

TE-Diagnose von Gasisolierten Schaltanlagen – Nachweis der Empfindlichkeit PD Diagnostics of Gas-Insulated Switchgear – Sensitivity Verification

Uwe Riechert^{1*}, Alexander Tröger¹, Markus Schraudolph¹, Reinhold Bräunlich², Stefan Neuhold²

¹ABB Schweiz AG, Gasisolierte Schaltsysteme, Brown Boveri Strasse 5, CH-8050 Zürich, Schweiz

²FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, Voltastrasse 9, CH-8044 Zürich, Schweiz

* e-Mail: uwe.riechert@ch.abb.com

Kurzfassung

Durch die sich momentan schnell ändernden Randbedingungen des Energiemarktes sind zuverlässige und kostengünstige Mittel- und Hochspannungsanlagen immer stärker gefragt. Dadurch gewinnt auch die Diagnostik einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) immer mehr an Bedeutung.

Für den Einsatz der UHF-Methode ist in der Regel der Einbau von mehreren Feldsensoren notwendig, während eine Prüfung nach IEC 60270 einen Koppelkondensator erforderlich macht. Die UHF-Methode nutzt dabei den Sachverhalt aus, dass sich TE-Signale innerhalb der GIS, die man als koaxialen Hohlleiter auffassen kann, als elektromagnetische Wellen ausbreiten. Ein formaler „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 60270 ist aus physikalischen und messtechnischen Gründen nicht möglich. Möglich ist aber ein sogenannter Empfindlichkeitsnachweis der UHF-Sensoren. Somit kann der Betreiber einer GIS die Empfindlichkeit der UHF-Sensoren nach dem CIGRÉ-Empfindlichkeitsnachweis unabhängig selber überprüfen. 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 CIGRÉ Task Force 15/33.03.05 erarbeitet.

Der Empfindlichkeitstest wird an der gesamten Messkette durchgeführt. Die Ergebnisse sind aber von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig, z. B. von der Art der Fehlstelle, vom Mess-System (breitbandig oder schmalbandig), von der Auswertemethode, von den eingesetzten Sensoren und vom Skalierimpulsgenerator. Insbesondere Vor-Ort werden aber verschiedene Mess-Systeme eingesetzt, so dass der Aufwand für die Empfindlichkeitsnachweise steigt. Im Beitrag werden Messungen, die die verschiedenen Einflussfaktoren berücksichtigen, vorgestellt und vergleichend bewertet, um allgemeingültige Aussagen zu zulassen.

Besonders interessant ist die Diagnose an Altanlagen. In diesen Fällen ist eine Überprüfung der Empfindlichkeit der Sensoren nicht immer möglich. Mit Hilfe einer einfachen Methode, basierend auf einer Kapazitätsmessung, lässt sich die Empfindlichkeit bestimmen. Diese Methode wird im Beitrag mit ersten Messergebnissen vorgestellt und bewertet.

Abstract in English

The demand for reliable and economic medium- and high-voltage installations is increasing due to the present rapidly changing conditions in the power substation and distribution markets. As a result, the diagnostics of gas-insulated switchgear (GIS) has also generally acquired importance.

As a rule, to apply the UHF method it is necessary to install several field sensors, whereas a test according to IEC 60270 requires a bulky coupling capacitor. The UHF method makes use of the fact, that within the GIS, which can be taken as a coaxial waveguide, the PD signals propagate as electromagnetic waves. An apparent „disadvantage“ of UHF measurements is that the UHF signal cannot be clearly correlated with the apparent charge of the PD source. In other words, a calibration according to IEC 60270 is not possible because of physical and measurement reasons. It is possible, however to perform a sensitivity verification, that is detailed in the report of the CIGRÉ Task Force 15/33.03.05, of the UHF sensors and the connected measuring system, which is together with the sensor essential responsible for the sensitivity. As a result, the GIS operator can now also check the sensitivity of the UHF sensors and his measuring system according to the CIGRÉ sensitivity verification procedure.

The results of the sensitivity check depends on different parameters like the type of defect, the frequency range (broad band or narrow band measurement at different frequencies), the evaluation method, the type of coupler and the sources for the artificial pulses. The paper describes measurements in order to define the most important factors that have to be considered when the results of different sensitivity verification measurements are compared.

One simple method to verify the sensitivity, especially on old installations, is the calculation of the artificial pulse based on a capacitance measurement. The paper presents measurements and shows a comparison with the common sensitivity verification.

