

Trockentransformatoren in veränderten Netzen und die Herausforderungen bei der Diagnose

Bernhard Engstler, Christoph Engelen, OMICRON electronics

▶ Agenda

- ▶ Veränderungen im Mittelspannungsnetz, neue Stressfaktoren für Transformatoren
- ▶ Diagnosemöglichkeiten Isolation – ölisolierte Transformatoren vs. Trockentransformatoren
- ▶ Induzierte Spannungsprüfung mit TE-Messung
- ▶ Felderfahrungen und Fallbeispiele

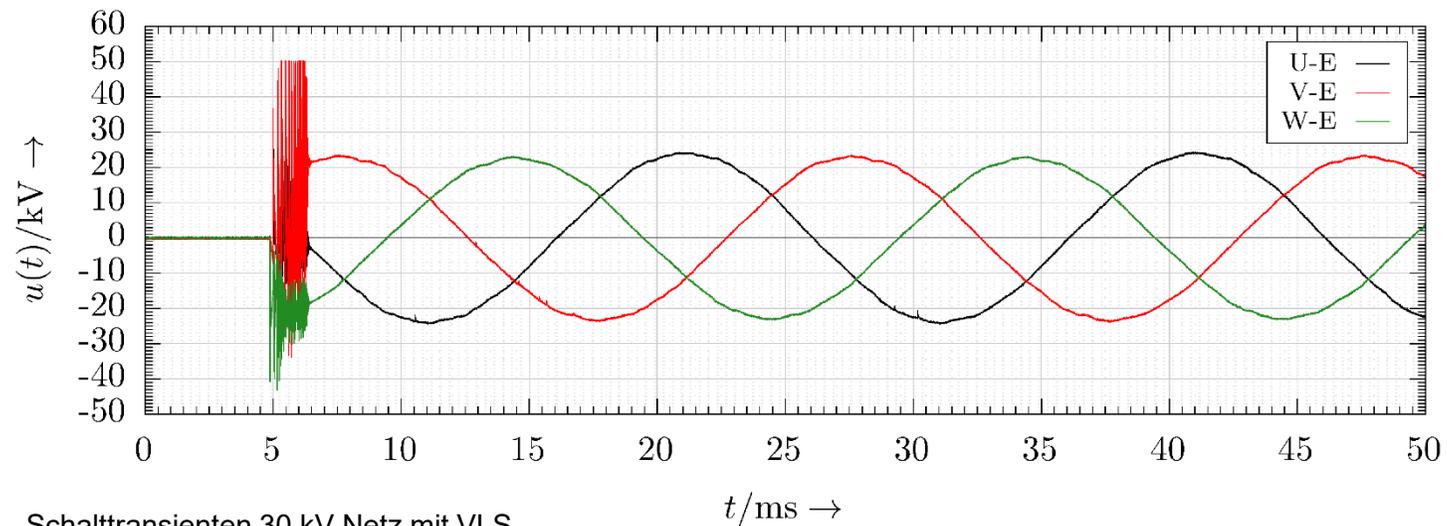
▶ Veränderungen und Herausforderungen

- ▶ PV-Anlagen schaffen neue Einspeisepunkte
 - ▶ Schnelle Lastwechsel, Lastrichtungswechsel
 - ▶ Infrastruktur muss ausgebaut werden => Hohe Nachfrage an Ortsnetzstationen => MS Transformatoren
 - ▶ Erhöhung Lieferzeiten MS Transformatoren => Wird Diagnose im MS-Netz immer relevanter?
- ▶ Gewichts- und Platzeinschränkungen (Bsp. Windenergie)
 - ▶ Herausforderungen an Materialien und Design
 - ▶ Grenzen von Isolationsfestigkeit werden schneller erreicht
 - ▶ Platzeinschränkungen erfordern portables Prüfequipment für vor-Ort Messungen
- ▶ Neue Technologien
 - ▶ Umrichter verursachen Oberwellen und hochfrequente Impulse
 - > Höhere Verluste durch Harmonische, zusätzliche thermische Belastung
 - > Resonanzeffekte im Transformator, erhöhter Stressfaktor für Isolation, Anregung von TE
 - ▶ Vakuumleistungsschalter erzeugen Schalttransienten, großes du/dt und di/dt
 - > Wiedertzündung, Wanderwellen, Reflexionen und Brechung führen zu sehr hohen Überspannungen am und im Transformator

► Schalttransienten

► Vakuum Leistungsschalter (VLS)

- Hartes schalten => großes du/dt und di/dt
- Wanderwellenvorgänge, Reflexionen und Brechungen können sehr hohe Spannungsspitzen erzeugen!
- Schädigung der Isolation => TE => Windungsschluss => Ausfall

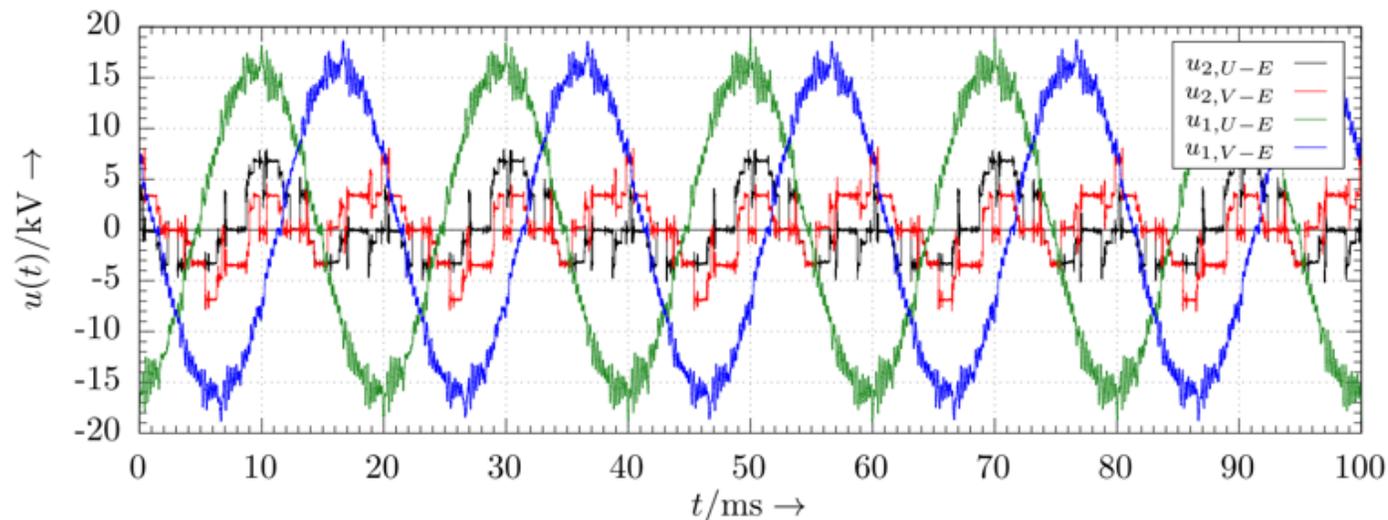


Schalttransienten 30 kV Netz mit VLS

Quelle: Roberto Schulze, OMICRON Diagnosewoche 2021, Ritz Instrument Transformers GmbH

► Anregung durch MS-Umrichter

- Schaltvorgänge von Umrichtern können Transformatorinterne Resonanzen anregen
 - Durch hochfrequente Schaltvorgänge der Umrichter sehr viele Anregungen pro Betriebsstunde
 - Zusatzbelastung für Isolation, Alterung
 - Durch Alterung Anregung von Teilentladungen bis hin zum Ausfall



