

Vergleichende Untersuchungen an dielektrischen Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Maik Koch,

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Kurt Feser,

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Deutschland

Kurzfassung

Dielektrische Diagnosemethoden etablieren sich zur Beurteilung des Alterungszustands Öl-Papier-isolierter Leistungstransformatoren. Die drei verbreiteten Verfahren zur dielektrischen Diagnose: Recovery Voltage Method RVM, Polarization and Depolarization Currents PDC und Frequency Domain Spectroscopy FDS wurden an einem großvolumigen Modell mit Öl-Papier-Dielektrikum vergleichend auf ihre Empfindlichkeit gegenüber einer Änderung der Isolationsgeometrie und der Isolationstemperatur untersucht. Dabei ist der Einfluss der Isolationstemperatur auf die Analyseergebnisse wesentlich bedeutender als die Isolationsgeometrie. Weiter werden Einflüsse und Grenzen einer linearen Modellierung der Polarisierung eines Dielektrikums betrachtet.

1 Dielektrische Diagnostik an Leistungstransformatoren

1.1 Notwendigkeit dielektrischer Untersuchungen

Die genaue Beurteilung des Alterungszustands von Leistungstransformatoren ist eine Voraussetzung für den sicheren und auch kostensparenden Betrieb von Übertragungsnetzen für Elektroenergie. Wirtschaftliche Randbedingungen des freien Strommarktes zwingen die Netzbetreiber, die Lebensdauer von Großtransformatoren vollständig auszuschöpfen. Dabei sollte die Zuverlässigkeit der Energieversorgung nicht beeinträchtigt werden.

Ein Beurteilungskriterium für den Alterungszustand der in den meisten Transformatoren verwendeten Öl-Papier-Isolierung bietet deren prozentualer Wassergehalt in der Zellulose (Papier, Pressboard). Feuchtigkeit entsteht durch Depolymerisation der Zellulose, also dem Aufbrechen der Glukoseringe unter Entstehung von Wasser, Gasen (CO, CO₂) und Aldehyd- und Carboxylgruppen (Alkaline und organische Säuren). Die Depolymerisationsgeschwindigkeit ist stark vom Wassergehalt, der Temperatur und der Anwesenheit von Sauerstoff abhängig. Demnach ist Feuchtigkeit ein Produkt der Alterung und beschleunigt die weitere Alterung [1]. Bei einem Leistungstransformator sinkt der Polymerisationsgrad (mittlere Anzahl der Glukoseringe je Zellulosemolekül) von anfangs über 1000 auf etwa 200 und damit auch die mechanische Festigkeit der Isolation. Äußere Kurzschlussströme im Energieverteilungsnetz können dann durch deren dynamische Kraftwirkung die gealterte brüchige Isolierung beschädigen und damit zu inneren Durchschlägen führen.

Neben dem genannten Schädigungsmechanismus kann eine hohe Feuchtigkeit zur Tröpfchenbildung führen und damit die elektrische Durchschlagsfestig-

keit wesentlich vermindern. Der Wassergehalt im Pressboard könnte auch über den Wassergehalt im Öl bestimmt werden. Derartige Konvertierungsdiagramme (z.B. in [2]) gelten aber nur unter Gleichgewichtsbedingungen, welche sich bei Umgebungstemperaturen erst nach sehr langen Zeiträumen einstellen. Zudem macht bei niedrigen Temperaturen und geringem Feuchtgehalt der sehr große Änderungsgradient der Kurven in den Diagrammen eine genaue Ablesung unmöglich.

