



VLF-Diagnosemessungen an Mittelspannungskabeln eines Industriebetriebes

Michael Krüger, Anja Kurth, Udo Ranninger

Übersicht

- **Grundlagen**
 - Warum Very Low Frequency?
 - Zustandsanalyse
 - Normen zur VLF-Diagnose
- VLF-Diagnosemessungen
 - Prüfaufbau
 - Optimierung des Prüfaufbaus
- Ergebnisse
 - Gesundes Kabelsystem
 - Hohe Tangens-Delta-Werte auf einer Phase
 - Teilentladungen auf allen drei Phasen
 - Durchschlag auf einer Phase
- Fehlersuche und Instandsetzung der Strecke

Warum Very Low Frequency?

- Die Prüfungen an Papier-Öl- und Papier-Massekabeln mit Gleichspannung war bewährt
- Messung des Isolationsstromes (μA) zur Diagnose der Isolierung
- Erste Kunststoffmittelspannungskabel Anfang der 70er Jahre
- Anfänglich wurden auch Kunststoffkabel mit Gleichhochspannung geprüft

Gleichspannungsprüfung an Kabelanlagen (Stand 1987)

Tafel 1. Gleichspannungsprüfung verlegter Hochspannungskabel (alle Werte in kV)

Norm Kabelart	U_0	0,6	3,5	6	12	18	26	36	64	76	87	130	160
	U	1	6	10	20	30	45	60	110	132	150	220	275

IEC 141-1 1976 Öl-Papier						81	117	160					
--------------------------------	--	--	--	--	--	----	-----	-----	--	--	--	--	--

IEC 55-1 Papierkabel (ohne Gasdrücke und Ölkabel) Radialfeld			18	25	50	76							
--	--	--	----	----	----	----	--	--	--	--	--	--	--

IEC 55-1 1978 nicht Radial- feld-Kabel			24	34	67	101							
---	--	--	----	----	----	-----	--	--	--	--	--	--	--

VDE 0255 1972 Masse- Papierkabel	8	21	36	72	108								
---	---	----	----	----	-----	--	--	--	--	--	--	--	--

VDE 0273 E86													
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

VDE 0298 Teil 1/11.82 PVC	5,6...	20...	34...	67...	76...								
	8	29	48	96	108								

PE/VPE	5,6...	20 ¹⁾ ...	34 ¹⁾ ...	67 ¹⁾ ...	76 ¹⁾ ...								
	8	29	48	96	108								

Norm Kabelart	U_0	0,6	3,5	6	12	18
	U	1	6	10	20	30

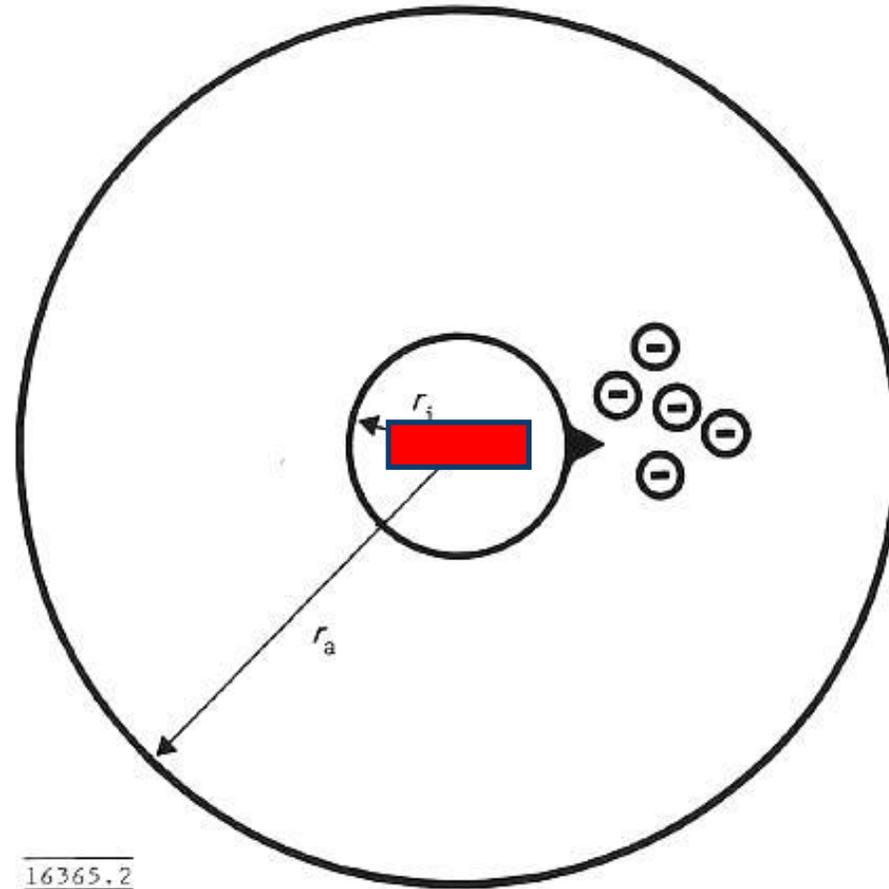
VDE 0298 Teil 1/11.82 PVC	5,6...	20...	34...	67...	76...	
	8	29	48	96	108	

