

Empfindlichkeitsvergleich von elektrischer und UHF Teilentladungsmessung zur Diagnose von Leistungstransformatoren

Sensitivity Comparison of electrical and UHF partial discharge measurement for power transformer diagnosis

Dipl.-Ing. Martin Siegel, M.Sc. Stephanie Hägele, Dipl.-Ing. Michael Beltle, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Stuttgart, Deutschland, martin.siegel@ieh.uni-stuttgart.de

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 nach IEC 60270 [1] die elektromagnetische UHF-Messmethode (UHF, Ultrahochfrequenz: 300 MHz – 3 GHz) zunehmend an Bedeutung. Beide Verfahren kommen in Diagnosemessung vor-Ort zum Einsatz. Speziell die UHF-Methode eignet sich auch als Teilentladungs-Monitoringsystem, da sie im Gegensatz zur elektrischer Messung unempfindlicher gegenüber externen Störern ist. Für die elektrische Teilentladungsmessung existiert ein standardisiertes Kalibrierverfahren. Die damit mögliche Vergleichbarkeit beliebiger elektrischer Messsysteme hat dazu geführt, dass sich trotz unbekannter, tatsächlich umgesetzter Ladung ein Abnahmepegel für Transformatoren etabliert hat. Dieser Beitrag zeigt eine Gegenüberstellung beider Messmethoden und bewertet die diagnostische Aussagekraft der elektrischen Messung anhand der Abhängigkeit der gemessenen scheinbaren Ladung Q_{IEC} von der Teilentladungsposition entlang einer Wicklung und abhängig vom verwendeten Frequenzbereich.

Abstract

The application of regular condition checks and continuous monitoring of power transformers gains in importance. Nowadays, these methods are used to detect damages in the insulation system at an early stage and thus to avoid outages. In addition to the electrical partial discharge (PD) measurement according IEC 60270 [1], the electromagnetic measurement method becomes common practice. The method is suitable for diagnostic measurement on-site and for continuous PD monitoring systems because of its lower sensitivity to external interference compared with the electrical measurement. For electrical PD measurement a calibration procedure is available. Although the actual PD charge remains unknown, the associated comparability of electrical PD measurement systems has led to an acceptance level at transformer routine tests. A similar calibration of the electromagnetic UHF (ultra-high frequency: 300 MHz – 3 GHz) measurement has not been implemented yet, but is a necessity for further standardization. This contribution compares both methods and takes a critical look at the established PD acceptance level. Therefore, the diagnostic value of the apparent charge measured according to IEC 60270 is discussed with regard to its dependency on the propagation path inside the winding and the frequency range of the measurement.

1 Einleitung

Um lokale Schäden der Isolation an Leistungstransformatoren frühzeitig erkennen zu können und dadurch die Ausfallgefahr zu minimieren, eignet sich die Teilentladungsmessung (TE) Messung. Verschiedene Messverfahren kommen in der Praxis zum Einsatz. Die konventionellen TE-Messung nach IEC 60270 [1] die elektrisch den Ladungsumsatz der TE bestimmt und die elektromagnetische Messmethode, welche die abgestrahlten Signale betrachtet. Neben dem Ladungsumsatz und der elektromagnetischen Abstrahlung erzeugen TE auch akustische Signale und UV-Licht. Zusätzlich entstehen durch chemische Prozesse des Energieumsatzes Fehlergase an der Fehlerstelle, die sich im umgebenden Isolieröl lösen. Die optische Detektion von TE wird nicht für TE im Transformator angewandt. Die akustische Messung wird hauptsächlich zur Lokalisierung von TE über Laufzeitdifferenzen verwendet [2], [3].

