

Der Einfluss von Alterung und Materialeigenschaften auf dielektrische Messungen an Öl-Papier-Isolierungen

Dipl.-Ing. Maik Koch, Omicron Energy, Klaus, Österreich

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen,

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Deutschland

Kurzfassung

Dieser Artikel untersucht den Einfluss von Alterung und Materialeigenschaften auf dielektrische Diagnoseverfahren wie Frequency Domain Spectroscopy FDS und Polarization Depolarization Currents PDC. Die Feuchtigkeitsanalyse beruht auf einem Vergleich zwischen einer modellierten dielektrischen Antwort aus der Datenbasis und der dielektrischen Antwort des Leistungstransformators. Um eine zuverlässige Datenbasis zu erhalten, wurden die dielektrischen Eigenschaften von Öl und Pressboard unter dem Einfluss von Feuchtigkeit, Alterung, Temperatur, Pressboardtyp und Imprägnierung gemessen. Feuchtigkeit erhöht die Verluste und Polarisierbarkeit, davon nicht unterscheidbar verhalten sich leitfähige Alterungsprodukte. Pressboard mit höherer Dichte weist höhere Polarisierbarkeit und Verluste auf als Material niedrigerer Dichte. Bei der Analyse von Leistungstransformatoren können diese Eigenschaften die Genauigkeit beeinträchtigen. Basierend auf den Labormessungen wurde ein Analysealgorithmus entwickelt, der einen Ansatz zur Kompensation leitfähiger Alterungsprodukte enthält. Dieser Algorithmus bewies seine Effektivität bei der Feuchtebestimmung an einem stark gealterten Transformator, wo zum Vergleich auch andere Verfahren angewendet wurden.

1 Einführung

Dielektrische Diagnoseverfahren etablierten sich in den letzten Jahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Öl-Papier-isolierten Transformatoren. Wasser ist ein Alterungsprodukt und spaltet die Zelluloseketten der Feststoffisolierung weiter hydrolytisch auf. Dadurch kann die Kraftwirkung äußerer Kurzschlussströme bei gesunkener mechanischer Festigkeit zum inneren dielektrischen Fehler führen. Weitere Schädenswirkungen von Wasser sind begünstigte Teilentladungen, Bläschenbildung (Bubbling) und eine verringerte Durchschlagsspannung des Isolieröls.

Dielektrische Diagnoseverfahren ermitteln den Wassergehalt der Feststoffisolierung durch einen Vergleich der am Transformator gemessenen dielektrischen Eigenschaften mit denen eines Modells der Isolierung. Es liegt auf der Hand, dass die Qualität des Modells über die Genauigkeit der Wasserbestimmung entscheidet. Einen zuverlässigen Datensatz für die Modellierung bereitzustellen ist das Ziel dieser Untersuchung. Leitfähige Alterungsprodukte wie Säuren erhöhen die dielektrischen Verluste in einer ähnlichen Weise wie Wasser und können dadurch zu einer Überschätzung des Wassergehalts führen. Ihre Wichtigkeit wurde bereits 2001 im Rahmen der CIGRÉ betont [1], einige Forscher untersuchten ihre Wirkung [2], [3], ein Verfahren zu deren Unterscheidung von Wasser existiert jedoch nicht. Der Einfluss des Pressboardtyps (Dichte, Hersteller) findet bisher kaum Beachtung [4]. Da beide Einflüsse potentielle Fehlerquellen darstellen, liegen sie auch im Untersuchungsbereich der CIGRÉ TF D1.01.14 "Dielectric response diagnoses for transformer windings".

Die vorliegende Arbeit untersucht die Einflüsse von Feuchtigkeit, Temperatur, Alterung, Ölqualität und

Pressboardtyp auf die dielektrischen Eigenschaften und stellt eine Möglichkeit zur Kompensation der Alterungseinflüsse vor.

2 Dielektrische Eigenschaften einer Öl-Papier-Isolierung

Der Strom durch ein Dielektrikum $I(\omega)$ lässt sich durch die Überlagerung von Polarisation und Leitfähigkeit beschreiben, (1).

$$\underline{I}(\omega) = j\omega C_0 \left\{ \underbrace{\varepsilon(\infty) + \chi'(\omega)}_{\text{Polarisation}} - j \underbrace{\left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right]}_{\text{Leitfähigkeit}} \right\} U(\omega) \quad (1)$$

Dabei bedeuten: C_0 – Geometrische Kapazität; $\varepsilon(\infty)$ – Permittivität, die innerhalb des gemessenen Frequenzbereichs konstant bleibt; χ' – Realteil der Suszeptibilität (Polarisierbarkeit); σ_0 – Leitfähigkeit; χ'' – Imaginärteil der Suszeptibilität (Polarisationsverluste); U – Sinusförmige Messspannung.

