

Einflussgrößen und Zuverlässigkeit bei dielektrischen Diagnosemethoden zur Bestimmung des Feuchtegehalts

Dipl.-Ing. Maik Koch,

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen,

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Deutschland

Kurzfassung

Dielektrische Diagnosemethoden etablieren sich zur Beurteilung des Alterungszustands Öl-Papier-isolierter Leistungstransformatoren. Zuverlässigkeit und Eindeutigkeit der Analyseergebnisse verbesserten sich dank Forschung und Anwendererfahrung während der letzten Jahre wesentlich. Dennoch sind sowohl die Messungen selbst als auch deren Analyse mit Unsicherheiten und Fehlern behaftet. In diesem Beitrag werden die Einflüsse durch Isolationsaufbau (Geometrie), Isolationstemperatur, Feuchtgleichgewicht zwischen Öl und Papier als auch weitere Einflussgrößen auf dielektrische Messungen diskutiert. Die chemische Analyseverfahren „Coulometrische Titration nach Karl Fischer“ dient als Vergleichswert. Alle gebräuchlichen dielektrischen Verfahren (Recovery Voltage Method RVM, Polarization and Depolarization Currents PDC und Frequency Domain Spectroscopy FDS) werden untersucht und gegenübergestellt.

1 Dielektrische Diagnostik an Leistungstransformatoren

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.

1.1 Wasser in Transformatoren

Ein Beurteilungskriterium für den Alterungszustand der in den meisten Transformatoren verwendeten Öl-Papier-Isolierung bietet deren prozentualer Wassergehalt in der Zellulose (Papier, Pressboard). Feuchtigkeit dringt über undichte Versiegelungen, während Reparaturarbeiten und durch „Atmung“ in den Kessel ein. Sie entsteht daneben durch Depolymerisation der Zellulose, also dem Aufbrechen der Glukoseringe. 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. Abbildung 1 stellt die relative Geschwindigkeit der Depolymerisation in Abhängigkeit von der Feuchte mit der Temperatur als Parameter dar. Der Wert 1 steht für eine Feuchte von 0,2 % bei 80°C.

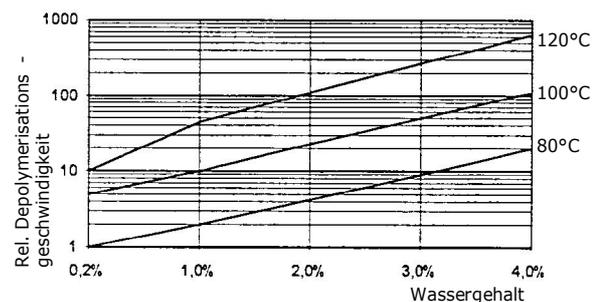


Abbildung 1: Relative Depolymerisationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Feuchte und der Temperatur [1]

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 des Isolationspapiers. 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 Tröpfchen- und Bläschenbildung „Bubbling“ führen und damit die elektrische Durchschlagsfestigkeit wesentlich beeinträchtigen.

1.2 Polarisation am mehrschichtigen Öl-Papier Dielektrikum

Am mehrschichtigen Öl-Papier Dielektrikum eines Transformators treten sowohl *material-* als auch *konstruktionsbedingte* Polarisierungseffekte auf. *Ma-*

terialabhängige Polarisierungseffekte sind die Orientierungs- oder Dipolpolarisation, die Ionenpolarisation und die Elektronenpolarisation. Öl und Zellulose unterscheiden sich in ihrer dielektrischen Antwort wesentlich, der Einfluss des Öls ist nur geringfügig, die dielektrischen Eigenschaften der Zellulose (bzw. Pressboards) dominieren die dielektrische Antwort. Letztere sind deutlich von dessen Feuchtgehalt und anderen Alterungsprodukten abhängig. *Konstruktionsbedingt* beeinflusst vor allem die Grenzflächenpolarisation an den Übergängen zwischen Öl und Zellulose (Pressboard) die außen messbaren dielektrischen Eigenschaften.

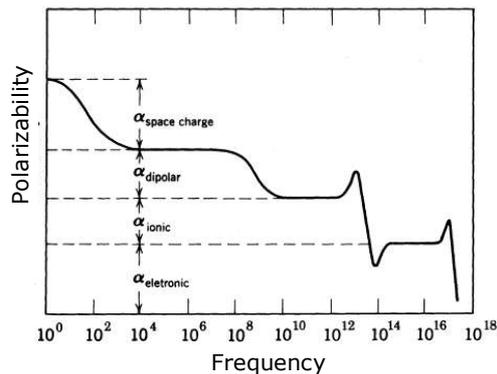


Abbildung 2: Polarisationsmechanismen in Abhängigkeit von der Frequenz

Gemäß Abbildung 2 sind die Polarisationsarten frequenzabhängig, die Grenzflächenpolarisation wirkt sich vor allem für Frequenzen deutlich unterhalb der Netzfrequenz aus (ausführliche Darlegungen in [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 (Pressboard). Der konstruktive Aufbau der Isolierung verändert das Zusammenwirken der genannten physikalischen Vorgänge. Die Temperatur beeinflusst die Ergebnisse wesentlich. Die folgende Untersuchung betrachtet die Auswirkungen von Konstruktion und Temperatur.

