

Dielektrische Analyse von Leistungstransformatoren

Martin Anglhuber, OMICRON electronics GmbH, Klaus/Austria
Michael Krüger, OMICRON electronics GmbH, Klaus/Austria

Überblick

In diesem Artikel geben wir einen Überblick über die dielektrischen Prüfungen, die zur Diagnose von Leistungstransformatoren und Durchführungen eingesetzt werden können. Es werden unterschiedliche Feldtests mit Hintergrundinformationen vorgestellt. Außerdem wird gezeigt, wo und wie die jeweiligen Prüfungen eingesetzt und welche Informationen daraus abgeleitet werden können.

Zusammenfassung

Dielektrische Prüfungen werden seit Jahrzehnten für die Diagnose von Leistungstransformatoren und Durchführungen eingesetzt. Zusätzlich zu traditionellen Prüfungen bei Netzfrequenz wurden moderne dielektrische Prüfungen bei unterschiedlichen Frequenzen und Spannungen entwickelt. In diesem Artikel werden die gängigsten Prüfverfahren sowie jeweils der Zweck dieser Ansätze erklärt. Es wird beschrieben, welche Informationen aus den jeweils gemessenen Werten abgeleitet werden können.

Stichwörter: dielektrische Eigenschaften, Leistungsfaktor, Verlustfaktor, $\tan(\delta)$, FDS, PDC, DFR, Leistungstransformator, Durchführung

1 Einleitung

Leistungstransformatoren sind die teuersten Komponenten, die in der Energieübertragung und -verteilung eingesetzt werden. Betreiber erwarten eine lange Nutzungsdauer ohne Ausfälle. Damit diese Aufgabe erfüllt werden kann, müssen die Transformatoren in einem guten Zustand sein, was durch entsprechende Diagnosen bestätigt werden kann. Bei nicht optimalen Ergebnissen können Maßnahmen ergriffen werden, um Ausfällen vorzubeugen.

Dielektrische Messungen stellen eine Gruppe solcher diagnostischer Verfahren dar. Mit ihnen kann der Isolierungszustand von Leistungstransformatoren und Durchführungen ermittelt werden. Die Integrität dieser Isolierungen ist eine Grundvoraussetzung für einen sicheren Betrieb.

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Reihe unterschiedlicher dielektrischer Messmethoden entwickelt. Alle diese dielektrischen Methoden haben eine gemeinsame Basis: Sie sind nicht invasiv und ermitteln Kapazitäten und Verluste der zu prüfenden Isolierung. Sie unterscheiden sich durch den untersuchten Frequenzbereich, die angelegte Spannung und das Bewertungsverfahren, das zur Auswertung der Ergebnisse herangezogen wird. Zusammen liefern diese unterschiedlichen Verfahren eine Vielzahl an Informationen über die geprüfte Isolierung.

2 Dielektrische Eigenschaften von Isolierungssystemen

Papier und Pressspan bilden zusammen mit dem Öl die Isolierung eines Transformators. Die dielektrischen Eigenschaften dieser Isolierung werden durch die Temperatur und den Wassergehalt beeinflusst. Der Einfluss von Wasser ist besonders für den Verlustfaktor $\tan(\delta)$ bei niedrigeren Frequenzen hoch, da Wasser die Polarisierung und Leitfähigkeit erhöht (Abbildung 1) [1] [2]. Dielektrische Eigenschaften bei Netzfrequenz und Frequenzen darüber werden dadurch aber deutlich weniger beeinflusst. Der Einfluss ist nur dann sichtbar, wenn der Wassergehalt sehr hoch ist (Abbildung 1).

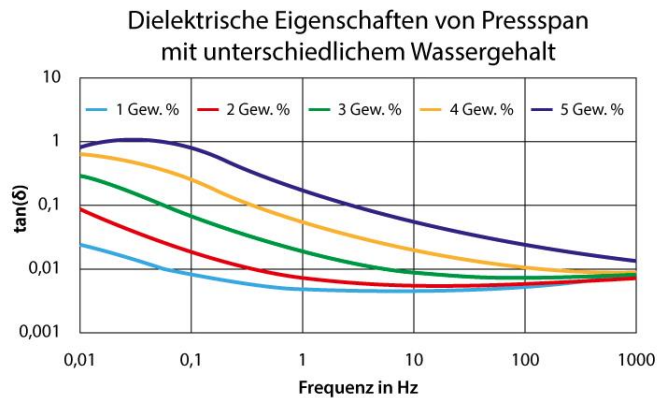


Abbildung 1: Dielektrische Eigenschaften von ölgetränktem Pressspan mit unterschiedlichem Wassergehalt bei 20° C

Die dielektrischen Eigenschaften von Papier und Pressspan hängen auch von der Temperatur ab. Aus diesem Grund muss bei jeder Messung der dielektrischen Eigenschaften auch immer die Temperatur gemessen und angegeben werden.

Die dielektrischen Eigenschaften von Mineralöl zeigen ein einfacheres Verhalten als die von Pressspan und können mit einer Leitfähigkeit und Permittivität für niedrige Feldstärken ausreichend nachgebildet werden [1] [2].