Für die elektromagnetische Messung wird mit einer in den Transformatorraum eingebrachten Antenne im ultrahochfrequenten Bereich (UHF: 300 MHz – 3 GHz) die TE gemessen. Diese Methode eignet sich auch für eine dauerhafte Überwachung von Transformatoren (Monitoring), da sie durch die elektromagnetische Schirmwirkung des Transformatorraums weniger empfindlich gegenüber externen Störern ist [4], [5]. Die Cigre Working Group WG A2-27 empfiehlt in ihrer Broschüre 343 an neuen Transformatoren Einrichtungen für die Installation von UHF Sensorik (DN50-Flansche oder dielektrische Fenster) vorzusehen [6]. Da die UHF-Methode immer häufiger angewandt wird, stellt sich oft die Frage nach ihrer Kalibrierbarkeit, um – wie bei der konventionellen Methode – eine Vergleichbarkeit einzelner Messungen zu erreichen. Häufig wird bei der UHF Methode unter Kalibrierung die Herstellung des Zusammenhangs aus gemessener Antennenspannung (mV) zur scheinbaren Ladung (pC) der elektrischen Messung verstanden, was allerdings bei

komplexen elektrischen Betriebsmitteln wie einem Transformator grundsätzlich nicht möglich ist. Aus diesem Grund soll in diesem Beitrag die Empfindlichkeit der konventionellen elektrischen Messung mit der UHF Methode, auch im Hinblick auf ihre Kalibrierbarkeit, verglichen werden. In **Bild 1** sind diese zwei Messprinzipien an einem Transformator dargestellt.

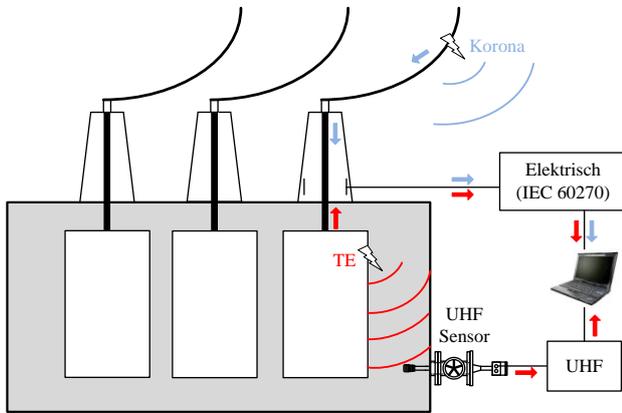


Bild 1 TE Messung am Transformator, elektrisch und elektromagnetisch (UHF).

Neben der aus diagnostischer Sicht wichtigen, internen TE (roter Signalpfad), ist auch eine externe TE (Korona, blauer Signalpfad) 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 mit der Antenne im Transformatorkegel im Wesentlichen Signale von internen TE empfangen werden. Die Schirmwirkung des geerdeten Kessels und die Filterfunktion von Hochspannungsdurchführungen verhindern ultrahochfrequente Einkopplungen externer TE oder anderer Störer.

2 Tatsächlicher TE Pegel

Ein grundlegender Unterschied der beiden Messverfahren ist durch die physikalische Messgröße gegeben. Bei der elektrischen Messung wird durch Integration des gemessenen Nachladestroms die 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 Fehlerstelle gemessen werden kann, bleibt der tatsächliche Pegel der TE immer unbekannt. Eine Kalibrierung kann nur bis zum Anschlusspunkt der Messsensorik an den Transformator erfolgen. Elektrische TE-Signale, die entfernt vom Kalibrierpunkt entstehen, werden durch den Ausbreitungsweg im Transformator beeinflusst. Der Signalpfad ist nicht bekannt und kann nicht in die Kalibrierung einbezogen werden. Bei der UHF-Messmethode besteht die gleiche Problematik, allerdings handelt es sich um einen anderen Ausbreitungsweg. Bei vom Sensor entfernten Quellen durchläuft die elektromagnetische Welle einen nicht bekannten Signalpfad, bevor sie gedämpft am Sensor gemessen werden kann. Aus diesem Grund kann bei beiden Messverfahren kein vollständiger Rückschluss vom gemessenen Wert auf die tatsächlich umgesetzte

Energie an der Fehlerstelle erfolgen. Vor diesem Hintergrund ist es schwierig aufgrund des gemessenen Pegels eine Kategorisierung nach kritischen oder tolerierbaren Fehler durchzuführen. Hilfreich kann die Analyse der Teilentladungsmuster sein.

Ein linearer Zusammenhang zwischen scheinbarer Ladung und Antennenfußpunktspannung kann bei gleich bleibendem Aufbau nachgewiesen werden [7], daher enthalten beide Messgrößen theoretisch denselben Informationsgehalt. 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 fälschlicherweise zu kleinen scheinbaren Ladungen führen oder unter dem Rauschpegel liegen.