1 Einleitung

Primärkomponenten gasisolierter Schaltanlagen werden in regelmässigen Wartungsintervallen auf Verschleiss geprüft oder revidiert. Ein stationsweites Überwachungssystem (Monitoring-System), das ständig die Primärkomponenten und Antriebe überwacht, erlaubt den Übergang zur Wartung bei Bedarf. Der Betreiber profitiert durch längere Inspektionsintervalle, kürzere Inspektionsarbeiten und die höhere Verfügbarkeit seiner Station. Die Ergebnisse einer detaillierten CIGRÉ-Umfrage [1] über moderne Eindrucks-SF₆-Leistungsschalter zeigen, dass mechanische Defekte im Antrieb und die Steuerungs- und Hilfselemente den weitest grössten Teil der Fehler verursachen. Die Fehlerstatistiken machen folgende Grössen für eine Überwachung interessant: Leistungsschalter, SF₆-Gasdichte und Teilentladungen.

Eine Teilentladung (TE), bei der in sehr kurzer Zeit ein Teil der Isolation zusammenbricht, emittiert elektrische und akustische Signale, die zur Fehlerortung und Identifikation herangezogen werden können. Die Fehlerstatistik der sogenannten „Major Failures“ von Schaltanlagen, also der Fehler, die zu einem dielektrischen Versagen der entsprechenden Komponente während des Betriebes geführt haben [1-3], zeigt, dass ca. 50 % – 70 % aller dielektrischen Fehler im Betrieb vor dem Fehlerfall mit einer empfindlichen TE-Messung nachweisbar gewesen wären.

Dielektrische Fehler in GIS-Anlagen werden hauptsächlich durch Metallpartikel verursacht. Sie entstehen bei der Fertigung, der Montage oder im Betrieb, wenn z. B. bei beweglichen Teilen die Schmierung versagt. Eine weitere Ursache sind scharfkantige Spitzen auf Leiterelektroden. Vor allem die elektrische und die akustische Detektion besitzen eine ausreichende Empfindlichkeit, um die meisten der in der Praxis auftretenden Fehler erkennen zu können.

2 UHF-Teilentladungsmessung

Für den Einsatz der UHF-Methode ist in der Regel der Einbau von mehreren Feldsensoren notwendig, während eine Prüfung nach IEC 60270 einen Koppelkondensator erforderlich macht. Ein formaler „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 60270 ist aus physikalischen und messtechnischen Gründen nicht möglich. Möglich ist aber ein sogenannter Empfindlichkeitsnachweis der UHF-Sensoren [4]. Somit kann der Betreiber einer GIS die Empfindlichkeit der UHF-Sensoren nach dem CIGRÉ-Empfindlichkeitsnachweis unabhängig selber überprüfen. Heute können mit der Schaltanlage integrierte TE-Sensoren angeboten werden. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff UHF-Sensoren geprägt, der weniger für die starre Nutzung des UHF-Frequenzbereichs steht, als vielmehr für eine bestimmte Art der Auskopplung im VHF bzw. UHF-Bereich.

Hierunter ist im wesentlichen die Erfassung des hochfrequenten elektrischen Feldes mit Hilfe von „Teller“- oder Ring-Sensoren bzw. Feldsteuerringen zu verstehen. Hier-

bei bildet die Messelektrode sowohl eine Kapazität zum Innenleiter (typisch: 0,2 pF – 2 pF) als auch eine Streukapazität (typisch: 5 pF – 80 pF) zur umgebenden Metallkapselung. Im TEM-Frequenzbereich stellt diese Anordnung einen Teiler mit einem festen Teilverhältnis dar [5]. Oberhalb des TEM-Bereichs wirkt der eigentliche Sensor als Antenne. Obwohl der Begriff UHF-Sensor intendiert, dass diese Sensoren immer im Bereich von 300 MHz bis 3 GHz arbeiten, sind die TEM-Bedingungen dieser Sensoren meist für einen niedrigeren Frequenzbereich ausgelegt. Typischerweise wird ein Bereich von 100 MHz bis 900 MHz zur Signalverarbeitung angestrebt.

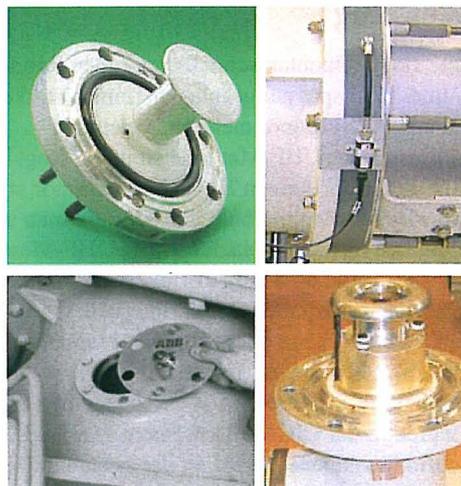


Bild 1 Beispiele für UHF Sensoren

Ein empfindlicher UHF-Sensor (**Bild 1**) ist die Basis für eine aussagekräftige TE-Messung. Durch eine entsprechende Konstruktion hat der Sensor in einem weiten Frequenzbereich eine nahezu gleiche Empfindlichkeit bzw. ein konstantes Teilverhältnis. UHF-Sensoren werden in Anlagen fest eingebaut oder als sogenannte Fenster-Sensoren zur Nachrüstung installiert. Eine Nachrüstung mit internen UHF Sensoren wird nur in den seltensten Fällen oder beim Umstellen auf TE-Monitoring durchgeführt. Meist sind dann Sensoren, die extern angebracht werden können, für diesen Fall bevorzugt [6].

3 Empfindlichkeitsnachweis

In den Anfängen der TE-Messungen mit kapazitiven Sensoren zwischen 1980 und 1990 wurde die Kapazität des Sensors zum Innenleiter für die Kalibration eingesetzt. Durch Anlegen eines Spannungsschritts U_{Schritt} wurde über diese Kapazität C_0 eine Testladung Q_{test} wie folgt übertragen: $Q_{\text{test}} = U_{\text{Schritt}} \cdot C_0$

Der Sensor wurde somit als Kalibratorkapazität entsprechend der Beschreibung in Kapitel 6 der IEC 60270 verwendet. Wird an der Bedingung von Ziff. 3.9.6 bez. der Figur 5 des IEC-Standards festgehalten, so dürfen sowohl das an einem Sensor empfangene TE-Signal wie auch dasjenige eines Kalibrierimpulses mit ihrem Spektrum erst oberhalb der Mittenfrequenz des Bandpassfilters abfallen. Zur Einhaltung dieser Bedingung wurden deshalb anfänglich nur Messfrequenzen bis zu einigen 100 MHz einge-

setzt. Es konnte dabei gezeigt werden, dass die spektralen Bedingungen für eine Quasiintegration und damit die wichtigste Voraussetzung für eine skalierte Teilentladungsmessung nach IEC 60270 erfüllt waren [7]. Dabei mussten wie bei anderen grossen Apparaten, Fehler durch Reflexion und Dämpfung in Kauf genommen werden.

Als Grösse der Testladung wurde in der Regel die geforderte Limite für nicht mehr zulässige Teilentladungen nach IEC 62271-203 von 5 pC herangezogen. Die Einspeisung eines Spannungsschritts der Amplitude $U_{\text{Schritt}} = 5 \text{ pC}/C_0$ ergab bei Einhaltung obiger Bedingung die gleiche Impuls-ladungsanzeige am TE-Messgerät, wie die Einspeisung eines Kalibratorimpulses der Ladung 5 pC zwischen Innenleiter und Gehäuse der GIS.

Zur Verbesserung des Signal-Störabstandes bei Teilentladungsmessungen in GIS wurde um 1990 begonnen, TE-Messfrequenzen bis zu einem GHz und darüber anzuwenden. Dadurch konnten auch die örtliche Auflösung bei Laufzeitmessungen für die Fehlerortung und die Sensorgrösse reduziert werden. Dagegen erhöhten sich die Signaldämpfung in Funktion des Abstands, der Einfluss der geometrischen Verhältnisse und des der Anstiegszeit des Skalierimpulses, die Signaldämpfung in Messkabeln und nichtlinearer Frequenzabhängigkeiten.

Infolge der obengenannten Einflüsse auf das Mess-Signal musste in Kauf genommen werden, dass eine Kalibration der scheinbaren Ladung nach IEC 60270 keine generelle Gültigkeit mehr haben konnte. Das Konzept der "Kalibration" musste durch das Konzept eines "Empfindlichkeitsnachweises" ersetzt werden. Es wurde ein Verfahren definiert, mit welchem anhand einer realen TE-Quelle in einer GIS nachgewiesen wird, dass ein TE-Signal von 5 pC scheinbarer Ladung an allen Stellen der GIS detektiert werden kann [4]. Die gemessene Signalthöhe lässt dabei keinen Rückschluss auf die scheinbare Ladung zu.

Nach der vorgeschlagenen Prozedur wird ebenfalls ein Schritimpuls verwendet, der zum Test in einen Sensor eingespeist wird. Die Amplitude wird aber durch Vergleich des Messpegels bei einer realen TE-Quelle mit dem Messpegel bei applizierten Schritimpulsen bestimmt, die über einen benachbarten Sensor eingespeist werden (erster Teil des Sensitivitätsnachweises im Labor oder vor Ort). An der Schaltanlage vor Ort kann dann überprüft werden, ob der Schritimpuls mit der vorbestimmten Amplitude von einem Sensor bis mindestens zu seinem Nachbarsensor detektierbar übertragen werden kann (zweiter Teil des Sensitivitätsnachweises vor Ort).

