

# **Kalibrierbarkeit verschiedener TE-Messverfahren für Leistungstransformatoren**

**Martin Siegel**

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

**Stefan Tenbohlen**

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

## **KURZFASSUNG**

Regelmäßige Zustandsprüfungen und dauerhafte Überwachung von Leistungstransformatoren werden immer häufiger angewandt um Schäden in der Isolation frühzeitig erkennen zu können und damit Ausfälle zu vermeiden. Dabei gewinnt neben der elektrischen Teilentladungsmessung die elektromagnetische Messmethode zunehmend an Bedeutung. Sie eignet sich vor allem zur Diagnosemessung vor-Ort und auch als Teilentladungs-Monitoringsystem, da sie im Gegensatz zur elektrischer Messung unempfindlicher gegenüber externen Störern ist.

Für die elektrische Teilentladungsmessung existiert ein Verfahren mit dem bis an den Anschlusspunkt an den Transformator kalibriert werden kann. Die damit mögliche Vergleichbarkeit beliebiger elektrischer Messsysteme hat dazu geführt, dass sich trotz unbekannter tatsächlich umgesetzter Ladung ein Abnahmepegel für Transformatoren etabliert hat. Eine vergleichbare Kalibrierung der UHF Messung ist bisher noch nicht umgesetzt, ist jedoch eine zwingende Bedingung zur weiteren Standardisierung der Methode.

Dieser Beitrag zeigt eine Gegenüberstellung beider Messmethoden und bewertet die diagnostische Aussagekraft der elektrischen Messung anhand der Abhängigkeit der gemessenen scheinbaren Ladung von der Teilentladungsposition entlang einer Wicklung und abhängig vom verwendeten Frequenzbereich.

Für die Kalibrierung der UHF Methode wird ein Verfahren vorgestellt, dass die Charakterisierung anhand des gemessenen Antennenfaktors der UHF Antenne unter realitätsnahen Bedingungen ermöglicht. Dazu wird konzeptuell ein Prüfstand entwickelt, der mit Hilfe einer ölfüllten Gigahertz-TEM Zelle eine standardisierte Bestimmung des Antennenfaktors im UHF Frequenzbereich ermöglicht.

# 1 EINLEITUNG

Um lokale Schäden der Isolation an Leistungstransformatoren frühzeitig erkennen zu können und dadurch die Ausfallgefahr zu minimieren, eignet sich die Teilentladungs- (TE) Messung. Neben der konventionellen TE-Messung nach IEC 60270 [1], die elektrisch den Ladungsumsatz der TE bestimmt, gewinnt die elektromagnetische Messmethode zunehmend an Bedeutung. Hierbei wird mit einer in den Transformatorbuckel eingebrachten Antenne im ultrahochfrequenten Bereich (UHF: 300 MHz – 3 GHz) die Abstrahlung von TE gemessen. Diese Methode eignet sich auch für eine dauerhafte Überwachung von Transformatoren (Monitoring), da sie durch die elektromagnetische Schirmwirkung des Transformatorbuckels weniger empfindlich gegenüber externen Störern ist [2], [3], [4]. Die Cigre Working Group WG A2-27 empfiehlt in ihrer Broschüre 343 an neuen Transformatoren, die als systemrelevant für das Netz eingestuft werden, Einrichtungen für die Installation von UHF Sensorik vorzusehen [5].

Außer dem Ladungsumsatz, der über den Nachladestrom aus einem Koppelkondensator oder bspw. mit einer Stromzange gemessen werden kann und der elektromagnetischen Abstrahlung, emittieren TE auch akustische Signale und UV Licht. Zusätzlich entstehen durch chemische Prozesse während des Energieumsatzes Fehlergase, die sich im umgebenden Isolieröl lösen. Die optische Detektion von TE wird prinzipiell nicht für TE im Transformator angewandt. Die akustische Messung wird weitestgehend nur zur Lokalisierung von TE über Laufzeitdifferenzen verwendet [6], [7]. Da die UHF Methode immer häufiger angewandt wird, stellt sich häufig die Frage nach der Kalibrierbarkeit der UHF Methode, um – wie bei der konventionellen Methode – eine Vergleichbarkeit einzelner Messungen zu erreichen. Oft wird bei der UHF Methode unter der Kalibrierung die Herstellung des Zusammenhangs aus gemessener Antennenspannung (mV) zur scheinbaren Ladung (pC) der elektrischen Messung verstanden, was allerdings grundsätzlich nicht möglich ist. Aus diesem Grund soll in diesem Beitrag die Kalibrierbarkeit der konventionellen elektrischen Messung mit der UHF Methode verglichen werden. In Abbildung 1 sind diese zwei Messprinzipien an einem Transformator dargestellt.

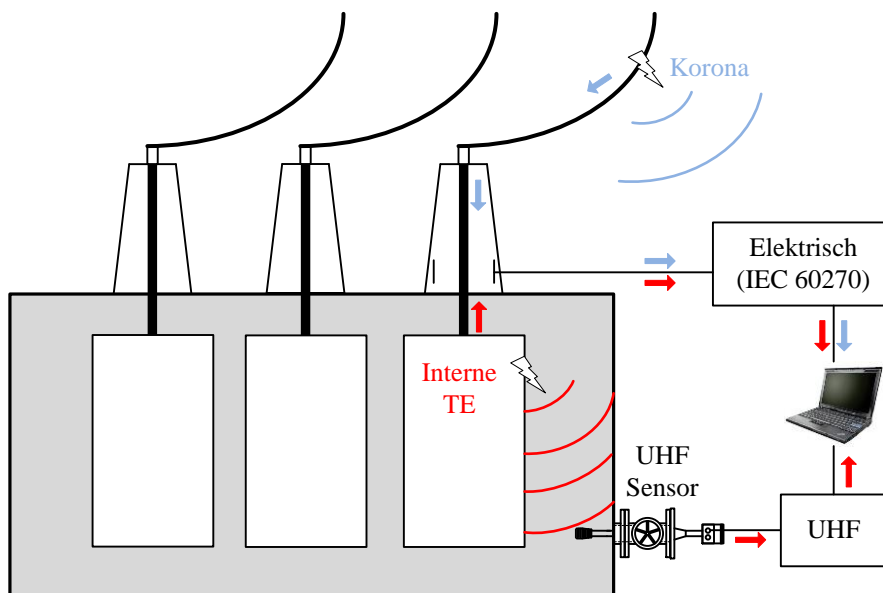


Abbildung 1 Elektrische und elektromagnetische TE Messung an Transformator

Neben der aus Betriebssicht kritischen, internen TE, die gemessen werden soll, ist auch eine externe TE (Korona) dargestellt. Die elektrische Messmethode kann bei der Messung des Nachladestroms nicht unterscheiden, ob es sich um interne oder externe TE handelt. Die UHF Methode ist hier im Vorteil, da theoretisch mit der Antenne im Transformatorbuckel nur Signale von internen TE empfangen werden. Die Schirmwirkung des geerdeten Kessels und die Filterfunktion von Hochspannungsdurchführungen verhindern feldgekoppelte als auch ultrahochfrequente galvanische

