Messungen mit einem *niederohmigeren Öl* („**Öl 2**“, Leitfähigkeitsendwert $3,6 \cdot 10^{-13}$ S/m bei 0,1 kV/mm), **Bild 6**. Dargestellt sind die Betragsdifferenzen der Ladungen $q_p - q_d$, deren Steigungen den Leitfähigkeitsendwerten proportional sind. Es ist deutlich erkennbar, dass eine hohe Ölleitfähigkeit auch bei vergleichbarem Feuchtigkeitsgehalt zu einer erhöhten Leitfähigkeit des Papiers führt. Für Öl 2 liegen allerdings noch nicht alle Messungen vor, da es sich um Zwischenergebnisse aus laufenden Untersuchungen handelt.

Die Zusammenhänge zwischen *OIP-Leitfähigkeit und Feuchtigkeitsgehalt* sind für die beiden Imprägnieröle 1 und 2 in **Bild 7** dargestellt und werden den Ölleitfähigkeiten selbst sowie *früheren Messungen* ([6], dünne Linien in Bild 7 für unterschiedliche Schichtungsverhältnisse Öl/Board) gegenübergestellt. Letztere erfolgten an Transformerboard-Proben, die zuvor getrocknet und über die *Luftfeuchtigkeit* bis zu einem

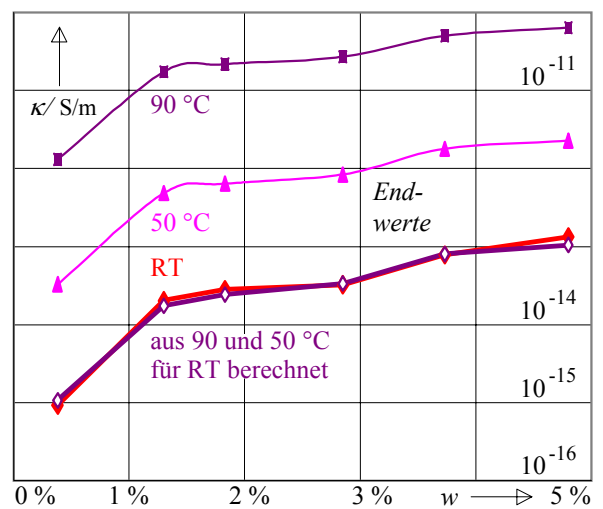
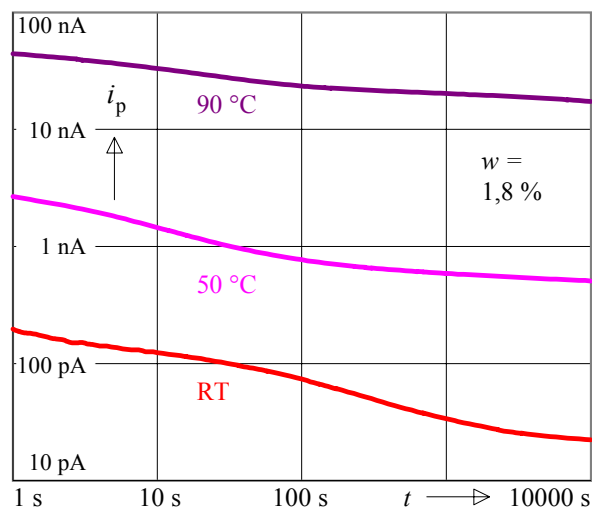


Bild 5 Polarisationsströme in OIP bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 1,8 % für unterschiedliche Temperaturen (links) sowie aus Ladungsdifferenzen ermittelte Leitfähigkeitsendwerte für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte und verschiedene Temperaturen (rechts). Kontrolle der Arrhenius-Beziehung durch Umrechnung von Messwerten bei 50 °C und 90 °C auf Raumtemperatur (RT). $E = 0,1$ kV/mm.