1.2 Polarisierung am mehrschichtigen Öl-Papier-Dielektrikum

Am mehrschichtigen Öl-Papier-Dielektrikum eines Transformators treten sowohl *material-* als auch *konstruktionsbedingte* Polarisierungseffekte auf. *Material-*abhängige Polarisierungseffekte sind die Orientierungs- oder Dipolpolarisation, die Ionenpolarisation und die Elektronenpolarisation. Im Öl-Papier-Dielektrikum dominieren die dielektrischen Eigenschaften der Zellulose (bzw. Pressboards) die dielektrische Antwort des Gesamtsystems. Diese sind deutlich von deren Feuchtgehalt und anderen Alterungsprodukten abhängig. *Konstruktionsbedingt* beeinflusst vor allem die Grenzflächenpolarisation an den Übergängen zwischen Öl und Zellulose die außen messbaren dielektrischen Eigenschaften. Alle Polarisationsarten sind frequenzabhängig, die Grenzflächenpolarisation wirkt sich vor allem für Frequenzen deutlich unterhalb der Netzfrequenz aus ([3] und [4]). Am Öl-Papier-Dielektrikum tritt immer die Überlagerung verschiedenartiger physikalischer Phänomene auf. Einflüsse haben die unterschiedlichen Polarisationsmechanismen des Papiers, die unterschiedlichen Polarisationsmechanismen des Öls, in einem Schichtdielektrikum die Grenzflächenpolarisation und weiterhin die Gleichstromleitfähigkeit des Öls (besonders bei neuen Ölen zeitlich nicht konstant) und die Gleichstromleitfähigkeit der Zellulose. Der konstruktive Aufbau der

Isolierung verändert das Zusammenwirken der physikalischen Vorgänge. Die Temperatur beeinflusst die Ergebnisse wesentlich.

1.3 Recovery Voltage Method RVM

Die an einem Dielektrikum messbare Polarisation als dielektrische Antwort kann im Zeit- und im Frequenzbereich gemessen werden. Die Recovery Voltage Method RVM (oder Wiederkehrspannungsmethode) als älteste angewandte Diagnosemethode arbeitet im Zeitbereich. Zunächst lädt eine Gleichspannungsquelle U_C das Prüfobjekt für eine bestimmte Ladezeit t_C auf. Danach wird das zu messende Dielektrikum für die halbe Ladezeit entladen. Nach dieser Zeit wird der Maximalwert der Rückkehrspannung gemessen. Die Rückkehrspannung entsteht durch Polarisationserscheinungen, welche elektrische Ladungen zur Folge haben. Als Messgerät wird das Recovery Voltage Meter RVM 5462 der Tettex Instruments Haefely Test AG (Schweiz) angewendet, welches neben der Rückkehrspannung auch den Isolationswiderstand und den Depolarisationsstrom misst. Die zum Messgerät gehörende Software SWRVM2 Version 3.0 nutzt zur Datenanalyse und Bestimmung des Feuchtgehalts ein sog. „Polarisationsspektrum“. Dieses Spektrum entsteht durch eine Serie von Messungen der Rückkehrspannung mit schrittweise erhöhter Ladezeit. Für jede Messsequenz wird das Maximum der Rückkehrspannung und deren Anstieg dU_R/dt aufgezeichnet. Der Maximalwert der Rückkehrspannung $U_{R,max}$ über der Ladezeit t_C im Polarisationspektrum, die „zentrale Zeitkonstante“, soll für den Feuchtgehalt charakteristisch sein. Die Auswertesoftware ermittelt ohne Berücksichtigung geometrischer Besonderheiten des Transformators das Maximum und gibt den Feuchtgehalt an ([5], [6], [7]).

1.4 Polarization and Depolarization Currents PDC

Gemessen werden die Polarisations- und Depolarisationsströme (PDC), die beim Anlegen einer Gleichspannung an ein polarisierbares Dielektrikum und danach bei dessen Entladung fließen (Relaxationsströme, [4]). Der PDC-Analyser 1MOD der Alff Engineering (Schweiz) misst die Polarisations- und Depolarisationsströme und ermöglicht auch eine Messwertanalyse mit der Software PDC-Evaluation V. 3.0. Dazu wird das Öl-Papier-Dielektrikum in einer Auswertesoftware mittels linearer RC-Glieder modelliert. Für diese Nachbildung ist eine genaue Kenntnis der Geometrie der Hauptisolierung notwendig. Am Modell der Isolation des zu analysierenden Transformators werden die Polarisations- und Depolarisationsströme für verschiedene prozentuale Feuchtgehalte im Pressboard errechnet. Dem Bediener obliegt es, die

errechneten PDC mit den gemessenen visuell sowohl bezüglich der anfänglichen Amplitude (Ölleitfähigkeit) als auch bezüglich des Endwerts (Wassergehalt im Pressboard) zu vergleichen. Wassergehalt und Ölleitfähigkeit des am besten mit den Messwerten übereinstimmenden Modells stehen dann für den Wassergehalt und die Ölleitfähigkeit im gemessenen Transformator. Die umfangreiche Software ermöglicht neben der PDC-Analyse auch die Umrechnung in Polarisationspektren und Frequenzbereichsergebnisse.

