

Vorschlag zur Kalibrierung der UHF Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren

Proposal for Calibration of UHF Partial Discharge Measurement for Power Transformers

Martin Siegel, Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Stuttgart, Deutschland, martin.siegel@ieh.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Durch die mit der Kalibrierung nach IEC60270 einhergehende Vergleichbarkeit von Messergebnissen hat sich die scheinbare Ladung der elektrischen TE-Messung als eine anerkannte Größe etabliert, die als Abnahmepegel in Werksabnahmeprüfungen verwendet wird. Um auch für die UHF Methode eine solche Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen UHF Messsystemen herzustellen, wird in diesem Beitrag eine Kalibriermethode vorgeschlagen, die durch die Berücksichtigung des Antennenfaktors die Charakteristik von UHF Sensoren miteinbezieht. Durch diese Vergleichbarkeit besteht für die UHF Methode die gleiche Voraussetzung um zu einem anerkannten Prüfkriterium zu werden und die elektrische TE-Messung zu unterstützen. Da sie weniger empfindlich gegen externe Störer und TE benachbarter Betriebsmittel (bspw. Korona) ist, eignet sich die UHF Methode auch für Monitoring und Diagnosemessungen vor-Ort. Aus diesem Grund bietet sich die UHF Methode auch für vergleichende TE-Messungen vor und nach dem Transport vom Werk zum Kunden an. Das vorgeschlagene UHF Kalibrierverfahren wird mit der Kalibrierung der elektrischen TE-Messung verglichen und es zeigt sich, dass in beiden Fällen ein unbekannter Signalpfad im Transformator unvermeidlich bleibt. Hier ist weder die UHF Methode, noch die elektrische TE-Messung im Vorteil. Als Vorbedingung für eine UHF Kalibrierung muss die Empfindlichkeit von UHF Sensoren bekannt sein. Hierfür wird eine ölgefüllte GTEM Zelle vorgestellt, die es erlaubt den Antennenfaktor von UHF Sensoren direkt in Transformatoröl im vollen UHF Frequenzbereich zu bestimmen. Da die Kalibrierung der UHF nicht ausschließen kann, dass der UHF Sensor zum Transformatorinneren beispielweise durch ein Steigrohr abgeschirmt ist, empfiehlt sich zusätzlich zur Kalibrierung die Durchführung eines Performance Checks mit einer zweiten sendenden UHF Antenne.

Abstract

The reliability of electrical energy networks depends on the quality and reliability of its electrical equipment, e.g. power transformers. Local failures inside their insulation may lead to catastrophic breakdowns and may cause high outage and penalty costs. To prevent these destroying events, power transformers can be tested on partial discharge (PD) activity before commissioning and monitored during service. In this contribution, a calibration procedure for the ultra-high frequency (UHF) method is proposed as it is necessary to ensure reproducibility and comparability of UHF measurements. Afterwards, a calibrated UHF method can be introduced supplementary to IEC60270 in acceptance tests of power transformers. This contribution compares the calibration procedures of the conventional electric method (IEC60270) and the electromagnetic method. A characterization of UHF sensors by the antenna factor (AF) is a precondition for the UHF calibration procedure. To provide profound knowledge of the equipment, the AF of the UHF sensor is determined under inside transformer conditions. To meet these conditions, an oil-filled GTEM cell is used for correct permittivity. Additional to the calibration procedure, the performance of the installed sensor has to be determined. The evaluation is based on the idea of transmitting electromagnetic waves through the transformer tank from one UHF sensor to another which is called performance check procedure.

1 Einleitung

Der zuverlässige Betrieb von Leistungstransformatoren ist für die Versorgungssicherheit des Stromnetzes wichtig, da Ausfälle zu Folgeschäden und entsprechend hohen Kosten führen können. Schäden an der Isolation eines Transformators müssen deshalb frühzeitig erkannt werden, wofür sich unter anderem die TE-Messung eignet [1]. Verschiedene diagnostische Methoden haben sich entsprechend der Anforderungen bei vor-Ort- und Prüffeldmessungen bereits etabliert. Im Wesentlichen gibt es die folgenden

drei verschiedene Arten des TE-Monitorings: indirekt durch die Messung von gelösten Fehlgasen (DGA), direkt mit der elektrischen TE-Messung gemäß IEC60270 [2] und direkt durch die elektromagnetische Messung im Ultrahochfrequenzbereich (UHF: 300 MHz - 3 GHz) [12]. Die Messung von akustischen TE-Emissionen wird hauptsächlich zur Ergänzung bei Diagnosemessungen für die Lokalisierung von TE verwendet [7] und in diesem Beitrag nicht betrachtet. Da die DGA nur einen Indikator für das Vorhandensein von TE liefert, gibt es eine wachsende Zahl von Transformatoren, die direkt auf TE überwacht werden. Welche Bedeutung die TE-Messung hat,

wird durch die standardisierte elektrische Messmethode gemäß IEC60270 gezeigt, die für Abnahmeprüfungen von Transformatoren im Werk (FAT: factory acceptance tests) erforderlich ist. Hier hat sich die scheinbare Ladung Q_{IEC} als Prüfpegel und somit als Faktor für die Qualität des Transformators durchgesetzt.