Die dielektrischen Eigenschaften einer kombinierten Öl-Papier-Isolierung in einem Leistungstransformator hängen von unterschiedlichen Parametern ab, z. B.:

- Temperatur
- Ölleitfähigkeit
- Geometrie der Isolierung (Anteil an Barrieren und Abstandshalter)
- Wassergehalt in der Papier- und Pressspanisolierung

Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass diese Einflussgrößen bei unterschiedlichen Frequenzen dominant sind (Abbildung 2). Eine höhere Ölleitfähigkeit oder -temperatur verursacht eine Verschiebung der gesamten Verlustfaktor-Kurve in Richtung höhere Frequenzen. Ein höherer Wassergehalt dagegen erhöht den Verlustfaktor bei höheren und niedrigeren Frequenzen, hat aber dazwischen einen nur sehr eingeschränkten Einfluss. Bei der Bestimmung des Feuchtegehalts liefert daher der Wassergehalt bei niedrigeren Frequenzen sehr viel zuverlässigere Ergebnisse. Der Einsatz hoher Frequenzen zur Bestimmung des Wassergehalts kann nicht empfohlen werden, da die dielektrischen Eigenschaften eher von der Ölleitfähigkeit als vom Wassergehalt abhängig sind (Abbildung 3). Ein hoher Wert für den Verlustfaktor bei Netzfrequenz gibt keinen Aufschluss darüber, ob die Ursache ein hoher Wassergehalt oder eine hohe Ölleitfähigkeit ist (Abbildung 3). Letztere kann bei neuem Öl Werte von 0,1 pS/m und darunter, und bei sehr gealtertem Öl Werte bis zu mehreren Hundert pS/m erreichen.

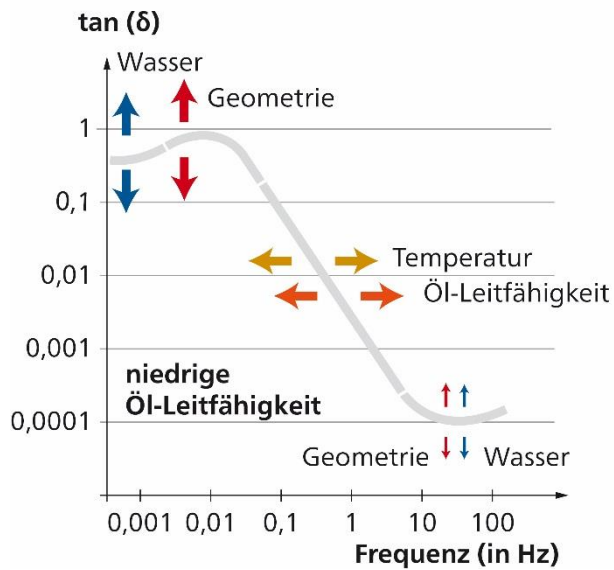


Abbildung 2: Dielektrische Eigenschaften von der Ober- bis Unterspannungswicklung (CHL) eines Leistungstransformators mit Öl-Papier-Isolierung

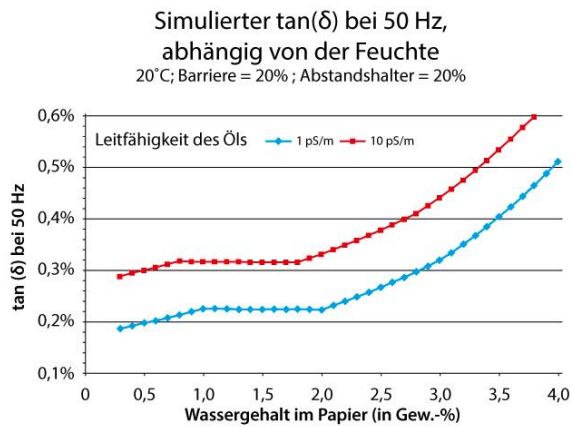


Abbildung 3: Simulierte Abhängigkeit des Verlustfaktors bei 50 Hz für einen Leistungstransformator mit zwei unterschiedlichen Ölleitfähigkeiten

3 Dielektrische Messverfahren für Feldtests

Auch wenn dielektrische Messungen theoretisch bei jeder Frequenz und Spannung möglich sind, gibt es für Feldtests von Hochspannungsbetriebsmitteln mehrere Gruppen von Prüfgeräten mit ähnlichen Prüfparametern. Aus diesem Grund werden in den folgenden Abschnitten die Eigenschaften und die praktische Anwendung jedes dieser Prüfverfahrens erläutert.

Messungen bei einer Frequenz

Dielektrische Messungen bei einer Frequenz werden normalerweise bei der Netzfrequenz des Systems, d. h. üblicherweise 50 Hz oder 60 Hz, durchgeführt. Da bei Feldtests Störer mit derselben Frequenz von einem spannungsführenden System der Umgebung erwartet werden müssen, ist normalerweise eine Hochspannungsquelle erforderlich, um ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis zu erreichen. Dies führt oft dazu, dass die Prüfausrüstung ziemlich groß und schwer ist. Der Vorteil Betriebsmittel bei Netzfrequenz zu prüfen liegt darin, dass alle festgelegten Parameter (Kapazität, Verluste usw.) auch für die tatsächliche Verwendung der Komponente gelten.

Messungen in einem begrenztem Frequenzbereich (15 Hz bis 400 Hz)

Eine verbesserte Version der Messung bei Netzfrequenz ist die Messung in einem Frequenzbereich, in dem die Netzfrequenz liegt. Der typische Frequenzbereich liegt zwischen 15 Hz und 400 Hz. Aufgrund des erhöhten Frequenzbereiches kann die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften analysiert werden. Auch wenn der begrenzte Frequenzbereich keine Trennung der vielen Einflussgrößen zulässt (siehe Abbildung 2), können oftmals einige weitere Schlussfolgerungen über den Zustand des Betriebsmittels gezogen werden.