1.5 Frequency Domain Spectroscopy

Die Frequency Domain Spectroscopy FDS bestimmt die dielektrische Antwort des Öl-Papier-Isolationssystems bei sinusförmiger Erregung in einem breiten Frequenzbereich [8]. Dadurch wird die komplexe Kapazität $C(\omega)$ und der Verlustwinkel $\tan \delta(\omega)$ in Abhängigkeit von der Frequenz ermittelt (z.B. von 1 kHz bis 0,0001 Hz). Programm Electric AB (Schweden) stellt das einzige z.Z. auf dem Markt erhältliche Gerät IDA 200 mit der Auswertesoftware MODS 1.5 her. Zur Datenanalyse findet auch hier ein Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Werten statt. Nach Angabe der geometrischen Parameter der Isolierung als Prozentualwerte passt die Software automatisch Ölleitfähigkeit und Feuchtigkeit eines Modells an die Messwerte an. Grundlage für die Modellwerte sind u.a. Messungen an Pressboard mit bekanntem Feuchtgehalt. Als Ergebnis erhält der Bediener den prozentualen Feuchtgehalt der Zellulose und die Ölleitfähigkeit.

2 Das Pancake Modell

Das „Pancake“ Modell (Name abgeleitet aus dem Englischen von der Form der Wicklungen) ist ein großvolumiger isolierölgefüllter Kessel, in dem verschiedene Aufbauten aus Pressboardbarrieren und Kanalleisten zwischen Pancake-förmigen Wicklungen angeordnet sind (siehe Abbildung 1). Dies ermöglicht die systematische Untersuchung folgender Einflüsse auf die dielektrische Antwort: (1) Geometrie der Öl-Papier-Isolation, (2) Amplitude der Messspannung, (3) Temperatur, (4) Ölleitfähigkeit.

Die Aufbauten aus Pressboardbarrieren und Kanalleisten mit unterschiedlichem Verhältnis von Barrieren zu Öl und Kanalleisten zu Öl bilden die Hauptisolierung verschiedener Transformatoren nach (Tabelle 1).

Bezeichnung (Anschluss)	Öl / Barrieren	Öl / Kanalleisten
CH – B	83 / 17	85 / 15
DG – CH	72 / 28	72 / 28
E – DG	50 / 50	45 / 55
F – E	0 / 100	0 / 100

Tabelle 1: Verhältnisse von Isolieröl zu Pressboard im Pancake Modell

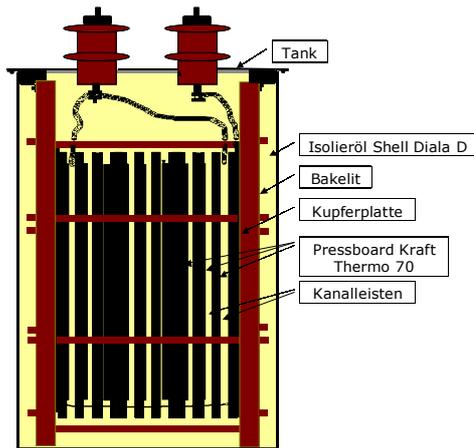


Abbildung 1: Schnittdarstellung des Pancake Modells

3 Messungen bei unterschiedlicher Geometrie

Der Einfluss des geometrischen Aufbaus auf die Ergebnisse der Diagnosemethoden RVM, PDC und FDS wurde untersucht bei einer Isolationstemperatur von 21°C und Messspannungen von weniger als 120 V, die keine nichtlinearen Effekte erwarten lassen. Gewünscht wird ein von der Geometrie der Isolation *unabhängiges* Messergebnis für den Feuchtgehalt in der Zellulose bzw. im Pressboard.

3.1 Messergebnisse

Abbildung 2 zeigt die sog. Polarisationspektren der RVM-Messung mit dem RVM 5462 von Haefely Tetra bei einer Ladespannung von 100 V als maximale Rückkehrspannung $U_{R,max}$ über der Ladezeit t_c .