PE/VPE	5,6...	20 ¹⁾ ...	34 ¹⁾ ...	67 ¹⁾ ...	76 ¹⁾ ...	
	8	29	48	96	108	

$$U_{\text{prüf}} = 5,6 - 8 \times U_0$$

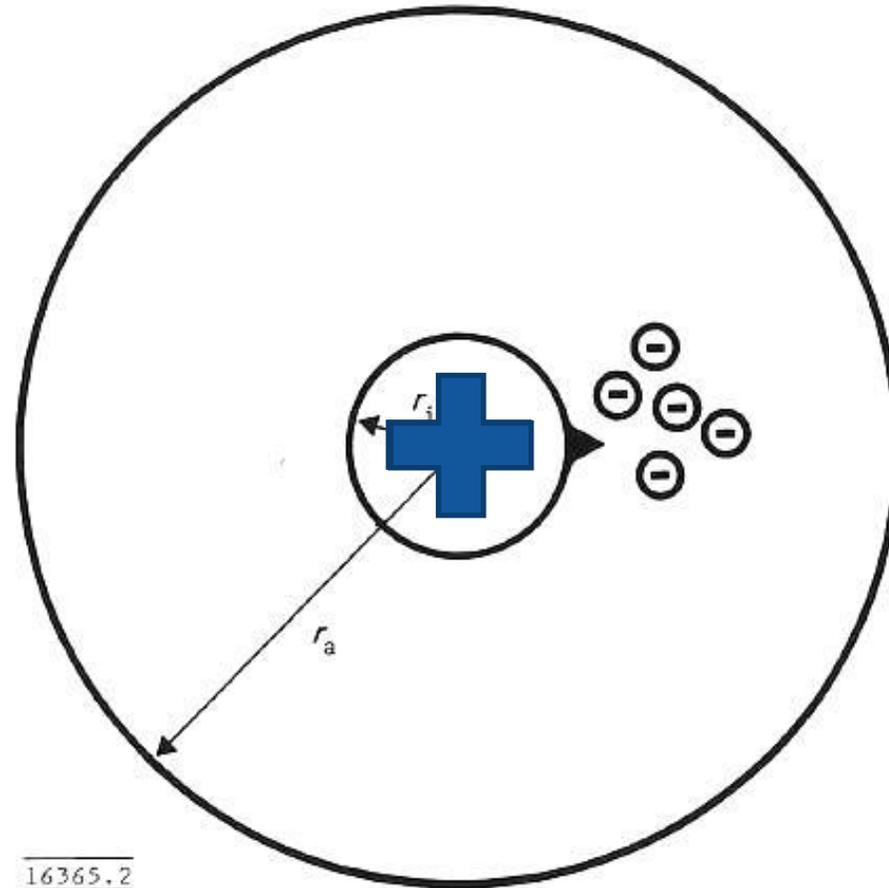
Raumladungen

durch lange Prüfung mit hohen Gleichspannungen



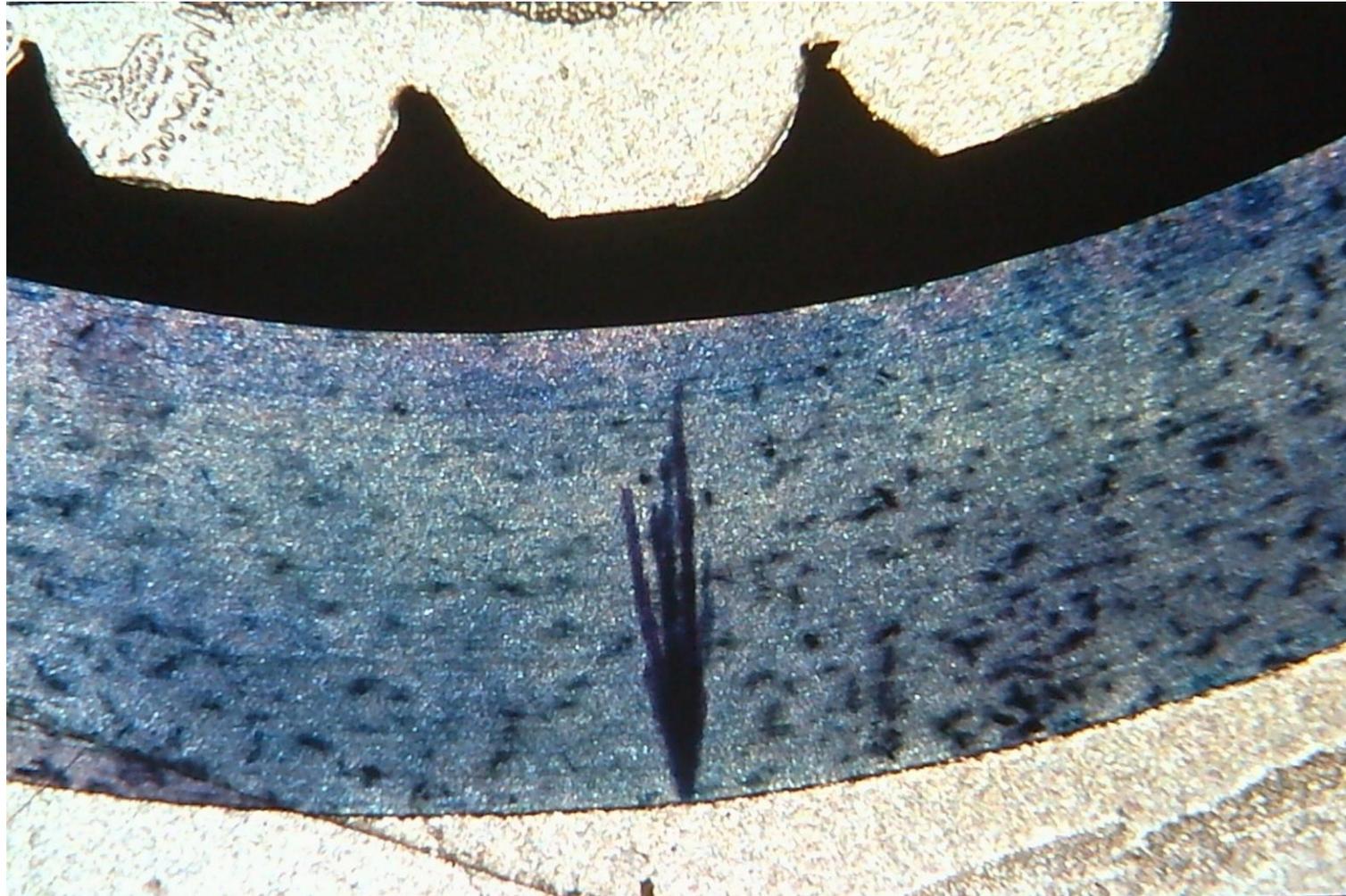
Raumladungen

durch lange Prüfung mit hohen Gleichspannungen



16365.2

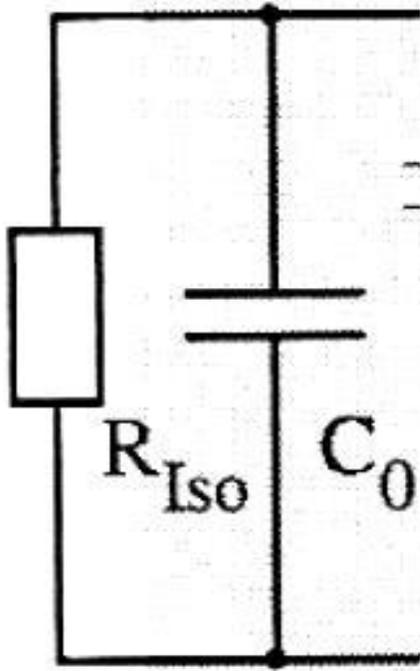
Water Trees



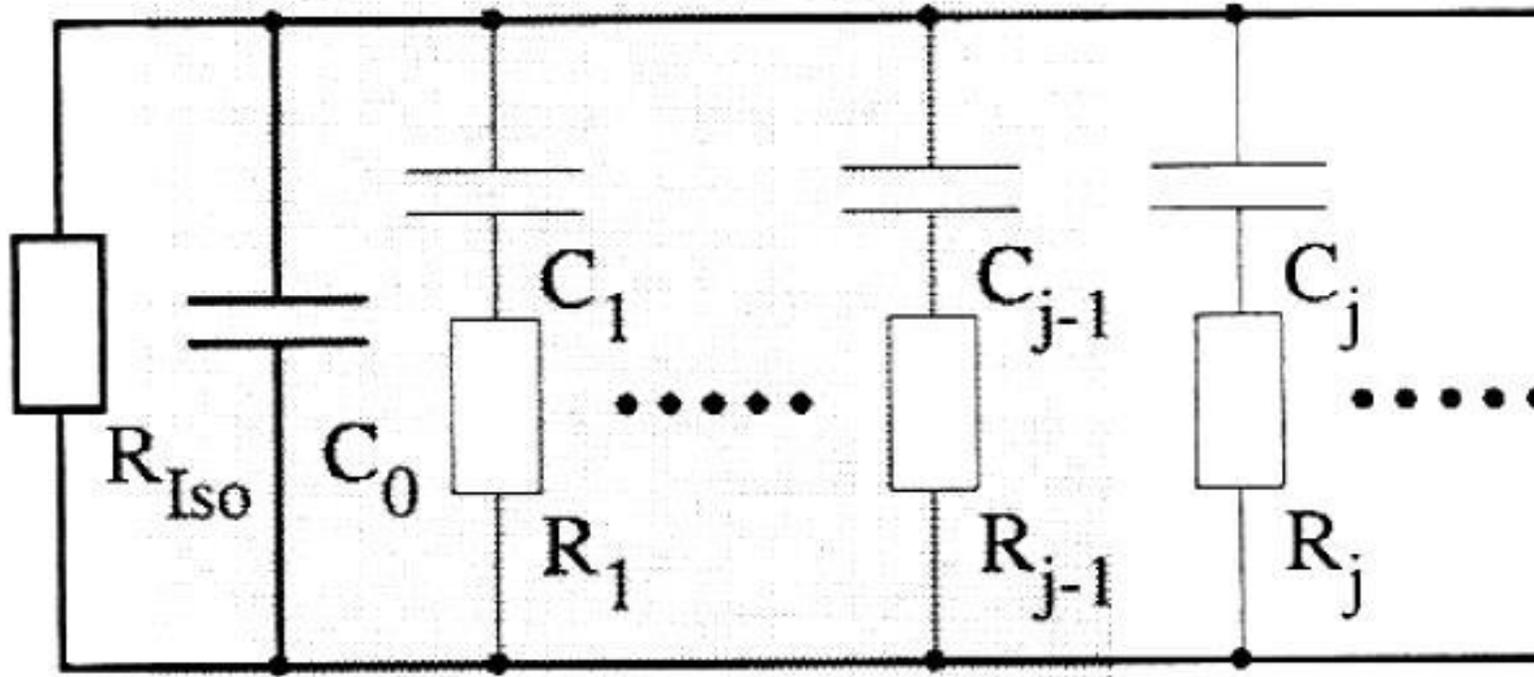
Viele Ausfälle von
Kabeln der ersten
Generation

