

VLF Sinus 0,1 Hz – Universalspannungsquelle für Prüfung und Diagnose von Mittelspannungskabeln

A. Gerstner, M. Jenny; BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH, Sulz (Österreich)

1. Einleitung

Immer mehr Betreiber von Mittelspannungsnetzen stehen vor der Problematik, hohe Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit bei möglichst geringen Kosten sicherstellen zu müssen. Für die kostenoptimale Bewirtschaftung, den Netzausbau und die Instandhaltung bietet die Bewertung des Zustands des Netzes wertvolle Informationen. Anhand der Zustandsdaten lassen sich zum Beispiel stark gealterte Kabelstrecken identifizieren und bei der Instandhaltung priorisieren. Aber auch bei neueren Kabelstrecken liefert die Kabeldiagnose Hinweise auf versteckte Mängel, zum Beispiel unsachgemäß durchgeführte Muffenmontagen, Wassereinbrüche und vieles mehr.

Um von den Möglichkeiten der Zustandsbewertung Gebrauch zu machen, sind Messungen der Kabelstrecken unerlässlich. Netzbetreiber, die neben Einschaltprüfungen auch diagnostische Messungen (siehe Abschnitt 2. Diagnoseverfahren) durchführen möchten, stehen somit vor der Frage, wie sie mit möglichst geringem Zeit- und Kostenaufwand zu sinnvollen Diagnoseergebnissen gelangen. Zudem streben sie eine möglichst hohe Aussagekraft der Messergebnisse an.

Unter anderem hängt die Aussagekraft der Messergebnisse von der Spannungsquelle des Prüf- und Messgeräts ab. Auf dem Markt sind diverse Quellen verfügbar, unter anderem 50-Hz-Resonanzanlagen, VLF Sinus 0,1 Hz (VLF = Very Low Frequency), DAC (DAC = Damped AC / gedämpfte Wechselspannung) und VLF Cos-Rect (Cosinus Rechteck)

In der Wissenschaft ist die Güte der jeweiligen Spannungsquellen – genauer: die Qualität der mit ihnen erzielbaren Messergebnisse – bereits vielfach Thema für Untersuchungen gewesen und auch Praktiker diskutieren über die Relevanz der Spannungsquelle für die Arbeiten im Feld. In diesem Paper werden die Ergebnisse einiger Untersuchungen interpretiert. Darüber

hinaus wird dargestellt, welche Methoden bzw. Kombinationen von Methoden in der Praxis sinnvoll sind.

Außerdem wird dargestellt, welche Auswirkung die Wahl der Spannungsquelle und der mit ihr möglichen Prüf- und Messmethoden auf den Praxisalltag hat, welche Kostenfaktoren bei der Entscheidung für eine Messtechnik zu beachten sind und wie sich alltagsrelevante Kriterien auf die Praxis auswirken.

2. Diagnoseverfahren

Während die Stehspannungsprüfung im Grunde nur ein „o.k.“ oder „nicht o.k.“ zum Ergebnis hat, liefert eine Kabeldiagnose Informationen über den Kabelzustand bzw. das Alterungsverhalten. Als besonders aussagekräftige Kabeldiagnoseverfahren haben sich die Verlustfaktormessung (auch tan delta Messung) und die Teilentladungsmessung (TE-Messung) erwiesen.

Die Verlustfaktormessung (tan delta)

Die Verlustfaktormessung ist ein zerstörungsfreies und integrales Verfahren, dient also der Bewertung der gesamten gemessenen Kabelstrecke. Sie ist bei kunststoffisolierten Kabeln, Papiermasse-Kabeln sowie bei gemischt bestückten Strecken anwendbar. Voraussetzung für die Interpretation der Messergebnisse ist, dass der Aufbau der Kabelstrecke bekannt ist. Die Verlustfaktormessung besteht typischerweise aus mehreren Messzyklen: In der Regel werden zwischen 6 und 10 Messungen bei $0,5 \times U_0$, $1,0 \times U_0$, $1,5 \times U_0$ und $2 \times U_0$ durchgeführt. Aus der Verlustfaktormessung lassen sich folgende Informationen ableiten:

- Der tan-delta-Mittelwert (MTD) der Messungen bei den einzelnen Spannungsstufen liefert Hinweise auf Water-Trees, also durch Wasser geschädigten Stellen in der Isolierung von kunststoffisolierten Kabeln. (Diese Water Trees können zu Electrical-Trees werden, an denen Teilentladungen und Durch-

schläge auftreten.) Zugleich gibt der Mittelwert Auskunft über das thermische oder chemische Alterungsverhalten der Kabelstrecke.