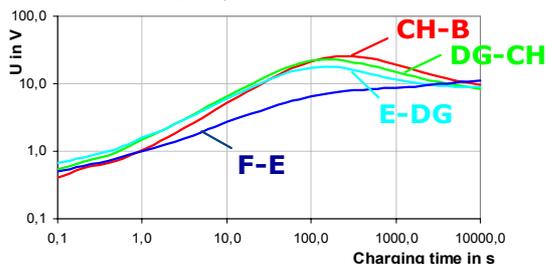


Abbildung 2: Ergebnisse der RVM-Messung bei unterschiedlicher Geometrie und 21°C

Die Messergebnisse weisen eine eher geringe Abhängigkeit von der Geometrie auf. Lediglich die Konfiguration F-E ohne Ölpalt, welche an realen Leistungstransformatoren nicht auftritt, hat einen deutlich anderen Verlauf. Die Analyseergebnisse für den Feuchtgehalt werden für den besseren Vergleich mit den anderen Methoden unter Abschnitt 3.2 dargestellt und diskutiert.

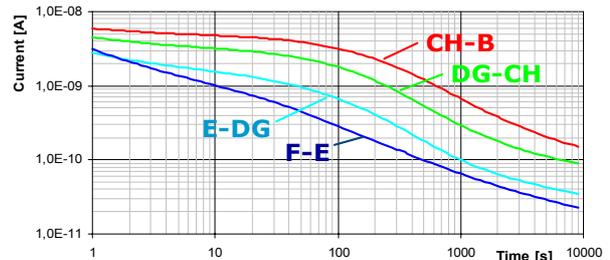


Abbildung 3: Polarisationsströme bei unterschiedlicher Geometrie und 21°C

Der PDC-Analyzer 1MOD ermittelte die Polarisations- und Depolarisationsströme für jeweils 10000 s bei einer Ladespannung von 50 V. Die Messergebnisse nach Abbildung 3 zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom geometrischen Aufbau der Isolierung. Mit steigendem Anteil an Öl in der Isolierung steigen die Amplituden der Polarisationsströme. Dies gilt sowohl für den von der Ölleitfähigkeit dominierten Zeitbereich bis etwa 30 s als auch für die Langzeitwerte bei 10000 s, welche nach üblicher Interpretation [4] die dielektrischen Eigenschaften der Zellulose dominieren. Die Analysesoftware für PDC berücksichtigt vorteilhafter Weise die Geometrie, so dass nicht zwangsläufig der ermittelte Feuchtgehalt beeinflusst wird.

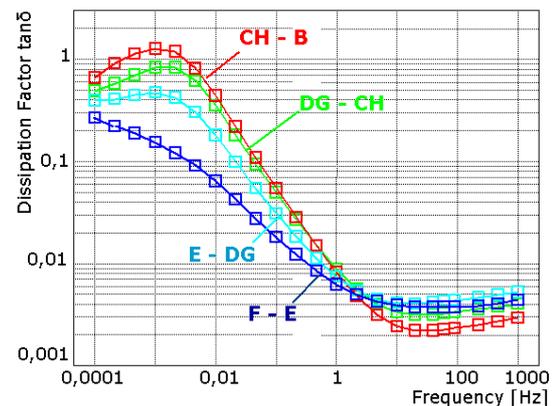


Abbildung 4: Der Verlustwinkel $\tan \delta$ bei unterschiedlicher Geometrie und 21°C

Das Isolationsdiagnosesystem IDA 200 zur Frequenzbereichsmessung stellt eine ganze Reihe von Ergebnissen bereit, von denen in Abbildung 4 zunächst nur der Verlustwinkel $\tan \delta$, gemessen im Frequenzbereich von 1 kHz bis 0,0001 Hz bei $75 V_{RMS}$ dargestellt wird. Die übliche Interpretation der Ergebnisse geht von einem Einfluss der dielektrischen Eigenschaften der Zellulose auf den Frequenzbereich mit geringen Verlusten (hier $f > 10$ Hz) und auf den mit den höchsten Verlusten (hier $f < 0,01$ Hz) aus. Die Neigung (hier bei 0,01 bis 10 Hz) wird hingegen von der Ölleitfähigkeit bestimmt. Die Ergebnisse zeigen deutliche Einflüsse der Geometrie der Öl-Papier-Isolation. Der folgende Abschnitt 3.2 gibt an, ob dadurch auch Einflüsse auf den ermittelten Feuchtgehalt in der Zellulose auftreten.

3.2 Analyse und Diskussion

Der Feuchtgehalt in der Zellulose als wichtiges Alterungskriterium wird bei jeder der Diagnosemethoden bzw. der zugehörigen Messgeräte durch Software errechnet, Ziel ist ein von der Isolationsgeometrie unabhängiger Wert.

