

FDS-Messungen an Leistungstransformatoren bei höheren Frequenzen – ausschließlich dielektrisches Verhalten?

Michael Jaya, Bastian Herbst, Prof. Thomas Leibfried,
Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Deutschland

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der dielektrischen FDS-Messung (Frequency-Domain-Spectroscopy) an Transformatorisolationstoffen bei höheren Frequenzen vorgestellt. Bei der bisherigen Erfassung der komplexen Kapazität im Frequenzbereich wurde meistens die Grenze von $f = 1 \text{ kHz}$ nicht überschritten. Mittels der FDS Messmethode ist es jedoch möglich, das dielektrische Verhalten von Isolierstoffen bis in den höheren kHz-Bereich aufzuzeichnen. In diesem Beitrag wird gezeigt, welche Effekte im höheren Frequenzbereich auftreten. Dazu eignen sich nicht nur FDS-, sondern auch FRA (Frequency Response Analysis)-Messgeräte, da diese bei höheren Frequenzen messen können. Die neuen Erkenntnisse zeigen, dass ab einem bestimmten Frequenzbereich die Information der Verlustfaktorkurve nicht mehr rein dielektrisch ist. Aufgrund dessen stellt sich die Frage, bis zu welcher Frequenzgrenze die Erfassung des dielektrischen Verhaltens der Transformatorisolation für eine repräsentative Beurteilung des Alterungszustandes ausreichend ist.

Do FDS-Measurements on transformers at higher frequencies exhibit purely dielectric behaviour?

FDS-Measurements were carried out on transformer insulation at higher frequencies than the usual $f_{\max} = 1 \text{ kHz}$ using both FDS- as well as FRA-Equipment. The results show that above a certain frequency range the measured response is not purely dielectric in nature. The question now is where the frequency limit should be set so that purely dielectric behaviour is acquired for the assessment of moisture content and aging in the insulation.

1 Dielektrische Diagnose an der Transformatorisolation

Zu den aufwändigsten und teuersten Betriebsmitteln eines Stromnetzes gehören sicherlich die Transformatoren. Eine hohe Verfügbarkeit dieser Betriebsmittel ist daher von enormer Wichtigkeit. Die Auswirkungen von Feuchtigkeit, Temperatur und anderen Alterungsmechanismen reduzieren die dielektrische und mechanische Festigkeit der Isoliermaterialien.

Zur Detektion dieser Alterungserscheinungen eignen sich dielektrische Diagnoseverfahren wie die FDS und die PDC (Polarization and Depolarization Current Analysis). Der Frequenzbereich für die Bestimmung des Verlustfaktors $\tan \delta$ ist nicht fest definiert und richtet sich nach Art der Isolierung, jedoch fand die Erfassung des dielektrischen Verlustfaktors von Transformatoren im Frequenzbereich bisher hauptsächlich zwischen $100 \mu\text{Hz}$ und 1 kHz statt (Bild 1) [1].

Im Allgemeinen wirkt sich der Einfluss der Feuchtigkeit im niederfrequenten Messbereich stärker aus als im hochfrequenten. Mit steigender Feuchtigkeit, Temperatur oder leitfähigen Alterungsprodukten verschiebt sich die Kurve nach rechts. Feuchtigkeit und leitfähige Alterungsprodukte spiegeln sich besonders im nieder- und hochfrequenten Bereich wieder. Für den mittleren Bereich mit dem steilen Anstieg ist die Öl-leitfähigkeit verantwortlich. Der "Buckel" reflektiert die Grenzflächenpolarisation, also die geometrischen Eigenschaften [2]. Neben den dielektrischen Messverfahren kann auch die Methode der FRA zur Diagnose der Transformatorisolation im hohen Frequenz-

bereich verwendet werden. Hierbei wird der Impedanzverlauf über der Frequenz bei der Messung zwischen der jeweils kurzgeschlossenen OS- und US-Wicklung aufgezeichnet. Nach [3] wurden dabei auftretende Resonanzen der Serienresonanz aus Wicklungsinduktivität und der Isolationskapazität zugeordnet. Dieses Resonanzverhalten oberhalb 1 kHz wurde daher näher untersucht.