Messung an Transformatoren mit Umrichtern auf der US-Seite

Quelle: Roberto Schulze, OMICRON Diagnosewoche 2021, Ritz Instrument Transformers GmbH

▶ Einsatz von Trockentransformatoren

- ▶ Einzug in vielen Anwendungsbereichen
 - ▶ Reduzierung von Brandlastrisiken
 - ▶ Grundwasserschutz
 - ▶ Wartungsarm
- ▶ Mittlerweile verfügbar für hohe Nennleistungen und Nennspannungen
 - ▶ Nennleistungen > 50 MVA
 - ▶ Nennspannungen bis zu 72,5 kV
- ▶ Diagnosemöglichkeiten der Isolation im Vergleich zu ölgefüllten Transformatoren eingeschränkt

▶ Gegenüberstellung Diagnosemöglichkeiten

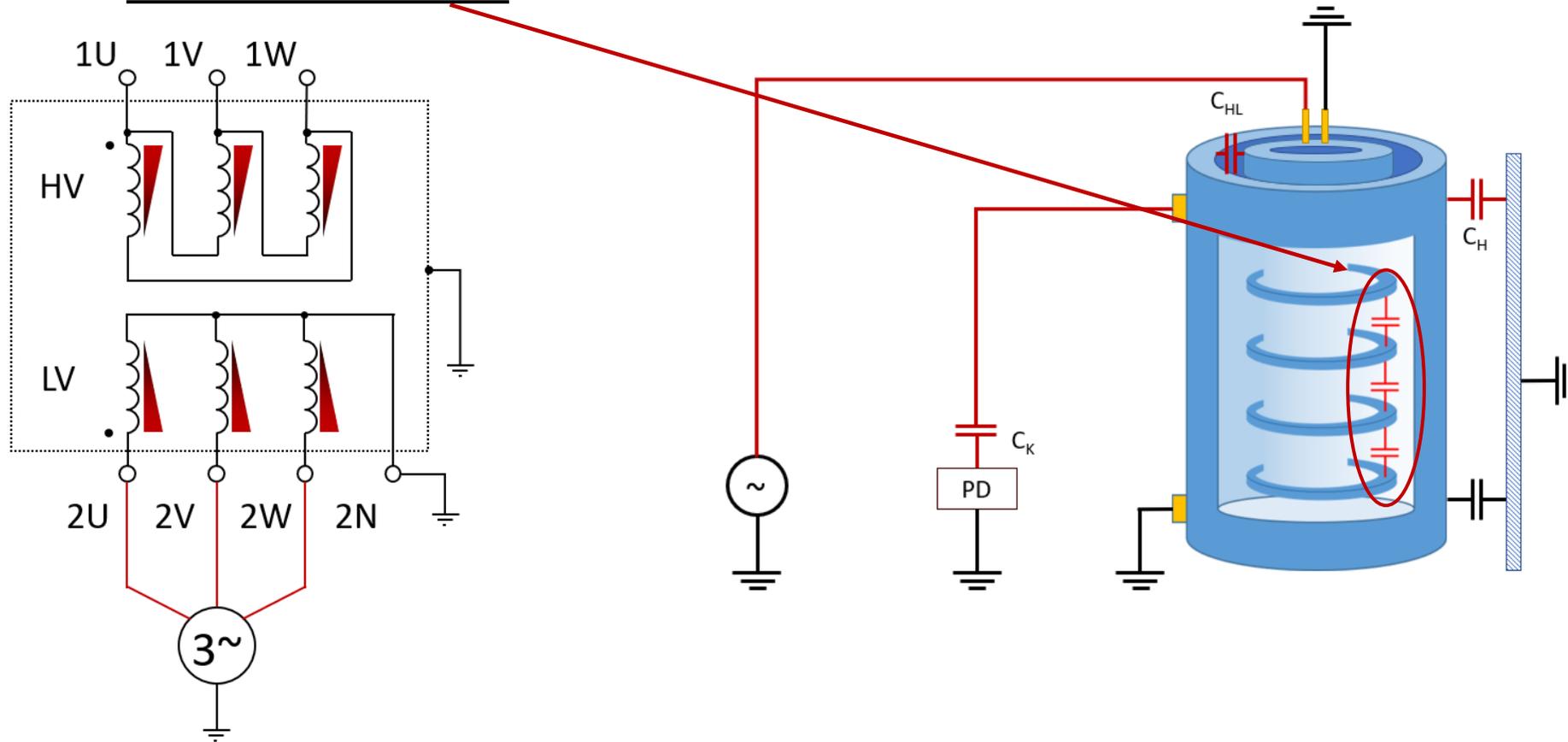
▶ Ölgefüllte Transformatoren vs. Trockentransformatoren (Fokus auf Isolation)

	Ölgefüllte Transformator		Trockentransformator	
Methode	Aufwand	Nutzen	Aufwand	Nutzen
DGA / Ölanalyse			n/A	n/A
Isolationswiderstand				
C-Verlustfaktor (δ Delta)				
Teilendladungsmessung				

▶ Induzierte Spannungsprüfung

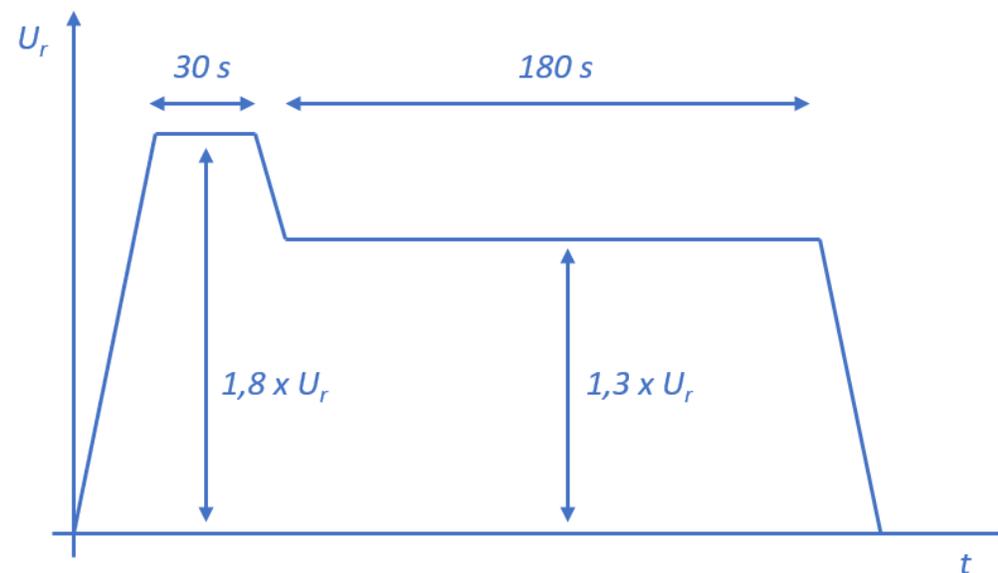
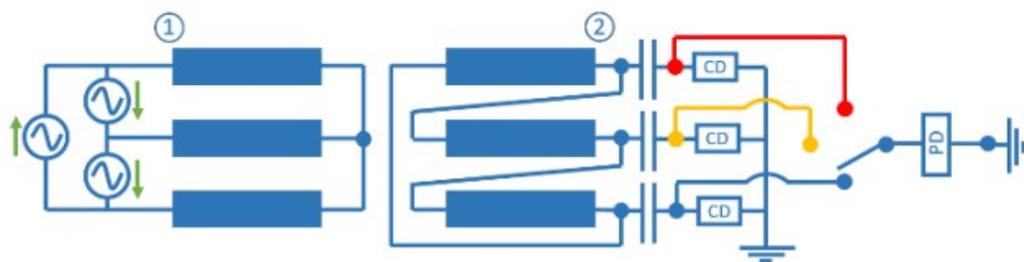
▶ Induzierte Spannungsprüfung