Auch die Permittivität ε (Dielektrizitätszahl) lässt sich als komplexe Größe ausdrücken:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (2)$$

Der bekannte Verlustfaktor Tangens Delta errechnet sich dann mittels (3).

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega)}{\varepsilon(\infty) + \chi'(\omega)} \quad (3)$$

Dielektrische Diagnosemethoden messen die Leitfähigkeit von Zellulose und Öl überlagert von der Grenzflächenpolarisation an den Übergängen des Öls zur Feststoffisolierung. Feuchtigkeit, Temperatur, die

Isolationsgeometrie, leitfähige Alterungsprodukte und andere Materialeigenschaften beeinflussen diese elektrisch messbaren Effekte, wie im Folgenden gezeigt wird. Für die Messung des Wassergehalts ist eine Unterscheidung der Effekte von essentieller Bedeutung. Bild 1 stellt den Verlustfaktor von Pressboard über dem sehr breiten Frequenzbereich von 0,0001-1000 Hz dar. Die Feuchtigkeit beträgt beispielhaft 1, 2 und 3 %, die Temperatur 20°C. Alterung und Materialeigenschaften wirken sich auf den Kurvenverlauf aus, wie Abschnitt 3 dieser Veröffentlichung zeigt.

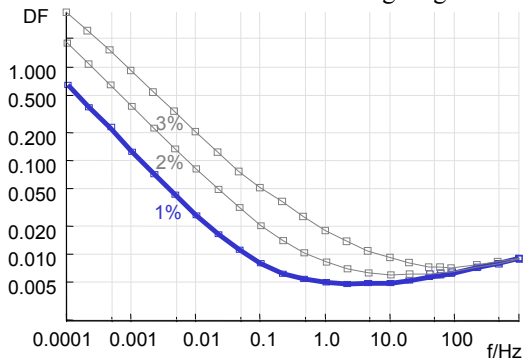


Bild 1: Verlustfaktor von Pressboard mit 1, 2 und 3 % Feuchtigkeit bei 20°C

Bild 2 zeigt den Verlustfaktor von Öl mit einer Leitfähigkeit von 1 pS/m bei 20°C. Im Gegensatz zum Pressboard fällt der Verlustfaktor mit 20 dB pro Frequenzdekade; das Öl weist also Leitfähigkeitseffekte aber in diesem Fall keine Polarisation auf.

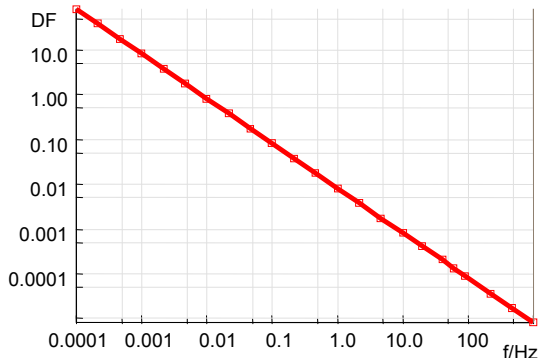


Bild 2: Verlustfaktor von Öl mit einer Leitfähigkeit von 1 pS/m bei 20°C

Im mehrschichtigen Dielektrikum von Transformatoren überlagern sich die oben dargestellten Eigenschaften von Pressboard und Öl gemeinsam mit der Grenzflächenpolarisation. Bild 3 zeigt die dementsprechende typische s-förmige Verlustfaktorkurve für eine Pressboard-Feuchte von 1 %, eine Ölleitfähigkeit von 1 pS/m, eine Temperatur von 20°C und eine Isolationsgeometrie von 30 % Barrieren und 15 % Kanalleisten. Pressboard dominiert die Frequenzen oberhalb 5 Hz und unterhalb 0,5 mHz. Öl verursacht den steilen Anstieg zwischen 5 Hz und 10 mHz. Die Isolationsgeometrie bewirkt durch die Grenzflächenpolarisation das lokale Maximum bei 3 mHz. Erst der breite Frequenzbereich ermöglicht die Unterscheidung der Bei-

träge der einzelnen Materialien zur gesamten dielektrischen Antwort.