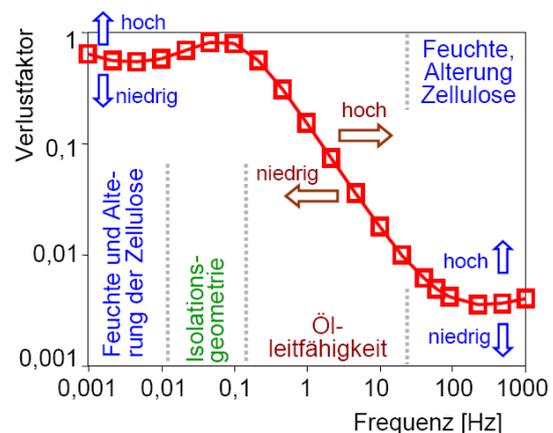


Bild 1 Typischer Verlustfaktorverlauf bei der FDS-Messung von Transformatoren [2]

2 Messungen an Transformerboardproben

Zunächst wurde das dielektrische Verhalten an unbehandelten und an Öl-impregnierten Transformerboardproben im höheren Frequenzbereich gemessen, um die Auswirkungen der Feuchtigkeit zu untersuchen.

Dabei bleibt die Feuchtigkeit im Material konstant und die Messtemperaturen variierten. Als Messgerät stand der Alpha-A Analyser von Novocontrol Technologies in Verbindung mit dem ZG4 Impedanz Interface bereit (

Bild 2). Die Messspannung betrug $U_{\text{eff}} = 3\text{V}$, der Messbereich lag bei $100\text{ mHz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$.

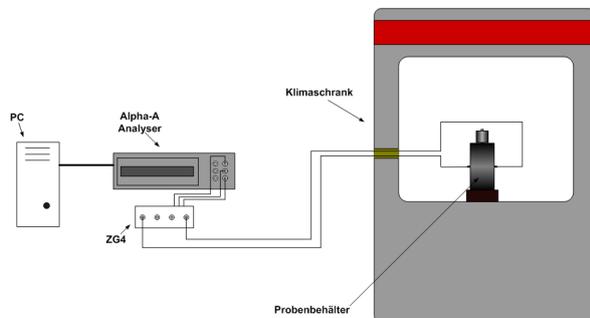


Bild 2 Versuchsaufbau für die Probenmessungen

2.1 Messungen an reinen Transformatorboardproben

In Bild 3 ist die Verlustfaktorkurve bei der Messung an einer unbehandelten, nicht imprägnierten Transformatorboardprobe dargestellt.

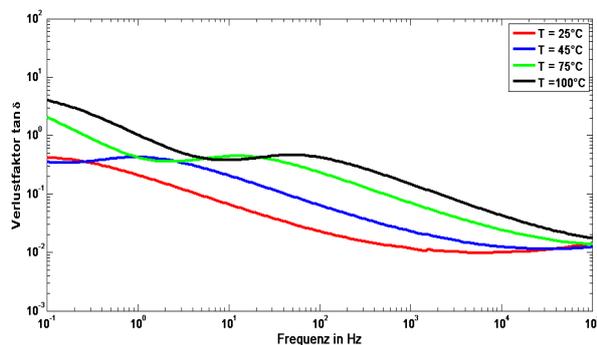


Bild 3 Verlustfaktor $\tan \delta$ einer Transformatorboardprobe mit 5 % Feuchtigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Messergebnisse lassen keine neuen Effekte im höheren Frequenzbereich erkennen. Durch die Zunahme der Temperatur in der Probe verschieben sich die einzelnen Kurven lediglich zu höheren Frequenzwerten. Die Kurvenformen entsprechen dem typischen S-förmigen Verlustfaktorverlauf.

2.2 Messungen an Öl imprägnierte Transformatorboardproben

In einem weiteren Versuch wurde die Transformatorboardprobe zusätzlich mit Öl imprägniert, um den Einfluss der zusätzlichen Isolierflüssigkeit auf das Messergebnis im höheren Frequenzbereich zu überprüfen.

An Bild 4 ist ebenfalls zu erkennen, dass auch durch die zusätzliche Ölprägnierung der Probe keine unbekanntene Effekte im höheren Frequenzbereich auftreten. Die einzelnen Verlustfaktorkurven verschieben sich aufgrund der Temperaturzunahme zu höheren Frequenzen und nehmen wiederum den typischen S-förmigen Kurvenverlauf innerhalb des Erfassungsgebietes an.