- ▶ Isolation Wicklung gegen Erde und andere Wicklungen wird belastet
- ▶ Lagenisolation wird ebenfalls belastet



▶ Induzierte Spannungsprüfung mit TE-Messung (IVPD)

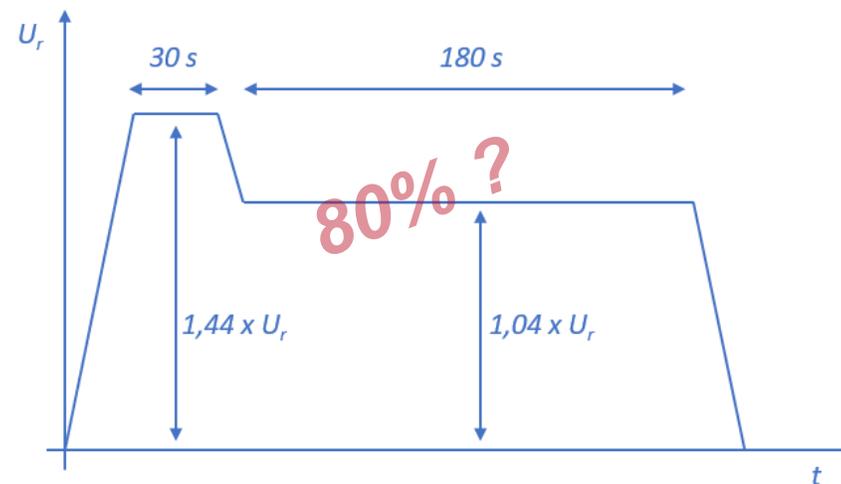
▶ Verfahren Werksprüfung nach IEC 60076-11



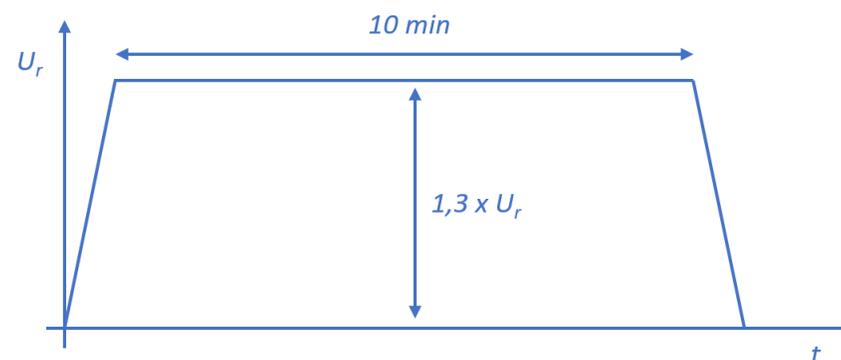
▶ Induzierte Spannungsprüfung mit TE-Messung (IVPD)

▶ Prüfzyklus und Bewertungskriterien vor Ort

- ▶ Wie wird der Transformator eingesetzt bzw. im Betrieb belastet?
- ▶ Was ist das Ziel der vor-Ort Messung?
- ▶ Bewertungskriterien
 - > Hersteller: Pass/Fail Kriterien, Qualitätssicherung
 - > Vor-Ort Messung:
 - Einsatzspannung
 - Klassifizierung der TE, Auswirkung auf Betriebssicherheit



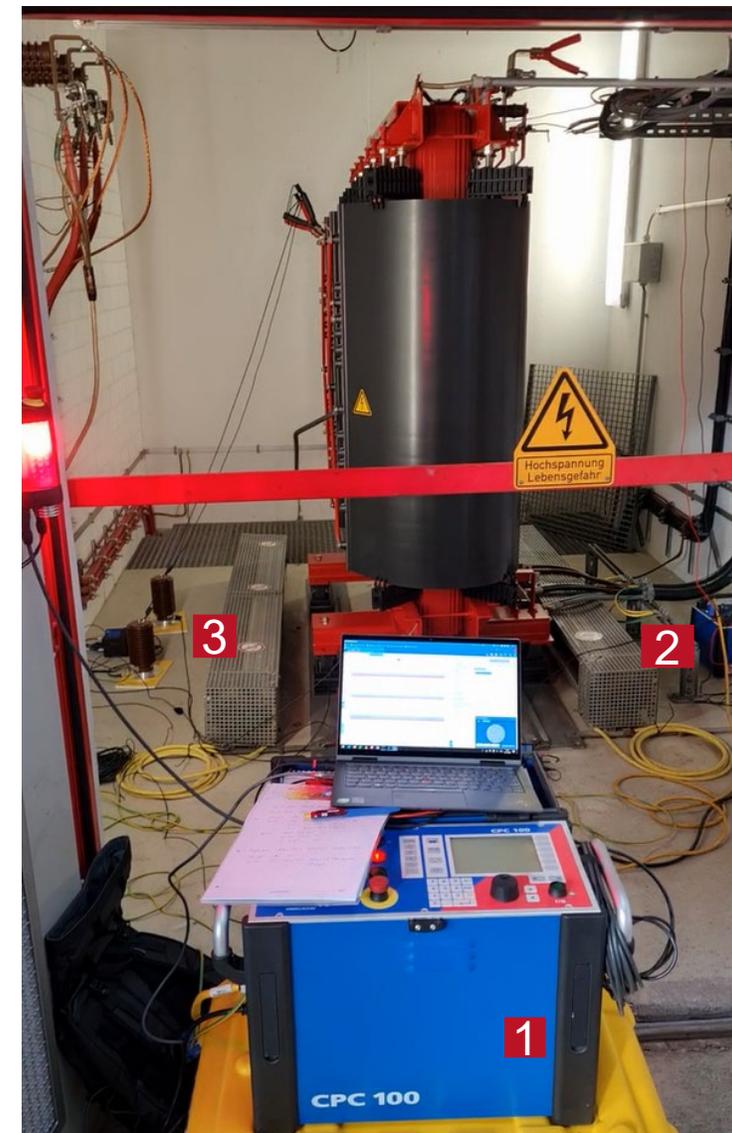
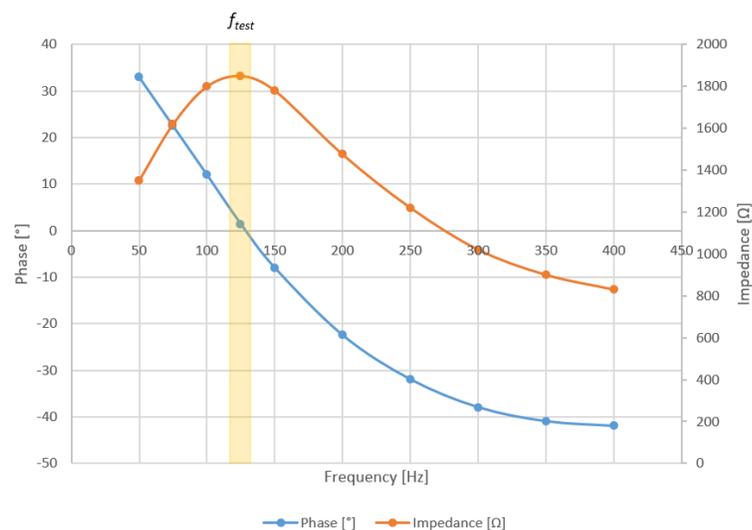
Vor Ort ??