Die UHF TE-Messung wurde anfangs für gasisolierte Schaltanlagen (GIS) [3] verwendet und wird mittlerweile vermehrt bei Leistungstransformatoren angewandt. Am Transformator erfordert das Verfahren UHF-Antennen im Inneren des Tanks, weshalb die Cigré Arbeitsgruppe WG A2-27 in Broschüre 343 DN50 Schieber oder dielektrische Fenster für den Einbau von UHF-Sensoren empfiehlt [4]. Die UHF Methode hat sich bereits als Trigger für die akustische Lokalisierung von TE [7], [14] und für vor-Ort/online Diagnosen [8] etabliert und ist auch für dauerhaftes TE-Monitoring an Transformatoren geeignet [9]. Die UHF Methode ist gewöhnlich vorteilhaft bei vor-Ort TE-Messungen, da sie elektromagnetisch gegen externe Störungen durch den geerdeten Transformatorkegel abgeschirmt ist [5]. Diese Eigenschaft könnte der UHF Methode zu verschiedenen Anwendungen verhelfen, wie z.B. der Vergleich von relativ ungestörten TE-Messungen im Prüffeld (FAT) mit TE-Messungen vor-Ort in gestörter Umgebung nach Transport und Installation, etwa als vor-Ort Abnahmetest (SAT: site acceptance test) [6]. Um die elektrische TE-Messung zu ergänzen und auch selbst ein anerkannter Qualitätsprüfungsfaktor zu werden, muss die UHF-Methode zunächst ihre Zuverlässigkeit nachweisen. Es fehlt bisher ein Kalibrierungsverfahren, das UHF-Sensoren und Messsysteme zueinander vergleichbar macht, weshalb die UHF-Methode nicht als Kriterium für Abnahmetests angewandt wird. Im Gegensatz dazu gibt es für die elektrische TE-Messung eine Kalibrierungsprozedur, die den Einfluss des Verhältnisses zwischen der Kapazität des Prüflings und des Koppelkondensators ausgleicht. Die damit verbundene Vergleichbarkeit von elektrischen TE-Messsystemen hat zu einem Abnahmepiegel bei Transformator Abnahmeprüfungen geführt, obwohl die tatsächliche TE-Ladung trotz Kalibrierung unbekannt bleibt [11].

2 Kalibrierung der UHF Methode

Um UHF Messungen untereinander vergleichbar zu machen, fehlt eine Kalibrierung die Unterschiede in der verwendeten Messtechnik (Sensoren, Verstärker, Kabel, Messsystemen) ausgleichen kann. Dieser Beitrag zeigt einen Vorschlag zur Kalibrierung der gesamten UHF Messkette inklusive der Sensorensitivität, vergleichbar zur Kalibrierung der elektrischen TE-Messung. Für diese zweistufige Kalibrierung wird der Antennenfaktor (AF) des UHF Sensors verwendet, der damit als Vorbedingung für eine Kalibrierung der UHF-Messtechnik bekannt sein muss. Zusätzlich wird ein Performance Check mit einem zweiten UHF Sensor im Transformator empfohlen, da die Kalibrierung den Signalausbreitungsweg im Transformator nicht mit einbeziehen kann.

2.1 Kalibrierung des UHF Messgerätes und der Messkabel

Ein bekannter Kalibrierimpuls wird am Messkabel ohne angeschlossenen UHF Sensor eingespeist um das verwendete Messsystem samt Kabeldämpfung zu kalibrieren, wie es **Bild 1** zeigt.