3.1 Einflussfaktoren

Der Empfindlichkeitstest wird an der gesamten Messkette durchgeführt. Die Ergebnisse sind aber von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig, z. B. von der Art der Fehlstelle, vom Mess-System (breitbandig oder schmalbandig), von der Auswertemethode, von den eingesetzten Sensoren und vom Skalierimpuls-generator. Insbesondere vor Ort werden aber verschiedene Mess-Systeme eingesetzt, so dass der Aufwand für die Empfindlichkeitsnachweise steigt. Im Folgenden werden Messungen, die die verschiedenen Ein-

flussfaktoren berücksichtigen vorgestellt und vergleichend bewertet, um allgemeingültige Aussagen zu erhalten. **Bild 2** zeigt den verwendeten Versuchsaufbau. Er besteht aus zwei GIS-Komponenten, die jeweils einen TE-Sensor enthalten. Die Anordnung ist dabei an einen konventionellen TE-Messkreis angeschlossen.



Bild 2 Versuchsaufbau

In der Komponente unterhalb von Sensor 1 wurden unterschiedliche künstliche Defekte eingebaut. Durch Einspeisen von Spannungsimpulsen an Sensor 1 konnte anschliessend im spannungslosen Zustand die TE-Aktivität nachgestellt werden. Als erster künstlicher Defekt wurde eine Nadel mit einer Länge von 10 mm am Innenleiter befestigt und die Hochspannung so geregelt, dass bei einer konventionellen TE-Messung eine Amplitude der scheinbaren Ladung von 5 pC gemessen wurde. Danach wurde ein Spannungsimpulse mit einer Anstiegszeit von weniger als 1 ns in Sensor 1 eingekoppelt. Die Amplitude dieser Impulse wurde variiert, bis die grösstmögliche Übereinstimmung der Frequenzspektren von Impuls und TE-Signal festgestellt wurde. Dieselbe Prozedur wurde mit einem zweiten künstlichen Defekt (hüpfendes Metallpartikel) wiederholt. Die Messung der Signalspektren an Sensor 2 erfolgte mit einem Spektrum Analyser, dem ein geeigneter Vorverstärker vorgeschaltet war. Für eine Messdauer von 60 s wurde im Frequenzbereich zwischen 500 MHz und 1.5 GHz das Amplitudenspektrum im „Max Hold“ Modus bestimmt. Die Bestimmung der äquivalenten Amplitude des Spannungsimpulses wird häufig unter Zuhilfenahme statistischer Kennwerte, wie der gesamten und der gemittelten umgesetzten Leistung, der maximal auftretenden Amplitude und der gemittelten Fläche unter der Kennlinie des Frequenzspektrums ermittelt [8]. In **Tabelle 1** sind diese Kennwerte für beide Defekttypen und verschiedene Impulsamplituden zusammengestellt:

Tabelle 1 Statistische Kennwerte von gemessenen Spektren: MP: gesamte Leistung, AP: gemittelte Leistung, MA: maximale Amplitude, AR: Fläche pro Datenpunkt

	MP [dBm]	AP [dBm]	MA [dBm]	AR
1 V	-19.5	-41.74	-20.02	53.2
2 V	-13.11	-35.9	-13.32	86.04
5 V	7.26	-15.3	7.22	524.7
10 V	16.26	-6.19	16.18	1298.5
Hüpfendes Partikel	-0.88	-26.82	-9.22	349.3
Spitze	0.29	-23.91	-2.92	219.4

Während der direkte Vergleich der Amplituden beider Spektren zeigt, dass das TE-Signal des hüpfenden Partikels stärker ausgeprägt ist (siehe **Bild 3/4**), liefern die statistischen Kennwerte in drei von vier Fällen einen höheren Wert für das Signal der Spitze am Innenleiter. Diese Diskrepanz wird durch eine starke Beeinflussung der Kennwerte durch dominante Amplituden im Frequenzspektrum des Spitzendefekts verursacht. Bei direktem Vergleich der Spektren ergibt sich als äquivalente Amplitude des einzuspeisenden Spannungsimpulses für den Spitzendefekt von 2 V - 5 V und für ein hüpfendes Partikel von 10 V. Die Spektren sind in **Bild 3** und **Bild 4** dargestellt.

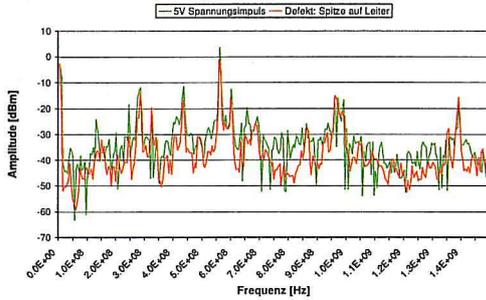


Bild 3 Vergleich der Spektren eines 5 V Spannungsimpulses und eines Spitzendefektes

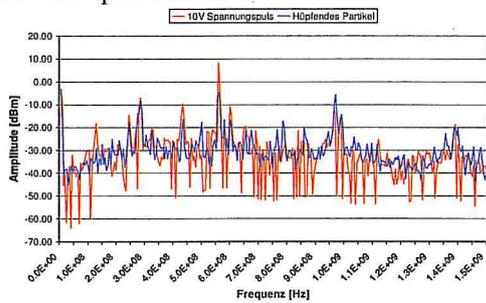


Bild 4 Vergleich der Spektren eines 10 V Spannungsimpulses und eines hüpfenden Partikels

Messungen mit einem weiteren, kommerziell erhältlichen Messsystem, das die Einhüllende des Spektrums auswertet, bestätigen diese Werte (**Tabelle 2**).

Tabelle 2 Messwerte von Spannungsimpulsen in Relation zu den unterschiedlichen Defekten

Puls	Spitze	Hüpfendes Partikel
1 V	86.6 %	72.8 %
2 V	96.7 %	80.4 %
5 V	110 %	92.4 %
10 V	-	100.7 %

Bei schmalbandigen Messungen können gezielt störempfindliche Frequenzen zur Messung gewählt werden. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Signaldämpfung frequenzabhängig ist. **Tabelle 3** zeigt die Ergebnisse von Messungen mit einem kommerziell erhältlichen, schmalbandigen Mess-System. Bei einer Messung bei 740 MHz entsprechen die Amplituden der ermittelten äquivalenten Spannungsimpulse den Ergebnissen der breitbandigen Messung. Bei anderen Messfrequenzen können jedoch zum Teil erhebliche Abweichungen auftreten.

Tabelle 3 Ermittelte Amplituden der äquivalenten Spannungsimpulse für beide künstlichen Defekte, gemessen mit einem schmalbandigen System

Frequenz	Spitze auf Innenleiter	Hüpfendes Partikel
540 MHz	2 V - 5 V	1 V - 2 V
740 MHz	2 V - 5 V	10 V
1240 MHz	1 V - 2 V	10 V - 20 V

3.2 Kapazitätsmessung

Im Folgenden wird auf die Frage eingegangen, ob sich die Schrittipulsamplituden nach dem Sensitivitätsnachweis U_{Schritt} (Sensitivitätsnachweis) von jenen aus der früheren Kalibrierung $U_{\text{Schritt}}(C_1) = 5 \text{ pC} / C_1$ wesentlich unterscheiden. Bei fehlender Angabe über die Schrittipulsamplitude könnte dann unter Umständen die frühere Methode der TE-Kalibrierung als Anhaltswert für die Schrittipulsamplitude dienen, welche zum Sensitivitätsnachweis Teil 2 benötigt wird. Deshalb wurden in der vorliegenden Arbeit verfügbare Werte für die Schrittipulsamplituden aus dem Sensitivitätsnachweis und solche aus der Bestimmung über C_1 ausgewertet und gegenübergestellt.

Für die Messung der Sensorkapazität bieten sich zwei Methoden an, bei denen der entsprechende GIS-Abschnitt unter Betriebsspannung oder einer ausreichend hohen Testspannung stehen muss:

- Messung des Ableitstroms I_{mess} am Sensor bei unter Spannung stehender GIS. Die Kapazität C_1 wird errechnet aus $C_1 = I_{\text{mess}} / (U_{\text{Phase-Erde}} \cdot \omega)$, Das notwendige Mikroampère-Messgerät muss eine ausreichend kleine Eingangsimpedanz besitzen, damit der Ableitstrom über die Erdkapazität C_2 vernachlässigt werden kann ($R_i < 0.1 / (\omega \cdot C_2)$).
 - Eine alternative Möglichkeit ergibt sich durch Zuschaltung einer Zusatzkapazität C_{mess} zwischen Sensoranschluss und GIS-Gehäuse im Wertebereich von ca. 100 nF. Bei anliegender Hochspannung am Innenleiter wird die Spannung U_{mess} über der angeschlossenen Kapazität C_{mess} gemessen. Die Kapazität C_1 ergibt sich mit ausreichender Genauigkeit aus der Beziehung $C_1 \cong C_{\text{mess}} \cdot U_{\text{mess}} / U_{\text{Phase-Erde}}$. Die Erdkapazität des Sensors C_2 kann vernachlässigt werden, wenn die Zusatzkapazität C_{mess} sehr viel grösser gewählt wird. Die Eingangsimpedanz R_i des Messgeräts muss ausreichend hochohmig sein $R_i > 10 / \omega \cdot C_{\text{mess}}$, damit der Messstrom durch das Instrument vernachlässigt werden kann.
- Gesamthaft wurden bei ca. 30 verschiedenen UHF-TE-Sensoren an verschiedenen Einbaustellen in GIS-Fabrikaten von 5 Herstellern die Kapazitäten C_1 und C_2 gemessen. Es wurden folgende Kapazitätswert-Bereiche festgestellt:

- C_1 0.12 pF ... 1.2 pF (einphasig gekapselt)
- C_2 24 pF ... 80 pF

Bei dreiphasig gekapselten Anlagen ist die Sensorkapazität zu den Phasenleitern nur bestimmbar, wenn ausschliesslich die untersuchte Phase an Spannung gelegt wird. Bei dreiphasig gekapselten Anlagen wurden Kapazitätswerte bei der Phase mit dem grössten Abstand zum Sensor bis herab zu 0.02 pC festgestellt.

Bisher wurden 8 Fälle bei GIS gefunden, für welche sowohl ein Wert für die Kapazität C_1 bekannt war, wie auch der Sensitivitätsnachweis Teil 1 durchgeführt worden war. Die Resultate sind in **Tabelle 4** und in **Bild 5** zusammengefasst.

Tabelle 4 Zusammenstellung der Daten von 8 GIS bei welchen Angaben für die Schritimpulsamplituden sowohl aus dem Sensitivitätsnachweis wie auch aus einer Bestimmung über C_1 erhältlich waren. Die Angabe 3/1 in Spalte 4 bedeutet, dass die Sammelschiene dreiphasig und die Fel-der einphasig gekapselt ist.

Hersteller	Auslegungsspannung	GIS Typ	1- oder 3-phasig gekapselt	C1	C2	U (5pC) C1	U (5pC) Sensitivitätsnachweis
1	2 [kV]	3	4	5 [pF]	6 [pF]	7 [V]	8 [V]
A	145	1	1	0.91	44	5.5	4.1
A	145	3	1	1.0	50	5.0	4.8
A	145	3	1	1.2	-	4.2	4.8
A	170	1	1	1.0	80	5.0	3.7
A	300	2	1	1.0	80	5.0	4.3
B	220	1	3/1	0.51	-	9.8	16
D	123	1	3	0.2	38	25.0	5
C	220	2	1	0.67	-	7.5	5

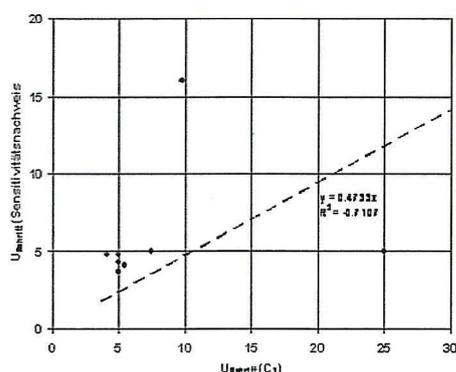


Bild 5 Graphische Korrelation der Schritimpulsamplitude bestimmt mittels der Kapazität C_1 zwischen Sensor und Innenleiter gegenüber der Schritimpulsamplitude bestimmt mit dem Sensitivitätsnachweis

Folgerungen:

Im Bereich der Sensorkapazitäten C_1 um 1 pF wird eine gute Übereinstimmung der Schritimpulsamplituden aus dem Sensitivitätsnachweis mit jenen aus der Bestimmung über C_1 festgestellt. Bei zwei einzelnen Spannungsimpulsamplituden im Bereich von C_1 -Werten deutlich unter 1 pF traten allerdings wesentliche Abweichungen auf.

Aus der praktischen Untersuchung und aus Betrachtungen der Wellenlänge bei elektromagnetischen Ausbreitungsvorgängen in einer GIS ist eine Bestimmung der Schritimpulsamplituden gemäss $U_{Schritt} = 5 \text{ pC}/C_0$ nur bedingt möglich. Für eine solche Bestimmung der Amplitude des Schritimpulses aus der Sensorkapazität C_1 für den Empfindlichkeitsnachweis, Teil 2, muss der Gültigkeitsbereich auf einen unteren Frequenzbereich eingeschränkt werden. Sowohl der Abstand zwischen Sensor und Innenleiter, wie auch der Abstand zwischen Innenleiter und GIS-Gehäuse müssen deutlich unter einem Viertel der Wellenlänge ($\lambda/4$) der Messfrequenz liegen. Als Beurteilungshilfe kann die Regel herangezogen werden, dass bei 750 MHz $\lambda/4 \approx 10 \text{ cm}$ beträgt.

Die unterschiedlichen Vor- und Nachteile der Messung bei hohen Frequenzen (oberhalb 1 GHz) und bei tieferen Frequenzen (bis herab unter 100 MHz) führen zur Empfehlung, dass TE-Mess-Systeme für kapazitive Sonden in GIS möglichst breitbandig ausgelegt werden sollten.

4 Einsatzmöglichkeiten

Neben dem Einsatz in Entwicklungs-, Type- und Routine-Prüfungen werden TE-Messungen in stärkerem Masse zur Inbetriebnahme und als Monitoring von gasisolierten Schaltanlagen eingesetzt [9]. Dies trifft insbesondere für Anlagen ab 245 kV Betriebsspannung zu. Niederschlag findet diese Praxis für die Inbetriebnahmeprüfung in der IEC62271-203, in welcher für GIS-Anlagen ab der Spannungsebene 245 kV zusätzlich zur Wechselspannungsprüfung entweder eine TE-Messung oder eine Stossspannungsprüfung empfohlen werden.

In Entwicklungsversuchen wird die UHF-TE-Messtechnik neben der konventionellen Methode (IEC 60270) routinemässig eingesetzt. Besonders bei ausgedehnten Prüflingen geben die Teilentladungsmessung und die Auswertung wertvolle Informationen darüber, ob das Design in Ordnung ist, oder ob die Ursachen der Teilentladungen in Qualitätsproblemen zu suchen sind. Weiterhin kann die Technik der TE-Messung optimiert, die Datenbank erweitert und Mitarbeiter ausgebildet werden. Während der Type Tests können bislang UHF-Messungen nicht zur Bewertung herangezogen werden.



Bild 6 Type Test eines 1100-kV-Trenners

Der im **Bild 6** dargestellte Versuchsaufbau für 1100 kV besitzt eine Prüflingskapazität von etwa 3 nF. Dieser Versuchsaufbau führt aufgrund von externen Störungen von den Prüfanlagen und durch Korona zu einem Pegel des Hintergrundrauschens von etwa 7 pC bei 1000 kV. Um eine hohe Empfindlichkeit bei den Messungen im Labor zu erreichen, wurden zusätzlich nichtkonventionelle TE-Messverfahren eingesetzt. Mit Hilfe der UHF-TE-Messung ist nicht nur eine sehr empfindliche Messung, sondern über eine Laufzeitmessung auch eine Ortung der TE-Quelle möglich. Damit konnten externe Störungen eindeutig in der Prüfanlage lokalisiert werden. Es bleibt zu hoffen, dass die UHF-TE-Messung auch als offizielle Messmethode, zumindest zur Unterscheidung von internen und externen TE-Quellen Einzug in die internationale Normung hält.

Um bei der Inbetriebnahme oder beim Monitoring von gasisolierten Schaltanlagen eine hohe Empfindlichkeit bei gleichzeitig möglichst geringer Anzahl von Sensoren zu gewährleisten, müssen die Sensoren optimal platziert werden. Bei ABB werden die Sensoren bereits während der Anlagenprojektierung berücksichtigt. **Bild 7** zeigt ein Beispiel. Die Abstände zwischen den Sensoren beruhen dabei auf Messungen der mittleren Dämpfung der einzelnen GIS-Komponenten und wurden durch zahlreiche Vor-Ort Messungen verifiziert. Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass die im Laborversuch ermittelte Empfindlichkeit immer erreicht, oft sogar übertroffen wird. Für die Überprüfung der Empfindlichkeit sind aber zusätzlich Sensoren notwendig, die nur zur Einspeisung des Skalierungsimpulses notwendig sind. Insbesondere bei langen Ausleitungen wäre es wünschenswert, durch eine vereinfachte oder modifizierte Prozedur auf diese zusätzlichen Sensoren zu verzichten. Die CIGRÉ WG D1.25 "Application guide for PD detection in GIS using UHF or acoustic methods" überarbeitet momentan die in [4] gegebenen Empfehlungen zum Empfindlichkeitsnachweis.

