

## Kombinierte Anwendung von Diagnoseverfahren für erdverlegte Mittelspannungskabel

**Tobias Neier**

Technischer Berater – Applikationsingenieur  
BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH  
t.neier@baur.at

**Martin Jenny**

Produktmanagement  
BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH  
m.jenny@baur.at

### ZUSAMMENFASSUNG

*In diesem Artikel werden die Vorteile der kombinierten Anwendung von Offline- und Online-Diagnoseverfahren für erdverlegte Mittelspannungskabel erläutert. Die Online-Messung von Teilentladungen (TE) ist ein nützliches Hilfsmittel zur Prüfung von Kabelstrecken auf Teilentladungsaktivitäten, ohne dass eine Abschaltung erforderlich ist. Die Vorteile und Herausforderungen der Online-TE-Diagnostik in Kombination mit den Vorteilen und Stärken der Offline-VLF-Verlustfaktor-(TD) und VLF-TE-Messung werden anhand praktischer Fallstudien illustriert. Die gemeinsame Anwendung hochentwickelter Diagnoseverfahren erlaubt den Anlageneigentümern die Ergreifung möglichst zeit- und kosteneffizienter Maßnahmen zur zustandsorientierten Instandhaltungsplanung.*

Schlagerworte: Online-TE, Offline-VLF-TD, VLF-TE, MWT

### 1. EINFÜHRUNG

Betreiber von erdverlegten Mittel- und Hochspannungskabelnetzen stehen immer häufiger vor der Herausforderung, die höchstmögliche Sicherheit der Spannungsversorgung bei gleichzeitiger Minimierung der Instandhaltungskosten zu gewährleisten.

Zur kosteneffizienten Verwaltung von Anlagen und Wartung von erdverlegten Mittel- und Hochspannungskabeln ist eine zustandsorientierte, vorbeugende Instandhaltung für moderner Energieversorgungsunternehmen entscheidend. Auf der Grundlage der Zustandsbewertung von erdverlegten Mittel- und Hochspannungskabeln können gealterte Kabel und sonstige Elemente in Abhängigkeit von ihrem Zustand vorrangig zur Wartung gereiht werden. Die Zustandsbewertung gewinnt auch für Inbetriebnahmeprüfungen neu verlegter Kabel zunehmend an Bedeutung. Die Kombination aus VLF-Prüfung und TE-Überwachung sowie -Ortung erlaubt die Erkennung von Schwachstellen bereits in der Inbetriebnahmephase.

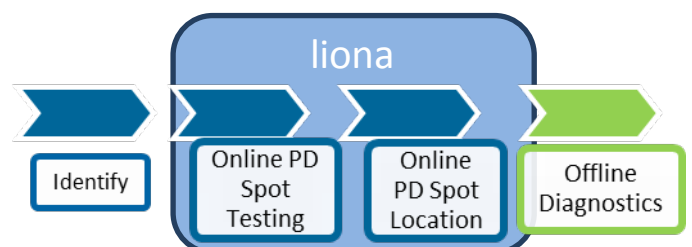
Dementsprechend können andernfalls erst langfristig auftretende Probleme schon zu Beginn vermieden werden.

Zur optimalen Nutzung der modernen Methoden zur Zustandsbewertung werden Diagnoseprüfungen durchgeführt, um einen Eindruck vom Kabelzustand zu gewinnen. Wie bei allen diagnostischen Untersuchungen kann nur durch die richtige Kombination der angewendeten

Technologien sichergestellt werden, dass alle Arten von Beschädigungen neuer und gealterter Kabel erkannt werden. Insbesondere alte verlegte Kabel, die aus verschiedenen Materialien bestehen können, weisen unter Umständen zahlreiche unterschiedliche Arten von Defekten in einem einzigen Kabel auf.

Es hat sich gezeigt, dass mit Hilfe kombinierter Diagnoseverfahren für erdverlegte Mittel- und Hochspannungskabel alle Alterungseffekte erfasst werden können. Unterschiedliche Diagnoseverfahren liefern aussagekräftige Ergebnisse, welche die Verbesserung des Kabelzustands bei geringstmöglichem Zeit- und Kostenaufwand erlauben. In den folgenden Abschnitten werden die zur kombinierten Diagnose angewendeten Technologien ausführlich erläutert.