Die dielektrischen Eigenschaften bei Netzfrequenz können entweder unmittelbar gemessen oder interpoliert werden: Somit ist auch ein Vergleich der gemessenen Werte mit den Referenzwerten bei Netzfrequenz möglich.

Messungen mit variabler Spannung („Tip-Up-Test“)

Eine Messung bei einer konstanten Frequenz, bei der die Spannung erhöht und die dielektrischen Parameter in einem Spannungsbereich gemessen werden, wird allgemein als „Tip-Up-Test“ bezeichnet. Meistens wird die Netzfrequenz verwendet, es ist aber auch eine Kombination mit einem Frequenzbereich (siehe vorheriger Abschnitt) möglich. Mit einer solchen Prüfung können einige spezielle Fehler ermittelt werden, z. B. ein fehlerhafter Kontakt an einem Messanschluss einer Durchführung (siehe Kapitel 6).

Messungen in einem breiten Frequenzbereich (DFR)

Dielektrische Messungen in einem breiten Frequenzbereich (oft „DFR“ für „dielectric frequency response“, zu Deutsch „dielektrische Frequenzantwort“) werden eingesetzt, um die dielektrischen Eigenschaften eines Betriebsmittels in einem sehr breiten Frequenzbereich zu messen. Der Frequenzbereich kann dabei von niedrigen kHz-Werten über wenige mHz bis hin zu μ Hz-Werten reichen. Es gibt verschiedene Ansätze, die Messungen im Frequenz-, aber auch im Zeitbereich verwenden. Es sind auch Kombinationen möglich, mit denen die Vorteile verschiedener Ansätze kombiniert werden [3]. Die Ergebnisse eines Verfahrens können für das andere Verfahren umgerechnet werden, wenn die Messungen korrekt und auf vergleichbare Weise durchgeführt werden [4] [5]. Am meisten wird der Frequenzbereich zur Darstellung der erhaltenen Daten verwendet, d. h. die Eigenschaft wird in einem Diagramm über der Frequenz dargestellt. Der große Vorteil der Verwendung eines sehr breiten Frequenzbereichs ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber verschiedenen Einflussfaktoren (siehe Abbildung 2). Durch diese hohe Empfindlichkeit eignet sich das Verfahren zum Beispiel zur Ermittlung des Wassergehalts [6]. Mit der Hilfe eines Computers wird dabei der absolute Wassergehalt in der Papier-/Pressspanisolierung ermittelt und auch die Ölleitfähigkeit bestimmt [1] [7] [3].

4 Prüfaufbau und Guard-Technik

Je nach Anschluss Technik werden unterschiedliche Teile der Leistungstransformatorisolation gemessen. Der Zweiwicklungstransformator eignet sich sehr gut, um die unterschiedlichen Teile der Isolation zu zeigen, die in einem Transformator gemessen werden können. Hier wird er auch verwendet, um das Prinzip des sog. „Guards“ zu erklären.

Ein Zweiwicklungstransformator mit Ober- und Unterspannungswicklung hat drei unterschiedliche Isolierungen, die gemessen werden können: Die Isolation von der Ober- zur Unterspannungswicklung CHL, die Isolation von der Oberspannungswicklung zum Kern und Kessel CH sowie die Isolation von der Unterspannungswicklung zum Kern und Kessel CL.

Die Isolation CHL bei Kerntransformatoren besteht aus Barrieren und Abstandshaltern, die der Isolation mechanische Stabilität geben und den Ölfluss zur Kühlung der Wicklungen ermöglichen. Verglichen mit den anderen Teilen der Isolation befindet sich der Hauptteil an Zellulose (Papier und Pressspan) in dieser Isolation CHL, d. h. die Eigenschaften der Isolation werden sehr stark durch die der Zellulose beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Isolation CHL sehr wichtig, wenn die Eigenschaften von Zellulose, z. B. der Wassergehalt analysiert werden sollen.

Die Isolation CH, die von den Oberspannungswicklungen zum Tank geht, besteht hauptsächlich aus Öl. Der Einfluss von Zellulose stammt normalerweise zum Großteil von den Teilen der Klemmkonstruktion. Die Isolation CL, die zum Großteil von der Unterspannungswicklung zum Kern führt, besteht auch aus Öl und Zellulose, wobei der Anteil an Zellulose geringer als in der CHL-Isolation ist.

Wenn die CHL-Isolation nur durch Einspeisung von Spannung auf der Hochspannungsseite und der Strom auf der Niederspannungsseite (oder umgekehrt) ohne Guard gemessen werden würden, würde auch der Strom durch die Durchführungen sowie CH und CL gemessen werden (Abbildung 4 a).

Um diese zusätzlichen Einflüsse zu beseitigen und nur die Eigenschaften von CHL messen zu können, wird die Guard-Technik eingesetzt. Sie setzt einen zusätzlichen Guard-Anschluss am Messgerät ein, über den die unerwünschten Ströme abgeleitet werden können. Durch die Verbindung des Kessels mit dem Guard im zuvor erwähnten Beispiel wird nur der Strom über die Isolation CHL gemessen (Abbildung 4 b).