Sollgewicht angefeuchtet wurden. Anschließend wurden sie in Öl 2 eingelegt. Man sieht, dass dies ver-

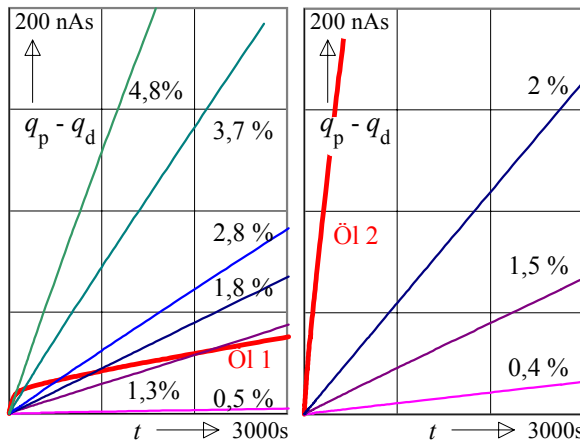


Bild 6 Einfluss der Ölleitfähigkeit auf die Leitfähigkeitsendwerte bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten. Die Steigungen der Ladungsdifferenzen entsprechen den Leitfähigkeiten.

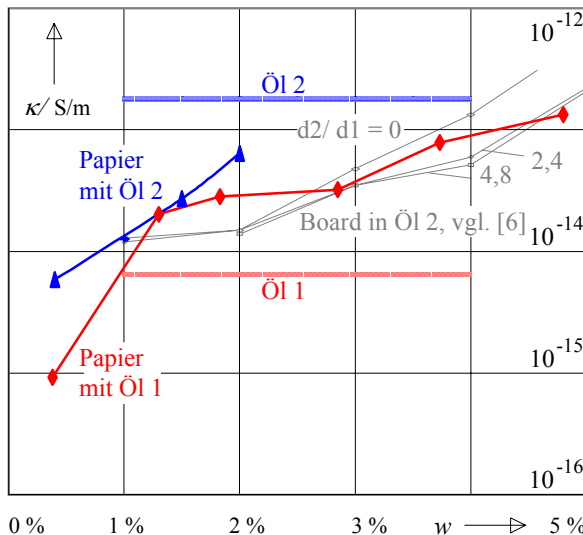


Bild 7 Leitfähigkeitsendwerte von OIP für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte im Vergleich zu Ölleitfähigkeiten und Leitfähigkeiten von imprägniertem Board [6].

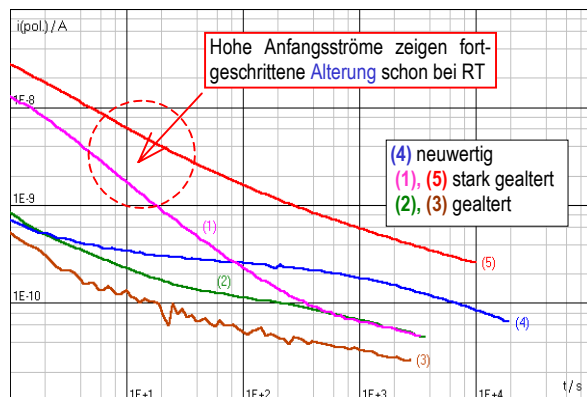


Bild 8 Alterungsdiagnose an betriebsgealterten OIP-Durchführungen bei Raumtemperatur.

gleichsweise niedrige Leitfähigkeitswerte ergab, möglicherweise weil die Befeuchtung an Luft v.a. die äußeren Lagen erfasst und im Inneren höherohmige Zonen belassen haben könnte.

Die beschriebenen Untersuchungen erfolgten bei einer **Feldstärke** von 0,1 kV/mm. Bei 1 kV/mm wurden etwas geringere Leitfähigkeiten festgestellt. Möglicherweise ist dies auf das bekannte nichtlineare Verhalten von Isolieröl zurückzuführen [7].

