Diagnose am Transformator

Neuste Entwicklungen in der Messtechnik

Trafo im Fokus, 19.09.2019

Lutz Hulka

Megger

Power on

Megger Historischer Überblick

1889 - Erstes tragbares Isolationsprüfgerät von Sydney Evershed

1903 - Megger wird als Markenzeichen registriert

1923 - Das erste AVO-Multimeter wird verkauft

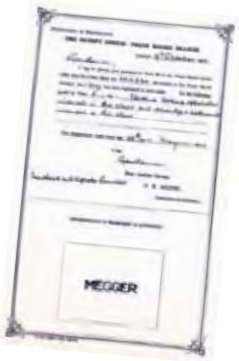
1991 - Gründung der Megger-Gruppe (Megger, Biddle, Multi-Amp)

2005 - Übernahme von Programma, Schweden

2012 - Übernahme von SebaKMT (Seba Dynatronic & Hagenuk KMT)

2018 - Übernahme von Baker Instruments

2019 - Übernahme von Power Diagnostix Instruments, Aachen



1889 hat Sidney Evershed in London den ersten Megaohmeter (Isolationstester) entwickelt. Vielen ist unser berühmter Kurbelinduktor noch heute ein Begriff.

Unsere Kernmarke „Megger“ ist ein Silbenwort. Es leitet sich ab aus dem Wort „Megaohmmeter“. Seit 1903 ist „Megger“ als Marke geschützt. Die original Urkunde existiert noch heute.

Unsere weltweiten Produktionsstandorte

Zentrale: Dover (UK)

Dallas (TX, USA)

ValleyForge (PA, USA)

Danderyd (SE)

Standort: Baunach (DE)

Radeburg (DE)

Fort Collins (CO, USA)

Aachen (DE)

Megger.
Power on

Entdecken Sie die Welt der Mess- und Prüftechnik von Megger

Kabelfehlerortung, Prüfung und Diagnose

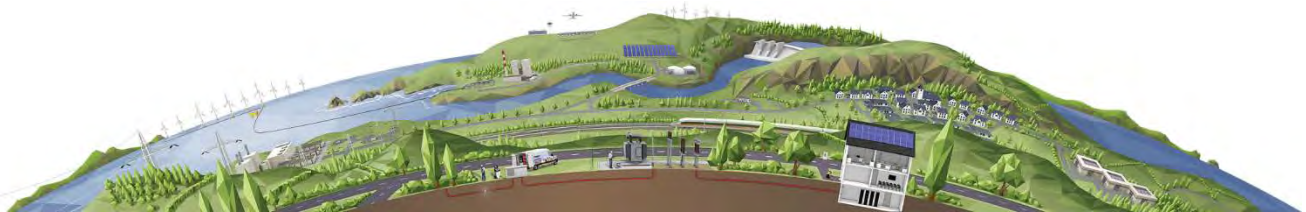
Leistungsschalteranalyse

DIN VDE Prüfungen

Schutzrelaisprüfung

Transformatorprüfung

Isolations- und Batterie-prüfung



Megger.
Power on

Neue Entwicklungen – warum?

- Thema Sicherheit von immer größerer Wichtigkeit
- Größerer Bedarf an Diagnostik,
  Umstellung von „time-based Maintenance“ auf
  „Condition based Maintenance“
- Einzug von Computer (Mikreprozessoren) auch bei
  Prüfgeräten eröffnet völlig neue Möglichkeiten
  - Automatisierte Prüfabläufe
  - Intuitive Benutzerführung
  - Direkte Auswertung/Analyse der Messergebnisse am Gerät
- Neue, innovative (Prüf-)Verfahren

Megger
Power on

”Diagnostic” matrix CIGRE TB445

	Type of Problem	Magnetic Circuit Integrity	Magnetic Circuit Insulation	Winding Geometry	Winding/Bushing/OLTC Continuity	Winding/Bushing Insulation	Winding Turn to Turn Insulation
	Diagnostic Technique						
Basic Electrical	Winding Ratio	•					
	Winding Resistance			•			
	Magnetisation current	•					•
	Capacitance and DF/PF		•		•	•	•
	Leakage Reactance				•		
	Insulation Resistance		•			•	
	Core Ground Test					•	
Advanced Electrical	Frequency Response of Stray Losses			•	•		
	Frequency Response Analysis	•			•	•	•
	Polarisation/Depolarisation		•				
	Frequency Domain Spectroscopy		•				
	Recovery Voltage Method		•				
	Electrical Detection of PD	•	•				
	Acoustical Detection of PD	•	•				
	UHF Detection of PD	•	•				
	Dissolved Gas Analysis	•	•	•		•	•

