

Sinnvoller Einsatz von UHF-Teilentladungsmessungen bei Entwicklungs- und Vor-Ort-Prüfungen

Ralf Pietsch

ABB Hochspannungstechnik AG, Zürich, Schweiz

Abstract

Weltweit sich schnell ändernde Randbedingungen beim Stromübertragungs- und Verteilungsmarkt lassen die Nachfrage nach zuverlässigeren und kostengünstigeren Mittel- und Hochspannungsanlagen steigen. Dadurch gewinnt auch die Diagnostik von Schaltanlagen generell weiter an Bedeutung. In diesem Kontext ist u.a. die Beantwortung der Frage von großem Interesse, ob die Messung von Teilentladungen (TE) die Möglichkeit bietet, den dielektrischen Zustand einer Schaltanlage während einer Prüfung mit geeigneten und empfindlichen Sensoren zuverlässig und wirtschaftlich zu erfassen, sei es bei Entwicklungs- oder Vor-Ort-Prüfungen. Aus der Sicht des Betreibers wird eine kostengünstige, zuverlässige und aussagekräftige TE-Messung gewünscht. Mit den heutigen Systemen ist dies nur mit Einschränkungen realisierbar. Schwierig wird es bei der Interpretation der gemessenen Teilentladungsaktivität und den daraus abzuleitenden notwendigen Entscheidungen. Die Praxis zeigt, daß genau hier noch wichtige, offene Fragen zu klären sind. Mit Blick auf diese Thematik wird in diesem Vortrag an Hand von Beispielen aus der Praxis erläutert, welche Möglichkeiten und Grenzen der Einsatz der UHF-Teilentladungs-Messung an SF₆-isolierten Schaltanlagen besitzt.

1. Einleitung

Physikalische, technologische aber auch ökonomische Gründe schränken die Möglichkeiten der Teilentladungsmessung bei Entwicklungs- und Vor-Ort-Prüfungen an SF₆-isolierten Schaltanlagen (GIS) ein. Die hier näher diskutierte UHF-Methode (Ultra High Frequency) hat gegenüber der konventionellen TE-Messung (IEC 270) Vorteile, vor allem bei der Störunterdrückung und in der relativ genauen Ortung der TE-Quellen.

In den letzten Jahren haben die UHF-Sensoren und die eingesetzte UHF-Messtechnik eine ausreichende Empfindlichkeit erreicht und ihre Praxistauglichkeit bewiesen. Die Empfindlichkeit der verschiedenen Teilentladungsmesstechniken, d.h. sowohl die UHF- als auch die akustische Methode, ist so gut, daß auch schwach TE-Aktivitäten von wenigen pC auch mühelos Vor-Ort detektiert werden können. Da aber die TE-Amplitude alleine keine Rückschlüsse auf die Gefährlichkeit eines Defektes zuläßt, rückt die Interpretation der gemessenen Signale und der daraus zu ziehenden Konsequenzen immer mehr in den Vordergrund der Untersuchungen. Es wird daher in diesem Beitrag versucht eine teilweise Beantwortung auf folgende Fragen zu geben: Was kann ich mit einer empfindlichen Teilentladungsmessung erfassen und welche Schlüsse lassen sich daraus ziehen? Muß wegen erhöhter TE-Aktivität ein Teil der Anlage vom Netz geschaltet werden? Gibt es Indizien vor einem Versagen, um rechtzeitig reagieren zu können? Ist eine Risikoabschätzung möglich? In welche Richtung sollten weitere Entwicklungen gehen?

Einen ersten Lösungsansatz liefert die Fehlerstatistik der sogenannten „Mayor Failures“ von Schaltanlagen, also der Fehler, die zu einem dielektrischen Versagen der entsprechenden Komponente während des Betriebes geführt haben [1,2,3]. Die statistischen Daten zeigen, daß ca. 50% – 70% aller dielektrischen Fehler im Betrieb vor dem Fehlerfall mit einer empfindlichen TE-Messung nachweisbar gewesen wären.

Für den Einsatz der UHF-Methode ist in der Regel der Einbau von mehreren (kleinen & handlichen) Feldsensoren notwendig, während eine Prüfung nach IEC 270 einen großen schweren Koppelkondensator erforderlich macht. Die UHF-Methode nutzt dabei den Sachverhalt aus, daß sich TE-Signale innerhalb der GIS, die man als coaxialen Hohlleiter auffassen kann, als elektromagnetische Wellen ausbreiten. Die Frequenzanteile liegen bei bis zu 2 GHz. Durch geeignete Feldsensoren (z.B. Scheibensensoren) können diese TE-Signale erfaßt und aus der GIS ausgekoppelt werden.

Ein scheinbarer „Nachteil“ der UHF-Messung besteht darin, daß das UHF-Signal nicht mit der scheinbaren Ladung der TE-Quelle eindeutig korreliert werden kann. D.h. eine Kalibrierung nach IEC 270 ist aus physikalischen und messtechnischen Gründen nicht möglich. Möglich ist aber ein sogenannter Empfindlichkeitsnachweis der UHF-Sensoren, der im Bericht der CIGRE Task Force 15.03.07 [22] näher beschrieben wird. Dadurch kann nun auch der Betreiber einer GIS die Empfindlichkeit der UHF-Sensoren nach dem hier vorgestellten CIGRE-Empfindlichkeitsnachweis unabhängig selber überprüfen.

2. Teilentladungsmessung als Diagnosemittel

Eine Teilentladung, bei der in sehr kurzer Zeit ein Teil der Isolation zusammenbricht, emittiert elektrische und akustische Signale, die zur Fehlerortung und Identifikation herangezogen werden können [4,5]. Die durch diese Fehlstellen erzeugten Teilentladungen treten in der Regel vor dem Durchschlag auf, so daß durch ihre Messung eine Diagnose des dielektrischen Zustandes einer Schaltanlage möglich wird [6,7,8].

Beim Einsatz der Teilentladungsmessung ist auf ein vernünftiges Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen, d.h. auf eine klare Trennung zwischen machbaren, d.h. technologisch möglichen und notwendigen, d.h. ökonomisch sinnvollen TE-Messungen zu achten. In der Beantwortung dieser Problematik liegt aber genau die Schwierigkeit, vor allem aus der Sicht des Betreibers einer SF₆-isolierten Schaltanlage, Fig. 1 und Fig. 2. Zu einem liegt es an der sehr komplexen Thematik der Teilentladungen und ihrer Messung, aber auch an den unterschiedlichen Standpunkten der beteiligten Partnern. So ist es verständlich, daß der Hersteller einer GIS, der Lieferant von TE-Messtechnik und der Betreiber dieser GIS unterschiedliche Motivationen für den Einsatz einer Teilentladungsmessung haben.

