

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

Kurzfassung

Teilentladungsmessungen im UHF (Ultra-Hoch-Frequenz) Bereich finden an vielen Assets, wie Transformatoren und Schaltanlagen erfolgreich Anwendung. Der Vorteil dieser unkonventionellen Teilentladungsmessmethode besteht darin, dass oberhalb der wesentlichen Störbeeinflussungen gemessen wird. In dem Paper werden mehrere Fallbeispiele von durchgeführten UHF Messungen in einem Frequenzbereich von 150MHz-1GHz an Hochspannungskabel-Endverschlüssen analysiert. Dafür wurden UHF-Messungen an vorinstallierten UHF Sensoren in den verschiedenen Betriebszuständen (wie z.B. im Normalbetrieb, spannungsführend aber lastfrei, nach Reinigung) des Testobjekts erfasst. Der Einfluss von Störungen im Frequenzbereich 100kHz – 20MHz, welcher sich bei der herkömmlichen, konventionellen Teilentladungsmesstechnik (IEC 60270) zeigen würde, wird an Hand parallel durchgeführter Messung mit zusätzlich installierten HFCT (high frequency current transformer, unkonventionelle TE-Kopplung) an den entsprechen Objekten dargestellt. Die gemessenen UHF Spektren wurden anschließend bei den Verdachtsfrequenzen, Frequenzen bei denen sich Veränderungen im Pegel durch mögliche Teilentladungen zeigen, im Zeitbereich in der Form eines phasenaufgelöstes Pattern (PRPDP) synchron zur Netzfrequenz des Testobjekts dargestellt. Die Messergebnisse werden abschließend hinsichtlich der Bewertung der Betriebsgefährdung der gemessenen TE diskutiert.

1. Einleitung

Hochspannungskabel-Endverschlüsse sind wichtige Komponenten in Hochspannungskabelsystemen. Die heutige Fertigungsqualität und geforderten Werksendprüfungen garantiert eine hohe Zuverlässigkeit. Allerdings stellen die notwendigen Montagen vor Ort einen erheblichen Unsicherheitsfaktor dar. Die Inbetriebnahme Prüfungen nach IEC60840 und IEC62067 von Kabelsystemen soll einen sicheren, störungsfreien Betrieb gewährleisten. Mit bestandener Inbetriebnahmeprüfung, welche zunehmend auch mit begleitender Teilentladungsmessung durchgeführt werden, geht das Kabelsystem in Betrieb. Während der Betriebsdauer finden wiederkehrende Prüfungen und Diagnosemessungen, welche eine Freischaltung des Kabels erfordern, nur bedingt statt, da Freischaltungen mit erheblichem Aufwand verbunden sind. Diagnosemethoden, welche im laufenden Netzbetrieb angewendet werden können, sind wichtige Informationsquellen mit einem vernünftigen Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen. Die Diagnose an Hochspannungs-Assets (Trafo, GIS, Kabel) bei UHF hat sich als eine effektive Analyseform bewährt, da diese online und bei Frequenzen fernab von Störsignalen durchgeführt wird.

2. Theoretischer Hintergrund

Verschiedene Teilentladungsfehlstellen weisen unterschiedliche Signaturen in ihrem Frequenzspektrum auf. Diese typischen Merkmale können in Kombination mit phasenaufgelösten Teilentladungspattern (PRPDP) zur Analyse der Teilentladungsarten und Defektstellen benutzt werden. Die Kenntnis über die Art der Teilentladung erlaubt eine Einschätzung der Kritikalität der Fehlstelle. Zur besseren Erläuterung

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

der verschiedenen Entladungsarten wurden anhand von künstlichen Fehlstellen die spektralen Verhaltensweisen untersucht.

2.1.1 UHF Messungen an künstlichen Fehlstellen

Für eine bessere Interpretation der Feldergebnisse sind drei charakteristische Fehlstellenarten anhand Ihres effektiven Spektrums analysiert worden. Dabei wurde neben den spektralen Verläufen jeweils ein phasenaufgelöstes Pattern bei typischen Frequenzen mit abgebildet. Es konnten dabei die Ergebnisse von C. Nyamupangedengu [1] der Entladungstypen in der „Initialphase“, d.h. in nahezu ungealtertem Zustand der Fehlstelle, bestätigt werden. Alle Messungen wurden mit 50 Hz Prüfspannung durchgeführt. Die angewandte Messbandbreite betrug 5MHz bei der jeweiligen Mittenfrequenz.

2.1.2 Korona Entladung

Die im nachfolgenden dargestellte Korona in Luft Teilentladung wurde mit einem spitz zulaufenden elektrischen Draht auf Hochspannungspotential simuliert. Dabei wurde eine Spannung von 4kVrms angelegt und somit die TE-Einsetzspannung um das 2fache überschritten.

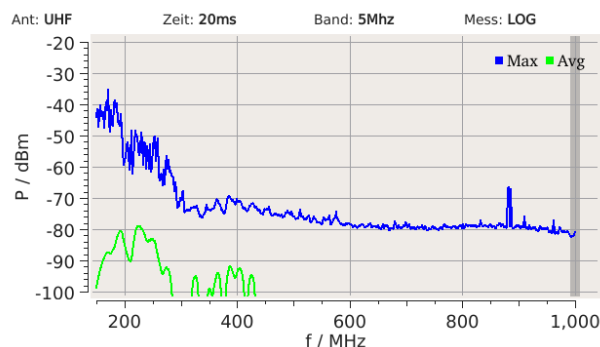


Bild 1: Frequenzspektrum einer Korona Entladung in Luft mit Spitze auf Hochspannungspotential

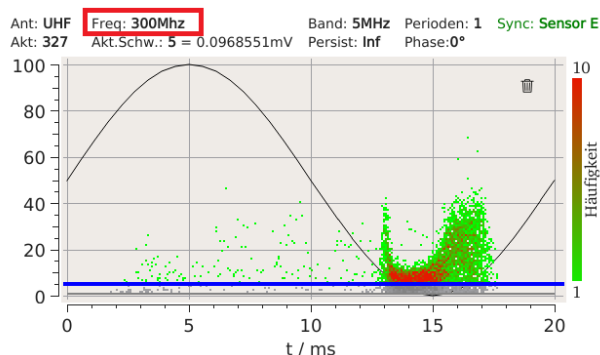


Bild 2: PRPDP der Korona Entladung (Bild 1) bei einer Mittenfrequenz von 300MHz

Die Koronaentladung zeigt ein typisches Pattern mit annähernd gleichbleibender Entladungshöhe im Maximum der negativen Spannungshalbwelle. Das effektive Frequenzspektrum dieser Entladung ist typischerweise begrenzt auf 300MHz.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

2.1.3 Gleit- / Oberflächenentladung

Zur Simulation einer Gleitentladung wurde eine Töpler-Anordnung benutzt. Dabei wurde die Hochspannungselektrode mit einem Durchmesser von 2,5mm mittig auf einer PVC Platte platziert. Die Messung wurde bei 4kVrms, der 1,7fachen Einsatzspannung durchgeführt.

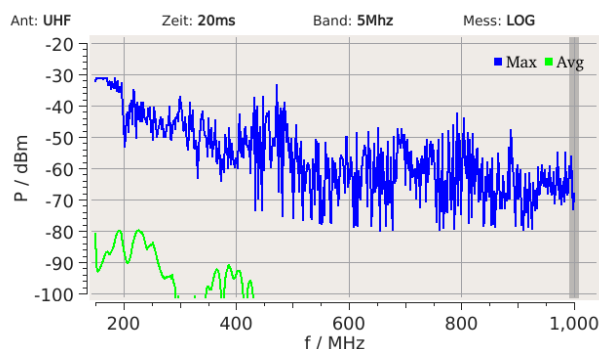


Bild 3: Frequenzspektrum einer Gleitentladungsanordnung nach Töpler

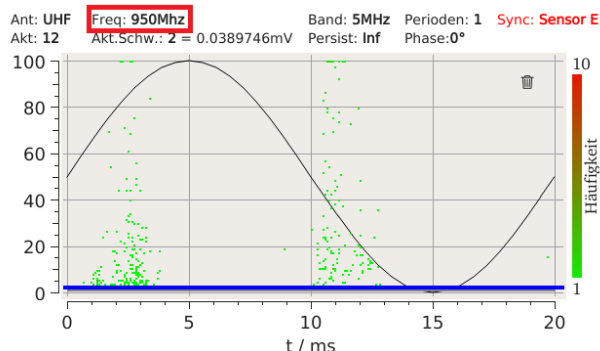


Bild 4: PRPDP bei der Mittenfrequenz von 950MHz der Gleitentladungsanordnung nach Töpler (Bild 3)

Die Oberflächenentladung zeigt eine durchgängige spektrale Verteilung. Die zeitlich aufeinander folgenden auftretenden Entladungspegel unterliegen hoher Schwankung. Die Standardabweichung der auftretenden Entladungen ist dadurch vergleichsweise (z.B. Korona) sehr hoch. Im charakteristischen PRPDP wird das anhand der Streuung der Pegel innerhalb des typischen Clusters ersichtlich.

2.1.4 Entladung im „kleinen“ Hohlraum

Zur Erzeugung dieser Hohlraumentladung wurde eine Epoxidharzplatte mit mehreren Lufteinschlüssen mit einem Durchmesser von ca. 500µm zwischen zwei Elektroden gesetzt. Die Lufteinschlüsse befinden sich nahe der Hochspannungselektrode. Als Testspannung wurde 4kVrms angewendet. Die Einsatzspannung wurde dabei 1,4fach überschritten.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

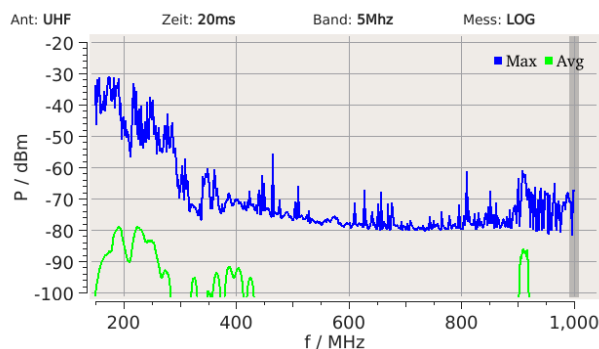


Bild 5: Frequenzspektrum Hohlraumentladungen 500 µm Hohlraumdurchmesser

Bei der Hohlraumladung muss man zwischen gealterten und ungealterten Fehlstellen unterscheiden. In der hier gezeigten Untersuchung handelt es sich um ungealterte Fehlstellen. Im Frequenzspektrum treten charakteristische Anteile im hohen Frequenzbereich auf. Man spricht in diesem Zustand von einer „Streamer-like“ Teilentladung [2]. Die spektrale Verteilung ändert sich mit zunehmender Alterung [1]. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zur Gleitentladung ist die nicht durchgängige Verteilung im Spektrum. D.h. es gibt Frequenzbereiche, in welchen die Entladung keine Signalanteile erzeugt.

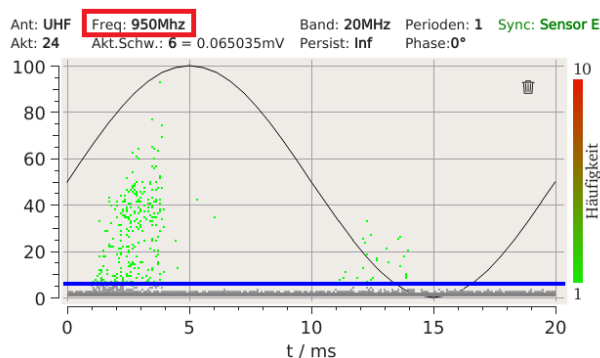


Bild 6: PRPDP bei der Mittenfrequenz von 950 MHz der Hohlraumladung (Bild 5)

Das im (Bild 6) dargestellte PRPDP zeigt, aufgrund der unmittelbaren Nähe der Hohlräume zu einer Elektrode, eine asymmetrische Struktur.

2.1.5 Entladung im „großen“ Hohlraum

Mit einem „großen“ Hohlraum soll die Townsend Teilentladung nachgestellt werden. Diese Entladungsform zeigt sich nicht ausschließlich bei verhältnismäßig großen Hohlräumen sondern auch gehen nach gewisser Alterungszeit der Fehlstellen mit „Streamer-like“ Teilentladung in diese Entladungsform über [1]. Diese Fehlstelle wurde ebenfalls mit einer Epoxidplatte mit einem mittig eingeschlossenen ellipsenförmigen Hohlraum eines Durchmessers von ca. 5mm simuliert. Als Testspannung wurde ebenfalls 4kVrms verwendet. Die Einsetzspannung wurde dabei 1,4fach überschritten.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

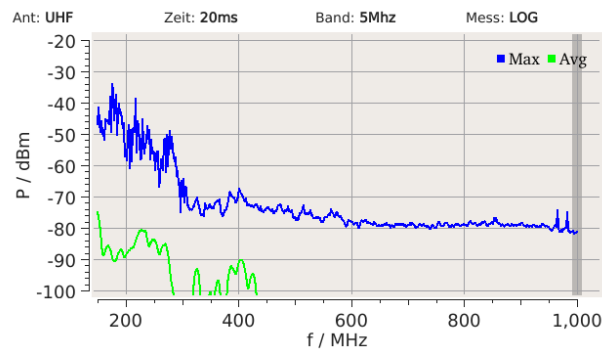


Bild 7: Frequenzspektrum einer Hohlraumladung (großer Hohlraum)

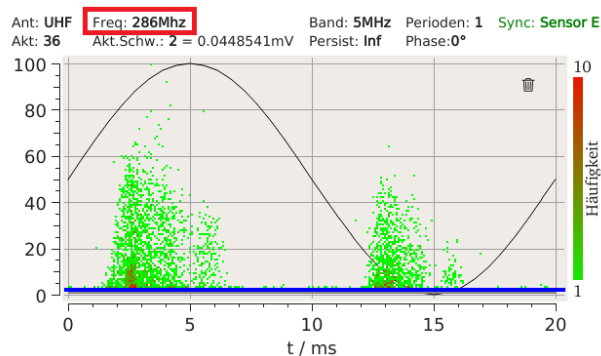


Bild 8: PRPDP bei der Mittenfrequenz von 286 MHz der Hohlraumladung

Das Frequenzspektrum (Bild 7) zeigt Frequenzanteile lediglich bis ca. 300MHz und ähnelt der spektralen Verteilung der Koronaentladung (Bild 1). Das phasenaufgelöste Teilentladungspattern (PRPDP) ermöglicht aber eine eindeutige Unterscheidung zwischen beiden Entladungsarten.

2.1.6 Störer

Zur Vervollständigung ist im (Bild 9) ein phasenaufgelöstes Pattern von Störern gezeigt, welche ebenfalls Cluster bilden können. Die Cluster treten in dieser Form bei Frequenzen bis zu 300MHz auf. Sie sind erkennbar an der „scharfen“ Struktur im PRPDP. In höheren Frequenzbereichen (oberhalb 400 MHz) zeigen sich Pegel, welche von Funkfrequenzen (z.B. Datenfunk, Mobilfunk, Polizeifunk, etc.) erzeugt werden. Eine Teilentladungsdiaognose bei diesen speziellen Frequenzen ist nicht möglich bzw. nicht sinnvoll.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

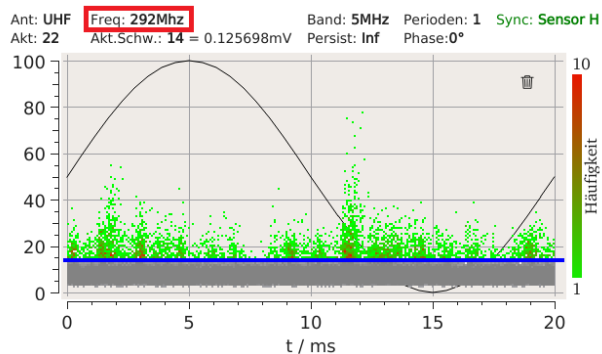


Bild 9: PRPDP bei der Mittenfrequenz von 292 MHz von Störern in phasenstabilen Clustern

3. Vergleich von Diagnosemethoden an einem Hochspannungskabelsystem

Zum Vergleich zwischen den Messmethoden wurde von einer Kabelstrecke VPE 110kV eine Phase herangezogen. Dabei befinden sich die Sensoren zur UHF- und RF -Auskopplung am gleichen Endverschluss. Der Endverschluss des Kabels ist über eine Sammelschiene mit der Sekundärseite des Hochspannungstransformators verbunden. D.h. der Transformator befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Messobjekt. Die konventionelle offline TE-Diagnose wurde mittels einer HV DAC (damped AC) Quelle durchgeführt. Diese Messung musste aufgrund der Anschlussbedingungen vom entgegengesetzten Kabelende aus durchgeführt werden.

3.1 Online unkonventionelle TE-Diagnose UHF versus RF

Die Vergleichsmessungen wurden unmittelbar aufeinanderfolgend durchgeführt. Die UHF Messung zeigte keine Auffälligkeiten des Endverschlusses.

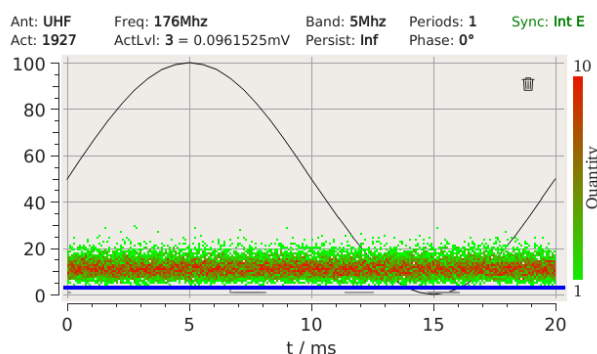


Bild 10: PRPDP des Endverschlusses (L3) bei der Mittenfrequenz von 176 MHz mit UHF

Im Vergleich dazu das PRPDP, welches mit einem HFCT auskoppelt wurde (Bild 11). Die Bewertung erfolgt in einem Frequenzbereich (RF) von 100kHz bis 20MHz.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

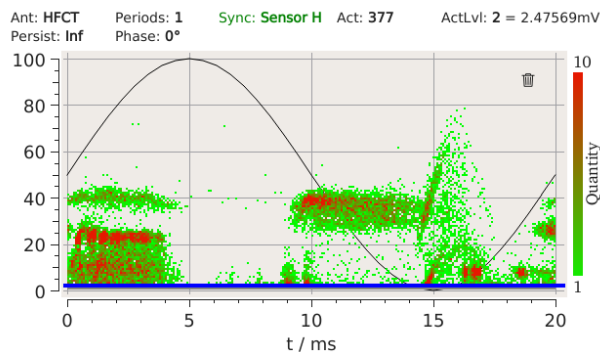


Bild 11: PRPD des Endverschlusses (L3) im RF Bereich - HFCT Auskopplung

Es zeigt sich ein PRPD mit relativ hohen Aktivitäten. In dem Pattern sind phasenstabile Störungen, sowie mehrere charakteristische Cluster zu erkennen, welche unter anderem auf Koronaentladungen schließen lassen. Im Vergleich zu Messungen im UHF werden RF Frequenzbereich Entladungsaktivitäten auch von nicht unmittelbar lokalen Fehlstellen erfasst. D.h. im Betrieb können Teilentladungen von den angeschlossenen Sammelschienen, Entladungen im Transformator oder Teilentladungsfehlstellen vom entfernten Kabelende und der dort angeschlossenen Komponenten ebenfalls die Ursache für ein Cluster im PRPD sein. Dabei ist es auch möglich das Entladungen in den aufgezählten Assets durch Übersprechen auf die gemessene Phase einkoppeln.

Da in der UHF Messung keine Signale einer Korona Entladung feststellbar waren, ist naheliegend, dass die mit RF detektieren Entladungen entweder vom fernen Kabelende oder den angeschlossenen Transformator kommen.

Energien im niedrigeren Frequenzbereich werden bekanntlich über größere Kabelstrecken übertragen und können bei RF Messungen erfasst werden.

3.2 Online unkonventionelle UHF versus offline konventionelle TE-Messung

Im Vergleich zur UHF Teilentladungsmessung wurde eine offline HV DAC mit konventioneller TE-Kopplung durchgeführt.

Die offline Messung bestätigte die TE-Freiheit des gesamten Kabels bei der nominellen Spannung. Dennoch sind Teilentladungen an allen nahen Endverschlüssen der HV DAC Messung ab einer Einsetzspannung von 1.7U_o festgestellt worden. Diese sind auf die Anschlusssituation des HV DAC Messgeräts zum Prüfling zurückzuführen.

3.3 Diskussion der UHF Messung zu den Vergleichsmethoden

Teilentladungsmessungen mittels UHF erlauben eine hohe Störunterdrückung und hohe Selektivität in der Diagnose, aufgrund der Auswahl geeigneter Frequenzen. Physikalisch bedingt ist die UHF Diagnose lokal auf die betrachtete Komponente des Testobjektes fokussiert, in diesem Fall den Hochspannungsendverschluss. Damit wird die Interpretation von Messergebnissen erleichtert, da es keine

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

Beeinflussung / Überlagerung durch Teilentladungen in weiter entfernten Muffen oder dem Endverschluss am fernen Ende gibt.

Uu den in diesem Abschnitt gezeigten Vergleichen der Diagnosemethoden lässt sich zusammenfassen, dass jede der Diagnoseformen online oder offline, im RF oder UHF Frequenzbereich, für sich Vor- und Nachteile mit sich bringt. Insgesamt sind aber alle dargestellten Methoden zueinander Komplementär und erlauben damit eine zuverlässigere Problemanalyse.

4. Fallbeispiele

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde UHF Messungen durchgeführt. Es handelte sich ausschließlich um Freiluft Hochspannungsendverschlüsse der Reihe 110kV. Der überwiegende Anteil dieser Systeme waren VPE isolierte Kabelstrecken unterschiedlichster Längen. Die Ergebnisse der UHF Messungen an den Endverschlüssen wurden statistisch analysiert. (Bild 13) zeigt eine UHF Messung vor Ort, mit Auskopplung an einem installiertem UHF Sensor.



Bild 12: Vor Ort UHF Messung an installiertem UHF Sensor

4.1.1 Internationale UHF Feldmessungen – statistischer Überblick

Als statistische Basis liegen 27 UHF-Messungen an 18 Endverschlüssen in verschiedenen Ländern zu Grunde. Dabei werden Neumessungen nur nach signifikanten Änderungen, wie Reinigung bzw.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

Aufarbeitung gezählt. Von den 18 Endverschlüssen waren 11 Stück mit fest installierten UHF Sensoren ausgestattet.

Zunächst wurden alle Messungen hinsichtlich gemessener Aktivität im Frequenzspektrum analysiert. Die Kategorisierung, der speziellen Teilentladungstypen, erfolgte anhand der charakteristischen PRPDP. PRPDP Cluster, welche keinem bekannten Entladungsmuster zugeordnet werden konnten, wurde der Kategorie „Störer“ zugerechnet. Nicht phasenstabile Signale werden automatisch als „keine Aktivität“ klassifiziert.

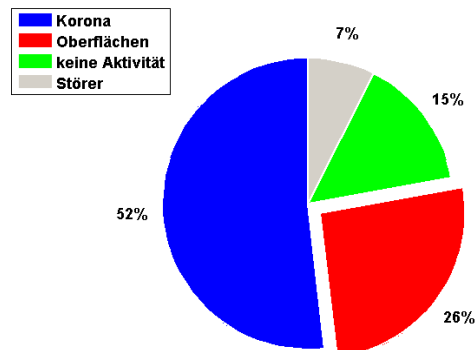


Bild 13: UHF Messergebnisse in den verschiedenen Kategorien im Bezug auf alle Messungen

In (Bild 14) werden Messergebnisse hinsichtlich der Frequenzanteile im Spektrum analysiert, welche phasenaufgelöste Patternstrukturen von Gleitentladung oder Hohlraumentladung aufweisen. Diese Messergebnisse sind im (Bild 14) in der Kategorie „Oberflächen“ enthalten.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

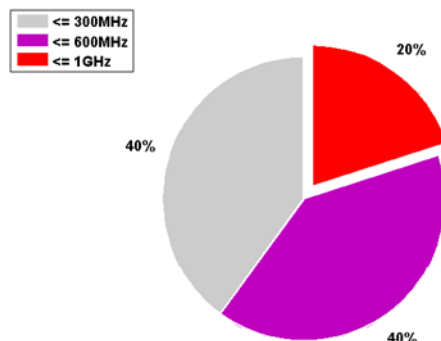


Bild 14: Frequenzanteile der Messungen mit PRPDP von Gleit- und Hohlraum Entladungen

Unter der Zuhilfenahme der Erkenntnisse der Art der Fehlstellen und deren Verhalten im Spektrum, sowie Betrachtung der absoluten Höhe des Pegels, wurden diejenigen Messungen, welche ein breites Energiespektrum aufweisen als beobachtungswert „further study“ bewertet. Im (Bild 16) ist der prozentuale Anteil auffälliger Ergebnisse von allen diagnostizierten Endverschlüssen aufgezeigt.

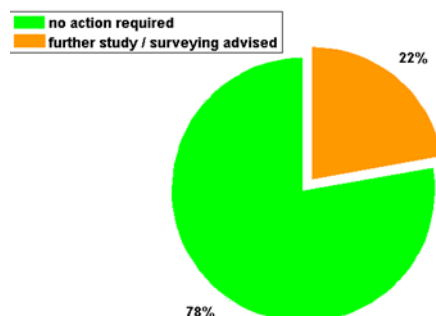


Bild 15: Prozentualer Anteil auffällig bewerteter Endverschlüsse

Eine Bewertung „further study / surveying advised“ ist eine Empfehlung zur Trendbeobachtung dieser Endverschlüsse. Eine Trendbeobachtung durch wiederholte, Messung an diesen Endverschlüssen gibt Aufschluss ob sich Änderungen hinsichtlich der Entladungsaktivität (Pulse per Periode), Entladungshöhen und Verhalten im Spektrum ergeben. Dabei ist es empfehlenswert die Wiederholungsmessungen bei gleichen Messeinstellungen und identischen Messfrequenzen durchzuführen.

UHF TE-Diagnose an Hochspannungsendverschlüssen – internationale Fallbeispiele

5. Zusammenfassung

Es wurden die unterschiedlichen spektralen Verteilungen von typischen Teilentladungsfehlstellen und deren Besonderheiten diskutiert. Im Vergleich der unkonventionellen Messmethoden UHF und im RF Bereich und konventionellen offline Messmethode stellen sich deutliche Unterschiede dar. Die charakteristischen Merkmale der UHF und RF Messung können sehr gut als Interpretationshilfe benutzt werden.

Das Praxisbeispiel von UHF Diagnosemessungen an 18 Hochspannungsendverschlüssen ergab Auffälligkeiten an 4 Endverschlüssen, welche von Oberflächenentladungen oder Hohlraumentladungen verursacht werden. Eine Trendverfolgung durch Wiederholungsmessungen ist zu empfehlen, um evtl. Änderungen in Pegel und Frequenzverhalten zu erfassen.

Neben dem Verhalten im Spektrum und den charakteristischen phasenaufgelösten Pattern, sind die Pegelhöhe und das Aktivitätslevel (Anzahl von Pulsen/Periode) als Entscheidungskriterien zu benutzen.

6 Literatur

- [1] C. Nyamupangedengu: PD-Type-Dependet Spectral Bandwidth in Solid Polymer Dielectrics. PhD Thesis. Johannesburg, 2011
- [2] P. Morshuis: Partial Discharge Mechanismus. PhD Thesis. Delft, 1993