



BMBF-Programm zu anwendungsorientierten Forschung
und Entwicklung an Fachhochschulen (aFuE)

VLF-TE Messungen an betriebsgealterten Mittelspannungskabel

-Abschlussbericht-

Förderkennzeichen: 17 085 01
Projektleiter: Professor Dr. Gunter Voigt
Projektmitarbeiter: Dipl.-Ing.(FH) Dirk Blum
Dipl.-Ing.(FH) Thekla Wolf
Projektthema: VLF-TE Messungen an betriebsgealterten Mittelspannungskabel
Förderzeitraum: 01.09.2001 – 30.09.2002
Durchführende Institution: Fachhochschule Konstanz



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung (Problemstellung, Stand der Technik, Zielsetzung)	3
1.1	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	3
1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.3	Stand der Forschung	3
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
1.5	Verwendete Literatur	4
2	Durchgeführte Untersuchungen / Ergebnisse	6
2.1	Verfügbare Prüftechniken.....	6
2.2	Teilentladungsmessung bei 50Hz und 0,1Hz	6
2.2.1	Bewertung von Teilentladungsmessungen	6
2.2.2	Verwendete Messaufbauten.....	7
2.3	Auswertung der Ergebnisse der Teilentladungsmessungen	8
2.3.1	Koronaentladung in Luft.....	8
2.3.2	TE Messungen an Antriebsstangen	10
2.3.3	Oberflächenentladungen auf einer Glasplatte in Luft.....	10
2.3.4	TE Messungen an betriebsgealterten Mittelspannungskabel.....	11
2.3.5	Messungen an betriebsgealterten VPE Kabeln.....	12
2.3.6	Messungen an betriebsgealterten VPE Kabeln mit geborgenen Muffen.....	12
2.3.7	TE- Messungen an neuen Mittelspannungskabel	12
2.3.8	Vergleich mit anderen Autoren	13
3	Verlustfaktor ($\tan \delta$) Messungen	14
3.1.1	Messaufbau 50Hz Messungen	14
3.1.2	Messaufbau 0,1Hz Messungen	14
3.1.3	Messergebnisse der $\tan \delta$ Messungen.....	15
4	Aufgetretene Probleme	16
4.1	Probleme bei den Teilentladungsmessungen.....	16
4.2	Probleme bei der Verlustleistungsmessung ($\tan \delta$)	16
5	Zusammenfassung	17



Einführung (Problemstellung, Stand der Technik, Zielsetzung)

Das Monitoring und die Diagnose von Kabel- und Versorgungssystemen beruht zum größten Teil auf der Statistik. Es werden Daten aufgezeichnet und mit bereits ausgewerteten oder älteren Daten aus demselben System verglichen.

Der Unterschied zwischen Monitoring und Diagnose ist, dass die Diagnose bei abgeschalteter Spannung erfolgt und das Monitoring ein ständiges Überwachen ist.

Ziel der Teilentladungsmessungen an betriebsgealterten Mittelspannungskabel war es einen Vergleich von Teilentladungsmessungen mit 50Hz und 0,1Hz zu erstellen. Dabei wurden Teilentladungsmessungen bei stark voneinander abweichenden Prüfbedingungen untersucht. Des Weiteren wurden Verlustleistungsmessungen ($\tan \delta$) bei verschiedenen Prüfobjekten mit 50Hz und 0,1Hz durchgeführt.

1.1 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Durch die Bereitstellung einer VLF-Prüfanlage der Firma BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH / Sulz, Österreich, einer der Vorreiter auf dem Gebiet der VLF-Prüftechnik, war es möglich die Messungen mit 0,1Hz durchzuführen.

50Hz Messungen wurden mit der bereits vorhandenen Power Diagnostix System Messeinrichtung ausgewertet.

Des Weiteren wurden zur Messung der Teilentladungen folgende Geräte eingesetzt:

- Analoges TE-Messgerät (mit phasenauflösender Anzeige bei 50Hz)
- Le Croy waverunner LT342 L DSO mit vorgeschaltetem Hochpass
- Digitales TE Messgerät nach IEC 60270
- Analoge Sondenmesstechnik

Die Auskopplung erfolgte über Koppelkondensatoren mit entsprechenden Messimpedanzen.

Die betriebsgealterten sowie neue Kabelstücke wurden von den Stadtwerken Konstanz zur Verfügung gestellt.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des aFuE-Projektes orientierte sich am Zeitplan des Antrages.

1.3 Stand der Forschung

Bisher liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor über das Verhalten einer Teilentladungsmessung bei den unterschiedlichen Spannungsbeanspruchungen.

Sensitive Teilentladungsmessungen sind jedoch neben der bereits hinreichenden erforschten Messung des $\tan \delta$ das wesentliche Hilfsmittel zu Ermittlung des Alterungszustandes und der



Abschätzung der Restlebensdauer eines Kabelsystems. /5, 3/ Insbesondere in /5, 8/ wird auf die mangelnde Erfahrung der TE Messung bei VLF-Prüfungen hingewiesen.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Vorhabens wurde überwiegend mit den Herren Mohaupt, Technischer Leiter, und Schlick von der Firma BAUR, Sulz zusammengearbeitet.

Als Ansprechpartner seitens der Stadtwerke Konstanz stand Herr Müller, Bereichsleiter Netze, zur Verfügung, sowie von Seiten eines Kabelherstellers Herr Dr. Meurer, NEXANS Deutschland, Hannover.