6 Anwendungsbeispiel

Als Beispiel werden betriebsgealterte OIP-Durchführungen betrachtet, bei denen man aufgrund erhöhter Leitfähigkeitsendwerte z.T. auf erhöhte Feuchtigkeitsgehalte hätte schließen können, obwohl Feuchtigkeitsbestimmungen an Papierproben einen trockenen Isolationszustand nachweisen konnten [4]. Eine isolierte Betrachtung ist hier offenbar nicht ausreichend: Es treten nämlich auch auffällig erhöhte Polarisationsströme innerhalb der ersten 100 s auf, **Bild 8**. In diesen Fällen ergaben Vergleichsmessungen bei 70 °C auch deutlich erhöhte netzfrequente Verlustfaktoren, die bei Raumtemperatur noch nicht erkennbar waren. Hieraus lassen sich zwei Schlüsse ziehen:

- (1) Einerseits sind stark gealterte OIP-Isolationen offenbar durch **PDC-Messung** schon bei **Umgebungs-temperatur** erkennbar.
- (2) Andererseits können Alterungsprodukte offenbar auch die Feuchtigkeitsdiagnose beeinflussen. Erhöhte Leitfähigkeitsendwerte sind somit ein **Indikator** für Veränderungen der Isolation, der sowohl *Feuchtigkeit* als auch *Alterung* erfasst.

Es besteht die Vermutung, dass die Alterung vor allem über **Leitfähigkeitsänderungen des Öles** auf die Eigenschaften des OIP wirkt. Um dies zu untersuchen wurden verschiedene Papiere mit neuwertigen und alten Ölen (Öl 1 und Öl 1 stark betriebsgealtert) imprägniert, **Bild 9**. Man sieht, dass der Polarisationsstrom-

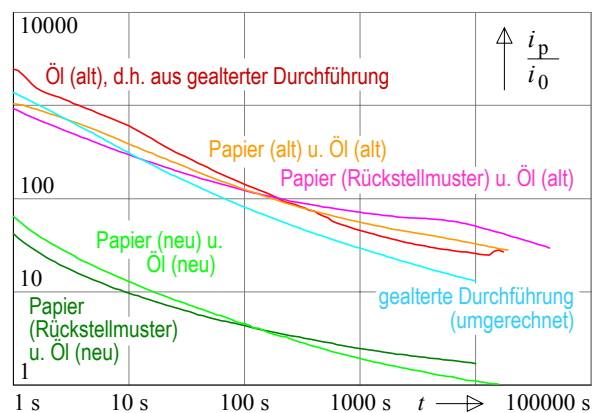


Bild 9 Beeinflussung von Polarisationsströmen in OIP durch betriebsgealtertes Öl. Die Ströme sind mit der Hilfsgröße i_0 auf gleiche Kapazitäten umgerechnet.

verlauf einer gealterten Durchführung sowohl mit gealtertem als auch mit neuwertigem (zurückgestelltem) Originalpapier nachgestellt werden kann, wenn die Imprägnierung mit gealtertem und leitfähigem Öl erfolgt. Bei Verwendung von Neuöl liegen die Polarisationsströme etwa um eine Größenordnung niedriger. Die *gealterte Ölkomponente* hat offenbar einen entscheidenden Einfluss auf *Polarisationsströme* des OIP bis zu den Endwerten hin.

7 Schlussfolgerungen

1.) Aus Anfangs- und Endwerten von **Polarisationsströmen** und aus **Stromverhältnissen** lassen sich Aussagen über *Leitfähigkeiten* und damit zusammenhängende *Alterungs-* und *Befeuchtungszustände* in homogenen und in geschichteten Isolationen treffen.

2.) Eine neue störungsunempfindliche und zeitsparende **Methode für die Auswertung** von P- und D-Strömen besteht in der **Integration der Signalströme** und in der Berechnung der geflossenen Gesamtladung q_p , der gespeicherten Ladung q_d und der nichtgespeicherten Ladung $q_p - q_d$.

Die *gespeicherte Ladung* q_d ist mit der Ölleitfähigkeit und mit Polarisationsvorgängen korreliert und zeigt eher Alterung und weniger Befeuchtung an.