Suche nach einem
Diagnoseverfahren
für Water Tree
geschädigte Kabel

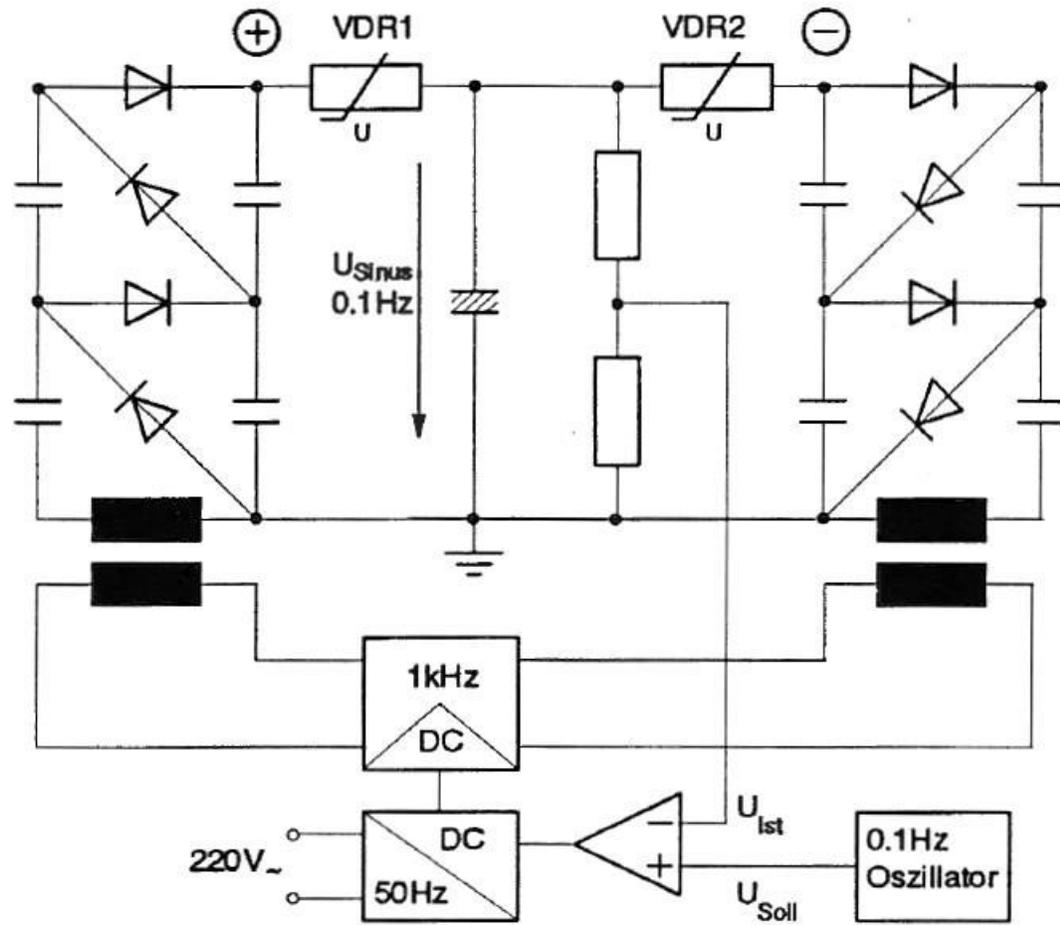
Idee: VLF + Verlustfaktormessung



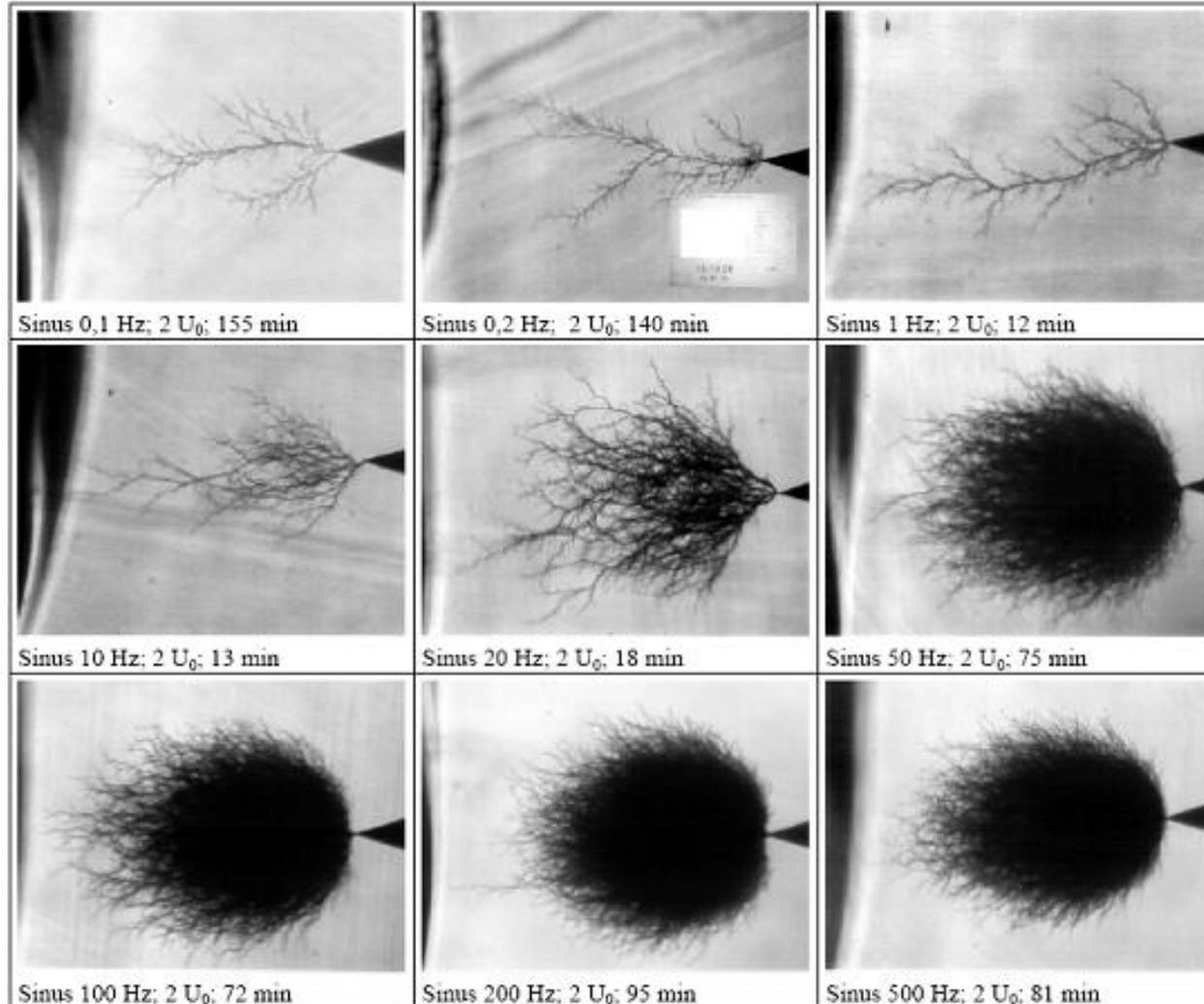
Idee: VLF + Verlustfaktormessung



VLF Anlage 1989 (Baur)



Einfluss der Frequenz der Prüfspannung auf das Wachstum der elektrischen Entladekanäle



Daniel Pepper, Dissertation 2003 TU Berlin

IEEE 400.2-2013 - Stehspannungsprüfung

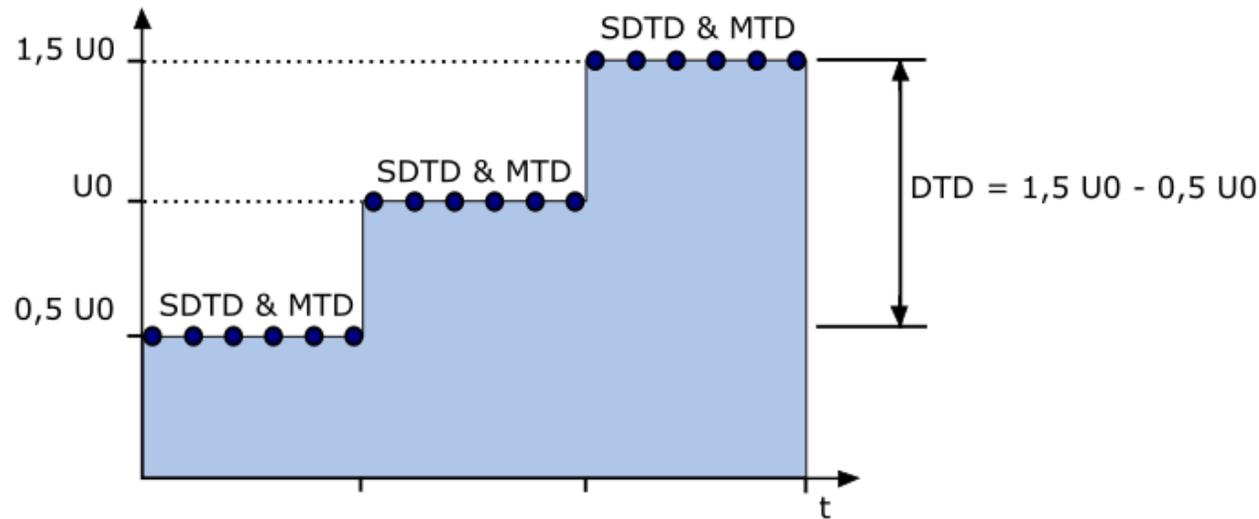
- Empfohlene Stehspannungsprüfungspegel nach IEEE400.2-2013

Spannungshöhe der Kabelanlage (Phase zu Phase) [kV]	Installation Prüfspannungspegel (Phase zu Erde) [kV]		Abnahme Prüfspannungspegel (Phase zu Erde) [kV]		Wartung Prüfspannungspegel (Phase zu Erde) [kV]	
	Sinus [U_{eff}]	CosRec ⁵ [U_{peak}]	Sinus [U_{eff}]	CosRec [U_{peak}]	Sinus [U_{eff}]	CosRec [U_{peak}]
5	9	13	10	14	7	10
8	11	16	13	18	10	14
15	19	27	21	3	16	22
20	24	34	26	37	20	28
25	29	41	32	45	24	34
28	32	45	36	51	27	38
30	34	48	38	54	29	41
35	39	55	44	62	33	47
46	51	72	57	81	43	61
69	75	106	84	119	63	89

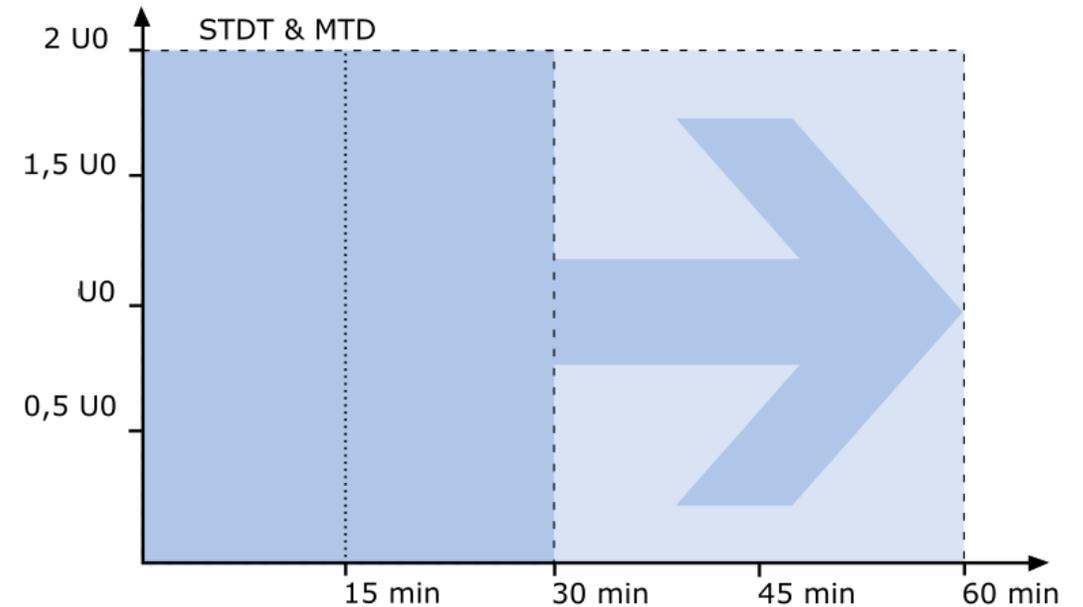
▲ IEEE Std 400.2-2013

VLF Verlustfaktor- und Stehspannungsprüfung

- **IEEE 400.2** Tangens-Delta-Monitoring (Stehspannungsprüfung)