1.5 Verwendete Literatur

1. Weck: Instandhaltung von Mittelspannungs-Verteilnetzen. Erfordernisse, Diagnoseverfahren Instandhaltungsstrategien
Haefely Test Symposium, Stuttgart, 2000
2. Gockenbach: Grundsätzliche Untersuchungen zu Prüfspannung kunststoffisierter Kabel
Haefely Test Symposium, Stuttgart, 2000
3. Plath, Herrmann, Polster: Inbetriebnahmeprüfungen der 400 kV VPE Kabelanlage der BEWAG Berlin
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 98 (1999)
4. Schufft, Coors, Hauschild, Spiegelberg: Frequency-tuned resonant test systems for on-site testing and diagnostics of extruded cables
11th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), London, GB, 1999
5. Lemke, Stehl, Rußwurm
New Development in the field of PD detection and location in power cables under on-site conditions
43rd International Scientific Colloquium Technical University of Illmenau Sept. 21-24, 1998
6. CIGRE Working Group 21.09:
After laying tests on high voltage extruded insulated cable systems
ELECTRA, No. 173 (1997)
7. Krage
Ergebnisse der Umfrage zur Kabelprüfung und –diagnose auf der VDEW-Kabeltagung 1997
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97 (1998)
8. Platz, Kalkner, Krage:
Vergleich von Diagnosesystemen zur Beurteilung des Alterungszustandes PE/VPE- isolierter Mittelspannungskabel
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96 (1997)
9. Mohaupt, Gamlin, Gleyvod, Kraus, Voigt:
High Voltage Testing using Series Resonance with Variable Frequency



-
10. Schiller: 10th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Montreal, CDN, 1997
Das Durchschlagverhalten von vernetztem Polyethylen (VPE) bei unterschiedlichen Spannungsformen und Vorbeanspruchungen
Dissertation, TU Hannover, 1996
 11. Krüger: Isolationsprüfung verlegter Kunststoffkabel
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 86 (1997)
 12. Gulski, Smit, Seitz, Smit: PD measurements onsite using oscillating wave test systems,
IEEE international Symposium on EI, Washington DC, USA 1998
 13. Pepper, Kalkner: PC-measurements on typical defects on XLPE-insulated cables at variable frequencies,
11th International Symposium on High Voltage engineering (ISH), Montreal, CDN, 1997
 14. Muhr, Sumereder, Woschitz: The use of the 0,1Hz cable testing method as substitution to 50Hz measurement and the application for PD measuring and cable fault location,
12th International symposium on High Voltage Engineering (ISH), Bangalore, IND, 2001
 15. Pepper, Kalkner: PC-pattern of defects in CLPE-Cable insulation at different test voltage shapes
11th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), London, GB, 1999
 16. Gulski: Computer aided recognition of partial discharges using statistical tools,
Thesis, TU Delft, 1991
 17. Moh, S. C. Very Low Frequency Testing. Its Effectiveness in Detecting Hidden Defects in Cables, 17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Barcelona, E, 2003
 18. Colloca et.al. Comparision among different diagnostic systems for medium voltage cable lines, 16th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Amsterdam, NL, 2001
 19. Gockenbach Hauschild The selection of frequency range for high-voltage on-site testing of extruded insulation cable systems, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 16, no. 6, Nov./Dec. 2000
 20. Voigt, Mohaupt Partial discharge measurements on service aged medium voltage cables at different frequencies, JICABLE 2003, Versailles, F, 2003-05-15
 21. Voigt Teilentladungsmessungen bei variablen Prüfspannungsfrequenzen,
VDE Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Berlin, 2002
 22. Kuschel, Plath, Kalkner: Dissipation factor measurement at 0.1 Hz as a diagnostic tool for service-aged XLPE medium voltage cables, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, A, 1995



Durchgeführte Untersuchungen / Ergebnisse

2.1 Verfügbare Prüftechniken

Prüfobjekte mit großer Kapazität können nur mit großem Aufwand mit einer hohen Wechselspannung exakt bei Bemessungsfrequenz geprüft werden. Daher wird hier gerne von der normalen Betriebsfrequenz abgewichen.

Resonanzprüfsysteme mit variabler Frequenz bieten gier die Möglichkeit Bauvolumen und Gewicht einer Prüfanlage zu reduzieren, ohne stark von der Bemessungsfrequenz abzuweichen. /4; 9/

Eine deutliche Reduzierung von Bauvolumen und Gewicht bieten Anlagen zur Prüfung mit oszillierenden Spannungen /5; 12/ und Prüfanlagen mit 0,1 Hz (VLF) /11/. VLF Anlagen ermöglichen dabei eine Prüfung über lange Zeit, während Prüfanlagen mit oszillierender Spannung i.A. nur die Prüfung über wenige Perioden einer gedämpft ausschwingenden Wechselspannung mit annähernd Bemessungsfrequenz des Betriebsmittels nach vorgehender Gleichspannungsaufladung zulassen.

Damit stehen im Wesentlichen Prüfverfahren mit oder nahe bei Bemessungsfrequenz als auch mit VLF Spannungen (0,1Hz) zur Verfügung.