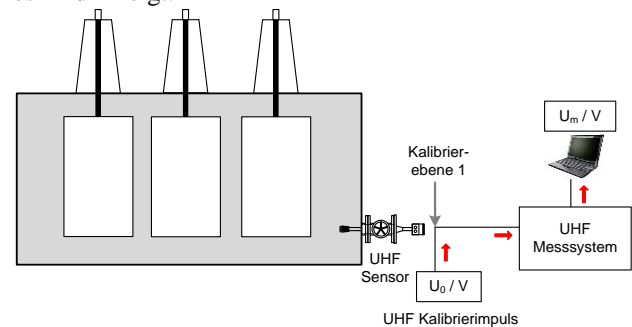


Bild 1 Kalibrierung des UHF Messgerätes/-kabel

Aus dieser Messung kann der Kalibrierfaktor K_1 berechnet werden:

$$K_1 = \frac{U_0}{U_m} \quad (1)$$

2.2 Kalibrierung des UHF Sensors

Um die Charakteristik des verwendeten UHF Sensors in die Kalibrierung zu integrieren, muss der AF(f) des verwendeten UHF Sensors bekannt sein. Er kann beispielsweise in einer Messzelle, wie sie in Kapitel 3 beschrieben ist, bestimmt werden. Der AF erlaubt es die Kalibrierebene vom Einspeisepunkt des UHF Kalibrierimpulses (siehe **Bild 1**) an die UHF Antenne in den Transformator hinein zu verschieben (siehe **Bild 2**). Um einen korrekten Kalibrierfaktor zu erreichen, muss der AF des Sensors bei der gleichen Einschubtiefe gemessen werden, bei der er auch im Transformator installiert wird.

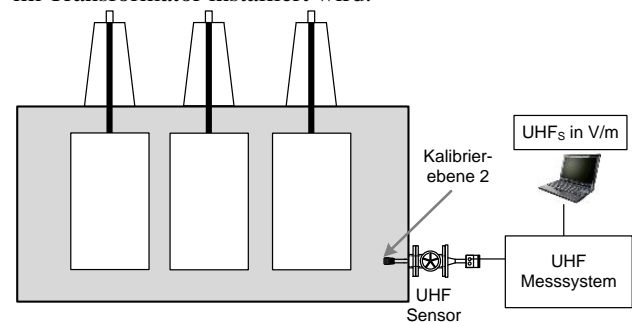


Bild 2 Miteinbeziehen des UHF Sensors in die Kalibrierung

2.2.1 Breitbandige UHF Messung

Für eine breitbandige Messung von UHF Impulsen müsste der Impuls im Frequenzbereich mit dem frequenzabhängigen AF(f) bewertet werden. Dies ist jedoch bei den meisten TE Messsystemen nicht vorgesehen und wird deshalb hier durch eine vereinfachte Version des Antennenfaktors AF_s ersetzt. Um den Kalibrierprozess einfach zu gestalten, kann der AF(f) auf einen frequenzunabhängigen Faktor K_2 reduziert werden, welcher die am meisten

auf tretenden UHF Frequenzen mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt. Hierfür wird vorgeschlagen den mittleren Antennenfaktor (mean AF(f)) im Frequenzbereich von 300 MHz bis 1 GHz zu verwenden.

$$AF_S = \text{mean}_{300\text{MHz} \leq f \leq 1\text{GHz}} AF(f) \quad (2)$$

Der daraus resultierende vereinfachte AF_S kann in seiner delogarithmierten Form K_2 dazu benutzt werden, breitbandige UHF Signale im Zeitbereich zu korrigieren.

$$K_2 = 10^{\frac{AF_S}{20}} \quad (3)$$

In **Bild 3** ist ein Beispiel zu sehen, wie ein $AF(f)$ in den draus resultierenden AF_S überführt werden kann.

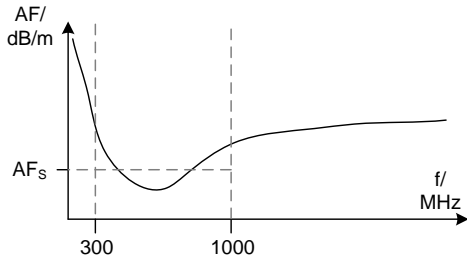


Bild 3 Beispiel für einen vereinfachten AF

2.2.2 Schmalbandige UHF Messung

Der Schritt der Vereinfachung des $AF(f)$ entfällt bei einem schmalbandigen UHF Messsystem. Hier kann stattdessen aus der $AF(f)$ Kurve der entsprechenden $AF(f_{center})$ an der Mittenfrequenz der Messung herangezogen werden.

2.3 Kalibrierung des Gesamtsystems

Um die Kalibrierung des kompletten Messsystems abzuschließen wird der gesamte Kalibrierfaktor K_{UHF} berechnet:

$$K_{UHF} = K_1 \cdot K_2 \quad (4)$$

Ein Impuls U_m der durch ein Messsystem gemessen wird, kann nun durch den Kalibrierfaktor K_{UHF} korrigiert werden. Dadurch wird ein zur von der TE emittierten elektrischen Feldstärke proportionaler Wert UHF_S [V/m] im Messsystem angezeigt.

$$UHF_S = K_{UHF} \cdot U_m \quad (5)$$

Dieser Wert kann als „scheinbares UHF Signal“ (UHF_S) entsprechend der Namensgebung aus der elektrischen TE-Messung „scheinbare Ladung“ bezeichnet werden. Er wird scheinbar genannt, da sich zwar aus diesem Wert kein direkter Rückschluss auf das tatsächlich abgestrahlte UHF Signal erlaubt, jedoch die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen UHF Messsystemen (inkl. Sensor und Kabel) durch ihre Kalibrierung erreicht ist.