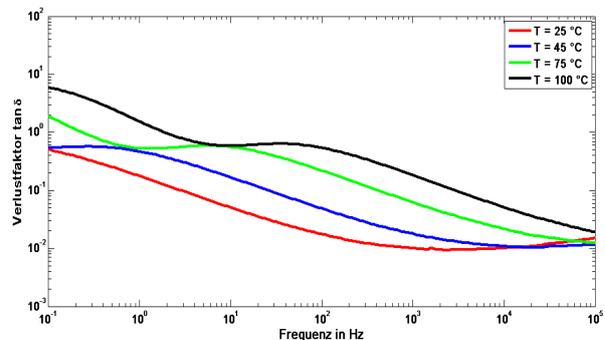


Bild 4 Verlustfaktor $\tan \delta$ einer mit Öl imprägnierten Transformatorboardprobe mit 5 % Feuchtigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen

3 Messungen an einem Verteiltransformator

Das dielektrische Verhalten eines Transformatorisolationssystems im höheren Frequenzbereich wurde an verschiedenen Verteiltransformatoren untersucht. Repräsentativ zeigt Bild 5 die Verlustfaktorkurve des Verteiltransformators vom Typ DO40020, Baujahr 1974 mit einer Nennleistung von 400 kVA.

Bis zur Frequenz von $f = 1\text{ kHz}$ zeigt die Verlustfaktorkurve typisches Verhalten. Oberhalb dieser Grenze treten im Verlustfaktorverlauf Resonanzstellen auf, die bei den bisherigen Messungen bis $f = 1\text{ kHz}$ nicht festgestellt werden konnten. Zunächst steigt die Kurve sehr stark an, zwischen $10\text{ kHz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ sind Resonanzspitzen zu erkennen, anschließend fällt die Kennlinie wieder steil ab und steigt dann erneut langsam bis zum Ende des Messbereiches an.

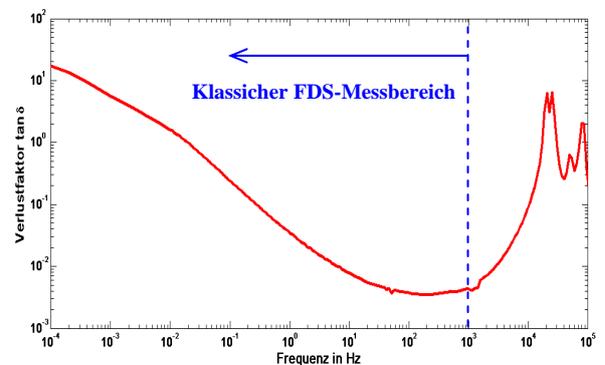


Bild 5 Exemplarischer Verlustfaktorverlauf eines Verteiltransformators mit erweitertem Messfrequenzbereich

2.2 Vergleich der Messergebnisse zwischen FDS- und FRA-Geräten

Das dielektrische Verhalten eines Isolationssystems kann auch mit Hilfe von FRA-Geräten erfasst werden. Dazu kamen zwei Geräte zum Einsatz: zum Einen das Tettex FRA 5310 der Haefely Test AG, zum Anderen der FRAnalyzer der Omicron electronics GmbH.

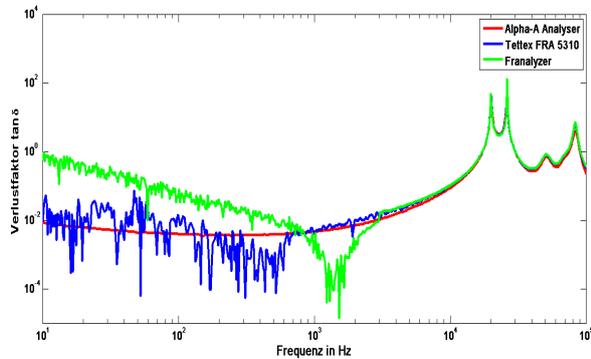


Bild 6 Vergleich der gemessenen Verlustfaktorkurven an einem Verteiltransformator von FDS- und FRA-Geräten

Am Vergleich der Verlustfaktorkurven der drei Messgeräte ist zu erkennen, dass der Kurvenverlauf lediglich im höheren Frequenzbereich, d.h. zwischen $2 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$ gut übereinstimmt. Außerhalb dieses Bereichs weichen die Kennlinien sehr stark voneinander ab. Zusätzlich weisen die Messkurven der FRA-Geräte zu tieferen Frequenzen hin zunehmend störendes Rauschen auf. Das Rauschen in den Kurven der FRA-Geräte ergibt sich durch die Umrechnung der Messwerte in den $\tan \delta$ mittels des Phasenwinkels φ , dessen Bestimmung bei sehr geringer Empfindlichkeit stattfindet.

