

# Aufbau einer ölgefüllten GTEM Zelle zur Vermessung der Empfindlichkeit von Sensoren zur UHF Teilentladungsmessung

## Design of an Oil-filled GTEM Cell for the Characterization of UHF Partial Discharge Sensors

Dipl.-Ing. Martin Siegel, 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

In Leistungstransformatoren können Teilentladungen (TE) an Fehlstellen in der elektrischen Isolierung auftreten. In ungünstigen Fällen können TE zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der Isolation im Laufe der Zeit und schließlich zu einem Zusammenbruch des gesamten Isolationssystems führen. Welche Bedeutung die TE-Messung in der Diagnostik hat, zeigt sich durch die standardisierte elektrische Messung nach IEC 60270 [1], die für Abnahmeprüfungen von Leistungstransformatoren erforderlich ist. Die scheinbare Ladung  $Q_{IEC}$  ist ein wichtiger Qualitätsindex von Transformatoren. Seit einigen Jahren kommen neben der genormten Messung alternative Messmethoden für TE zum Einsatz. Die Ultrahochfrequenz (UHF)-Messung, die ursprünglich für gasisolierte Anlagen entwickelt wurde [2], wird zunehmend auch für die Diagnostik von Transformatoren eingesetzt [3], [4]. Da die UHF-Messung mehrere Vorteile mit sich bringt, kann eine Standardisierung der Methode als zweites Verfahren zu TE Messung durchaus sinnvoll sein. Wichtige Voraussetzungen für eine Standardisierung sind die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von UHF-Messungen untereinander. Um dies zu erreichen ist wie bei der elektrischen Messung eine Kalibrierung der Messtechnik und eine Validierung der Empfindlichkeit der UHF-Sensorik erforderlich [5]. Die Empfindlichkeit kann durch den Antennenfaktor (AF) bei korrekter Dielektrizitätskonstante unter in-Öl Bedingungen bestimmt werden. Mit bekanntem AF können Korrekturfaktoren eingeführt werden, um Messungen verschiedener UHF-Sensoren vergleichbar zu machen. Dieser Beitrag zeigt den Aufbau einer mit Mineralöl gefüllten Gigahertz-Transversal-Elektro-Magnetische-Zelle (GTEM-Zelle) für die Bestimmung des AF von UHF-Sensoren.

### Abstract

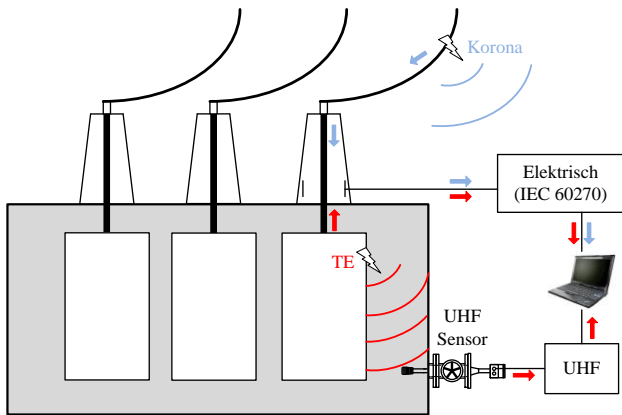
Local failures in power transformers are often caused partial discharges (PD) in the electric insulation. Continuous deterioration over time increases the defect which finally can lead to a breakdown of the entire insulation. The importance of PD measurement is accommodated by standardized electrical measurement according to IEC 60270 [1] which is required for acceptance certificates at routine testing. Therefore, the apparent charge  $Q_{IEC}$  is an important value for transformer quality. Since a couple of years, alternative measurement methods for PD are used. Originally developed for gas insulated systems [2], ultra high frequency (UHF) measurement establishes in transformer diagnosis since the last years [3], [4]. To become an accepted quality factor, UHF has to be proven a reliable testing method. Therefore, a sensor calibration and a validation of its sensitivity is required [5], comparable to the electrical measurement. To provide profound knowledge of the equipment, the antenna factor (AF) of the UHF sensor needs to be determined under inside-transformer conditions. To meet these conditions, an oil-filled GTEM-cell is required for correct permittivity. This contribution describes the design of a Gigahertz-Transversal-Electro-Magnetic Setup (GTEM-cell) for the determination of the UHF sensor's AF. Correction factors can then be introduced to minimize measurement errors and to establish comparability for the UHF method.