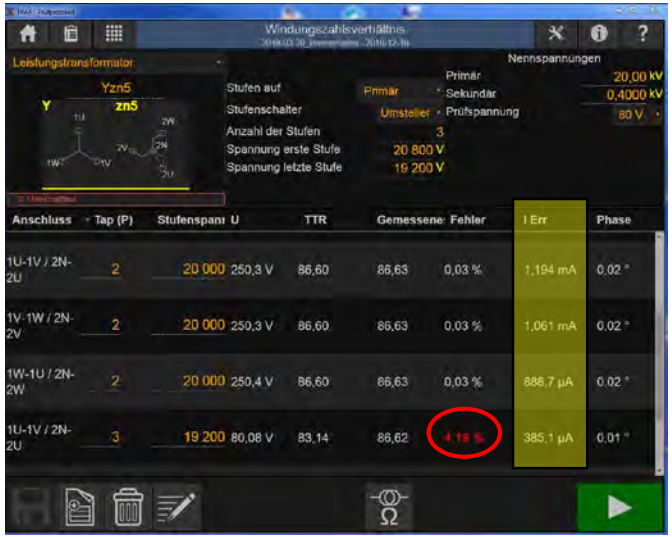
Table 29: Electrical Tests and DGA Diagnostic Matrix

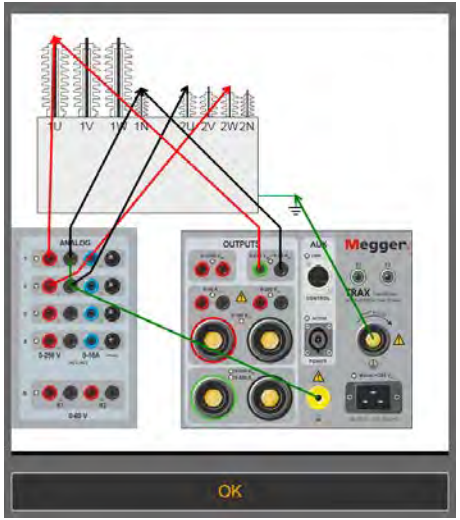
Megger
Power on

Innovation in TTR-Prüfung

Höherer Komfort durch einfachere Benutzerführung

- Schaltgruppe, Nenngrößen und Anzahl Stufen angeben
- Verdrahtungshinweise bekommen, Prüfung starten
- Automatische Bewertung der Messergebnisse
- Zusatzinformation Erregerstrom





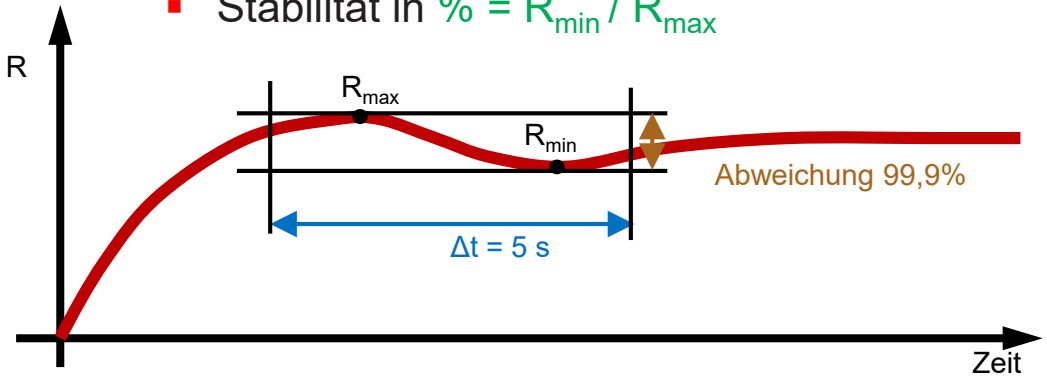
Megger
Power on

Innovationen in WRM - Prüfung

- Automatische Berechnung des Widerstands bei Referenztemperatur
- Automatische Messwerterfassung bei Erfüllen definierter Stabilitätskriterien
- Viele Sicherheitsfunktionen schützen den Benutzer, das Prüfobjekt und das Prüfgerät (z.B. automatische Entladung)
- Simultane Wicklungsmagnetisierung
- Adaptiver Algorithmus zur schnellen Entmagnetisierung