Einkopplungen externer TE oder anderer Störer. Wird die Kalibrierbarkeit von Messmethoden untersucht, müssen alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die auf den gesamten Signalpfad einwirken. Dabei stellt sich die grundsätzliche Frage, welche Teile der Messkette überhaupt kalibrierbar sind.

## 2 TATSÄCHLICHER TE PEGEL

Ein grundlegender Unterschied der beiden Messverfahren ist die Messgröße. Bei der elektrischen Messung wird durch Integration des gemessenen Nachladestroms die sogenannte scheinbare Ladung bestimmt, die in pico Coulomb (pC) gemessen wird. Bei der UHF Methode erzeugt die elektromagnetische Abstrahlung der TE an der UHF Antenne eine Spannung, die in Millivolt (mV) gemessen wird. Da sowohl bei der elektrischen als auch bei der UHF TE Messung nicht direkt an der Fehlstelle gemessen werden kann, bleibt der tatsächliche Pegel der TE beim Leistungstransformator immer unbekannt. Eine Kalibrierung kann nur bis zum Anschlusspunkt des Sensors an den Transformator erfolgen. Das heißt für die elektrische Messung, dass eine TE direkt an den Durchführungen nahezu mit ihrem eigentlichen Pegel gemessen werden kann. TE Signale, die weiter entfernt vom Kalibrierpunkt entstanden sind, werden durch den Ausbreitungsweg im Transformator beeinflusst. Dieser ist nicht genau bekannt und kann nicht kalibriert werden. Bei der UHF Messmethode verhält es sich prinzipiell gleich, allerdings handelt es sich um einen anderen Ausbreitungsweg. Auch bei der UHF Messung können TE in der direkten Nähe zum Sensor nahezu mit ihrem eigentlichen Signalpegel gemessen werden. Bei entfernten Quellen durchläuft die elektromagnetische Welle ein beliebig komplexes System, bevor sie gedämpft am Sensor gemessen werden kann. Aus diesem Grund kann bei beiden Messverfahren kein Rückschluss auf die tatsächlich umgesetzte Energie an der Fehlstelle gezogen werden. Daher ist es bei jeder TE Messung schwierig nur durch den gemessenen Pegel eine Aussage zu treffen, ob es sich um einen kritischen oder tolerierbaren Fehler handelt.

Ein linearer Zusammenhang zwischen scheinbarer Ladung und Antennenfußpunktspannung kann bei gleich bleibendem Aufbau nachgewiesen werden [8], daher enthalten beide Messgrößen theoretisch den selben Informationsgehalt. Aus Laborexperimenten kann eine grobe Abschätzung abgeleitet werden: mehrere 10 mV UHF Signal entsprechen mehreren 100 pC scheinbare Ladung. Allerdings gibt es TE, die im UHF Bereich nicht abstrahlen und nur konventionell gemessen werden können. Andererseits können elektrische Signale von TE, die tief in der Wicklung liegen, sehr stark gedämpft werden und an der Messstelle fälschlicher Weise zu sehr kleinen scheinbaren Ladungen führen oder sogar vollständig im Rauschen verschwinden.

## 3 DÄMPFUNG IM AUSBREITUNGSWEG

Die Ausbreitungsmechanismen der elektrischen und elektromagnetischen Messung sind von Grund auf unterschiedlich und damit sind auch die Dämpfungen der Signale verschieden. Bei der elektrischen TE Messung dient der Wicklungsleiter als Ausbreitungsweg. Gleichzeitig stellt die Wicklung ein RLCM Netzwerk mit Tiefpassfilterfunktion dar [9], [10], siehe Abbildung 2 links.

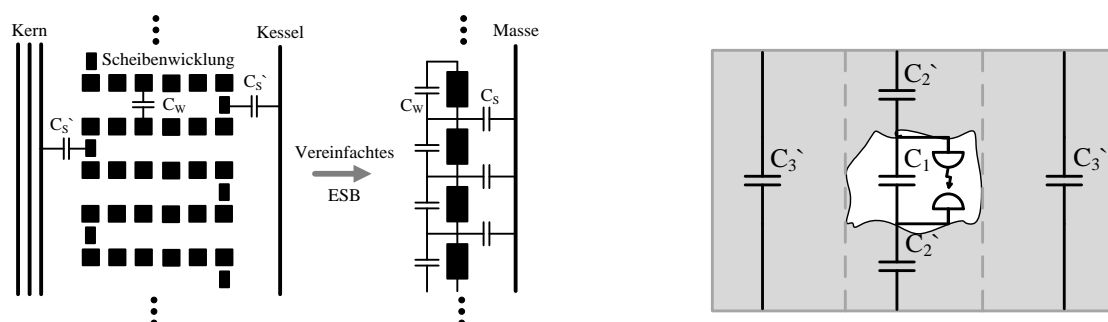


Abbildung 2 Links: Die Transformatorwicklung als Filter für elektrische TE Impulse.  
Rechts: Interne Kapazitätsverhältnisse (unbekannt)

Hinzu kommt, dass bei der elektrischen Messung die internen Kapazitätsverhältnisse an der Fehlerstelle unbekannt sind. Beispielhaft kann dies an einem Lufteinschluss im Isolationssystem erklären werden. In Abbildung 2 rechts ist ein Lufteinschluss mit umgebenden intakten Isolationssystem vereinfacht dargestellt. Bricht im Lufteinschluss die Spannung aufgrund einer TE zusammen, wird diese Ladung zum Teil aus den dargestellten inneren Kapazitäten und zum Teil aus dem außen angeschlossenen Koppelkondensator nachgeladen. Da sowohl der Ort und die Ausmaße der Fehlerstelle nicht bekannt sind, kann auch das Verhältnis zwischen den Kapazitäten  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$  nicht bestimmt werden. Gemessen wird nur der Anteil des Nachladestroms aus dem angeschlossenen Koppelkondensator.