1.3 Mess- und Analyseverfahren

Recovery Voltage Method RVM

Die Recovery Voltage Method RVM (oder Wiederkehrspannungsmethode) als älteste angewandte Methode arbeitet im Zeitbereich und spiegelt langsame Polarisationsprozesse wieder. Zunächst lädt

eine Gleichspannungsquelle U_c das Prüfobjekt für eine bestimmte Ladezeit t_c auf. Danach wird das zu messende Dielektrikum kurzgeschlossen (üblicherweise für die halbe Ladezeit). Nach dieser Zeit wird der Kurzschluss entfernt und der Maximalwert der Rückkehrspannung gemessen. Die Rückkehrspannung entsteht durch Polarisationserscheinungen, welche elektrische Ladungen zur Folge haben.

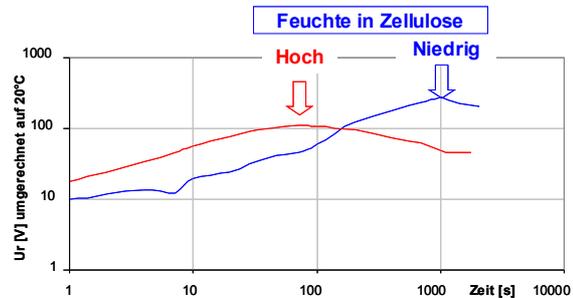


Abbildung 3: Analyse der Feuchtigkeit bei der RV-Methode anhand des Maximalwerts im Polarisationspektrum

Zur Auswertung nutzt die Software SWRVM2 Version 3.0 ein „Polarisationspektrum“. 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. Im Polarisationspektrum wird die Rückkehrspannung über der Ladezeit abgebildet. Den Feuchtgehalt des Feststoffs in der Öl-Papier-Isolierung bestimmt eine einfache Auswertemethode am Polarisationspektrum. Der Maximalwert der Rückkehrspannung $U_{R,max}$ über der Ladezeit t_c soll für den Feuchtgehalt charakteristisch sein (siehe Abbildung 3). Die Auswertesoftware ermittelt das Maximum und gibt den Feuchtgehalt an. Geometrische Besonderheiten des Transformators lassen sich nicht berücksichtigen. Die Interpretation der Messergebnisse führte zu einer Reihe von Widersprüchen, welche sich in der teilweise kontroversen Diskussion der Fachliteratur äußern [6].

Als Messgerät wird in dieser Untersuchung das Recovery Voltage Meter RVM 5462 der Tettex Instruments Haefely Test AG angewendet. Neben der Rückkehrspannung kann auch der Isolationswiderstand und der Depolarisationsstrom gemessen werden (weiterführende Literatur in [5], [6], [7]).

1.3.1 Polarisation and Depolarisation Currents PDC

Gemessen werden die Polarisations- und Depolarisationsströme (PDC), die beim Anlegen einer Gleichspannung an ein polarisierbares Dielektrikum und danach bei dessen Entladung

fließen. Sie werden auch als Relaxationsströme bezeichnet [4].

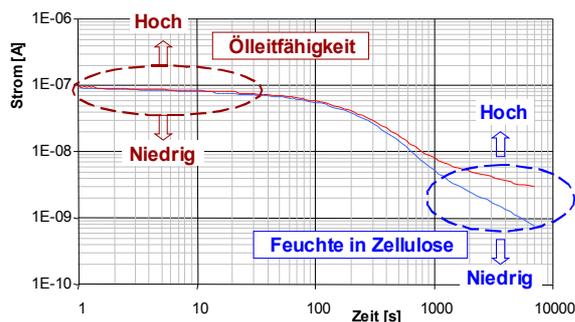


Abbildung 4: Unterscheidbare Einflüsse von Ölleitfähigkeit und Feuchtigkeit in der Zellulose bei der PDC-Methode

Der hier angewandte PDC-Analyser 1MOD der Alff Engineering misst die Polarisations- und Depolarisationsströme und ermöglicht auch eine Messwertanalyse. 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. Dann werden an diesem Modell 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. Abbildung 4 zeigt den Einfluss der Feuchte in der Zellulose und im Unterschied dazu den der Ölleitfähigkeit entsprechend des üblichen Interpretationsschemas. Die umfangreiche Software ermöglicht neben der PDC-Analyse auch die Umrechnung in Polarisationspektren und Ergebnisse für den Frequenzbereich.

1.3.2 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 verwendete Messgerät IDA 200 mit der Auswertesoftware MODS 1.5 her.