## 1 Einleitung

Der zuverlässige Betrieb von Leistungstransformatoren ist wichtig für die Versorgungssicherheit des Stromnetzes. Ausfälle können zu Folgeschäden und entsprechend hohen Kosten führen. Schäden an der Isolation eines Transformators müssen deshalb frühzeitig erkannt werden [6]. Verschiedene diagnostische Methoden haben sich entsprechend der Anforderungen bei Vor-Ort und Prüffeldmessungen etabliert. Die elektrische TE-Messung nach IEC 60270 ist als Abnahmeprüfung für Leistungstransformatoren standardisiert. In den letzten Jahrzehnten sind alternative Messmethoden für TE entstanden. Ursprüng-

lich wurde die ultrahochfrequente TE-Messung (UHF: 300 MHz – 3 GHz) für gasisolierte Schaltanlagen (GIS) entwickelt [2]. Zunehmend wird das Verfahren auch bei Leistungstransformatoren angewandt [3]. Die UHF-Methode hat sich bereits als Trigger für die akustische Lokalisierung von TE [7] und für vor-Ort / online Diagnosen etabliert und eignet sich für dauerhaftes TE Monitoring an Transformatoren. Die UHF-Messung ist elektromagnetisch gegen externe Störungen durch den geerdeten Transformatorkegel abgeschirmt, siehe **Bild 1**. Elektrische vor-Ort TE-Messungen sehen in der Praxis häufiger Einkopplungen externer Störer. Die UHF-Messung ist in solchen Fällen vorteilhaft. Die Schirmwirkung ermög-

licht den Einsatz für verschiedene Anwendungsfälle. Zum Beispiel, können UHF-Messungen im Prüffeld mit niedrigen Störpegeln mit Messungen vor-Ort in Umgebungen mit hohen externen Störpegeln verglichen werden, um Transformatoren nach Transport und Installation erneut prüfen zu können.



**Bild 1** Elektrische und UHF TE-Messung an einem Transformator. Rot: Signal einer inneren TE, blau: externer Störer (Korona).

Sowohl die elektrischen als auch die UHF-TE-Pegel werden beeinflusst durch

1. die Art und den tatsächlichen Pegel der TE
2. die Signaldämpfung im Ausbreitungsweg
3. die Sensorempfindlichkeit
4. die Empfindlichkeit der angeschlossenen Messtechnik.

Der Einfluss der elektrischen Messtechnik (Koppelkapazität und Ankoppelvierpol) kann bei der Kalibrierung nach IEC 60270 korrigiert werden, nicht jedoch der Einfluss des unbekanntenen Signalausbreitungspfades [8]. Für die UHF-Methode ist durch eine Kalibrierung des Messpfades eine vergleichbare Vorgehensweise möglich, die insbesondere Empfangseigenschaften des verwendeten UHF-Sensors berücksichtigt. Um die Empfindlichkeit von UHF-Sensoren zu kennen muss der AF bestimmt werden. Hierfür wurden in früheren Untersuchungen luftgefüllte TEM-Zellen verwendet, mit denen der AF bis etwa 950 MHz bestimmt werden kann [9]. Aufgrund der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten 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. Um den AF von UHF-Sensoren für Leistungstransformatoren im vollen UHF-Frequenzbereich unter realen Bedingungen vermessen zu können, wird eine ölgefüllte Gigahertz-Transversal-Elektro-Magnetische-Zelle (GTEM-Zelle) benötigt.