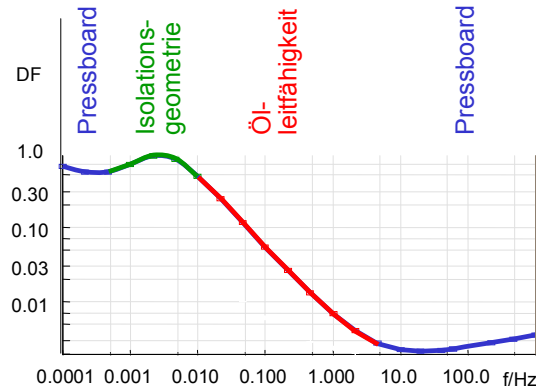


Bild 3: Überlagerung der dielektrischen Eigenschaften von Pressboard und Öl mit Grenzflächenpolarisation

An dieser Stelle muss betont werden, dass die angegebenen Frequenzbereiche keine festen Grenzen darstellen sondern für jede Isolierung spezifisch sind. So illustriert Bild 4, wie sich die Verlustfaktorkurve für höhere Feuchtigkeit und Ölleitfähigkeit in Richtung höherer Frequenzen verschiebt.

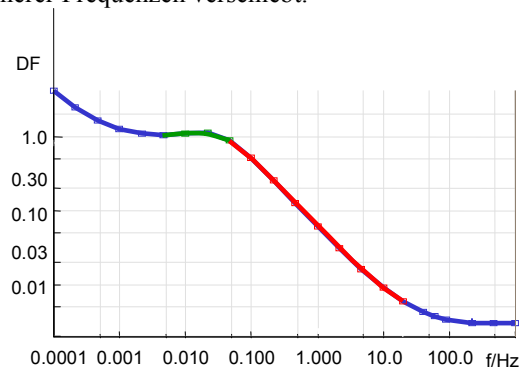


Bild 4: Verlauf des Verlustfaktors für einen höheren Wassergehalt von 3 % und eine höhere Ölleitfähigkeit von 10 pS/m bei 20°C

Steigt schließlich auch die Temperatur der Isolierung, so erhöhen sich die Verluste weiter. Bild 5 zeigt die Isolierung mit den Parametern von Bild 4 bei einer Temperatur von 50°C.

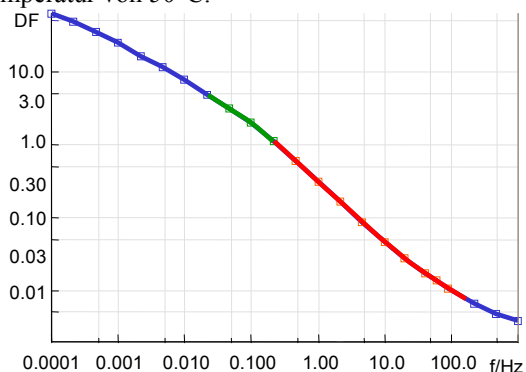


Bild 5: Verlustfaktor bei 3 % Feuchtgehalt und 43 pS/m Ölleitfähigkeit bei 50°C

Die Analyse der dielektrischen Eigenschaften zielt auf die Bestimmung der Feuchtigkeit in der Feststoffiso-

lierung (Pressboard) ab. Vom Pressboard wird der Bereich niedriger Frequenzen links vom Bereich der Grenzflächenpolarisation und der Bereich hoher Frequenzen dominiert. Es genügt nun nicht, die Messung auf den Bereich hoher Frequenzen zu beschränken, da sich in diesem Bereich Unterschiede im Wassergehalt nur sehr geringfügig auswirken (Bild 1). Wird zum Beispiel die Messung in Bild 3 bei 2 mHz abgebrochen, so erscheint der von Feuchtigkeit im Pressboard dominierte Bereich der dielektrischen Antwort noch nicht. Damit kann die dielektrische Analyse nur noch grob zwischen trocken und feucht unterscheiden, sie wird ihrer Genauigkeit beraubt. Eine dielektrische Messung ermöglicht erst dann eine genaue Feuchteanalyse, wenn sie auch Informationen vom niederfrequenten, vom Pressboard dominierten, Bereich enthält. Die Position des interessanten, niederfrequenten Bereichs bestimmt die notwendige Dauer einer dielektrischen Messung.