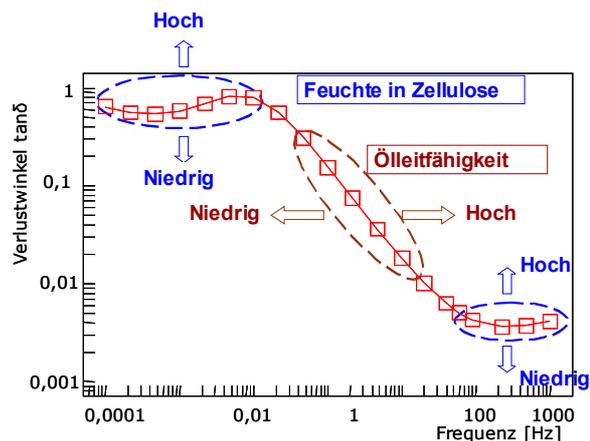


Abbildung 5: Unterscheidbare Einflüsse von Ölleitfähigkeit und Feuchtigkeit in der Zellulose bei der FDS-Methode

Zur Datenanalyse findet auch hier ein Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Werten statt. Nach Angabe der geometrischen Parameter der Isolierung als Prozentualwerte (siehe Abbildung 11) findet hier eine automatische Anpassung von Ölleitfähigkeit und Feuchtigkeit eines Modells an die Messwerte statt („Kuvenfitting“). Grundlage für die Modellwerte sind u.a. Messungen an Pressboard mit bekanntem Feuchtgehalt. Als Ergebnis erhält der Bediener den prozentualen Feuchtgehalt in der Zellulose als auch die Ölleitfähigkeit. Die Einflüsse durch die Ölleitfähigkeit und die Feuchte der Zellulose sind wie in Abbildung 5 dargestellt zu unterscheiden.

2 Einflüsse auf dielektrische Messungen

Forschung und Entwicklung verbesserten die dielektrischen Diagnosemethoden während der letzten Jahre wesentlich. Dennoch treten eine Reihe von Einfluss- und Störgrößen auf, welche im folgenden betrachtet werden.

(1) Isolationstemperatur

Den stärksten Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften verursacht die Isolationstemperatur. Damit verbundene Probleme sind:

- Ihre Messung in der Hauptisolierung; die am Transformator angebrachten Thermometer zeigen nur die obere (evt. untere) Öltemperatur.
- Die Wärmeabfuhr durch das Öl kann nach Abbildung 6 zu einer vertikalen Temperaturdifferenz von bis zu 25 K führen. Damit stellen sich entsprechend der Temperaturzonen des Transformators auch „Feuchte-zonen“ ein.
- Wegen der nach dem Transformatorbetrieb absinkenden Temperatur ändert sich die Leit-

fähigkeit als auch die Polarisationsmechanismen im Dielektrikum.

Abschnitt 5 zeigt eine systematische Untersuchung des Einflusses auf die Methoden RVM, PDC und FDS.

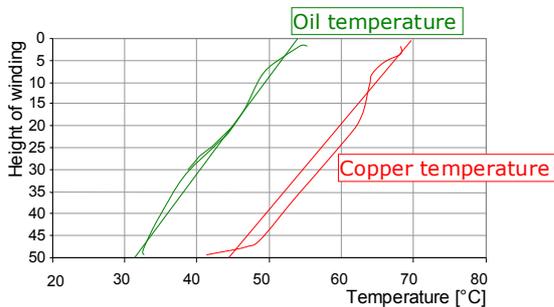


Abbildung 6: Gemessene vertikale Temperaturverteilung an einer Wicklung mit natürlicher Kühlung

(2) Migrationsprozesse

Da die Wasseraufnahmefähigkeit insbesondere von Öl stark temperaturabhängig ist, stellen sich abhängig von der Temperatur Gleichgewichtszustände zwischen der Feuchte im Öl und der in der Zellulose ein. Die Zeitkonstante dieser Prozesse ist sehr groß, z.B. benötigt Feuchtigkeit 14 d, um durch 1 mm ölgetränktes Pressboard zu migrieren [2]. Onsite-Messungen an Leistungstransformatoren finden i.a. während laufender Migrationsprozesse statt. Deren Einfluss auf dielektrische Messungen ist erheblich (siehe Abbildung 22), jedoch bisher nicht quantifiziert.

(3) Eigenschaften der Ölleitfähigkeit

Abhängig von der Alterung, der Ionenmobilität und der elektrischen Feldstärke sinkt die Ölleitfähigkeit nichtlinear wie in Abbildung 7 dargestellt. Das führt zu einem nichtlinearen und damit kaum modellierbaren Verhalten mehrschichtiger Öl-Papier-Isolationen.

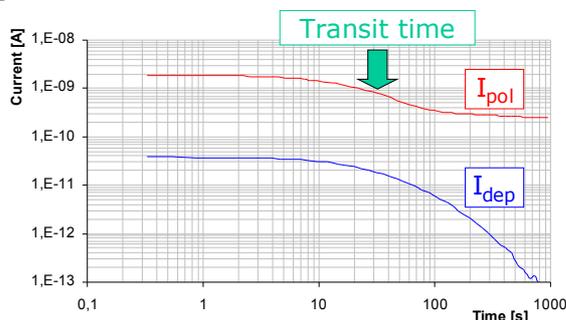


Abbildung 7: "Transitzeit" bei sich verringernder Ölleitfähigkeit

(4) Nicht bekannte Strompfade

Der während dielektrischer Messungen fließende Strom kann Wege nehmen, welche ausschließlich im Öl verlaufen. Wegen der wesentlich höheren

Leitfähigkeit von Öl gegenüber der von Pressboard wird das Messergebnis verfälscht.