2.2 Teilentladungsmessung bei 50Hz und 0,1Hz

Die Messung von Teilentladungen ist eines der wichtigsten diagnostischen Verfahrens bei der Bewertung des Zustandes von Isoliersystemen. Zur Bewertung der verfügbaren Prüftechniken ist das Teilentladungsverhalten von Prüflingen bei 50Hz und bei 0,1Hz zu vergleichen.

Verschiedene Arbeiten beschreiben das grundsätzliche Teilentladungsverhalten von Modelanordnungen und künstlich gealterten Betriebsmitteln. /z.B. 10; 13; 14; 15/

In der vorliegenden Arbeit sollen zusätzliche charakteristische Kenndaten der Teilentladungsmessung bei der Gegenüberstellung von 50Hz und 0,1Hz Messungen ausgewertet werden.

2.2.1 Bewertung von Teilentladungsmessungen

Teilentladungsmessungen sollten immer den Rückschluss auf den Gefährdungsgrad einer Isolation zulassen oder aber eine Lokalisierung einer signifikanten Fehlstelle ermöglichen.

Bei der Bewertung werden unterschiedliche statistische Verfahren angewendet. Hierbei kommen Aussagen über Einsetzspannung und Löschespannung, Pegel der Teilentladungsimpulse sowie deren Häufigkeit und deren Phasenbezug zur Prüfspannung zur Anwendung. Weitere statistische Verfahren sind z.B. in /16/ beschrieben, kommen bei Messungen mit 0,1Hz zur Zeit aber nicht zum Einsatz.

Bei der Ortung von Fehlern nach Laufzeiteffekten sind diese statistischen Parameter eher unbedeutend. Entscheidend ist hier die Auswertung von signifikanten Signalen oberhalb der TE Einsatzspannung.

2.2.2 Verwendete Messaufbauten

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden Teilentladungsmessungen an verschiedenen Prüfobjekten bei 50Hz und 0,1Hz sinusförmiger sowie bei 0,1Hz rechteckförmiger Prüfspannung durchgeführt.

Prüfobjekte waren hierbei als Referenz eine Koronaentladung in Luft (Spitze an Hochspannung), Oberflächenentladungen auf einer Glasplatte, GfK Isolierstangen und verschiedene neue und betriebsgealterte PVC isolierte 20kV Kabel.

Die geprüften betriebsgealterten Kabel wurden zum Teil mit Original Endverschlüssen geprüft. Diese wurden zur Eingrenzung von Oberflächenentladungen in Luft und Öl betrieben. An einem betriebsgealterten Kabel wurden die originalen Endverschlüsse entfernt und TE Messungen mit Hilfe von Prüfendverschlüssen durchgeführt.

Die neuen Kabel wurden alle mit Hilfe der Prüfendverschlüsse geprüft.

2.2.2.1 50 Hz Messungen

Der grundsätzliche Messaufbau bei den 50 Hz Messungen sieht folgendermaßen aus.

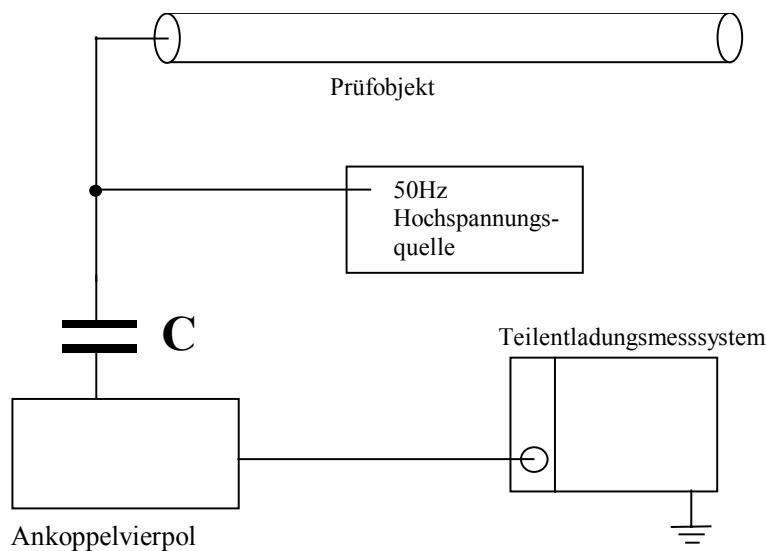


Abbildung 2-1 Messaufbau Teilentladungsmessungen 50Hz

2.2.2.2

0,1Hz Messungen

Bei den 0,1Hz Messungen wurde nach folgendem Aufbau gemessen.