Aus Gründen der Vereinfachung wird hier ein Verstärker im Messsystem nicht mit betrachtet. Sollte ein Verstärker am Sensor verwendet werden, kann dieser direkt mit in Kalibrierschritt 1 durch den eingespeisten Impuls miteinbezogen werden oder der frequenzabhängige Verstärkungsfaktor $G(f)$ wird behandelt wie der $AF(f)$.

2.4 Vergleich zwischen elektrischer Kalibrierung und UHF Kalibrierung

Oft wird Kalibrierung der UHF Methode als Synonym für die Relation der gemessenen UHF Antennenspannung in mV zu der scheinbaren Ladung in pC der elektrischen TE-Messung verwendet. Da auch die scheinbare Ladung keinen Rückschluss auf die tatsächlich an der Fehlstelle umgesetzte Ladung oder Energie erlaubt, ist es nicht zielführend diesen Zusammenhang zu suchen. Außerdem zeigen verschiedene Untersuchungen, dass diese Relation zwar im einfachen Laboraufbau nachgewiesen werden kann, es diese jedoch bei komplexeren elektrischen Betriebsmitteln nicht gibt, wie beispielsweise dem Transformator, wo der Ort der TE unbekannt ist [12].

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, bleibt der Signalpfad innerhalb des Transformators trotz Kalibrierung unbekannt. Sowohl die elektrische TE-Messung, als auch die UHF Methode können nur bis zum Anschlusspunkt an den Transformator kalibriert werden. Das folgende **Bild 4** zeigt beide Kalibrierverfahren im direkten Vergleich. Dargestellt ist, welche Transferfunktionen (TF) bei der Kalibrierung berücksichtigt werden können und welche unbekannt bleiben.

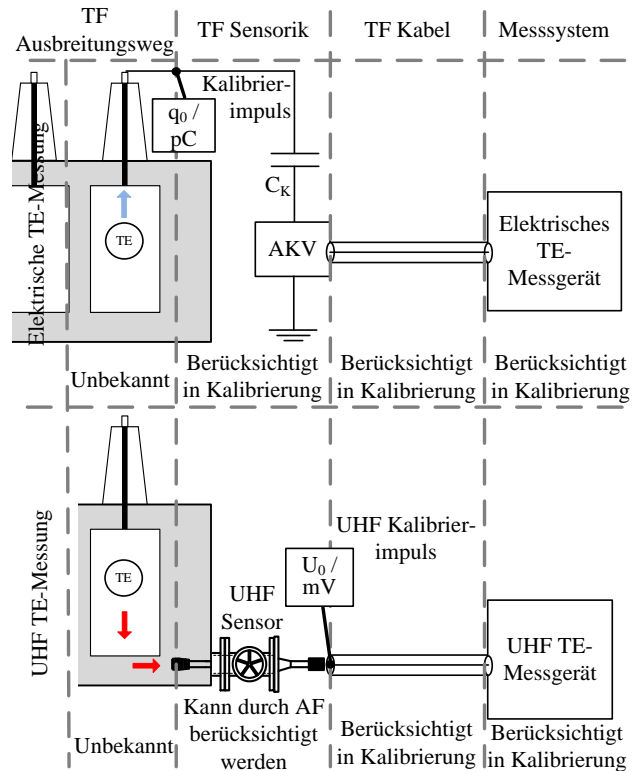


Bild 4 Vergleich der Kalibrierung von elektrischer TE-Messung nach IEC60270 und der UHF Kalibrierung, wie sie in diesem Beitrag vorgeschlagen wird

Da die Ausbreitungsmechanismen der elektrischen TE-Messung und der UHF Methode grundlegend verschieden sind, sind es auch die Dämpfungen der Signale. Bei der elektrischen Messung handelt es sich um eine leitungsgebundene Ausbreitung im Wicklungsleiter und kapazitivem Übersprechen zwischen den Windungen. Im Gegensatz dazu findet die Ausbreitung der UHF Signale gestrahlt im gesamten Transformator statt, wo sie gedämpft

werden und auch an metallischen Teilen reflektiert werden können. In beiden Fällen bleibt die TF im Transformator unbekannt und kann daher nicht im Kalibrierprozess integriert werden. Bei der elektrischen TE-Messung wird die TF des „Sensors“ bestehend aus Koppelkondensator C_K und Ankoppelvierpol AKV durch die Kalibrierung mit einem bekannten Ladungsimpuls q_0 miteinbezogen. Bei der UHF Kalibrierung ist dies nicht möglich. Aus diesem Grund muss die TF des Sensors (der AF) zusätzlich berücksichtigt werden um den Einfluss unterschiedlicher Antennen in die Kalibrierung mit einschließen zu können.