Die *nichtgespeicherte Ladung* $q_p - q_d$ ergibt frühzeitig konstante Steigungen, die dem Leitfähigkeitsendwert proportional sind und die eine sehr deutliche Differenzierung unterschiedlicher Materialzustände erlauben.

3.) Für die **definierte und homogene Befeuchtung** von vakuumimprägniertem OIP hat sich eine neue Methode mit thermisch erzwungenem Feuchtigkeitstransfer durch das Öl bewährt.

4.) **Leitfähigkeitsendwerte** steigen mit dem *Feuchtigkeitsgehalt* des OIP, es zeigt sich jedoch im Bereich mittlerer Feuchtigkeiten (um 2 %) ein *Sättigungseffekt*. Die ermittelten Leitfähigkeitswerte dürfen im gesamten Feuchtebereich (0,5 bis 5 %) nach Arrhenius bzgl. der *Temperatur korrigiert* werden. Neben der Feuchtigkeit hat auch die *Ölleitfähigkeit* einen

Einfluss auf Leitfähigkeitsendwerte, der jedoch erst unvollständig untersucht ist.

5.) **Leitfähigkeitsendwerte** sind somit ein Indikator für *Feuchte* im Papier und für *gealtertes (d.h. leitfähigeres) Öl*. Hohe **Anfangswerte** von Polarisationsströmen deuten auf fortgeschrittene *Alterung* hin, die mit der Ölkomponente in Beziehung steht. Durch PDC-Messungen ist es deshalb möglich, gealterte OIP-Isolierungen **schon bei Raumtemperatur** zu diagnostizieren, auch wenn ein erhöhter netzfrequenter Verlustfaktor erst bei erhöhter Betriebstemperatur auftritt.

8 Referenzen

- [1] A. Küchler; *Hochspannungstechnik*; Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2. Aufl. 2005
- [2] A. Küchler, T. Leibfried; *Berücksichtigung geometrischer und parasitärer Einflüsse bei der Bestimmung des Wassergehaltes in Öl-Papier-Isolationen durch dielektrische Diagnose*; ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, 2004
- [3] J.J. Alff, V. Der Houhanessian, W.S. Zaengl, A.J. Kachler; *A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis on Electric Power Apparatus*; IEEE Symposium on El. Insulation, Anaheim, USA, 2000
- [4] A. Küchler, F. Hüllmandel, K. Böhm, N. Koch; *Einfluss äußerer Grenzflächen auf die dielektrische Diagnose betriebsgealterter Hochspannungsdurchführungen*; ETG-Fachtagung „Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen“, Hanau, 8.-9.3.2005
- [5] F. Kempl; *Einfluss von Materialparametern auf dielektrische Diagnosemessungen*; Diplomarbeit FHWS Schweinfurt, 2004
- [6] A. Küchler, J.J. Alff, T. Bedel, T. Häusler; *Dielektrische Diagnose von Transformator-Isolationen zur Bestimmung des Wassergehaltes in der festen Isolation*; VDI-GET-Tagung „Monitoring-, Diagnose- und USV-Systeme“, Braunschweig, 2001
- [7] A. Kuechler, F. Huellmandel, J. Hoppe, D. Jahnel, C. Krause, U. Piovan, N. Koch; *Impact of Dielectric Material Responses on the Performance of HVDC Power Transformer Insulations*; ISH 03 International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, NL, 2003

Danksagung:

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Messungen an Durchführungen.

Weiterhin sei Herrn H. Gasser (Weidmann Transformerboard Systems AG) für wertvolle Diskussionen sowie den Herren F. Klauer und F. Kempl (FHWS Schweinfurt) für die sorgfältige Durchführung der praktischen Messungen recht herzlich gedankt.

Anschrift:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler
FHWS Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt
Hochspannungslabor
Ignaz-Schön-Str. 12
97421 Schweinfurt

Tel. (09721) 940-840
Email: akuechler@fh-sw.de