

# Kalibrierung von UHF TE-Messsystemen an Leistungstransformatoren

**Martin Siegel**  
Universität Stuttgart  
martin.siegel@ieh.uni-stuttgart.de  
Germany

**Sebastian Coenen**  
GE Grid Solutions  
sebastian.coenen@ge.com  
Germany

**Stefan Tenbohlen**  
Universität Stuttgart  
stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de  
Germany

## 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 bestehen für die UHF Methode die gleichen Voraussetzungen 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.

## 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] 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 Transformator-Kessel 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-Messungen 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 Abnahmepegel bei Transformator Abnahmeprüfungen geführt, obwohl die tatsächliche TE-Ladung trotz Kalibrierung unbekannt bleibt [11].

## 2 VORSCHLAG ZUR KALIBRIERUNG DER UHF METHODE

Um UHF Messungen 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 Sensitivität, 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 Abbildung 1 zeigt.

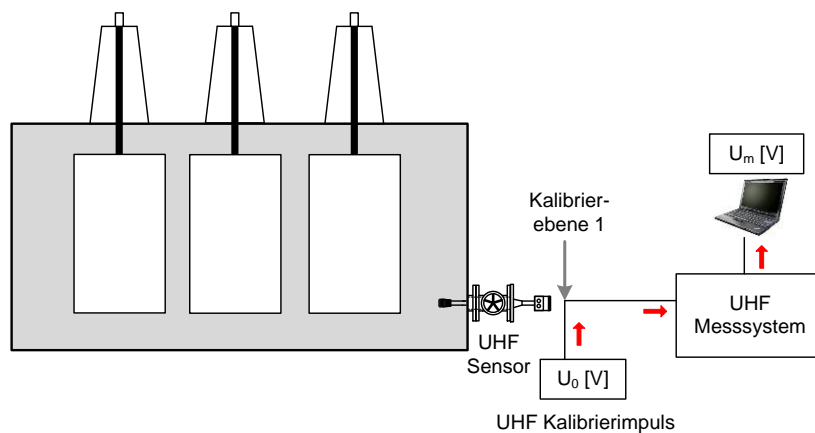


Abbildung 1 Kalibrierung des UHF Messgerätes und der Messkabel

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 Kalibrierenebene vom Einspeisepunkt des UHF Kalibrierimpulses (siehe Abbildung 1) an die UHF Antenne in den Transformator hinein zu verschieben (siehe Abbildung 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.

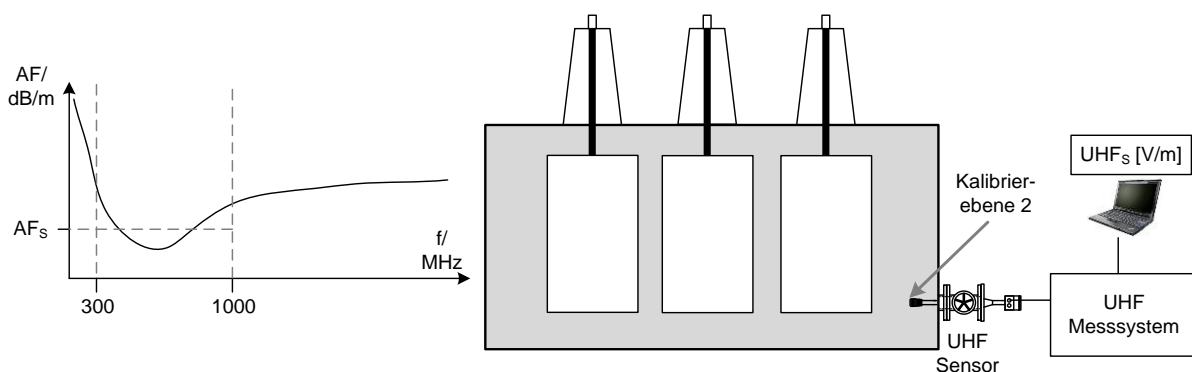


Abbildung 2 Miteinbeziehen des UHF Sensors in Kalibrierung bei breitbandiger Messung durch einen vereinfachten Antennenfaktor

### 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 auftretenden 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.

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

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 Abbildung 2 ist ein Beispiel zu sehen, wie ein  $AF(f)$  in den daraus resultierenden  $AF_S$  überführt werden kann. Außerdem ist die neue Kalibrierebene nach diesem Schritt eingezeichnet.

### 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 [mV] zu der scheinbaren Ladung [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.