Aus der Sicht des Betreibers wird eine kostengünstige, zuverlässige und aussagekräftige TE-Messung gewünscht. Mit den heutigen Systemen ist dies nur mit Einschränkungen realisierbar. Schwierig wird es bei der Interpretation der gemessenen Teilentladungsaktivität und den daraus abzuleitenden Entscheidungen. Die Praxis zeigt, daß genau hier noch wichtige, offene Fragen zu untersuchen sind.

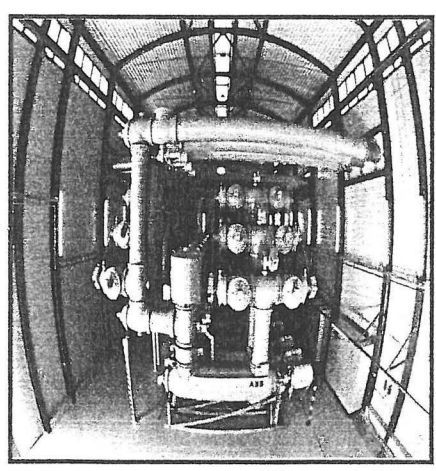


Fig. 1:
Foto einer 550kV gasisolierten Schaltanlage

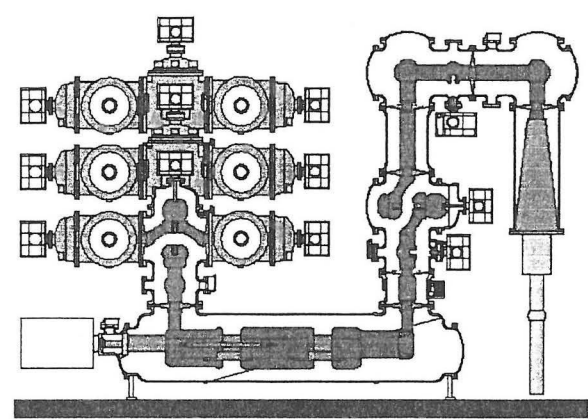


Fig.2:
Querschnitt durch eine 550 kV GIS mit Kabelabgang und Doppelsammelschiene

2.1 Typische Defekte in einer SF₆-isolierten Schaltanlage

Besonders kritische, d.h. für den Betrieb einer GIS gefährliche Fehlstellen sind frei bewegliche oder fixierte Teilchen auf Elektroden und Stützern, Fig. 3. Weiterhin können schlecht kontaktierte Elektroden und Hohlräumen in Stützern oder anderen festen Isolationsmaterialien Teilentladungen erzeugen. Im ungünstigen Fall, z.B. durch Überspannungen oder infolge von Alterungseffekten, können diese dann einen Überschlag oder einen Durchschlag einleiten. Auswertungen von Fehlerdaten [1,2,3] zeigen, daß frei bewegliche Teilchen besonders häufig zu den dielektrischen Versagern beitragen.

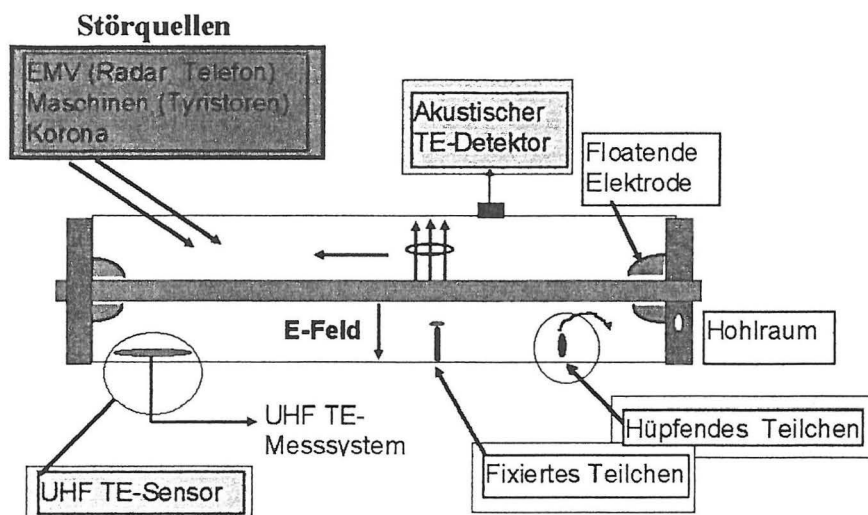


Fig. 3
Typischen TE-Quellen innerhalb einer GIS sind frei bewegliche Teilchen, fixierte Teilchen, Hohlräume in Isolatoren sowie schlecht kontaktierte Abschirmungen.

Neben den TE-Signalen die von Defekten aus der GIS kommen, gibt es eine Vielzahl von möglichen anderen (externen) Signalquellen. Bei der Diagnose müssen diese daher klar von den kritischen Defekten innerhalb der GIS getrennt und lokalisiert werden. Als externe Quellen treten häufig Mobiltelefon, Radar und Impulse von Thyristoren störend auf. Störsignale können aber durch Teilentladungen von Transformatoren, Durchführungen und Freileitungen herrühren.

Zum Nachweis der Teilentladungssignale innerhalb einer GIS eignet sich die UHF-Methode, bei der die Installation von entsprechenden Sensoren innerhalb der GIS notwendig ist, besonders gut. Weiterhin können auch die akustisch emittierten Signale zur Diagnose herangezogen werden [z.B. 8].

2.2 Interpretation von Teilentladungen

Bei der Interpretation von gemessenen TE-Signalen muß neben der Impulsausbreitung, d.h. der Einfluß von Dämpfung und Dispersion, auch die Impulsaufbereitung durch das Messsystem unbedingt beachtet werden. Nur durch die Beachtung dieser Einflussgrößen, die den Wirkmechanismus zwischen TE-Quelle und interpretierter Darstellung auf dem Monitor eines TE-Messsystems beeinflussen, kann eine zuverlässige und aussagekräftige Teilentladungdiagnose durchgeführt werden.

Die Interpretation von Teilentladungen, die von nur einem Defekt gleichzeitig verursacht werden, ist relativ gut ausgreift [12,13,14,15]. Es sind hierzu auch verschiedene, automatisierte Systeme auf dem Markt erhältlich. Nochmals sei an dieser Stelle betont, daß das Ergebnis der Interpretation von Teilentladungssignalen auch vom Messsystem selbst

beeinflusst wird. Werden z.B. die Pulse im Zeitbereich oder Frequenzbereich gemessen? Wurden die Signale so aufgezeichnet, daß Korrelationen zwischen einzelnen Pulsen und der angelegten Spannung möglich sind? Werden statistische Parameter oder z.B. absolute Größen wie Phasenlage der Pulse, Zählrate/s oder Pulse/Halbwelle herangezogen? Von der Beantwortung dieser Fragen hängen die anwendbaren Auswertealgorithmen und die Zuverlässigkeit der Interpretation ab.

Sehr wesentlich wird das Interpretationsergebnis durch die Messempfindlichkeit und dem Signal-Rauschverhältnis beeinflusst. Letzteres ist besonders gut im Falle der UHF-Messtechnik, da durch die Erfassung der TE-Signale im Frequenzbereich zwischen 300MHz und 2GHz einige Störquellen einfach ausgeblendet werden können.

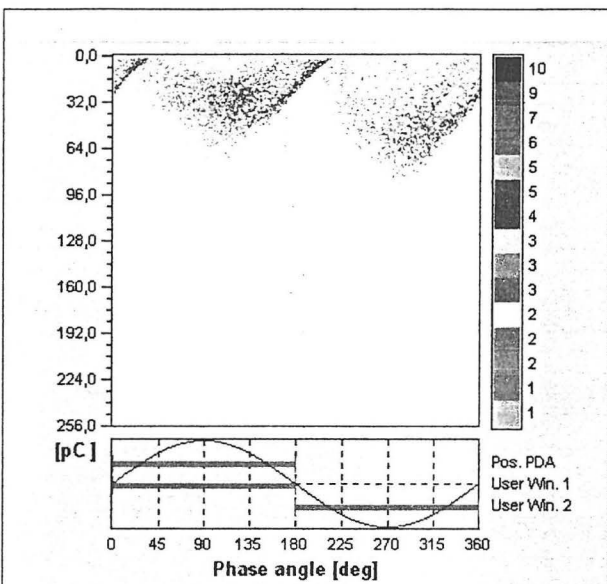


Fig 4: Eine Möglichkeit der Darstellung und Auswertung von TE-Signalen: Das sog. PRPD-Muster eines 5mm langen, frei beweglichen Teilchens; aufgenommen mit UHF-Sensor; Ladung ist nicht kalibriert!

Fig. 4 zeigt als eine mögliche Auswertung bzw. Darstellung ein phasenaufgelöstes Teilentladungsmuster [6,7]. Mit Hilfe entsprechender Algorithmen kann dieses Muster dann weiter ausgewertet werden. Im vorliegenden Fall handelt es sich um das Muster eines 5mm langen, frei beweglichen Teilchens.

Andere, aber intuitiv vielleicht nicht so leicht zugängliche Auswertungen bzw. Darstellungen sind beispielsweise die „Pulse-Sequenz-Analyse“ [10] oder die SPDP-Methode [11].

3. UHF-Teilentladungsmesstechnik

Bei der UHF-Teilentladungsmesstechnik werden mit Hilfe von speziellen Feldsensoren, die innerhalb einer GIS installiert sind, die Teilentladungspulse gemessen. Infolge der extrem schnellen Anstiegszeit in SF_6 [z.B. 9] ergibt sich für den TE-Puls ein breites Frequenzband bis zu 2GHz. Hieraus leitet sich auch der Name der Methode ab: Ultra High Frequency Method (UHF-Methode). Im Vergleich hierzu nehmen andere Signalquellen, wie z.B. Mobiltelefon, Flughafenradar, und Fernsehsender einen deutlich schmalen Frequenzbereich in Anspruch. Auch die Freiluftkorona hat, je nach Einkopplungsmechanismus, nur Frequenzanteile bis zu 500MHz, maximal sind auch ca. 1000MHz möglich.

Weil nun physikalisch verschiedene Defekte unterschiedliche Frequenzbereiche in Anspruch nehmen, läßt sich dies effektiv zur Störunterdrückung verwenden. Wenn man z.B., ähnlich wie bei einem Radio, nur die Signalanteile in einem engen Frequenzband auswertet, kann man dann mit der sogenannten Schmalbandmethode ein sehr hohes Signal-Rauschverhältnis erzielen.

3.1 Feldsensoren

Die elektromagnetischen Signale, die von einer TE-Quelle emittiert werden, breiten sich innerhalb der GIS als leitungsgebundene Wellen aus. Mit Hilfe von geeigneten

Feldsensoren, Fig. 5 und Fig. 6, lassen sich diese Signale aus der GIS auskoppeln. In erster Näherung läßt sich der Sensor dabei als kapazitiver Teiler auffassen (gilt für den TEM Mode) [16, 17, 18, 19, 20, 26].

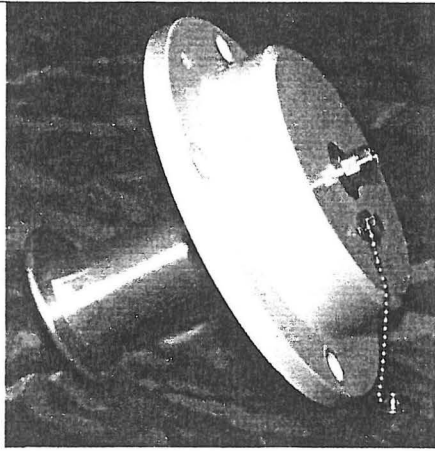


Fig. 5
Beispiel für einen UHF-Sensor

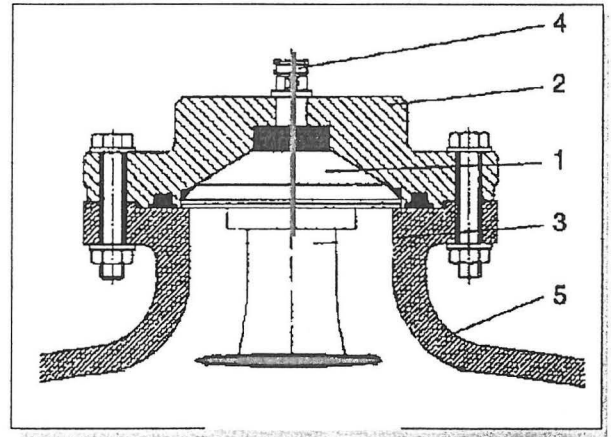


Fig. 6
Querschnitt durch einen UHF-Sensor;
1 Isoliermaterial, 2 Deckplatte, 3 Sensorelement, 4 Verbindungsstecker, 5 GIS Gehäuse

Durch eine entsprechende Konstruktion hat der Sensor in einem weiten Frequenzbereich eine nahezu gleiche Empfindlichkeit bzw. ein konstantes Teilverhältnis. Ein empfindlicher UHF-Sensor ist aber die Basis für eine aussagekräftige Teilentladungsmessung. Zur Erinnerung: Typische TE-Amplituden innerhalb einer GIS können zwischen weniger als 0.5pC (Teilchen auf einem Stützer) und bis zu einigen hundert pC (schlecht kontaktierte Elektrode) liegen.