▶ Induzierte Spannungsprüfung mit TE-Messung (IVPD)

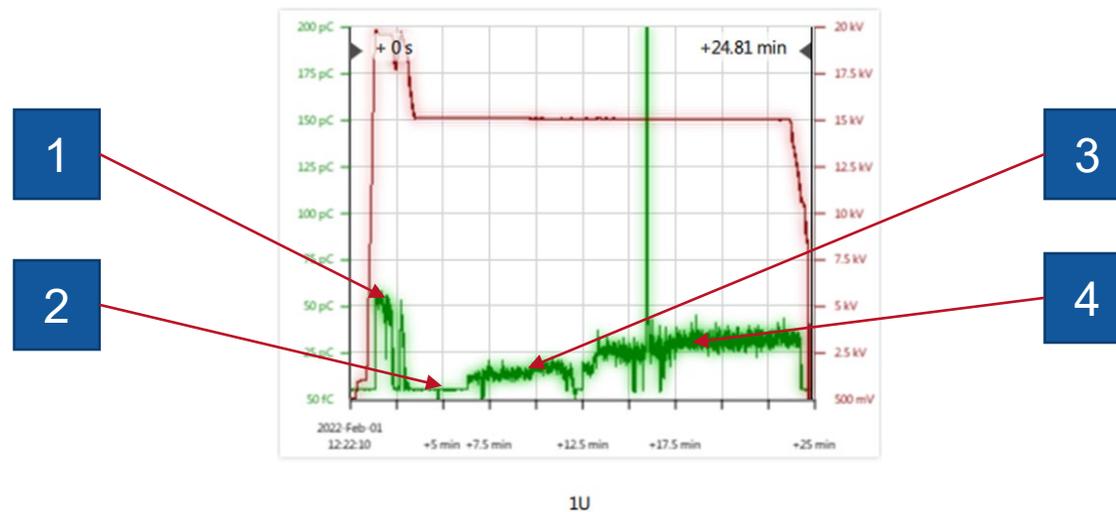
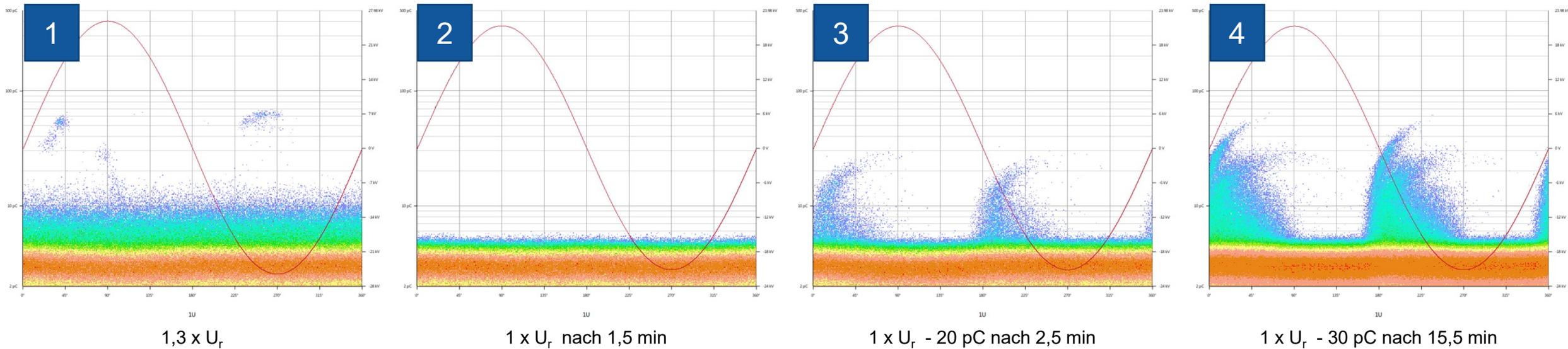
▶ Vor-Ort Prüfung - einphasig induzierte Spannungsprüfung

- ▶ Portable und frequenzvariable Spannungsquelle (1)
- ▶ Anpasstransformator (2)
- ▶ TE Messequipment (3)



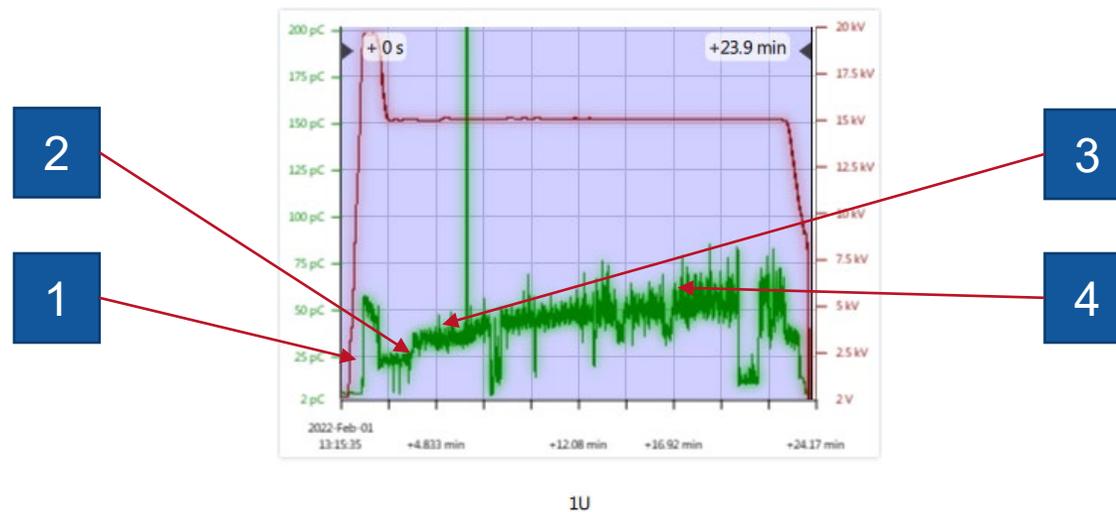
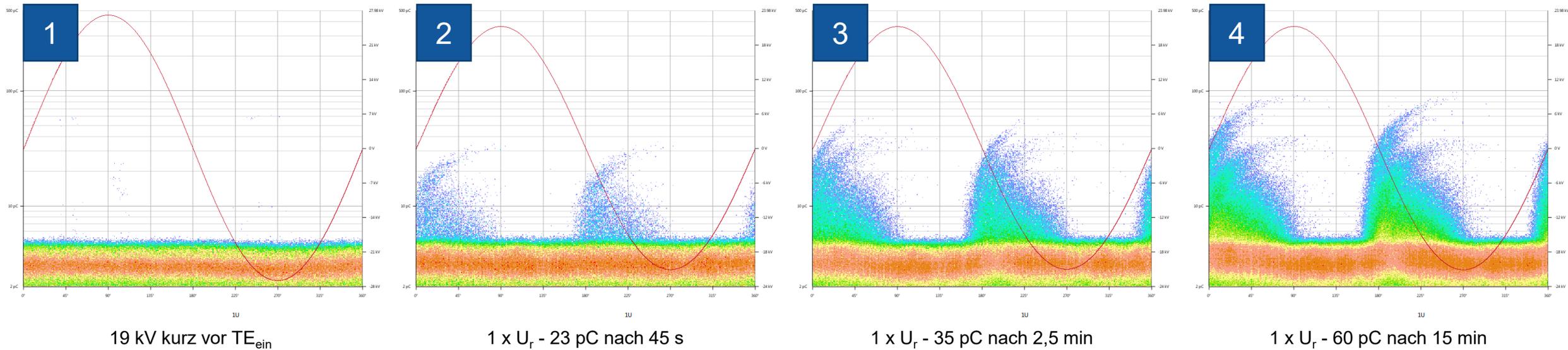
Fallbeispiel 1 - Prüfzyklen