3 Dämpfung im Ausbreitungspfad

Die Ausbreitungsmechanismen der elektrischen und UHF-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. Die Wicklung kann durch ein RLCM Netzwerk mit Tiefpassfilterfunktion abgebildet werden [8], [9], siehe **Bild 2**.

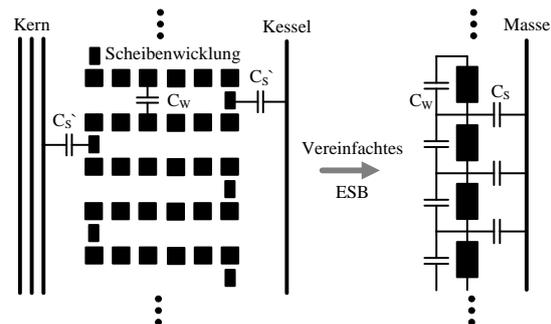


Bild 2 Transformatorwicklung als Filter für elektrische TE Impulse.

Hinzu kommt, dass bei der elektrischen Messung die internen Kapazitätsverhältnisse an der Fehlerstelle unbekannt sind. Beispielhaft kann dies an einem Luftteinschluss im Isolationssystem gezeigt werden. In **Bild 3** ist ein Luftteinschluss mit umgebenden intakten Isolationssystem vereinfacht dargestellt.

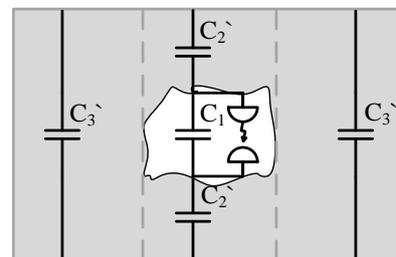


Bild 3 Luftteinschluss im Prüfling, interne Kapazitätsverhältnisse an Fehlerstelle und im gesunden Medium.

Bricht im Luftteinschluss die Spannung aufgrund einer TE zusammen, wird nach der Wiederverfestigung die Ladung zum Teil aus den dargestellten inneren Kapazitäten und zum Teil aus dem außen angeschlossenen Koppelkonden-

sator nachgeladen. Da sowohl der Ort und die Ausmaße der Fehlstelle nicht bekannt sind, kann auch das Verhältnis zwischen den Kapazitäten C_1 , C_2 und C_3 nicht bestimmt werden. Ein detaillierter Rückschluss ausgehend vom gemessenen Nachladestroms des angeschlossenen Koppelkondensators ist nicht möglich.

Bei der UHF-Messung findet die Ausbreitung der elektromagnetischen Signale nicht in der Wicklung selbst sondern in Öl und Pressboard statt. Dabei wird die elektromagnetische Welle gedämpft und kann an metallischen Teilen reflektiert werden. Die Dämpfung im elektromagnetischen Ausbreitungsweg ist vergleichsweise gering. Sie beträgt etwa 2 dB pro Meter für Transformatoröl [7].

4 Nachweis der Sensitivität

Wichtig bei einer TE-Messung ist der Nachweis der Sensitivität. Bei der elektrischen TE-Messung kann der Kalibrierimpuls an den Durchführungen oder den Koppelkapazitäten eingespeist werden, nicht direkt in die Wicklung. Durch Einspeisen eines Kalibrierimpulses am Sternpunkt oder einer anderen Phase kann der Einfluss der Wicklung die Sensitivität miteinbezogen werden. Bei der UHF-Messung kann bei mehreren installierten UHF-Sensoren ein UHF-Impuls über einen Sensor eingespeist und an einem anderen gemessen werden. Falls die Sensoren, wie in **Bild 4** dargestellt, auf gegenüberliegenden Seiten des Transformators liegen, kann die Sensitivität für den kompletten Transformator gezeigt werden [10], [11]. Allerdings ist es für beide TE Messmethoden nicht möglich einen Impuls direkt in der Wicklung zu erzeugen und somit bleibt die Sensitivität für TE direkt in Wicklungen quasi ohne Nachweis.