- Die tan-delta-Standardabweichung (STD) der Messungen bei den einzelnen Spannungsstufen kann genutzt werden, um Indizien auf Teilentladungen (TE) zu sammeln oder zum Beispiel feuchte Muffen zu erkennen.
- Die Differenz des Mittelwertes (DTD) bei den verschiedenen Spannungsstufen ist hilfreich, um Water Trees, Teilentladungen und Vaporisationseffekte (z.B. an Endverschlüssen) zu erkennen.
- Weiterhin lässt sich mit der Verlustfaktormessung eine unzureichende Isolierung von Papiermasssekabeln aufgrund von eingedrunenem Wasser aufspüren.

Die Aussagekraft der tan-delta-Messung ist von der Messgenauigkeit und Auflösung abhängig. Um zum Beispiel den Anstieg des Verlustfaktors bei der Messung an einem kunststoffisolierten Kabel, zu erkennen, ist eine Messgenauigkeit von etwa $1 \cdot 10^{-4}$ erforderlich (siehe Abb. 1).

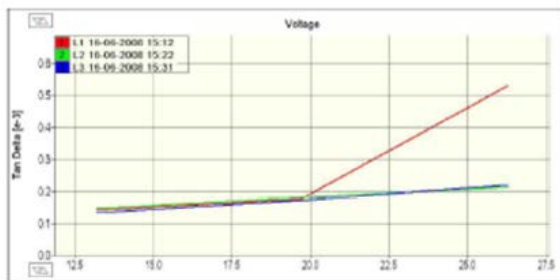


Abb. 1: Der Anstieg des Verlustfaktors der Phase 1 von $0,2 \cdot 10^{-3}$ bei $1,5 \times U_0$ auf $0,5 \cdot 10^{-3}$ bei $2 \times U_0$ liefert Hinweise auf einen „verdeckten“ Fehler. Eine anschließende TE-Messung wies auf einen fehlerhaft montierten Endverschluss hin.

Die Teilentladungsmessung (TE)

Die Teilentladungsmessung ist ein zerstörungsfreies Verfahren, bei dem die Messwerte einem bestimmten Ort auf der Kabelstrecke zugeordnet werden können. Anhand der Einsetzspannung (der Spannung, bei der die Teilentladungen erstmals auftreten) sowie der gemessenen TE-Pegel bei einer vorgegebenen Prüfspannung lassen sich beispielsweise diese Störungen entdecken:

- Nachhaltige Schädigungen des Kabelmantels aufgrund äußerer Einwirkung, etwa im Zuge von Erdarbeiten
- Defekte an neuen und alten Garnituren, beispielsweise fehlerhaft montierte Muffen oder Garnituren
- Die Isolierwirkung beeinträchtigende Defekte in der Isolierung kunststoffisolierter Kabel wie Electrical-Trees
- Eine unzureichende Papiermasse-Isolierung aufgrund Austrocknung oder Wassereinbruch

Im Sinne einer umfangreichen Kabeldiagnose ist es daher wünschenswert, neben einer Kabel- oder Mantelprüfung beide Diagnoseverfahren – Verlustfaktormessung und Teilentladungsmessung – vornehmen zu können.

3. Die Spannungsquellen – Anforderungen und Charakteristika

Um eine erfolgreiche zustandsorientierte Instandhaltung vornehmen zu können, müssen die Prüf- und Messgeräte somit einem Katalog von Anforderungen genügen. Die wesentlichen Anforderungen an die Spannungsquelle sind:

- Eignung für Kabelprüfung / Stehspannungsprüfung
- Hohe Messgenauigkeit bei der Verlustfaktormessung (s.o.)
- Aussagekräftige Ergebnisse bei der TE-Messung (Einsetz- und Aussetzspannung, TE-Pegel und phasenaufgelöstes TE-Pattern) und gute Lokalisation der TE
- Hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, um die Vergleichbarkeit zeitversetzter Messungen und verschiedener Kabelstrecken im Netz sicherzustellen
- Möglichkeit, verschiedene Methoden parallel durchzuführen und die Ergebnisse der Prüfung/Messung automatisch zu kombinieren, um Zeit zu sparen
- Geringes Gewicht, einfaches Handling, leichter Anschluss, einfache Bedienung, kurze Messdauer