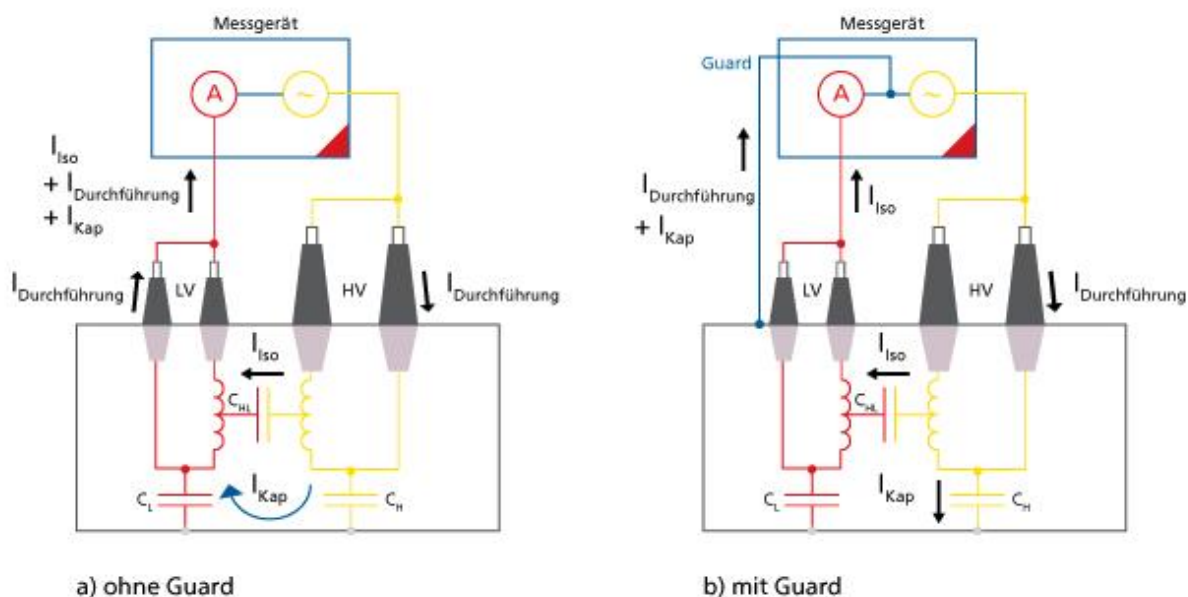


Abbildung 4: Messung von CHL an einem Zweiwicklungstransformator ohne bzw. mit Guard

5 Dielektrische Messungen an Leistungstransformatoren

Vorbereitungen

Vor dielektrischen Messungen an einem Leistungstransformator müssen alle elektrischen Anschlüsse zu den Durchführungen vollständig getrennt werden. Dies erfolgt nicht nur aus Sicherheitsgründen, sondern auch weil dielektrische Messungen alle an das System angeschlossenen Teile messen und induzierte Spannungen zu Störern führen können. Alle Wicklungen derselben Gruppe (HV, LV,...) werden vor der Messung kurzgeschlossen. Auch die neutrale Durchführung sollte, falls vorhanden, ebenfalls mit kurzgeschlossen werden.

Hier muss nochmals angemerkt werden, dass die Temperatur bei allen Arten der dielektrischen Messung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Aus diesem Grund muss die Temperatur des Betriebsmittels zum Zeitpunkt der Messung gemessen und vermerkt werden.

Prüfen mit Netzfrequenz

Messungen bei Netzfrequenz liefern Parameter, die mit Referenzwerten verglichen werden können, um sichtbare Unterschiede aufzuzeigen. Kapazitätswerte werden normalerweise nicht wesentlich durch kleine Temperaturschwankungen zwischen der tatsächlichen Messung und Referenzmessung beeinflusst. Messungen des Verlustfaktors können allerdings nur verglichen werden, wenn die Messungen bei derselben Temperatur durchgeführt wurden.

Ein an über 100 Leistungstransformatoren durchgeführter Feldtest zeigt das Verhältnis des Verlustfaktors bei 50 Hz zum Wassergehalt (Abbildung 5). Die dielektrischen Verluste erhöhen sich tendenziell bei einem höheren Wassergehalt. Allerdings kann aus einem gemessenen $\tan(\delta)$ -Wert nicht ein bestimmter Wassergehalt abgeleitet werden. Beispiel: Bei einem Transformator mit einem niedrigen Wassergehalt von 1,4 Gew.-% wurde ein Verlustfaktor von 0,5 % gemessen, derselbe Wert wurde aber auch bei einem Transformator mit einem hohen Wassergehalt von 4 Gew.-% gemessen.

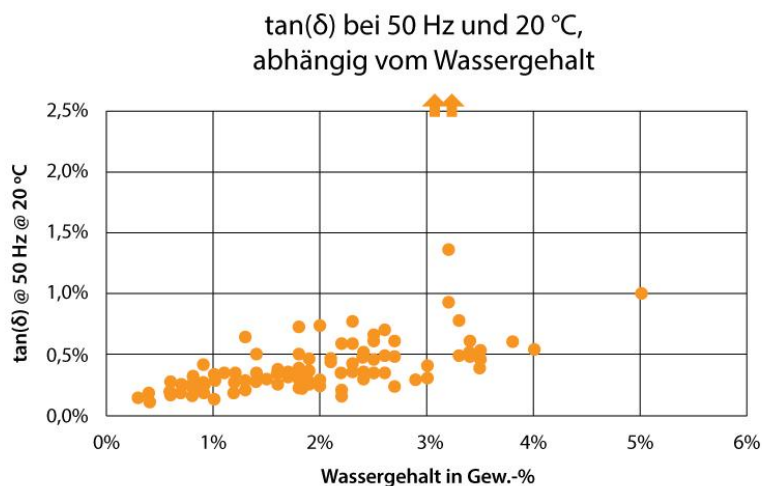


Abbildung 5: Verhältnis des Verlustfaktors bei 50 Hz und 20 °C zum Wassergehalt in der Zellulose bei über 100 Leistungstransformatoren, bewertet mit dielektrischen Messungen in einem breiten Frequenzbereich mit dem Prüfsystem DIRANA von OMICRON.