2.5 Kalibrierung für UHF Messsysteme im Frequenzbereich

Die vorangegangenen Abschnitte zeigen eine Kalibrierung von UHF Messsystemen im Zeitbereich. Wird eine Frequenzbereichsmessung mit einem Spektrumanalysator oder ähnlichem Gerät durchgeführt können alle frequenzabhängigen $TF(f)$ berücksichtigt werden: $AF(f)$ des UHF Sensors, $Gain(f)$ eines Verstärkers, Dämpfung(f) des Kabels und ein kalibriertes Messgerät selbst. Vereinfachungen und ein Kalibrierimpuls sind nicht nötig. Da die meisten Messgeräte bzw. UHF Monitoringsysteme allerdings nicht im Frequenzbereich arbeiten und oft TF wie die Kabeldämpfungen(f) unbekannt sind, ist eine Kalibrierung auf diese Weise allerdings nur selten möglich.

2.6 Performance Check zur Überprüfung der Empfangsantenne

Die Kalibrierung trifft keine Aussage darüber, ob die UHF Antenne Signale aus dem Inneren des Transformators empfangen kann. Daher sollte zusätzlich zum beschriebenen Kalibrierprozess bei jeder Installation eines UHF Messsystems auch ein Performance Check mit einer zweiten, sendenden UHF Antenne im Transformator erfolgen. Als Negativbeispiele können dann ein Steigrohr am Ölschieber oder Prallbleche vor dem Sensor (elektromagnetischer Abschirmung des Sensors) erkannt werden. Im Vergleich zur elektrischen TE-Messung wäre es der höchst unwahrscheinliche Fall, dass die Durchführung intern nicht angeschlossen wäre und so keine Ausbreitung der TE-Impulse bis zum Koppelkondensator zustande kommt, obwohl die Kalibrierung erfolgreich war.

3 Charakterisierung von UHF Sensoren

Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt, muss als Vorbedingung für die UHF Kalibrierung eine Charakterisierung des UHF Sensors erfolgen. Hierfür wird der AF des Sensors in einem speziellen Testsetup bestimmt.

3.1 Antennenfaktor

UHF Sensoren sind passive Antennen, die durch ihre spezielle Bauform in Leistungstransformatoren eingebracht werden können, siehe **Bild 5**.



Bild 5 UHF Sensor für DN 80 Standard Ölschieber

Die Empfindlichkeit einer Antenne hängt von ihrem Design ab. Antennen sind durch verschiedene Antennenparameter wie zum Beispiel den Antennengewinn oder die Antennenwirkfläche charakterisiert. Bei Antennen wie Monopolen oder Dipolen wird die effektive Antennenhöhe bzw. der Antennenfaktor (AF) zur Charakterisierung verwendet. Dieser ist definiert als:

$$AF(f) = \frac{E(f)}{U(f)} \quad (6)$$

wobei $U(f)$ der Ausgangsspannung der Antenne und $E(f)$ der elektrischen Feldstärke der einfallenden elektromagnetischen Welle entspricht. Die effektive Antennenhöhe ist als inverser AF definiert. In früheren Untersuchungen wurden luftgefüllte TEM-Zellen verwendet, mit denen der AF bis etwa 950 MHz bestimmt werden kann [12]. Aufgrund des unterschiedlichen ϵ_r , gilt der in Luft ($\epsilon_{r, \text{Luft}} = 1$) vermessene AF nicht für Sensoren in Transformatoröl ($\epsilon_{r, \text{Öl}} = 2,2$) oder muss zumindest umgerechnet werden [12].

