

Artikel

Erfahrung mit dem Teilentladungs-Monitoring von HS-Kabelsystemen

Autoren

W. KOLTUNOWICZ, U. BRONIECKI, D. GEBHARDT, O. KRAUSE
OMICRON Energy Solutions GmbH, Deutschland

Datum

Mai 2019

Beschriebenes OMICRON-Produkt

MONCABLO

Anwendungsbereiche

Online-Monitoring von Teilentladungen (TE) an Hochspannungsenergiekabeln

Schlagwörter

OMICRON, MONCABLO, Online-Monitoring, Teilentladungen, TE, Isolierungszustand, Hochspannungskabel, Energiekabel, VPE-Kabel

Version

v1.0

Kurzfassung

In diesem Artikel wird ein fortgeschrittenes Konzept für das Monitoring des Isolierungszustands von Energiekabelsystemen mit vernetzter Polyäthylen-Isolierung (VPE-Kabel) beschrieben. Dieser Artikel basiert auf einer tatsächlichen Fallstudie eines Kunden, bei dem MONCABLO, unser System zum Online-Monitoring von Teilentladungen (TE), für die kontinuierliche Analyse des Isolierungszustands eines erdverlegten Starkstromkabelsystems verwendet wird.

Einführung

Laut CIGRE kam es zwischen 2000 und 2005 insgesamt zu 119 Ausfällen in HS-Kabelsystemen mit Nennspannungen zwischen 60 kV und 500 kV. Ungefähr 50 % dieser Ausfälle sind auf externe Faktoren zurückzuführen (ungewöhnliche Systembedingungen, andere physische externe Parameter, durch Dritte verursachte mechanische Schäden usw.). Dieselbe Untersuchung ergab, dass Erdkabel ungefähr 10-mal häufiger durch externe Bedingungen beschädigt werden als Kabelsysteme in dedizierten Gräben oder Tunneln.

Für VPE-Garnituren wird in Abbildung 1 die Ausfallrate, aufgeteilt in zwei Klassen ober- und unterhalb von 220 kV, dargestellt. Die Leitungsabschlüsse im Außenbereich in der höchsten Spannungsklasse haben die höchste Ausfallrate. Die Instandsetzung eines VPE-Kabelsystems nimmt ungefähr 20 Tage in Anspruch.

Eine von vier großen Versorgungsunternehmen in Europa durchgeführte Untersuchung ergab ähnliche Ausfallraten. Lange Kabelsysteme stellen in den Übertragungsnetzen ein erhöhtes Risiko dar. Die Stückprüfung von Kabeln und Garnituren im Werk als Qualitätssicherungsmaßnahme ist etabliert. Derzeit wird der Zustandsüberwachung während des Betriebs der Kabelanlage zunehmend mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Eine weitere qualitätssichernde Maßnahme ist die Prüfung nach der Installation. Der Wert der Teilentladungen (TE) ist ein wichtiger Indikator um die Integrität der Kabelisolierung sicherzustellen und den Zustand bewerten zu können.

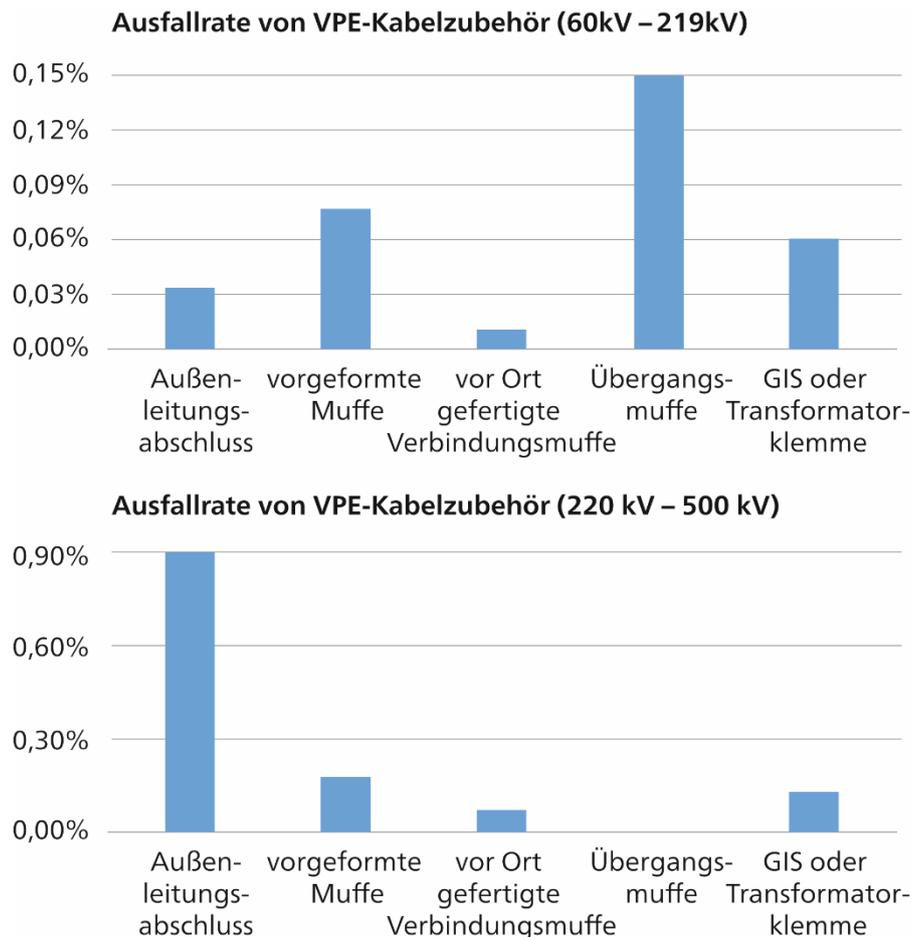


Abbildung 1. Ausfallrate von VPE-Kabelzubehör für die Klasse 60 kV – 219 kV (oben) und 220 kV - 500 kV (unten)

Teilentladungsmessungen

Die Messung von Teilentladungen ist heute ein weltweit akzeptiertes Verfahren für die zustandsabhängige Bewertung der Isolierung von HS-Kabeln. Es werden unterschiedliche Lösungen für Sensoren und Erfassungstechniken empfohlen und angewendet, die kürzlich durch internationale Normen und Fachgremien anerkannt wurden.