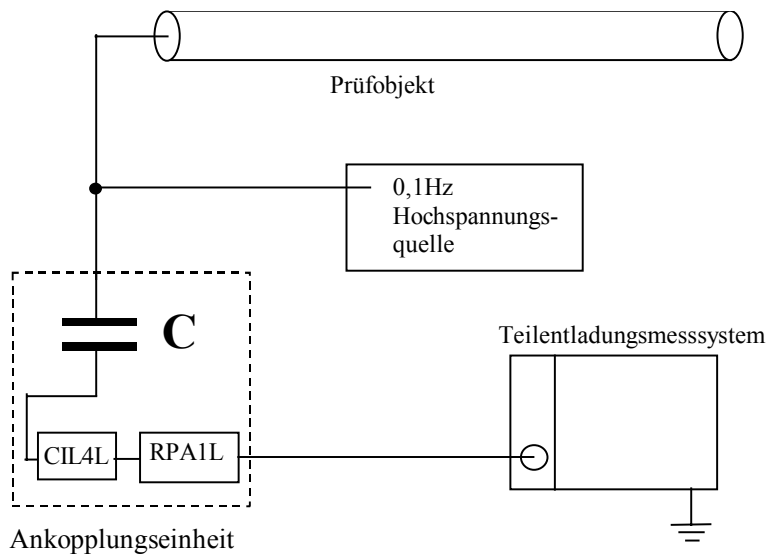


Abbildung 2-2 Messaufbau Teilentladungsmessungen 0,1Hz

2.3 Auswertung der Ergebnisse der Teilentladungsmessungen

Wesentliche ausgewertete Parameter bei der Teilentladungsmessung sind TE Einsatzspannung U_i , TE Löschspannung U_e sowie Teilentladungspegel bei definierten Spannungspegeln. Zusätzlich wurden Muster der TE Häufigkeit und Intensität über der Phasenlage (Mapping, Pattern, Fingerprints) aufgenommen.

Weitere statistische Parameter wurden nicht ausgewertet. Aufgrund der geringen Länge der geprüften Kabelstücke wurde auf eine Lokalisierung von Einzelfehlern verzichtet.

Die unterschiedlichen verwendeten Messverfahren lieferten bei gleicher Kalibrierung vergleichbare Ergebnisse. Auf leichte Abweichungen der Systeme gegeneinander muss nicht eingegangen werden.

2.3.1 Koronaentladung in Luft

Wie in den Bildern 1 und 2 dargestellt ergeben sich für Koronaentladungen in Luft knapp oberhalb der TE Einsatzspannung sehr ähnliche TE Muster bei 50Hz und 0,1Hz. Bei höheren Spannungen verändern sich die Muster leicht unterschiedlich.

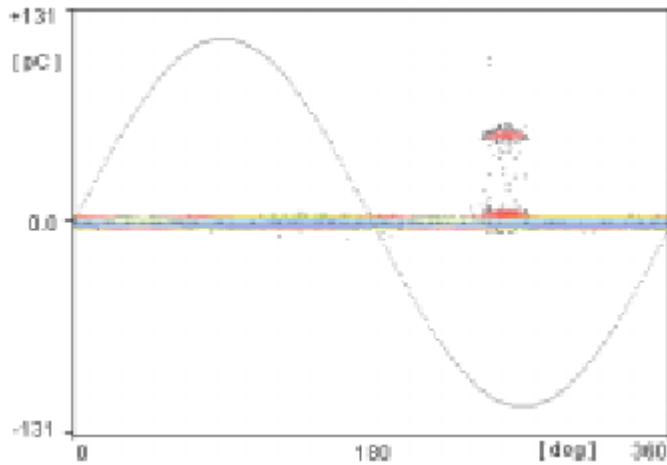


Abbildung 2-3 Koronaentladung in Luft, 12kV, Messdauer 300s, 50Hz

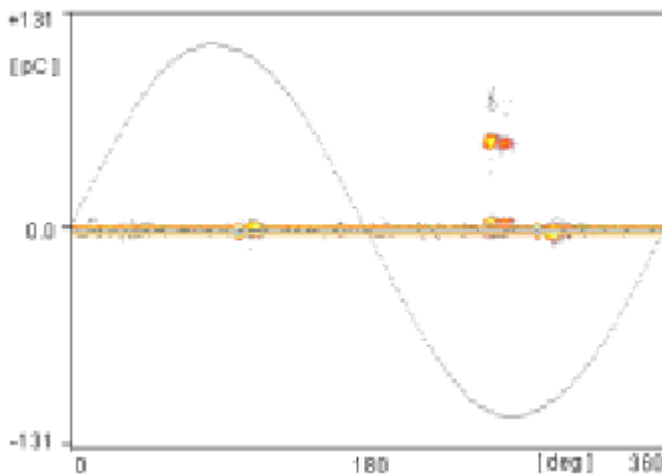


Abbildung 2-4 Koronaentladung in Luft, 12kV, Messdauer 300s, 0,1Hz

Der Mustervergleich diese Entladung zeigt, dass eine ähnliche Anzahl von Entladungsimpulsen bei gleicher Prüfspannung bei beiden Prüfspannungsfrequenzen zu beobachten ist.

Weitere charakteristische Daten sind in Tabelle zusammengefasst.

Korona in Luft	50 Hz	0,1 Hz
Einsetzspannung	11,6 kV	12,0 kV
Löschspannung	11,1 kV	11,5 kV
TE (max.) bei 20 kV	95 pC	130 pC
TE (mittl.) bei 20 kV	50 pC	70 pC

Tabelle 2-1 Spitze an Hochspannung 50Hz / 0,1Hz



2.3.2 TE Messungen an Antriebsstangen

Es wurden hier GfK Stangen für den Einsatz in Betriebsmitteln mit einer Bemessungsspannung von 36kV untersucht.