Ein neu vorgestelltes Messgerät, welches zwecks Zeiteinsparung die Messung im Zeit- und Frequenzbereich kombiniert [5], benötigt folgende Messzeiten: Für den Zustand nach Bild 3 liegen bei 0,2 mHz genügend Informationen vor, die Messung dauert 1:23 h. Bei der höheren Feuchtigkeit nach Bild 4 genügen 2 mHz, korrespondierend mit 14 min und bei Bild 5 schließlich 8 min. Zum Vergleich benötigt eine ausschließlich im Frequenzbereich durchgeführte Messung für den Zustand nach Bild 3 etwa 3 h.

3 Einfluss von Alterung und Materialeigenschaften

3.1 Messaufbau

Um die dielektrischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden neue Pressboardscheiben von 2 mm Dicke in den Feuchtestufen 0,8; 2,0; 2,8; und 3,9 % mit Neuöl imprägniert und bei 20, 50 und 80°C gemessen. Für eine homogene Feuchteverteilung ist das zyklische Erhitzen der Proben nötig.

In einer weiteren Untersuchung wurden mit Neuöl imprägnierte Pressboardscheiben während 2 Monaten bei 130°C unter Beigabe von Metallspänen gealtert, was in einen Polymerisationsgrad von 110-150 resultierte. Nach der Alterung betrug die Feuchtigkeit in allen Proben ca. 1 %, was auf Undichtigkeiten der Behälter hinweist. Anschließend wurde die Feuchtigkeit auf 0,2; 2,1; 3,1 and 3,9 % eingestellt.

Der Einfluss des zur Imprägnierung verwendeten Öls wurde durch Imprägnierung mit vier unterschiedlich betriebsgealterten Ölen untersucht. Die Ölleitfähigkeit betrug 0,05; 3,5; 21 pS/m und 148 pS/m.

Schließlich wurden vier neue Pressboardproben unterschiedlicher Hersteller mit demselben neuen, nur gering leitfähigen Öl imprägniert. Die Feuchtigkeit aller Proben blieb dabei mit 2,6 % gleich, ebenso die Temperatur mit 20°C. Eine Messzelle mit Schutzringelekt-

rodenanordnung diente wiederum zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften.

Ein Messsystem nach [6] ermittelte Real- und Verlustanteil der Kapazität in den Proben, welche in einer Schutzringelektrodenanordnung eingespannt waren.

3.2 Einfluss der Feuchtigkeit

Bild 6 zeigt den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Permittivität von neuem Pressboard. Wasser erhöht sowohl die Polarisierbarkeit als auch die Verluste und wirkt sich im besonderen auf die niedrigen Frequenzen aus.

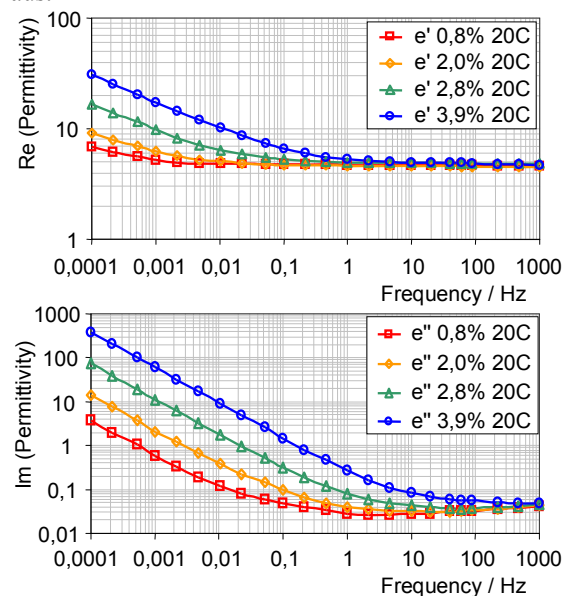


Bild 6: Einfluss des Wassergehalts auf die dielektrischen Eigenschaften von neuem Pressboard bei 20°C Isolationstemperatur. Das obere Diagramm zeigt den Realteil der Permittivität (Polarisierbarkeit) und das untere Diagramm den Imaginärteil (Verluste).

3.3 Einfluss der Temperatur

In ähnlicher Weise wie der Wassergehalt wirkt sich auch die Isolationstemperatur aus, im Bild 7 beispielhaft nur für 2,8 % Feuchtegehalt dargestellt. Die Analyse des Wassergehalts verlangt also eine zuverlässige Temperaturkompensation, was durch geeignete Software auch möglich ist.