## 2 Charakterisierung von UHF Sensoren

UHF-Sensoren sind passive Antennen, die durch ihre spezielle Bauform in Leistungstransformatoren eingebracht werden können, siehe **Bild 2**. Die Empfindlichkeit einer Antenne hängt von ihrem Design ab. Bei Monopolen oder

Dipolen wird oft der Antennenfaktor zur Charakterisierung verwendet. Dieser ist definiert als

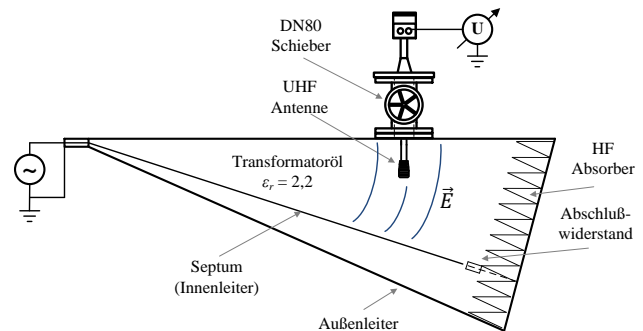
$$AF(f) = \frac{E(f)}{U(f)} \quad (1)$$

wobei  $U(f)$  der Ausgangsspannung der Antenne und  $E(f)$  der elektrischen Feldstärke der einfallenden elektromagnetischen Wellen entspricht. Alternativ kann die Charakterisierung auch über die effektive Antennenhöhe erfolgen, die als inverser AF definiert ist.



**Bild 2** UHF-TE-Sensor für den Kesseleinbau über DN-80/50 Ölschieber mit einfallender elektromagnetischer Welle und resultierender Antennenfußpunktspannung.

Eine GTEM-Zelle (**Bild 3**) stellt für die Bestimmung des AF ein Prüfvolumen mit quasihomogenem elektrischem Feld  $E(f)$  bereit [10]. Sie besteht aus einem pyramidenähnlichen Aufbau, der einen koaxialen Leiter bis zum rückseitigen Abschluss immer weiter aufspannt. Der koaxiale Aufbau minimiert externe Störeinkopplungen und ist so abgeschlossen, dass keine Reflexionen zu Feldüberlagerungen im Prüfvolumen entstehen.



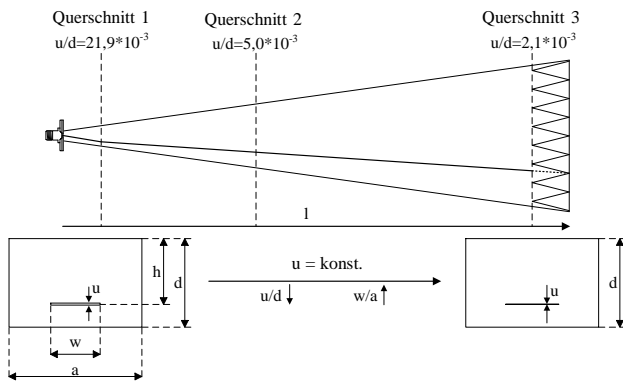
**Bild 3** Prinzipieller Aufbau einer GTEM-Zelle für die Vermessung von UHF-Sensoren.

Für die Auslegung einer Zelle in Öl ist zu beachten, dass alle Geometrien für Septum und Außenleiter für die höhere Permittivität entsprechend angepasst werden müssen um einen über der Zellenlänge konstanten Wellenwiderstand  $Z = 50 \Omega$  zu erhalten. In den Deckel der Zelle ist ein Adapterflansch eingebaut, über den UHF-Sensoren angeschlossen werden können. Mit diesem Aufbau kann der AF direkt in Öl gemessen werden.

## 3 Design einer ölgefüllten GTEM Zelle

Um das Prüfvolumen für die Vermessung von UHF-Sensoren möglichst groß zu gestalten wird die Geometrie der Zelle bei konstantem Wellenwiderstand optimiert. Dazu wird das Verhältnis von Septumhöhe ( $h$ ) zu Zellenhöhe ( $d$ ) konstant als  $h/d = 0.75$  gewählt. Die Sep-

tumsdicke  $u$  ist aus Fertigungsgründen konstant. Die Anpassung des Wellenwiderstandes wird durch passende Wahl des  $w/a$ -Verhältnisses aus Septumsbreite ( $w$ ) zu Zellenbreite ( $a$ ) realisiert, siehe **Bild 4**.