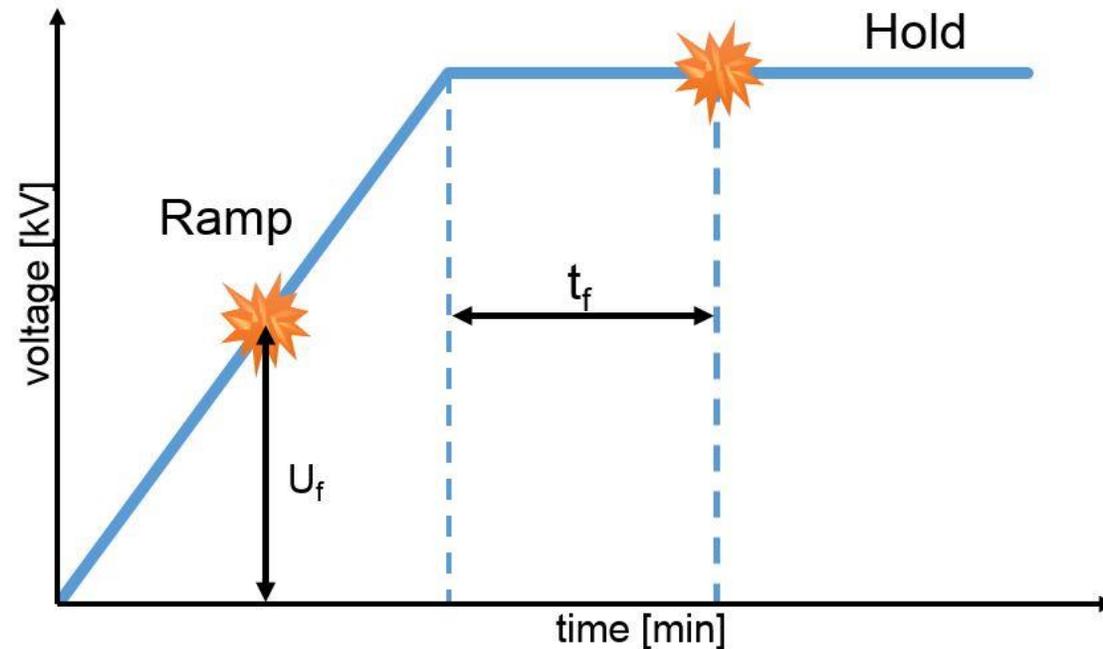
● ● ● ● ● ● 6 Messungen pro Spannungsstufe
 SDTD Standard Deviation Tan Delta
 MTD Mean Tan Delta
 DTD Delta Tan Delta



STDT Tan Delta Stability
 MTD Mean Tan Delta

IEEE 400.2 VLF Spannungsfahrt

- Tritt der Fehler in der Rampe auf, sollte die Höhe der Spannung U_f , bei der der Fehler auftritt, dokumentiert werden.
- Tritt der Fehler in dem Hold-Teil auf, sollte zusätzlich die Zeit t_f dokumentiert werden, nach der der Fehler erstmals auftritt.



Bewertung von VLF Verlustfaktorwerten

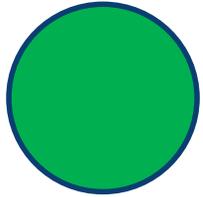
IEEE Std 400.2-2013

IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)

Table 4—Historical figures of merit for condition assessment of service-aged PE-based insulations (e.g., PE, XLPE, and TRXLPE) using 0.1 Hz

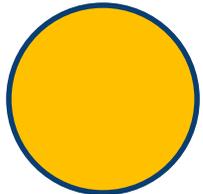
Condition assessment	VLF-TD Time Stability (VLF-TDTS) measured by standard deviation at U_0 , $[10^{-3}]$		Differential VLF-TD (VLF-DTD) (difference in mean VLF-TD) between $0.5 U_0$ and $1.5 U_0$ $[10^{-3}]$		Mean VLF-TD at U_0 $[10^{-3}]$
 No Action Required	< 0.1	and	< 5	and	< 4
 Further Study Advised	0.1 to 0.5	or	5 to 80	or	4 to 50
 Action Required	> 0.5	or	> 80	or	> 50

Bewertung von VLF Verlustfaktorwerten



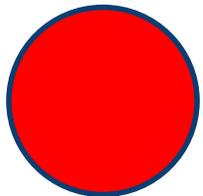
Kabel betriebsbereit:

$$\tan \delta (2 * U_0) < 1,2 * 10^{-3} \text{ und}$$
$$\tan \delta (2 * U_0) - \tan \delta (U_0) < 0,6 * 10^{-3}$$



Kabel mit erhöhtem Betriebsrisiko

$$\tan \delta (2 * U_0) > 1,2 * 10^{-3} \text{ und } < 2,2 * 10^{-3} \text{ und}$$
$$\tan \delta (2 * U_0) - \tan \delta (U_0) > 0,6 * 10^{-3} \text{ und } < 1 * 10^{-3}$$



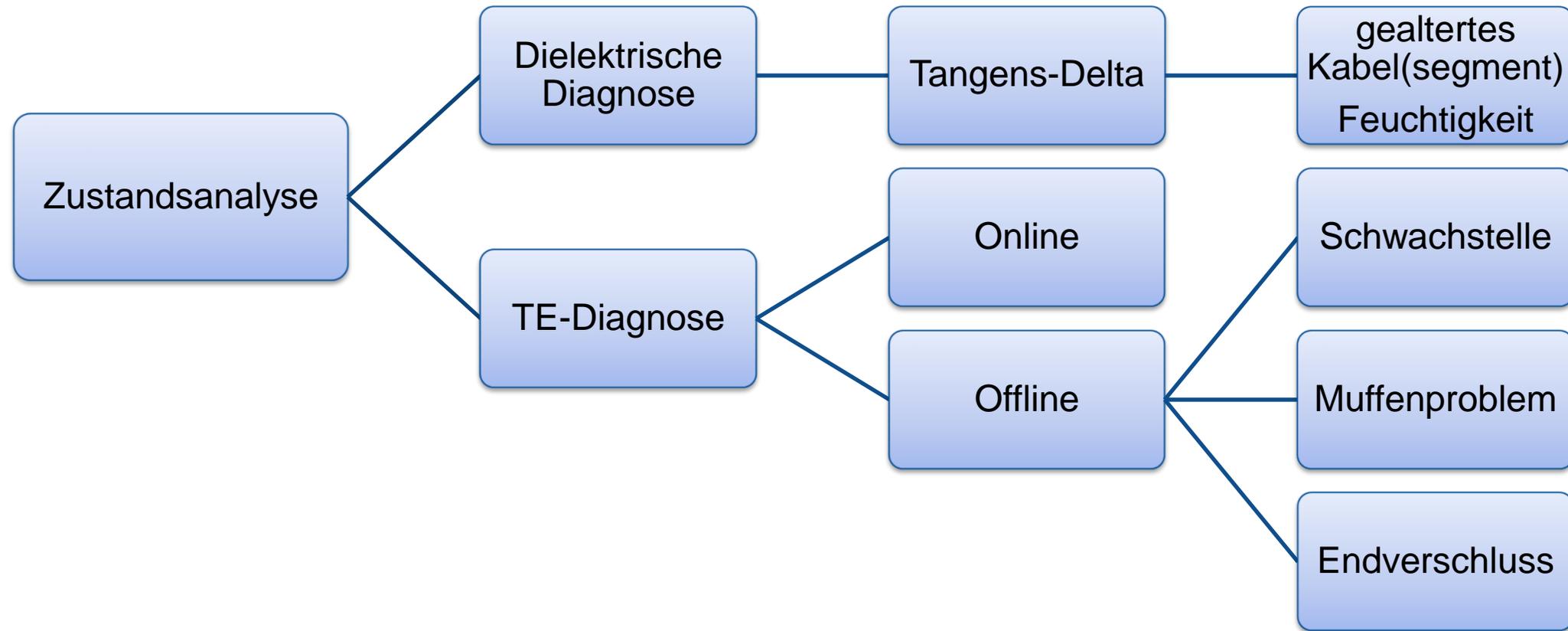
Kabel mit sehr hohem Betriebsrisiko:

$$\tan \delta (2 * U_0) > 2,2 * 10^{-3} \text{ und}$$
$$\tan \delta (2 * U_0) - \tan \delta (U_0) > 1 * 10^{-3}$$

Vorbereitung der Vor-Ort-Messung

- ❑ Informationen zum Kabel, inklusive kapazitiver Last.
 - Prüfsystem muss genügend Leistung bereitstellen können.
- ❑ Karte, mit den eingezeichneten Kabellängen, Muffen und Endverschlüssen zur späteren Lokalisierung
 - TDR (time domain reflectometry) kann angewendet werden, um Muffen und Endverschlüsse zu lokalisieren und um die Länge des Kabels zu bestimmen.
- ❑ Was ist angedacht?
 - Stehspannungsprüfung
 - Diagnosemessung (Verlustfaktor-, Teilentladungsmessung)
- ❑ Versorgungssicherheit
 - Redundanz?
 - Das Kabel muss rasch instand gesetzt werden können, wenn ein Fehler während der Prüfung auftritt.
- ❑ Sicherheit
 - Sicherheitsunterweisung
 - Erdungsgarnitur
 - ...