Gießharztransformator Baujahr 2017: li0i0 15 kV / 2 x 1 kV – 1000 kVA – Erstprüfung



► Fallbeispiel 1 - Prüfzyklen

► Gießharztransformator Baujahr 2017: li0i0 15 kV / 2x 1 kV – 1000 kVA – Wiederholungsprüfung

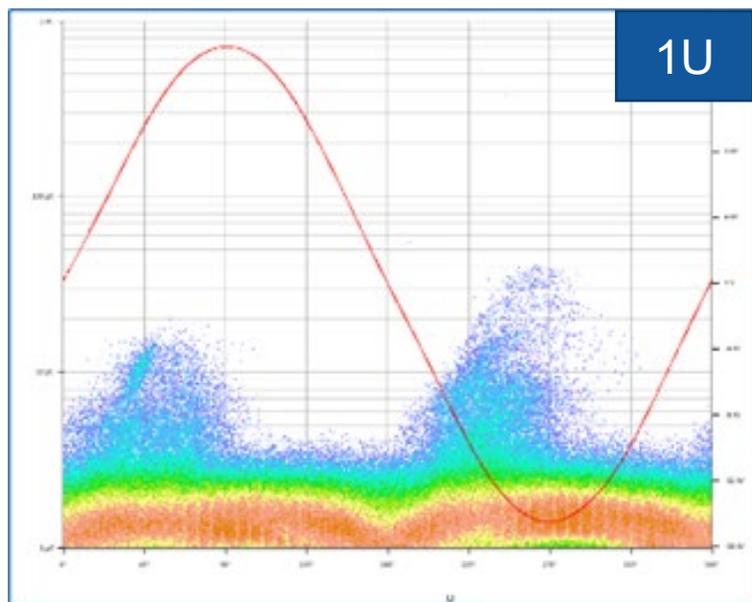


▶ Fallbeispiel 1 - Fazit

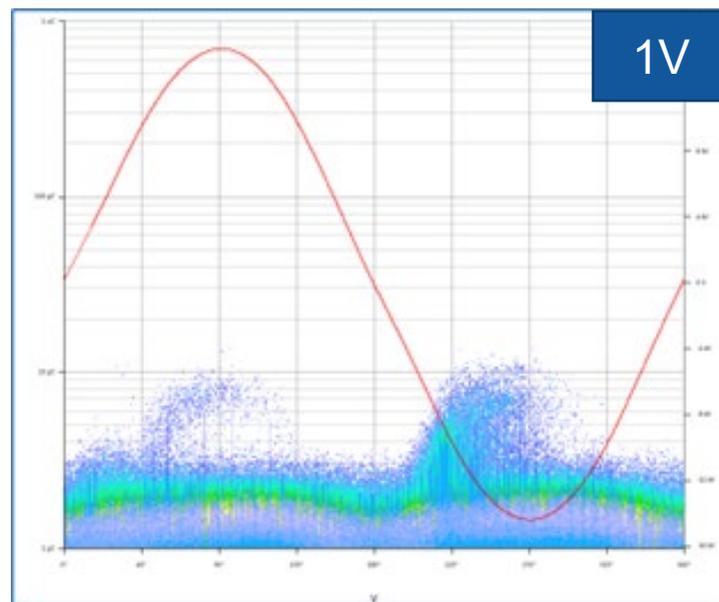
- ▶ Gewisse TE-Mechanismen brauchen eine Anregung
 - ▶ Vorstressphase für 30 s vor TE-Messphase
 - ▶ Bei verminderter oder fehlender Vorstressphase oder -spannung sollte die Messzeit erhöht werden
 - ▶ Einmal angeregt (z.B. Ionisierung im Hohlraum) treten TE bei kurz darauffolgenden Wiederholungsprüfungen schneller ein
- ▶ Interne TE wie Hohlraumentladungen können Zeitweise wieder aussetzen
 - ▶ Druck im Hohlraum steigt durch Erwärmung
 - ▶ Erhöhter Druck kann zum Zeitweisen Aussetzen von Hohlraumentladungen führen (Paschenkurve)
- ▶ Was bedeutet das für den Betrieb?
 - ▶ Anregung z.B. durch Oberwellen (Umrichter) bzw. Schaltspannungsspitzen

► Fallbeispiele 2 – TE-Trend Offline Messungen

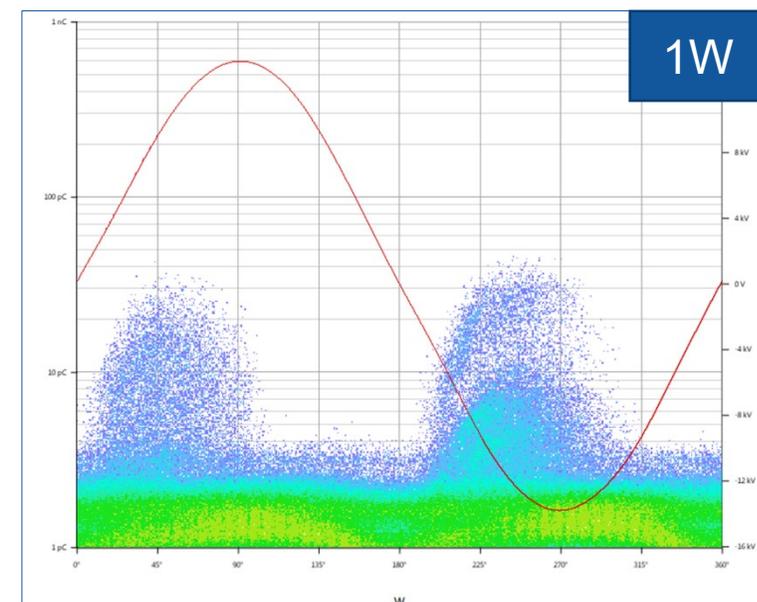
- Gießharztransformator Baujahr 2004: Dyn5 – 20 kV / 0,4 kV – 2500 kVA
 - Erstmessung 2020
 - Vorstressphase $1,3 \times U_r$, TE-Messung bei $1 \times U_r$
 - 25 pC – 45 pC
 - Trotz Reinigung, Muster deuten auf Oberflächenentladungen hin (weniger Kritisch wie Hohraumentladungen)
 - Empfehlung Wiederholungsmessung in einem Jahr



$1 \times U_r$



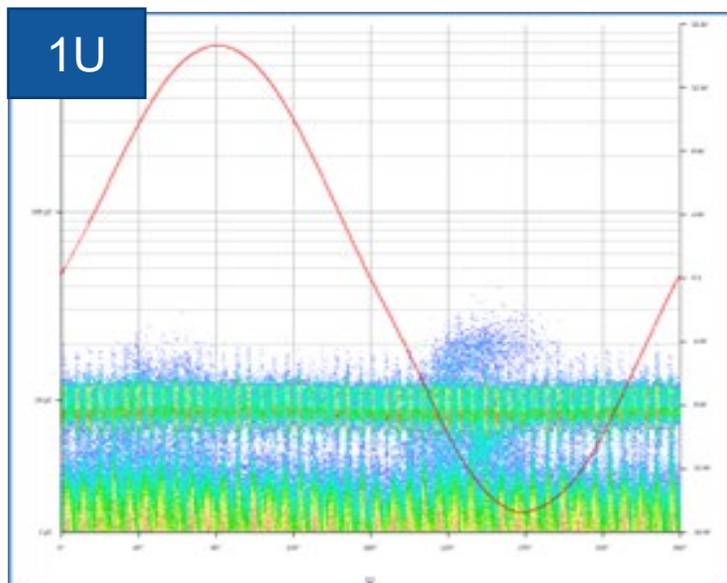
$1 \times U_r$



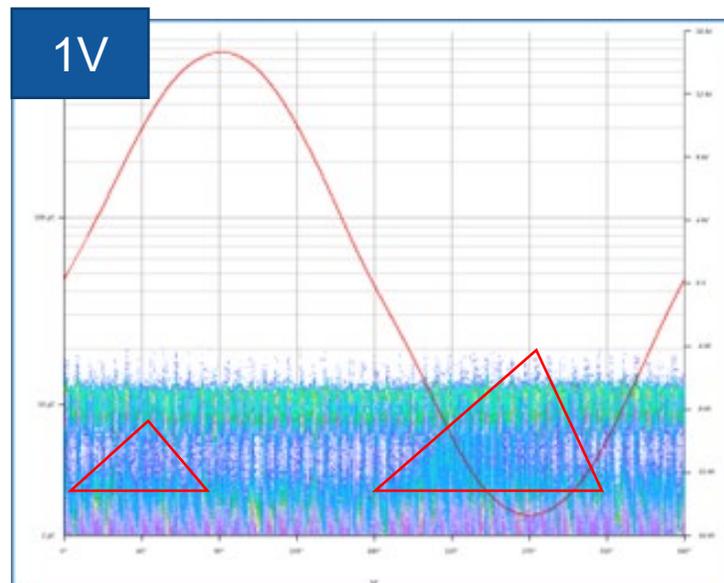
$1 \times U_r$

► Fallbeispiele 2 – TE-Trend Offline Messungen

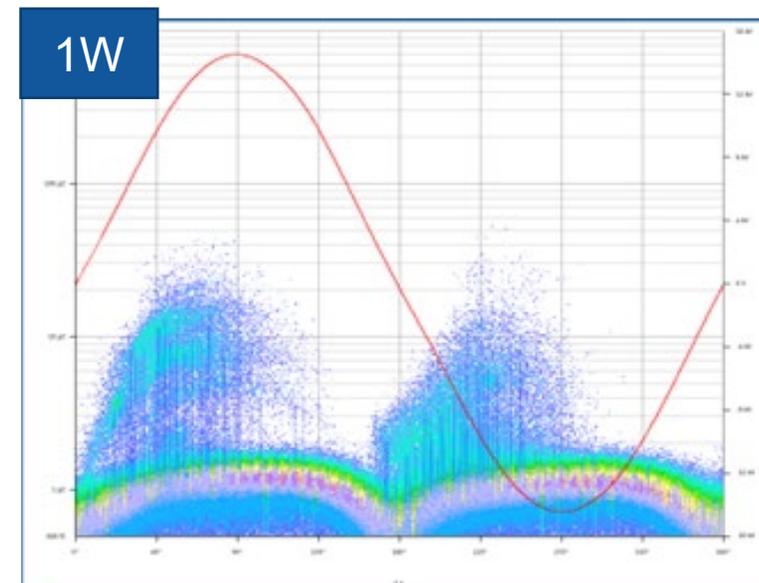
- Gießharztransformator Baujahr 2004: Dyn5 – 20 kV / 0,4 kV – 2500 kVA
 - Zweitmessung 2021
 - Zeitweise höhere Grundstörpegel, Muster jedoch erkennbar
 - 29 pC – 45 pC
 - Sehr Vergleichbar mit Erstmessung. Empfehlung: Wiederholungsmessung in zwei Jahren



1 x U_r



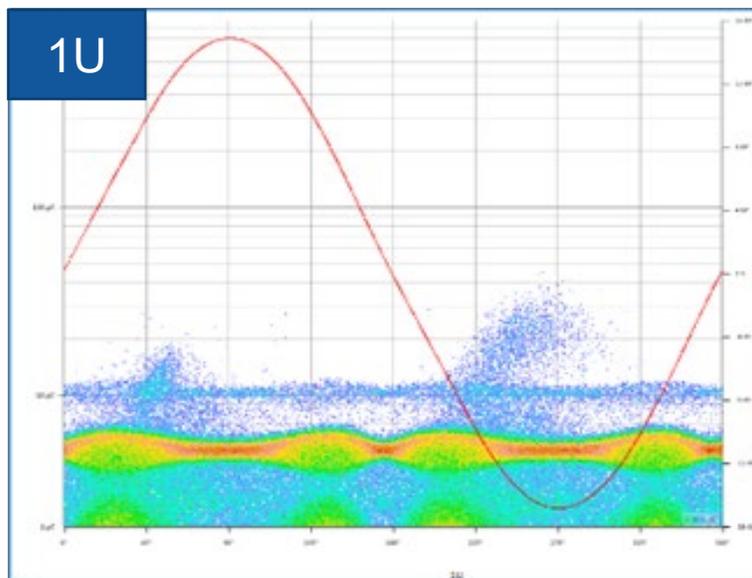
1 x U_r



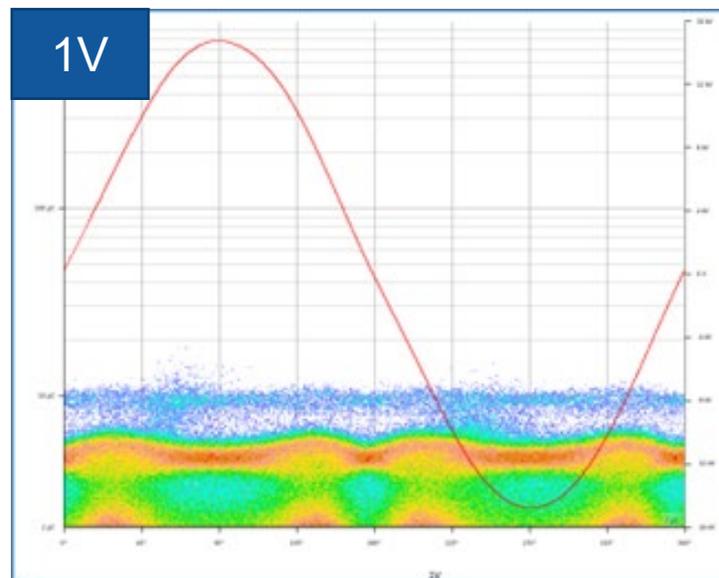
1 x U_r

► Fallbeispiele 2 – TE-Trend Offline Messungen

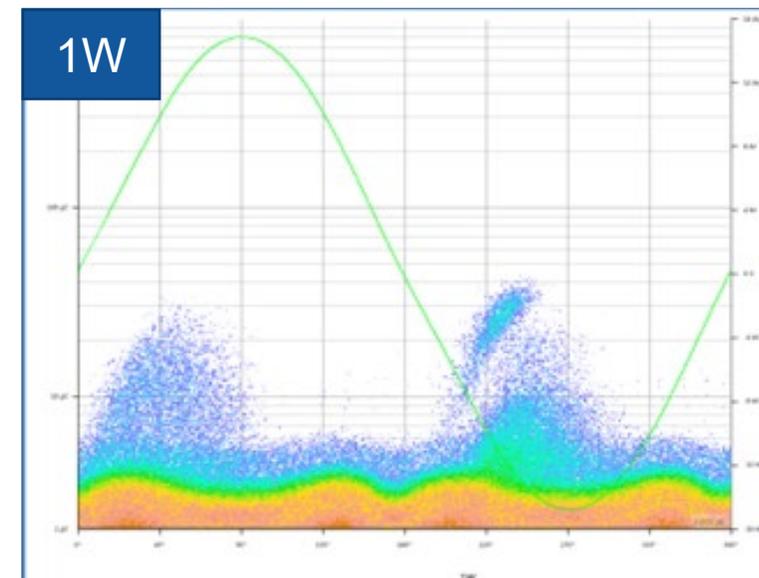
- Gießharztransformator Baujahr 2004: Dyn5 – 20 kV / 0,4 kV – 2500 kVA
 - Drittmessung 2023
 - 21 pC – 46 pC
 - Sehr Vergleichbar mit vorigen Messungen.