3.2 Messprinzip

Die in Figur 7 gezeigte UHF-TE-Messung kann unter günstigen Bedingungen diese hohe Empfindlichkeit erreichen. Die mit den UHF-Sensoren gemessenen Teilentladungspulse (gezeigt sind nur die beiden Sensoren S1 und S2) werden zuerst mit Hilfe breitbandiger Vorverstärker verstärkt. Sie können dann entweder mit einem Oszilloskop oder mit einem Spektrumanalysator ausgewertet werden. Eine andere Möglichkeit ist die Messung und Auswertung direkt mit Hilfe einer geeigneten Messkarte, die in einem PC integriert ist.

Verwendet man z.B. einen Multiplexer, können die Sensoren sequentiell abgefragt werden. Der Einsatz des Spektrumanalysators erlaubt eine schmalbandige Messung. Die Bandbreite liegt dann typischerweise zwischen 1 und 3MHz, sonst reicht sie von einigen hundert MHz bis zu ca. einem GHz. Diese Breitbandmessung ist kostengünstiger, da einmal auf den Spektrumanalysator verzichtet werden kann und die zeitraubende Einstellung auf die Resonanzfrequenz, auf der das TE-Signal ausgekoppelt wird, nicht für jeden Sensor individuell eingestellt werden muß. Dies erkauft man sich aber mit einer Reduktion des Signal-Rauschverhältnisses.

Infolge der unterschiedlichen Dämpfung der TE-Signale auf ihrem Weg von der TE-Quelle zu den Sensoren, kann die daraus folgende Differenz in der Signalamplitude zwischen Sensor S1 und S2 zur Ortung der TE-Quelle ausgenutzt werden. Mit Hilfe einer Laufzeitmessung und / oder durch eine zusätzliche akustische TE-Messung läßt sich der Defekt dann auf ca. 0.5m oder genauer eingrenzen.

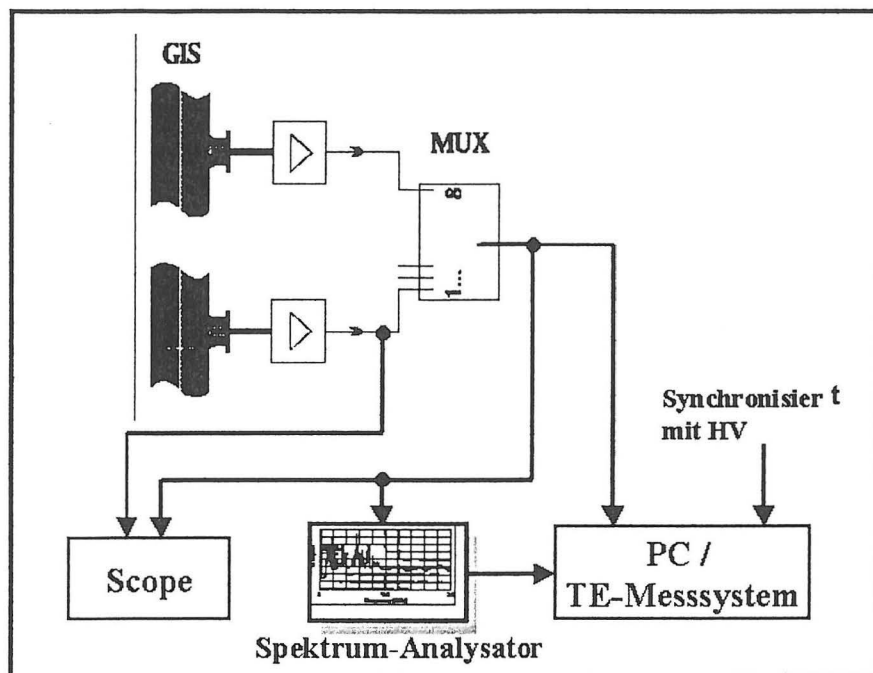


Fig. 7
Prinzip der UHF-Teilentladungsmessung

3.3 Empfindlichkeitsnachweis von UHF-Sensoren

Wie aber lässt sich nun die Empfindlichkeit der UHF-Sensoren und der des gesamten Messsystems bestimmen und auch Vor-Ort einfach überprüfen?

Anders als bei der konventionellen Methode (IEC 270) ist die UHF-Methode nicht kalibrierbar. D.h., daß zwischen der scheinbaren Ladung und der Anzeige auf dem TE-Messsystem keine eindeutige, feste Korrelation hergestellt werden kann. Dieser Nachteil der UHF-Methode ist nur ein scheinbarer, denn bei der Interpretation spielen die Größen wie Anzahl der Pulse/s oder Pulse/Halbwelle, die Phasenlage der TE-Pulse relativ zur angelegten Hochspannung und die gesamte Anzahl der Pulse die wichtigste Rolle. Sie sind unabhängig von der Bandbreite des eingesetzten Messsystems und der wahren Größe der Teilentladungsamplitude. Daher sind auch z.B. die PRPD-Muster, unabhängig ob sie mit der konventionellen Methode, der UHF-Methode oder mit Hilfe der akustischen Methode erzielt wurden, in ihrem Erscheinungsbild gleich!

Obwohl also die UHF-Methode nicht kalibrierbar ist, lässt sich dennoch die Empfindlichkeit der in einer GIS eingebauten UHF-Sensoren bestimmen. Diese Empfindlichkeit kann der Betreiber einer GIS Anlage auch Vor-Ort selbst ermitteln, unabhängig und ohne großen Aufwand. Einzige Voraussetzung hierzu: Der Hersteller der UHF-Sensoren hat die Sensoren im Werk zusammen mit der GIS, die beim Betreiber steht, bereits ausgemessen. Dieses Verfahren wurde in der CIGRE Task Force 15/33.03.05 erarbeitet und in der Électra 1999 veröffentlicht [22].

Die ABB Hochspannungstechnik AG hat nun diesen Empfindlichkeitsnachweis für alle Sensoren der verschiedenen GIS-Baugrößen und für die wichtigsten Einbauorte durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in entsprechenden Test Reports festgehalten und stehen damit dem Kunden zur Verfügung.

Am Beispiel mit einem UHF-Sensor für unsere 550kV GIS soll dieser Empfindlichkeitsnachweis vorgestellt werden. Gleichzeitig wird auch die gute Empfindlichkeit unseres Sensors demonstriert.

Der Empfindlichkeitsnachweis, der übrigens in dieser Task Force sowohl für die UHF-Methode als auch für die akustische Methode erarbeitet wurde, erfolgt in zwei Schritten beim Hersteller, s. Fig. 8. Durch die beiden Schritte a) + b) wird die Empfindlichkeit des Sensors ermittelt. Für diesen Nachweis sind neben den zwei Sensoren und dem UHF-Messsystem ein konventionelles TE-Messsystem, eine echte TE-Quelle sowie ein Pulsgenerator für Pulse schneller Anstiegszeit, <1ns, erforderlich.