Anforderung	VLF Sinus	VLF Cos-Rect	50-Hz-Resonanzanlagen	DAC
Stehspannungsprüfung nach IEC, VDE (CENELEC), IEEE	ja	ja	ja	ja, IEEE-Norm in Vorbereitung
Lastunabhängiges Prüfsignal	ja	Umschwingphase variiert im Bereich von 30-250 Hz lt. IEEE400.2 [8], Nachladephase variiert je nach Last	Prüffrequenz abhängig von der Kabellänge	Prüffrequenz abhängig von Kabellänge
tan delta Messgenauigkeit	hoch ($1 \cdot 10^{-4}$)	ungeeignet für tan delta	hoch	mittel
tan delta Sensitivität / -Vergleichbarkeit	hoch	ungeeignet für tan delta	mittel, Sensitivität kleiner als bei VLF	mittel, lastabhängig
TE-Lokalisierung möglich	ja	ja	ja	ja
TE Pegel und TE-Muster vergleichbar mit Messung bei 50 Hz	ja	noch nicht hinreichend untersucht	ja	ja
TE-Einsatzspannung vergleichbar mit Messung bei 50 Hz	ja	noch nicht hinreichend untersucht	ja	ja
kompakte Spannungsquelle	ja	ja	nein	ja

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Spannungsformen bezüglich verschiedener praxisrelevanter Anforderungen.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der verschiedenen Spannungsquellen bezüglich der vorher genannten Anforderungen. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die VLF 0,1 Hz Sinus Spannung als einzige Spannungsquelle alle gestellten Anforderungen erfüllt, also auch für die Messung von Teilentladungen und die Verlustfaktormessung (tan delta) geeignet ist. Bezüglich der Stehspannungsprüfung haben sich in Theorie und Praxis quasi alle marktüblichen Spannungsquellen als geeignet erwiesen.

Zu beachten ist jedoch, dass es hier auf die Spannungsform ankommt: Um zuverlässige, von der Last (Kabelstrecke) unabhängige Ergebnisse zu erhalten, ist eine ideale Sinuskurve von Vorteil. Dazu ist es notwendig, dass die Spannungsquelle möglichst immer die gleiche Signalform und Frequenz liefert, um Einflüsse z.B. auf die TE-Messung oder tan-delta-Messung zu vermeiden. Ziel ist es, den Einfluss der Spannungsquelle auf das Messergebnis zu minimieren. Dies erlaubt es dem Anwender, die Messergebnisse zu vergleichen und somit Entscheidungskriterien für die Zustandsbewertung von Kabelstrecken zu verfeinern. Hierfür ist besonders die VLF Sinus-Spannungsquelle geeignet.

Im Hinblick auf die Messung des Verlustfaktors hat sich gezeigt, dass eine VLF Sinus-Messung durch die hohe Präzision und Sensitivität selbst der 50-Hz-Messung überlegen ist. Bei der niedrigen Frequenz sind die tan-delta-Werte für PE-isolierte

Kabel höher – somit kann ein Anstieg des tan delta besser (sensitiver) erkannt werden. Es ist noch zu erwähnen, dass für eine präzise tan-delta-Messung nur sinusförmige Spannungsquellen geeignet sind. Und davon hat sich, wie oben bereits erwähnt, der 0,1 Hz Sinus soweit bewährt, dass Normen und Grenzwerte (IEEE 400.2-2013) für diese Messung verfügbar sind. Dies ist unter anderem der Tatsache zu verdanken, dass inzwischen ein breiter Erfahrungsschatz mit dem VLF Sinus vorhanden ist.

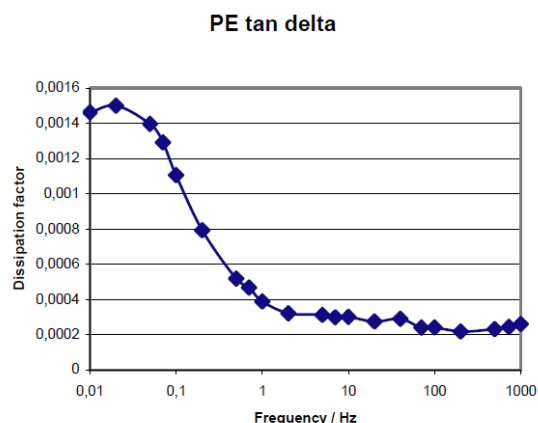


Abb. 2: Bei geringen Frequenzen wird ein höherer Wert des tan delta gemessen (Grafik-Quelle: [7])

In diversen wissenschaftlichen Publikationen war auch die Eignung verschiedener Spannungsquellen (VLF Sinus 0,1 Hz, 50 Hz, DAC, VLF Cos-Rect) für die Teilentladungsmessung bereits Thema. Untersucht wurde zum Beispiel das Verhalten ver-

schiedener Spannungsquellen bei folgenden Prüflingen:

- Künstlich erzeugte Fehler an Kabelstrecken und Endverschluss
- Verschmutzte Freiluft-Endverschlüsse, Defekt an äußerer Leitschicht / Deflektor
- In Betrieb befindliche Kabelstrecken
- Fehlerhaft montierte Muffen
- Betriebsgealterte kunststoffisolierte Kabel bzw. Muffen.