Bei der UHF Messung findet die Ausbreitung der elektromagnetischen Signale nicht in der Wicklung selbst sondern im kompletten Transformator, bzw. hauptsächlich im Öl und Pressboard statt. Dabei wird die elektromagnetische Welle gedämpft und kann auch an metallischen Teilen reflektiert werden. Die Dämpfung im elektromagnetischen Ausbreitungsweg ist vergleichsweise gering. Sie beträgt etwa 2 dB pro Meter für Transformatoröl [8].

#### 4 NACHWEIS DER SENSITIVITÄT

Wichtig bei einer TE Messung ist der Nachweis der Sensitivität. Bei der elektrischen TE Messung kann der Kalibrierimpuls nur direkt an den Durchführungen oder den Koppelkapazitäten eingespeist werden, nicht etwa direkt in die Wicklung. Damit wird der Ausbreitungsweg im Transformator nicht berücksichtigt und somit auch keine Sensitivität für interne TE nachgewiesen. Hingegen kann bei der elektromagnetischen Messung bei mehreren UHF Sensoren ein UHF Impuls an einem Sensor eingespeist und an einem anderen gemessen werden. Falls diese, wie in Abbildung 3, auf den gegenüberliegenden Seiten des Transformators liegen, kann Sensitivität für den kompletten Transformator gezeigt werden [11], [12]. Allerdings ist es auch hier nicht möglich einen UHF Impuls direkt in der Wicklung zu erzeugen und somit bleibt die Sensitivität für TE direkt in Wicklungen ebenfalls ohne Nachweis.

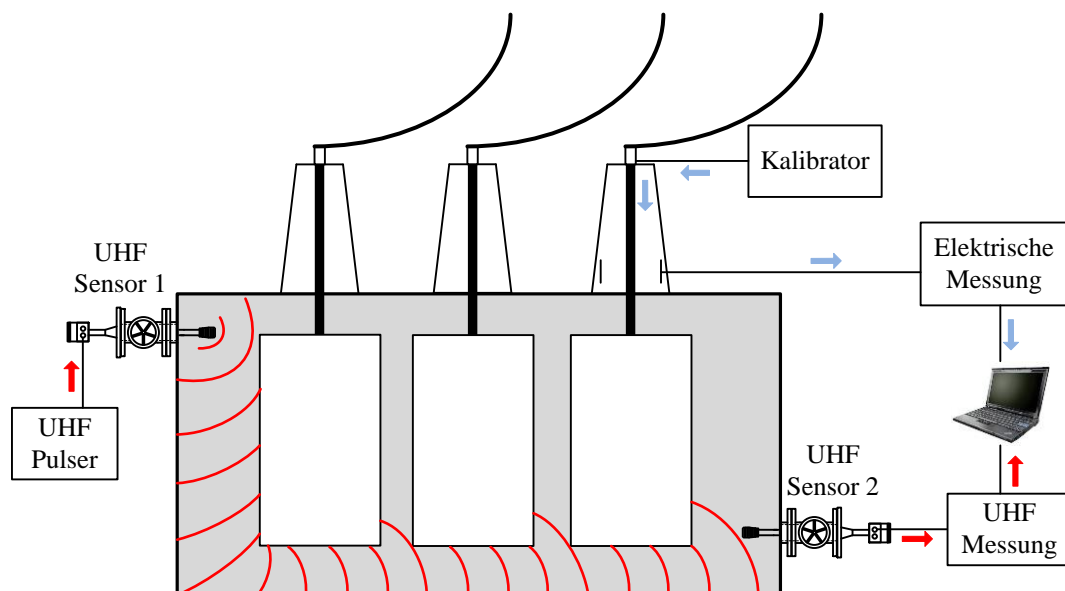


Abbildung 3 Sensitivitätsnachweis von elektrischer und elektromagnetischer TE Messung

#### 5 KALIBRIERUNG DER ELEKTRISCHEN TE MESSUNG

Durch das Einspeisen eines bekannten Ladungsimpulses  $q_0$  möglichst nahe am Prüfling wird das Verhältnis der messbaren Ladung  $q_m$  zur scheinbaren Ladung  $q_s$  bestimmt und durch einen Kalibrierfaktor angepasst. Durch die Kalibrierung wird das Verhältnis zwischen Koppelkapazität  $C_K$

und Prüflingskapazität  $C_T$  ermittelt und ausgeglichen. Abbildung 4 stellt einen typischen TE Messkreis bestehend aus Prüfling, Koppelkapazität, Ankoppelvierpol, Messsystem und Kalibrator dar.

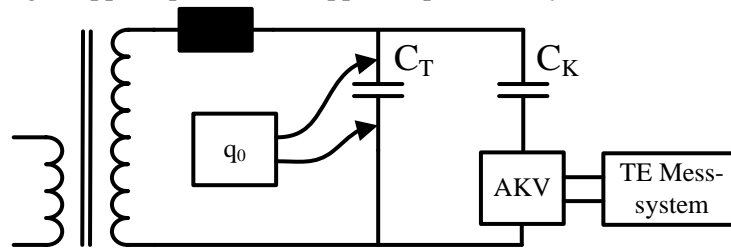


Abbildung 4 Kalibrierung des elektrischen TE Messkreises

Obwohl der tatsächlich umgesetzte Ladungspegel trotz Kalibrierung nicht bekannt ist, hat sich vor allem in Norm-orientierten Werksabnahmeprüfungen ein üblicher Abnahmepegel  $q_{s,Abnahme} < 100 \text{ pC}$  bei einer Prüfspannung  $U_{prüf} = 1,2 U_m / \sqrt{3}$  für Transformatoren durchgesetzt [13]. Kann der Größe der scheinbaren Ladung bei elektrisch einfachen Signalausbreitungswegen einer GIS oder eines Kabels noch eine Bedeutung beigemessen werden, so verliert sie an Aussagekraft bei elektrisch komplexen Betriebsmitteln, wie Leistungstransformatoren [14].