Messungen von 15 Hz bis 400 Hz

Die Messung des Verlustfaktors in einem kleinen Frequenzbereich nahe an der Netzfrequenz, z. B. von 15 Hz bis 400 Hz, liefert nicht nur Informationen über die dielektrischen Verluste bei Netzfrequenz, sondern zeigt auch die Steigung der Verlustfaktor-Kurve. Dadurch erhält man zusätzliche Informationen über die Ölleitfähigkeit und kann analysieren, ob ein erhöhter Verlustfaktor durch das Öl verursacht wird. Allerdings reichen die Informationen nicht für eine zuverlässige Ermittlung des Wassergehalts aus.

Abbildung 6 zeigt den Verlustfaktor von 4 Leistungstransformatoren in einem Frequenzbereich von einigen Hundert μHz bis hin zu Hunderten Hz. Bei 50 Hz haben die Betriebsmittel mit einem Wassergehalt von 0,7 % und 2,3 % in der Papierisolation fast identische Verlustfaktoren (0,164 % bzw. 0,172 %). Wird der Wert aber bei anderen Frequenzen gemessen, zeigt sich ein deutlicher Unterschied der Kurven – selbst im eingeschränkten Frequenzbereich von 15 Hz bis 400 Hz. Ein deutlicher Abfall der Kurve in diesem Bereich lässt auf eine hohe Ölleitfähigkeit schließen (vgl. rote Kurve). Ansteigende Kurven in diesem Frequenzbereich weisen normalerweise auf eine sehr niedrige Ölleitfähigkeit hin (vgl. violette Kurve).

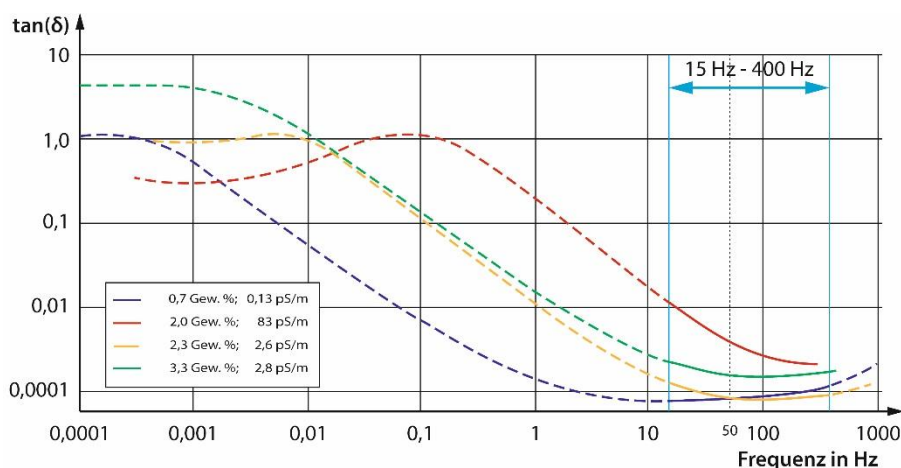


Abbildung 1: Dielektrische Eigenschaften in einem breiten Frequenzbereich von 4 unterschiedlichen Leistungstransformatoren bei 20 °C.

Messungen mit variabler Spannung („Tip-Up-Test“)

Messungen mit variabler Spannung, so genannte Tip-Up-Tests, erfolgen normalerweise nicht an Leistungstransformatoren selbst, sondern an den Durchführungen. Dort können sie zum Beispiel zur Ermittlung von Kontaktproblemen oder Ausfällen zwischen Steuerbelägen eingesetzt werden [8] [9].

Dielektrische Messungen in einem breiten Frequenzbereich

Die dielektrischen Eigenschaften eines breiten Frequenzbereichs, einschließlich niedriger Frequenzen (im mHz- oder μHz -Bereich), ermöglichen eine Trennung und Identifizierung der Eigenschaften von Öl und Pressspan in einem Leistungstransformator.

Die gemessene Kurve zeigt die charakteristische Form mit einem „Buckel“ bei niedrigeren Frequenzen (Abbildung 6). Der Bereich ungefähr 1 - 2 Dekaden unterhalb der Spitze des „Buckels“ wird stark durch den Wassergehalt der Zellulose-Isolierung beeinflusst. Die Bestimmung dieses Frequenzbereichs ist sehr wichtig und die Messung, die typischerweise bei höheren Frequenzen beginnt, darf nicht beendet werden, bis dieser Frequenzbereich gemessen wurde. Aus diesem Grund ist die Einstellung eines ausreichend großen Frequenzbereichs sehr wichtig.

In der Praxis stellt man den größtmöglichen Bereich ein und hält die Messung an, sobald der Benutzer erkennt, dass alle erforderlichen Daten gemessen wurden. Eine weitere gebräuchliche Vorgehensweise ist eine Messung „über Nacht“ durchzuführen nachdem die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen ergriffen wurden.