GfK Stange ($U_0 = 36$ kV)	50 Hz	0,1 Hz
Einsetzspannung	35 kV	24 kV
Löschspannung	35 kV	22 kV
TE (max.) bei 40 kV	150 pC	100 pC
TE (mittl.) bei 40 kV	40 pC	40 pC

Tabelle 2-2 GfK Stangen ($U_0 = 36$ kV) 50Hz / 0,1Hz

Der Vergleich (s.a. Tabelle 2-2) zeigt, dass bei 50Hz und 0,1Hz vergleichbare TE Muster. Die Impulshäufigkeit ist bei 0,1Hz jedoch leicht verringert.

2.3.3 Oberflächenentladungen auf einer Glasplatte in Luft

Diese Modellanordnung besteht aus einer 10mm dicken Glasplatte mit aufgesetzten Elektroden von je 50mm Durchmesser. Einer der Elektroden liegt auf Erdpotential, die andere auf Hochspannung.

Oberflächenentladung auf einer Glasplatte in Luft	50Hz	0,1Hz
Einsetzspannung	5,9 kV	20 kV
Löschspannung	5,6 kV	19 kV
TE (max.) bei 30 kV	2100 pC	130 pC
TE (mittl.) bei 30 kV	1300 pC	40 pC

Tabelle 2-3 Oberflächenentladung auf einer Glasplatte in Luft 50Hz / 0,1Hz

Der Vergleich zeigt auch hier vergleichbare TE Muster. Die Impulshäufigkeit ist bei 0,1Hz deutlich geringer.

2.3.4

TE Messungen an betriebsgealterten Mittelspannungskabel

Die zu prüfenden betriebsgealterten Mittelspannungskabel wurden von den Stadtwerken Konstanz zur Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei um VPE Kabel

Die Prüflinge wurden nach ca. 30 Jahren mit weitgehend unbekanntem Betriebsbedingungen ausgetauscht.

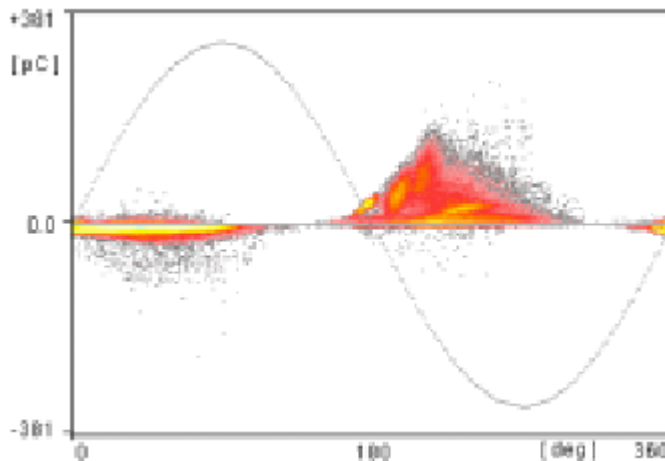


Abbildung 2-5 20 kV Kabel mit Prüfendverschlüssen TE bei 24kV, Messdauer 300s, 50Hz

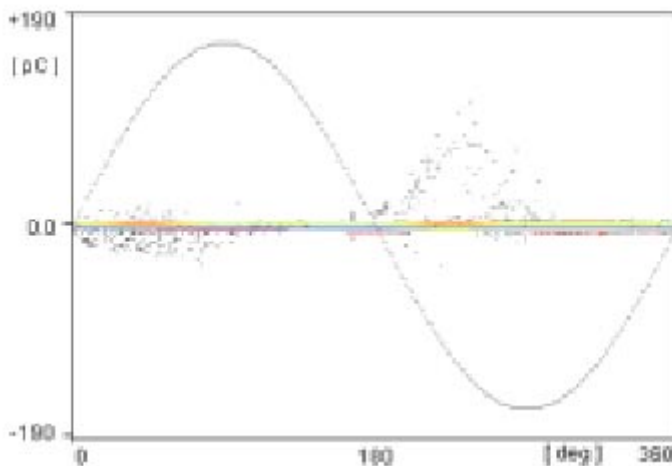


Abbildung 2-6 20 kV Kabel mit Prüfendverschlüssen, TE bei 24kV, Messdauer 300s, 0,1Hz

Bei den Mustern ist wiederum eine gewisse Ähnlichkeit zu erkennen. Die Impulshäufigkeit ist bei 0,1Hz deutlich gegenüber der bei 50Hz verringert.

PVC Kabel ($U_0 = 12$ kV), Prüfendver-	50 Hz	0,1 Hz
---	-------	--------



schlüsse		
Einsetzspannung	12 kV	16 kV
Löschspannung	6,4 kV	14 kV
TE (max.) bei 24 kV	180 pC	130 pC
TE (mittl.) bei 24 kV	100 pC	20 pC

Tabelle 2-4 Kabel mit Prüfendverschlüssen

PVC Kabel ($U_0 = 12$ kV), Prüfendverschlüsse	50 Hz	0,1 Hz
Einsetzspannung	8,1 kV	11 kV
Löschspannung	6,7 kV	8 kV
TE (max.) bei 24 kV	700 pC	150 pC
TE (mittl.) bei 24 kV	500 pC	20 pC

Tabelle 2-5 Kabel mit Gießharzendverschlüssen

2.3.5 Messungen an betriebsgealterten VPE Kabeln

Bei Messungen an betriebsgealterten VPE Kabeln bestätigt sich die Tendenz, dass bei VLF Prüfungen die Einsatzspannung von Teilentladungen bei einer Einsatzspannung vom 1,2 bis 1,3 fachen der Einsatzspannung bei 50 Hz Messungen erfolgt. Die Anzahl der Entladungsimpulse ist bei VLF gegenüber 50 Hz deutlich reduziert. Bei Prüfung mit einer gleichen Anzahl von Prüfperioden ist eine vergleichbare Anzahl von Impulsen zu erwarten. Im dieser Arbeit wurden grundsätzlich mit Prüfzeiten von 3 min gearbeitet. Bei gleiche Anzahl von Perioden bei VLF wie innerhalb einer 50 Hz, 3 Minuten Prüfung hätte sich eine Prüfzeit von 25 Stunden ergeben. Auf diese Messung wurde im Rahmen dieses Projektes verzichtet.