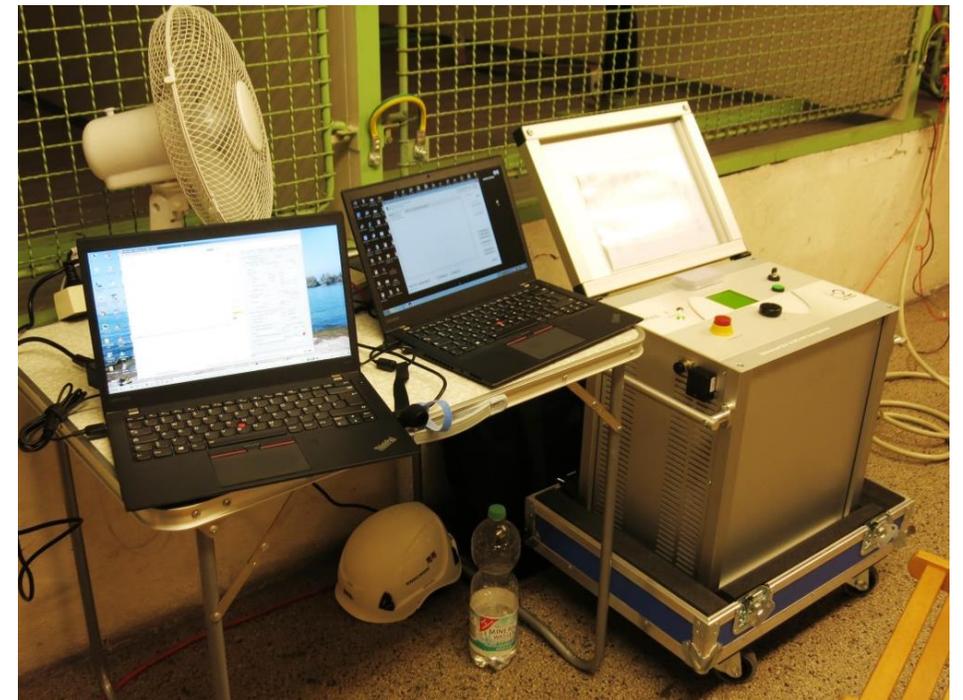
Zustandsanalyse bei der Vor-Ort-Messung



Übersicht

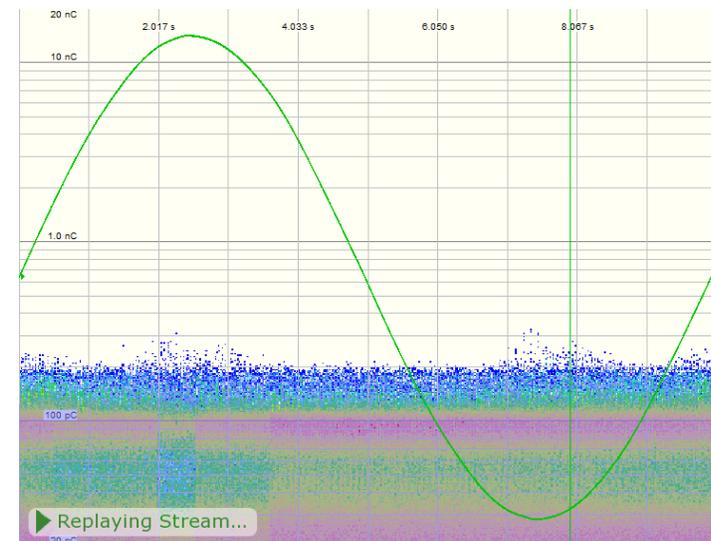
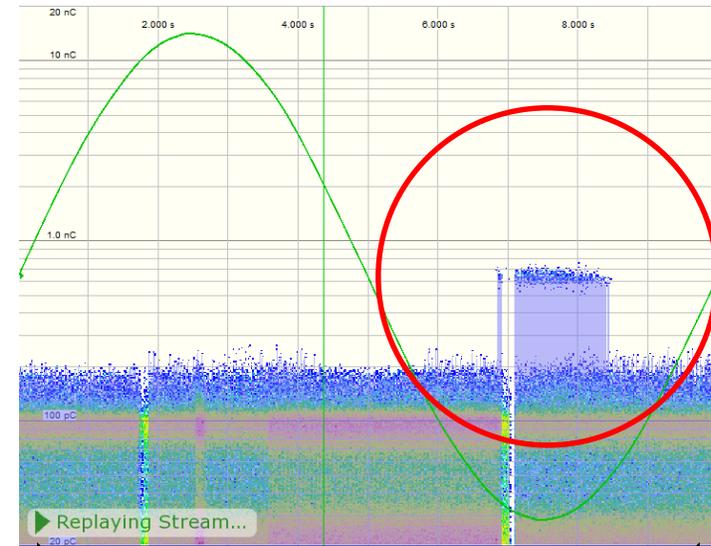
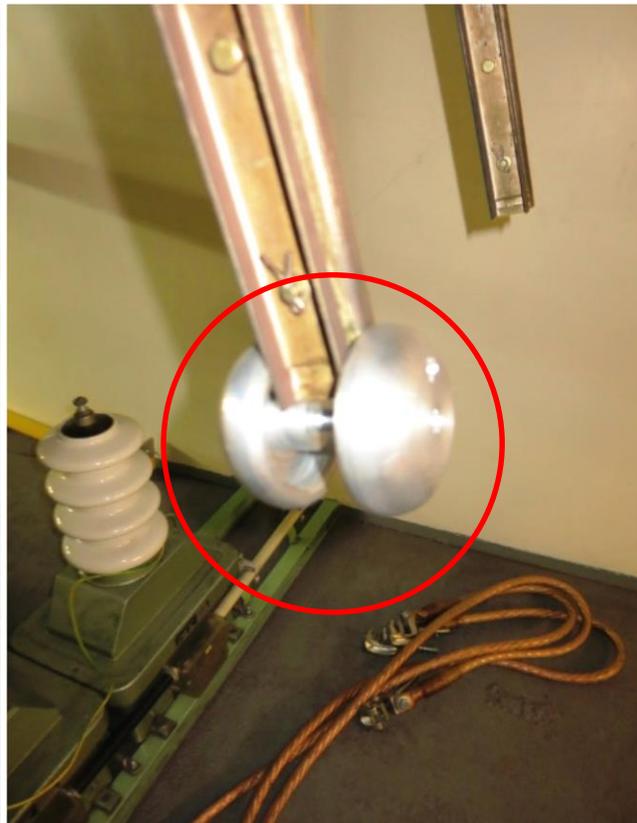
- Grundlagen
 - Warum Very Low Frequency?
 - Zustandsanalyse
 - Normen zur VLF-Diagnose
- **VLF-Diagnosemessungen**
 - Prüfaufbau
 - Optimierung des Prüfaufbaus
- Ergebnisse
 - Gesundes Kabelsystem
 - Hohe Tangens-Delta-Werte auf einer Phase
 - Teilentladungen auf allen drei Phasen
 - Durchschlag auf einer Phase
- Fehlersuche und Instandsetzung der Strecke

Prüfaufbau



Optimierung des Prüfaufbaus

- Corona bei 25 kV bei 0,1 Hz
- Position 270° - Spitze auf HV
- Trenner konnte als Ursache identifiziert werden.



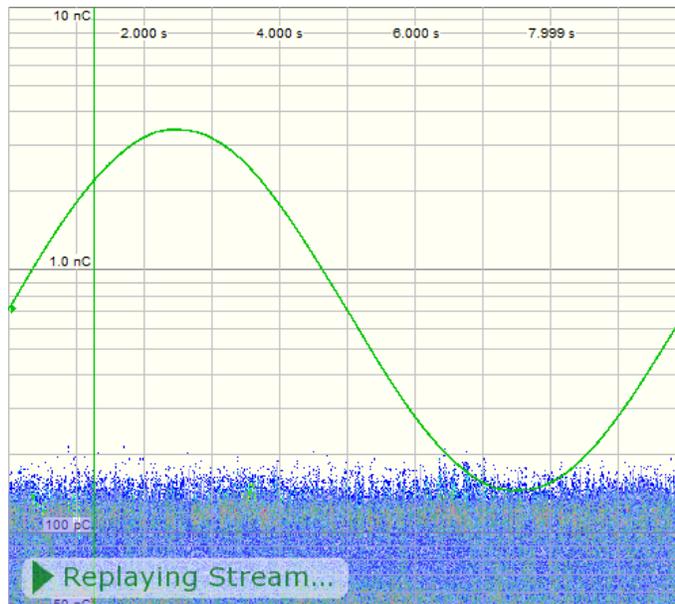
Übersicht

- Grundlagen
 - Warum Very Low Frequency?
 - Zustandsanalyse
 - Normen zur VLF-Diagnose
- VLF-Diagnosemessungen
 - Prüfaufbau
 - Optimierung des Prüfaufbaus
- **Ergebnisse**
 - Gesundes Kabelsystem
 - Hohe Tangens-Delta-Werte auf einer Phase
 - Teilentladungen auf allen drei Phasen
 - Durchschlag auf einer Phase
- Fehlersuche und Instandsetzung der Strecke

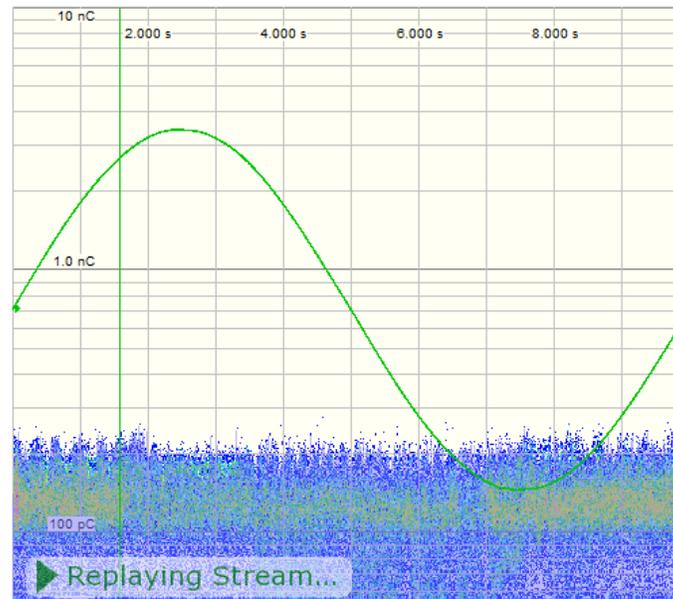
Übersicht PRPD – Turbo 7

- > Turbo 7: 3x300mm² Cu, PE, BJ.1972
- > 680 m Kabellänge, 17,5/ 30 kV

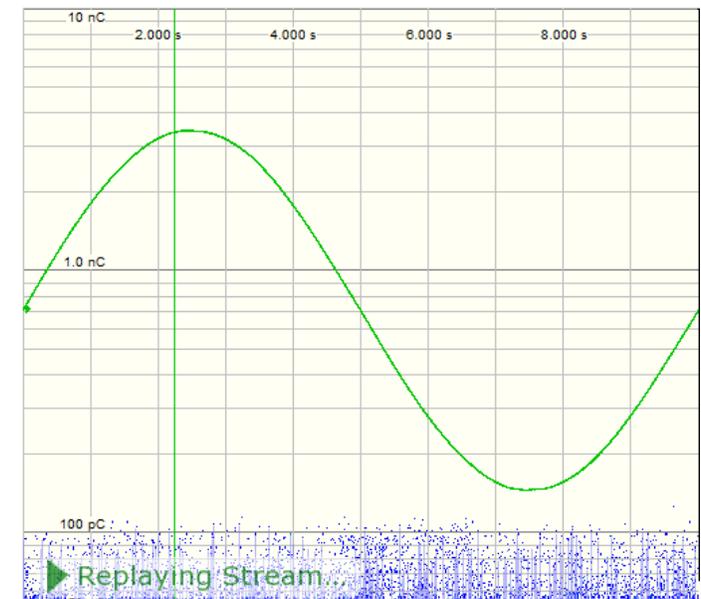
L1, bei 34 kV
 $f_c = 2 \text{ MHz} \pm 150 \text{ kHz}$



L2, bei 34 kV
 $f_c = 2 \text{ MHz} \pm 150 \text{ kHz}$



L3, bei 34 kV
 $f_c = 2 \text{ MHz} \pm 150 \text{ kHz}$



Übersicht Tangens-Delta – Turbo 7

- Gemessene Kapazität: 180 nF
- Kein Anstieg des Verlustfaktors über die Spannung für L1, L2 und L3

Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.1	25.6	34.1
TD Wert [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle 1 Phase L1 mit 180 nF

Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.1	25.6	34.1
TD Wert [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle 2 Phase L2 mit 179 nF

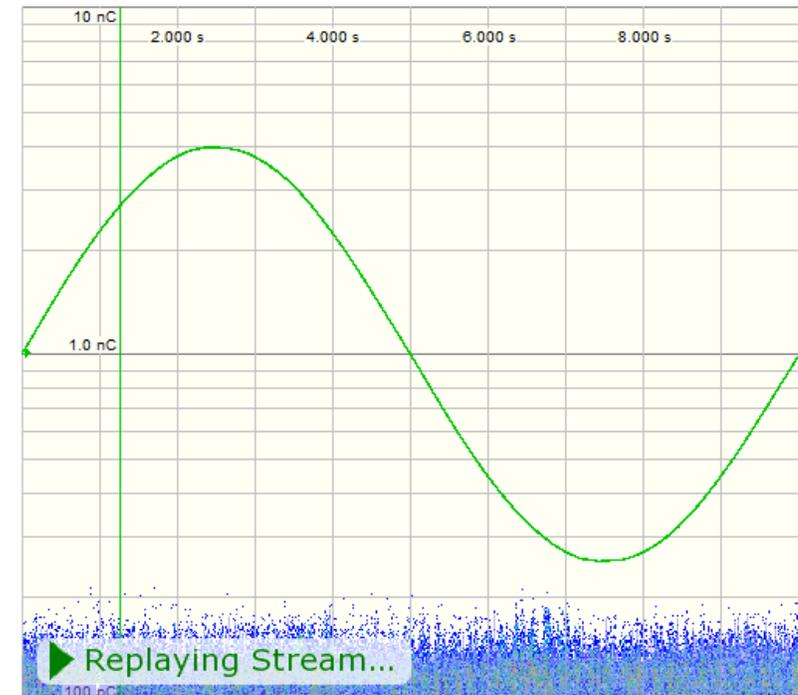
Prüfspannung [kV _{rms}]	17.1	23.2	25.6	30.1	34.1
TD Wert[E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw . [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle 3 Phase L3 mit 179 nF

Gesundes Kabelsystem – Turbo 7 – Zusammenfassung

- Stabile Tangens-Delta-Werte auf allen drei Phasen
- Keine Teilentladungen über dem Grundrauschen
- Alle drei Phasen zeigten keine Auffälligkeiten

Test voltage [kV_{rms}]	8.5	17.1	25.6	34.1
MTD [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Dev. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00

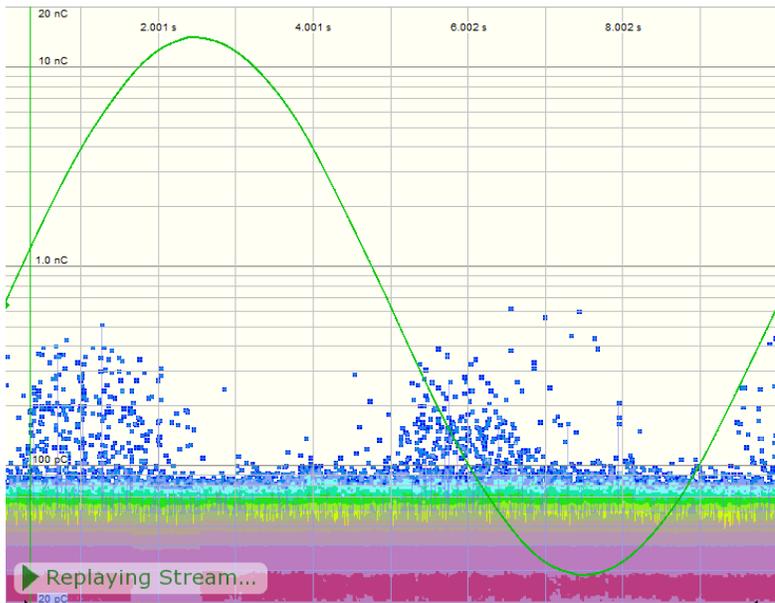


▲ PRPD, L1 (Turbo 7), bei 34 kV
Messfrequenz: 2 MHz ± 150 kHz

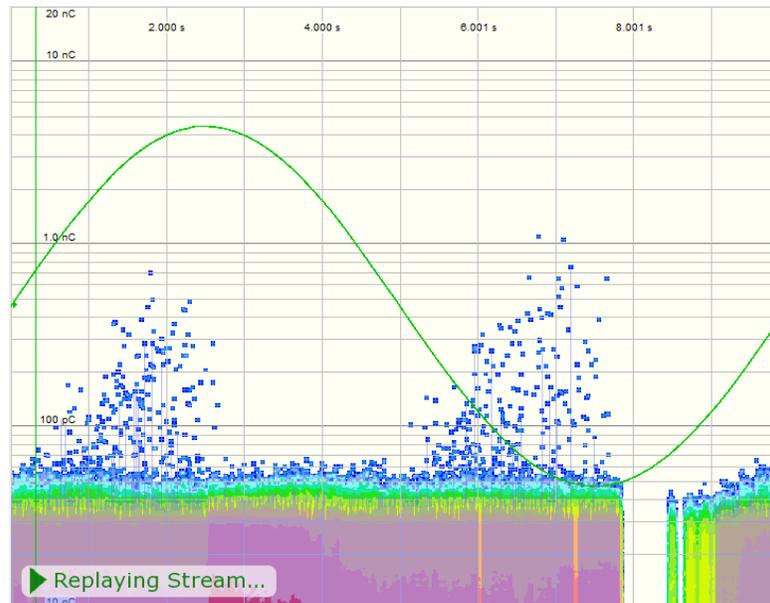
Übersicht PRPD – KW 8

> KW 10: 3x240mm², Al, PE, BJ.1970, 2,9 km Kabellänge, 17,5/ 30 kV

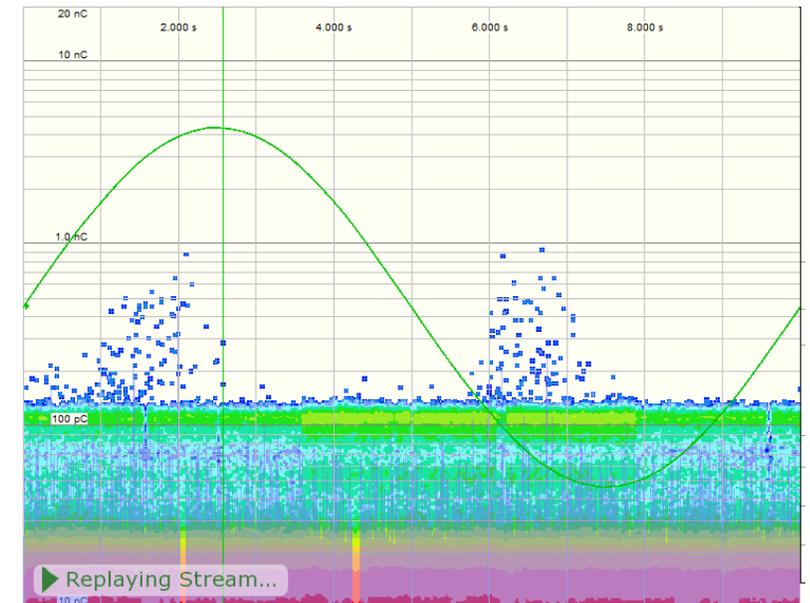
L1, bei 25 kV
fc = 2 MHz ± 150 kHz



L2, bei 34kV
fc = 2 MHz ± 150 kHz



L3, bei 34 kV
fc = 2 MHz ± 150 kHz



Übersicht Tangens-Delta – KW 8

- Gemessene Kapazität: 795 nF
- Kein Anstieg des Verlustfaktors über die Spannung für L1, L2 und L3

Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.0	18.6	20.1	25.6
TD Wert [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle 1 L1 mit 795 nF

Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.0	20.1	25.6	30.1	34.1
TD Wert [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