Es besteht ein hoher Bedarf für ein vielseitig einsetzbares TE-Monitoring-System, das für unterschiedliche Kabeltypen (VPE, Öl- und Gasdruck) mit unterschiedlichen Nennspannungen bis 500 kV in Kabeltunneln oder bei Erdverlegungen eingesetzt werden kann. Zusätzlich sollte das System in der Lage sein, weitere für den Zustand des Kabels relevante Daten zu integrieren, wie z. B. den Öldruck an den Endverschlüssen, den Zustand von Mantelspannungsbegrenzern an Auskreuzungen, den Mantelstrom usw.

Die Herausforderungen bei der Entwicklung und Installation eines solchen TE-Monitoring-Systems zur Verwendung bei Erd- oder Tunnelverlegung werden in diesem Artikel besprochen. Beschrieben werden das Design und die Funktionen des Monitoring-Systems bei Erd- oder Tunnelverlegung. Außerdem wird die Verwendung des Systems für die Prüfung nach der Installation und für Instandhaltungs-inspektionen während des Betriebs des Kabelsystems diskutiert (Abbildung 2). In diesem Artikel werden vor allem die folgenden Aspekte näher beleuchtet: Sensorpositionierung und Prüfung des Anschlusskastentyps, Stromversorgung des Monitoring-Systems an Erd- und Tunnelkabeln, Lokalisierung von Fehlern und Überwachung weiterer Parameter.

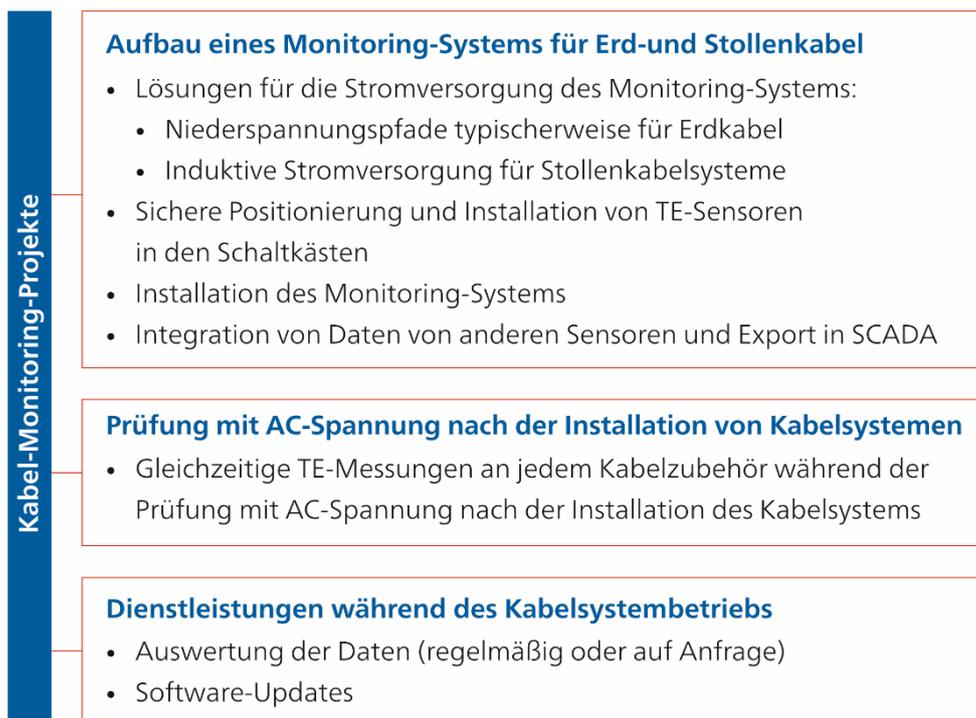
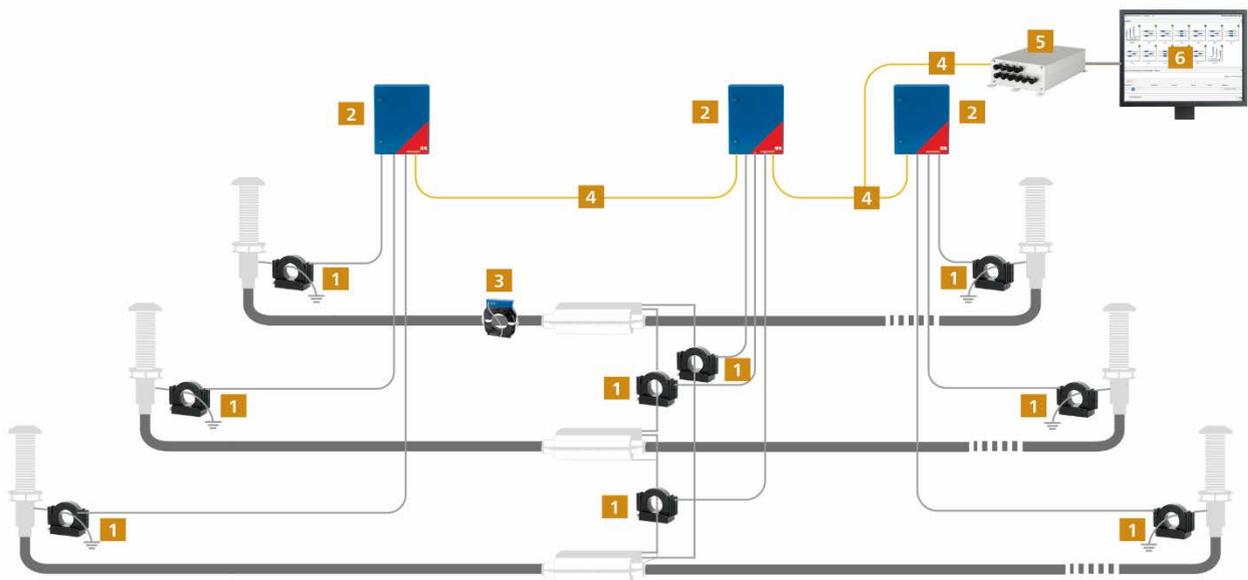