## 6 ABHÄNGIGKEIT DER SCHEINBAREN LADUNG VON TE ORT UND FREQUENZBEREICH

Der Einfluss der Position auf TE Signale wird anhand eines Laboraufbaus untersucht. Als Messobjekt wird ein runder, etwa 1,2 m hoher Tank verwendet, der mit einer Wicklung und einer von außen in der Höhe verstellbaren TE Quelle ausgestattet ist. Die Wicklung liegt auf Hochspannungspotential, das untere Wicklungsende ist nicht geerdet. In Abbildung 5 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

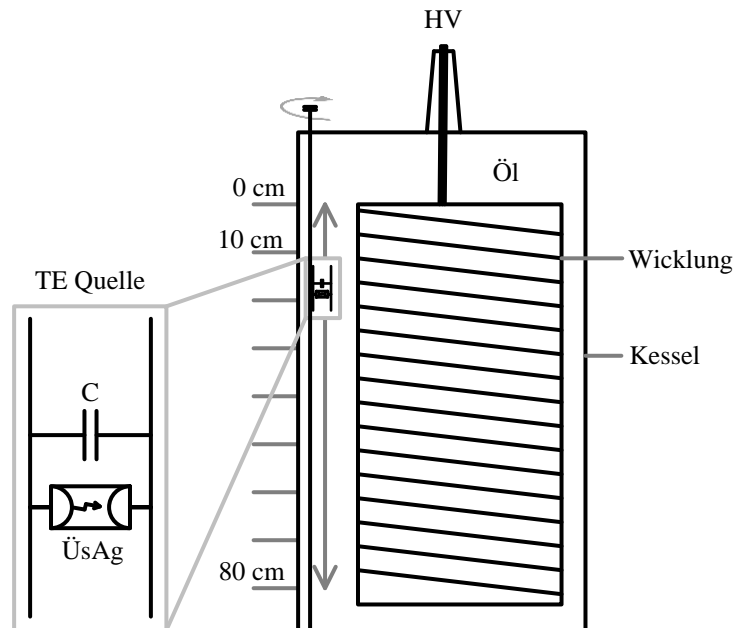


Abbildung 5 Versuchsaufbau mit verstellbarer künstlichen TE Quelle

Die TE Quelle ist auf einer Seite mit Masse verbunden und besteht aus zwei Kupferplättchen, die durch einen Kondensator und einen gasgefüllten Überspannungsgasableiter (ÜsAg) verbunden sind. Diese künstliche TE Quelle wird verwendet, da sie einen reproduzierbaren, konstanten Ladungsumsatz erzeugt. Dieser kann aus dem Produkt der Kapazität und der Ansprechspannung des verwendeten ÜsAg berechnet werden. Die TE Quelle ist an einer gemassten Gewindestange befestigt, über die von außen die Position entlang der Wicklung präzise verstellbar ist. Abbildung 6 zeigt ein mit dieser TE Quelle erzeugtes PRPD und den konstanten Pegel der Quelle über der Zeit (Trend).

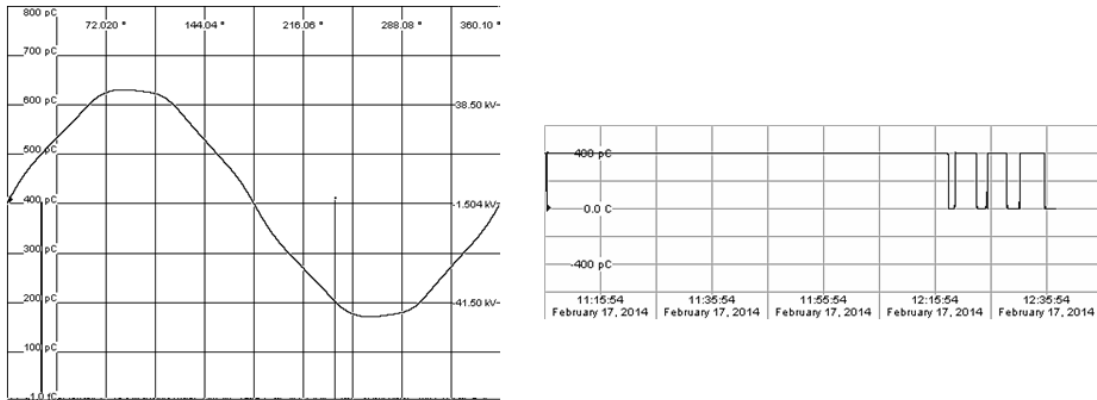


Abbildung 6 Links: PRPD, rechts: Trend der pegelstabilen, künstlichen TE Quelle

Das PRPD in Abbildung 6 zeigt zwei einzelne, phasenstabile Punkte bei konstantem Pegel und den dazugehörigen Trend, bei dem zunächst die Spannung etwa eine Stunde über TE Einsatzspannung gehalten wird und danach durch Verfahren der Spannung die TE Quelle aus und wieder zugeschaltet wird, womit die Reproduzierbarkeit der Quelle bestätigt ist.

Mit dieser TE Quelle wird am gezeigten Versuchsaufbau eine breitbandige elektrische TE Messung durchgeführt. Der verwendete Ankoppelvierpol weist eine obere Grenzfrequenz von etwa 15 MHz auf. Abbildung 7 zeigt das Amplitudendichtespektrum an vier verschiedenen Messpunkten entlang der Wicklung.