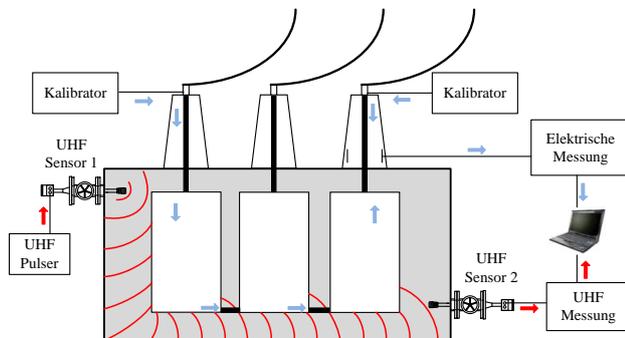


Bild 4 Sensitivitätsnachweis bei elektrischer und UHF TE Messung.

5 Kalibrierung

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 als Kalibrierfaktor k im Messsystem hinterlegt. Durch die Kalibrierung wird das Verhältnis zwischen Koppelkapazität C_K und Prüflingskapazität C_T ausgeglichen. **Bild 5** stellt einen typischen elektrischen TE-Messkreis bestehend aus Transformator als Prüfling, Hochspannungsdurchführung mit Messbelegen als Koppelkapazität, Ankoppelvierpol, Messsystem und Kalibrator dar. Daneben ist die UHF-Messung mit UHF-Kalibrierimpuls direkt am Sensor dargestellt.

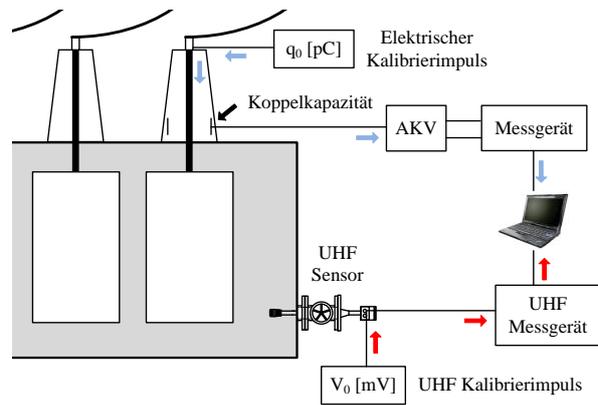


Bild 5 Kalibrierung der elektrischen und UHF TE-Messtechnik am Transformator.

Um bei der UHF-Messung die Charakteristik des verwendeten UHF Sensors mit in die Kalibrierung mit einbeziehen zu können, kann diese mithilfe einer ölgefüllten GTEM-Zelle, siehe **Bild 6**, bestimmt werden [4].

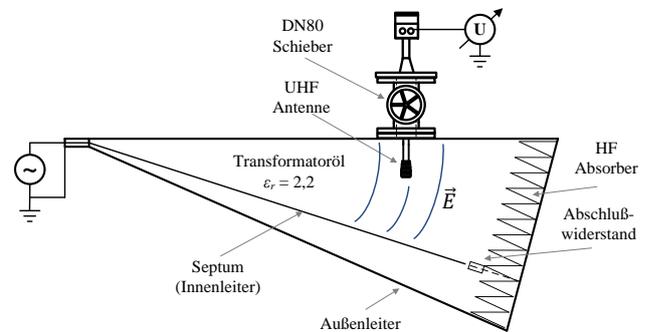


Bild 6 Charakterisierung von UHF TE-Sensoren mit einer GTEM-Zelle [12].

Obwohl der tatsächlich umgesetzte Ladungspegel trotz Kalibrierung nicht bekannt ist, hat sich vor allem in Norm-orientierten Werksabnahmeprüfungen ein üblicher Abnahmepegel $q_{s, Abnahme} < 100$ pC bei einer Prüfspannung $U_{prüf} = 1,2 U_N / \sqrt{3}$ für Transformatoren durchgesetzt [13], [14]. Eine genormte Kalibriermethode für die UHF-Messung existiert bisher noch nicht.

6 Einfluss der TE Position entlang einer Transformatorwicklung

6.1 Laboraufbau

Der Einfluss der TE-Position auf die Amplitude von TE-Signalen 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 **Bild 7** ist der Versuchsaufbau dargestellt. 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. Die künstliche TE Quelle erzeugt einen reproduzierbaren, konstanten Ladungsumsatz. Sie ist an einer gemassten Gewindestange befestigt, über die die Position entlang der Wicklung präzise verstellt werden kann. **Bild 8** zeigt ein

mit dieser TE-Quelle erzeugtes phasenbezogenes TE Muster (engl. PRPD-pattern) und den konstanten Pegel der Quelle über der Zeit (Trend).