3.2 Ölgefüllte GTEM-Zelle

Für die Bestimmung des AF von UHF Sensoren für Leistungstransformatoren ist ein spezieller Aufbau ohne externe Störeinkopplungen und ohne interne Reflexionen von elektromagnetischen Wellen nötig, der mit Transformatoröl gefüllt ist [6]. Hierfür wurde eine Transversal-Elektro-Magnetische-Zelle (GTEM-Zelle) aufgebaut, deren Geometrie sich aufgrund des unterschiedlichen ϵ_r von typischen mit Luft gefüllten Zellen unterscheidet [13]. Eine GTEM-Zelle (**Bild 6**) ist ein pyramidenähnlicher Aufbau, der einen koaxialen Leiter bis zum rückseitigen Abschluss aufspannt. Die Zelle hat über die gesamte Länge einen Wellenwiderstand von 50Ω um Reflexionen zu vermeiden. In einer solchen Zelle wird mit einem definierten elektromagnetischen Feld auf einen Prüfling (UHF Sensor) eingestrahlt, ohne von der Umgebung beeinflusst zu werden. Innerhalb der Zelle wird ein Testvolumen mit quasi-homogenem elektrischem Feld definiert, in dem die Messungen stattfinden.

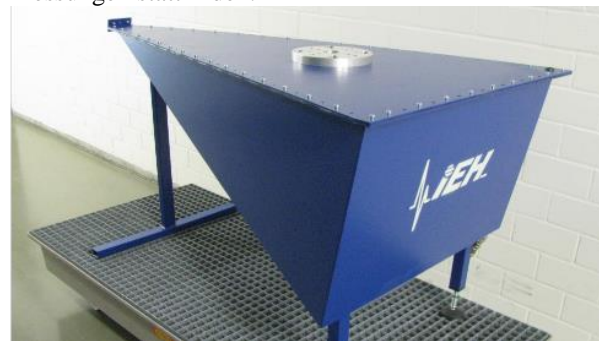


Bild 6 GTEM-Zelle mit Aufnahme für UHF Sensoren

3.3 Antennenfaktorbestimmung mit GTEM-Zelle

Der AF eines UHF Sensors kann direkt durch die Messung des Transmissionsfaktors S_{21} mit einem Netzwerkanalysator (VNA: Vector Network Analyzer) an der GTEM-Zelle bestimmt werden. Die **Bild 7** zeigt den kompletten Messaufbau. Der UHF Sensor wird an der dafür vorgesehenen Öffnung in das Prüfvolumen eingeführt. Der VNA regt mit seinem Port 1 die Zelle selbst an und misst mit Port 2 die von der UHF Antenne gemessene Antennenspannung im Frequenzbereich. Da das elektrische Feld im Prüfvolumen bekannt ist, kann der AF(f) direkt aus dem S_{21} Parameter berechnet werden.

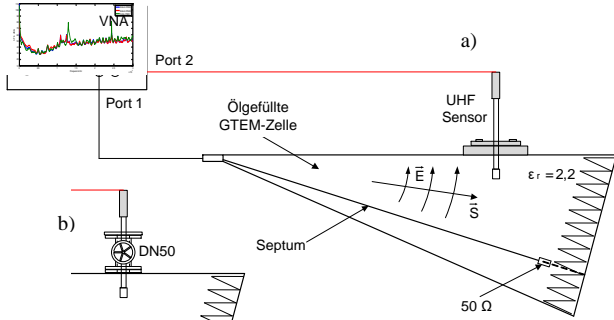


Bild 7 Messaufbau zur AF Bestimmung mit GTEM-Zelle und VNA

In **Bild 8** sind zwei AF aus den Messsetups a) und b) aus **Bild 7** zu sehen. Bei a) ist der UHF Sensor direkt und bei b) über einen DN50 Schieber auf der GTEM-Zelle montiert.

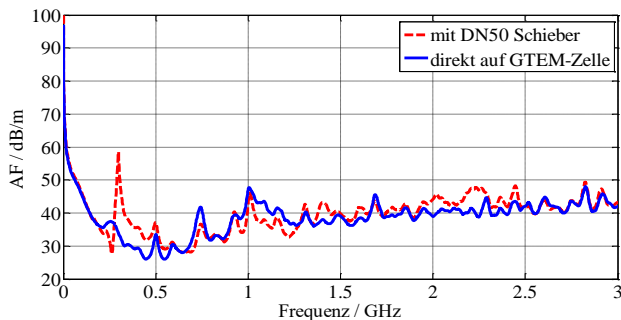


Bild 8 AF von UHF Sensor mit und ohne DN50 Schieber

Der Fall b) inkludiert die Eigenschaften des DN50 Flansches im AF, was dem realen Einsatz im Transformator entspricht. Hauptsächlich wird der AF durch den Flansch im Bereich von 300 MHz beeinflusst, hier entsteht eine Resonanzstelle. Der vermessene UHF Sensor hat seine höchste Empfindlichkeit im Bereich von 200 MHz bis 1 GHz. Hier ist anzumerken, dass je niedriger der AF, desto besser ist die Empfindlichkeit der Antenne. Die hier gezeigten AF sind bei einer Einschubtiefe von 50 mm gemessen, da dies ein üblicher Wert bei der Installation am Transformator ist. Der UHF Sensor darf nicht mehr im Rohrstück des Flansches sein und darf aber auch nicht zu weit in den Transformator hineinreichen, da genug Abstand zu spannungsführenden Teilen eingehalten werden muss.