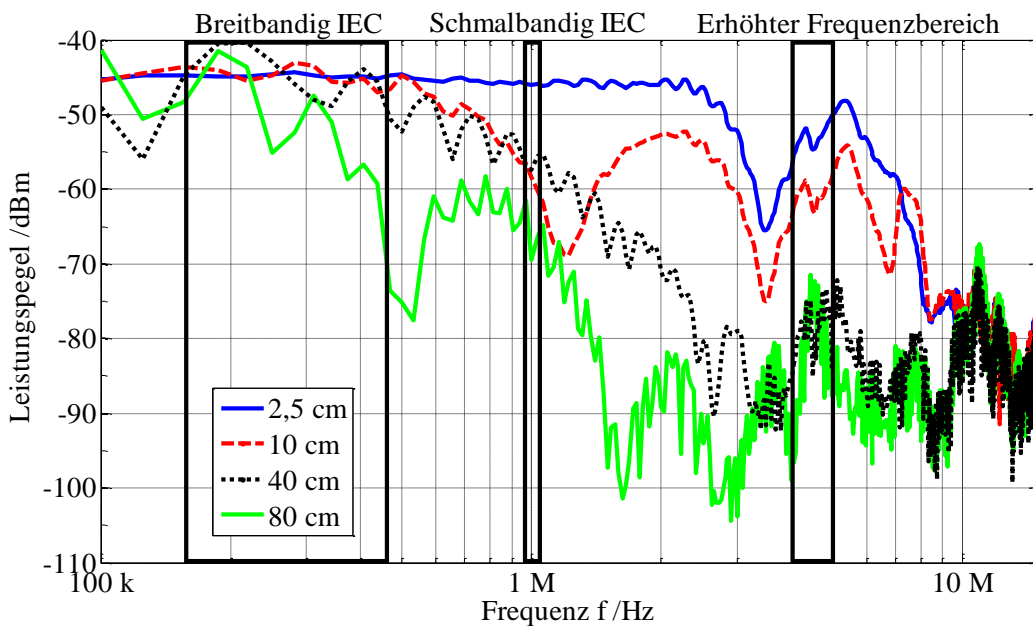


Abbildung 7 Amplitudendichtespektrum der elektrischen TE Messung an verschiedenen TE Positionen

Zu erkennen ist eine zunehmende Tiefpassfilterwirkung des Aufbaus mit zunehmender Einschubtiefe der TE Quelle. Markiert sind drei Frequenzbereiche. Dabei wird normgerecht nach IEC 60270 jeweils breitbandig und schmalbandig gemessen. Der dritte Frequenzbereich wird beispielsweise häufiger bei vor-Ort TE Messungen verwendet, um störunempfindliche Messungen durchführen zu können. Dieser ist jedoch nicht konform zur IEC Norm. In Abbildung 8 ist die scheinbare Ladung gemessen in den drei Frequenzbereichen abhängig von der TE Position entlang der Wicklung zu sehen. Für diese Messungen wird nach jedem Wechsel des Frequenzbereichs an der Durchführung des Versuchsaufbaus neu kalibriert.

Die verwendeten Frequenzbereiche sind:

- Breitbandig IEC:  $f_M = 300 \text{ kHz}$   $\Delta f = 300 \text{ kHz}$
- Schmalbandig IEC:  $f_M = 1 \text{ MHz}$   $\Delta f = 30 \text{ kHz}$
- Erhöhter Frequenzbereich:  $f_M = 4,5 \text{ MHz}$   $\Delta f = 1 \text{ MHz}$

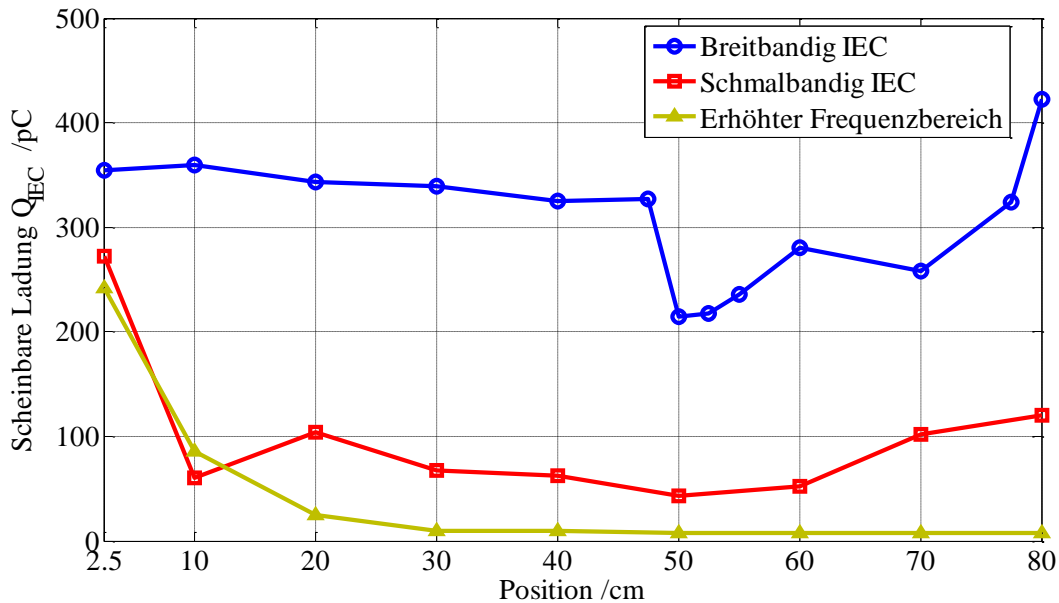


Abbildung 8 Scheinbare Ladung in Abhängigkeit der TE Position entlang der Wicklung und des eingestellten Frequenzbereichs

Trotz Kalibrierung und reproduzierbarer, zeitlich stabiler TE Quelle werden bereits bei geringer Einschubtiefe deutlich unterschiedliche Pegel gemessen. Im Rahmen einer Abnahmeprüfung mit einem zugelassenen Prüfpegel von  $q_{s, \text{Abnahme}} < 100 \text{ pC}$  würde bei einer schmalbandigen IEC Messung in 5 von 9 Fällen (TE Positionen) die Prüfung als bestanden gelten. Die breitbandige IEC Messung würde hingegen in allen 9 Fällen nicht bestanden werden. Die Messung im erhöhten Frequenzbereich zeigt, dass ab einer TE Position von etwa 30 cm kaum noch ein Signal messbar ist. Diese Frequenzerhöhung unterdrückt demnach nicht nur Störungen bei vor-Ort Messungen, sondern lässt die Messung auch für TE in der Wicklung „blind“ werden. In der breitbandigen Messung ist ein Sprung im Pegel bei 50 cm zu erkennen, der zunächst als Messfehler angenommen werden könnte, jedoch durch eine erhöhte Anzahl an Messpunkten im Umfeld bestätigt wird. Der Grund für die Pegeländerung speziell bei dieser Position ist noch nicht bekannt.