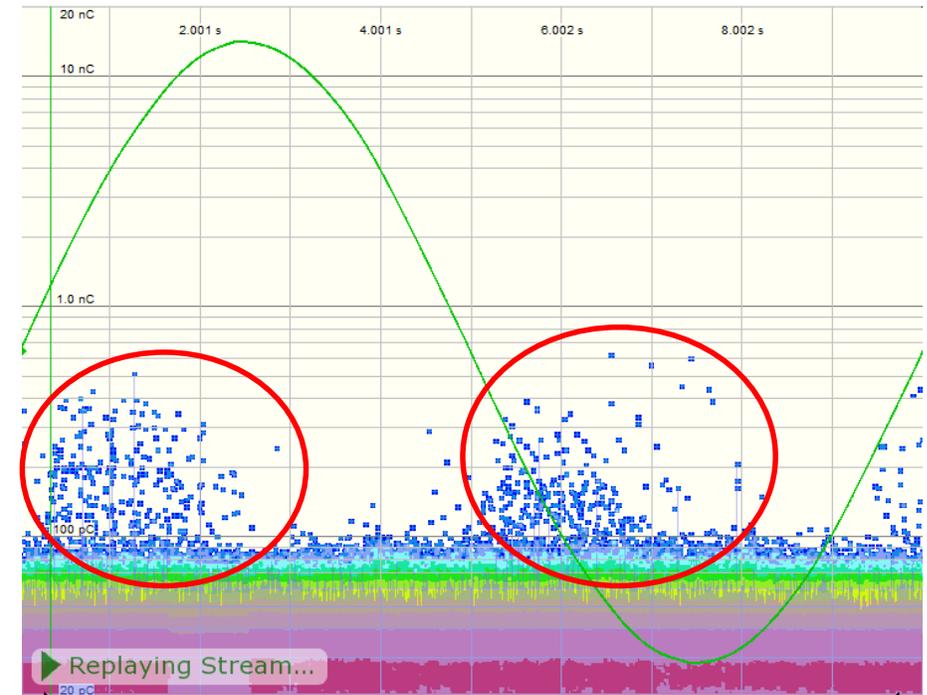
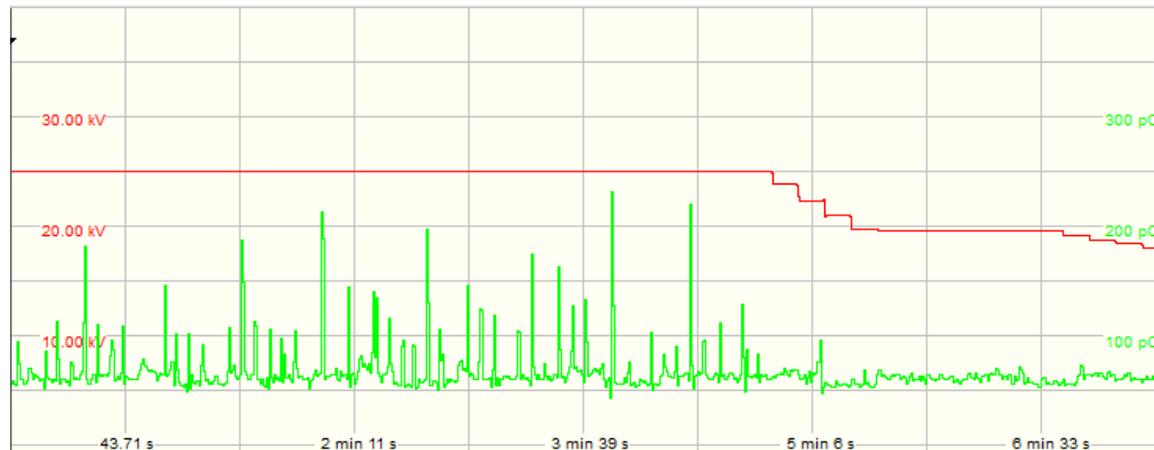
Tabelle 2 L2 mit 792 nF

Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.1	25.6	34.1
TD Wert [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle 3 L3 mit 801 nF

KW 8 Zusammenfassung

- Teilentladungen, ab 25,5 kV Einsetzspannung
- PRPD, Pegel bis etwa 600 pC
- Teilentladungen auf allen drei Phasen
- Stabile Tangens-Delta-Werte auf allen drei Phasen



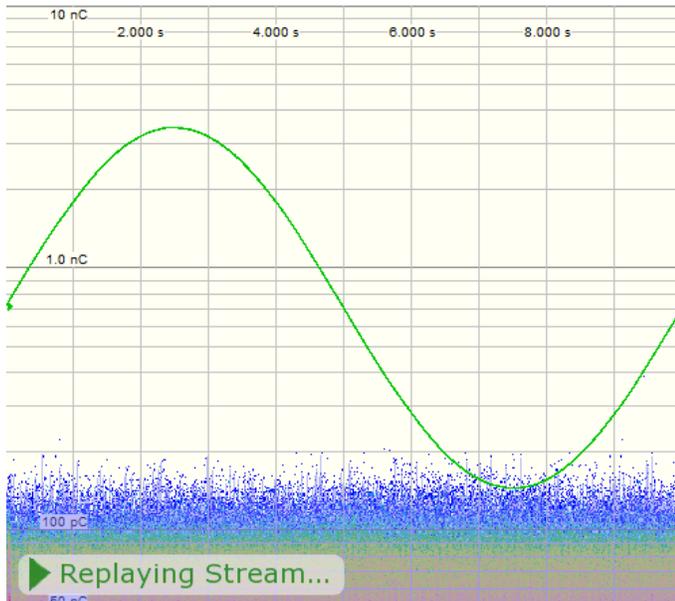
▲ PRPD, L1 (KW8), 600 pC bei 25,5 kV
Messfrequenz: 1 MHz \pm 150 kHz

◀ Aussetzspannung, L1

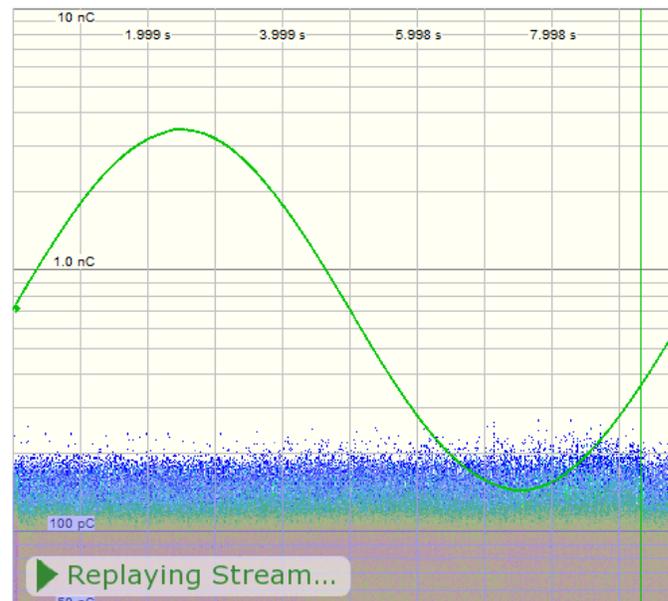
Übersicht PRPD – KW 9

> KW 10: 3x240mm², Al, PE, BJ.1970, 2,9 km Kabellänge, 17,5/ 30 kV

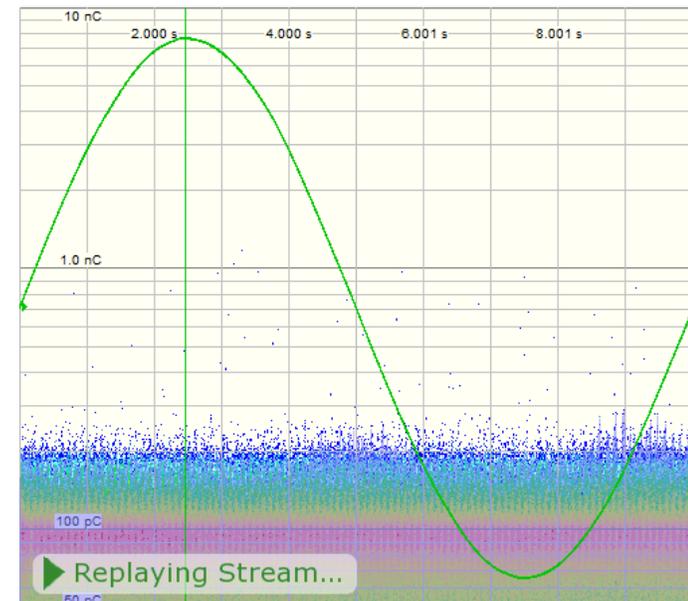
L1, bei 34 kV
 $f_c = 800 \text{ kHz} \pm 150 \text{ kHz}$



L2, bei 25 kV
 $f_c = 1 \text{ MHz} \pm 80 \text{ kHz}$

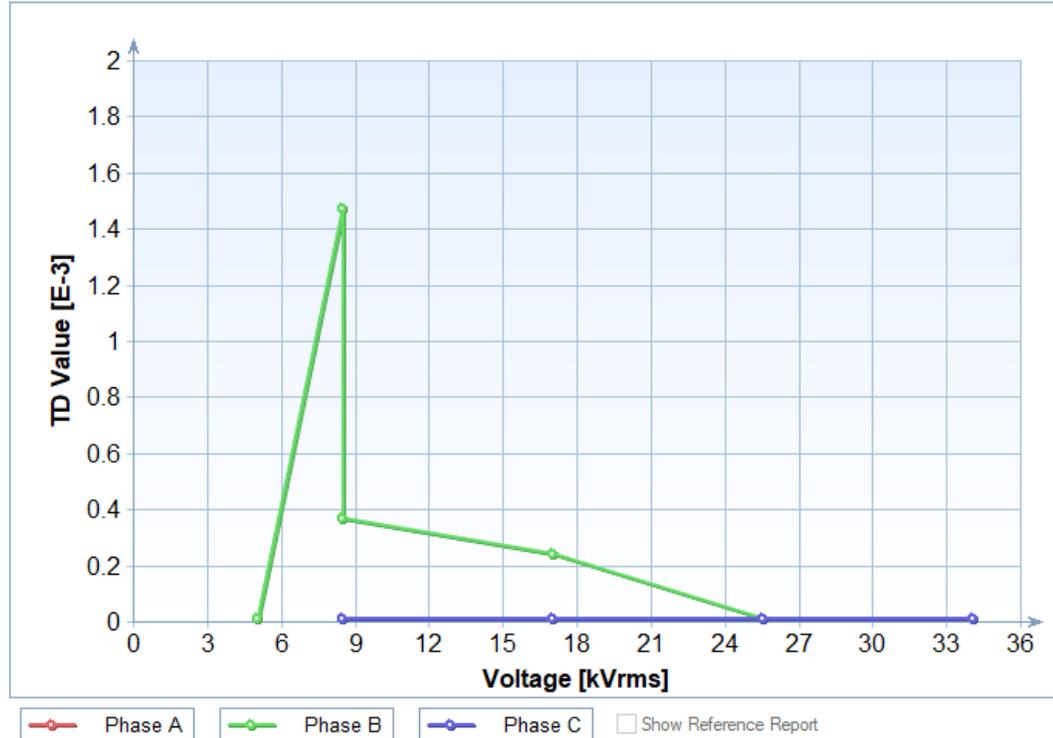


L3, bei 34 kV
 $f_c = 1 \text{ MHz} \pm 150 \text{ kHz}$



Übersicht Tangens-Delta – KW 9

- Gemessene Kapazität: 799 nF
- Kein Anstieg des Verlustfaktors über die Spannung für L1, L2 und L3
- Durschlag auf der Phase L2 bei 25 kV