4 Untersuchung zur Einschubtiefe

Ein UHF Sensor wird wie in **Bild 7 b)** über einen DN50 Flansch an der GTEM-Zelle montiert und bei unterschiedlichen Einschubtiefen vermessen: **Bild 9** zeigt die gemessenen AF den Sensorpositionen:

Pos. 1 (0 mm): Die Antenne ist noch im DN50 Schieber und ragt nicht in den Transformator herein.

Pos. 2 (50 mm): Die Antenne ist 50 mm in die Zelle/den Transformator eingeschoben. Dies ist der gewünschte Installationsort.

Pos. 3 (100 mm), Pos. 4 (150 mm), Pos. 5 (200 mm): Die Antenne wird weiter eingeschoben um eine bessere Empfindlichkeit zu erreichen.

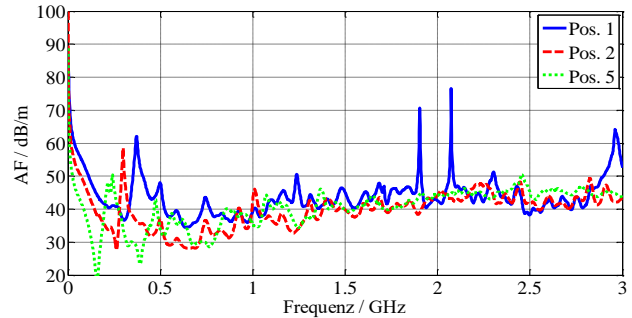


Bild 9 AF bei unterschiedlichen Einschubtiefen

Speziell im Frequenzbereich $f < 1$ GHz in dem die UHF Sensoren am empfindlichsten sind, wirkt sich die Einschubtiefe stark auf die Empfindlichkeit aus. Pos. 1 zeigt einen im Schnitt etwa 10 dB höheren AF (unempfindlicher) als die bevorzugte Pos. 2. Tieferes Einschubtiefen verbessert die Empfindlichkeit nur noch unwesentlich. Dies bestätigen auch praktische Beobachtungen bei UHF Messungen an Transformatoren, wie sie **Bild 10** beispielhaft zeigt. Hierfür wird ein künstlicher UHF Impuls mit zwei UHF Sensoren an unterschiedlichen Flanschen an einem Transformator mit einem digitalen Speicheroszilloskop gemessen. Der künstliche Impuls wird über einen dritten UHF Sensor in den Transformator eingeschleust. Ab Pos. 3 ist keine wesentliche Erhöhung des Pegels bzw. keine Verbesserung der Empfindlichkeit mehr zu erkennen.

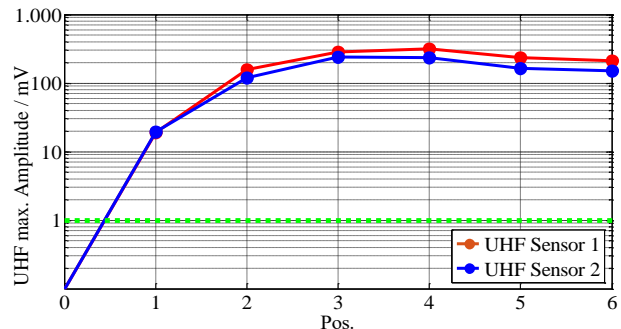


Bild 10 max. UHF Amplitude bei unterschiedlichen Einschubtiefen und konstantem künstlichem Impuls

5 Zusammenfassung

Durch die mit der Kalibrierung nach IEC60270 einhergehende Vergleichbarkeit von Messergebnissen hat sich die scheinbare Ladung in der elektrischen TE-Messung als

eine anerkannte Größe etabliert, die als Abnahmepegel für FAT verwendet wird. Um auch für die UHF Methode eine solche Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen UHF Messsystemen herzustellen, wird in diesem Beitrag eine mögliche Kalibriermethode beschrieben, die durch die Berücksichtigung des AF die Charakteristik von UHF Sensoren miteinbezieht. Zunächst wird ein bekannter Kalibriepuls in das Messkabel eingespeist und der gemessene Pegel am Messsystem angeglichen. Dann wird bei der UHF Messung ein vereinfachter AF verwendet, um die Kalibrierebene in den Transformator zu verschieben und die Empfindlichkeit des Sensors mit in die Kalibrierung einzubeziehen. Dieser vereinfachte AF kann für eine schmalbandige UHF Messung direkt aus der frequenzabhängigen AF Kurve abgelesen werden oder muss bei einer breitbandigen Messung durch eine Vereinfachung der AF(f) Kurve bestimmt werden.