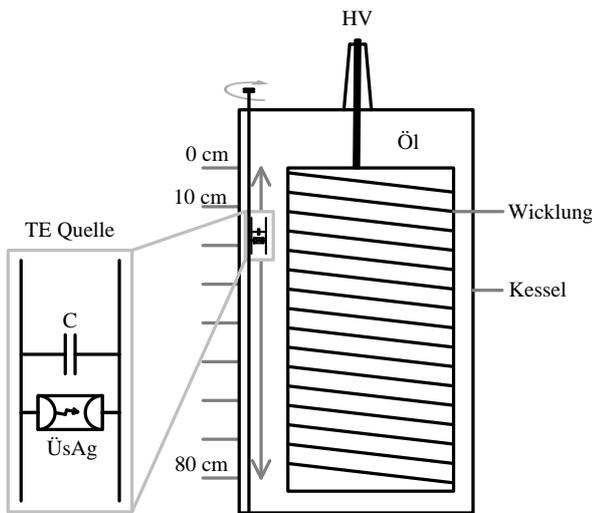


Bild 7 Versuchsaufbau mit höhenverstellbarer, künstlicher TE Quelle.

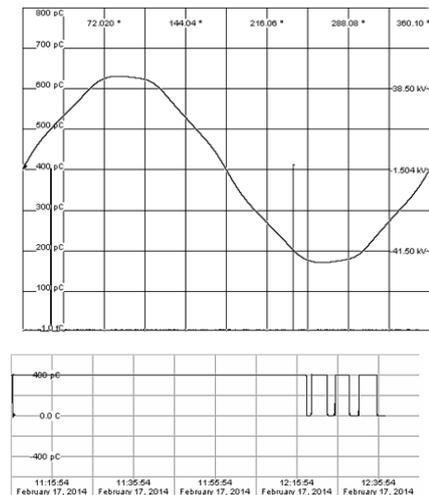


Bild 8 PRPD Muster und Trend der pegelstabilen künstlichen TE Quelle.

Erkennbar sind zwei einzelne, phasenstabile Punkte bei konstantem Pegel und der dazugehörige Trend. Um die Reproduzierbarkeit der Quelle untersuchen, wird zunächst die Spannung etwa eine Stunde über TE-Einsatzspannung gehalten (siehe Trend) und danach durch Verfahren der Spannung die Quelle wiederholbar aus- und wieder zugschalten.

6.2 Messergebnisse

Mit der künstlichen TE-Quelle wird am gezeigten Versuchsaufbau eine breitbandige elektrische TE-Messung durchgeführt. Der verwendete Ankoppelvierpol weist eine obere Grenzfrequenz von etwa 15 MHz auf. **Bild 9** zeigt das Amplitudendichtespektrum an vier verschiedenen Messpunkten entlang der Wicklung. Die verwendeten Frequenzbereiche sind:

- (1) IEC breitbandig: $f_M = 250 \text{ kHz}$, $\Delta f = 300 \text{ kHz}$
- (2) IEC schmalbandig: $f_M = 1 \text{ MHz}$, $\Delta f = 30 \text{ kHz}$

- (3) Erhöhte Frequenz: $f_M = 4,5 \text{ MHz}$, $\Delta f = 1 \text{ MHz}$

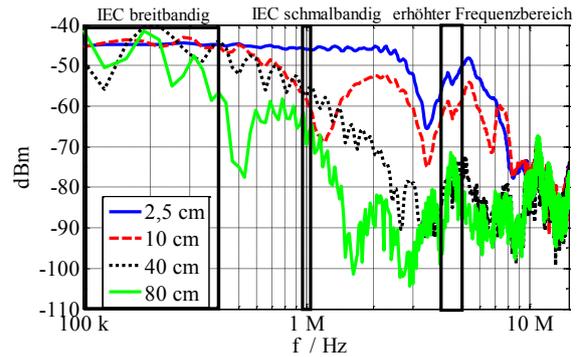


Bild 9 Amplitudendichtespektrum der elektrischen TE Messung an verschiedenen TE Positionen