Temperaturkorektur & Auto-Stopp

- Gemessener Widerstand ist eine Funktion der Wicklungstemperatur
- Korrektur des Widerstands bei bekanntem Material und Temperaturen
- Kriterien für Stabilität:
  - in einem gewissen Zeitraum Δt
  - Stabilität in % = R_{min} / R_{max}



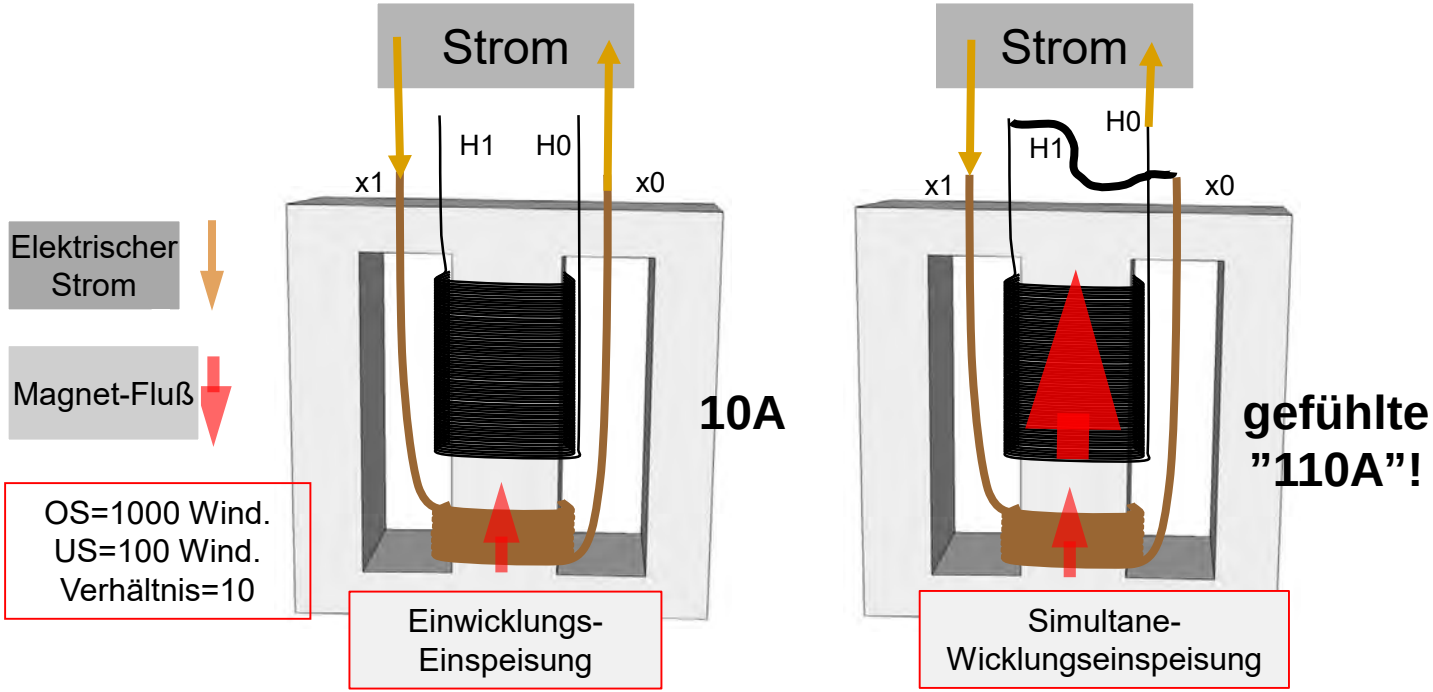
Megger
Power on

Simulatane Wicklungs-Magnetisierung

- **Problem:**
  - