TE-Charakterisierung frei beweglicher Partikel in HVDC-GIS mittels UHF-Messtechnik und Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen PD-Characteristic of Free Moving Particles in HVDC-GIS using UHF Measuring Technique and High-Speed Imaging

Philipp Wenger, Michael Beltle, Stefan Tenbohlen Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland, philipp.wenger@ieh.uni-stuttgart.de Uwe Riechert, ABB Schweiz AG, Zürich, Schweiz

Kurzfassung

Der zuverlässige Einsatz elektrischer Betriebsmittel in der Hochspannungstechnik setzt eine jederzeit einwandfreie Isolation voraus, die jedoch durch Teilentladungen (TE) beeinträchtigt werden kann. Eine zuverlässige TE-Diagnostik ist deshalb wesentlicher Bestandteil der Zustandsabschätzung eines Betriebsmittels. In dieser Arbeit werden frei bewegliche Partikel hinsichtlich ihres Bewegungsmusters und ihrer Teilentladungsaktivität in realen GIS-Versuchsanordnungen unter hoher Gleichspannung untersucht. Hierfür wird deren Geometrie, Materialzusammensetzung, sowie die Höhe der angelegten Gleichspannung variiert. Für die Erfassung der TE wird das Signal breitbandig über einen internen UHF-Sensor ausgekoppelt und im Zeitbereich aufgezeichnet. Mit Hilfe zeitsynchroner Aufnahmen des UHF-Messsystems und einer Hochgeschwindigkeitskamera werden die unterschiedlichen Bewegungsmuster von freibeweglichen Partikeln im elektrischen Gleichfeld separiert und den UHF-Pulsmustern zugeordnet. Insbesondere die Partikelbewegung mit kleinen Hüben an der negativen Elektrode - Firefly genannt - kann durch die Korrelation von UHF-Signalen und aufgezeichneten Bewegungsabläufen genauer differenziert werden. So kann beispielsweise die Sprungamplitude von Stabpartikeln mit kreiszylindrischem Querschnitt abgeschätzt werden. Den verschiedenen Bewegungsmustern können eindeutige UHF-Pulsmuster im Zeitbereich zugeordnet werden, die abhängig von der Partikelbewegung charakteristische zeitliche Pulsabstände und Signalamplituden aufweisen. Diese werden mit Hilfe der Puls-Sequenz-Analyse (PSA) visualisiert und bilden signifikante Cluster, so dass die Partikelbewegung anhand der PSA-Diagramme abgeschätzt werden kann.

Abstract

A reliable operation of high-voltage equipment requires an insulation in perfect condition, which, however can be affected by partial discharges (PD). Therefore, PD-measurement is a meaningful tool to evaluate the condition of high voltage components. Scope of this work are free moving particles with regard to their movement pattern and their partial discharge activity in an experimental GIS-arrangement under high DC field stress. For this purpose, their geometry, material composition and the amplitude of applied DC voltage is varied. For the detection of PD, the signal is measured using a broadband UHF plate sensor and recorded in the time domain. Time-synchronized measurements of UHF measuring system and a high-speed camera allow to identify different motion patterns of free moving particles as well as the correlation to UHF pulse patterns. In particular, particle movement with small hopping amplitudes on the negative electrode known as firefly - can be differentiated more accurately by the correlation of UHF signals and the recorded trajectory. Thus, the hopping height of wire-shaped particles with circular cross-section can be estimated. The different movement patterns can be correlated to unique UHF pulse patterns in the time domain, which provide characteristic pulse repetition rates and signal amplitudes depending on the particle movement. These are visualized by means of pulse sequence analysis (PSA) which form significant clusters. Hence, the particle movement can be estimated from PSA diagrams.