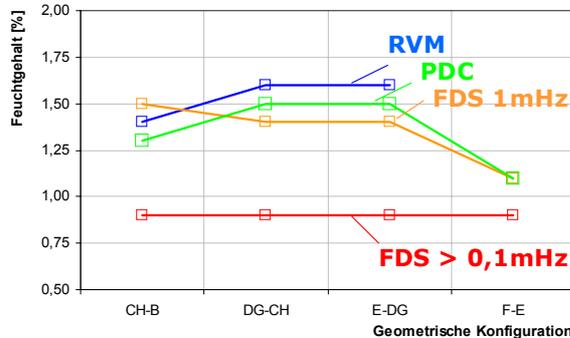


Abbildung 5: Analytisch ermittelter Feuchtgehalt in der Zellulose bei unterschiedlicher Geometrie

Die in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse lassen für die Recovery Voltage Method eine eher geringe Abhängigkeit des ermittelten Feuchtgehalts von der Geometrie des Dielektrikums erkennen. Bei der Konfiguration F-E (100 % Zellulose) trat keine „zentrale Zeitkonstante“ auf, so dass dort kein Ergebnis vorliegt.

Die Analyse der Polarization and Depolarization Currents beinhaltet einen visuellen Vergleich von gemessenen mit errechneten PDC durch den Bediener. Der dadurch entstehende subjektive Einfluss als auch die immer vorhandene Differenz zwischen Mess- und Rechenwerten erschwert die genaue Angabe von Feuchtwerten. Erkennbar ist aber auch hier eine eher geringe Abhängigkeit von der Geometrie.

Bei der Frequency Domain Spectroscopy beeinflusst der gemessene Frequenzbereich die Analyseergebnisse. Werden Messwerte zwischen 1 kHz und 1 mHz zur Analyse genutzt (Messdauer etwa 1,2 h), so ist der ermittelte Feuchtgehalt von der Geometrie abhängig. Bei der Verwendung von Werten im Bereich 1 kHz bis 0,1 mHz (Messdauer etwa 12 h) tritt diese Abhängigkeit nicht mehr auf.

Beim Vergleich der ermittelten Feuchtgehalte der verschiedenen Methoden untereinander fallen bemerkenswerte Unterschiede auf. Die Ergebnisse der Methoden RVM und PDC lassen auf etwa 1,4 % Wasser im festen Isolierstoff schließen. Die Analysesoftware der Methode FDS ermittelt jedoch einen deutlich geringeren Werte von 0,9 %. In Anbetracht des neuen und trockenen Pressboards und Isolieröls des Pancake-Modells erscheint letzteres Ergebnis als plausibler. Es bedingt jedoch Messungen bis zur sehr niedrigen Frequenz von 0,1 mHz, was Zeitbereichsinformationen von bis zu etwa 10000 s entspricht.

4 Messungen bei unterschiedlicher Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die Polarisation des Öl-Papier-Dielektrikums des Pancake Modells und die Messwertanalyse wurde in der Klimakammer der BTU Cottbus untersucht. Die Messungen mit den Methoden RVM, PDC und FDS fanden bei 21, 55 und 78°C statt.

4.1 Messergebnisse

Aus der Vielzahl der Ergebnisse und Effekte können hier nur einige prägnante betrachtet werden.

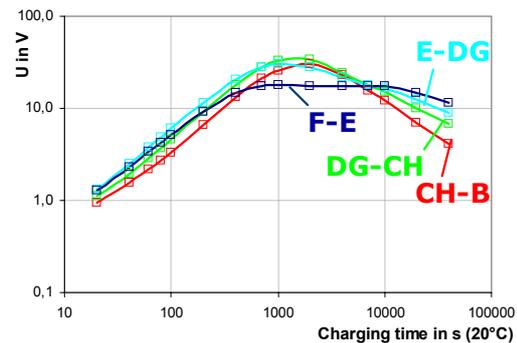


Abbildung 6: Polarisationsspektren der RVM-Messung bei 78°C, normalisiert auf 20°C

Abbildung 6 zeigt die Polarisationsspektren der RVM-Messung bei einer Temperatur von 78°C, durch die Software SWRVM 3.0 normalisiert auf 20°C. Die „zentrale Zeitkonstante“ sämtlicher Polarisationsspektren ist in Richtung größerer Zeitkonstanten, also laut üblicher Interpretation trockenerer Zellulose verschoben (vgl. Abbildung 2). Auch der Verlauf für die Konfiguration F-E (100 % Pressboard) weist jetzt ausgeprägte Maxima auf, wie sie sonst nur bei Geometrien mit Ölspalt auftreten.