## 7 VORSCHLAG ZUR KALIBRIERUNG DER UHF METHODE BZW. CHARAKTERISIERUNG DER UHF SENSORIK

Die Kenntnis der Empfangseigenschaften von UHF Sensoren ist wichtig, um eine Aussage treffen zu können, wie empfindlich ein Sensor in einem bestimmten Frequenzbereich ist. Mit bekannten Empfangseigenschaften kann der Einfluss der Antenne auf die gemessene Spannung herausgerechnet werden, was eine bessere Beurteilung einer gemessenen TE ermöglicht. Zudem ist die Vergleichbarkeit von Messungen mit unterschiedlichen UHF Sensoren gegeben. Zur Charakterisierung der Empfangseigenschaft von Antennen eignet sich der Antennenfaktor (AF). Mit der Kenntnis des Antennenfaktors kann ähnlich wie bei der Kalibrierung der elektrischen TE Messung der Messkreis bis an den „Anschlusspunkt“ am Transformator beschrieben werden.

### 7.1 Antennenfaktor

Der Quotient aus dem Betrag, der am Antennenkopf anliegenden elektrischen Feldstärke  $|\vec{E}|$  und der sich daraus ergebenden Spannung  $U_{ANT}$  am Antennenfußpunkt, wird als Antennenfaktor definiert:

$$AF = \frac{|\vec{E}|}{U_{ANT}} \quad , \quad [AF] = \frac{1}{m}$$

Dieser beschreibt die Empfangseigenschaften einer Antenne. Je kleiner der Antennenfaktor, desto empfindlicher ist eine Antenne.

Die durch TE entstehenden elektromagnetischen Wellen breiten sich in Transformatoren im Isoliermedium Öl aus. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in Öl um den Faktor  $1/\sqrt{\epsilon_r}$  geringer gegenüber der Ausbreitung in Vakuum bzw. Luft ist, führt dies zu einer Frequenzverschiebung des Antennenfaktors hin zu niedrigeren Frequenzen. Bisher wurde der Antennenfaktor von UHF Sensoren für Leistungstransformatoren nur in luftgefüllten TEM Zellen bis etwa zu einer Frequenz von 1 GHz bestimmt, was nach der Umrechnung für Öl noch etwa 670 MHz entspricht [15]. Der vorgesehene Frequenzbereich von 300 MHz bis 3 GHz kann auf diese Weise demnach mit TEM Zellen nur teilweise charakterisiert werden.

## 7.2 GTEM Zelle

Um UHF-Sensoren für Transformatoren unter realen Bedingungen zu vermessen, geschieht dies direkt in einer mit Transformatoröl gefüllten GTEM-Zelle. UHF Sensoren für GIS wurden bereits mit einer luftgefüllten GTEM Zelle vermessen [16]. Aufgrund ihres größeren nutzbaren Frequenzbereichs im Vergleich zu TEM Zellen können Sensoren bis in den GHz-Bereich vermessen werden. In Abbildung 9 ist eine mögliche Anordnung zur Bestimmung des Antennenfaktors von UHF-Sensoren zu sehen.

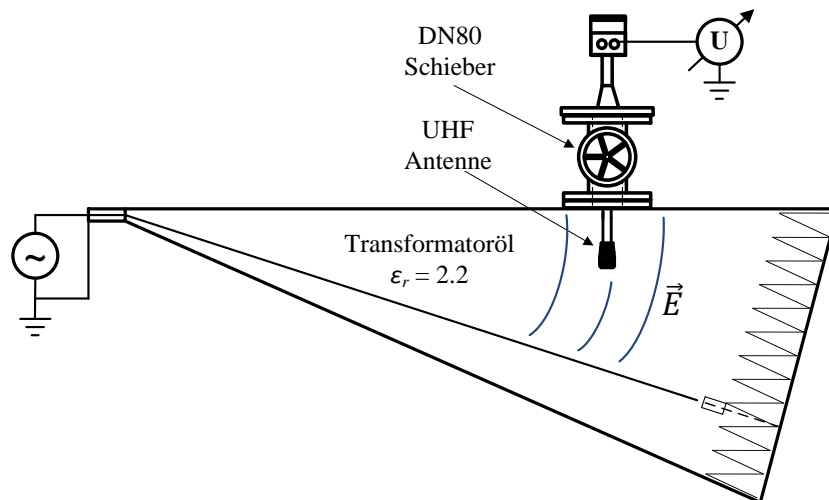


Abbildung 9 Ölgefüllte Anordnung zur Antennenfaktorbestimmung von UHF Sensoren

Eine GTEM-Zelle ist wie die TEM-Zelle ein rechteckförmig aufgeweiteter Koaxialleiter mit einem flachen Innenleiter [17]. Sie besitzt jedoch kein Mittelteil mit konstanten Querschnitts und auch kein zweites Tor. In Abbildung 10 ist der prinzipielle Aufbau einer GTEM-Zelle dargestellt.