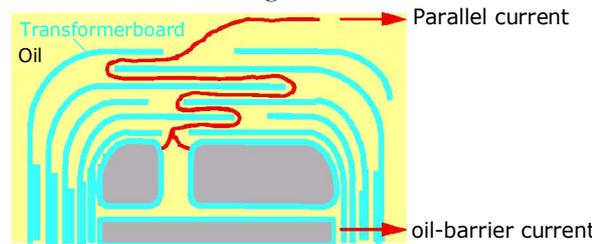


Abbildung 8: Strompfade in einer mehrschichtigen Isolation [11]

(5) Temperaturkompensation in der Analysesoftware

Der Einfluss der Isolationstemperatur auf die Analyseergebnisse dielektrischer Verfahren muss kompensierbar sein. Im Abschnitt 5.2 wird die Temperaturkompensation der RVM, PDC und FDS überprüft.

(6) Interpretation der Messdaten

Das Analyseschema muss eine Unterscheidung verschiedener Einflüsse, besonders der der Ölleitfähigkeit von der der Feuchte in der Zellulose erlauben. Für die Methoden PDC und FDS ist das entsprechend Abbildung 4 und Abbildung 5 möglich, nicht jedoch für die RVM (Abbildung 3). Die CIGRE Task Force 15.01.09 berichtete bereits von verschiedenen kaum unterscheidbaren Einflüssen auf das „Polarisationsspektrum“. Die „zentrale Zeitkonstante“ im Polarisationspektrum spiegelt zwar auch Änderungen des Wassergehalts in der Zellulose wieder, aber auch die Ölleitfähigkeit. Eine Differenzierung beider Einflüsse ist nicht ohne weiteres möglich.

(7) Verifikation der Analyseergebnisse

Die coulometrische Titration nach Karl Fischer gilt als Maßstab für die dielektrischen Verfahren oder für Feuchtebestimmung im Allgemeinen. Dennoch treten auch hier ein Beschränkungen und Einflussgrößen auf:

- Bei indirekter Titration ist das Titrationsergebnis von der angewandten Ausheiztemperatur abhängig. [10] empfiehlt für Pressboard 190-220°C statt der in der IEC 60814 angegebenen Temperatur von 130-140°C. Mit steigender Temperatur wird nach Abbildung 9 mehr Wasser freigesetzt.
- Additive des Öls oder Alterungsprodukte könnten den elektro-chemischen Titrationsprozess beeinflussen [10].
- Bei der Vorbehandlung der Proben für eine Titration kann Wasser aus der Atmosphäre eindringen. Dadurch entsteht systematisch ein positiver Fehler.

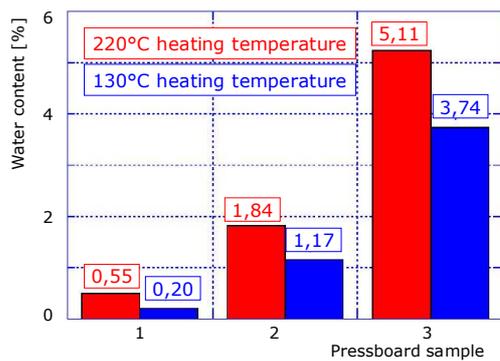


Abbildung 9: Analyseergebnisse nach Karl Fischer bei unterschiedlicher Ausheiztemperatur [10]

(8) Messzeit

Feuchtigkeit in der Zellulose wirkt sich vor allem auf die Messwerte nach langer Zeit bzw. bei niedriger Frequenz aus. Die Zeit für Onsite-Messungen ist jedoch immer beschränkt, weshalb eine möglichst kurz dauernde Messung wünschenswert ist. Der nötige Zeit für auswertbare Messergebnisse hängt vom Alterungszustand, der Isolationstemperatur und der dielektrischen Methode ab. Ein einfacher Vergleich: Die Messzeit für Zeitbereichsinformationen von 2000 s beträgt für die RVM 3,5-4,5 h, für die PDC 1,2 h und für FDS 2-2,5 h.

(9) Vergleich mit Ölproben

Der Wassergehalt im Pressboard könnte auch über den Wassergehalt im Öl bestimmt werden. Derartige Konvertierungsdiagramme (z.B. in [2]) sind aber einer Reihe von Unsicherheiten und systematischen Fehlern unterworfen:

- Die Probenentnahme verursacht eine nicht einschätzbare Streuung der Ergebnisse.
- Die Diagramme gelten nur unter Gleichgewichtsbedingungen, welche sich bei Umgebungstemperaturen erst nach sehr langen Zeiträumen einstellen.
- Der bei niedrigen Temperaturen und geringem Feuchtgehalt sehr große Änderungsgradient der Kurven macht eine genaue Ablesung unmöglich.
- Die Feuchtigkeits- und temperaturverteilung im Transformator ist ungleichmäßig.
- Die Diagramme sind nur für das spezifische Öl und Papier gültig, an welchem sie erstellt wurden. Besonders bei gealtertem Öl und Papier ist wegen der dann höheren Wasseraufnahmefähigkeit mit einer erheblichen Abweichung zu rechnen, welche eine Verwendung dieser Diagramme ausschließt.