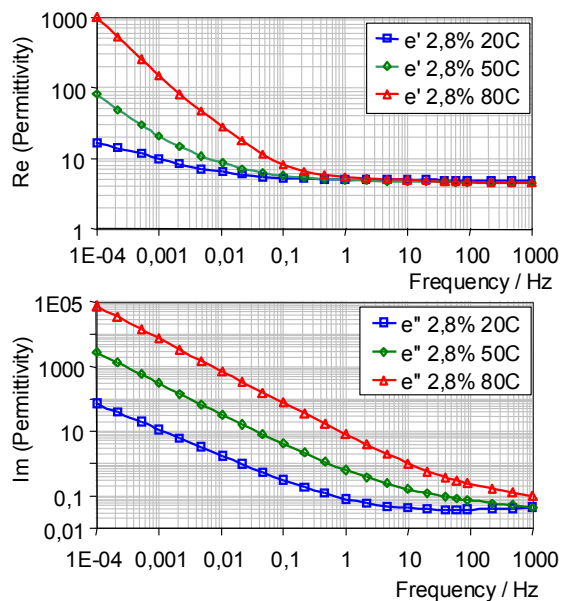


Bild 7: Einfluss der Isolationstemperatur auf die Permittivität von neuem Pressboard mit 2,8 % Wassergehalt

3.4 Einfluss thermischer Alterung

Die Alterung von Zellulose geschieht bis zu der hier verwendeten Temperatur hauptsächlich durch Oxydation und Hydrolyse, nur teilweise durch Pyrolyse. Sie resultiert in leitfähige Alterungsprodukte wie z.B. Säuren, die die Verluste und auch die Polarisierbarkeit erhöhen (Bild 8). Bild 9 vergleicht den Verlustfaktor von neuem mit dem von gealtertem Pressboard bei ähnlichem Wassergehalt. Das Vorhandensein der leitfähigen Alterungsprodukte erhöht die Verluste und kann in gealterten Transformatoren Feuchtigkeit vortäuschen.

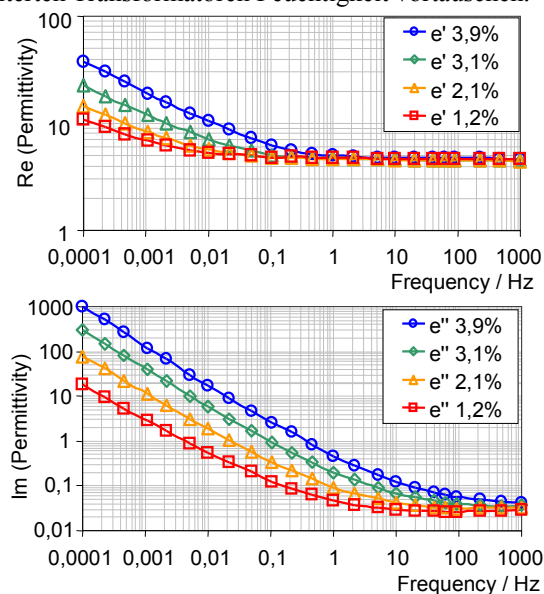


Bild 8: Permittivität gealterter Pressboardproben mit Feuchtigkeit 1,2; 2,1; 3,1 und 3,9 % bei 20°C

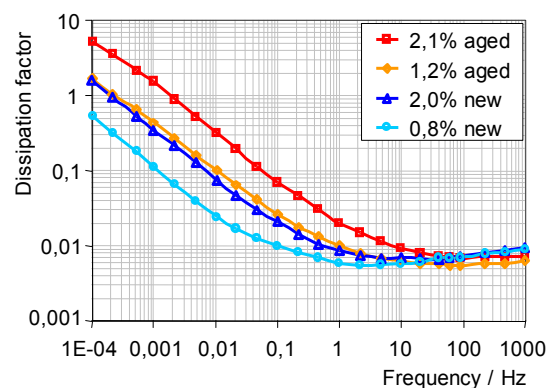


Bild 9: Vergleich des Verlustfaktors für neues und gealtertes Pressboard mit ähnlichem Wassergehalt bei 20°C Isolationstemperatur

3.5 Einfluss des imprägnierenden Öls

Bild 10 zeigt den Einfluss der Leitfähigkeit des zur Imprägnierung verwendeten Öls auf den Verlustfaktor von neuem Pressboard. Drei der verwendeten Öle wurden im betriebsgealterten Zustand aus Transformatoren entnommen, sie enthalten also typische leitfähige Alterungsprodukte. Obwohl der Wassergehalt aller Proben mit 2,6 % gleich war, erhöht die Leitfähigkeit des Imprägnieröles die dielektrischen Verluste in einer ähnlichen Weise, wie es auch die thermische Alterung bewirkt (Bild 9). Bei der Analyse realer Leistungstransformatoren muss aufgrund einer durch Alterung erhöhten Ölleitfähigkeit mit einer Überschätzung des Wassergehalts gerechnet werden.