Je nach Publikation wurde das Verhalten von zwei oder mehr Spannungsquellen verglichen, insbesondere im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit solchen, die bei Betriebsfrequenz (50 bzw. 60 Hz) gemessen wurden. Zusammenfassend leitet sich aus den Publikationen folgendes Ergebnis ab (siehe auch [1] bis [6]):

Laut [6] ergab sich für eine VLF Cos-Rect-Spannungsquelle bei der Gegenüberstellung von Messungen mit $2 \times U_0$ an 6 betriebsgealterten Muffen der 5,5 fache TE-Pegel mit ca. 5.500 pC (gegenüber etwa 1.000 pC bei 50 Hz und VLF Sinus).

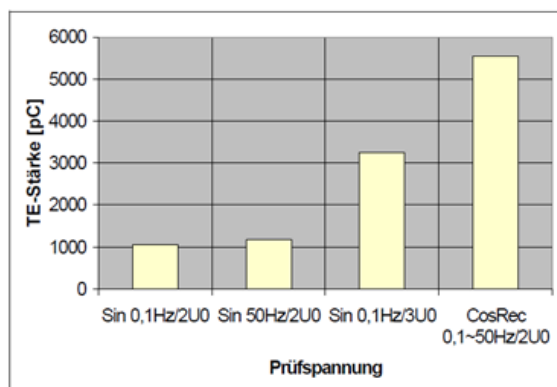


Abb. 3: TE-Stärken von sechs Muffen (Aufschiebetechnik); [6]

Diese höheren Messwerte bedeuten, dass eine Messung mit der Cos-Rect-Spannungsquelle eine größere Belastung für betriebsgealterte Muffen darstellt. Für die schonende Diagnose ist es jedoch wichtig, dass das Kabel und die Garnituren durch die Messung nicht übermäßig belastet oder sogar geschädigt werden. Zusätzlich wird in [6] festgehalten, dass die Kurvenform der Prüfspannung von größerem Einfluss als die Erhöhung des Pegels von 2

$\times U_0$ auf $3 \times U_0$ (Vergleich Sinus mit Cos-Rect). Es ist auch ersichtlich, dass Sinus 50 Hz und Sinus 0,1 Hz praktisch identische Pegel aufweisen.

Bisher wurden nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen zur TE-Messung mit einer VLF Cos-Rect-Spannungsquelle durchgeführt. Auch praktische Erfahrungen über die Tauglichkeit der VLF Cos-Rect Spannungsform zur TE-Messung, vor allem bei betriebsgealterten Kabelstrecken, liegen noch nicht vor.

Bezüglich der TE-Messungen mit VLF Sinus ergaben alle genannten Veröffentlichungen, dass die Höhe der TE-Einsatzspannung mit denen der 50-Hz-Messung vergleichbar ist, wenn Tests an Feldobjekten (also nicht künstlich präparierten Objekten) durchgeführt wurden. Bei künstlich erzeugten Fehlern wich die Einsatzspannung bei der VLF-Messung und der 50-Hz-Messung mitunter voneinander ab, weswegen [4] zu dem Schluss kommt, dass künstliche, im Labor erzeugte Defekte und Prüfkörper nicht geeignet sind, die optimale Spannungsquelle auszuwählen.

Hinsichtlich der TE-Pegel und der TE-Muster (Verteilung der Messwerte) ergab sich bei den angeführten Publikationen ebenfalls, dass Resultate mit VLF Sinus 0,1 Hz vergleichbar sind mit den Ergebnissen von 50-Hz-Messungen. Dies gilt für betriebsgealterte Muffen in Aufschiebe- und Warmschrumpftechnik gleichermaßen. Auch im Hinblick auf die Lokalisierung der Teilentladungen zeigten sich keine relevanten Unterschiede.

Bezüglich eines Vergleichs (4 Kabelstrecken mit insgesamt 42 verschiedenen Fehlerstellen) zwischen VLF Sinus 0,1 Hz, 50-Hz-Resonanzanlage, 20-400-Hz-Resonanzanlage und DAC (Cos-Rect kam hier nicht zur Anwendung) kommt zum Beispiel [2] zum Schluss, dass sich bei den Test an diversen Mittelspannungskabeln keine Technologie als deutlich besser erwies als eine andere („Under the conditions in which this project was carried out, the experimental results show that there is not one partial discharge testing technology for installed MV cable systems which provides significantly better results than another.“).