Abbildung 2. Projektelemente beim Design, bei der Installation und dem Betrieb eines Kabel-Monitoring-Systems

Aufbau des Monitoring-Systems

In Abbildung 3a wird der Aufbau des Monitoring-Systems für lange Kabelsysteme und in Abbildung 3b für kurze Kabelverbindungen dargestellt. Das TE-Signal wird durch induktive Sensoren an den Anschlusskästen und den Endverschlüssen erfasst. Die Informationen der TE-Sensoren werden synchron von einem mehrkanaligen Datenerfassungsgerät erfasst. Die Synchronizität zwischen den Kanälen ist für die fortgeschrittene Signalverarbeitung zwingend und ermöglicht die Trennung der Signalquellen, die Lokalisierung von Defekten usw. Darüber hinaus extrahiert das Datenerfassungsgerät die wesentlichen Eigenschaften des TE-Signals und übermittelt sie an einen Computer, mit dem eine langfristige Datenspeicherung und eine weitere Nachbearbeitung möglich sind.



- 1) TE-Sensor (HFCT)
- 2) Datenerfassungsgerät
- 3) induktive Stromversorgung
- 4) Glasfaserkabel
- 5) Kontrolleinheit
- 6) zentraler Computer mit Monitoring-Software

Abbildung 3a. Aufbau eines Monitoring-Systems für lange Kabelsysteme

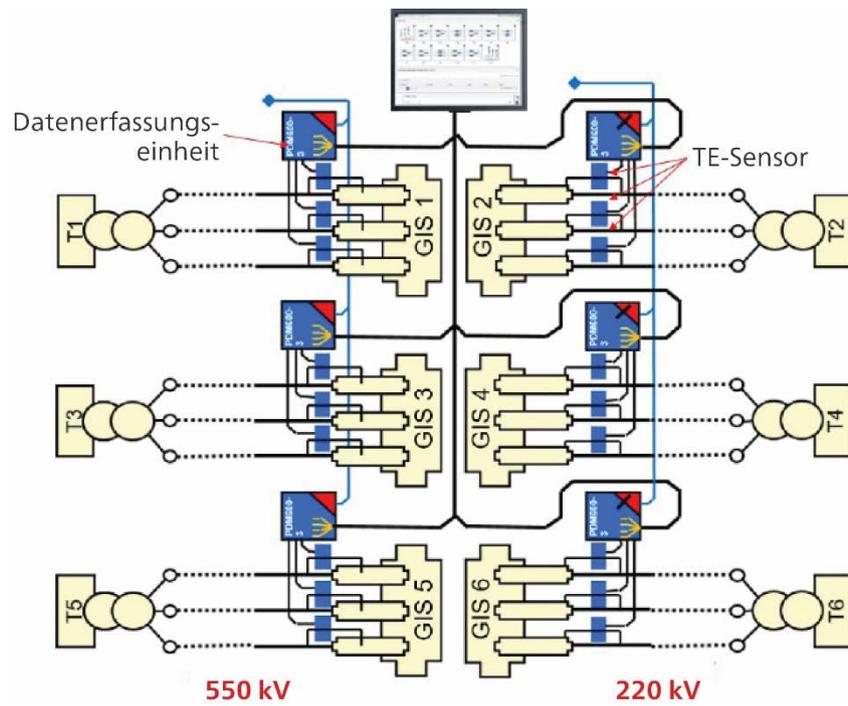


Abbildung 3b. Beispiel für den Aufbau eines Monitoring-Systems für kurze Kabelverbindungen zwischen 220 kV und 550 kV; Verbindungen zwischen GSU-Transformatoren und GIS in einem Kraftwerk

Anordnung von TE-Sensoren

Für die Erfassung von TE-Signalen werden normalerweise entweder Sensoren in den Muffen installiert oder externe Sensoren an den Auskreuzungen angebracht. Bei Tunnelkabelsystemen ist die Installation von TE-Sensoren an den Kabelmuffen einfach. Allerdings sollten einige Sicherheitsvorkehrungen bei der Installation von Sensoren in den Anschlusskästen der Auskreuzverbindungen getroffen werden, da der Abstand zwischen den Auskreuzverbindungen durch die Installation der TE-Sensoren reduziert wird (Abbildung 4).

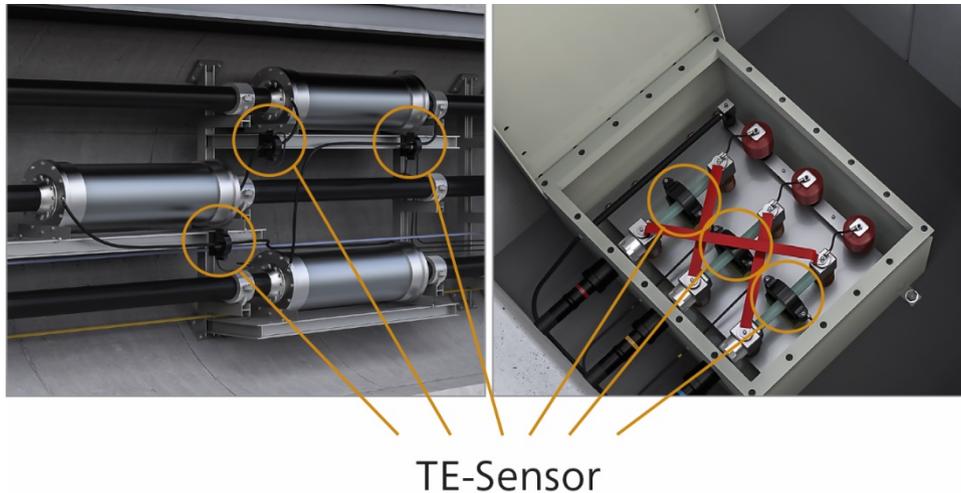


Abbildung 4. Installation von TE-Sensoren an einer Tunnelkabelmuffe (links) und in einem Linkbox eines Erdkabels (rechts)

Deshalb muss der Linkbox mit den installierten TE-Sensoren einer erneuten Typprüfung unterzogen werden, um einen sicheren und langen Betrieb sicherzustellen. Es müssen Wechsel- und Stoßspannungsprüfungen sowie Kurzschlussstrom- und interne Lichtbogenprüfungen durchgeführt werden.

Stromversorgung des Monitoring-Systems

Die Stromversorgung der Erfassungsgeräte an den Muffen stellt eine echte Herausforderung bei der Überwachung langer Kabelsysteme dar, weil die Muffen generell in abgelegenen Bereichen ohne direkten Zugang bzw. nicht in der Nähe einer Stromquelle liegen. Je nach Art der Kabelinstallation können für die Lösung dieses Problems unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Für Tunnelkabelsysteme können speziell entwickelte induktive Stromversorgungen die Lösung sein. Die induktive Stromversorgung versorgt das Erfassungsgerät mit ausreichend Leistung – und das auch im Falle einer sehr niedrigen Last des Kabelsystems. Sie enthält die nötige Elektronik zur Überwachung und Steuerung des am Ausgang ausgegebenen DC-Stroms in Abhängigkeit der verschiedenen Lastsituationen auf dem Hochspannungskabel und zur Filterung von Störungen, welche die TE-Messung in der Nähe beeinflussen würden.

Bei Erdkabeln ist die Verlegung eines Niederspannungsleiters (NS-Leiters) gemeinsam mit dem Starkstromkabel gängige Praxis. Um einen sicheren Betrieb zu garantieren, muss eine speziell entwickelte Schutzbeschaltung zur Unterdrückung transienter Signale an jeder Muffe installiert werden (Abbildung 5 – rechts). Sie bietet Schutz im Falle von transienten Überspannungen aufgrund von Blitzschlägen an den Leitungsanschlüssen oder in der Nähe der Anschlusskästen, Schalthandlungen oder Fehlerströme auf dem Primärleiter. Während des Normalbetriebs wird der Niederspannungspfad von einem Kabelende aus gespeist. Bei einer Unterbrechung ist die Speisung von anderen Kabelende möglich. Zusätzlich zu den

Ableitern für die Unterdrückung der asymmetrischen und symmetrischen Überspannungen wird ein Temperaturregler im Schrank für die Stromversorgung installiert.

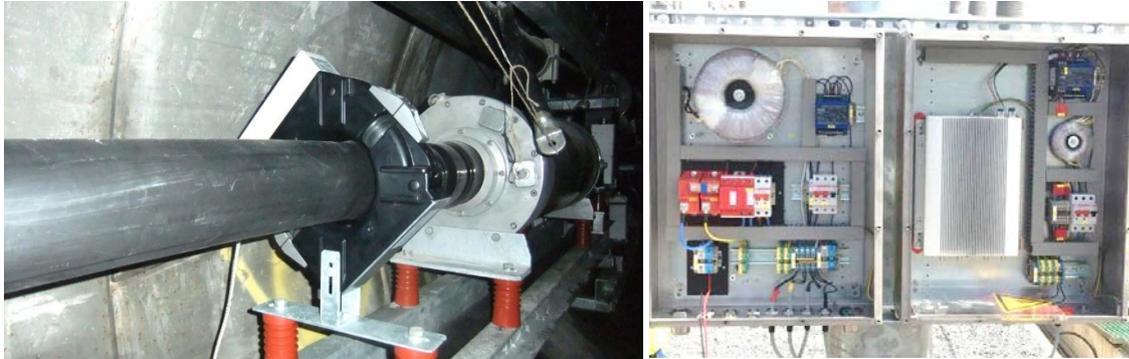


Abbildung 5. Stromversorgungslösungen für Tunnelkabel (links) und Erdkabel

Monitoring-Software

Aufbau der Software

Die Software ist ein hochgradig modulares und skalierbares verteiltes System. Die Architektur besteht aus einem Kern auf Windows-Basis und einem web-basierten Steuerteil [8]. Der Kern der Monitoring-Software ist in Form von Windows-Diensten realisiert und läuft kontinuierlich, ohne dass ein direktes Eingreifen des Benutzers erforderlich ist. Das Kernsystem ermöglicht eine Erfassung und Speicherung der Messung, eine Datennachbearbeitung und -analyse, Sicherheitsaufgaben für Datenzugriff und Systemoperationen sowie externe Schnittstellen für den Datenaustausch via Ethernet oder Feldbus.

Das Monitoring-System empfängt Daten von jedem Erfassungsgerät auf zwei Arten: permanenter Modus und periodischer Modus. Im permanenten Modus werden die Daten jede Sekunde erfasst, mit Grenzwerten verglichen und in Echtzeit in der grafischen Benutzeroberfläche angezeigt. Liegen diese Daten innerhalb der normalen Grenzen, werden sie grün markiert. Überschreiten die Werte die Grenzwerte für „Warnung“ oder „Alarm“, werden sie entsprechend in Gelb oder in Rot angezeigt. Die Daten des permanenten Modus können für alle überwachten Standorte gleichzeitig oder für jeden Standort einzeln angezeigt werden (Abbildung 6). Ein Vergleich der skalaren Werte für das gesamte Kabelzubehör ist ebenfalls möglich (Vergleichsansicht).

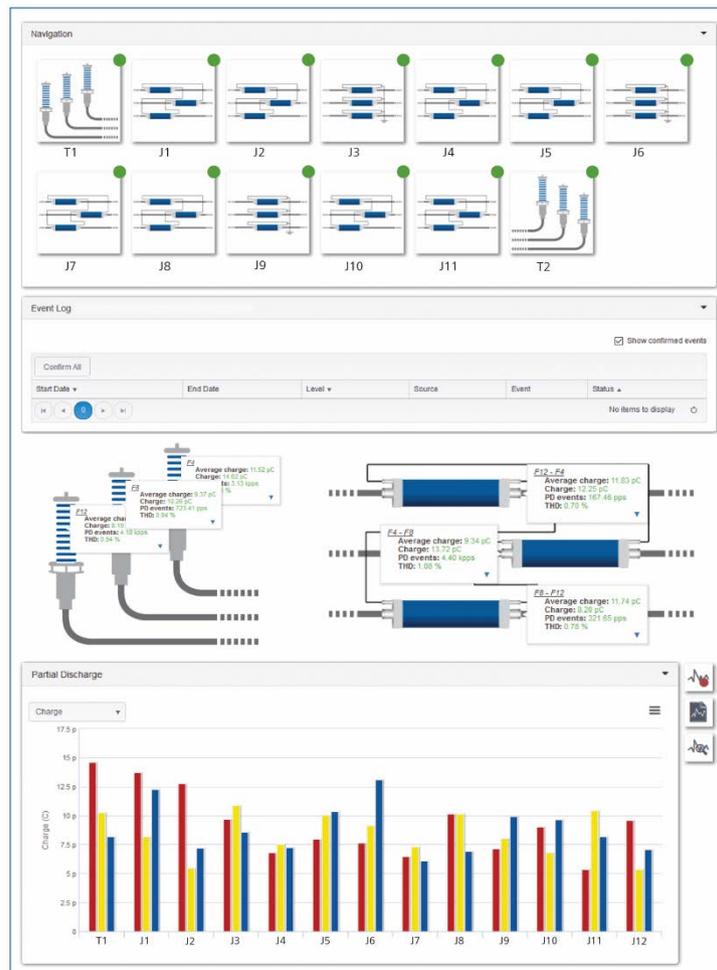


Abbildung 6. Visualisierung von Daten in Echtzeit im permanenten Modus der Monitoring-Software

Periodische Messungen werden in gleichmäßigen Abständen vorgenommen, z. B. stündlich. Die Dauer der periodischen Messung beträgt normalerweise eine Minute. Während dieser Zeitspanne werden alle erwähnten skalaren Werte berechnet und die PRPD-Diagramme (Phase Resolved Partial Discharge) und 3PARD-Diagramme (3 Phase Amplitude Relation Diagram) erfasst [9]. Diese Daten werden für die Nachverarbeitung und Trendanzeige gespeichert.

Ungeplante periodische Messungen werden getriggert, wenn eine oder mehrere Messgrößen die eingestellten Grenzwerte überschreiten. Darüber hinaus zeichnet das Monitoring-System Datensätze auf (regelmäßig oder ausgelöst durch Ereignisse) und führt eine automatische Separierung zwischen mehreren einzelnen Quellen durch. Dabei wird die wahrscheinlichste Phase des Quellenursprungs angegeben, um die Datenauswertung durch Nutzer ohne Fachwissen zu erleichtern. Abbildung 7 zeigt die Daten (skalare Werte und Bilder), die für jeden Punkt in der historischen Trendkurve gespeichert werden. Die Software des Monitoring-Systems übernimmt auch die Kommunikation und die Datenübermittlung an Überwachungssysteme über Universalschnittstellen und Protokolle. Gleichzeitig ist das Monitoring-System in der Lage, Daten von Drittsensoren über die genannten Schnittstellen zu integrieren und im Web-Interface zu visualisieren. Der Nutzer kann jederzeit bei Überschreiten der eingestellten Grenzwerte per E-Mail/SMS mit der Position und dem Zeitstempel des Ereignisses benachrichtigt werden.

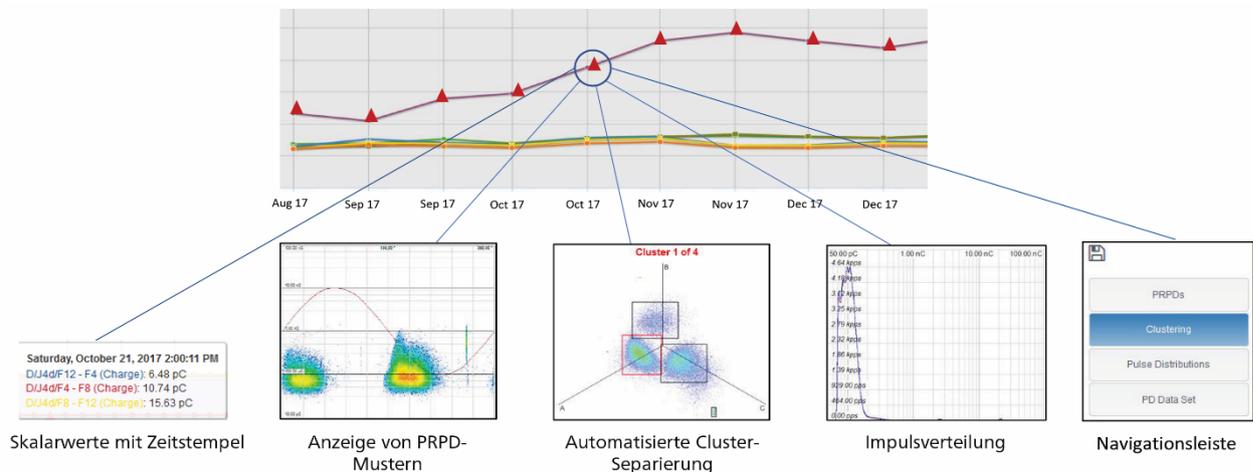


Abbildung 7. Visualisierung von skalaren Werten und Bildern, die für jeden Punkt in der historischen Trendkurve gespeichert wurden.

Werkzeuge für die automatische Auswertung der Daten

Für die automatische TE-Auswertung nutzt die Software spezifische Werkzeuge, mit denen die regelmäßige (z. B. einmal pro Tag) oder durch Ereignisse und/oder den Nutzer ausgelöste Separierung von PRPD-Clustern aus unterschiedlichen TE-Signalquellen möglich ist.

Die Erzeugung der 3PARD-Diagramme erfolgt auf Basis der synchronen Datenerfassung. Dieses Diagramm visualisiert die Beziehung zwischen den Amplituden eines TE-Impulses in einer Phase und den durch überkoppeln dieses Impulses entstandenen Signalen in den beiden anderen Phasen [10]. Durch das Wiederholen dieses Verfahrens für eine große Anzahl von TE-Impulsen werden im 3PARD-Diagramm die im Prüfobjekt liegenden TE-Quellen und die externen Störungen durch unterschiedliche Konzentrationen von Punkten (Cluster) angezeigt und sind somit klar unterscheidbar (Abbildung 8). Die Cluster-Separierung wird regelmäßig durchgeführt oder wenn die Schwellenwerte eines Alarms/einer Warnung überschritten werden.

Bei TE-Signalen führt das Erfassungsgerät eine hochentwickelte Vorbearbeitung der Rohdaten durch. Störungen werden beseitigt, die wesentlichen Eigenschaften der TE-Signale bestimmt und an den Computer übermittelt, mit dem die Daten langfristig gespeichert werden können.

Die Datenerfassung wird an allen Kanälen eines Erfassungsgeräts und an allen Erfassungsgeräten des Monitoring-Systems synchron durchgeführt. Die Synchronizität unter mehreren Erfassungsgeräten ist durch ihre Verbindung über Lichtwellenleiter (LWL) möglich, die parallel zum Hochspannungskabel verlegt sind. Um einen Datenverlust aufgrund von LWL-Unterbrechungen zu vermeiden, ist die Verbindung ringförmig ausgeführt und startet bzw. endet am zentralen Computer. Während des Normalbetriebs werden die Daten über einen einzelnen Pfad übermittelt und bei einer LWL-Unterbrechung (deren Position durch das Monitoring-System angezeigt wird) werden die Daten über zwei Pfade übermittelt.

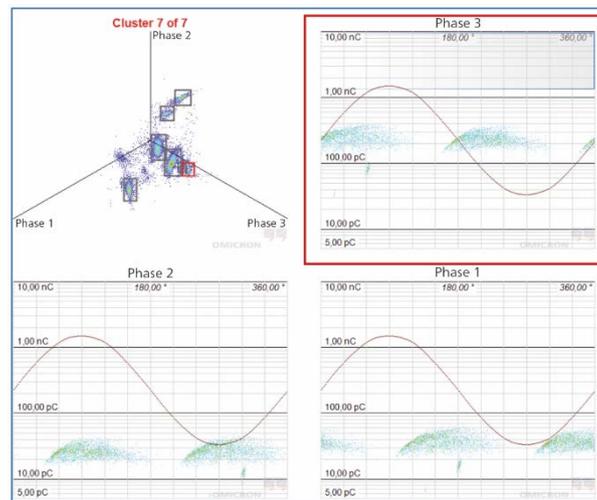


Abbildung 8. Beispiel für eine Cluster-Separierung mit 3PARD

Lokalisierung von Teilentladungsquellen

Unten wird das Verfahren mit zwei Erfassungseinheiten beschrieben, dabei wird keine Reflexion betrachtet. Das Signal breitet sich in beide Richtungen auf dem Kabel aus und wird von den Einheiten neben der Quelle direkt erfasst. Die Funktion wird durch die synchrone Datenerfassung unter allen Erfassungsgeräten ermöglicht. Während des Kabelbetriebs werden die Erfassungsgeräte neben der zu untersuchenden Signalquelle als Trigger- und Korrelationseinheit verwendet. Der Abstand von der Triggerquelle zum Ort der Signalquelle wird automatisch berechnet und in der Diagnosesoftware angezeigt (Abbildung 9).

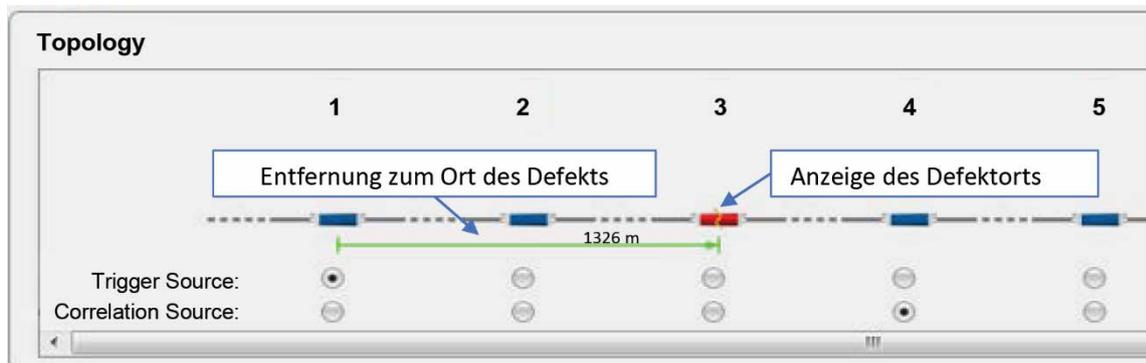


Abbildung 9. Funktion für die TE-Lokalisierung des Monitoring-Systems

Prüfung nach der Installation

HS-Prüfungen werden vor Ort für alle extrudierten HS-Kabel durchgeführt. Normalerweise müssen die Prüfverfahren zwischen dem Hersteller und dem Nutzer gemäß internationalen und nationalen Normen abgestimmt werden.

Dielektrische Prüfungen vor Ort ersetzen keine Stückprüfungen und Bauartprüfungen. Sie ergänzen dielektrische Stückprüfungen und sollen die dielektrische Integrität der vollständig montierten Kabelstrecke prüfen, um beispielsweise den Transport, die Lage bzw. Anordnung oder durch eine fehlerhafte Montage des Zubehörs verursachte mögliche Defekte erkennen zu können. Durch die Installation vor Ort können Fehler entstehen. Sie birgt somit ein Restrisiko, da die Bedingungen vor Ort für eine Installation von HöS-Zubehör nicht ideal sind. Kleine Partikel, Staub, Feuchtigkeit oder Wassertropfen können zu Defekten an elektrisch kritischen Stellen des Zubehörs führen und die Nutzungsdauer des Kabelsystems reduzieren oder einen Ausfall verursachen. Deshalb ist es wichtig, den Defekt zu erkennen, zu lokalisieren und zu identifizieren. Defekte erzeugen Teilentladungen, wenn das lokale elektrische Feld am Defekt den TE-Einsetzpegel überschreitet.

Für Werksprüfungen wird AC-Spannung mit Netzfrequenz Frequenz bevorzugt, weil sie für Laborprüfungen im Bereich zwischen 45 und 65 Hz genormt ist. Für die Vor-Ort-Prüfung ist eine Frequenztoleranz zwischen 20 und 300 Hz akzeptabel. Eine Resonanzdrossel mit fester Induktivität und Erregung durch frequenzvariable Spannung wird typischerweise zum Anlegen der AC-Prüfspannung verwendet (Abbildung 10).



Abbildung 10. Anordnung für die Resonanzprüfung eines Kabelsystems

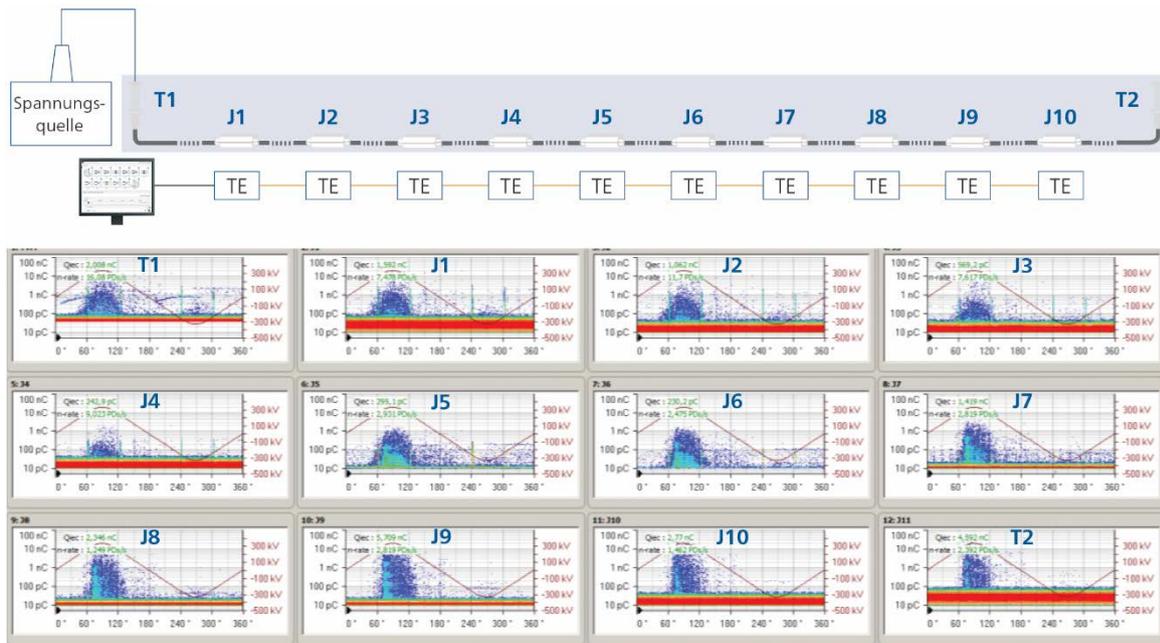


Abbildung 11. Beispiel für TE-Messungen nach der Installation des gesamten Zubehörs eines Kabelsystems

Wenn eine HS-Prüfung mit AC-Spannung vor Ort in Kombination mit TE-Messungen durchgeführt werden kann, ist es möglich, alle Erfahrungen aus der Stückprüfung im Werk auf die Vor-Ort-Prüfung zu übertragen. Da Hochspannungskabel bereits vor dem Transport an den Installationsort im Herstellerwerk geprüft werden müssen, konzentrieren sich die TE-Messungen vor Ort auf die im Feld montierten Garnituren.

Die Teilentladungsmessung erfolgt an allen Garnituren gleichzeitig. Um die Darstellung von PRPD Diagrammen zu ermöglichen ist das TE-Monitoring-System mit der Prüfspannungsquelle synchronisiert.