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. Die folgende Abbildung 3 zeigt beide Kalibrierverfahren im direkten Vergleich. Dargestellt ist, welche Transferfunktionen (TF) bei der Kalibrierung berücksichtigt werden können und welche unbekannt bleiben.

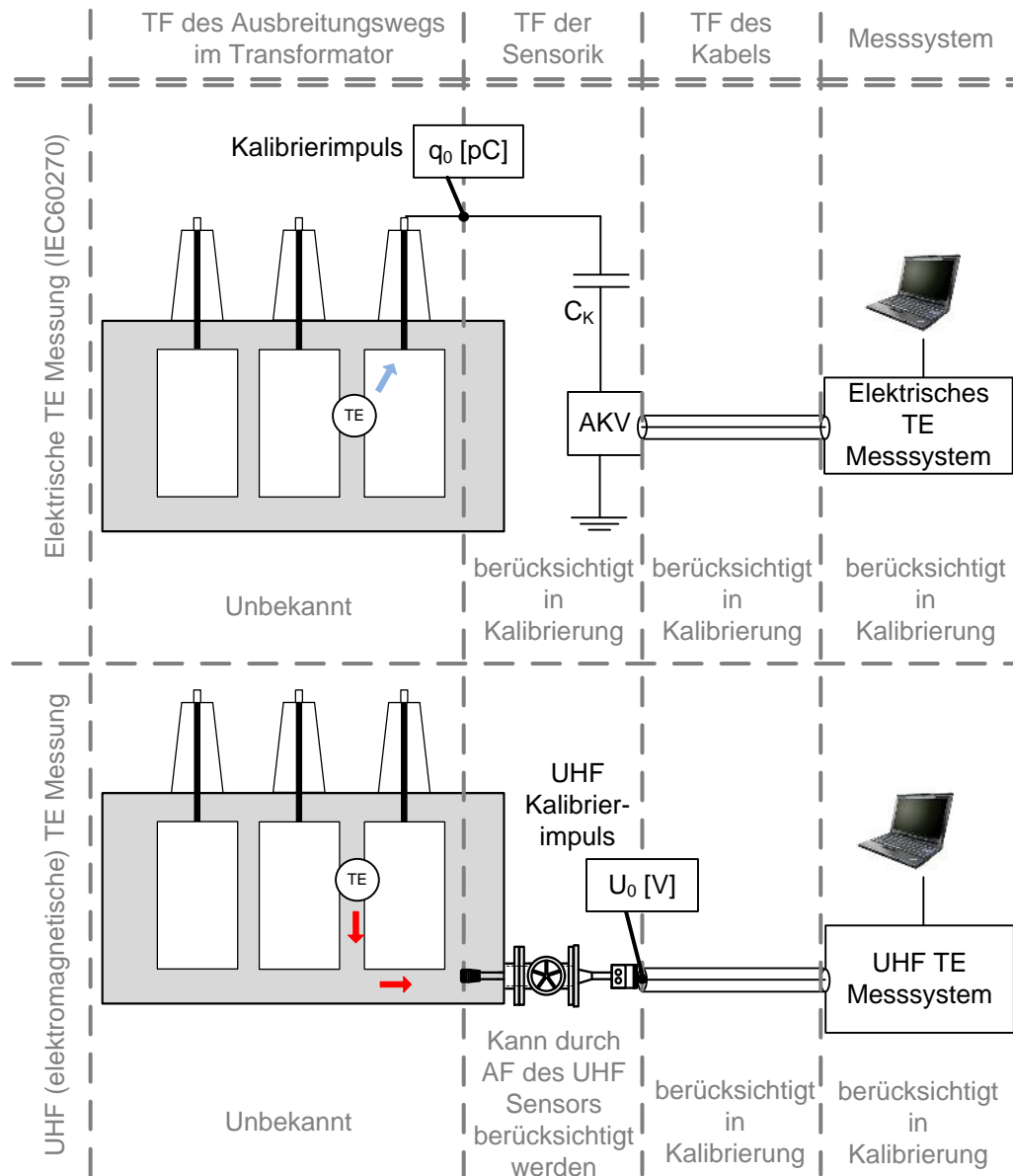


Abbildung 3 Vergleich der Kalibrierung von elektrischer TE Messung nach IEC60270 und der UHF Kalibrierung, wie sie in diesem Beitrag vorgeschlagen wird

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 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 (Kapitel 4) mit einer zweiten, sendenden UHF Antenne im Transformator erfolgen. Als Negativbeispiele können dann ein Steigrohr am Ölschieber oder Prallbleche vor dem Sensor durch die 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 Abbildung 4.



Abbildung 4 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  $\epsilon_r$ , gilt der in Luft ( $\epsilon_{r,Luf} = 1$ ) 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  $\epsilon_r$  von typischen mit Luft gefüllten Zellen unterscheidet [13]. Eine GTEM-Zelle (Abbildung 5) ist ein pyramidenähnlicher Aufbau, der einen koaxialen Leiter bis zum rückseitigen Abschluss weiter aufspannt. 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.

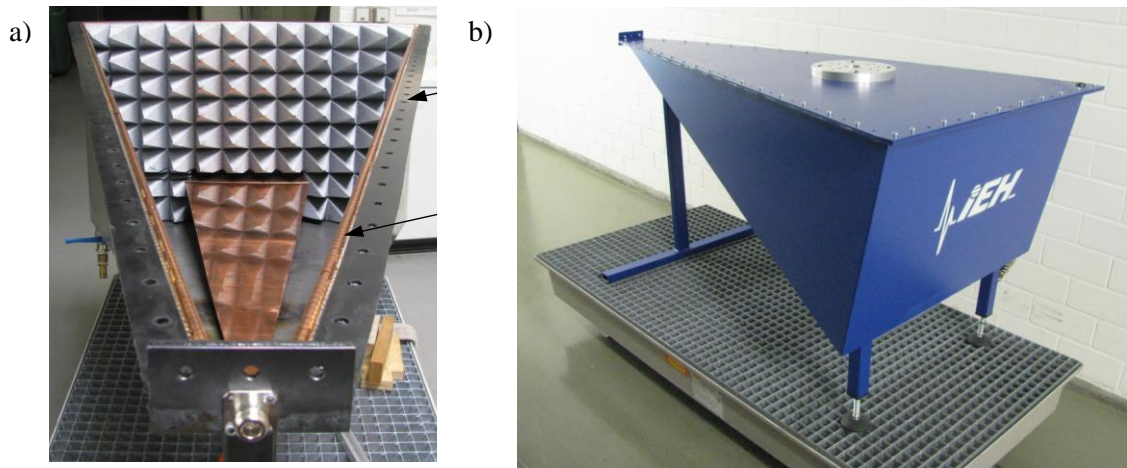


Abbildung 5 a) GTEM-Zelle Innenansicht mit Septum und Absorbieren an der Rückwand  
b) GTEM-Zelle Außenansicht

### 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 Abbildung 6 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. Da das elektrische Feld im Prüfvolumen bekannt ist, kann der AF(f) direkt aus dem  $S_{21}$  Parameter berechnet werden.

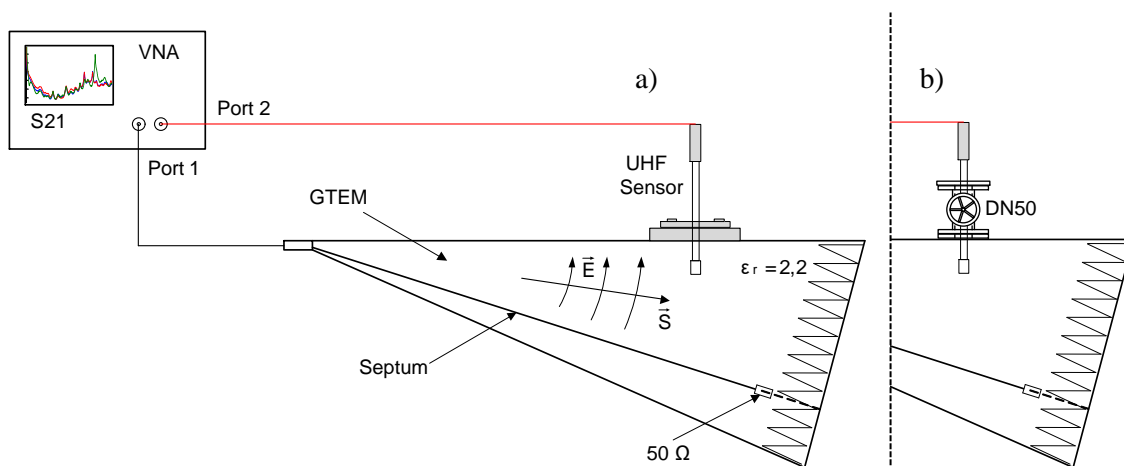


Abbildung 6 Messaufbau zur AF Bestimmung mit GTEM-Zelle und VNA

In Abbildung 7 sind zwei AF aus den Messsetups a) und b) aus Abbildung 6 zu sehen. Bei a) ist der UHF Sensor direkt und bei b) über einen DN50 Schieber auf der GTEM-Zelle montiert.