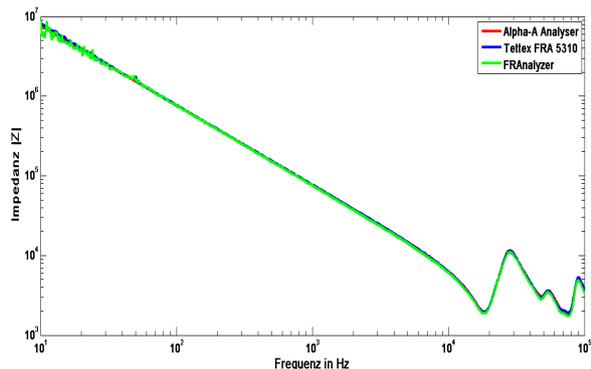


Bild 7 Vergleich der gemessenen Impedanzkurven an einem Verteiltransformator von FDS- und FRA-Geräten

Gute Übereinstimmungen ergeben sich bei der Betrachtung der Betragsimpedanz $|Z|$. Bis $f = 100 \text{ kHz}$ stimmen die Messergebnisse aller Geräte sehr gut überein. Oberhalb dieser Grenze weicht die Kennlinie des FRAnalyzers von den anderen beiden ab. Mittels

der Impedanzkurve lässt sich ebenfalls das dielektrische Verhalten im höheren Frequenzbereich darstellen. Der Resonanzbereich zwischen $10 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$ ist auch bei dieser Darstellungsform gut zu erkennen.

3.2 Einfluss von Kern, US- und OS-Wicklung auf das Messergebnis

Zur Untersuchung des Einflusses der Hauptkomponenten des Aktivteils eines Transformators auf das dielektrische Verhalten im höheren Frequenzbereich wurde die Messanordnung der FDS-Methode (Messanordnung 1) variiert. Als Messgerät diente das Tettex FRA 5310.

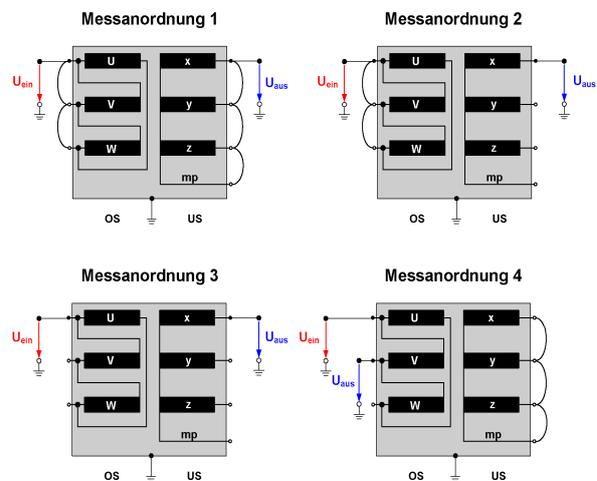


Bild 8 Messanordnungen zur Darstellung des Einflusses der Hauptkomponenten auf das dielektrische Verhalten bei höheren Frequenzen

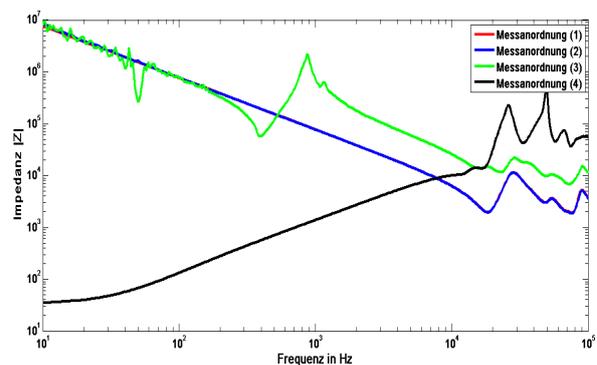


Bild 9 Impedanzverläufe für die verschiedenen Messanordnungen nach Bild 8

Der Impedanzverlauf von Messanordnung 1 entspricht dem Ergebnis bei einer FDS-Messung. Wird der Kurzschluss auf der US-Seite des Transformators entfernt (Messanordnung 2), zeigen sich zusätzliche Resonanzstellen oberhalb von $f = 500 \text{ kHz}$ (nicht abgebildet), die durch die US-Wicklungen hervorgerufen werden. Das Aufheben des Kurzschlusses an der OS-Seite des Transformators (Messanordnung 3) bewirkt, dass im Impedanzverlauf eine weitere Reso-