Ein klarer Zusammenhang zwischen der TE-Stärke oder der Einsatzspannung und

der Spannungsquelle ließ sich durch die in [2] beschriebene Untersuchung nicht nachweisen („*The possible relationship between the magnitude of the partial discharges and the type of high voltage source used was investigated, but no relationship was found between them due to the great dispersion of results. The same conclusion was reached on researching the possible relationship between the PD inception voltage levels and the type of voltage source used. It was not possible to establish any correlation*“).

Bei der Auswahl unter den in [2] untersuchten Spannungsquellen (VLF Sinus 0,1 Hz, 50-Hz-Resonanzanlage, 20-400-Hz-Resonanzanlage und DAC) sollten Anwender daher eher praktische Kriterien wie mögliche Erfüllung der Aufgaben, Gewicht, Handhabbarkeit und Vielseitigkeit in Betracht ziehen. Ein Blick auf Tabelle 1 zeigt, dass von den vier Arten von Spannungsquellen – VLF Sinus, VLF Cos-Rect, 50 Hz und DAC – nur die VLF Sinus Spannungsquelle alle Anforderungen erfüllt, wenn sowohl die Kabelprüfung als auch die tan delta und TE-Messung betrachtet werden. Hinsichtlich der tan-delta-Messung wirkt sich der VLF Sinus aufgrund seiner höheren Sensitivität sogar positiv aus.

4. Konsequenzen für die Praxis

Für den praktischen Einsatz gilt es, neben der Messgenauigkeit und -zuverlässigkeit weitere Aspekte zu beachten. Für den Einsatz im Feld sind unter anderem wichtig:

- Einfacher Transport und einfacher Anschluss der Messtechnik
- Personalaufwand, Schulungsbedarf
- Zeitaufwand für den Anschluss
- Zeitaufwand für die Messung
- Kosten/Nutzen-Verhältnis
- Relevanz der Messergebnisse für die vorausschauende Instandhaltung

Unter diesen Aspekten können die VLF-Spannungsquellen ein geringes Gewicht und ihre Kompaktheit als Pluspunkte gegenüber einer 50-Hz-Spannungsquelle verbuchen. Da die VLF Sinus-Quelle zudem für die Kabelprüfung und die Diagnosemessungen (tan delta und TE) in Frage kommt, können Netztechniker mit nur einer

Spannungsquelle alle an neuen und gealterten Kabeln relevanten Messungen durchführen.

Gegenüber der Verwendung von verschiedenen Spannungsquellen für verschiedene Methoden (Bsp. Cos-Rect für Stehspannungsprüfung und OWTS für TE-Messung) ergeben sich klare Zeitvorteile bei Verwendung einer Spannungsquelle, wie z.B. VLF Sinus: Anschlussarbeiten reduzieren sich auf die Hälfte. Bei Verwendung einer Spannungsquelle ist es zudem möglich, Prüf- und Messmethoden parallel anzuwenden, zum Beispiel beim Monitored Withstand Test:

Mit Monitored Withstand Test oder Monitored Withstand Diagnostics (kurz MWT) wird das teilweise zeitgleiche Durchführen von Kabelprüfung und Kabeldiagnose mit der tan-delta-Methode bezeichnet. Da der Messtechniker für den MWT nur ein Gerät anschließen muss und einen zusammenhängenden Arbeitsablauf startet, kann er mit geringem Zeitaufwand die nach der Neuverlegung oder Reparatur einer Kabelstrecke übliche Prüfung durchführen und zugleich den Zustand des Kabels ermitteln. Die Kombination aus Prüfung und Diagnosemessung – der MWT – bietet folgende Vorteile:

- Einfacher Prüfaufbau, einfacher Ablauf (keine zusätzlichen Anschlüsse und keine Einarbeitung in MWT erforderlich)
- Verkürzung der Prüfdauer, wenn Kabel in gutem Zustand ist
- Keine Kabelüberlastung
- Ergebnisauswertung in Echtzeit
- Interpretation des Kabelzustands mit Smiley-Symbol auf dem Display
- Präzise Ergebnisse zum Kabelzustand

Auch die Teilentladungsmessung lässt sich in ähnlicher Form in einen Mess- und Prüfzyklus integrieren, so dass eine TE-Messung kaum zusätzliche Zeit beansprucht. Die Informationen der integralen Verlustfaktormessung und der lokalen Teilentladungsmessung ergänzen und/oder bestätigen einander und geben Netztechnikern und Instandhaltern somit mehr Kriterien zur Beurteilung ihrer Anlagen.