Eine Analyse von über 100 Messungen an Leistungstransformatoren zeigt deutlich, dass die Stopfrequenz nicht aus der Temperatur des Betriebsmittels abgeleitet werden kann, da man sogar für ziemlich warme Leistungstransformatoren sehr niedrige Stopfrequenzen im μHz -Bereich benötigen kann (Abbildung 7).

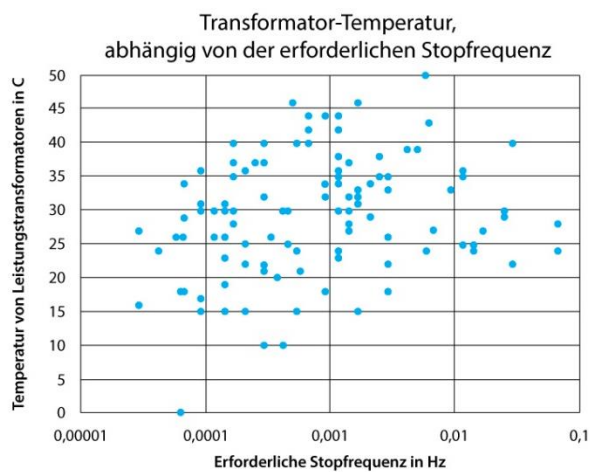


Abbildung 2: Erforderliche Stopfrequenz in Abhängigkeit von der Transformatortemperatur bei über 100 Leistungstransformatoren

Die Temperatur der Isolierung ist für die Analyse des Feuchtegehalts sehr wichtig und sollte aus diesem Grund genau vermerkt werden. Ohne korrekte Temperaturangabe der Isolierung kann der Feuchtegehalt der Feststoffisolierung nicht zuverlässig ermittelt werden. Die obere Öltemperatur kommt der durchschnittlichen Isolierungstemperatur am nächsten. Aus diesem Grund wird eine Verwendung dieses Werts zur Bewertung des Feuchtegehalts empfohlen.

Die Bewertung der Kurven erfolgt normalerweise automatisch mit der Hilfe eines Computers und einer Datenbank für ölgetränkte Zellulose, die dielektrischen Eigenschaften von Pressspan bei unterschiedlichem Wassergehalt und Temperaturen enthält. Als Ergebnis dieser Bewertung erhält man den Wassergehalt in der Zellulose-Isolierung und die Ölleitfähigkeit.

Die verbleibende Nutzungsdauer des Betriebsmittels hängt von vielen Faktoren ab. Allerdings ist der Feuchtegehalt ein wichtiger Parameter. Deshalb ist diese Messung sehr hilfreich, wenn man die verbleibende Nutzungsdauer der Transformator-Isolierung abschätzen möchte, und sie zeigt, ob Maßnahmen wie Trocknung oder Ölaufbereitung notwendig sind.

6 Messen von Durchführungen

In einem Leistungstransformator werden normalerweise mehr als eine Durchführung desselben Typs und desselben Alters eingebaut, wodurch ein Vergleich der dielektrischen Eigenschaften unter identischen Einheiten zusätzlich zu einem Vergleich mit festen Grenzwerten möglich ist. Damit kann ein Problem (das durch dielektrische Messungen ermittelt werden kann) mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, wenn zum Beispiel drei identische Durchführungen identische dielektrische Eigenschaften aufweisen.

Zusätzlich muss bei dielektrischen Messungen an Durchführungen auch die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass selbst komplexe Temperaturkompensationsverfahren nicht in allen Fällen eine solche Korrektur erzielen können [10]. Aus diesem Grund vergleicht man dielektrische Werte von Durchführungen

mit anderen Durchführungen oder festen Grenzwerten am besten mit Messungen bei derselben oder einer ähnlichen Temperatur.

Messungen bei Netzfrequenz an Durchführungen

Die Messung der Kapazität und des Verlustfaktors bei Netzfrequenz war jahrzehntelang eine sehr gängige Praxis bei Durchführungen. Eine Änderung der Kapazität weist auf einen Durchschlag zwischen den kapazitiven Belägen hin; eine Erhöhung des Verlustfaktors lässt auch auf andere Probleme, wie Wasser, Alterung, Verkohlungen oder fehlerhafte Kontakte schließen. IEEE- und IEC-Normen für Durchführungen schreiben die Messung des Verlustfaktors bei Raumtemperatur als Stückprüfung an neuen Durchführungen vor. Tabelle 1 zeigt die Grenzwerte bei Netzfrequenz gemäß IEC 60137 [11] und IEEE C57.19.01 [12] für unterschiedliche Durchführungstypen.

	Gießharzgetränk (RIP)	Ölgetränk (OIP)	Hartpapier (RBP)
$\tan \delta$ (Quelle IEC 60137)	< 0,7 %	< 0,7 %	< 1,5 %
Verlustfaktor (Quelle IEEE C57.10.01)	< 0,85 %	< 0,5 %	< 2 %
Typische Werte für neue Durchführungen	0,3 % - 0,4 %	0,2 % - 0,4 %	0,5 % - 0,6 %

Tabelle 1: Grenzwerte und typische Werte für den Verlustfaktor ($\tan(\delta)$) bei Netzfrequenz gemäß IEC 60137 und IEEE C57.19.01 bei $1,05 \text{ Um}\sqrt{3}$ und 20°C

Messungen von 15 Hz bis 400 Hz an Durchführungen

Die Messung der dielektrischen Eigenschaften erhöht insbesondere beim Verlustfaktor bei niedrigeren Frequenzen die Empfindlichkeit gegenüber Feuchte und Alterung. Abbildung 8 zeigt den Verlustfaktor für eine trockene und eine feuchte Durchführung zwischen 20 Hz und 400 Hz. Auch wenn der Unterschied bei Netzfrequenz und darüber sichtbar ist, so ist er doch bei niedrigeren Frequenzen am deutlichsten.