Generell lassen sich für ein effizientes Vorgehen Online- und Offline-Diagnoseverfahren kombinieren, wenn Stromabschaltungen kritisch sind und gut begründet werden müssen.



### 2. ONLINE-TE-DIAGNOSE

Das tragbare Messgerät "liona" dient zur Online-TE-Messung und -Ortung, also während der Stromkreis in Betrieb ist. Mit "liona" können Mittel- und

Hochspannungskabel sowie Schaltanlagen rasch, kostengünstig und ohne den mit der Abschaltung der Kabelstrecke verbundenen Aufwand auf TE geprüft werden. Spezielle Hochfrequenz-Stromsensoren (HFCT – Hochfrequenz-Stromwandler) dienen zur Durchführung von Messungen an einem spannungsführenden Energiekabel. Die Sensoren erlauben das Messen des TE-Signals an der Kabelabschirmung im Umspannwerk sowie in den Verteilerschranken von Übertragungskreisen (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2).

Zur Erfassung aussagekräftiger Informationen trotz aktivem Netzbetrieb muss die Gerätesoftware in der Lage sein, zwischen Interferenzsignalen und den TE-Aktivitäten zu differenzieren. Eines der leistungsfähigsten Hilfsmittel zur Unterscheidung zwischen Störsignalen und TE-Aktivitäten ist der von IPEC Ltd. [1] entwickelte Algorithmus DeCiFer®, der das Herzstück der Software bildet. Dieser Algorithmus ist das Ergebnis der langjährigen Forschung und Erfahrung von IPEC. Er dient zur automatischen Ausfilterung von TE-Aktivitäten aus den Interferenzsignalen (Abbildung 4). Störsignale sind die Hauptschwierigkeiten, die bei der Online-Diagnose bewältigt werden müssen.

“Iona” stellt das Ergebnis des vollautomatischen Messvorgangs in einer Grafik dar, die Informationen über den Pegel und die Art der TE bietet. Die Ortung der TE-Aktivitäten kann präzise über einen an der Gegenstation des Kabels angebrachten Transponder erfolgen (siehe Abbildung 1). Zu diesem Zweck wird der Impulsgenerator (Transponder) über einen HFCT-Sensor an der Kabelstrecke mit dem anderen Ende der Kabelstrecke verbunden.



Abbildung 1 Ausrüstung für den Online-TE-Schnelltest

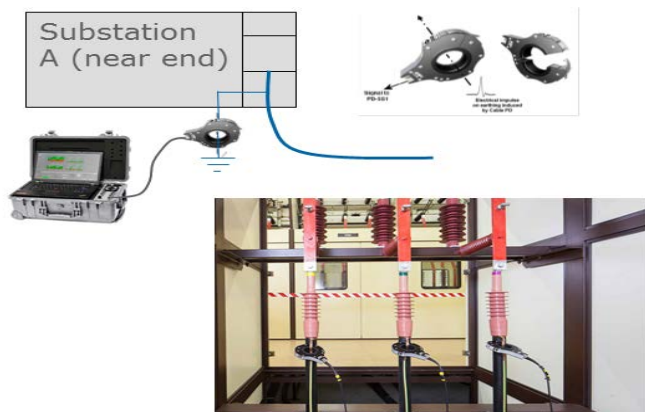


Abbildung 2 Anschluss für Online-TE-Messung

Durch die einfache Herstellung der Verbindung schließt "Iona" die Messung binnen Minuten und ohne mühsame Umschaltvorgänge ab.

Werden im Zuge der Online-Messung innerhalb der Kabelstrecke TE festgestellt, sollte eine ausführlichere Offline-Kabeldiagnose mit Verlustfaktor- und TE-Messung durchgeführt werden. Die TE-Erkennung mittels Online-Messung kann nur Informationen über eine bestimmte Verschlechterungseigenschaft (TE) im Betriebszustand liefern. Dementsprechend kann die Online-Diagnose keine umfassende Offline-Diagnose, bei der der Spannungspegel angepasst werden kann, ersetzen. Die Online-Diagnose kann jedoch als wichtige Argumentationsgrundlage zur Rechtfertigung einer Stromabschaltung dienen.