Zu erkennen ist eine Tiefpassfilterwirkung des Aufbaus mit zunehmender Einschubtiefe der TE-Quelle. Markiert sind die drei betrachteten Frequenzbereiche. Dabei wird normgerecht nach IEC 60270 breitbandig (1) und schmalbandig (2) gemessen. Der dritte Frequenzbereich (3) wird beispielsweise häufiger bei vor-Ort TE Messungen verwendet, um störungsempfindliche Messungen durchführen zu können. Dieser ist jedoch nicht konform zur IEC Norm. In **Bild 10** ist die scheinbare Ladung gemessen in den drei Frequenzbereichen abhängig von der TE-Position entlang der Wicklung zu sehen. Für die Messungen wird nach jedem Wechsel des Frequenzbereichs an der Durchführung des Versuchsaufbaus neu kalibriert.

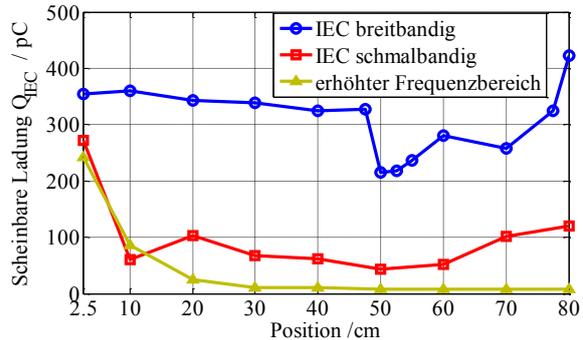


Bild 10 Scheinbare Ladung in Abhängigkeit der TE-Position entlang der Wicklung.

Trotz normgerechter Kalibrierung und reproduzierbarer, zeitlich stabiler TE-Quelle werden bereits bei geringer Einschubtiefe deutlich unterschiedliche Pegel gemessen. 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 bestätigt wird. Der Grund für die Pegeländerung an dieser Position ist noch nicht bekannt.

6.3 Erweiterung des Laboraufbaus

Für weitere Untersuchungen wird der Laboraufbau durch eine zweite Durchführung erweitert, die das untere Wicklungsende nach außen führt. Somit kann an der Wicklung von beiden Seiten mit der elektrischen TE-Methode gemessen werden. Außerdem werden vier UHF Drain Valve Sensoren durch DN 80 Flansche und ein UHF Plate Sen-

senor direkt auf dem Deckel angebracht. **Bild 11** zeigt den erweiterten Aufbau.

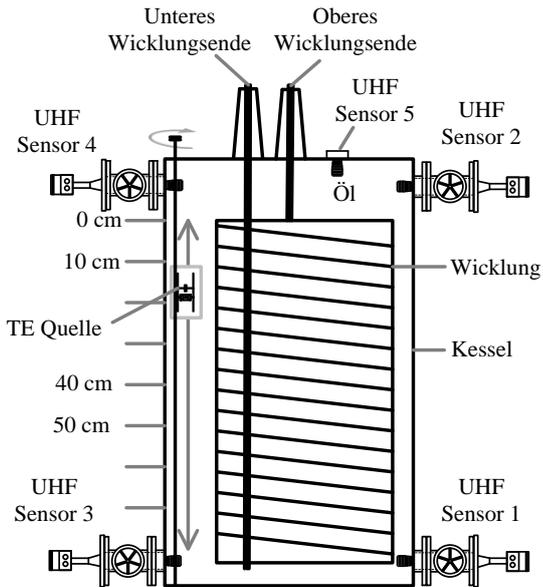


Bild 11 Erweiterter Versuchsaufbau mit UHF-Sensoren und beiden herausgeführten Wicklungsenden.

6.4 Messergebnisse

In **Bild 12** ist die jeweils neu kalibrierte elektrische Messung im breitbandigen IEC Bereich von beiden Wicklungsenden zu sehen.