**Bild 4** Veränderung des Verhältnisses Septumsdicke zu Zellenhöhe ( $u/d$ ) und benötigte Anpassung der Septumsbreite zur Zellenbreite ( $w/a$ )

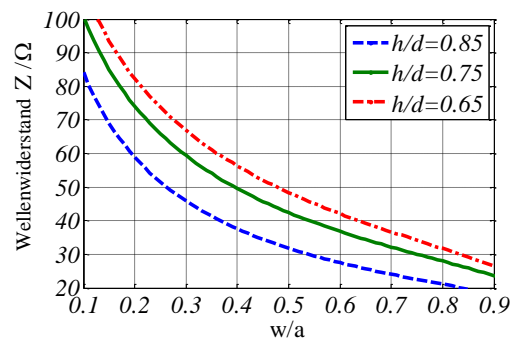
### 3.1 Wellenwiderstand

Um Reflexionen in der Zelle am Eingang und am Abschluss zu vermeiden muss der komplette Aufbau frei von Stoßstellen sein. Der Wellenwiderstand  $Z$  wird durch die Ersatzschaltung aus infinitesimal kurzen Linienelementen definiert. Dabei werden für die Auslegung nur die Längsinduktivität  $L'$  und der Kapazitätsbelag  $C'$  gegen Masse betrachtet. Der Längswiderstandsbelag  $R'$  und der Leitwert  $G'$  gegen Masse können vernachlässigt werden. Aus den in Bild 4 gezeigten Geometrie Größen kann für jeden Querschnitt durch die Zelle  $L'$  und  $C'$  ermittelt und daraus  $Z$  berechnet werden. Ist die Septumsdicke  $u$  gegenüber der Zellhöhe  $d$  sehr klein, kann  $u$  vernachlässigt werden. Dies gilt für den Hauptteil des Innenleiters (das Septum), jedoch nicht für den Anfangsbereich der Zelle, der den Übergang von Koaxialleiter auf die pyramidenförmige Zelle realisiert, den sogenannten Apex. Die Geometrie des Apex muss daher vom Septum getrennt berechnet werden. Der Wellenwiderstand  $Z$  entlang der Zelle kann mit einer analytischen Näherung oder mit einer numerischen Simulation durch einen Feldlöser auf Basis der Methode der finiten Elemente (FEM) ermittelt werden.

### 3.2 Analytische Näherung

Zunächst wird eine analytische Näherung für einen rechteckigen koaxialen Querschnitt der Zelle (siehe Bild 4) mit infinitesimal dünnen Septum und vertikalem Offset gemäß [11] verwendet. Diese Näherung ist aufgrund der vernachlässigten Leiterdicke  $u$  nicht für die Berechnung des Apex anwendbar [12].

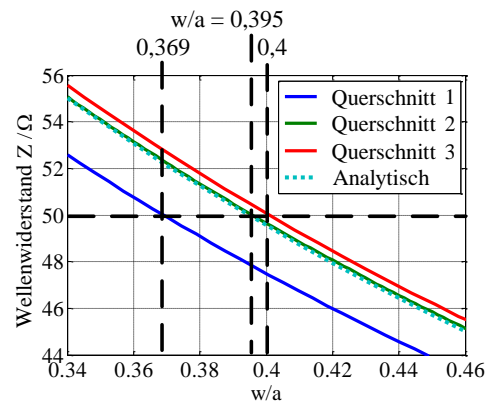
In **Bild 5** ist der durch diese Näherung berechnete Wellenwiderstand in Abhängigkeit des  $w/a$ -Verhältnisses bei drei verschiedenen  $h/d$ -Verhältnissen zu sehen. Der Wellenwiderstand  $Z$  kann über der gesamten Zellenlänge konstant gehalten werden, wenn die geometrischen Verhältnisse von jedem Querschnitt konstant gehalten bleiben. Für die öl-gefüllte GTEM-Zelle mit einem Verhältnis  $h/d = 0.75$  ergibt sich ein konstantes Verhältnis  $w/a = 0.4$ .