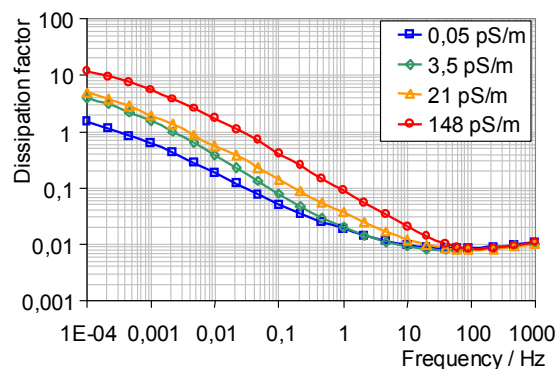


Bild 10: Verlustfaktor von neuem Pressboard mit 2,6 % Wassergehalt imprägniert mit Ölen unterschiedlicher Leitfähigkeit: 0,05; 3,5; 21 und 148 pS/m

3.6 Einfluss des Pressboard-Materials

Um den Einfluss des Pressboard-Materials zu untersuchen, wurden zwei Werkstoffe in HD-Qualität (Weidmann Transformerboard IV, Pucaro Elboard High Density HD) mit zwei LD-Werkstoffen verglichen (Weidmann Transformerboard III und ein LD-Material von Petrocard).

Bild 11 zeigt die Permittivität der vier Materialien als Real- und Verlustteil. Die HD-Materialien mit einer Dichte von 1,1-1,3 g/cm³ besitzen eine höhere Polarisierbarkeit von $\epsilon' = 4,6$ im Vergleich zu den LD-Materialien (Dichte etwa 0,9 g/cm³) mit $\epsilon' = 3,0$. Aufgrund der höheren Dichte enthalten die HD-Werkstoffe eine größere Menge an polarisierbarem Material pro Volumen, ebenso aber sind auch die Verluste ϵ'' höher. Im Transformatorenbau werden HD-Materialien typischerweise für die Barrieren und Kanalleisten eingesetzt, während LD-Materialien für Formteile dienen. Die Autoren von [4] stellten nicht nur Dichte-, sondern auch herstellerspezifische Unterschiede in der dielektrischen Antwort fest, welche bei der Software von [6] zu einer Fehleinschätzung des Wassergehalts von bis zu 0,5 % führten. Aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften von Pressboardmaterialien muss also mit einer Toleranz in der Wasserbestimmung von etwa 0,5 % gerechnet werden.

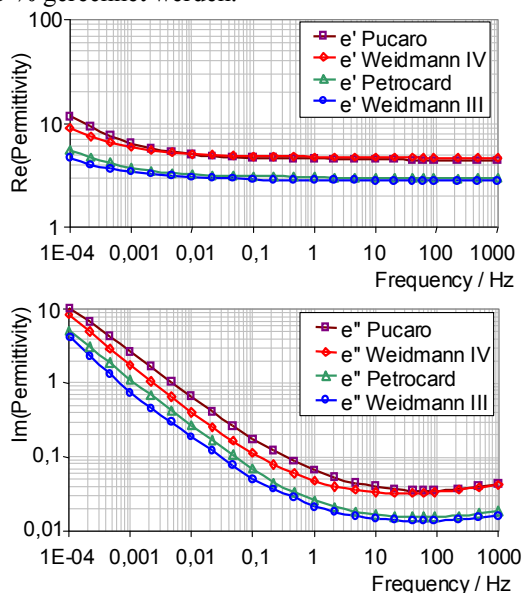


Bild 11: Permittivität von vier Pressboardproben unterschiedlicher Materialien und Hersteller bei gleicher Feuchtigkeit von 2,6 % und 23°C

3.7 Kompensation leitfähiger Alterungsprodukte

Leitfähige Alterungsprodukte verändern Polarisierbarkeit und Verluste im Dielektrikum in einer ähnlichen Weise wie Feuchtigkeit, so zeigen es die obenstehenden Untersuchungen. An einem Leistungstransformator könnte der überschätzte Wassergehalt gegebenenfalls zu einer unnötigen Trocknung führen. Eventuell zum Vergleich herangezogen Ölproben und traditionelle Gleichgewichtsdiagramme würden aufgrund der Alterung die Feuchtigkeit in der Feststoffisolierung ebenfalls überschätzen [7]. Eine Kompensation leitfähiger Alterungsprodukte ist also für die genaue Wasserbe-

stimmung in gealterten Transformatoren von großer Bedeutung.