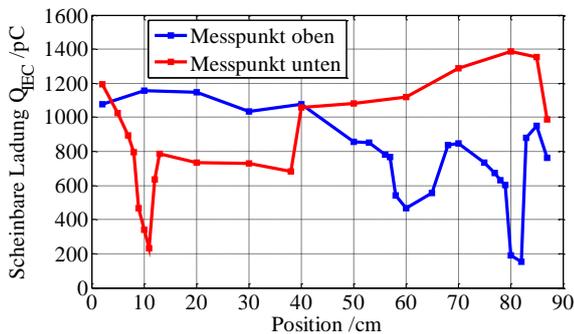


Bild 12 Breitbandig IEC: $f_M = 250 \text{ kHz}$, $\Delta f = 300 \text{ kHz}$

Die sich im Vergleich zu den vorangegangenen Ergebnissen unterscheidenden Ladungspegel ergeben sich durch einen größeren tatsächlichen Ladungsumsatz der künstlichen TE-Quelle (Kapazität wurde vergrößert). Grundsätzlich ist der grobe Verlauf der alten Messung vom oberen Wicklungsende mit einem Einbruch bei etwa 50 – 60 cm bestätigt. Allerdings kommt bei dieser Messung ein zweiter starker Einbruch im Ladungspegel bei 80 cm hinzu. Die zweite Kurve zeigt die Messung vom unteren Wicklungsende. Hier ist qualitativ ein gespiegelter Verlauf erkennbar.

In **Bild 13** wird die schmalbandige elektrische Messung gezeigt. Auch hier lässt sich der Verlauf der vorangegangenen Messung nachvollziehen. Die Messung vom unteren Wicklungsende verläuft qualitativ ebenso gespiegelt.

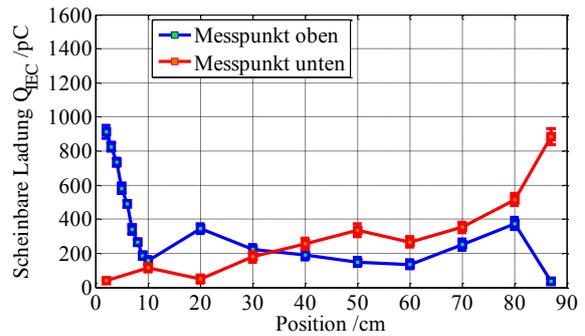


Bild 13 Schmalbandig IEC: $f_M = 1 \text{ MHz}$, $\Delta f = 30 \text{ kHz}$

Bei zwei weiteren Mittenfrequenzen wird die schmalbandige Messung vom oberen Wicklungsende an ausgewählten Positionen wiederholt um den Einfluss der Messfrequenz in **Bild 14** zu zeigen. Bei gleichbleibender Bandbreite werden stark unterschiedliche scheinbare Ladungen gemessen. Mit steigender Mittenfrequenz nimmt der gemessene Pegel ab.

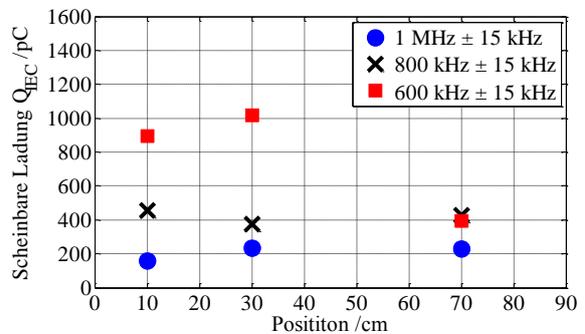


Bild 14 Schmalbandige IEC Messung bei unterschiedlichen Mittenfrequenzen an drei Referenzpunkten.

Zusätzlich zur elektrischen Messung wird die elektromagnetische Abstrahlung der künstlichen TE-Quelle mit insgesamt 5 UHF-Sensoren breitbandig gemessen. In **Bild 15** sind die Verläufe der Maximalamplituden der unverstärkten Antennenfußpunktspannungen zu sehen.

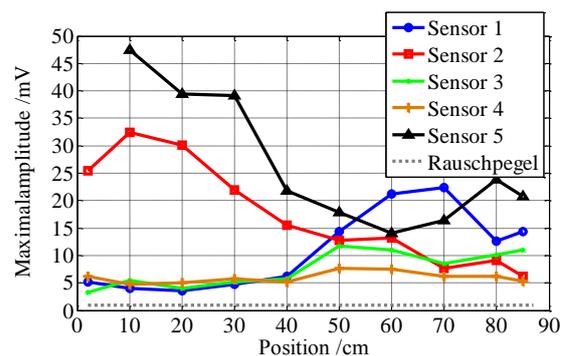


Bild 15 UHF-Amplitude in Abhängigkeit der TE-Position entlang der Wicklung.