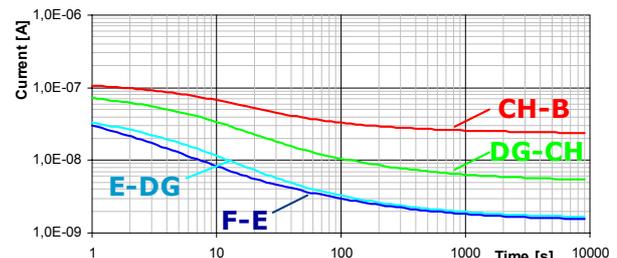


Abbildung 7: Polarisationströme bei 78°C

Auch die Polarisations- und Depolarisationsströme zeigen eine sehr starke Temperaturabhängigkeit. In Abbildung 7 ist eine deutlich erhöhte Amplitude für alle Geometrien erkennbar. Daneben verlaufen jetzt auch die Messwerte der Konfiguration F-E mit 100 % Pressboard qualitativ wie eine mehrschichtige Konfiguration mit Ölspalt. Abbildung 7 beinhaltet keine Temperaturkorrektur, jedoch berücksichtigt die Auswertesoftware die Isolationstemperatur.

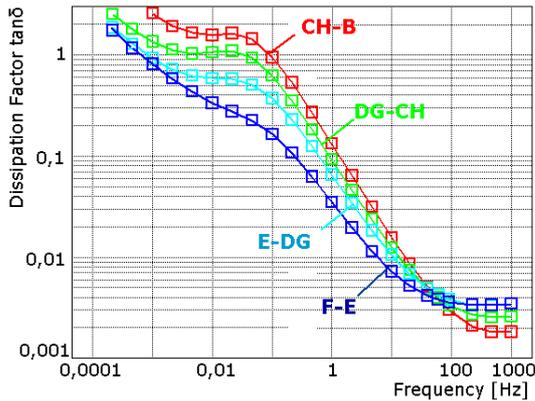


Abbildung 8: Verlustwinkel $\tan \delta$ bei 78°C

Die in Abbildung 8 dargestellten Messwerte der Frequenzbereichsmessung zeigen einen sehr großen Verlustwinkel und eine Verschiebung der Verläufe in Richtung höherer Frequenzen.

4.2 Analyse und Diskussion

Die Ergebnisse der Messwertanalyse zeigt Abbildung 9. Für die PDC ist eine Ermittlung des Feuchtgehalts der bei 78°C aufgezeichneten Messwerte nicht möglich, da deren Temperaturkompensation auf niedrigere Werte beschränkt ist.

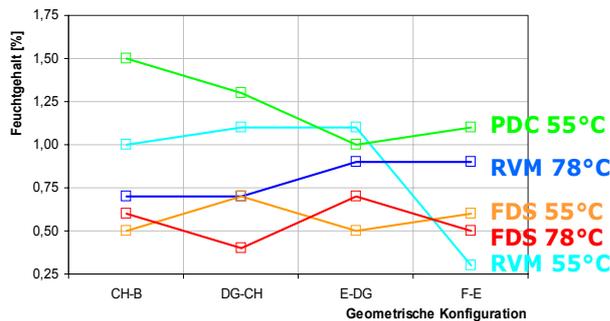


Abbildung 9: Analytisch ermittelter Feuchtgehalt für die verschiedenen Geometrien bei 55 und 78°C

Gegenüber den Messungen bei 21°C (siehe Abbildung 5) ermitteln alle Diagnosemethoden einen deutlich geringeren Wassergehalt im Pressboard. Eine scheinbare Trocknung ist auch tatsächlich zu erwarten, da die Zellulose bei steigender Temperatur Wasser an das Isolieröl abgibt. Auf Grund ihres stark hydrophilen Charakters enthält sie jedoch auch bei 78°C den weitest größten Teil des Wassers im Öl-Papier-Dielektrikum (Wasseranteil in Zellulose etwa 1 %, im Öl nur etwa $40 \cdot 10^{-4}$ %, nach [2]). Deshalb ist die oben dargestellte, von den Analysesoftware ermittelte Änderung nicht realistisch. Vielmehr lässt sie auf mangelhafte Temperaturkompensation oder systematische Fehler schließen.