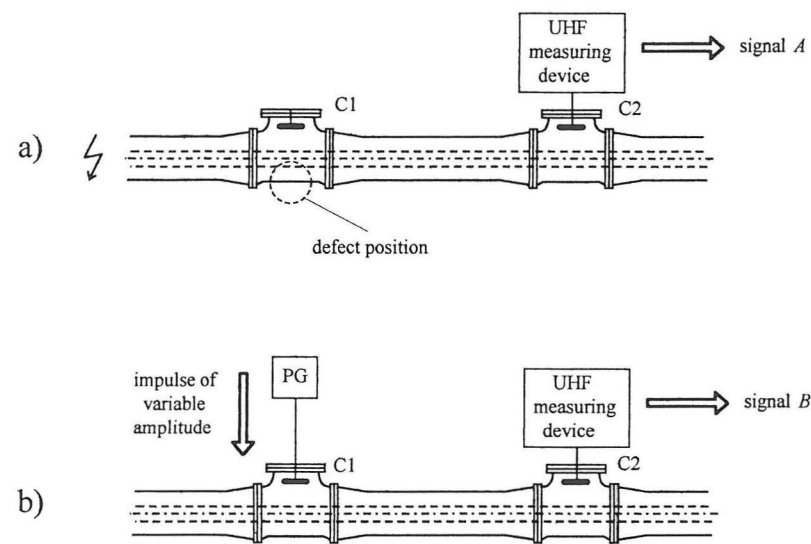


Fig. 8
Bestimmung der Empfindlichkeit von UHF-Sensoren nach dem CIGRE-Empfindlichkeitstest [22]. Erläuterung im Text.

Im Labor wird also zuerst mit Hilfe eines Defektes, in unserem Fall ein senkrecht auf den Innenleiter montiertes 20mm langes Teilchen, eine reproduzierbare Teilentladungsamplitude erzeugt. Die maximale Ladung wird mit Hilfe eines kalibrierten, konventionellen TE-Messsystems (IEC 270) bestimmt. Durch Variation der angelegten Hochspannung wurde in unserem Fall eine Amplitude von 5pC eingestellt. Es kann aber auch jeder andere Wert herangezogen werden!

Der Prüfaufbau und einige Details sind in Fig.9 – Fig. 11 gezeigt. Der Defekt befindet sich im gleichen Gasraum wie der Sensor S1. Das TE-Signal mit der Amplitude von 5pC (nach IEC 270 ermittelt) wird am Sensor S2 mit Hilfe eines Spektrumanalysators gemessen.

Fig. 12 zeigt das unter diesen Bedingungen gemessene Amplitudenspektrum der 5pC starken TE-Quelle im Vergleich zum Rauschspektrum, d.h. ohne angelegter Hochspannung. Die verschiedenen Linien bzw. Spitzen im Rauschsignal werden durch Radio- und Fernsehsender, Mobilfunkstationen und durch das in der Nähe befindliche Flughafenradar verursacht [18]. Dies liegt nicht an einem schlecht geschirmten Messaufbau, sondern diese Störer werden direkt in die GIS eingekoppelt, z.B. über die Flanschbereiche oder durch die hier eingesetzte Freiluftdurchführung.

Figur 13 zeigt, daß die Übereinstimmung des am Sensor S1 eingespeisten Pulses mit dem Spektrum der realen 5pC großen Teilentladung bei einem 2V großen Puls am größten ist.

Durch diesen Vergleich ist es nun möglich, mit Hilfe eines künstlichen TE-Pulses bekannter Amplitude die Empfindlichkeit eines UHF-Sensors zu bestimmen. Würde man zum Beispiel einen konstruktiv anderen Sensor in den gleichen Versuchsaufbau einbauen, so kann man

durch Vergleich der Amplitudenspektren von einem Puls mit 2V feststellen, ob die Sensoren die gleiche Empfindlichkeit besitzen.

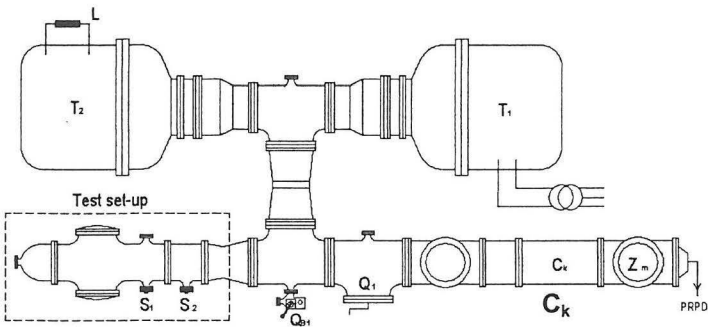


Fig. 9
 Prüfaufbau zur Bestimmung der Empfindlichkeit der UHF-Sensoren S1 und S2. Der Koppelkondensator C_k erlaubt die Messung der scheinbaren Ladung nach IEC 270.

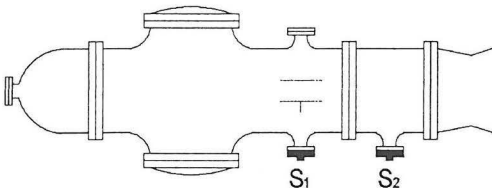


Fig. 10
 Ausschnitt des Prüfaufbaus mit den UHF-Sensoren und einem 20mm langem Teilchen auf dem Innenleiter zur Erzeugung reproduzierbarer TE

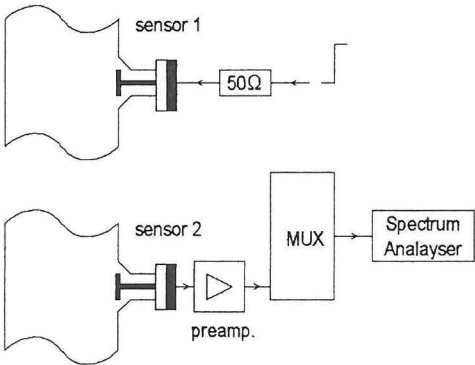


Fig. 11
 Durchführung des Empfindlichkeitsnachweises:
 Am Sensor S1 wird ein schneller Puls eingespeist und am Sensor S2 wird das entsprechende Amplitudenspektrum bestimmt.

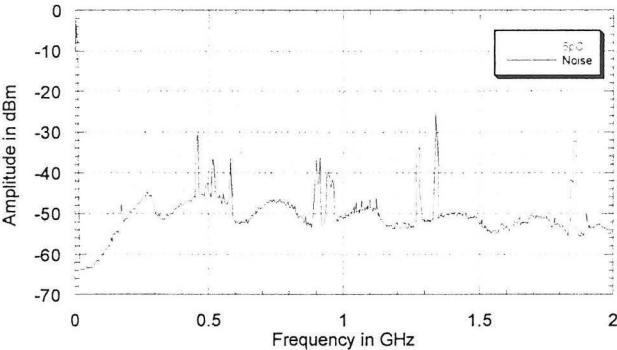


Fig. 12: Amplitudenspektren, gemessen am Sensor 2; Die untere Kurve zeigt das Rauschsignal ohne angelegter Hochspannung während die obere Kurve das Signal einer 5pC starken Teilentladung von einem fixierten Teilchen zeigt.