nanzstelle um $f = 1$ kHz auftritt, die durch den Kern verursacht wird. Bei der ausschließlichen Erfassung des Impedanzverlaufs an der OS-Seite des Transformators (Messanordnung 4) können die Eigenresonanzen der OS-Wicklung dargestellt werden. Diese befinden sich im vorliegenden Fall im gleichen Frequenzbereich wie die Resonanzstellen im Impedanzverlauf der FDS-Messkurve. Weder der Kern noch die Unterspannungswicklungen rufen die markanten Resonanzstellen im Impedanzverlauf hervor.

3.3 Messungen an der OS-Wicklung des Aktivteils eines Transformators

Zur näheren Untersuchung des Einflusses der OS-Wicklung auf den Resonanzbereich im Impedanzverlauf wurde erneut deren Eigenresonanz gemessen.



Bild 10 Aktivteil eines Verteiltransformators mit intakter OS-Wicklung

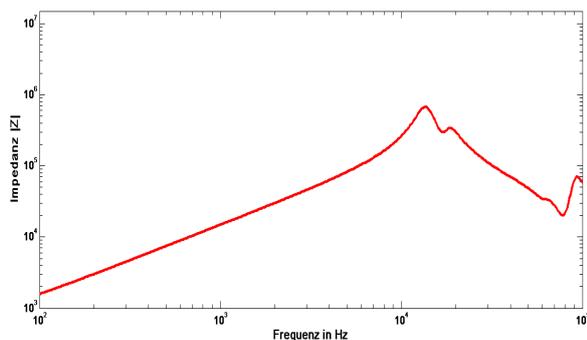


Bild 11 Impedanzverlauf der OS-Wicklung des demontierten Verteiltransformators

Dazu stand die OS-Wicklung eines demontierten Verteiltransformators bereit. Diese befand sich auf dem mittleren Kernschenkel, während alle anderen Wicklungen entfernt waren. Die OS-Wicklung ist aus zwei Wicklungshälften mit jeweils vier Wicklungsscheiben aufgebaut. Zur Mitte hin befinden sich jeweils drei Anzapfungen an den Spulenhälften zur Einstellung der verschiedenen Stufenschalterstellungen. Am oberen bzw. unteren Ende der Wicklungshälften befinden

sich Verbindungen nach außen oder zu den anderen OS-Wicklungen. Als Messgerät stand das Tettex FRA 5310 bereit. Die Wicklungshälften wurden über zwei Anzapfungen kurzgeschlossen. Zunächst zeigt sich ein induktives Verhalten beim Ansteigen der Kurve bis zur Resonanzspitze bei $f = 13$ kHz. Anschließend fällt die Kurve mit kapazitivem Verhalten bis zum Ende des Messbereiches ab, wobei sich eine weitere Eigenresonanz bei $f = 94$ kHz ergibt.

3.3.1 Messungen mit Kapazitäten in Serie zur OS-Wicklung

In dieser Versuchsanordnung kamen verschiedene Kapazitäten (Bild 12) zum Einsatz. Des Weiteren wurde eine Öl-Papier-Probe als Kapazität verwendet, um den eigentlichen Isolationsaufbau im Transformator besser nachzubilden.