3 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 10). Die systematische Untersuchung folgender Einflüsse ist möglich: (1) Aufbau der Öl-Papier Isolation, (2) Isolationstemperatur, (3) Amplitude der Messspannung, (4) Ölleitfähigkeit.

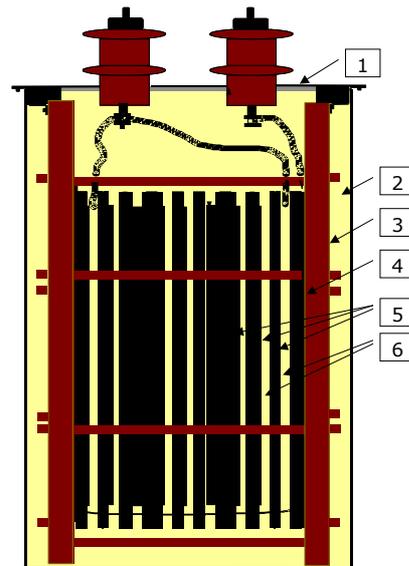


Abbildung 10: Schnittdarstellung des Pancake Modells: 1 – Tank, 2 – Isolieröl Shell Diala D, 3 – Bakelit, 4 – Kupferplatte, 5 – Pressboard Kraft Thermo 70, 6 – Kanalleisten

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).

Tabelle 1: Verhältnisse von Isolieröl zu Pressboard im Pancake Modell

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

Die folgende Abbildung 11 zeigt die Vereinfachung einer mehrschichtigen Öl-Papier Isolation zu einem durch prozentuale Verhältnisse beschreibbaren Modell mit gleichen dielektrischen Eigenschaften.

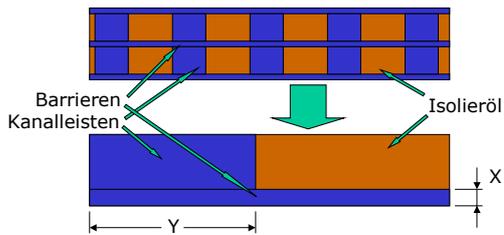


Abbildung 11: Vereinfachung einer Hauptisolierung für prozentuale Verhältnisse von Zellulose und Öl

4 Messungen bei unterschiedlicher Geometrie

Der Einfluss des geometrischen Aufbaus auf die Ergebnisse der Diagnosemethoden RVM, PDC und FDS wurde untersucht bei einer Temperatur von 21°C und Messspannungen von weniger als 200 V, die keine nichtlinearen Effekte erwarten lassen. Gewünscht wird ein von der Geometrie der Isolation *unabhängiges* Messergebnis für den Feuchtgehalt in der Zellulose bzw. Pressboard.

4.1 Messergebnisse

Abbildung 12 zeigt die sog. Polarisationspektren der RVM-Messung mit dem RVM 5462 von Haeffely Tettex bei einer Ladespannung von 100 V als maximale Rückkehrspannung $U_{R,max}$ über der Ladezeit t_c .

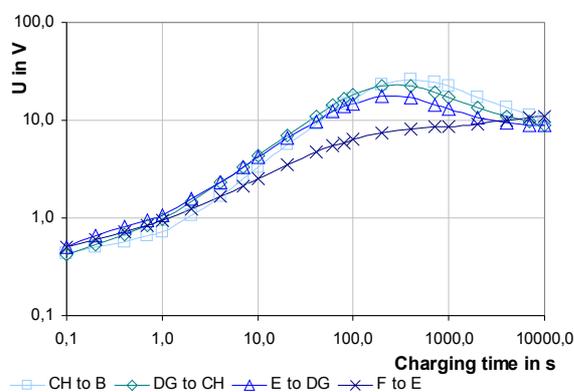


Abbildung 12: Ergebnisse der RVM-Messung bei unterschiedlicher Geometrie und 21°C

Die Messergebnisse weisen eine eher geringe Abhängigkeit von der Geometrie auf. Lediglich für die Konfiguration ohne Ölpalt F – E, welche an realen Leistungstransformatoren nicht auftritt, tritt eine deutliche Änderung auf. Die Ergebnisse werden für den besseren Vergleich mit den anderen Methoden unter Abschnitt 4.2 dargestellt und diskutiert.

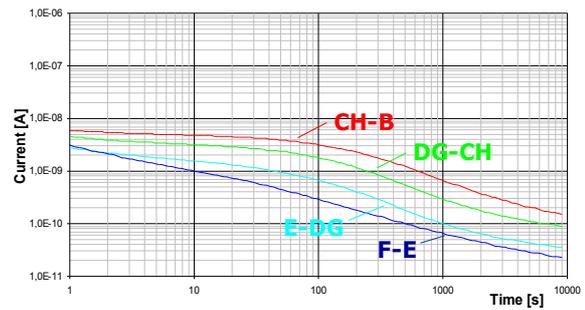


Abbildung 13: Polarisations- und Depolarisationsströme bei unterschiedlicher Geometrie und 21°C

Der PDC-Analyser 1MOD ermittelte die Polarisations- und Depolarisationsströme für jeweils 10000 s bei einer Ladespannung von 50 V. Die Messergebnisse nach Abbildung 13 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 Öl-leitfähigkeit 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 Auswirkungen auf den ermittelten Feuchtgehalt zu erwarten sind.