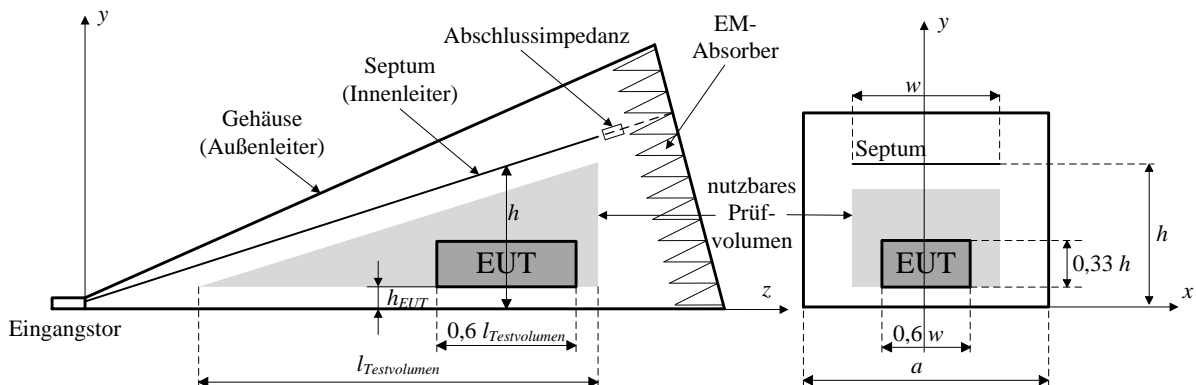


Abbildung 10 Aufbau einer GTEM Zelle



Die Wellenausbreitung findet vom coaxialen Einspeisepunkt hin zum pyramidenförmigen Ende, der Zellenrückwand, statt. Dort erfolgt der reflexionsarme Abschluss durch eine Kombination aus verteilten Abschlusswiderständen für die galvanische Kopplung, sowie Pyramiden-Absorbern für TEM-Wellen höherer Frequenzen. In einer GTEM-Zelle ist der Innenleiter asymmetrisch im Inneren angeordnet. Zwar wird die Feldhomogenität durch die Verschiebung des Septums gegenüber der Mitte geringfügig negativ beeinflusst, doch vergrößert sich dadurch deutlich das Prüfvolumen.

Soll eine TEM-Wellenausbreitung ermöglicht werden, müssen alle Verhältnisse, die die Zelle in ihrer geometrischen Form beschreiben, entlang der Zelle konstant bleiben. Es ist daher wichtig die Proportionalität der Querschnittsgeometrie über der gesamten Länge der GTEM-Zelle beizubehalten. Eine solche Leitung wird als homogen bezeichnet. Die TEM-Wellen breiten sich, aufgrund der sich konisch aufweitenden Pyramidenform, leicht kugelförmig aus. Jedoch kann das elektrische Feld dieser elektromagnetischen Wellen infolge der relativ kleinen Öffnungswinkel als nahezu senkrecht zur Zellenwand und ohne Krümmung betrachtet werden. Damit herrschen in der Zelle nahezu Fernfeldbedingungen. Das erzeugte Feld ist bei gutem rückseitigem Abschluss, mit sehr kleinem Reflexionsfaktor, homogen. Außerdem müssen Knickstellen und Kanten in der Leitergeometrie vermieden werden.

### 7.3 50 Ω Design für Transformatoröl

Für einen Leitungswellenwiderstand von 50 Ω wird die Septumsbreite  $w$  als einziger Parameter für das jeweilige Dielektrikum angepasst. Eine luftgefüllte Zelle besitzt beispielsweise eine Septumsbreite von  $w = 63,6\%$  der Außenleiterbreite  $a$ . In diesem speziellen Fall wird das Verhältnis  $w/a$  für das Dielektrikum Öl mit  $\epsilon_r = 2,2$  ausgelegt. Da das Septum eine konstante Dicke  $u$  aufweist, wird das Verhältnis  $u/d$  über der Zellenlänge immer geringer. Dies wird ausgeglichen, indem das Verhältnis der Septumsbreite zur Außenleiterbreite über der Zellenlänge erhöht wird. Abbildung 11 zeigt diesen Zusammenhang [18].

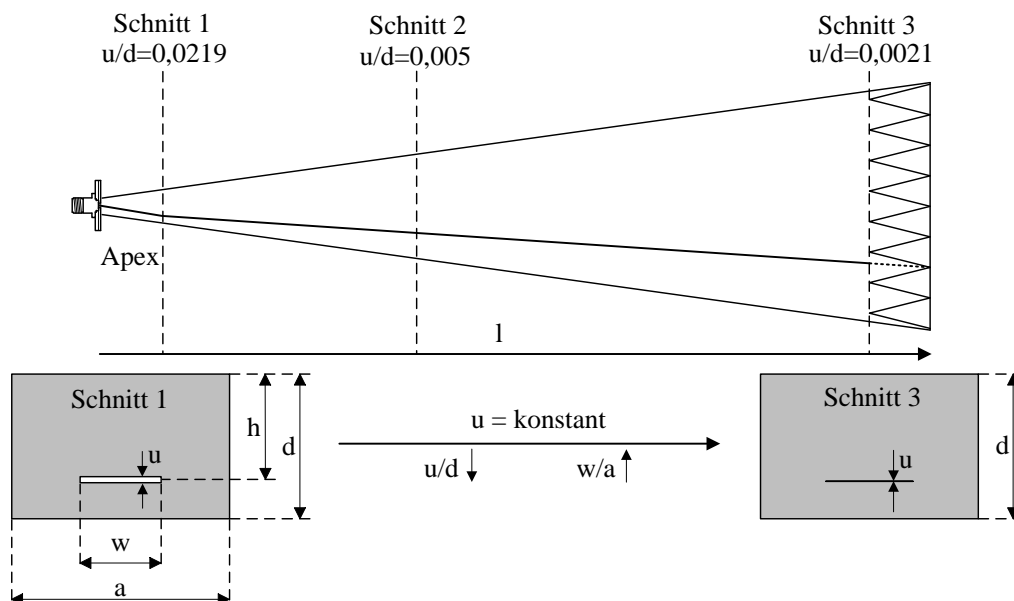


Abbildung 11 Querschnittsverhältnisse über der Zellenlänge

Da im vorderen Bereich, dem sogenannten Apex der GTEM Zelle, die Innenleiterhöhe aus der coaxial aufgebauten N-Buchse an das  $h/d$  Verhältnis der restlichen Zelle angepasst werden muss, wird in diesem Bereich über eine weitere Veränderung der Septumsbreite der Wellenwiderstand auf 50 Ω angepasst [18]. Mit diesen Anpassungen wird simulativ ein Wellenwiderstand über der gesamten Zellenlänge erreicht, der weniger als 0,07 Ω (1,4‰) von 50 Ω abweicht. In Abbildung 12 ist der Wellenwiderstand entlang der GTEM Zelle dargestellt.