Für den Praktiker bedeutet die Verwendung einer leichten und leicht handhabbaren Spannungsquelle für die Kabelprüfung und -diagnose, dass er in der gleichen Zeit mehr Kabelstrecken messen kann als bei der Verwendung verschiedener Span-

nungsquellen. Mit anderen Worten: In der gleichen Zeit lässt sich der Zustand für beinahe doppelt so viele Kabelstrecken ermitteln, was sich positiv auf die zustandsorientierte Instandhaltung auswirkt.

Standardabweichung	Befund	Erforderliche Messungen	Erforderliche Maßnahmen	Kommentar
< 0,010	<ul style="list-style-type: none"> • Kabel in gutem Zustand • Water-Tress • Nur wenige TE 	<ul style="list-style-type: none"> • tan delta • TE 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine, da guter Zustand 	<ul style="list-style-type: none"> • Standardabweichung tan delta niedrig • Keine TE, keine starken TE
0,010 bis 0,080	<ul style="list-style-type: none"> • Water-Trees und TE • Nur TE 	<ul style="list-style-type: none"> • tan delta • TE 	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate Alterung hinsichtlich Water-Trees • TE-Konzentration ist zu analysieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate Water-Trees – keine sofortige Maßnahmen • Muffen ersetzen, falls TE-Konzentration
0,080 bis 0,500	<ul style="list-style-type: none"> • Wassereintritt in Muffen 	<ul style="list-style-type: none"> • tan delta • TE zeigt möglicherweise keine hohen Werte 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur der tan delta zeigt den Effekt • TE-Werte gedämpft wegen Wassereintritts, TE kann nicht als Kriterium dienen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantelfehlerortung kann die Stelle der nassen Muffe anzeigen, weil dort Leckströme auftreten • Muffen mit Hinweis auf geringe TE sollten untersucht werden (trotz der geringen TE-Werte)
> 0,500	<ul style="list-style-type: none"> • Starker Wassereintritt in Muffen 	<ul style="list-style-type: none"> • tan delta • TE sind weitgehend eliminiert in den betroffenen Muffen 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur der tan delta zeigt den Effekt • TE zeigt keine Schwachstelle an / sofortiger Ersatz der Muffe • Untersuchung der TE-Kalibrierungsgrafik 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantelfehlerortung kann die Stelle der nassen Muffe anzeigen, weil dort Leckströme auftreten

Tabelle 3: Beispielhafte Richtlinie zur Interpretation der Standardabweichung des tan delta.

5. Praxisbeispiel

Warum es wichtig ist, sich die Option auf eine Verlustfaktormessung und eine Teilentladungsmessung offen zu halten, verdeutlicht ein Beispiel: Typischerweise lassen sich defekte Muffen, zum Beispiel falsch montierte Garnituren oder solche mit elektrisch leitenden Einschlüssen, mit der TE-Messung erkennen. Dies ist jedoch bei nassen Muffen nicht der Fall. Bei diesem Beispiel, gemessen im Netz von Hong Kong, lieferte die tan delta Messung Hinweise dafür.

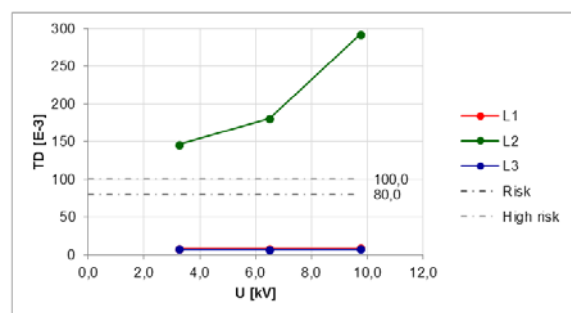


Abb. 4: Verlustfaktormessung an dreiphasigem Kabel: Leiter 2 weist eine hohe Standardabweichung auf.

STDTD	0,5U ₀ (kV)	U ₀ (kV)	1,5U ₀ (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 2: Messwerte zu Abbildung 4.