**Bild 5** Berechneter Wellenwiderstand einer ölgefüllten GTEM-Zelle bei drei verschiedenen Verhältnissen von Septumhöhe zu Zellenhöhe ( $h/d$ ) unter Veränderung der Septumsbreite zur Zellenbreite ( $w/a$ ).

### 3.3 Numerisches Modell

Neben dem analytischen Näherungsmodell wird ein numerisches Modell verwendet, das mithilfe eines FEM Feldlösers den Wellenwiderstand der GTEM-Zelle bestimmen kann. Die Zelle wird in mehrere Querschnitte unterteilt, für diese wird die Verteilung des elektrischen und magnetischen Feldes mit einem 2D-Solver simuliert. Aus den simulierten elektrischen und magnetischen Feldenergien können die Belagswerte  $L'$  und  $C'$  ermittelt werden woraus  $Z$  berechnet wird. **Bild 6** zeigt die Abhängigkeit des Wellenwiderstandes vom Verhältnis  $w/a$  bei den drei in Bild 4 eingezeichneten Querschnitten, die sich im Verhältnis  $u/d$  unterscheiden.



**Bild 6** Aus Feldsimulation berechneter Wellenwiderstand  $Z$  bei drei verschiedenen Querschnitten entlang der Zelle unter Berücksichtigung der Innenleiterdicke  $u$ .

Die Widerstandskennlinien der Querschnitte zeigen zueinander eine Parallelverschiebung mit sinkenden Werten für  $Z$  bei steigendem Verhältnis von  $u/d$ . Das numerische Modell und die analytische Näherung sind bei Querschnitten mit kleinem Verhältnis  $u/d$  vergleichbar, siehe Querschnitte 2 und 3.

### 3.4 Design des Septums

Für das Design und die spätere Fertigung des Septums wird die numerische Berechnung verwendet. Bei konstantem Verhältnis  $h/d$  und konstantem  $u$  wird das Verhältnis  $w/a$  entlang der Zellenlänge angepasst. Gemäß **Bild 6**

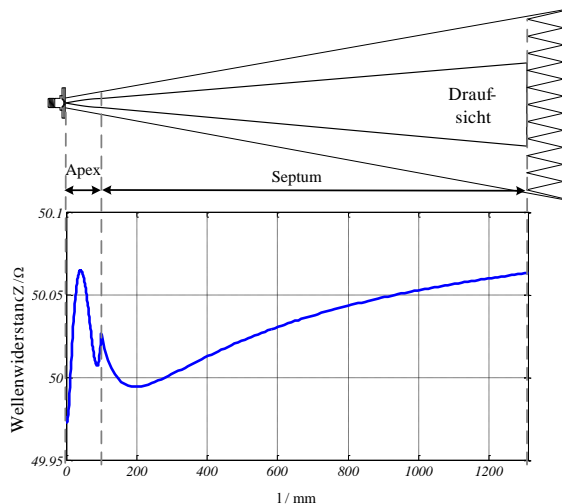
muss das Verhältnis  $w/a$  an den berechneten Querschnitten 0.369, 0.395 und 0.4 betragen. Durch eine lineare Fitfunktion wird  $w/a$  entlang der Zelle für die Fertigung bestimmt. Die Näherung führt zu einer geringen berechneten maximalen Abweichung des Wellenwiderstandes  $\Delta Z = 0,06 \Omega$  (0.13%) am Zellenende.