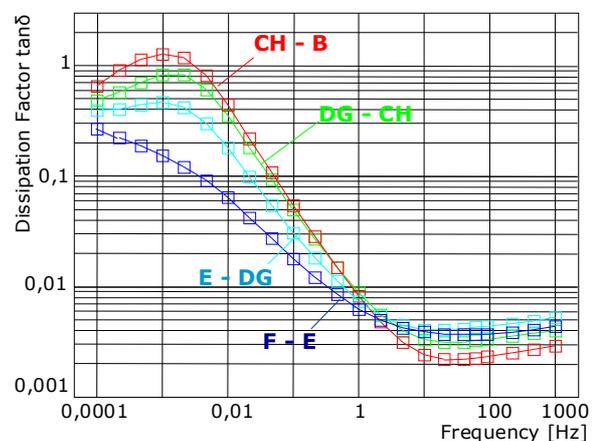


Abbildung 14: Der Verlustwinkel $\tan \delta$ bei unterschiedlicher Geometrie und 21°C

Das Isolationsdiagnosesystem IDA 200 stellt eine ganze Reihe von Ergebnissen bereit, von denen in Abbildung 14 zunächst nur der Verlustwinkel $\tan \delta$, gemessen im Frequenzbereich von 1 kHz bis 0,0001 Hz bei 75 V_{RMS} dargestellt wird. Die Ergebnisse zeigen deutliche Einflüsse der Geometrie der Öl-Papier Isolation. Der folgende Abschnitt 4.2 gibt an, ob dadurch auch Einflüsse auf den ermittelten Feuchtgehalt in der Zellulose auftreten.

4.2 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 unabhängiges Ergebnis.

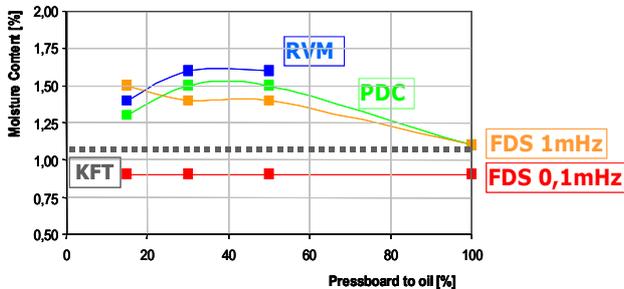


Abbildung 15: Analytisch ermittelter Feuchtgehalt in der Zellulose bei unterschiedlicher Geometrie

In Abbildung 15 zeigt die vertikale Achse den mit der Software ermittelten Feuchtgehalt im Papier/Pressboard, die horizontale Achse das Verhältnis von Zellulose zu Öl, also die Geometrie des Dielektrikums, wobei als Parameter die Temperatur des Dielektrikums dient. Die grau gestrichelte Linie „KFT“ ist das Ergebnis einer Messung der Papierfeuchte mit Hilfe der chemischen Analyse nach Karl Fischer. Deren Ergebnis beträgt 1,1 % Feuchte im Papier/Pressboard und ist allerdings ebenfalls fehlerbehaftet. Die Verfahrensweise während der Probenaufbereitung als auch die fragliche Heiztemperatur bei indirekter Titration lassen eine Toleranz von $\pm 0,15$ % entstehen. Jedoch dient dieser Feuchtwert mindestens als Anhaltspunkt für die dielektrischen Verfahren. Die in Abbildung 15 dargestellten Ergebnisse lassen für die Recovery Voltage Methode 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 Polarisation and Depolarization Currents beinhaltet einen visuellen Vergleich von gemessenen mit errechneten PDC durch den Bediener. Der dadurch entstehende subjektive Einfluss als auch die kaum auftretende abweichungsfreie Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenwerten erschwert die genaue Angabe von Feuchtwerten. Erkennbar ist auch hier eine eher geringe Abhängigkeit von der Geometrie. Bei den Ergebnissen der Frequency Domain Spectroscopy tritt ein deutlicher Einfluss des gemessenen Frequenzbereichs auf. Werden Ergebnisse 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 Ergebnissen 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 1,5 % Wasser im festen Isolierstoff schließen. Die Analysesoftware der Methode FDS ermittelt jedoch einen deutlich geringeren Werte von 0,9 %.

5 Messungen bei unterschiedlicher Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die Polarisation des Öl-Papier Dielektrikums des Pancake Modells 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. Die Auswerteprogramme sämtlicher Methoden ermöglichen eine Temperaturkorrektur, deren Zuverlässigkeit geprüft wird.

5.1 Messergebnisse

Aus der Vielzahl der Ergebnisse und beobachteten Effekte können hier nur einige prägnante dargestellt werden. Abbildung 16 zeigt die Polarisationspektren der RVM-Messung bei einer Temperatur von 78°C, durch die Software SWRVM 3.0 normalisiert auf 20°C.