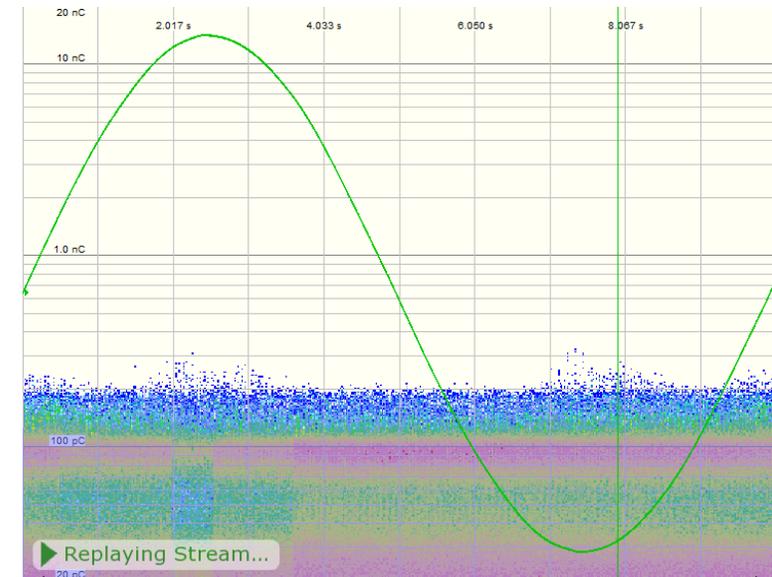


Durchschlag auf einer Phase – KW 9 – Zusammenfassung

- Durchschlag auf der Phase L2 bei 25 kV
- Restspannungsfestigkeit < 4 kV nach Durchschlag
- Keine Teilentladungsaktivität über dem Grundstörpegel
- Starke Schwankungen beim Verlustfaktor

Test voltage [kV_{rms}]	8.5	17.1	25.6
MTD [E-3]	0.36	0.24	0.1
Std. Dev. [E-3]	0.25	0.33	0.00

▲ Tangens-Delta-Werte auf L2

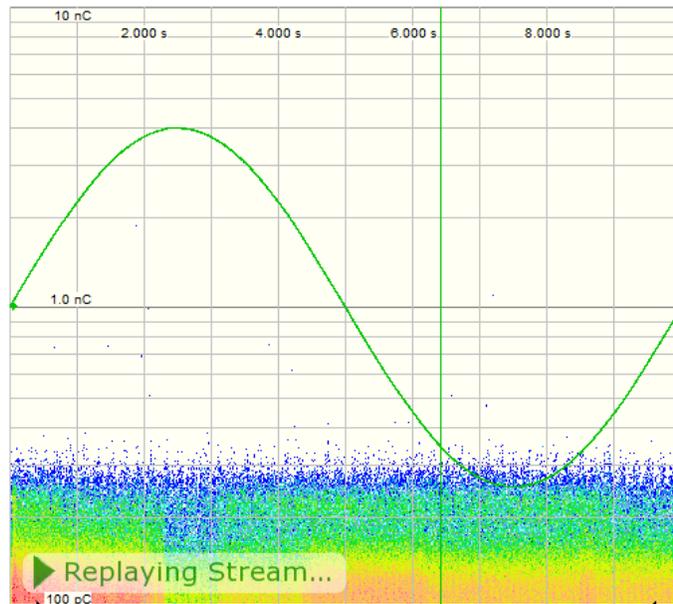


▲ PRPD, L2 (KW9) bei 25,5 kV
Messfrequenz: 1 MHz ± 80 kHz

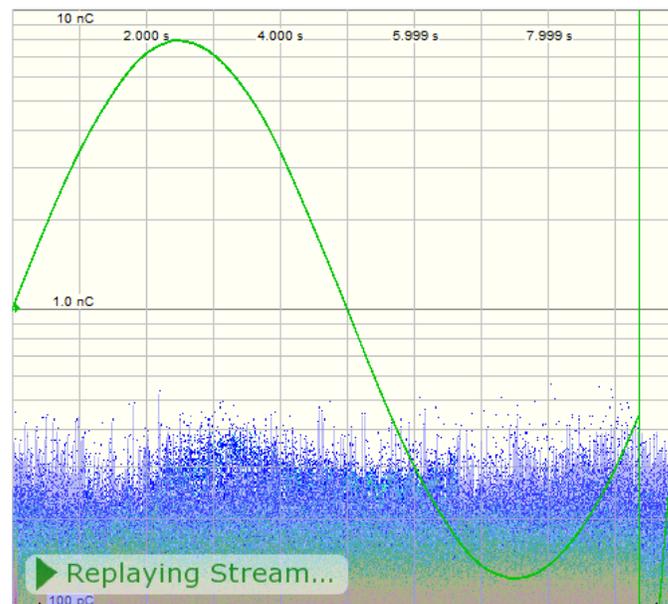
Übersicht PRPD – KW 10

> KW 10: 3x240mm², Al, PE, BJ.1970, 2,9 km Kabellänge, 17,5/ 30 kV

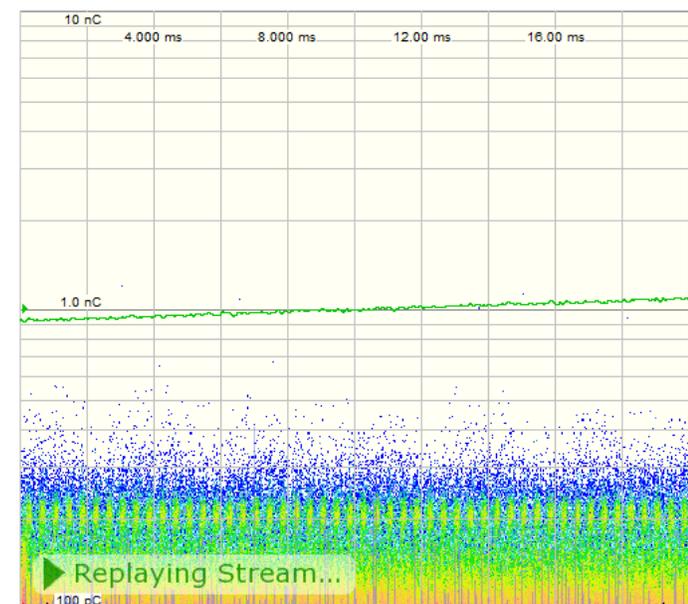
L1, bei 34 kV
 $f_c = 1 \text{ MHz} \pm 80 \text{ kHz}$



L2, bei 25 kV
 $f_c = 1 \text{ MHz} \pm 80 \text{ kHz}$

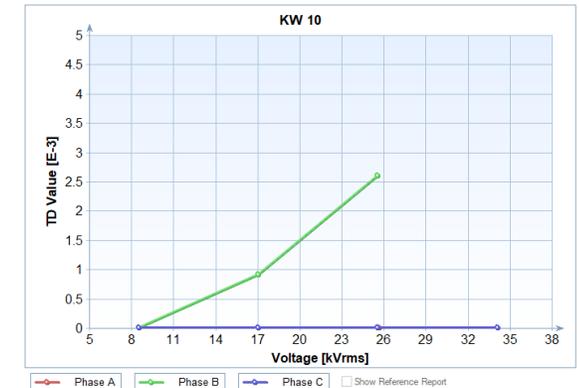


L3, bei 34 kV
 $f_c = 1 \text{ MHz} \pm 80 \text{ kHz}$



Übersicht Tangens-Delta – KW 10

- Gemessene Kapazität: 794 nF
- Kein Anstieg des Verlustfaktors über die Spannung für L1 und L3
- Verlustfaktor erhöht sich mit steigender Spannung



Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.1	25,6	34.1
TD Wert [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle 1 L1 mit 793 nF

Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.1	25.6
TD Wert [E-3]	0.1	0.91	2.6
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.10	0.03

Tabelle 2 L2 mit 795 nF

Prüfspannung [kV _{rms}]	8.5	17.1	25.6	34.1
TD Wert [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Abw. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabelle 3 L3 mit 794 nF

Hohe Tangens-Delta-Werte auf einer Phase

KW 10 – Zusammenfassung

- KW 10: 3x240mm², Al, PE, BJ.1970, 2,9 km Kabellänge, 17,5/ 30 kV
- Stabile Tangens-Delta-Werte auf der Phase L1 und L3
- Steigender Verlustfaktor auf Phase L2
- Geringere Stabilität der Messwerte
- Abbruch der Messung bei 25,5 kV

Test voltage [kV_{rms}]	8.5	17.1	25.6
MTD [E-3]	0.1	0.91	2,6
Std. Dev. [E-3]	0.01	0.30	0.01

▲ Steigender Tangens-Delta-Wert über der Prüfspannung, L2

◀ L1 und L3 zeigen ein gleiches Verhalten, hier exemplarisch L1

Test voltage [kV_{rms}]	8.5	17.1	25.6	34.1
MTD [E-3]	0.1	0.1	0.1	0.1
Std. Dev. [E-3]	0.00	0.00	0.00	0.00

Übersicht

- Grundlagen
 - Warum Very Low Frequency?
 - Zustandsanalyse
 - Normen zur VLF-Diagnose
- VLF-Diagnosemessungen
 - Prüfaufbau
 - Optimierung des Prüfaufbaus
- Ergebnisse
 - Gesundes Kabelsystem
 - Hohe Tangens-Delta-Werte auf einer Phase
 - Teilentladungen auf allen drei Phasen
 - Durchschlag auf einer Phase
- **Fehlersuche und Instandsetzung der Strecke**

Instandsetzung der Strecke

- Die Nachortung zeigte 1,8 km vom fernen Ende die Fehlerstelle.
- Beim Verbindungsstück vom Kabelkanal zur Hochbrücke ist das Kabel der Witterung ausgesetzt.



Fehlstelle