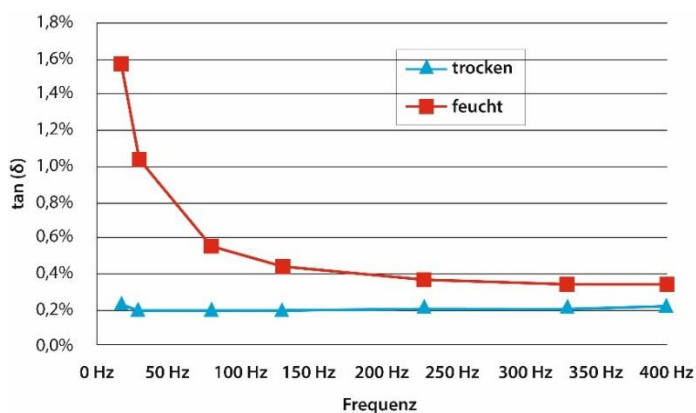


Abbildung 3: Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz bei einer trockenen und einer feuchten 33 kV-OIP-Durchführung bei 30°C (Daten aus Invalid source specified.)

Tabelle 2 zeigt die Grenzwerte bei unterschiedlichen Frequenzen der CIGRE-Empfehlung für die Wartung von Leistungstransformatoren [9].

	Harz imprägniert (RIP)		Weichpapier (OIP)		Hartpapier (RBP)	
Frequenz	neu	alt	neu	alt	neu	alt
15 Hz	< 0,6 %	< 0,7 %	< 0,5 %	< 0,7 %	< 0,7 %	< 1,5 %
50 Hz / 60 Hz	< 0,5 %	< 0,5 %	< 0,4 %	< 0,5 %	< 0,6 %	< 1,0 %
400 Hz	< 0,6 %	< 0,7 %	< 0,5 %	< 0,7 %	< 0,7 %	< 1,5 %

Tabelle 2: Indikative Grenzwerte des Verlustfaktors von Durchführungen bei 20 °C **Invalid source specified.**

Messungen mit variabler Spannung („Tip-Up-Test“) an Durchführungen

Messungen von Durchführungen bei unterschiedlichen Spannungen können Probleme wie fehlerhafte Kontakte von Messanschlüssen aufdecken. Bei einem solchen Problem verkleinert sich der Verlustfaktor mit höherer Spannung (Abbildung 9).

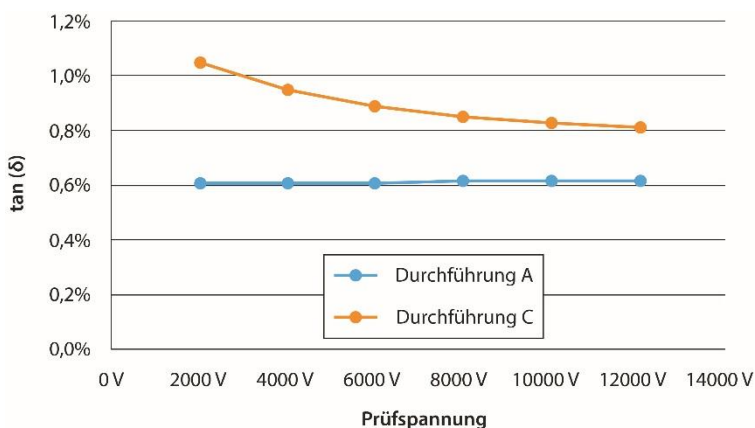


Abbildung 4: Verlustfaktor-Messungen von zwei 123 kV-RBP-Durchführungen desselben Typs bei unterschiedlichen Spannungen mit Kontaktproblemen am Messanschluss von Durchführung C (Daten aus **Invalid source specified.**)

Dielektrische Messungen in einem breiten Frequenzbereich an Durchführungen

Da der niedrige Frequenzbereich am empfindlichsten auf Wasser und Alterung reagiert, können dielektrische Messungen in einem breiten Frequenzbereich auch eingesetzt werden, um kleine Änderung im Wassergehalt von Durchführungen zu erfassen. Diese Art von Messung ist damit auch für neue Durchführungen und deren Qualitätskontrolle geeignet.

Dielektrische Messungen in einem breiten Frequenzbereich von ölgetränkten Durchführungen (OIP) ermöglichen auch eine Bewertung des absoluten Wassergehalts und zwar mit einem Verfahren, das der Bewertung von Leistungstransformatoren ähnelt [13]. Eine Bestimmung des absoluten Wassergehalts ist für andere Durchführungstypen wie RIP- oder RBP-Durchführungen nicht möglich, da die Datenbank nur für reine Öl-Zellulose-Isolierungen gültig ist [3]. Allerdings beeinflusst der Wassergehalt auch die dielektrischen Eigenschaften der betreffenden Isolierungssysteme. Änderungen können daher durch einen Vergleich unterschiedlicher Messungen ermittelt werden.