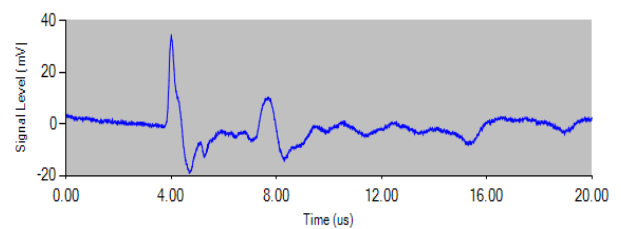


Abbildung 3 Online-TE-Messung - einzelner TE-Impuls

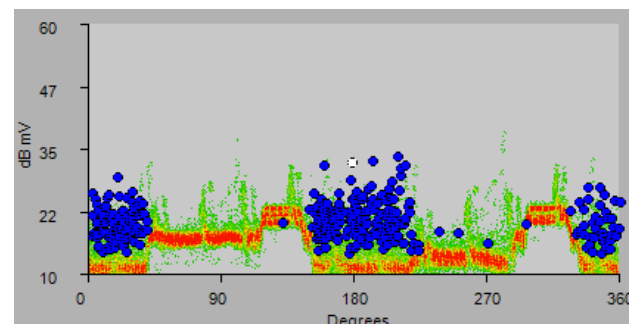


Abbildung 4 Online-TE-Ortung Kabel #1, Anzeige einer TE bei  $1,0 \times U_o$  – online

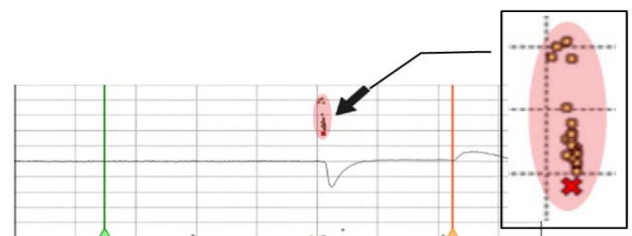


Abbildung 5 Online-TE-Ortung Kabel #1, Ortung der TE-Quelle bei 350 m nur in L1

Die obigen Ergebnisse des Online-TE-Schnelltests und der Online-TE-Ortung für Kabel #1 basieren auf einem bestimmten Beispiel, bei dem eine TE-Aktivität in einer Phase gemessen werden konnte. Die eindeutige Erkennung und Identifikation der TE im Rauschbild mit Hilfe des DeCiFer®-Algorithmus (Abbildung 4) bestätigt das Vorhandensein von TE-Aktivitäten im Betriebszustand

( $1,0 \times U_o$  – Betriebsspannung). Die Online-TE-Ortung weist auf TE-Aktivitäten an einer einzelnen Stelle bei 350 m hin (siehe Abbildung 5).

- Stark zunehmende TD-Werte innerhalb jedes Spannungspegels sind ein Zeichen für Kriechverhalten in einer Muffe [5]

### 3. OFFLINE-DIAGNOSE

#### 3.1. Verlustfaktormessung

Die Messung von VLF-Verlustfaktor, Differenzial-Verlustfaktor, Verlustfaktorstabilität, Kriechstrom und der Oberschwingungen des Verluststroms kann zur Überwachung der Alterung und Verschlechterung von Kabelsystemen dienen. Messungen von Verlustfaktor (VLF-TD), Differenzial-Verlustfaktor (VLF- $\Delta$ TDt) und Verlustfaktorstabilität (VLF-SDTD) sind jedoch die gängigsten Verfahren in diesem Bereich [2].

Der Verlustfaktor ist eine Maßeinheit für den tatsächlichen Energieverlust in einem Dielektrikum. Eine ausführliche Definition enthält IEEE 400.2-2013 [2].

Bei erdverlegten Kabeln wird mit dieser Methode der Gesamtverlust gemessen, nicht jedoch die einzelnen Verluste infolge eines bestimmten Defekts. Bei der Verlustfaktormessung handelt es sich also um ein Verfahren zur Kabeldiagnose, bei dem die allgemeine Unversehrtheit der Isolierung des Kabelsystems geprüft wird. Die Verlustfaktormessung ist auf alle Kabeltypen anwendbar; bei der Auswertung der Prüfergebnisse sind jedoch das jeweilige Isolationsmaterial und die Art der Muffe und der Kabelendverschlüsse zu berücksichtigen [3]. Anhand der Instandhaltungs-VLF-Prüfung gemäß IEEE 400.2 kann sichergestellt werden, dass keine versteckten Schwachstellen existieren.

Sehr häufig wirkt sich das Eindringen von Wasser in Muffen in hohem Maße auf den Verlustfaktor aus. Grundsätzlich zeigen die TD-Stabilität und der TD-Stabilitätstrend klar, ob Alterserscheinungen auf das Eindringen von Wasser in Muffen, auf water-trees oder auf Kriechverhalten in Muffen zurückzuführen sind. Ein Anwendungsleitfaden des Herstellers[4] enthält Informationen zu möglichen Deutungen des TD-Stabilitätswerts.

Muffen, in die Wasser eingetreten ist, können bei der Messung folgende Eigenschaften aufweisen:

- Stark schwankende Werte innerhalb jedes Spannungspegels deuten auf das Eindringen großer Wassermengen in Muffen hin
- Abnehmende Werte innerhalb jedes Spannungspegels weisen auf eine geringe Feuchtigkeitsmenge entweder in einer Muffe oder im Endverschluss hin; die Feuchtigkeit verdampft durch die angelegte Spannung

Abbildung 6 zeigt die VLF-TD-Messkurve von Kabel #1. Aus den TD-Werten lässt sich entnehmen, dass das betreffende Kabel unversehrt ist und keine Hinweise auf water-tree-AAlterung oder das Eindringen von Wasser in Muffen vorliegen. Mittels VLF-TD-Messung können grundsätzlich nur sehr intensive TE-Aktivitäten erkannt werden. Geringfügige TE-Aktivitäten wirken sich nicht wesentlich auf die Verluste des Kabels aus.



Abbildung 6 TD-Ergebnis Kabel #1, VPE-Kabel, Kabel unversehrt, TE an Muffe

#### 3.2. TE-Messung

Die genaue Ortung geschwächter Kabelabschnitte oder Muffen ist einfach möglich, wenn die TE-Aktivität gemessen werden kann [5].

Nach der Online-Messung wurde der Stromkreis zur umfassenden Offline-Diagnose abgeschaltet. Abbildung 7 zeigt das Offline-TE-Ortungsdiagramm, aus dem sich ablesen lässt, dass nur L1 des dreiphasigen Kabels bei einer Betriebsspannung von  $1,0 \times U_o$  an der Position 350 m TE-Aktivitäten aufweist.

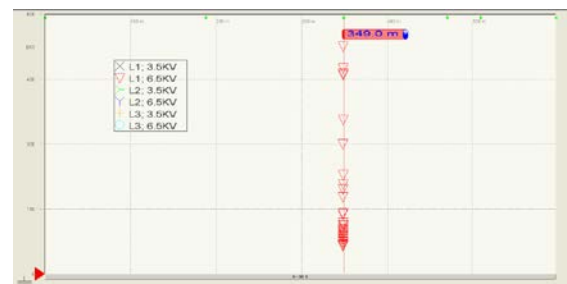


Abbildung 7 Offline-TE-Ortung Kabel #1, VLF-TE bestätigt TE bei  $1,0 \times U_o$  bei 350 m nur in L1



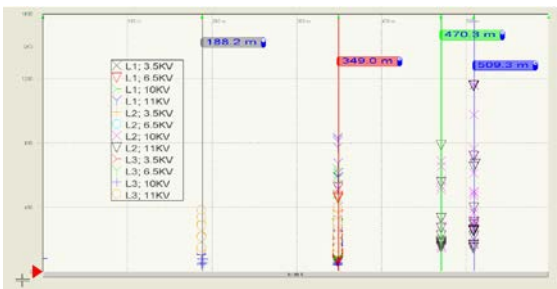


Abbildung 8 Offline-TE-Ergebnis Kabel #1, bis zu 1,7 x U<sub>0</sub>, VPE-Kabel, TE in vier Muffen

Zur Offline-VLF-TE-Diagnose werden im Allgemeinen die Spannungspegel bis 1,7 x U<sub>0</sub> gescannt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass in Kabel #1 insgesamt vier Muffen mit TE-Aktivitäten erkannt wurden, die sich bei Spannungspegeln oberhalb der Betriebsspannung zeigen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Offline-VLF-TE-Diagnose eindeutig Schwachstellen aufzeigen kann, die im Rahmen der Online-Messung bei 1,0 x U<sub>0</sub> nicht ermittelt werden können.

Die Muffe bei 350 m wurde ausgetauscht, und bei der Zerlegung zeigte sich die Kriechspur der TE-Aktivität.



Abbildung 9 Zerlegung der Muffe von Kabel #1, L1 bei 350 m, TE-Kriechspur

Die Diagnose von PILC-Kabeln oder gemischten Kabeln (Mischung aus VPE- und PILC-Kabelabschnitten) kann sich schwieriger gestalten. Gealterte PILC-Kabel weisen wahrscheinlich TE-Aktivitäten auf. Abbildung 10 zeigt das Ergebnis der Offline-VLF-TE-Diagnose, das auf TE-Aktivitäten in den PILC-Kabelabschnitten hindeutet, wobei die TE-Aktivitäten in allen drei Adern vergleichbar sind.

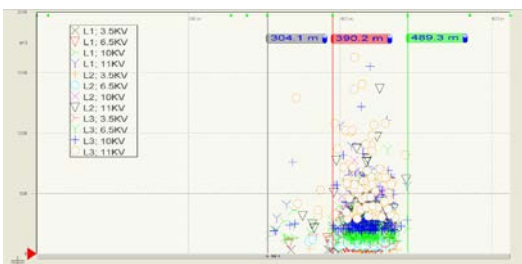


Abbildung 10 TE-Ergebnis Kabel #2, PILC-/VPE-Kabel, TE-Aktivität im PILC-Kabelabschnitt

Aus dem VLF-Verludtfaktor-Ergebnis von Kabel #2 lässt sich entnehmen, dass zusätzlich zu dem gealterten PILC-Kabelabschnitt, der intensive TE-Aktivitäten aufweist, auch weitere Hinweise auf Alterserscheinungen vorliegen. Die eingehende Analyse von SDTD und SDTD-Trendverhalten erlaubt zudem die Erkennung von water-tree-Alterungseffekten in VPE-Kabelabschnitten (siehe Abbildung 11). Water-trees können bekanntlich nicht anhand von TE-Messungen ermittelt werden.

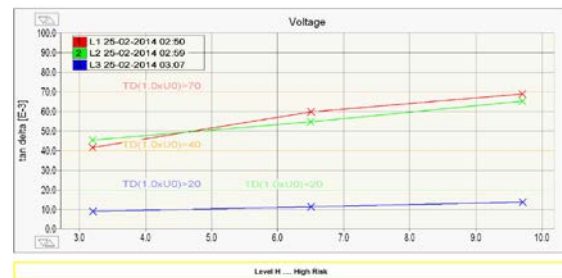


Abbildung 11 TD-Ergebnis Kabel #2, PILC/VPE-Kabel, Kabel mit hohem Betriebsrisiko, geschwächter PILC-Abschnitt, water-tree-Alterung im XLPE-Kabelabschnitt

Für Kabel #2 war die Anwendung des kombinierten Diagnoseverfahrens von entscheidender Bedeutung, um einen korrekten Eindruck vom Alterungszustand des Kabels zu gewinnen.

### 3.3. Monitored Withstand Test

Ein neues Diagnoseverfahren ist der Monitored Withstand Test (MWT), der die bestehenden Verfahren der VLF-Spannungsprüfung und der VLF-Verlustfaktormessung in sich vereint. Der MWT wurde bereits in die neuen Normen IEEE 400-2012 [6] sowie IEEE 400.2-2013 [2] aufgenommen. Der praktische Leitfaden der IEEE empfiehlt den VLF-Sinus-MWT mit Verlustfaktormessung ausdrücklich als einziges "nützliches" Verfahren zur Messung gealterter Verteilerkabelsysteme.

Der VLF-MWT kombiniert die Hochlaufphase (ramp up), die der VLF-TD-Diagnose entspricht, mit der Haltephase, die zur TD-Überwachung im Zeitverlauf (VLF-ΔTDt) während des VLF-Prüfzeitraums dient.

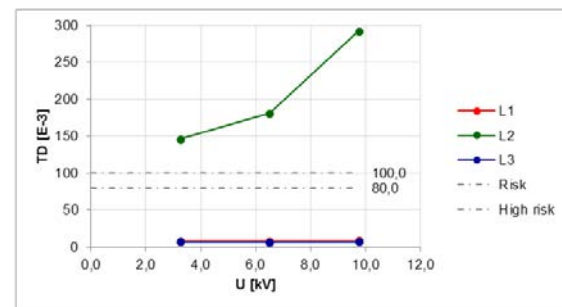


Abbildung 12 TD-Messung, dreiadriges Kabel #3: L2 zeigt hohe TD-Werte und hohe Standardabweichung

Abbildung 12 und Tabelle 1 zeigen die Hochlaufphase des an Kabel #3 durchgeführten MWT. L2 weist einen starken TD-Anstieg mit sehr hohen SDTD-Werten auf. SDTD ist ein sehr nützliches Verfahren zur Ermittlung von Eindringen von Wasser in Muffen.

SDTD	0,5 U <sub>0</sub> (kV)	U <sub>0</sub> (kV)	1,5 U <sub>0</sub> (kV)
	3,5	6,5	10
L1	0,068	0,036	0,060
L2	4,453	2,313	9,343
L3	0,063	0,004	0,050

Tabelle 1 Standardabweichung von drei Adern bei unterschiedlichen Spannungspegeln

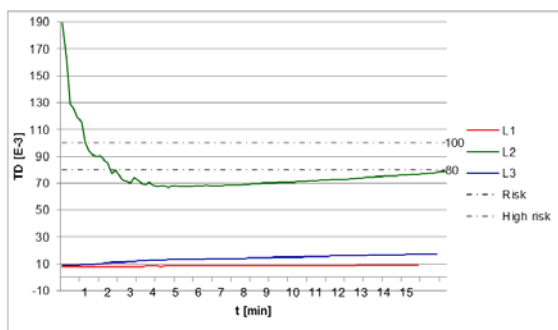


Abbildung 13 Die MWT-Kurve zeigt das Trocknungsverhalten von L2 im Zeitverlauf, was auf das Eindringen von Wasser in eine Muffe hindeutet

Das Verhalten des Verlustfaktors während des MWT (siehe Abbildung 13) über einen Zeitraum von 15 Minuten illustriert den Trocknungsvorgang einer der verdächtigen Muffen und zeigt eine wesentliche Abnahme des TD-Werts. Dieses Verhalten bestätigt die Annahme, dass Wasser in eine der Muffen eingedrungen ist. Entsprechende Abhilfemaßnahmen können ergriffen werden [7]. Weitere Informationen zur Erkennung von durch Wassereintritt beschädigten Muffen enthält die Publikation [5].

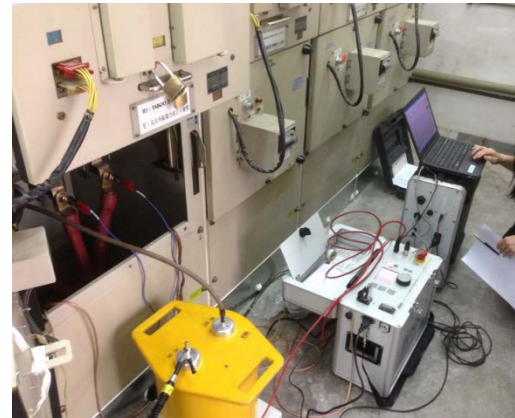


Abbildung 14 VLF-TD-TE-MWT, frida – Aufbau zur Offline-VLF-Diagnose

#### 4. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Kombination aus geeigneten Diagnoseverfahren erlaubt die umfassende Beurteilung des Zustands von erdverlegten Mittel- und Hochspannungskabelnetzen. Durch Online-TE-Schnelltest und Online-TE-Ortungen wird die Erkennung nennenswerter TE-Aktivitäten ohne Abschaltung des Netzes ermöglicht. Aufgrund der Betriebsspannung können nur TE-Quellen mit einer Einsetzspannung, die der Betriebsspannung entspricht oder niedriger ist als diese, erkannt werden.

Zur umfassenden Analyse des Zustands eines erdverlegten Mittel- oder Hochspannungskabels muss eine Offline-Diagnose durchgeführt werden. Die Kombination aus VLF-Verlustfaktor- und VLF-TE-Diagnose erlaubt eine detaillierte Einschätzung des Kabelzustands. Mittels Offline-VLF-TE-Messung können Schwachstellen entlang des Kabels ermittelt werden, auch wenn die TE-Einsetzspannung über der Betriebsspannung liegt. So lassen sich Schwachstellen frühzeitig erkennen. Die Kombination mit der VLF-Verlustfaktormessung ermöglicht zudem die Erkennung der water-tree-Alterung bei VPE-Kabeln sowie der Effekte des Eindringens von Wasser in Muffen. Ein Monitored Withstand Test erlaubt die Bestätigung von Annahmen hinsichtlich der Ursache von Verschlechterungen, damit geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.



Kombination aus Verfahren zur Online- und Offline-Diagnose

## 5. LITERATURVERWEISE

- [1] IPEC, "IPEC Ltd.", 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ipec.co.uk/>.
- [2] IEEE400.2, "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)", IEEE Standards Association, New York, USA, 2013.
- [3] T. Neier, "Technique used for Combined Diagnostic Method Dissipation Factor Measurement TanDelta", CableTech 2013, Bengaluru, Indien, 2013.
- [4] BAUR, "TD Diagnostic Guidelines", Version 4, Österreich, 03/2013.
- [5] Jenny, Gerstner, Neier, "Identification of joints affected by water ingress in complex hybrid MV cable networks", CMD, Bali, Indonesien, 2012.
- [6] IEEE400-2012, "Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5kV and Above", New York, USA, 2012.
- [7] Gerstner, Jenny, "Prüfung und Diagnose von Mittelspannungskabeln mit VLF-Spannungsquelle (sinus 0.1Hz)", HV Symposium, Stuttgart, 2014.

## 6. VERFASSER



**Tobias Neier** wurde 1981 in Österreich geboren und studierte Elektrotechnik in Österreich. Er ist seit 2002 für die BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH tätig und hat Seminare in technischen Einrichtungen und bei Energieversorgern geleitet sowie weltweit als Referent an Konferenzen zum Thema Technologie für Kabelprüfung und -diagnose sowie Kabelfehlerortung teilgenommen. Er kann auf praktische Erfahrungen in den Bereichen Benutzerschulung, Feldversuche und Strategieentwicklung in mehr als 30 Ländern in Europa, Nordafrika, dem Nahen Osten und der Region Asien-Pazifik verweisen.



**Martin Jenny** wurde 1972 in Österreich geboren und ist als Produktmanager in der Kabelprüfung und -diagnose tätig. Seit mehr als vier Jahren leitet er das Produktmanagement für das Kabelprüfungs- und Diagnoseproduktportfolio von BAUR. Die tragbaren VLF-Prüfgeräte von BAUR sind eine der Innovationen, deren Entwicklung Martin Jenny in den vergangenen Jahren maßgeblich geprägt hat. Er blickt auf über zehn Jahre Erfahrung im Bereich Prüfen und Messen in unterschiedlichen Branchen zurück.