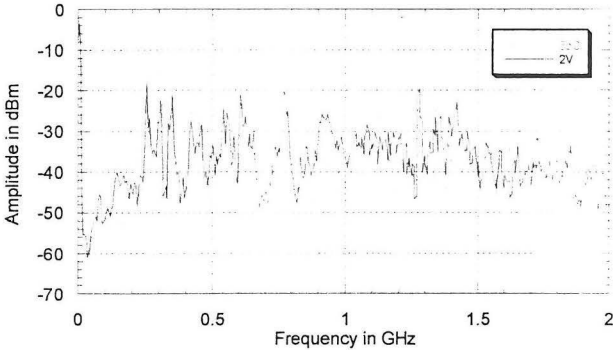


Fig. 13: Vergleich des Amplitudenspektrums der realen 5pC Teilentladung mit dem Amplitudenspektrum eines 2V grossen Pulses, der am Sensor 1 eingespeist wurde. Beide Spektren wurden am Sensor S2 gemessen.

Damit dieser Empfindlichkeitstest korrekt durchgeführt werden kann, ist eine schnelle Anstiegszeit des künstlichen Pulses von weniger als 1ns nötig, besser wären 0.5ns, um auch Frequenzanteile deutlich über 1GHz zu erhalten.

Weiterhin ist zu beachten, daß der Sensor nicht alleine vermessen wird, sondern auch der Einfluß des Einbauortes und der verwendeten Komponenten, die zwischen den beiden Sensoren liegen, mit gemessen werden. Im obigen Fall war es ein Stützer.

Vor-Ort kann der Empfindlichkeitstest an baugleichen Sensoren dann folgendermaßen durchgeführt werden: An einem ausgewählten Sensor wird ein künstlicher Puls eingespeist, z.B. mit der Amplitude 2V. Kann dieser Puls nun an einem räumlich benachbarten Sensor gemessen werden, sind zwei Aussagen möglich: Die Empfindlichkeit des Sensors wurde bestätigt und das Signal entspricht einer TE-Quelle mit ca. 5pC (+/- 30%) Amplitude.

4. Sinnvolle Einsatzmöglichkeiten der UHF-TE-Messung

In den letzten Jahren findet die Teilentladungsmessung mit Hilfe der UHF-Messtechnik immer mehr Verbreitung. Durch die ausreichende Empfindlichkeit, dem guten Signal-Rauschverhältnis und der Möglichkeit der Ortung des Defektes wird sie vor allem bei Entwicklungs- und Vor-Ort-Prüfungen eingesetzt. Hier hat man in der Regel ausreichend Zeit, um die Signale zu interpretieren und entsprechende Entscheidungen zu treffen.

Durch vier Beispiele aus der Praxis sollen die Möglichkeiten und Grenzen der UHF - Teilentladungsmesstechnik diskutiert werden.

4.1 Entwicklungsprüfung

In unseren Entwicklungsversuchen wird der UHF-Teilentladungsmesstechnik gemäss Figur 7 neben der konventionellen Methode (IEC 270) routinemäßig eingesetzt. Gründe dafür sind die hohe Empfindlichkeit und die Möglichkeit der Ortung der TE-Quelle. Besonders bei ausgedehnten Prüflingen geben die Teilentladungsmessung und die Auswertung wertvolle Informationen darüber, ob das Design in Ordnung ist, oder ob die Ursache der Teilentladungen in Qualitätsproblemen zu suchen sind. Weiterhin kann die Technik der TE-Messung optimiert, die Datenbank erweitert und Mitarbeiter ausgebildet werden.

4.2 Endprüfung

In der Endprüfung setzen wir routinemäßig die konventionelle Teilentladungsmesstechnik (IEC 270) ein, d.h. mit Hilfe eines gasisolierten Koppelkondensators wird die TE-Aktivität innerhalb des Testobjektes gemessen. Ausgewertet werden "nur" die kalibrierte TE-Amplitude und die Phasenlage auf einem Oszilloskop. Übersteigt die Amplitude einen kritischen Wert, liegt sie also z.B. über 5pC oder 10pC, wird die fehlerhafte Komponente durch eine neue ausgetauscht und die Prüfung wiederholt. Weitere Analysen, wie z.B. die Erstellung eines TE-Musters (PRPD-Muster), können dann separat an der fehlerbehafteten Komponente vorgenommen werden, um die genaue Ursache des Defektes zu bestimmen. Die Ergebnisse liefern dann einen wichtigen Input an die Qualitätskontrolle.

4.3 Vor-Ort-Prüfung

Die UHF-Teilentladungsmessung Vor-Ort führen wir in der Regel durch, wenn der Endkunde dies wünscht und die entsprechenden UHF-Sensoren vorab in der Anlage installiert wurden. Zur genauen Ortung von möglichen TE-Quellen, d.h. um den Ort auf ca. 10 bis 30cm genau zu bestimmen, wird ergänzend ein akustisches Teilentladungs-Messgerät verwendet. Der hier gezeigte Defekt (Fig. 14 und Fig.15) wurde mit der UHF-Methode bei einer Vor-Ort Prüfung an einer 220kV GIS entdeckt.

Fig. 14 zeigt das Amplitudenspektrum und Fig. 15 das entsprechende PRPD-Muster dieses Defektes, daß im sog. Zero-Span Modus bei 781 MHz aufgenommen wurde (Resolution Bandwidth: 3MHz) [21]. Die Signale konnten eindeutig einem frei beweglichen Teilchen

zugeordnet werden. Da sich dieses Teilchen in der Nähe eines Stützers und eines Kabelabganges befand, wurde entschieden, die entsprechende Komponente zu öffnen. Gefunden wurde eine 2mm lange Kupferspäne. Bei Betriebsspannung hätte dieses nur 2mm lange Teilchen im Betrieb wahrscheinlich keinen Überschlag verursacht. Bei transienten Überspannungen bestünde jedoch ein kleines Risiko, das aber nicht genau zu quantifizieren ist.

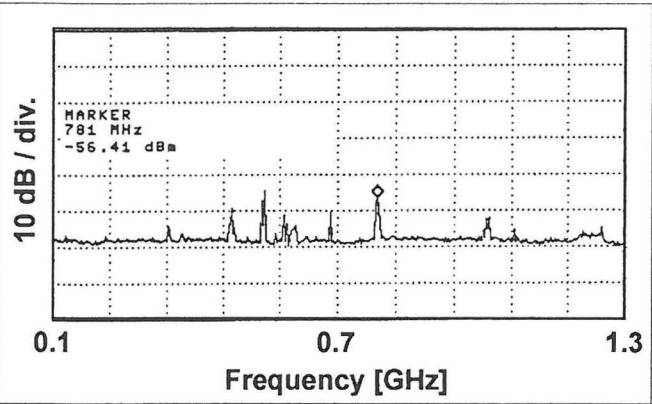


Fig 14
Amplitudenspektrum von einem frei beweglichen Teilchen in einer 220kV GIS. Die angelegte Spannung betrug 280kV.