### 3.5 Design des Apex

Der Übergang von der koaxialen Zuleitung auf die Zelle muss separat betrachtet werden. Die rotationssymmetrische, koaxiale Zuleitung weist ein Verhältnis  $h/d = 0.5$  auf. Innerhalb der ersten 100 mm der Zelle muss eine Anpassung auf  $h/d = 0.75$  erfolgen. Zusätzlich hat die Septumsdicke  $u$  einen signifikanten Einfluss aufgrund der kleinen Zellhöhe  $d$  im Apexbereich. Um den Wellenwiderstand  $Z = 50 \Omega$  möglichst konstant halten zu können werden fünf Querschnitte im Apex simuliert und durch ein Polynom 4. Grades gefittet.

### 3.6 Wellenwiderstand entlang der Zelle

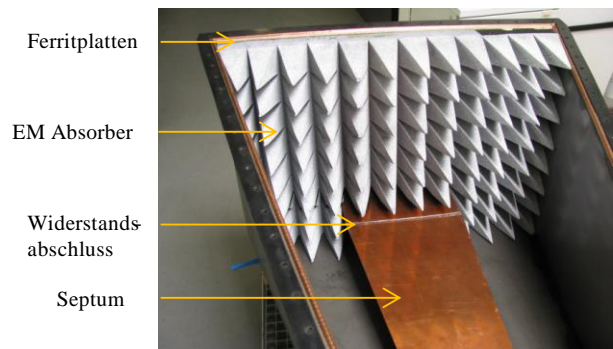
Der Wellenwiderstand  $Z$  über der Zelllänge ist in **Bild 7** dargestellt. Im Bereich 0-100 mm wird die berechnete Geometrie des Apex verwendet, welche die Höhenanpassung des Innenleiters unter Berücksichtigung der Apexdicke  $u$  durchführt. Für den Hauptteil der Zelle (100 mm – 1312 mm) wird die berechnete Septumsgeometrie verwendet. Die Abweichung ist in Anbetracht von Fertigungstoleranzen ausreichend gering.



**Bild 7** Berechneter Wellenwiderstand entlang der Zellenlänge.

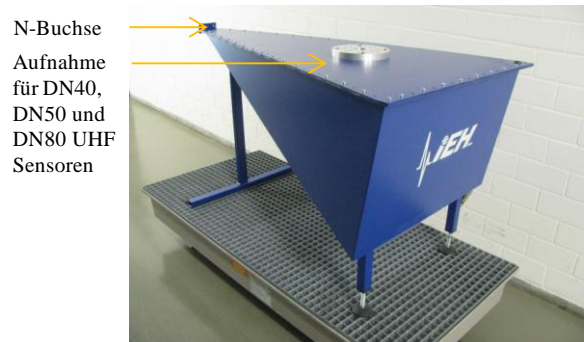
### 3.7 Abschluss

Um Reflexionen am Zellenende zu vermeiden, muss ein galvanischer  $50 \Omega$  Abschlusswiderstand flächig über die gesamte Septumsbreite angebracht werden. Dieser besteht aus SMD Widerständen in Parallelschaltung. Der Abstand zwischen den einzelnen Widerständen muss kleiner als  $\lambda/10$  der kleinsten auftretenden Wellenlänge (ca. 1 mm für 3 GHz in Öl) sein um Reflexionen zu vermeiden [13]. Für den reflexionsfreien Wellenabschluss am Zellenende werden Ferritplatten und Schaumstoffabsorber flächig auf der Rückwand angebracht, siehe **Bild 8**.



**Bild 8** Innenaufbau der GTEM-Zelle, Blick auf das Zellenende.

Eine Gesamtansicht der Zelle ist in **Bild 9** dargestellt. Der Anschluss an die Signalerzeugung erfolgt über ein Koaxialkabel mit N-Verschraubungen. Auf dem Deckel der Zelle befindet sich das Adaptersystem um Sensoren für Flachkeilschieber und Sensoren für die direkte Kesselmontage anzuschließen. In der Zelle, direkt unter dem Adapter beginnt das Prüfvolumen. Der gesamte Aufbau ist fahrbar auf einer Ölauffangwanne aufgebaut.