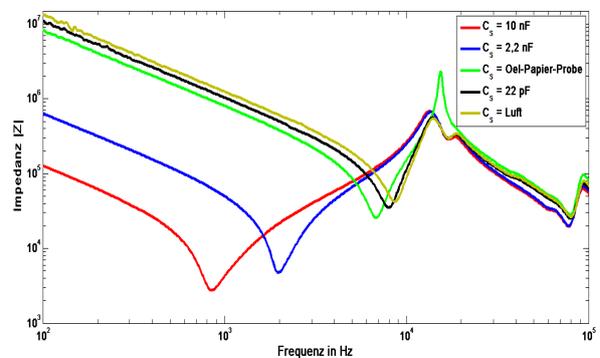


Bild 12 Impedanzverlauf mit Kapazitäten in Serie zur OS-Wicklung

Durch das Hinzuschalten von Kapazitäten in den Messkreis wird im Wesentlichen der Bereich links der Resonanzspitze beeinflusst. Mit abnehmendem Kapazitätswert verschiebt sich das Resonanzminimum zu höheren Frequenzen. Gleichzeitig nehmen die Impedanzwerte sichtlich zu und die Ausprägung des gesamten Resonanzbereichs erheblich ab. Die Eigenresonanzen der OS-Wicklung bleiben trotz der in den Messkreis eingebrachten Kapazitäten nahezu fix an ihrem Frequenzpunkt. Oberhalb der Resonanzspitze wird der Impedanzverlauf maßgeblich vom kapazitiven Verhalten der OS-Wicklung geprägt.

Durch die Serienschaltung der Kapazitäten an die OS-Wicklung des offenen Transformators zeigt sich, dass vor allem die Lage des Resonanzminimums stark von der Größe der Kapazität abhängt. Nähern sich die Kapazitätswerte denen einer Öl-Papier-Isolation an, verschiebt sich der komplette Resonanzanteil zu höheren Frequenzen und gleicht vermehrt dem einer FDS-Messkurve.

3.4 Nachbildung des Streukanals und Wicklungsaufbaus eines Transformators

Zum besseren Vergleich der Gegebenheiten im Innern des Transformators, wurde der Streukanal und Wicklungsaufbau nachgebildet.

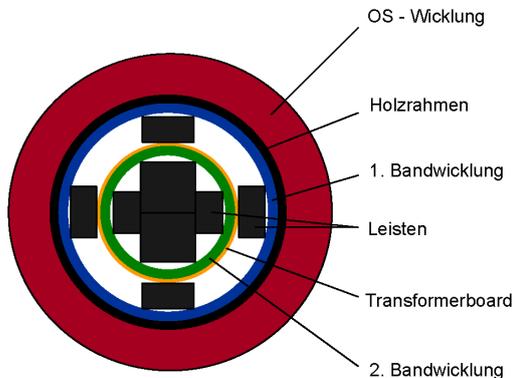


Bild 13 Nachbildung des Wicklungsaufbaus und des Hauptstreukanals eines Transformators

Gemessen wurde mit dem Alpha-A Analyser bei drei verschiedenen Messanordnungen:

- Einspeisung OS – Abgriff 1. BW
- Einspeisung OS – Abgriff 2. BW
- Einspeisung 1. BW – Abgriff 2. BW (BW = Bandwicklung)

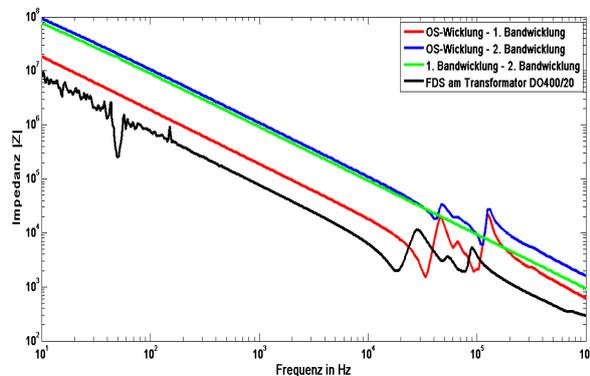


Bild 14 Impedanzverlauf der Nachbildung nach Bild 13 im Vergleich zur Messkurve am Transformator

Bei der Messung zwischen OS-Wicklung und 1. Bandwicklung ergeben sich ebenfalls Resonanzerscheinungen ähnlich derer wie bei einer FDS-Messung am Transformator. Diese nehmen in ihrer Ausprägung ab und verschieben sich zu etwas höheren Frequenzen bei der Messung zwischen OS-Wicklung und 2. Bandwicklung. Misst man rein zwischen den beiden Bandwicklungen zeigen sich im Impedanzverlauf keine Resonanzstellen mehr. Auch am Verlustfaktorverlauf sind ähnliche Effekte zu erkennen (Bild 15).