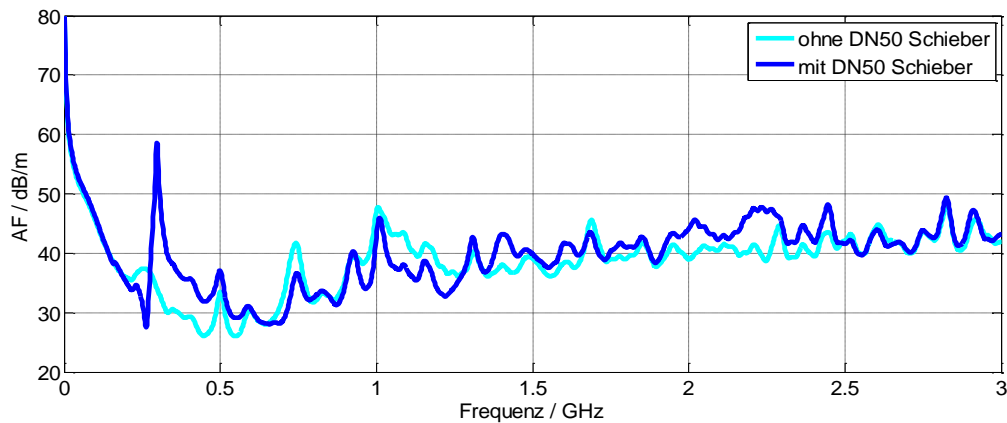


Abbildung 7 AF von UHF Sensor mit und ohne DN50 Schieber

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 500 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 PERFORMANCE CHECK

Zusätzlich zur eigentlichen Kalibrierung ist immer auch ein Performance Check nötig, um nachzuweisen, dass das UHF Messsystem Signale aus dem inneren des Transformators empfangen kann [12], [14]. Sollte der Ölschieber in ein Steigrohr enden oder Prallbleche vor dem Sensor sein, ist die UHF Antenne elektromagnetisch vom Trafoinneren abgeschirmt. Abbildung 8 zeigt den Performance Check mit einem zweiten UHF Sensor im Transformator, der als sendende Antenne für ein künstliches Signal verwendet wird. Wird dieses Signal vom UHF Messsystem detektiert, so gilt der Performance Check als bestanden.

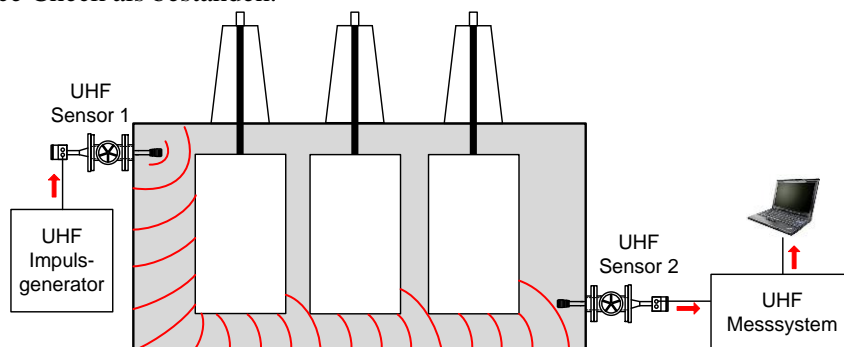


Abbildung 8 Performance Check zum Nachweis der Empfindlichkeit des UHF Sensors

##### 4.1 Erfahrungen mit Impulsgeneratoren an großen Leistungstransformatoren

Der Performance Check wird bisher mit Impulsgeneratoren durchgeführt, die für den Sensitivity Check an GIS entwickelt wurden. Diese geben meistens einen Impuls mit einer maximalen Amplitude von  $\hat{U}_{\text{Impuls}}=50\text{...}60\text{ V}$  (an  $50\ \Omega$ ) und einem relativ langen Rücken aus, siehe Abbildung 9 a). Bei kleinen Transformatoren mit kurzen Ausbreitungswegen zwischen den Sensoren und damit geringer Dämpfung im Ausbreitungsweg werden damit gute Erfahrungen gemacht: Der an einem Sensor eingespeiste Signalpegel reicht aus um am zweiten Sensor ein Signal oberhalb des Rauschlevels empfangen zu können. Damit kann der Performance Check mit einem solchen Impulsgenerator an kleinen Transformatoren durchgeführt werden. Bei größeren Leistungstransformatoren sind die