Durch die Möglichkeit zur Kalibrierung der UHF Methode und der damit einhergehenden Vergleichbarkeit der Messungen ist die Voraussetzung geschaffen, die UHF Methode zu einer anerkannten und unterstützenden Messung zur Qualitätssicherung bei FATs weiter zu entwickeln. Weiterhin eignet sich die UHF Methode besonders für Monitoring und Diagnosemessungen vor-Ort, da sie weniger empfindlich gegen externe Störer und TE benachbarter Betriebsmittel (bspw. Korona) ist. Aus diesem Grund bietet sich die UHF Methode für vergleichende TE-Messungen vor und nach dem Transport vom Werk zum Betriebsort an. Die Ergebnisse der FAT können bei einer vor-Ort Abnahmeprüfung (SAT) bestätigt werden und auch im Laufe der Betriebsjahre vergleichbar gemessen werden, auch durch unterschiedliche Messsysteme.

Das vorgeschlagene UHF Kalibrierverfahren wird mit der Kalibrierung der elektrischen TE-Messung verglichen und es zeigt sich, dass in beiden Fällen ein unbekannter Signalpfad im Transformator unvermeidlich bleibt. Hier ist weder die UHF Methode, noch die elektrische TE-Messung im Vorteil.

Als Vorbedingung für eine UHF Kalibrierung muss die Empfindlichkeit von UHF Sensoren bestimmt werden. Hierfür wird eine ölgefüllte GTEM Zelle vorgestellt, die es erlaubt den AF von UHF Sensoren direkt in Transformatoröl im vollen UHF Frequenzbereich zu bestimmen. Bei der Verwendung des AF von UHF Sensoren ist darauf zu achten, dass der AF in der Messzelle immer genau bei derselben Einschubtiefe gemessen, wie er auch später am Transformator eingesetzt wird, was durch eine Untersuchung zur Einschubtiefe gezeigt wird.

Da die Kalibrierung der UHF nicht ausschließen kann, dass der UHF Sensor zum Transformatorinneren etwa durch ein Steigrohr abgeschirmt ist, empfiehlt sich zusätzlich zur Kalibrierung auch die Durchführung eines Performance Checks mit einer zweiten sendenden UHF Antenne.

Literatur

- [1] J. Fuhr, „Procedure for Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers“ IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, No. 5, Vol.12, 2005.
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC), „IEC 60270 High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements“, Geneva, Switzerland, 2000.
- [3] CIGRE TF 15/33.03.05, „PD Detection Systems for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method“, International Council on Large Electric Systems, Electra, No. 183, 1999.
- [4] CIGRE WG A2.27, „Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers“, in Cigre Brochure 343.
- [5] M. Judd, „Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 2: Field Experience“, IEEE Electrical Insulation Magazine, No.3, Vol. 21, 2005.
- [6] S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Beltle, M. Reuter, „Suitability of Ultra High Frequency Partial Discharge Measurement for Quality Assurance and Testing of Power Transformers“, in CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, Zurich, Switzerland, 2013.
- [7] S. Coenen, „UHF and Acoustic Partial Discharge Localisation in Power Transformers“, in International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Hannover, Germany, 2011.
- [8] CIGRE WG D1.33, „Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements“, International Council on Large Electric Systems, Paris, France, 2010.
- [9] M. D. Judd, „Power Transformer Monitoring Using UHF Sensors: Installation and Testing“, in IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, USA, 2000.
- [10] S. Okabe, G. Ueta, H. Wada, „Partial discharge signal propagation characteristics inside the winding of gas-filled power transformer - study using the equivalent circuit of the winding model“, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011.
- [11] M. Siegel, S. Tenbohlen, „Comparison between Electrical and UHF PD Measurement concerning Calibration and Sensitivity for Power Transformers“, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Jeju, Korea, 2014.
- [12] S. Coenen, „Measurements of Partial Discharges in Power Transformers using Electromagnetic Signals“, Dissertation Universität Stuttgart, Books on Demand GmbH, ISBN 978-3-84821-936-0, 2012.
- [13] M. Siegel, S. Tenbohlen, „Design of an Oil-filled GTEM Cell for the Characterization of UHF PD Sensors“, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Jeju, Korea, 2014.
- [14] S. Tenbohlen, A. Pfeffer, S. Coenen, „On-site Experiences with Multi-Terminal IEC PD Measurements, UHF PD Measurements and Acoustic PD Localisation“, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, California, USA, June 6-10, 2010, Proceedings of the ISEI, Paper No. 095