Das thermodynamische Gleichgewicht betrifft auch die Gleichverteilung des chemischen Potentials von Alterungsprodukten. Ebenso wie für das Wasserpotential wird diese Gleichverteilung zwischen Öl und Zellulose im Betrieb angestrebt. Also ist das chemische Potential der Alterungsprodukte in erster Näherung gleichverteilt, jedoch wirken sich die Alterungsprodukte unterschiedlich auf die dielektrischen Eigenschaften des Öls und der Zellulose aus. Während das Öl sehr stark von leitfähigen Alterungsprodukten beeinflusst wird, jedoch weniger von Feuchtigkeit [8], wirkt sich letztere besonders deutlich auf die Feststoffisolierung aus. Darauf basiert ein Kompensationsalgorithmus, dessen Wirksamkeit im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

4 Feuchtigkeitsanalyse an einem stark gealterten Transformator

Ein stark gealterter Transformator war zur Verschrottung bestimmt und bot damit eine gute Gelegenheit, indirekte Verfahren zur Feuchtebestimmung mit direkt entnommenen Papierproben zu vergleichen. Der Transformator mit 30 MVA Nennleistung aus dem Jahr 1950 war mit Shell Diala K6SX aus dem Jahre 1954 gefüllt. Das Öl hatte bereits eine Neutralisationszahl von 0,49 mg KOH/g Öl.

Zur Feuchtebestimmung wurden drei Prinzipien angewendet: Erstens dielektrische Verfahren mit und ohne Kompensation für Alterungsprodukte, Zweitens die Ölprobenmethode mit Anwendung eines Gleichgewichtsdiagramms und drittens die direkte Karl Fischer Titration an entnommenen Papierproben.

Bild 12 zeigt die Ergebnisse der dielektrischen Messungen als Polarisations- und Depolarisationsstrom über der Zeit (links) und der Verlustfaktors über der Frequenz (rechts). Das schnelle Erreichen eines konstanten Stroms im Zeitbereich bei ca. 100 s und eines von Leitungsverlusten dominierten Verlustfaktors bei etwa 0,01 Hz charakterisieren eine stark von Leitfähigkeitsprozessen geprägte Isolierung.

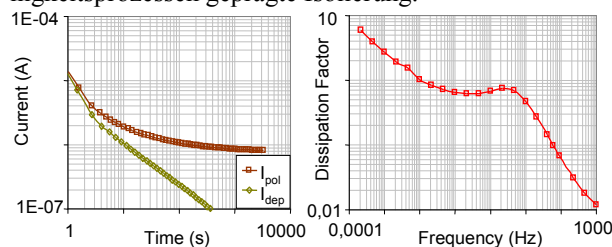


Bild 12: Polarisations- und Depolarisationsstrom (links) und Verlustfaktor (rechts), gemessen zwischen Ober- und Unterspannungswicklung bei 26°C

Das Säulendiagramm in Bild 13 vergleicht den Wassergehalt, wie er von den verschiedenen Verfahren ermittelt wurde. Die Karl Fischer Titration an Papierproben führte zu 2,6 % (KFT) und dient hier als Refe-

renz. Die Analyseergebnisse dielektrischer Diagnosemethoden unterscheiden sich: Zwei Algorithmen besitzen keine Kompensation für Alterungsprodukte (DA1, DA2) und ermitteln 3,8 bzw. 4 %. Der innerhalb dieser Arbeit entwickelte Algorithmus [5] kompensiert leitfähige Alterungsprodukte und ermittelt 2,9 %, was als gute Übereinstimmung mit den Papierproben bezeichnet werden kann.

Bei den Gleichgewichtsverfahren wurde die Wassersättigung direkt vor Ort in einer Ölprobe ermittelt und führt mittels eines neuartigen Gleichgewichtsdiagramms [7] zu 2,5 % Wassergehalt in der Zellulose (RS). Wird jedoch der Wassergehalt im Öl (PPM) auf ein konventionelles Gleichgewichtsdiagramm [9] angewendet, so wird die Zellulosefeuchte mit 6 % drastisch überschätzt. Die Alterung des Isolationssystems macht die Anwendung von Gleichgewichtsdiagrammen, welche für den Neuzustand entwickelt wurden, unmöglich.