1 x U_r



1 x U_r



1 x U_r

▶ Fallbeispiel 2 - Fazit

- ▶ Sehr hohe Reproduzierbarkeit
 - ▶ TE-Muster trotz unterschiedlicher Störbedingungen wiedererkennbar mit geringen Veränderungen
 - ▶ TE-Pegel ziemlich konstant über drei Jahre
- ▶ Bewertung von Gefährdungspotential durch Bestimmung der Art der TE
 - ▶ Oberflächenentladungen trotz gründlicher Reinigung vor jeder Messung
 - ▶ Oberflächenentladungen weniger kritisch als interne / Hohlraumentladungen, keine visuellen Beeinträchtigungen
 - ▶ Feststoffisolierte Dreiecksverbindung mögliche Quelle der Oberflächenentladungen?



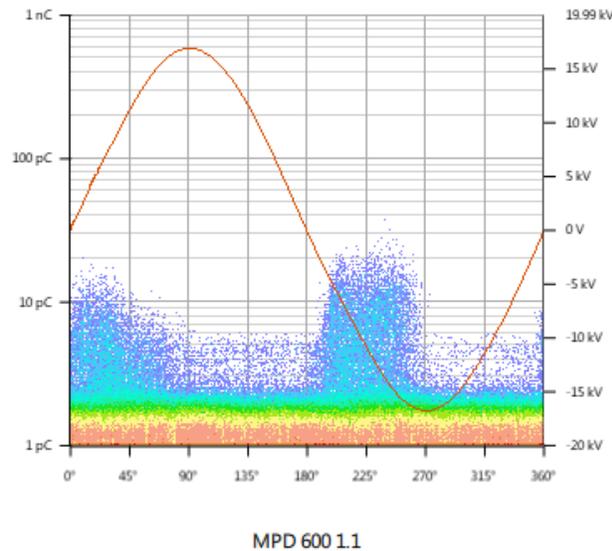
► Disclaimer

- ▶ Oberflächenentladung sind weniger kritisch für Betriebssicherheit
- ▶ Jedoch: Bei starken Oberflächenentladungen können Schäden entstehen (PD treeing)
- ▶ Wartungsarm bedeutet nicht Wartungsfrei!
 - ▶ Reinigung gehört zur Wartung

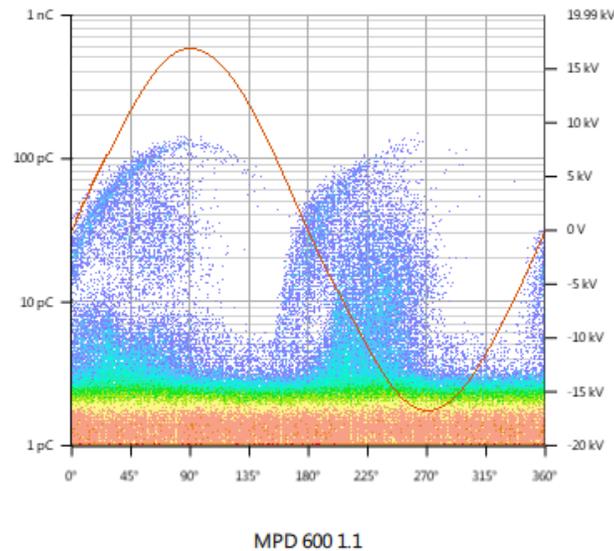


► Fallbeispiel 3

- Gießharztransformator Baujahr 2008: Dyn5 – 20 kV / 0,4 kV – 630 kVA
 - Erstprüfung 2019
 - TE Einsatzspannung bei nur 11,5 kV (0,57 x Ur L-L)
 - TE Muster nach 45 s deuten auf interne Entladungen hin
 - Empfehlung: Austausch des Transformators



Einsetzen TE bei 0,57 x U_r – 12 pC



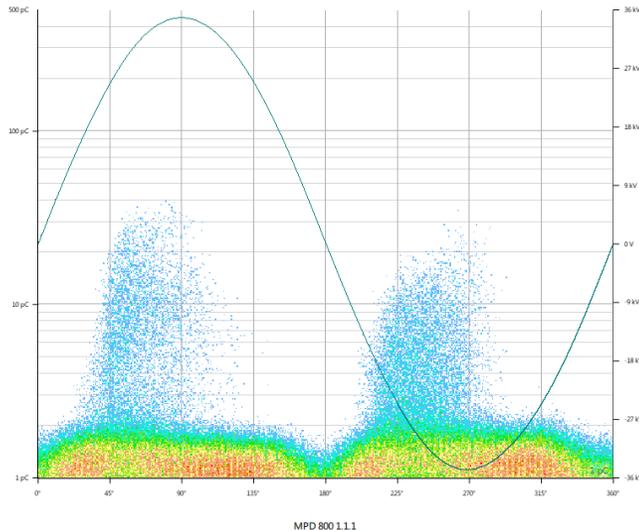
0,57 x U_r nach 45 s – 100 pC



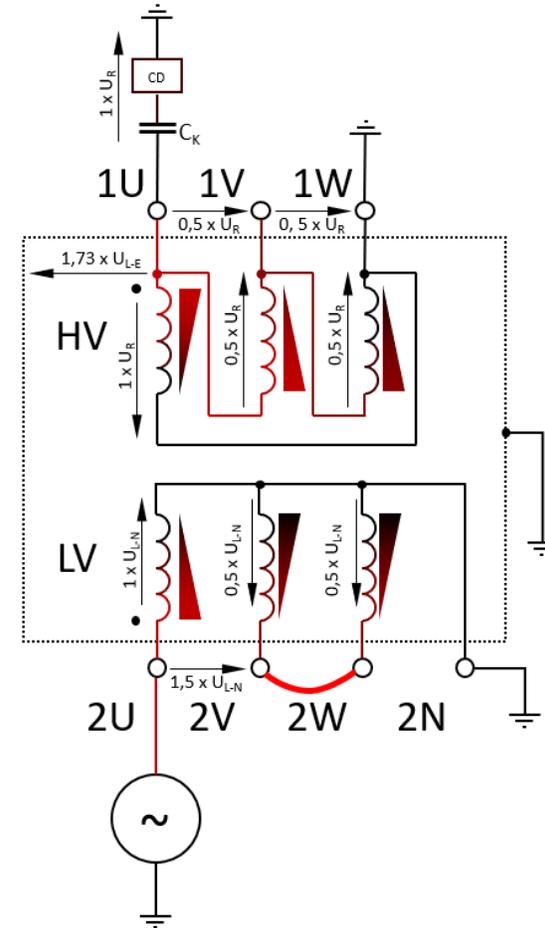
Fallbeispiel 4

► Gießharztransformator Baujahr 2017: Dyn1 – 22,5 kV / 0,4 kV – 160 kVA

- Oberflächenentladungen bei $1,1 \times U_r$
- Wie ist die Spannungsverteilung bei einphasiger Speisung?
- Leiter-Erde Isolation wird mit 1,73-facher Spannung belastet! (Vergleich zu Drehstromspeisung)
- Oberflächenentladungen werden begünstigt