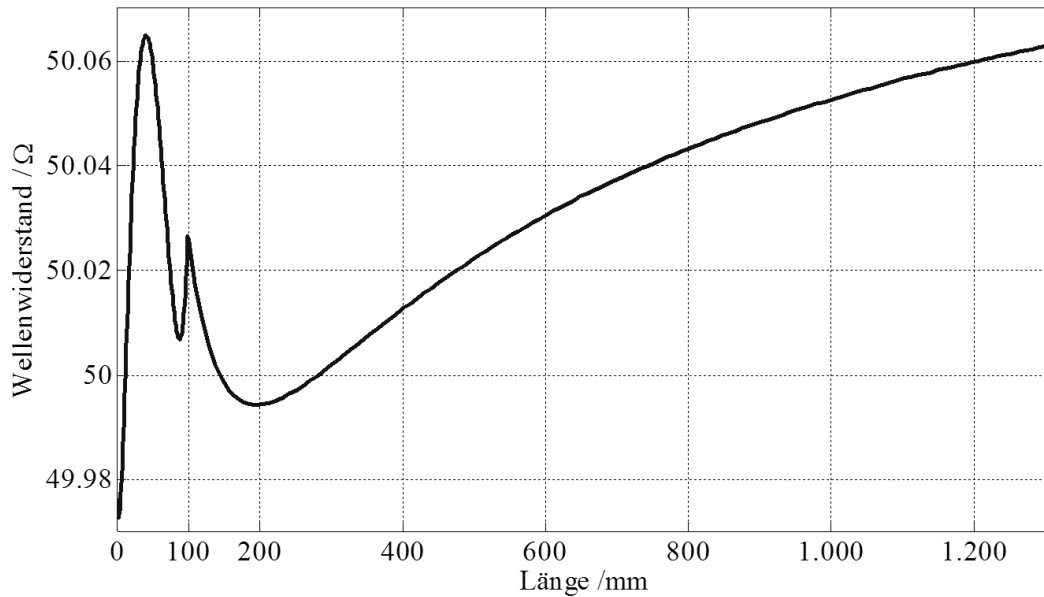


Abbildung 12 Wellenwiderstand über der Zellenlänge

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Wird die Kalibrierbarkeit der elektrischen und elektromagnetischen TE Messmethode verglichen, bleiben in beiden Fällen Unbekannte im Signalpfad unausweichlich. Der Vorteil der elektrischen gegenüber der elektromagnetischen Messung ist eine Kalibrierung bis an den Anschlusspunkt am Leistungstransformator. Die transformatorinterne Signalausbreitung ist jedoch weiter unbekannt. Daher lässt die gemessene, kalibrierte scheinbare Ladung keinen eindeutigen Rückschluss auf den tatsächlichen Ladungs- bzw. Energieumsatz der internen TE Quelle zu. Eine Charakterisierung bzw. Kalibrierung der UHF Methode muss noch erfolgen. Der in diesem Beitrag präsentierte Vorschlag ermöglicht es, mit Hilfe des Antennenfaktors, UHF Messsysteme ähnlich wie elektrische Messsysteme, untereinander vergleichbar zu machen. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um eine Standardisierung der UHF Methode zu ermöglichen und um Abnahmepegel definieren zu können. In Tabelle 1 ist abschließend eine Zusammenstellung der gezeigten Einflüsse auf die Kalibrierbarkeit der zwei Messmethoden aufgelistet.

Tabelle 1 Vergleich der elektrischen und elektromagnetischen TE Messmethoden

	IEC 60270		UHF	
Tatsächlicher TE Pegel	pC	unbekannt	mV	unbekannt
Dämpfung im Ausbreitungsweg	Tiefpassfilterwirkung der Wicklung & Verhältnis der internen Kapazitäten	unbekannt	Dämpfung der elektromagnetischen Wellen	unbekannt (jedoch klein)
Nachweis der Sensitivität	Kalibrierimpuls	Nur direkt an Durchführung	UHF Impuls	An mehreren installierten Sensoren
Kalibrierung	Verhältnis zwischen Koppelkapazität und Prüflingskapazität	<i>kalibriert</i>	Antennenfaktor	<i>bisher nicht kalibriert</i>
Abnahmepegel Prüffeld	@ 1,2 $U_m/\sqrt{3}$	<i>&lt; 100 pC</i>	?	?

## LITERATUR

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 60270 High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements," Geneva, Switzerland, IEC International Standard 60270 2000.
- [2] M. Judd, "Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, March 2005.
- [3] M. Judd, "Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 2: Field Experience," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/June 2005.
- [4] M. Siegel, S. Kornhuber, M. Beltle, A. Müller, S. Tenbohlen, "Monitoring von Teilentladungen in Leistungstransformatoren," in *Stuttgarter Hochspannungssymposium*, Stuttgart, 2012.
- [5] CIGRE WG A2.27, "Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers," in *Cigre Brochure 343*.
- [6] S. Coenen, A. Müller, M. Beltle, S. Kornhuber, "UHF and Acoustic Partial Discharge Localisation in Power Transformers," in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Hannover, Germany, 2011.
- [7] M. Siegel, S. Tenbohlen, S. Kornhuber, "Neue Methoden zur Ortung mehrerer TE-Quellen mittels akustischem Sensorarray," in *ETG Diagnostik Elekterischer Betriebsmittel*, Fulda, 2012.
- [8] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous, T. Strehl, "Sensitivity Limits of UHF PD Measurements on Power Transformers," in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Cape Town, South Africa, 2009.
- [9] 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, pp. 1668-1677.
- [10] S. Coenen, M. Reuter, S. Tenbohlen, S. Markalous, "Influence of PD Location in Transformer windings on IEC60270- and UHF-Measurements," in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Tokyo, Japan, 2010.
- [11] 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, 2004, pp. 58-61.
- [12] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous, T. Strehl, "Attenuation of UHF signals regarding the Sensitivity Verification for UHF PD Measurements on Power Transformers," in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Beijing, China, 2008.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 60076-3 Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances,".
- [14] S. Tenbohlen, M. Heindl, M. Jovalekic, A. Müller, M. Siegel, "Trends in der Diagnostik von Hochspannungs-Betriebsmitteln," in *ETG Diagnostik Elektrischer Betriebsmittel*, Fulda, 2012.
- [15] S. Coenen, S. Tenbohlen, T. Strehl, S. Markalous, "Fundamental Characteristics Of UHF PD Probes And The Radiation Behavior Of PD Sources In Power Transformers," in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Cape Town, South Afrika, 2009.
- [16] M. Judd, O. Farish, "A Pulsed GTEM System for UHF Sensor Calibration," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Volume:47, Issue: 4*.
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61000-4-20 ed2.0 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides ," 2010.
- [18] 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*, Zürich, 2013.