**Bild 10** Außenansicht der ölgefüllten GTEM-Zelle. Aufbau auf einer Ölauffangwanne.

## 4 Zusammenfassung

Um als Prüfverfahren anerkannt und evtl. standardisiert zu werden, muss für die UHF-Messung ein einheitliches Kalibrierverfahren bereitgestellt werden, das UHF-Messungen unabhängig vom verwendeten Sensor oder Messsystem vergleichbar macht. Bei der elektrischen Messtechnik nach IEC 60270 kann durch eine Kalibrierung der Einfluss des Signalpfads bzw. der Sensorik (bestehend aus Koppelkondensator und Ankoppelvierpol) zwischen Prüfling und Messgerät korrigiert werden. Um den Signalpfad in der UHF-Messung zu kennen und kompensieren zu können, müssen die Empfangseigenschaften der UHF-Sensoren bekannt sein, die über den Antennenfaktor charakterisiert werden. Für eine zuverlässige Charakterisierung muss der Antennenfaktor unter realistischen, reproduzierbaren Bedingungen, direkt unter Öl im gesamten UHF-Frequenzbereich (300 MHz – 3 GHz) bestimmt werden können. Hierzu wird in diesem Beitrag eine mit Öl gefüllte GTEM-Zelle im  $50 \Omega$  System entworfen. Die Zelle stellt ein Prüfvolumen mit bekannter elektrischer Feldstärke zur Verfügung und ist für vorhandene typische Antennen Größen und Geometrien ausgelegt.

Die Zelle ist kompatibel für übliche UHF-Drain Valve Sensoren und verfügt über einen standardisierten Flachkeilschieber, über den Sensoren in die Zelle eingeführt werden können. Mit Hilfe von Adaptern können auch UHF-Plate Sensoren vermessen werden, die direkt bei neuen Transformatoren in der Transformatorkeiselwand eingeschweißt werden. Mit dem Messaufbau kann eine Bewertung der Qualität von Sensoren und ihrer Empfindlichkeit im Vergleich vorgenommen werden.

## 5 Literatur

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC), High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, Geneva, Switzerland: IEC, 2000.
- [2] CIGRE TF 15 / 33.03.05, „PD Detection Systems for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method,“ in *Electra No. 183*, International Council on Large Electric Systems, 1999.
- [3] M. D. Judd, „Experience with UHF partial discharge detection and location in power transformers,“ in *Electrical Insulation Conference*, Annapolis, Maryland, 2011.
- [4] S. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous, T. Strehl, „Sensitivity of UHF PD Measurements in Power Transformers,“ in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, , No. 6, 2008.
- [5] D. Templeton, H. Li, J. Peasron, R. Brinzer, A. Reid, M. Judd, „Sensitivity Testing of a UHF Power Transformer Monitoring System,“ in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Ljubljana, 2007.
- [6] J. Fuhr, „Procedure of Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers,“ in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 12, No. 5, 2005.
- [7] 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.
- [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, S. Tenbohlen, T. Strehl, S. Markalous, „Fundamental Characteristics of UHF PD Probes and the Radiation Behaviour of PD Sources in Power Transformers,“ in *Proceedings of 16th ISH*, South Africa, 2009.
- [10] Deutsche Industrienorm DIN, „DIN EN 61000-4-20 Elektromagnetische Verträglichkeit(EMV) Teil 4-20: Prüf und Messverfahren- Messung der Störfestigkeit in transversalelektromagnetischen (TEM-) Wellenleitern,“ DIN / VDE, Berlin, 2011.
- [11] E. Yamashita, K. Atsuki, „Strip line with rectangular outer conductor and three dielectric layers,“ in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.18, No.5, 1970.
- [12] S. Tenbohlen, M. Siegel, M. Beltle, M. Reuter, „Suitability of UHF PD Measurement for Quality Assurance and Testing of Power Transformers,“ in *CIGRE Colloquium*, Zürich, 2013.
- [13] C. R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, New York: Wiley & Sons Inc., 1992.
- [14] Working Group D 1.33, „Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements,“ International Council on Large Electric Systems, Paris, 2010.