2.3.6 Messungen an betriebsgealterten VPE Kabeln mit geborgenen Muffen

Im Rahmen planmäßiger Erneuerung des Mittelspannungskabelnetzes der Stadtwerke Konstanz wurden mehrere Muffen mit Kabelenden von je 2 m geborgen und mit VLF und 50 Hz Prüfspannungen getestet. Auch bei diesen Messungen ergibt sich bei VLF eine gegenüber 50 Hz um das 1,2 bis 1,3 fache erhöhte Einsatzspannung bei reduzierter Entladungszahl.

2.3.7 TE- Messungen an neuen Mittelspannungskabel

Bei den neuen Mittelspannungskabeln handelt es sich um ABB Energiekabel NA2XS(F)2Y, 1x150mm², 20kV und NA2XS(F)2Y, 1x240mm², 20kV. Diese wurden mit Prüfendverschlüssen bei 50Hz und 0,1Hz durchgemessen.

Erwartungsgemäß ergaben sich bis hin zu Prüfspannungen von 2,5 U_0 bei beiden Prüfverfahren keine nennenswerten Teilentladungsimpulse. Insbesondere bei Messungen mit 0,1 Hz ist aufgrund des Verfahrens der Spannungserzeugung ein Grundstörpegel von 10 pC auch bei gegenüber dem Serienprodukt verbesserter Filtertechnik nicht zu unterschreiten. Neue Kabel haben oberhalb dieses Bereichs aber keine messbaren Entladungsimpulse.



2.3.8 Vergleich mit anderen Autoren

Während des laufenden Projektes wurden weitere Veröffentlichungen zum Thema publiziert. Mit bereits vorher veröffentlichten Ergebnissen ergibt sich damit für das abgeschlossene Projekt folgendes Bild:

$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.5$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[19]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.8$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[13], [15]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.9$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[14]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.7 - 0.4^{(*)}$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[18]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.75 - 0.85$	$U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	abgeschlossenes Projekt [20, 21]

Damit decken sich die Ergebnisse die in diesem Projekt erzielt wurden mit denen anderer Autoren:

Größere Abweichungen zwischen Einsetzspannung von TE Impulsen bei unterschiedlichen Spannungsformen ergeben sich nur bei künstlich erzeugten Fehlstellen mit erhöhter Leitfähigkeit der Fehlstelle selbst.

Betriebsgealterte Kabel zeigen bei VLF und 50 Hz ähnliches TE Verhalten wie künstliche Fehlstellen in neuen Kabeln und künstlich gealterte Kabel.

Größere Abweichungen zwischen VLF und 50 HZ treten wie in Kapitel 2.3.2 bzw. 2.3.3 beschrieben in Anordnungen auf, die mit der Prüfung von realen Kabeln offensichtlich nicht zu vergleichen sind.

Verlustfaktor ($\tan \delta$) Messungen

Zusätzlich zu den ursprünglich geplanten Untersuchungen wurde die Messung des Verlustwinkels mit in das Versuchsprogramm aufgenommen.

Eine wichtige Aufgabe einer Diagnose an Kunststoffkabel ist die Beurteilung des Allgemeinzustandes. Dieser hängt in erster Linie von der water-tree Konzentration ab. Water Trees sind Schädigungen der Kabelisolation aufgrund von eingedrungener Feuchtigkeit im Kabel (elektrochemische Korrosion). Das Schädigungsbild ist ähnlich wie das Bild des Treeings durch Teilentladungen. An verschiedenen Prüfobjekten wurden daher $\tan \delta$ Messungen bei 0,1Hz und 50Hz durchgeführt und gegeneinander verglichen.

3.1.1 Messaufbau 50Hz Messungen

Die 50Hz Messungen wurden mit dem Lemke Diagnostics GmbH Messsystem LDV-5 gemacht.