1 Einführung

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) gelten aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und langen Betriebserfahrung in Wechselspannungsnetzen als wesentliche Komponenten der Energieversorgung. Daher wird diese bewährte Technik auch vermehrt bei Gleichspannungsanwendung eingesetzt. Das dielektrische Verhalten von gasförmigen Isoliermedien in koaxialen Elektrodenanordnungen unter Gleichspannungsbelastung unterscheidet sich jedoch wesentlich vom Verhalten bei Wechselspannung. Der zuverlässige Einsatz elektrischer Betriebsmittel der Hochspannungstechnik setzt ein dauerhaft beständiges Isolationssystem voraus. Teilentladungen (TE) führen zum lokalen Zusammenbrechen eines kleinen Teils der Isolationsstrecke über einen kurzen Zeitraum. In GIS werden TE vor allem durch Metallpartikel verursacht, die während der Fertigung, der Montage aber auch während des Betriebs (z.B. durch Schalthandlungen) in die Anlage gelangen. Neben festen Störspitzen sind freibewegliche Partikel mit die häufigste Ursache für Isolationsversagen bei GIS [1]. Die Feldstärke, bei der das Partikel abhebt und zwischen Kathode und Anode springt, hängt von dessen geometrischer Form und seiner Masse ab. Neben der Bewegung von einer Elektrode zur anderen, können weitere Bewegungsformen auftreten [2]. Der Übergang zwischen den einzelnen Bewegungsarten ist fließend und wird im Wesentlichen von der Höhe und Polarität der angelegten Gleichspannung bestimmt. Abhängig von der Bewegung und der relativen Position des Partikels zu den Elektroden emittiert das Partikel Teilentladungspulse [3]. In SF₆ können TE-Impulse breitbandig sein und hochfrequente Spektralanteile besitzen, die mittels der UHF-Messtechnik erfasst werden können. In den durchgeführten Untersuchungen werden die Partikelbewegungen hinsichtlich ihres Einfluss auf die Teilentladungsaktivität betrachtet. Für diese Untersuchungen wurde ein Versuchsaufbau realisiert, mit dem die Partikelbewegung durch Justierung des Spannungspegels initialisiert und mit Hilfe von Schaugläser beobachtet werden kann.

2 Versuchsaufbau und -durchführung

Der in **Bild 1** dargestellte Versuchsaufbau setzt sich aus handelsüblichen GIS-Komponenten, zwei LED Strahlern, einem UHF-TE-Messsystem, bestehend aus UHF-Sensoren und Oszilloskop und einem Kamerasystem für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zusammen. Die Prüfspannung wird durch eine luftisolierte, dreistufige Greinacherkaskade gleichgerichtet. Die resultierende Gleichspannung kann stufenlos bis U $\leq \pm 550$ kV eingestellt werden und besitzt eine Welligkeit $\delta u \leq 2$ %. Sie wird prüflingsseitig mittels gemischt gedämpftem Spannungsteiler gemessen. Die Gasdurchführung ist über einen Vorwiderstand mit R = 15 k Ω kontaktiert.

Im Versuchsabschnitt bilden Innenleiter und Kapselung eine waagerecht ausgerichtete koaxiale Elektrodenanordnung. Der Außendurchmesser des Innenleiters beträgt 115 mm, der Innendurchmesser der Kapselung beträgt 275 mm. Um das elektrische Feld am Ende des Leiters zu homogenisieren, ist dieser mit einer Kugel, deren Durchmesser 120 mm beträgt abgeschlossen. Leiter, Kapselung und Kugel bestehen aus unbeschichtetem Aluminium. Die Versuche werden mit SF₆ bei einem Druck von 0,5 MPa durchgeführt.



Bild 1 Versuchsaufbau für die zeitsynchrone Erfassung von UHF-TE-Signalen und Bildern der Hochgeschwindigkeitskamera

2.1 Partikelbewegung und TE

Das Bewegungsverhalten frei beweglicher Partikel unter Gleichspannungsbeanspruchung kann in drei grundsätzliche Arten unterteilt werden: Springen zwischen den Elektroden, Schweben im Elektrodenzwischenraum und das Springen an der Kathode – genannt Firefly. Das Springen zwischen den Elektroden setzt unmittelbar nach Erreichen der Abhebefeldstärke ein. Mit höheren Feldstärken nimmt die Wahrscheinlichkeit der Firefly-Bewegung zu. Diese kann in verschiedene Bewegungsformen weiter unterteilt werden, wie zum Beispiel Firefly mit kleiner und großer Sprungamplitude.