Monitoring von VPE-Kabeln im Tunnel – Fallstudie

Die 230-kV-VPE-Leitung ist 6 km lang und der erste Abschnitt des Kabels wird in einem unterirdischen Tunnel verlegt. Der zweite Abschnitt des Kabels ist erdverlegt. An der Leitung gibt es sechs Muffengruppen. Jede 3. Muffengruppe ist geerdet. Die anderen Muffen sind ausgekreuzt. Es bestand die Notwendigkeit, den Zustand der Isolierung von zwei aufeinanderfolgenden Cross-Bonding-Muffen im Tunnel zu überwachen. Es wurden sechs HFCT-Sensoren an den Auskreuzungen installiert und für die Erfassung der Teilentladungen direkt an den überwachten Muffen eingesetzt. Das TE-Erfassungssystem besteht aus zwei modularen und hochpräzisen dreikanaligen Erfassungsgeräten (pro Muffe). Die Messungen werden an allen sechs Messpunkten synchron durchgeführt. Die Synchronisation der Erfassungsgeräte erfolgt über Lichtwellenleiter innerhalb von 2 bis 5 ns. Im Tunnel gibt es ein Stromversorgungsgerät für die Erfassungsgeräte. Es werden damit keine zusätzlichen Geräte (z. B. induktive Stromversorgung) benötigt. Die Überwachungsdaten von zwei Erfassungsgeräten werden über Lichtwellenleiter an einen Server in einer Leitwarte in der Anlage am Ende des Kabels übermittelt.

Die Leistungsfähigkeit des Systems wurde überprüft, indem Kalibrierimpulse von 100 pC direkt in die HFCT-Sensoren eingespeist wurden. Für den digitalen Filter des Erfassungsgeräts wurden eine Mittenfrequenz von 900 kHz und eine Bandbreite von 300 kHz eingestellt. Die Kalibrieimpulse wurden vom Hintergrundrauschen des Systems unterschieden.

Basierend auf den bisherigen Erfahrungen wurden die TE-Schwellenwerte für Warnungen und Alarmer berücksichtigt und auf 30 pC (Warnstufe) und 50 pC (Alarmstufe) eingestellt. Die TE-Werte sollten für eine vordefinierte Zeit (z. B. 15 s) über den Schwellenwerten bleiben, um eine Warnung oder einen Alarm auszulösen. Dieses Verfahren soll falschpositive Warnungen/Alarmer vermeiden, die während des Betriebs aufgrund von Lastschwankungen, Schaltvorgängen, Umgebungsbedingungen usw. auftreten können.

Während des Monitorings wurde ein TE-ähnliches Signal an Phase L2 der Muffengruppe 2 beobachtet. Die synchron erfassten PRPD-Muster an dieser Muffengruppe sind in Abbildung 12 dargestellt. Eine gegenseitige Beeinflussung an den Phasen L1 und L3 wurde ebenfalls beobachtet. Dasselbe TE-ähnliche Signal wurde auch an den anderen überwachten Muffengruppen mit reduzierter Amplitude aufgezeichnet. Die Quelle des Signals wurde mit einer zusätzlichen Messung erfasst. Die TE-Quelle wurde im Transformator gefunden, der ungefähr 1,8 km von der Muffengruppe 2 an der Leitung angeschlossen ist.

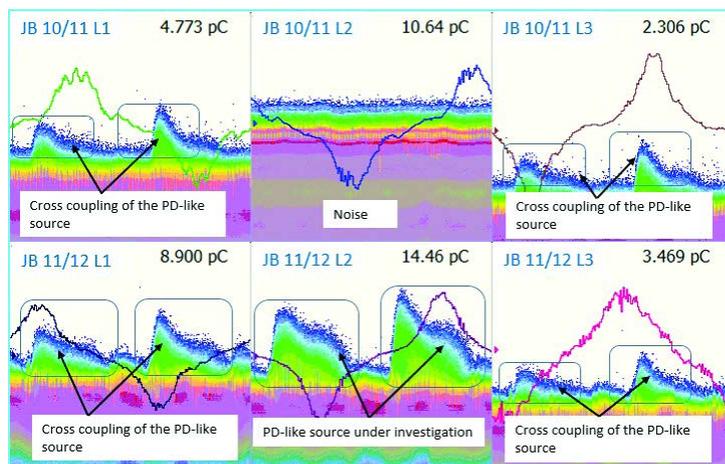


Abbildung 12. Synchron erfasste PRPD-Muster an Muffengruppe 2

Fazit

Der Anbieter des (TE-)Monitoringsystems unterstützte den Eigentümer in allen Phasen des Monitoring-Projekts, von der Planung des Systems bis hin zur Instandhaltung des in Betrieb genommenen Monitoring-Systems.

Das moderne TE-Monitoring-System für HS-Kabel bot dem Anlagenbetreiber die folgenden Funktionen:

- > Automatische Separierung der TE-Quellen und Rauschunterdrückung. Synchrone mehrkanalige Auswertungsverfahren erfüllten diese Anforderungen.
- > Lokalisierung von TE-Quellen entlang der gesamten Länge des HS-Kabels durch die erfolgreiche Anwendung der statistischen Dual-End-Zeitbereichsreflektometrie.
- > Überwachung weiterer kabelzustandsrelevanter Parameter, wie zum Beispiel Mantelstrom, Status der Mantelspannungsbegrenzer und Öl Druck an den Leitungsanschlüssen. Auf diese Weise können die Betriebskosten durch den Wegfall präventiver Instandhaltungsmaßnahmen (Überprüfung der Mantel- und Cross-Bonding-Funktionalität) weiter reduziert werden.
- > TE-Messungen des Kabelsystems während der dielektrischen Prüfungen nach der Installation. Gleichzeitige TE-Messungen an jedem Kabelzubehör während der Prüfung mit AC-Stehspannung haben Vorteile.

Darüber hinaus lieferte der Anbieter des Monitoring-Systems bewährte Lösungen und Expertise in den folgenden Bereichen:

- > Lösungen für die Stromversorgung des Monitoring-Systems. Für erdverlegte Kabelsysteme wurde ein Niederspannungspfad, für Stollenkabelsysteme eine induktive Stromversorgung empfohlen.
- > Positionierung der Sensoren und Installation von TE-Sensoren in den Anschlusskästen.