Erwartungsgemäß hängt der gemessene UHF-Pegel hauptsächlich vom Ausbreitungsweg, d.h. vom Abstand der TE-Quelle zum UHF-Sensor ab. Die Sensoren 1, 2 und 5 zeigen diesen Verlauf deutlich, wohingegen die Sensoren 3 und 4 einen fast konstanten Pegel aufweisen, unabhängig von der TE-Position.

7 Zusammenfassung

Wird die Empfindlichkeit von elektrischer mit UHF TE-Messung verglichen muss beachtet werden, dass bei der Kalibrierung beider Messmethoden am Transformator Unbekannte im Signalpfad bestehen bleiben, die nicht mit kalibriert werden können. Die Messungen an einem Versuchsaufbau mit einer pegelstabilen, künstlichen TE-Quelle zeigen, dass sowohl breitbandige als auch schmalbandige elektrische TE-Messungen nach IEC 60270 von der TE-Position entlang der Wicklung beeinflusst werden. Die UHF-Messung hängt weniger von der Position entlang der Wicklung, sondern eher direkt vom Abstand zwischen TE-Quelle und UHF-Sensor ab. Beide Messmethoden können die TE-Quelle an allen Positionen entlang der Wicklung detektieren. Beide Verfahren lassen keinen direkten Rückschluss auf die tatsächlich umgesetzte Ladung bzw. Energie in der Fehlstelle zu. Vorteil der elektrischen Messung ist die bestehende Norm, die zu anerkannten Prüfpegeln für elektrische Betriebsmittel geführt hat. Wie dieser Beitrag zeigt, sind Prüfpegelvorgaben für Transformatoren kritisch zu betrachten. In **Tabelle 1** ist abschließend eine vergleichende Zusammenstellung der beiden TE-Messmethoden dargestellt.

Tabelle 1 Vergleich elektrischer mit UHF TE Messung

	IEC 60270	UHF
Tatsächlicher TE Pegel	pC <i>unbekannt</i>	mV <i>unbekannt</i>
Dämpfung im Ausbreitungsweg	Tiefpassfilterwirkung der Wicklung & Verhältnis der internen Kapazitäten <i>unbekannt</i>	Dämpfung der elektromagnetischen Wellen <i>unbekannt (jedoch klein)</i>
Kalibrierung	Verhältnis zwischen Koppelkapazität und Prüflingskapazität <i>kalibriert</i>	Antennenfaktor <i>bisher nicht kalibriert</i>
Abnahmepegel	<100 pC @ 1,2U _N	? ?

8 Literatur

- [1] International Electrotechnical Commission, IEC 60270 High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, 3. Edition, Geneva, Switzerland, 2000.
- [2] S. Coenen, A. Müller, M. Beltle and S. Kornhuber, „UHF and Acoustic Partial Discharge Localisation in Power Transformers,“ in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Germany, Hannover, 2011.
- [3] M. Siegel, S. Tenbohlen, S. Kornhuber, „New Methods for Multisource PD Localization on Power

Transformers by an Acoustic Sensor Array,“ in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Seoul, Korea, 2013.

- [4] M. Judd, „Partial Discharge Monitoring of Power Transformers using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation,“ in *IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 21, Issue 3*, 2005.
- [5] M. Judd, „Partial Discharge Monitoring of Power Transformers using UHF Sensors Part 2: Field Experience,“ in *IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 21, Issue 3*, 2005.
- [6] CIGRFE WG A 2.27, „Recommendations for Condition Monitoring and Condition Assessment Facilities for Transformers,“ in *Cigre Brochure 343*.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] S. Coenen, M. Reuter, S. Tenbohlen, S. Markalous, „Influence of PD Location in Transformer Windings on IEC 60270- and UHF Measurements,“ in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Tokyo, Japan, 2010.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] M. Siegel, S. Tenbohlen, „Kalibrierbarkeit verschiedener Messverfahren für Leistungstransformatoren,“ in *Stuttgarter Hochspannungssymposium*, Stuttgart, 2014.
- [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.