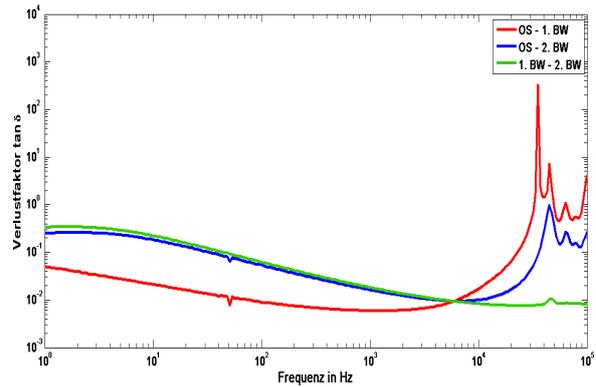


Bild 15 Verlustfaktorverlauf der Streukanalnachbildung nach Bild 13

Es ergeben sich die bekannten Resonanzerscheinungen im Kurvenverlauf. Die OS-Wicklung beeinflusst auch die Kurve bei reiner Messung zwischen den Bandwicklungen.

3.5 Erfassung des dielektrischen Verhaltens von Transformatorisoliertstoffen mit Bandwicklungen

Der Aufbau mit Bandwicklungen im Innern der OS-Wicklung wurde in einen Kunststoffzylinder durchgeführt. Hier wurde nun rein das dielektrische Verhalten ohne Beeinflussung der OS-Wicklung ermittelt.

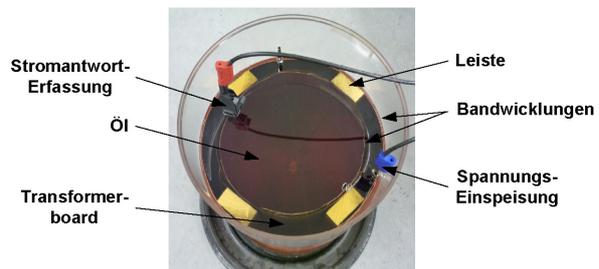


Bild 16 Messaufbau mit Bandwicklungen und OIP (Öl-Imprägniertes-Papier)

Zwischen den beiden Bandwicklungen waren Stützleisten angebracht. Die innere Bandwicklung war zusätzlich mit Transformerboard umwickelt. Zunächst blieb der Aufbau rein mit Luft gefüllt. Später wurde zusätzlich Öl hinzugeschüttet. Als Messgerät diente wiederum der Alpha-A Analyser in Verbindung mit dem ZG4 Impedanz Interface.

Bei der Betrachtung des Impedanzverlaufes kann man feststellen, dass innerhalb des Messbereiches keine Resonanzstellen mehr auftreten. Die Kurve bei ölgefülltem Messaufbau ist zu etwas tieferen Impedanzen hin verschoben.

Auch im Verlustfaktorverlauf treten keine Resonanzerscheinungen mehr auf. Die beiden Kennlinien verlaufen nahezu identisch innerhalb des Messbereiches.