In diesem Zusammenhang sei auf die konträre Diskussion zur Interpretation der Messergebnisse der Recovery Voltage Method hingewiesen. Die Task Force

15.01.09 der CIGRE bezeichnet in ihrem Abschlussbericht [9] die Ermittlung des Feuchtgehalts im festen Isolierstoff auf Basis der „zentralen Zeitkonstanten“ im Polarisationspektrum als falsch, verantwortlich für die „zentrale Zeitkonstante“ sei vor allem die Ölleitfähigkeit. Die hier präsentierten Ergebnisse bestätigen diese Aussage. Die „zentrale Zeitkonstante“ im Polarisationspektrum spiegelt zwar auch Änderungen des Wassergehalts in der Zellulose wieder, ist aber vor allem von der Ölleitfähigkeit abhängig. Eine Differenzierung beider Einflüsse ist nicht ohne weiteres möglich. In Abschnitt 3.2 wurde die RVM-Analyse als weitgehend unabhängig von der Geometrie des mehrschichtigen Öl-Papier-Dielektrikums bezeichnet. Diese - eigentlich wünschenswerte - Unabhängigkeit gründet sich darin, dass in erster Linie die Ölleitfähigkeit wiedergegeben wird, welche sich ja bei *unterschiedlicher* - aber notwendiger Weise *mehrschichtiger* - Geometrie nicht ändert.

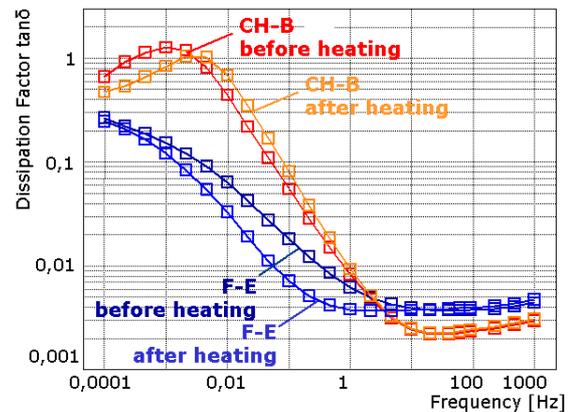


Abbildung 10: Messergebnisse der FDS bei 21°C vor und nach Erwärmung auf 78°C

Die Abbildung 10 zeigt am Beispiel der Frequency Domain Spectroscopy einen weiteren beobachteten Effekt: Die Messungen bei 21°C vor der Erwärmung unterscheiden sich deutlich von denen bei 21°C nach der Erwärmung. Die Ursache ist im gestörten Gleichgewichtszustand der Feuchteverteilung zwischen Öl und Zellulose zu suchen. Das Pancake Modell wurde vor den Temperaturversuchen über drei Jahre unter nur wenig geänderter Temperatur aufbewahrt, so dass entsprechend der in [2] angegebenen Diffusionsgeschwindigkeit für Wasser in ölgetränkter Zellulose ein Gleichgewicht der Feuchteverteilung anzunehmen ist. Die Erwärmung störte diesen; jetzt befindet sich mehr Feuchtigkeit im Öl als beim Gleichgewichtszustand. Die an den Messwerten sichtbare Änderung äußert sich auch in den Analyseergebnissen für den Wassergehalt in der Zellulose: Vor den Temperaturversuchen ermittelte die Analysesoftware MODS einen prozentualen Wasseranteil von 0,9 %, nach der Erwärmung 0,7%. Derartige Beeinflussungen sind auch bei der Offline ausgeführten Messung an Leistungstransformatoren zu erwarten.

5 Modellierung der dielektrischen Antwort

Polarisationsvorgänge an Dielektrika können in erster Näherung durch die Aufladung von Netzwerken aus Widerständen und Kondensatoren nachgebildet werden [4]. Diese *lineare* Modellierung ist jedoch nur mit Einschränkungen gültig: (1) Die Feldstärke über der Isolationsstrecke darf 10 V/mm nicht überschreiten. (2) Die Linearität wird durch die Isolationsgeometrie beeinflusst. (3) Mit steigender Temperatur werden die Polarisationserscheinungen zunehmend nichtlinear.