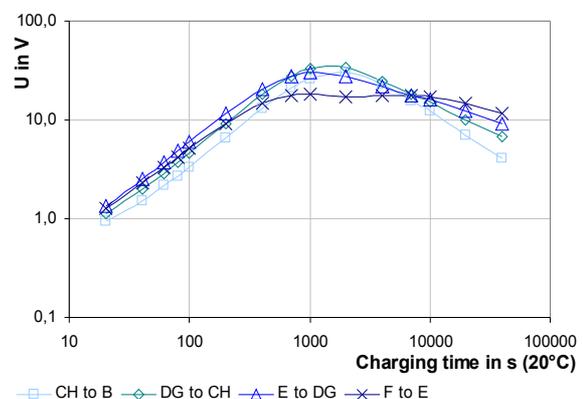


Abbildung 16: Polarisationspektren der RVM-Messung bei 78°C normalisiert auf 20°C

Die „zentrale Zeitkonstante“ sämtlicher Polarisationspektren ist in Richtung größerer Zeitkonstanten, also laut üblicher Interpretation trockenerem Pressboard verschoben (vgl. Abbildung 12). Auch der Verlauf für die Konfiguration F-E (100 % Pressboard) weist jetzt ausgeprägte Maxima auf, wie sie sonst nur bei Geometrien mit Ölspalt auftreten.

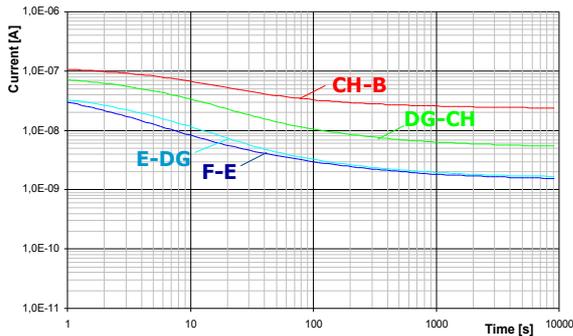


Abbildung 17: Gemessene Polarisationsströme bei 78°C

Auch die Polarisations- und Depolarisationsströme zeigen eine sehr starke Temperaturabhängigkeit. In Abbildung 17 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 Ölspace. Abbildung 17 beinhaltet keine Temperaturkorrektur, jedoch berücksichtigt die Auswertesoftware die Messtemperatur.

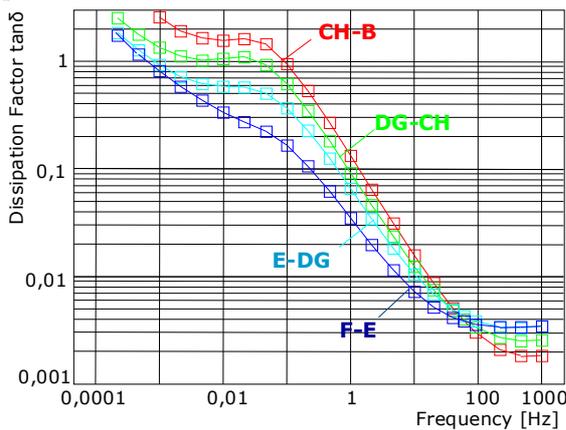


Abbildung 18: Verlustwinkel $\tan \delta$ bei 78°C

Die in Abbildung 18 dargestellten Messwerte zeigen sehr hohe Verluste und eine Verschiebung der Verläufe in Richtung höherer Frequenzen.

5.2 Analyse und Diskussion

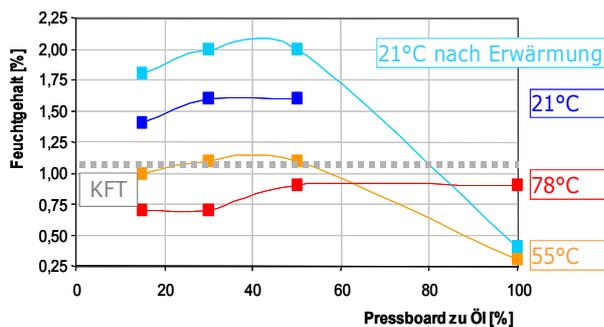


Abbildung 19: Analyseergebnisse der RVM für verschiedene Isolationsgeometrien mit der Temperatur als Parameter

Die in Abbildung 19 gezeigten Ergebnisse der Recovery Voltage Method mit der Software RVM 2 V.3.0 zeigen eine starke Anfälligkeit gegenüber der Isolationstemperatur als auch gegenüber dem Isolationsaufbau. Bemerkenswert sind auch die völlig unterschiedlichen Ergebnisse bei einer Temperatur von 21°C vor und nach dem Erwärmungsprozess. Diese können nur mit noch ablaufenden Migrationserscheinungen von Feuchte im Öl zu Feuchte in der Zellulose erklärt werden.

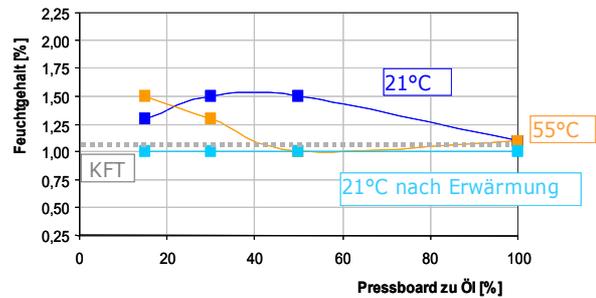


Abbildung 20: Analyseergebnisse der PDC-Software

Abbildung 20 zeigt an den Ergebnissen der PDC-Methode einen vergleichsweise geringen Einfluss der Isolationstemperatur. Für die Temperatur 78°C war keine Messwertanalyse möglich, da die Temperaturkompensation auf geringere Werte beschränkt ist.