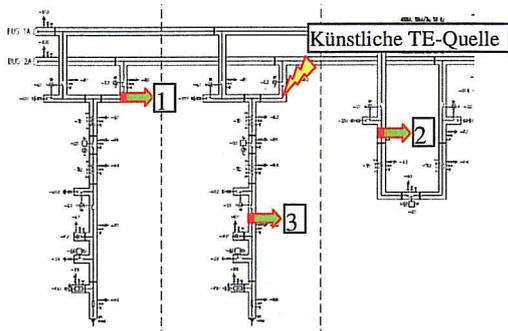


Bild 7 Beispiel für die Platzierung der UHF-Sensoren

5 Schlussfolgerungen

TE-Messungen im UHF-Bereich haben sich in den letzten Jahrzehnten bei der Vor-Ort-Prüfung von gasisolierten Schaltanlagen als Abnahmekriterium durchgesetzt. Mit Hilfe der UHF-TE-Messung ist nicht nur eine sehr empfindliche Messung, sondern über eine Laufzeitmessung auch eine Ortung der TE-Quelle möglich. Eine wesentliche Voraussetzung für empfindliche TE-Messungen vor Ort ist der Empfindlichkeitsnachweis. Somit kann der Betreiber einer GIS die Empfindlichkeit der UHF-Sensoren nach dem CIGRÉ-Empfindlichkeitsnachweis unabhängig selber überprüfen. Der Empfindlichkeitsnachweis ist aber von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig, z. B. von der Art der Fehlstelle, vom Mess-System (breitbandig oder schmalbandig), von der Auswertemethode, von den eingesetzten Sensoren und vom Skalierimpulsgenerator. Insbesondere Vor-Ort werden aber verschiedene Mess-Systeme eingesetzt. Die Einflussfaktoren müssen dabei bekannt sein und berücksichtigt werden.

An älteren Anlagen ist oftmals kein Empfindlichkeitsnachweis vorhanden. In solchen Fällen kann über die Messung der HS-Kapazität des Sensors eine Abschätzung der Empfindlichkeit unter bestimmten Voraussetzungen erfolgen.

Diese offenen Fragen, wie auch die Platzierung der Sensoren werden momentan in der CIGRÉ WG D1.25 "Application guide for PD detection in GIS using UHF or acoustic methods" bearbeitet.

Beim Einsatz der TE-Messung 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. 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. Somit rücken die Interpretation der gemessenen Signale und die daraus zu ziehenden Konsequenzen immer mehr in den Vordergrund der Untersuchungen. Die CIGRÉ TF D1.03.09 "Risk Assessment for Defects in GIS by PD Diagnostics" wird dazu einen wesentlichen Beitrag leisten.

6 Literatur

- [1] Janssen, Degen, Heising, Bruvik, Colombo, Lanz, Fletcher, Sanchis: *Final Report of Second International Enquiry on HV Circuit-Breaker Failures and Defects in Service*, Cigré WG 13-06 Brochure, Juni 1994
- [2] CIGRE Joint Working Group 33/23.12: *Insulation Coordination of GIS: Return of Experience, On Site Tests and Diagnostic Techniques*, Électra No. 176, Feb. 1998, pp. 67 - 97
- [3] Neumann, C.: *GIS-Vorortprüfungen aus Sicht des Betreibers*, HighVolt Kolloquium, Dresden, May 1997
- [4] CIGRÉ, Joint 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, pp. 75 - 87
- [5] Hampton, B.F.; Meats, R.J.: *Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations*, IEE Proc., Vol. 135, Pt. C, No. 2, 1988, pp. 137 - 144
- [6] Neuhold, S.; Heizmann, Th.; Bräunlich, R.; Koechli, D.; Riechert, U.; Dehne, Ch.: *Experiences with UHF PD detection in GIS using external capacitive sensors on windows and disk-insulators*, ISH 2007, August 27-31, 2007, Ljubljana, Slovenia, paper T7-480
- [7] Albiez M.: *Teilentladungsmessung an SF₆-isolierten Schaltanlagen*, Diss. ETH 9694, 1992
- [8] Meijer, S.: *Partial Discharge Diagnosis of High-Voltage Gas-Insulated Systems*, Dissertation University of Delft, 2001
- [9] Riechert, U.; Kudoke, M.; Strehl, Th.: *Monitoring und Diagnose von gasisolierten Schaltanlagen – Sinnvoller Einsatz von Teilentladungsmessungen*, HighVolt Kolloquium 2003, Mai 22-23, 2003
- [10] Riechert, U.; Holaus, W.; Krüsi, U.; Sologuren-Sanchez, D.: *Design and Test of Gas-Insulated Circuit-Breaker and Disconnecter for 1100 kV*, 2009 International Conference on UHV Power Transmission, May 20-22, 2009 Beijing, China