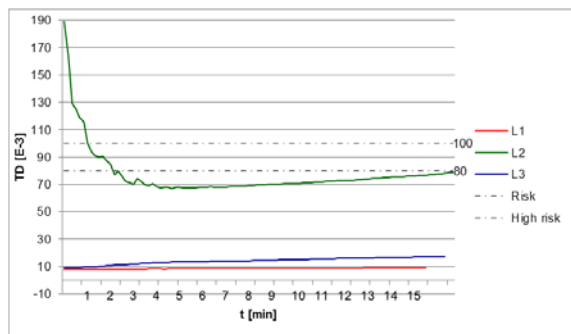


Abb. 5: Austrocknungseffekt der feuchten Muffe während eines MWT

Die tan-delta-Standardabweichung an Leiter 2, zu erkennen in Abb. 4, ließ den starken Verdacht auf eine feuchte Muffe zu, da die TE-Messung keine TE-Aktivität erkennen ließ (zu viel Feuchtigkeit). Der MWT, also die Kombination aus Kabelprüfung und tan-delta-Messung über 15 Minuten, führte dazu, dass die Muffe austrocknete und die Werte des tan delta deutlich sanken (Abb. 5). Dies untermauerte den Verdacht auf Nässe.

6. Auswirkungen der Spannungsquelle – Beispiel E-Werk Mittelbaden

Die Elektrizitätswerk Mittelbaden Netzbetriebsgesellschaft mbH (kurz E-Werk Mittelbaden) hat vor etwa zehn Jahren einen Vergleich der VLF 0,1 Hz Sinus und einer 50-Hz-Methode zur TE-Messung anhand von über 40 Kabelstrecken durchgeführt. Da die 50-Hz-Methode damals zu sehr unterschiedlichen Auswertungen und vor allem mehr negativen Prognosen führte, die sich bis heute nicht als Ausfälle zeigten, entschied sich das Unternehmen für die VLF-0,1-Hz-Sinus-Methode. In der Zwischenzeit hat sich die VLF-Messung mit Sinusspannung in Hunderten von Messungen bewährt. Dies hat sich an 240 Kilometer mit 500 Teilstrecken durchgeführten Diagnosemessungen im 20-kV-Netz des

E-Werk Mittelbaden an Papiermassekabel- und Mischkabelstrecken gezeigt.

Beim E-Werk Mittelbaden werden solche Kabelstrecken mit einem VLF Sinus 0,1 Hz mittels TE und seit etwa sieben Jahren auch mit der tan-delta-Messung diagnostiziert. Laut Werner Brucker, dem Leiter Netzbetrieb, ergibt sich durch die Anwendung beider Diagnoseverfahren ein guter Gesamtüberblick über die Alterung und den Zustand des Netzes. Als gefährdet klassifizierte Teilabschnitte werden zeitnah ersetzt. Durch die Eingrenzung defekter Teilabschnitte ergibt sich eine große Ersparnis, da nicht ganze Kabeltrassen zu erneuern sind.

Für die Inbetriebnahmeprüfung von neuen oder geänderten Kabelanlagen hat sich die VLF-Messung in der Praxis als geeignet erwiesen, um Fehlerstellen genau zu lokalisieren und in Zukunft mit gleichzeitiger TE-Messung auch Fehler in den Garnituren zu erkennen, so dass der Arbeitsaufwand für die Fehlerbehebung, wie Montagefehler, oder in der Instandhaltung, beispielsweise Grabarbeiten, geringer ausfällt.

Als wesentlichen Vorteil der VLF Sinus-Spannungsquelle hebt Brucker das Gewicht und die Alltagstauglichkeit hervor. Die 0,1-Hz-Technik lasse sich von einem Mitarbeiter transportieren und bedienen, was mit einer 50-Hz-Anlage sicherlich nicht möglich wäre.

Der Einsatz eines Messwagens, der mit zwei Personen besetzt ist, ist nur selten erforderlich, da das portable Mess- und Prüfgerät für die meisten Kabellängen ausreicht. Nur bei etwa jeder siebten Messung ist somit der Einsatz eines Messwagens nötig.

Für das E-Werk Mittelbaden ergibt sich ein klarer Kostenvorteil durch den Einsatz der VLF-0,1-Hz-Technik: Messungen lassen sich leicht von einem Mitarbeiter in kurzer Zeit vornehmen. Durch die kurze Anschlusszeit und Messdauer sowie den geringen Personalbedarf können relativ viele Kabelstrecken pro Jahr gemessen werden. Die durch die Messungen als kritisch bewerteten Strecken beziehungsweise Teilabschnitte werden für die zeitnahe Reparatur beziehungsweise den Austausch vorgesehen. Instandhaltungsbudgets lassen sich so gezielt einsetzen. Durch die Kenntnis

von Schwachstellen im Netz und die zustandsorientierte Instandhaltung gelingt es trotz des gewachsenen Kabelbestands, das Mittelspannungsnetz mit einer geringen Ausfallrate kostenoptimiert zu betreiben.