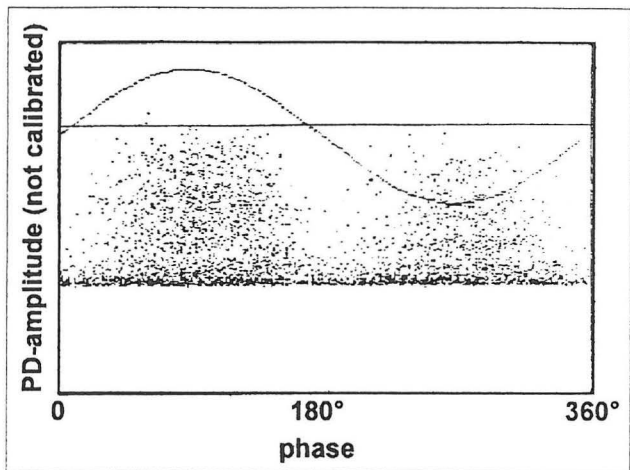


Fig 15:
PRPD-Muster des gleichen Defektes wie in Fig. 14. Es wurde im sog. Zero-Span Modus auf der Resonanzfrequenz von 781MHz aufgenommen. Integrationszeit 60s, RBW lag bei 3MHz.

Diese Vor-Ort Messung demonstriert damit zwar die hohe Empfindlichkeit der UHF-Messung und unserer Sensoren, aber es bleibt relativ wage, ob der Einsatz der UHF TE-Messung in diesem Fall „sinnvoll“, d.h. wirtschaftlich war.

4.4 Teilentladungsmonitoring von GIS-Anlagen

Dem Einsatz der Teilentladungsmessung als Monitoring-System zur kontinuierlichen Überwachung einer kompletten GIS ist technisch nichts entgegen zu setzen, u.a. wegen der erreichbaren hohen Nachweisempfindlichkeit. Zur Zeit gibt es aber kein System, was neben einer automatischen Interpretation und Ortung der TE-Quelle auch eine Entscheidung über notwendige Maßnahmen treffen kann, ob z.B. die Anlage innerhalb der nächsten 10min. oder 24h vom Netz genommen werden muß. Weiterhin sind keine oder statistisch nur wenig zuverlässige Aussagen bezüglich der Restlebensdauer einzelner Komponenten oder gar der kompletten Anlage möglich.

Bisherige eigene Erfahrungen [23,24] zeigen zusätzlich, daß in den meisten Fällen Störsignale von außen, d.h. nicht aus der GIS stammend, registriert wurden. Wurde ein neues Signal registriert, mußte mit Hilfe von detaillierten, teilweise zusätzlichen Messungen und durch Hinzunahme von „Experten“ entschieden werden, ob das Signal einem Defekt innerhalb der Anlage zuzuordnen war und ob es gefährlich werden konnte.

Beispielsweise zeigt Figur 16 das Teilentladungssignal, das mit dem Monitoring-System an einer 400kV Anlage gemessen wurde [24]. Genauere Untersuchungen bestätigten, daß die TE-Aktivität durch einen Hohlraum in einem Kabelendverschluß verursacht wurde. Zwar fand daraufhin ein Austausch dieser Komponente statt, offen blieb aber die Frage, ob dieser Defekt zu einem dielektrischen Versagen geführt hätte und wenn ja, innerhalb welches Zeitraumes.

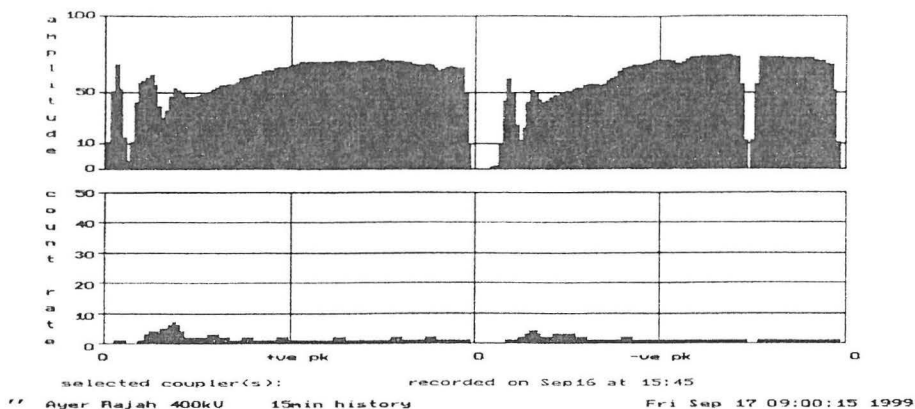


Fig. 16. Signatur eines Hohlraums in einem Kabelendverschluss in einer 400kV GIS [24]

5. Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren findet die Teilentladungsmessung mit Hilfe der UHF-Messtechnik immer mehr Verbreitung. Durch die ausreichende Empfindlichkeit und der Möglichkeit der Ortung des Defektes wird sie vor allem bei Entwicklungs- und Vor-Ort-Prüfungen eingesetzt. Neben der Erfassung, Ortung und Interpretation der TE-Signale sind die genauen Anlagenkenntnisse (Aufbau, Feldverteilung, Isoliermaterial etc.) von großer Bedeutung, um auch eine Entscheidung bezüglich Öffnung der entsprechenden Komponente zu treffen. Generell erfordern diese TE-Messungen einen beträchtlichen Zeit- und damit Kostenaufwand. In den Fällen, bei denen die Ursache innerhalb der GIS liegt, können aber leider keine quantitativen Aussagen über die mögliche Wahrscheinlichkeit eines Überschlages oder über die Restlebensdauer gemacht werden, da hierzu das Wissen und die Daten nicht vorhanden sind. Dies führt dann konsequenterweise zur Verunsicherung beim Betreiber der GIS, der dies eigentlich von einem TE-Mess- und / oder Monitoringsystem erwartet.

Aus heutiger Sicht ist somit nicht eindeutig zu klären, ob sich UHF-Teilentladungsmessungen, besonders im Falle von TE-Monitoring, wirtschaftlich lohnen. Dies muß auch in naher Zukunft weiterhin von Fall zu Fall individuell geklärt werden. Im Rahmen der aktuellen Diskussion zur Isolationskoordination einer GIS erhält die Teilentladungsmessung für "On Line Monitoring" erhöhte Aufmerksamkeit, da Alterungseffekte durch höhere Isolationspegel nicht erfaßt werden können [25]. Hier soll die TE-Messung Unterstützung bieten. Es bleibt aber abzuwarten, welche Erfahrungen hierbei noch berichtet werden.