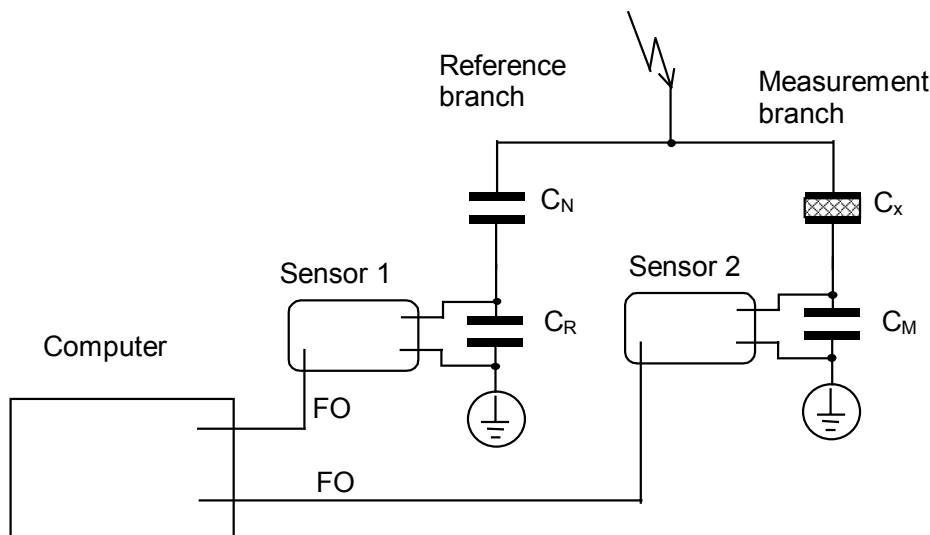


Abbildung 3-1 Messaufbau $\tan \delta$ Messungen 50 Hz

3.1.2 Messaufbau 0,1Hz Messungen

Die Verlustfaktormessungen $\tan \delta$ bei 0,1Hz wurden mit dem von der Fa. BAUR zur Verfügung gestellten Messgerät durchgeführt. Hierbei wird die Spannung über einem ohm'schen Teiler und der Strom durch den Prüfling über eine Messkapazität erfasst. Durch Fourier-Analyse und nachfolgender Auswertung der Grundwellen beider Messsignale wird der Verlustwinkel bestimmt und der Verlustfaktor berechnet.

Ein zusätzliches Erdpotential stellt bei der Messung an verlegten Kabel sicher, dass alle Fehlströme zwischen Hochspannung und geerdeten Teilen nicht in die Messung eingehen. Es werden alle Leckströme von Zuleitungen, Oberflächen und Isolierstrecken im Gerät und an der Oberfläche der Endverschlüsse abgefangen.

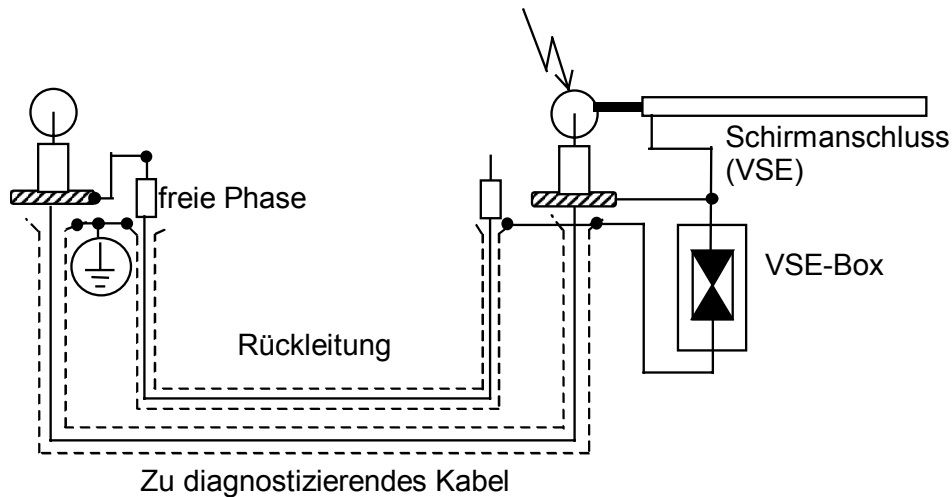


Abbildung 3-2 Messaufbau $\tan \delta$ Messungen 0,1Hz

2.4.2.1 Grenzwerte und Auswertung [22]

Für die Beurteilung sind nur die Veränderung des Verlustfaktors gegenüber dem Neuzustand und die Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors wichtig. Heute bei der Beurteilung herangezogenen Grenzwerte gehen im Wesentlichen auf [22] zurück. Diese Werte wurden in der Praxis gut bestätigt:

Die absoluten Grenzwerte, bei denen von betriebsgefährdenden Schädigungen ausgegangen werden muss, sind abhängig von der Isolierstoffzusammensetzung des Kabels. Die Werte sollten daher im Zusammenhang mit dem $\tan \delta$ - Wert im Neuzustand gesehen werden.

Bei homopolymeren PE- und VPE- Kabel liegen typische Verlustfaktorabsolutwerte im Neuzustand bei 1 bis 2×10^{-4} .

Für copolymerer Kabel liegen diese Werte deutlich höher.

Bei $\tan \delta$ Werten ($2 \times U_0$) $< 1,2 \times 10^{-3}$ und
 $\tan \delta$ Werten ($2 \times U_0$) – $\tan \delta (U_0)$ $< 0,6 \times 10^{-3}$

ist das Kabel nicht durchgehend water-tree geschädigt. Hier wird zur Abdeckung lokaler Schwachstellen eine zusätzliche Prüfung mit $3U_0$ empfohlen.

Bei $\tan \delta$ Werten ($2 \times U_0$) $> 2,2 \times 10^{-3}$ und
 $\tan \delta$ Werten ($2 \times U_0$) – $\tan \delta (U_0)$ $> 1 \times 10^{-3}$

hat das Kabel ein sehr hohes Betriebsrisiko, hier wird ein schnellstmöglicher Austausch des Kabels oder eines Kabelabschnittes empfohlen.