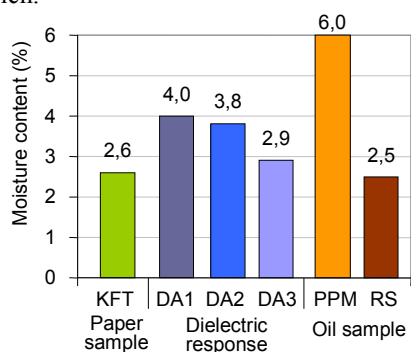


Bild 13: Wassergehalt in der Feststoffisolierung, ermittelt an Papierproben (KFT), durch dielektrische Verfahren (DA1, DA2, DA3) und mittels Gleichgewichtsdiagrammen basierend auf dem Wassergehalt im Öl (PPM) und der Wassersättigung im Öl (RS)

Diese Messung an einem realen Transformator belegt, dass Alterung sowohl bei dielektrischen Diagnosemethoden als auch bei Gleichgewichtsdiagrammen zur Überschätzung des Wassergehalts führt. Sie zeigt weiterhin, dass eine automatische Kompensation leitfähiger Alterungsprodukte für dielektrische Verfahren möglich ist.

5 Zusammenfassung

Dielektrische Diagnoseverfahren ermitteln die Feuchtigkeit in Öl-Papier-Isolierungen durch einen Vergleich der gemessenen dielektrischen Eigenschaften mit einem Modell. Für eine richtige Modellierung ist ein zuverlässiges Modell nötig, was praktisch auftretende Störgrößen kompensieren kann.

Diese Veröffentlichung diskutiert zunächst die Überlagerung der einzelnen dielektrischen Antworten von Pressboard und Öl mit der Grenzflächenpolarisation unter dem Einfluss von Feuchtigkeit, Ölleitfähigkeit, Temperatur und Isolationsgeometrie. Für eine zuverlässige Feuchteanalyse müssen die tiefen Frequenzen,

welche die Eigenschaften des Pressboards widerspiegeln, erfasst werden.

In Laboruntersuchungen wird der Einfluss von Feuchtigkeit, Temperatur, Alterung, Leitfähigkeit des Imprägnieröls und Pressboard-Material untersucht. Da der verwendete Pressboard-Typ unbekannt ist, muss mit einer Toleranz in der Feuchteermittlung von bis zu 0,5 % gerechnet werden. Demgegenüber kann der Einfluss von leitfähigen Alterungsprodukten kompensiert werden, da sie sich bei unterschiedlichen Frequenzen auf die dielektrischen Eigenschaften auswirken.

Ein praktisches Beispiel zeigt die Auswirkung der Alterung auf Verfahren zur Feuchtigkeitsdiagnose und die Funktion der Kompensation leitfähiger Alterungsprodukte.

6 Literatur

- [1] P. Guuinic, J. Aubin: "Cigre's Work on Power Transformers" EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference IX, February 18-21, 2001 New Orleans, Louisiana, USA
- [2] A. Shayegani, E. Gockenbach, H. Borsi, H. Mohseni: "The Influence of Aging on Results of Dielectric Spectroscopy on Impregnated Pressboard" Proceedings of the XIVth ISH, Tsinghua University, Beijing, China, 2005
- [3] C. Ekanayake: "Diagnosis of Moisture in Transformer Insulation", Dissertation, Dep. of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, 2006
- [4] J. Gielniak, K. Walczak "Influence of Oil Parameters and Pressboard Mass Density on Dielectric Response of Oil-Paper Insulating System", APTADM07, Wroclaw, Poland, 2007, p 118-121.
- [5] M. Koch, M. Krüger, S. Tenbohlen: "Moderne Verfahren zur Wasserbestimmung in Leistungstransformatoren" Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008, Leinfelden, Germany, 2008
- [6] Insulation Diagnostics System IDA 200, Internet (04 September 2007) www.gepower.com
- [7] M. Koch, S. Tenbohlen: "Ein neues Verfahren zur Online-Feuchtemessung in Leistungstransformatoren" ETG Fachtagung „Diagnostik elektrotechnischer Betriebsmittel“, Fachbericht 104, Kassel, Germany, 2006
- [8] M. Koch, S. Tenbohlen: "Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum" VDE Fachtagung - Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, ETG Fachbericht 99, S. 171 – 176, Hanau, Germany, 2005
- [9] T. V. Oommen - "Moisture Equilibrium Charts for Transformer Insulation Drying Practice" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, Oct. 1984, pp. 3063-3067.