Auf einem leitfähigen, freibeweglichen Partikel, das auf der Kapselung liegt, sammeln sich Ladungsträger abhängig vom auf das Partikel wirkende elektrische Feld und dessen Geometrie. Übersteigt die auf das Partikel wirkende Coulombkraft F_{el} die Gravitationskraft F_{G} beginnt es sich aufzurichten. Durch die exponiertere Position befindet sich das Partikel bereits im Bereich höherer Feldstärke, wodurch sich weitere Ladungsträger akkumulieren und das Partikel häufig bereits während der Aufrichtbewegung abhebt. Die Feldstärke, die notwendig ist, um die Partikelbewegung zu initialisieren, ist um bis zu 2-3-mal höher als die Aussetzfeldstärke, bei der die Partikelbewegung zum Erliegen kommt [4]. Nach dem Abheben bewegt sich das Partikel zum Innenleiter, wo es umgeladen wird und wieder zur Kapselung zurückkehrt. Bei dieser Sprungbewegung zwischen den Elektroden sind Teilentladungspulse kurz vor dem Kontakt des Partikels mit einer der Elektroden messbar.

Bei höheren Feldstärken können kurz vor dem Erreichen der Kathode (entspricht in dieser Untersuchung dem Innenleiter) Entladungen an beiden Partikelenden auftreten [3-4]. Durch das Abwandern der beweglichen Elektronen in Richtung Kapselung entsteht vor der der Anode zugewandten Partikelspitze ein positiv geladener Feldbereich. Dichte und Ausdehnung dieser Raumladungszone hängt von der Form, der Spannungspolarität und vom Isoliergasdruck ab. Die längliche Form der Zylinderpartikel mit spitzen Enden führt zu einer stark inhomogenen Feldverteilung und begünstigt dadurch die Bildung der Raumladungszone [5]. Bewegt sich das Partikel auf seinem Weg Richtung Anode in diese Raumladungswolke wird es umgeladen und bewegt sich entgegengesetzt in Richtung Kathode. Diese oszillierende Bewegung - Firefly genannt - kann sich in ganz unterschiedlichen Sprungamplituden äußern [6]. Es wurden große Sprünge bis weit in den Gasraum hinein ebenso wie kleine Sprungamplituden von < 1 mm (entspricht der 0,25-fachen Partikellänge) aufgezeichnet.

2.2 Messsystem

Durch einen geschlossenen Stützisolator vom Versuchsabschnitt getrennt, ist an die angrenzende Komponente ein UHF-Sensor angeflanscht. Das UHF-TE-Signal wird über ein RG 214 Messkabel an ein digitales Speicheroszilloskop geführt. Das Oszilloskop zeichnet die Signale mit 4 GHz analoger Bandbreite und einer Abtastrate von 10 GS/s für 10 ms auf, wobei je 5 ms vor und nach dem Triggerereignis abgespeichert werden. Auf den Einsatz von Vorverstärkern oder Dämpfungsgliedern wird verzichtet. Sobald das Oszilloskop auf das UHF-Signal triggert, wird über den Triggerausgang des Oszilloskops die Hochgeschwindigkeitskamera ausgelöst. Das Kamerasystem zeichnet zeitsynchron die Bewegung des Partikels auf. Die gemessene Zeitverzögerung von UHF-Triggerevent bis zur Kameraauslösung beträgt im Mittel 6,6 μ s. Bei einer für diese Versuche eingestellten Bildwiederholrate von maximal 10000 fps (Zeitverzug *t* zwischen zwei Bilder t = 100 μ s) ist die Verzögerung demnach vernachlässigbar.

2.3 Untersuchte Partikel

Die Messungen wurden mit unterschiedlichen, nachfolgend in **Tabelle 1** aufgelisteten, Partikelgeometrien und – materialien durchgeführt. Die Abmessungen wurden so gewählt, dass Partikel, die aus dem gleichen Material bestehen, in etwa das gleiche Gewicht aufweisen. In **Bild 2** sind die untersuchten Partikeltypen dargestellt.

Tabelle 1 Partikelgeometrien und -materialien

Geometrie	Material	Abmessung
Plättchen	Aluminium	Länge = 2 mm
		Breite = $1,5 \text{ mm}$
		Stärke = 0,1 mm
Kreiszylinder	Nickel-Chrom,	Länge = 4 mm
	bzw. Aluminium	$\emptyset = 0,3 \text{ mm}$
Spirale	Nickel-Chrom,	Länge = $2,3 \text{ mm}$
	bzw. Aluminium	Ø = 0,9 mm



Bild 2 Untersuchte Partikel – Plättchen- (links), Zylinder-(Mitte) und Spiralpartikel (rechts)

2.4 Auswertung mit PSA

Entscheidend für die Entstehung und die Intensität von Teilentladungen an den Partikelspitzen ist das vorherrschende lokale elektrische Feld. Ist die kritische elektrische Feldstärke der Isolierstrecke überschritten, kommt es zu einem raschen Anstieg der Ladungsträger in diesem Bereich. Das resultierende elektrische Feld setzt sich aus der Überlagerung des angelegten Gleichfelds und die durch vorangegangenen Teilentladungen gebildeten Raumladungszonen zusammen. Nachfolgende TE-Impulse werden deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit von vorangegangenen Impulsen maßgeblich beeinflusst [7].

Die Puls-Sequenz-Analyse (PSA) ist ein geeignetes Werkzeug, um die im Zeitbereich gemessenen Signale der Teilentladungsaktivität visuell darzustellen [8]. In **Bild 3** ist das Auftreten aufeinanderfolgender Entladungen, gemessen als Spannungssignal eines UHF-Sensors, über der Zeit schematisch dargestellt. Zu jedem Impuls mit der Amplitude *p* wird auch die Amplitude des Nachfolgepulses p_{nach} und der zeitliche Abstand Δt_{nach} bestimmt.



Bild 3 Schematische Darstellungen aufeinanderfolgender UHF-TE-Impulse im Zeitbereich

Die Darstellung der TE-Signale erfolgt mittels zweier Diagramme. Die Korrelation zweier aufeinanderfolgender Pulsamplituden p und p_{nach} ist in **Bild 4** links dargestellt und die Korrelation von Pulsamplitude p zum Zeitverzug Δt_{nach} zwischen den Pulsen p und p_{nach} in **Bild 4** rechts dargestellt. Je nach Kombination der Pulse und des zeitlichen Abstands bilden sich Muster in unterschiedlichen Bereichen im PSA-Diagramm. Zwei im UHF-Signal aufeinanderfolgende Pulse mit kleiner Amplitude erscheinen beispielsweise im p_{nach} -p-Diagramm (**Bild 4**, links) im dritten Quadranten. Ein Puls mit kleiner Amplitude, der auf einen Puls mit großer Amplitude folgt hingegen ist im p_{nach} -p-Diagramm im zweiten Quadranten markiert. Darüber hinaus ist die auf eine Sekunde normierte Anzahl der gemessenen Pulse links oben im p_{nach} -p-Diagramm ergänzt. Im Δt_{nach} -p-Diagramm wird die Amplitude des Nachfolgepulses nicht berücksichtigt, sondern lediglich der zeitliche Verzug Δt zwischen zwei Pulsen.

Um statistische Ausreiser geringer zu gewichten, werden jeweils zehn UHF-TE-Sensorsignale der gleichen Partikelbewegung in einem Diagramm ausgewertet. Die Diagramme enthalten eine farbcodierte Häufigkeitsverteilung.



Bild 4 Schematische Darstellung des p_{nach} -p-Diagramms (links) und des Δt_{nach} -p-Diagramms (rechts) mit Unterteilung in prägnante Bereiche

3 Messergebnisse

Die in den **Bilder 5, 6, 8 und 10** dargestellten UHF-TE-Signale zeigen Pulsmuster von vier beobachteten Partikelbewegungen. Die Partikelgeometrie und die Höhe der angelegten Prüfspannung begünstigen bestimmte Partikelbewegungen, die aber fließende Übergänge aufweisen. Generell springt das Partikel mit dem Erreichen der Abhebefeldstärke zwischen den Elektroden. Wird die Feldstärke erhöht kommt es vermehrt zu Firefly. Je höherer die Feldstärke ist desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass es zum Firefly mit kleinen Sprungamplituden kommt. Quasi-stehendes Firefly findet bei allen Feldstärken statt, ist jedoch nicht sehr stabil, so dass das Partikel bereits nach einigen 10 ms wieder in andere Firefly-Bewegungen übergeht. Die verschiedenen Bewegungen konnten bei allen untersuchten Partikelgeometrien und -materialen nachgewiesen werden. Bei der Firefly-Bewegung von Plättchen- und Spiralpartikeln ist häufig eine Rotation um die vertikale Achse zu beobachten. Die Geschwindigkeit mit der sich das Partikel durch den Gasraum bewegt, hängt stark von dessen Geometrie ab. Bedingt durch die verhältnismäßig große Oberfläche und den dadurch größeren Strömungswiderstand bewegen sich von den untersuchten Partikelgeometrien Plättchenpartikel am langsamsten durch das Gas.

Die nachfolgend exemplarisch vorgestellten Ergebnisse sind bei der Bewegung eines Zylinderpartikels aus Nickel-Chrom-Draht bei am Innenleiter negativer angelegter Spannung entstanden.

3.1 Springen zwischen den Elektroden

In **Bild 5** ist das UHF-Signal über der Zeit dargestellt, wenn ein Partikel zwischen den Elektroden hin und her springt. Impulse kleiner Amplitude lassen auf Kontakt mit dem Außenleiter schließen. TE-Impulse großer Amplituden werden detektiert, kurz bevor das Partikel am Innenleiter auftrifft. Der kleinere Radius des Innenleiters führt bei Partikelanwesenheit zu einer größeren Feldverzerrung und begünstigt einen TE-Umladeimpuls großer Amplitude im Bereich zwischen Partikelspitze und Elektrode [9].



Bild 5 Gemessenes UHF-Signal eines springenden Zylinderpartikels zwischen den Elektroden bei U_{DC} = - 150 kV

3.2 Firefly mit großen Sprungamplituden

Bild 6 zeigt das UHF-Signal eines Zylinderpartikels, das Firefly mit großen Sprungamplituden ausführt. Das Partikel entfernt sich dabei bis zu mehreren Partikellängen von der Elektrode. Dabei entstehen im UHF-Signal V-förmige Pulssequenzen, zwischen denen längere Zeiträume von mehrerer Millisekunden Dauer ohne TE-Impulse liegen. Die V-förmigen Pulssequenzen entstehen, wenn das Partikel sich dem Innenleiter annähert. Je näher das Partikel der Elektrode kommt, desto kleiner werden die Amplituden der einzelnen TE-Impulse und desto höher wird die Pulswiederholrate. Zu dem Zeitpunkt, an dem das Partikel die Elektrode berührt, sind keine TE-Impulse messbar. Sobald sich das Partikel wieder von der Elektrode entfernt werden wieder in der Amplitude zunehmende TE-Impulse detektiert, bis das Partikel sich so weit entfernt hat, dass die elektrische Feldstärke nicht mehr ausreicht, um TE-Impulse zu zünden. Anhand der Kamerabilder ist nachvollziehbar, dass bei Zylinderpartikel von 4 mm Länge ab einer Distanz von 1-2 mm zwischen Kathode zu Partikelspitze die TE-Pulse aussetzen.



Bild 6 Gemessenes UHF-Signal eines Zylinderpartikels während der Firefly-Bewegung mit großen Sprungamplituden bei $U_{DC} = -290 \text{ kV}$

Im $p_{\text{nach}-p}$ -Diagramm (**Bild 7**, links) entsteht ein zur Winkelhalbierenden achsensymetrisches Muster mit signifikanter Häufung bei kleinen Pulsamplituden, die sich aufgrund der V-förmigen Pulsmuster im Zeitbereich ergeben. Das $\Delta t_{\text{nach}-p}$ -Diagramm zeigt ein Muster mit signifikanter Ausprägung hin zu größeren zeitlichen Abständen bis zu $\Delta t_{\text{nach}} = 0,5$ ms. Gleichzeitig wird deutlich, dass die meisten Impulse weniger als 20 µs zeitlichen Versatz haben. Die kürzesten Pulsabstände, von z.T. unter 1 µs werden kurz vor und nach der Elektrodenberührung gemessen.



Bild 7 PSA-Muster eines Zylinderpartikels während der Firefly-Bewegung mit großen Sprungamplituden bei $U_{DC} = -290 \text{ kV}$

3.3 Firefly mit kleinen Sprungamplituden

Bild 8 zeigt das UHF-Signal während der Firefly-Bewegung bei der der Hub der Sprungbewegung viel kleiner ist als die Partikellänge. Wie bei der Firefly-Bewegung mit großer Sprungamplitude sind V-förmige Pulsmuster erkennbar, die bei Annäherung und Entfernen des Partikels an die Hochspannungselektrode entstehen. Zwischen den V-förmigen Pulsmustern sind Impulse hoher Amplitude erkennbar und deutlich kürzerem zeitlichen Verzug Δt_{nach} zwischen den Impulsen.



Bild 8 Gemessenes UHF-Signal eines Zylinderpartikels während der Firefly-Bewegung mit kleinen Sprungamplituden bei $U_{DC} = -310 \text{ kV}$

Bild 9 zeigt das PSA Diagramm kleiner Sprungamplituden. Im Vergleich zum Firefly mit großen Sprungamplituden (vgl. **Bild 8**) entsteht im p_{nach} -p-Diagramm ein Muster entlang der Winkelhalbierenden, bei dem die Häufung insgesamt hin zu größeren Pulsamplituden verschoben ist. Die Anzahl der Pulse pro Sekunde ist mehr als 3,5-mal so hoch. Das Δt_{nach} -p-Diagramm zeigt eine deutlich flachere Struktur, da auch die Impulse mit großen Amplituden eine hohe Wiederholrate aufweisen.



Bild 9 PSA-Muster eines Zylinderpartikels während der Firefly-Bewegung mit kleinen Sprungamplituden bei $U_{\text{DC}} = -310 \text{ kV}$

3.4 Quasi stehendes Firefly

Schwebt das Partikel unmittelbar an der Elektrode, ohne dass eine sichtbare Hubbewegung zu erkennen ist, sind im Zeitbereich Pulssequenzen messbar wie die in **Bild 10** dargestellt.



Bild 10 Gemessenes UHF-Signal eines Zylinderpartikels während der Firefly-Bewegung in schwebendem Zustand bei U_{DC} = - 190 kV

Verhältnismäßig gleichbleibende Pulsabstände und – amplituden begründen sich auf die geringe Variation des Abstands von Partikel zu Elektrode, und somit der Streukapazität der Anordnung. Im Vergleich zu den oben erläuterten Ausprägungen des Fireflys bewegt sich das Partikel hierbei nur sehr langsam horizontal entlang der Elektrode. In beiden PSA-Diagrammen in **Bild 11** schlägt sich die gleichmäßige Bewegung in Muster mit homogener Häufigkeitsverteilung nieder. Die Pulswiederholrate ist etwas höher als bei Firefly mit großen Sprungamplituden.



Bild 11 PSA-Muster eines Zylinderpartikels während der Firefly-Bewegung in schwebendem Zustand bei $U_{DC} = -190 \text{ kV}$

Anhand der erläuterten Beispiel wird deutlich, dass durch Kombination der UHF-TE- Messmethode und dem PSA-Verfahren die geringen Unterschiede im Bewegungsverhalten freibeweglicher Partikel separiert, statistisch bewertet und dargestellt werden können.

4 Zusammenfassung

Freibewegliche, leitfähige Partikel können in SF₆-isolierten Betriebsmitteln abhängig von ihrer Bewegungsform zu Teilentladungen und zum Isolationsversagen und somit zum Ausfall der Anlage führen. Es ist deshalb notwendig, etwaige Partikel unter dem Einfluss eines elektrischen Gleichfelds in GIS zuverlässig zu detektieren. Um diese Themen genauer untersuchen zu können, werden ein Versuchsaufbau aus handelsüblichen GIS-Komponenten realisiert, sowie verschiedenen Partikelgeometrien, wie zylinder-, spiral- und plättchenförmige Partikel, im Bereich des Anlagennenndrucks untersucht. Die Messung des UHF-Signals und die zeitsynchrone Aufzeichnung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigen, dass die bekannten Bewegungsformen freibeweglicher Partikel, wie das Springen zwischen den Elektroden, dem Firefly und der im Gasraum schwebende Zustand weiter separiert werden können. So kann die Firefly-Bewegung in Firefly mit kleinen, bzw. großen Sprungamplituden und in ein Firefly mit quasi stehendem Partikel weiter unterteilt werden. Mit Hilfe von PSA-Diagrammen werden die TE-Impulse visualisiert, um den Benutzer, ähnlich dem PRPD bei AC-TE-Messungen, bei der Defekterkennung zu unterstützen. Die PSA-Diagramme der drei Firefly-Bewegungsmuster zeigen eindeutige Merkmale, die zu ihrer Klassifizierung herangezogen werden können.

In weiterführenden Untersuchungen soll die Polarität der Prüfspannung geändert werden, so dass am Innenleiter eine positive Gleichspannung anliegt und die Fireflybewegung an der Kapselung auftritt. Darüber hinaus sollen weitere Defekte wie ortsfeste Störstellen hinsichtlich ihres TE- Verhaltens untersucht werden. Der so entstehende Fehlerkatalog kann später zur Fehlererkennung herangezogen werden.

5 Literatur

- CIGRE Joint Working Group 33/23.12, "Insulation Coordination of GIS: Return of Experience, On Site Tests and Diagnostic Techniques", Electra No. 176, Feb. 1998
- [2] J. R. Laghari, A. H. Qureshi, "A Review Of Particle-Contaminated Gas Breakdown", IEEE TEI Vol. EI-16 No.5, 1981
- [3] Y. Kudo, T. Sugimoto, Y. Higashiyama, "DC Corona Discharge From a Wire Particle Floated With a Microgap in Parallel Plate Electrodes", IEEE TIA, Vol. 42, No. 4, 2006
- [4] K. Asano, K. Anno, Y, Higashiyama, "The Behaviour of Charged Conducting Particles in Electric Fields", IEEE TIA, Vol. 33, No. 3, 1997
- [5] H. You, Q. Zhang, J. Ma, C. Guo, Y. Qin, T. Wen, "Firefly and Standing Still Phenomena of Free Conducting Wire-type Particles in SF₆ under DC Voltage", IEEE CEIDF, Toronto, Canada, 2016
- [6] Y. Negara, K. Yaji, J. Suehiro, N. Hayashi, M. Hara, "DC Corona Discharge From Floating Particle in Low Pressure SF₆", IEEE TDEI, Vol. 13, No. 6, 2006
- [7] M. Hoof, "Impulsfolgen-Analyse: Ein neues Verfahren der Teilentladungsdiagnose", Dissertation, Universitäts-Gesamthochschule Siegen 1997
- [8] A. Pirker, U. Schichler, "HVDC GIS/GIL PD Identification by NoDI* Pattern", 20th ISH, Buenos Aires, Argentinien, 2017
- [9] W. Mosch, W. Hauschild, J. Speck, S. Schierig, "Phenomena in SF₆ Insulations with Particles and their Technical Valuation", Third International Symposium on High Voltage Engineering 1979, Milan, Italy