3.1.3 Messergebnisse der $\tan \delta$ Messungen

Messungen bei 0,1 Hz VLF Spannungen konnten aufgrund der vergleichsweise kurzen Prüflinge nicht durchgeführt werden. Ein Vergleich mit den bei 50 Hz durchgeführten Messungen ist daher hier nicht sinnvoll.



Die Ergebnisse bei 50 Hz zeigen ein uneinheitliches Bild. Die zur Verfügung stehenden Kabel waren allerdings auch nicht erkennbar durch WT geschädigt.

Bereits bei den Messungen zur TE Aktivität war ein deutlicher Unterschied insbesondere bei leitfähigen Fehlstellen zwischen VLF und 50 Hz zu beobachten. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere die Kenngröße $\tan \delta$ bei WT geschädigten Kabeln stark von der verwendeten Messfrequenz abhängt. Entsprechend umfangreiche Kenntnisse zur Bewertung von WT Schädigungen wie bei VLF beschrieben in [22] liegen derzeit für 50 Hz Prüfungen nicht vor. Die zu erwartende Abhängigkeit des Verlustwinkels $\tan \delta$ stellt die Verwendung von frequenzvariablen Prüfsystemen zur Kabeldiagnose [4, 9, 19] in Frage.

4 Aufgetretene Probleme

4.1 Probleme bei den Teilentladungsmessungen

Während der Teilentladungsmessungen traten folgende Probleme auf:

- Aufgrund der Größe des Hochspannungslabors ist es nicht möglich längere Kabelstrecken zu messen.
- Durch die Strombegrenzung der Hochspannungseinrichtung war es zudem nicht möglich längere Kabelstrecken zu messen.

4.2 Probleme bei der Verlustleistungsmessung ($\tan \delta$)

Nachfolgend werden die Probleme geschildert, welche bei den $\tan \delta$ Messungen auftraten.

- Die Kapazität der kurzen Kabelstücke im Labor ist so klein, dass das 0,1 Hz Messgerät keine direkte $\tan \delta$ Messung durchführen kann. Es kann lediglich mit einem parallel geschalteten Referenzkondensator gemessen werden. Anschließend muss der $\tan \delta$ berechnet werden. Dieses Verfahren hat keine hinreichende Genauigkeit.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des hier beschriebenen Projekts wurden Modellanordnungen und betriebsgealterte Mittelspannungskabel unterschiedlicher Fertigungsjahre untersucht. Schwerpunkt lag auf dem Vergleich von Teilentladungsmessungen bei 0,1 Hz VLF und 50 Hz Prüfspannungen.

Die Ergebnisse wurden mit denen anderer Autoren verglichen:

- Größere Abweichungen zwischen Einsetzspannung von TE Impulsen bei unterschiedlichen Spannungsformen ergeben sich nur bei künstlich erzeugten Fehlstellen mit erhöhter Leitfähigkeit der Fehlstelle selbst.
- Betriebsgealterte Kabel zeigen bei VLF und 50 Hz ähnliches TE Verhalten wie künstliche Fehlstellen in neuen Kabeln und künstlich gealterte Kabel.
- Größere Abweichungen zwischen VLF und 50 Hz treten wie in Kapitel 2.3.2 bzw. 2.3.3 beschrieben in Anordnungen auf, die mit der Prüfung von realen Kabeln offensichtlich nicht zu vergleichen sind.

$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.5$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[19]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.8$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[13], [15]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.9$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[14]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.7 - 0.4^{(*)}$	$\cdot U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	[18]
$U_{i,50 \text{ Hz}} \approx 0.75 - 0.85$	$U_{i,0.1 \text{ Hz}}$	abgeschlossenes Projekt [20, 21]

Messungen des Verlustwinkels betriebsgealterter Kabel ergaben im Rahmen des abgeschlossenen Berichtzeitraums kein einheitliches Bild. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere die Kenngröße $\tan \delta$ bei WT geschädigten Kabeln stark von der verwendeten Messfrequenz abhängt. Entsprechend umfangreiche Kenntnisse zur Bewertung von WT Schädigungen wie bei VLF beschrieben in [22] liegen derzeit für 50 Hz Prüfungen nicht vor. Die zu erwartende Abhängigkeit des Verlustwinkels $\tan \delta$ stellt die Verwendung von frequenzvariablen Prüfsystemen zur Kabeldiagnose [4, 9, 19] in Frage.

Für die Vorortprüfung von Kabeln sind Aussagen nötig zur Gefährdung durch WT und durch Teilentladungen.

Ersteres kann aufgrund der bestehenden Erfahrungen gut durch eine $\tan \delta$ Messung bei 0,1 Hz VLF erfolgen.

Teilentladungsmessungen dienen vor Ort zur Ortung von Fehlstellen. Hierbei ist v.A. eine Spannungsprüfung durchzuführen, die sicher in Fehlstellen Teilentladungen zündet, ohne umgebendes fehlerstellenfreies Material zu schädigen. Aufgrund der nur leicht erhöhten Prüfspannung bei VLF Prüfungen und entsprechender geringer Gefährdung von gesundem Material bei dieser Spannungsform ist VLF hier eine geeignete Spannungsbeanspruchung. Andere Spannungsformen, insbesondere Prüfung mit 50 Hz oder nahe 50 Hz ergeben vergleichbare Ergebnisse.