Der Instandhaltungsplan beim E-Werk Mittelbaden beträgt circa 4 Mio. EUR, davon sind 2,5 Mio. EUR relevant für das Verteilnetz. Die Kosten für die Kabeldiagnose belaufen sich derzeit auf 90.000 €/Jahr.

Aus den vergleichenden Tests vor Anschaffung der VLF-Ausrüstung weiß Brucker, dass bei seinen Messungen deutliche Unterschiede zwischen VLF 0,1 Hz Sinus und 50-Hz-Messungen auftraten.

In der Praxis ist ein Umstieg jedoch längst nicht mehr relevant, da sich das E-Werk Mittelbaden in die VLF-0,1-Hz-Messungen und ihre Interpretation sehr gut eingearbeitet hat und Messwerte mit hoher Zuverlässigkeit zur Klassifikation der Kabelstrecken heranziehen kann. Auch die Vorhersage, ob eine Kabelstrecke kurz- oder mittelfristig ausfallgefährdet ist, gelingt mit dem Erfahrungsschatz relativ genau, so dass Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend priorisiert werden.

7. Schlussfolgerung

Die Anwendung einer VLF-Sinus-Spannungsquelle eröffnet die Möglichkeit, Kabelprüfungen sowie Diagnosen einer Kabelstrecke mit nur einem Mann und mit portablem Equipment durchzuführen. In wissenschaftlichen Untersuchungen und im Feld hat der VLF Sinus gezeigt, dass er eine geeignete Spannungsquelle für Kabelprüfung, TE- und tan-delta-Messung ist und die erzielten Messergebnisse mit denen bei Betriebsfrequenz vergleichbar sind. Die ideale, lastunabhängige Sinusform erweist sich außerdem als vorteilhaft, wenn es um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse geht und eine Lastunabhängigkeit (Unabhängigkeit der Messungen von der Kabellänge) gewünscht ist. Somit können Vergleiche von Messergebnissen einfach durchgeführt und ein Erfahrungsschatz zur Zustandsbewertung von Kabelstrecken aufgebaut werden.

Die VLF-Sinus-Messung bietet somit die Chance, mehr Kabelstrecken bei gleichem Mittel- und Zeiteinsatz zu messen und

mehr Informationen über den Zustand des Netzes zu sammeln. Damit ergeben sich diverse Vorteile in der Praxis:

- Gezielter Einsatz der Instandhaltungsbudgets
- Kostenersparnisse durch Eingrenzen fehlerhafter Teilabschnitte
- Geringere Ausfallrate
- Positive Auswirkung auf die Kostenstruktur im Verhältnis zur Netzausfallrate
- Qualität neuer Kabelstrecken (Erkennen von Montagefehlern vor einem eventuellen Ausfall)

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Diskussion um die Vergleichbarkeit der VLF-Sinus-Messergebnisse mit anderen Spannungsformen akademischen Charakter. Die Universalität der VLF-Sinus-Messung hat in der Praxis ihre Eignung in verschiedenen Netzen (Europa, Übersee, an kunststoffisolierten Kabeln, Papiermassekabeln, Mischstrecken...) bewiesen und liefert hinreichend genaue Ergebnisse, um dem Netztechniker und Instandhalter eine zuverlässige Beurteilung der Kabelstrecken zu ermöglichen.

Referenzen

[1] The Use of the 0,1 Hz Cable Testing Method as Substitution to 50 Hz Measurement and the Application for PD Measuring and Cable Fault Location; M. Muhr, C. Sumeder, R. Woschitz

[2] Jicable 11 – Investigation of the Technologies for Defect Localization and Characterization on Medium Voltage Underground Lines; G. Maiz (Iberdrola Distribución, Spain)

[3] New Studies on PD Measurements on MV Cable System at 50 Hz and Sinusoidal 0,1 Hz (VLF) Test Voltage; K. Rethmeier, P. Mohaupt, V. Bergmann, W. Kalkner, G. Voigt

[4] Partial Discharge Measurements on Service Aged Medium Voltage Cables at Different Frequencies; G. Voigt, P. Mohaupt

[5] VLF-TE Messungen an betriebsgealterten Mittelspannungskabel (Abschlussbericht); G. Voigt

[6] Grundlagenuntersuchung zum Teilentladungsverhalten in kunststoffisolierten Mittelspannungskabeln bei Prüfspannungen mit variabler Frequenz und Kurvenform, D. Pepper

[7] New Studies on Site Diagnosis of MV Power Cables by Partial Discharge and Dissipation Factor Measurement at Very Low Frequencies VLF, G. Voigt

[8] IEEE 400.2-2013 IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)