7 Fazit

Dielektrische Messungen helfen bei der Entdeckung unterschiedlicher Probleme an Transformatoren und Durchführungen. Unterschiedliche Arten dielektrischer Messungen ermöglichen eine Identifikation spezifischer Probleme (**Error! Reference source not found.**). Für die Isolierung von Transformatoren liefern dielektrische Messungen in einem breiten Frequenzbereich zum Beispiel nicht nur den absoluten Wassergehalt in der Zellulose-Isolierung, sondern auch die Ölleitfähigkeit. An Durchführungen kann ein „Tip-Up-Test“ mit steigender Spannung mögliche Kontaktprobleme ermitteln, die kaum durch andere Prüfungen aufgedeckt werden können. Mit den richtigen Prüfungen können Ingenieure Probleme an Leistungstransformatoren und Durchführungen frühzeitig ermitteln und entsprechende Wartungsmaßnahmen vor einem Ausfall vorschlagen.

Prüfbereich	... kann zur Ermittlung von ... eingesetzt werden	
	an Transformatoren	an Durchführungen
Netzfrequenz	allgemeiner Zustand	allgemeiner Zustand, Durchschläge zwischen kapazitiven Belägen, Identifizierung eines hohen Wassergehalts
15 Hz - 400 Hz	allgemeiner Zustand, Aussagen über die Ölleitfähigkeit	allgemeiner Zustand, Durchschläge zwischen kapazitiven Belägen, Identifizierung eines hohen Wassergehalts
Tip-Up-Prüfung (variable Spannung)	Probleme an den Durchführungen	Kontaktprobleme, dielektrische Durchschläge zwischen kapazitiven Belägen, allgemeiner Zustand
Messung in einem breiten Frequenzbereich	absoluter Wassergehalt, absolute Ölleitfähigkeit, allgemeiner Zustand	allgemeiner Zustand, absoluter Wassergehalt (nur OIP), Ermittlung des Einflusses von Wasser und Alterung, allgemeiner Zustand, Durchschläge zwischen kapazitiven Belägen,

Tabelle 3: Übersicht von erkennbaren Problemen durch unterschiedliche dielektrische Prüfungen

Verweise

- [1] M. Koch, Reliable Moisture Determination in Power Transformers, Sierke Verlag, 2008.
- [2] CIGRE, Technical Brochure 254: Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers, CIGRE, 2002.
- [3] M. Krueger and M. Koch, A fast and reliable dielectric diagnostic method to determine moisture in power transformers, in IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2008.
- [4] W. S. Zaengl, Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, 2003.
- [5] A. K. Jonscher, Dielectric relaxation in Solids, Chelsea Press, 1983.
- [6] W. S. Zaengl, Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 6, pp. 9-22, 2003.
- [7] CIGRE, Technical Brochure 414: Dielectric Response Diagnoses For Transformer Windings, 2010.
- [8] M. Krueger, A. Kraetge, M. Puetter and L. Hulka, New diagnostic tools for high voltage bushings, in CIGRE VI Workspot – international workshop on power transformers, Foz do Iguacu, Brazil, 2010.
- [9] CIGRE, Technical Brochure 445: Guide for Transformer Maintenance, 2011.
- [10] M. Puetter, I. Hong, M. Anglhuber, M. Krueger and M. Koch, New Diagnostic Tools for High Voltage Bushings by Considering the Temperature Dependency, in International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, Korea, 2014.
- [11] IEC 60137: Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V, 2008.
- [12] IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.
- [13] S. Raetzke, M. Koch, M. Krueger and A. Talib, Condition assessment of instrument transformers using Dielectric Response Analysis, in CIGRE paper B2: PS2, Paris, 2012.
- [14] U. Graevert, Dielectric Response Analysis of Real Insulation Systems, in Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), 2004.
- [15] T. Leibfried, A. J. Kachler, A. Kuchler, W. S. Zaengl, V. D. Houhanessian and B. Breitenbach, Ageing and Moisture Analysis of Power Transformer Insulation Systems, in CIGRE Session, Paris, 2002.

Autoren



Dr. Martin Anglhuber schloss 2007 das Studium in Elektrotechnik an der TU München ab. Von 2007 bis 2011 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik und Energieversorgung der TU München. Sein Forschungsgebiet, auf dem er auch 2012 promovierte, waren Polymer-Nanokomposite als Isoliermaterial für Hochspannungsgeräte. Ab 2012 war er bei OMICRON als Applikationsingenieur beschäftigt wo er Produktmanager im Bereich dielektrischer Diagnoseverfahren für Transformatoren ist. Er ist Mitglied im VDE, CIGRE und IEEE.



Dr. Michael Krüger ist Senior Engineer bei OMICRON. Er studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen und der Universität Kaiserslautern und machte 1976 seinen Abschluss (Dipl.-Ing.). 1990 erhielt er den Dokortitel Dr. techn. von der Universität Wien. Dr. Michael Krüger hat mehr als 25 Jahre Erfahrung in der Hochspannungstechnik und der Isolierungsdiagnose. Er ist Mitglied im VDE, CIGRE und IEEE.

OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 150 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Servicezentren auf allen Kontinenten bieten zudem ein breites Anwendungswissen und erstklassigen Kundensupport. All dies, zusammen mit einem starken Netz von Vertriebspartnern, ließ OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden.

Mehr Informationen, eine Übersicht der verfügbaren Literatur und detaillierte Kontaktinformationen unserer weltweiten Niederlassungen finden Sie auf unserer Website.