Abstände zwischen den Sensoren größer und damit auch die Dämpfung im Ausbreitungsweg höher. Das führt dazu, dass mit den relativ geringen Ausgangspegeln der UHF Impulsgeneratoren kein Signal mehr oberhalb des Rauschlevels am messenden Sensor detektiert werden kann. Der Performance Check schlägt damit fehl, allerdings wird keine Aussage darüber getroffen ob der Sensor elektromagnetisch abgeschirmt ist oder korrekt funktioniert. Da keine UHF Impulsgeneratoren mit höherer Amplitude verfügbar sind, wird ein Impulsgenerator mit höherer Impulsleistung an Leistungstransformatoren getestet, der eigentlich bei EMI/RFI/EMV Anwendung findet. Seine Signalamplitude liegt bei  $\hat{U}_{\text{Impuls}}=250 \text{ V}$  (an  $50 \Omega$ ) und seine Impulsform unterscheidet sich wesentlich von den bisher verwendeten UHF Impulsgeneratoren. Sie weist im Vergleich keinen langen Rücken auf, sondern ähnelt eher einem Dirac Impuls (sehr kurze Anstiegs- und Abfallzeit und eine gesamte Impulslänge von wenigen 100 ps), siehe Abbildung 9 b). Die resultierende Impulsleistung liegt bei etwa 1,25 kW. Die Versuche an großen Leistungstransformatoren zeigen allerdings, dass auch diese Leistung nicht ausreicht um einen Performance Check mit zwei UHF Sensoren an großen Leistungstransformatoren erfolgreich durchzuführen.

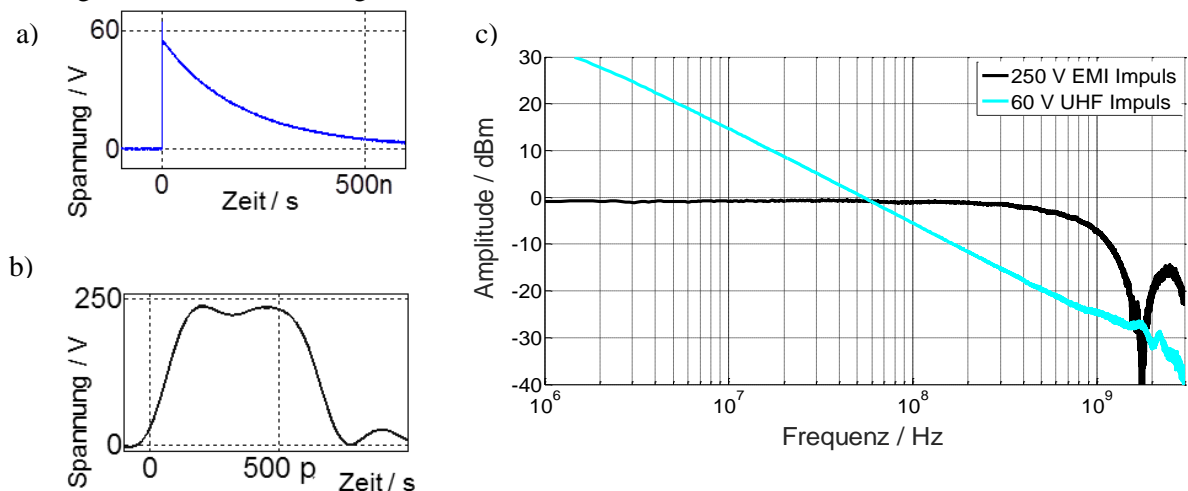


Abbildung 9 a) Impulsform UHF Impulsgenerator  
 b) Impulsform EMI Impulsgenerator  
 c) Beide Impulse dargestellt im Frequenzbereich

## 4.2 Untersuchung zur Transferfunktion an einem Leistungstransformator

Die Tatsache, dass der Performance Check mit den verfügbaren Impulsgeneratoren nicht erfolgreich ist, führt zu der Fragestellung nach dem Ausbreitungsweg innerhalb des Transformators. Um diesen zu charakterisieren wird mit einem VNA der Transmissionsfaktor  $S_{21}$  von UHF Sensor zu UHF Sensor durch den Transformator im Frequenzbereich von 300 kHz bis 3 GHz gemessen. Beide Sensoren sind bei diesem Test 50 mm in den Transformator eingeschoben. In Abbildung 10 a) ist der Messaufbau und dazu in b) das Messergebnis zu sehen.