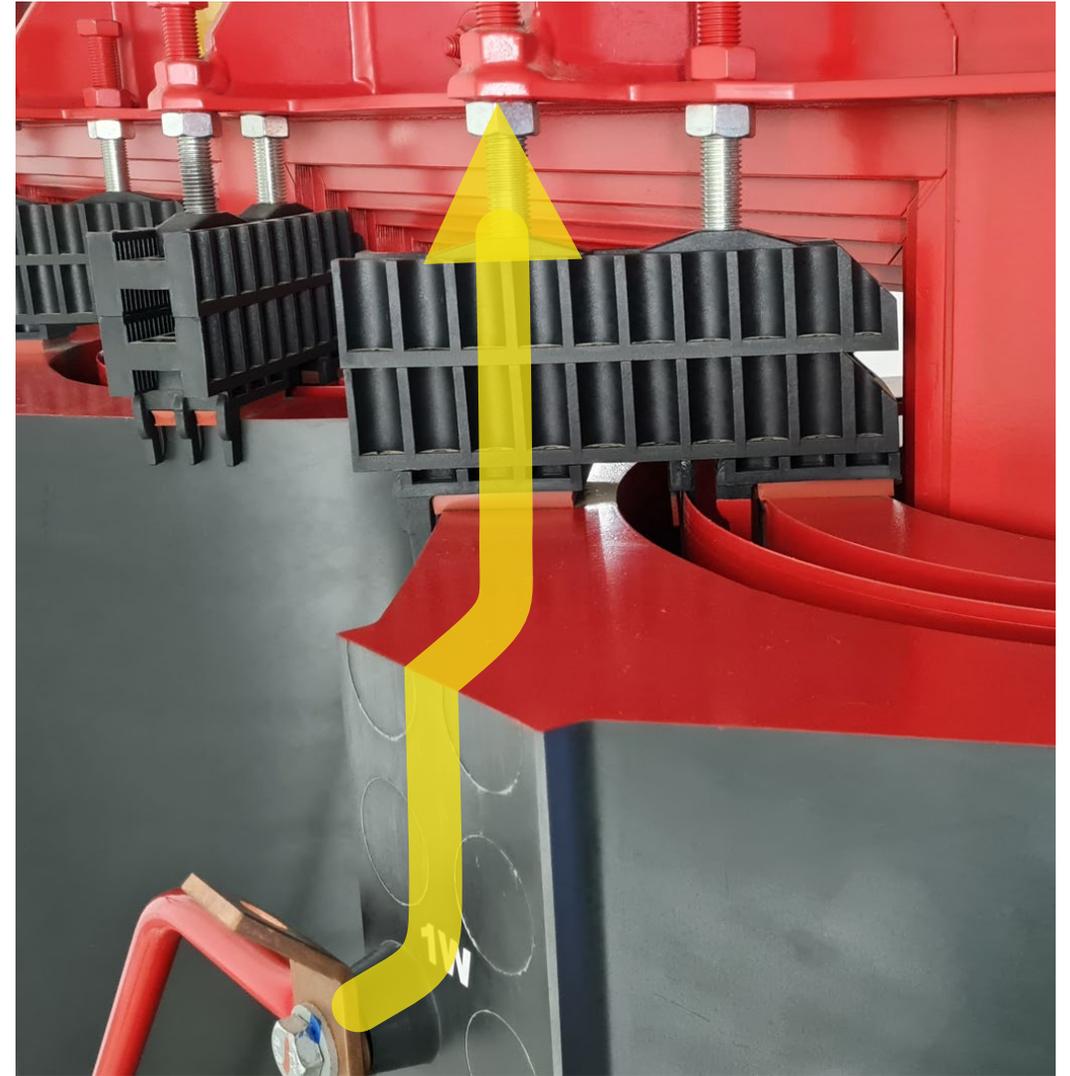


MPD 800 111
PRPD bei $1,1 \times U_r$ – 26 pC



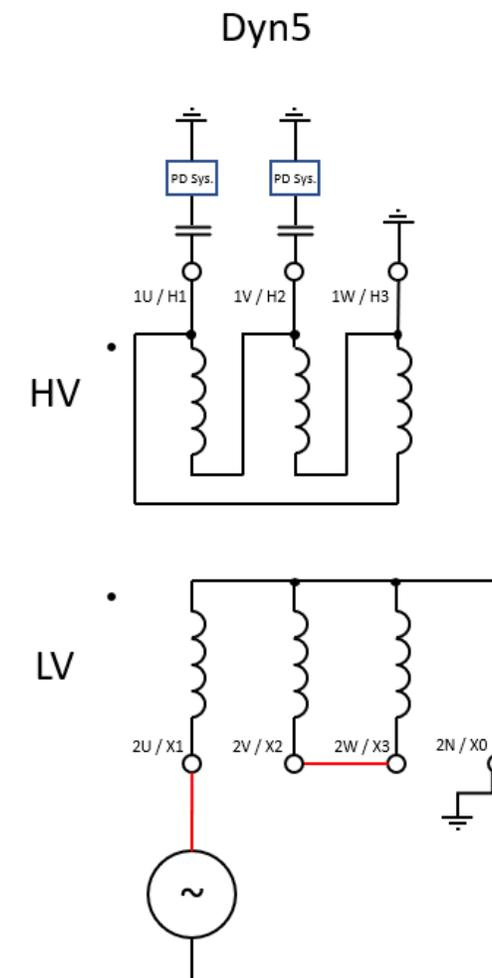
▶ Fallbeispiel 4

- ▶ Wie sieht diese Leiter-Erde Isolation bei Gießharztransformatoren aus?
 - ▶ Kriechwege an der Spulenoberfläche und Stütz- / Spannelementen
 - ▶ In der Regel gut zugänglich und sichtbar für visuelle Inspektion
 - ▶ Verschmutzung und Luftfeuchtigkeit begünstigen TE
 - ▶ Keine Aussage über Zustand der internen Isolierung / Lagenisolation
 - ▶ => Für TE-Messung und Diagnostik zweitrangig



Fazit

- ▶ Auswahl einer geeigneten Messanordnung wichtig für die einphasige Prüfung vor Ort
 - ▶ Fokus auf Belastung der Lagenisolation bei Trockentransformatoren
 - ▶ Vermeidung von Oberflächenentladungen
- ▶ Dual-end Messung bietet Vorteile
 - ▶ Beidseitige Messung der zu prüfenden Spule
 - ▶ TE Fehler die am „entfernten“ Ende auftreten besser Erkennbar
 - ▶ Klassifizierung der TE-Quelle(n)
 - ▶ TE-Quellen innerhalb der Wicklung haben entgegengesetzte Polarität an beiden C_k
 - ▶ TE-Quellen zu Erdpotential hin (z.B. Oberflächen- und Corona Entladungen) haben die gleiche Polarität an beiden C_k



► Zusammenfassung

- ▶ Erfahrung zeigt dass Diagnoseverfahren in Mittelspannungsnetzen immer relevanter wird
- ▶ Induzierte Spannungsprüfung kombiniert mit TE Messung ist ein sehr gutes Diagnosetool
- ▶ Vor-Ort Messungen und Diagnose bedingen andere Anforderungen an Messabläufe und Prüfequipment als Werksmessungen