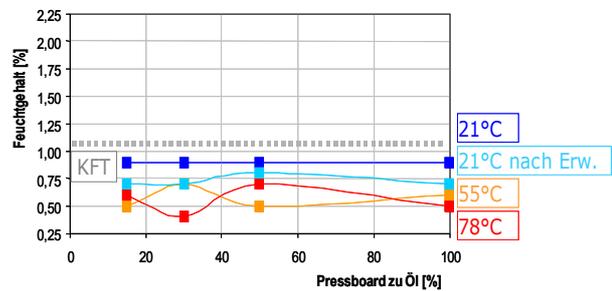


Abbildung 21: Sehr gute Kompensation der Isolationsgeometrie bei den Analyseergebnissen der Software Mods 1.5 für die FDS-Methode

Die Analyse der Frequency Domain Spectroscopy FDS in Abbildung 21 zeigt die vergleichsweise beste Kompensation der Isolationsgeometrie. Für steigende Temperaturen allerdings sinkt der ermittelte Feuchtgehalt deutlich, was der physikalischen Realität nicht entspricht. Gegenüber den Messungen bei 21°C (siehe Abbildung 15) 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 weitaus größten Teil des Wassers im Öl-Papier Dielektrikum, da die Wasseraufnahmefähigkeit von Öl zu der von Zellulose

nach [2] etwa 1:2000 beträgt. Deshalb ist die oben dargestellte, von den Analysesoftware ermittelte Änderung nicht realistisch. Vielmehr lässt sie auf mangelhafte Temperaturkompensation oder systematische Fehler schließen.

5.3 Migration und dielektrische Messungen

Die Abbildung 22 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 Diffusionsgeschwindigkeiten ein Gleichgewicht der Feuchteverteilung anzunehmen ist. Die Erwärmung störte diesen; jetzt befindet sich mehr Feuchtigkeit im Öl als im 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 Messungen an Leistungstransformatoren zu erwarten.

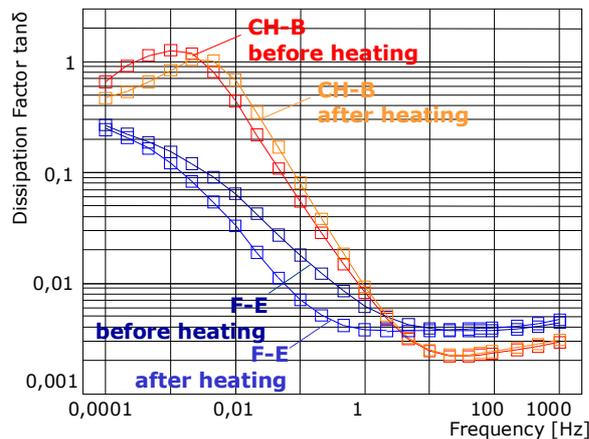


Abbildung 22: Messergebnisse der FDS bei 21°C vor und nach Erwärmung auf 78°C

6 Zusammenfassung

Dielektrische Diagnosemethoden gestatten durch offline durchgeführte Messungen die Beurteilung des Isolations- und Alterungszustandes von Öl-Papier-isolierten Leistungstransformatoren. Ihre Analyseergebnisse sind durchaus verheißungsvoll verglichen mit der althergebrachten Methode, über

eine Ölprobe die Feuchtigkeit im festen Isolierstoff abzuleiten. Dennoch erschwert eine Reihe von Einflussfaktoren die Messwertanalyse, z.B. die Isolationsgeometrie und die -temperatur. Beim systematischen Vergleich der Analysemethoden RVM, PDC und FDS verdeutlichen sich spezifische Schwächen und Stärken. Für eine zuverlässige Diagnose des Alterungszustandes von Öl-Papier-Isolationen findet die Weiterentwicklung der Diagnosemethoden unter Berücksichtigung verschiedener äußerer Einflüsse und den komplexen Wirkungszusammenhängen eines geschichteten Dielektrikums statt.

7 Literatur

- [1] Gmeiner, P.K.: „Combi-LFH-Trocknung von Leistungstransformatoren im Felde“, Micafil Symposium Werterhaltung von Isolationssystemen in Transformatoren, Schaltanlagen und Kabeln, Stuttgart, 1996
- [2] Du, Y., Zahn, M. et. al “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: Theoretical Considerations”, 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, published in ELECTRA No. 202 – June 2002

- [10] O. Kleboth-Lugova, B. Buerschaper, T. Leibfried: „Feuchtebestimmung in Isoliermedien - ein Erfahrungsbericht“ ETG Fachtagung Diagnostik Köln 2004
- [11] Kuchler, A.; Leibfried, T.: „Beruecksichtigung geometrischer und parasitaerer Einfluesse bei der Bestimmung des Wassergehalts in Oel-Papier Isolationen durch dielektrische Diagnose“, ETG Fachtagung Diagnostik Cologne 2004