Generell sind daher weitere Untersuchungen zur quantitativen Beschreibung des Durchschlagrisikos verschiedener Defekte in einer GIS erforderlich. Dies umfaßt neben weiterer, statistischer Auswertungen von Fehlerraten auch Arbeiten auf dem Gebiet der Restlebensdauer von Komponenten oder gar größerer Einheiten, denn nur auf der Basis verlässlicher Daten wird in Zukunft die Entscheidung über einen sinnvollen, d.h. auch wirtschaftlichen Einsatz einer TE-Messung möglich sein. Die Ende 1998 gegründete CIGRE Task 15.03.09 "Risk Assessment for Defects in GIS by PD Diagnostics" möchte genau hierzu einen Beitrag leisten.

6. Literaturangaben

- [1] Joint CIGRE Working Group 33/23.12: Insulation Co-Ordination of GIS: Return of Experience, On Site Tests and Diagnostic Techniques; CIGRE Joint Working Group 33/23.12, Électra No. 176, February 1998, S. 67-97
- [2] C.Neumann: GIS-Vorortprüfungen aus Sicht des Betreibers; HighVolt Kolloquium 1997, S. 163-169
- [3] A.L.J.Janssen et al.: Final Report of the second International Enquiry on High Voltage Circuit-Breaker Failures and Defects in Service; CIGRE, WG 13.06, June 1994

- [4] M.Albiez: Teilentladungen an SF₆-isolierten Schaltanlagen; Dissertation ETH Nr. 9694, ETH Zürich, 1992
- [5] R.Baumgartner, B.Fruth, W.Lanz, K.Pettersson: Partial Discharge - Part X: PD in Gas-Insulated Substations - Measurement and Practical Considerations; IEEE Electrical Insulation Magazine, January/February 1992, Vol.8, No.1, S. 16-17
- [6] L.Niemeyer, B. Fruth, H. Kugel: Phase Resolved Partial Discharge Measurements in Particle Contaminated SF₆ Insulation; 6th Int. Symposium on Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE USA, 1992, S. 337- 345.
- [7] B. Fruth, L. Niemeyer: The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data; IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, N°. 1, Feb. 1992, S. 60-69.
- [8] H.-D.Schlemper: Akustische und elektrische Teilentladungsmessung zur Vor-Ort-Prüfung von SF₆-isolierten Schaltanlagen; Dissertation Universität Stuttgart 1997
- [9] I.Herbst, R.Pietsch: The Fast and Slow Signal Components of Partial Discharges in SF₆ – Measurements of the Electron and Ion Contribution to PD-Signal; Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA, USA, June 5-8, 1994, S. 283-287
- [10] M.Hoof, R.Patsch: Analyzing Partial Discharge Pulse Sequenz – A New Approach to Investigate Degredation Phenomena; 1994, IEEE Int. Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, USA
- [11] R.Pietsch, F. Gutfleisch, L. Niemeyer: Sequential Partial Discharge Pattern Analysis as a Diagnostic Tool of PD Monitoring in HV Systems; Nordic Insulation Symposium. ('NORDIS'), Bergen, 1996, S. 157-169.
- [12] A.Krivda: Recognition of Discharges, Discrimination and classification, Dissertation TU Delft, 1995, ISBN 90-407-1156-9
- [13] Th.Hücker: Computergestützte Teilentladungsdiagnostik unter Berücksichtigung praxisrelevanter Randbedingungen; Dissertation Gesamthochschule Wuppertal, 1995
- [14] M.G.Turner, E.Gulski: Mustererkennung in der TE-Messtechnik; Haefely Symposium 1998
- [15] R.Feger, K.Feser, R.Pietsch: Partial Discharge Classification in GIS using the Narrow-Band UHF Method; 11th ISH 1999, London
- [16] B. F. Hampton, R. J. Meats: Diagnostic Measurements at UHF in Gas Insulated Substations; IEE Proc.; Vol 135, Part C, No. 2, pp. 137-144, March 1988.
- [17] J.S.Pearson, B.F. Hampton, & A.G. Sellars: A Continuous UHF Monitor for Gas-insulated Substations; IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 26, N° 3, June 1991, pp. 469-478.
- [18] N.de Kock, B.Coric, R.Pietsch: Teilentladungsmessung an Gasisolierten Schaltanlagen bei Ultrahohen Frequenzen; Bulletin SEV/VSE (Schweiz), 11/96, pp. 39-44.
- [19] R.Kurer: Teilentladungsmessung im Gigahertz-Frequenzbereich an SF₆-isolierten Schaltanlagen; Dissertation Universität Stuttgart 1997, ISBN 3-8265-2211-7
- [20] G.Wanninger: Ultrahochfrequente Teilentladungssignale in gasisolierten Schaltanlagen (GIS); Dissertation, Technische Universität München, 1998, ISBN 3-18-325721-1
- [21] G.J.Behrmann, S. Neuhold, R. Pietsch: Results of UHF measurements in a 220kV GIS Substation During On-site Commissioning Tests; 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Quebec, 1997, S. 451-455.
- [22] Joint CIGRE Task Force 15/33/03.05: Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF method and the Acoustic method; Électra, No. 183, April 1999, S. 75-87.
- [23] H.L.Ho et al.: A New Partial Discharge Monitoring System at Labrador and Ayer Rajah 400kV GIS Substation; 12th CEPIS Symposium, Pattay Thailand, 1.-6. November 1998
- [24] K.T.Yoon, G.Behrmann, R.Pietsch, J.Pearson: Further Results of the Partial Discharge Monitoring System at Labrador and Ayer Rajah 400kV GIS Substation, to be published at 13th CEPIS 2000, Manila, 23-27 Oktober
- [25] A.Sabot: Isulation Coordination and on line Insulation Monitoring & Diagnostic Techniques for Gas Insulated Switchgear (GIS); CIGRE Session 2000, 27.8 – 1.9. 2000, Paris, Beitrag P1-109
- [26] M.Seeger, G.Behrmann, B.Coric, R.Pietsch: Application of Electrical Field Sensors in GIS for Measuring High Voltage Signals over the Frequency Range 10Hz to 100MHz, 11th ISH 1999, London

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank meinen Kollegen G.Behrmann, B.Coric, Th.Linn, St.Neuhold, O.Obert, U.Riechert, M.Seeger und J.Pearson (DMS Ltd.) ausdrücken, die im Laufe der letzten Jahre einen Großteil der Messungen durchführten und durch zahlreiche Diskussionen zur Entstehung dieses Papers beigetragen haben.

Adresse des Autors

R.Pietsch

ABB Hochspannungstechnik AG, Abteilung ASR-A

CH-8050 Zürich

email: ralf.pietsch@ch.abb.com