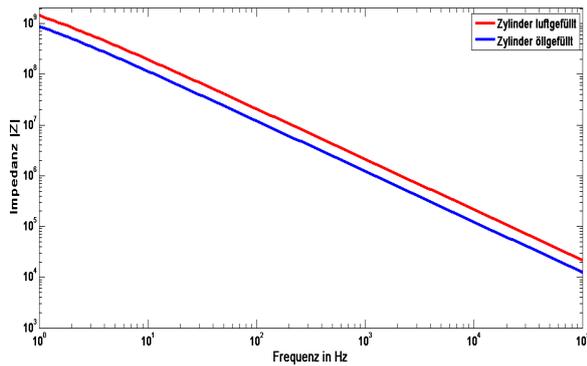


Bild 17 Impedanzverlauf für den luft- und ölgefüllten Versuchsaufbau

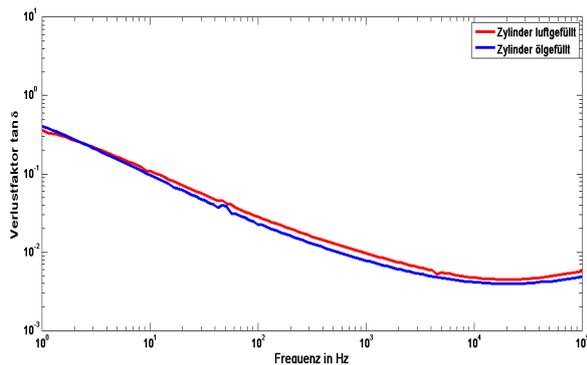


Bild 18 Verlustfaktorverlauf für den luft- und ölgefüllten Versuchsaufbau

4 Vergleich der Messergebnisse zwischen energietechnischen Betriebsmitteln mit OIP

Die Messergebnisse am Verteiltransformator mit den Resonanzstellen im höheren Frequenzbereich wurden zum Schluss mit Messungen an verschiedenen energietechnischen Betriebsmitteln mit OIP Isolationssystem verglichen, um den Wicklungseinfluss zu untersuchen. Hierfür standen ein Eigenbedarfstransformator (40 MVA), eine 110-kV-Durchführung und ein 200-kV-Hochspannungskondensator zur Verfügung.

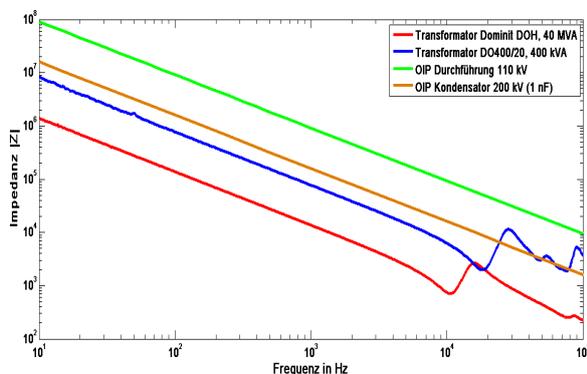


Bild 19 Vergleich der Impedanzkurven zwischen verschiedenen energietechnischen Betriebsmitteln

Es zeigt sich, dass auch am Großtransformator (Dominit 40 MVA) Resonanzstellen im höheren Frequenzbereich auftreten, die in ihrer Form denen des Verteiltransformators entsprechen. Die Verschiebung des Resonanzbereiches bei der Messung am Großtransformator hin zu tieferen Frequenzen kann durch die wesentlich tiefere Messtemperatur ($T \approx 0 \text{ }^\circ\text{C}$) als am Verteiltransformator ($T \approx 15\text{-}20 \text{ }^\circ\text{C}$) erklärt werden. An der Durchführung bzw. an dem Kondensator sind keine Resonanzstellen zu erkennen, wie dies auch von einem reinen dielektrischen Verlauf ohne Wicklungseinfluss zu erwarten ist.

5 Zusammenfassung

Bei der Messung an den Transformatorboardproben treten keine unbekanntenen Effekte im höheren Frequenzbereich auf. Der Anstieg der Feuchtigkeit und Temperatur im Transformatorboard verursacht eine Verschiebung der Verlustfaktorkurve zu höheren Frequenzen. Anders sieht dies bei der Messung am Isolationssystem des Transformators aus. Hier treten oberhalb von $f = 1 \text{ kHz}$ Resonanzstellen auf, die dem dielektrischen Verhalten des Isolationssystems überlagert sind. Diese Resonanzen werden nicht durch die Isolation selbst, sondern durch die Wicklungen verursacht.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass das dielektrische Verhalten ab einem gewissen Frequenzpunkt nicht mehr eindeutig der Isolation des Transformators zugewiesen werden kann. Dieser Frequenzpunkt lässt sich nicht eindeutig bestimmen. Anhand des Vergleichs zwischen gemessenem und errechnetem Verlustfaktorverlauf kann die Aussage getroffen werden, dass ein Detektieren des Isolationsverhaltens bis zum Beginn des gekrümmten Bereiches im Verlustfaktorverlauf ausreichend ist. Oberhalb dieser Grenze kann nicht exakt nachgewiesen werden, ab wann der Kurvenverlauf von den Einflüssen der Wicklungen überlagert wird.

6 Literatur

- [1] Leibfried, T.: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel. Vorlesungsbegleitendes Skript, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH), Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [2] Koch, M.; Tenbohlen, S.: Der Einfluss von Alterung und Materialeigenschaften auf dielektrische Messungen an Öl-Papier-Isolierungen. ETG-Fachtagung: Grenzflächen in elektrischen Isolationssystemen, Würzburg, September 2008
- [3] Gubanski, S. M.; Abeywickrama, K. G.: Exploring Possibilities for Characterization of Power Transformer Insulation by FRA, IEEE Transactions on Power Delivery, July 2006