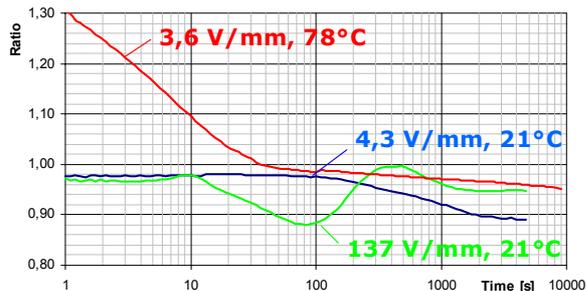


Abbildung 11: Linearität der Polarisationsströme unter dem Einfluss von Spannung und Temperatur

Abbildung 11 stellt den Quotienten (Ratio) aus Polarisationsstrommessungen bei schrittweise erhöhter Spannung an der Anordnung DG-CH am Pancake Modell dar. Ein lineares Verhalten entspricht dabei 1,00. Bei einer Feldstärke über der Isolationsstrecke von 4,3 V/mm und 21°C ist der Quotient tatsächlich nahe 1, damit ist die Annahme linearen Verhaltens berechtigt. Wird die Temperatur jedoch bei gleicher Feldstärke auf 78°C erhöht, so ist kaum noch eine Linearität erkennbar. Durch eine erhöhte Feldstärke (z.B. 137 V/mm) wird ebenfalls der Bereich der Linearität verlassen.

Ein lineares Verhalten des Öl-Papier Dielektrikums ist Voraussetzung für die Modellierung und Feuchtigkeitsanalyse entsprechend Abschnitt 1.4. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um auch die Gesetzmäßigkeiten im nichtlinearen Verhalten des Dielektrikums zu bestimmen und damit eine genauere Messwertanalyse zu ermöglichen.

6 Zusammenfassung

Dielektrische Diagnosemethoden gestatten durch offline durchgeführte Messungen die Beurteilung des Isolations- und Alterungszustandes von Öl-Papier-isolierten Leistungstransformatoren. Eine Reihe von Einflussfaktoren erschwert die Messwertanalyse, z.B. die Isolationsgeometrie und die Temperatur. Beim mehrschichtigen Öl-Papier-Dielektrikum weisen alle Diagnosemethoden RVM, PDC und FDS eine geringe Geometrieabhängigkeit auf, nicht aber im Vergleich zum einschichtigen homogenen Dielektrikum. Der

Einfluss der Isolationstemperatur auf die Analyseergebnisse ist weit größer. Die Analysesoftware MODS zur Methode FDS kompensiert sowohl die Einflüsse durch die Temperatur als auch die durch die Isolationsgeometrie am besten. Für eine zuverlässige Diagnose des Alterungszustandes von Öl-Papier Isolationen ist die Weiterentwicklung der Diagnosemethoden unter Berücksichtigung verschiedener äußerer Einflüsse und den komplexen Wirkungszusammenhängen eines geschichteten Dielektrikums unumgänglich.

7 Literatur

- [1] Gmeiner, P.K.: „Combi-LFH-Trocknung von Leistungstransformatoren im Felde“, Micafil Symposium, Stuttgart, 1996
- [2] Du, Y., M. Zahn, B.C. Lesieutre, A.V. Mamishev, and S.R. Lindgren, “A Review of Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems” IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No. 1, pp. 11-20, January-February 1999
- [3] Zaengl, W. S.: „Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 5, 2003
- [4] Der Houhanessian, Vahe: “Measurement and analysis of dielectric response in oil-paper insulation systems”, Dissertation ETH Zürich, 1998
- [5] E. Nemeth, “Measuring the voltage response, a diagnostic test method of insulation,” presented at 7th ISH, Dresden, 1991
- [6] A.J. Kachler, R. Baehr, W.S. Zaengl, B. Breitenbach, U. Sundermann: „Kritische Anmerkung zur Feuchtigkeitsbestimmung von Transformatoren mit der Recovery- Voltage- Methode“; Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95 (1996)
- [7] Diverse Artikel und Publikationen siehe http://www.haefely.com/measuring_diagnostics/rvm.html am 12.12.2003
- [8] Neimanis, R., Tapan K. Saha, Roland Eriksson, "Determination of Moisture Content in Mass Impregnated Cable Insulation Using Low Frequency Dielectric Spectroscopy", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA, July 16-20, 2000
- [9] CIGRÉ TASK FORCE 15.01.09: Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers, ELECTRA No. 202 – June 2002