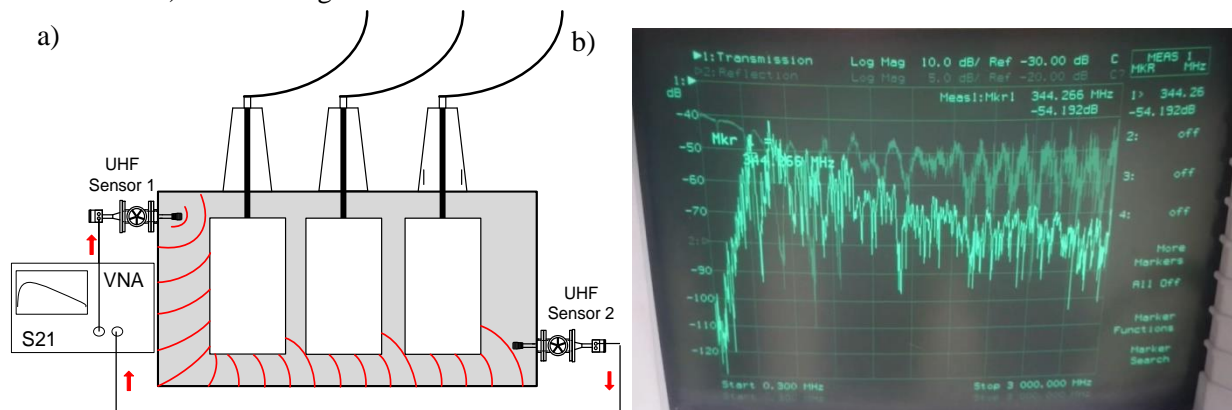


Abbildung 10 a) Messaufbau zur Messung der TF durch einen Leistungstransformator  
 b) Gemessene TF inklusive Sendeantenne, Transformator und Empfangsantenne

Der Transmissionsfaktor ähnelt dem AF (bzw. eher dem doppelten AF) der verwendeten UHF Sensoren. Deutlich zu erkennen ist auch die Charakteristik des DN50 Flansches (Resonanz bei 300 MHz) beim Vergleich der  $S_{21}$  Kurve mit dem in der GTEM-Zelle gemessenen AF aus Abbildung 7. Dies zeigt, dass der in der GTEM-Zelle gemessene AF für den im Transformator installierten Sensor verwendbar ist. Um nun einen Performance Check durchführen zu können empfiehlt sich die Verwendung eines Impulsgenerators, der hohe Signalanteile im Bereich des höchsten  $S_{21}$  durch den Transformator, bzw. im Bereich der höchsten Empfindlichkeit der UHF Antenne aufweist.

### 4.3 VHF/UHF Hochleistungsimpulsgenerator

Aus der durchgeführten Transmissionsfaktormessung am Leistungstransformator können Anforderungen für Impulsgeneratoren für den Performance Check abgeleitet werden. Hierfür werden zunächst die zwei bisher verwendeten Impulsformen im Frequenzbereich betrachtet, siehe Abbildung 9 c). Hier zeigt sich, dass der EMI Impuls ein deutlich flacheres Frequenzspektrum als der UHF Impuls hat und somit im Bereich von mehreren 100 MHz, wo die Sensoren am empfindlichsten sind, deutlich höhere Amplituden aufweist. Ein neuer Impulsgenerator für den Performance Check an großen Leistungstransformatoren basierend auf der EMI Impulsform und mit höherem Ausgangspegel (600 V an 50  $\Omega$ ) befindet sich derzeit in Entwicklung. Erste Messungen zeigen bis zu 10 dB höhere Pegel im Frequenzbereich von mehreren 100 MHz. Mit der bisherigen Abschätzung von 2 dB/m Dämpfung für UHF Signale im Transformator sind damit bis zu fünf Meter mehr Entfernung beim Performance Check möglich.

## 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 Kalibriimpuls 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.

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. Hierfür befindet sich ein Hochleistungsimpulsgenerator in Entwicklung, der einen flachen Frequenzgang bis zu mehreren 100 MHz aufweist.

## 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. Meijer, E. Gulski, J. Smit, H. Reijnders, „Sensitivity Check of UHF PD Detection on Power Transformers“, in IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, 2004.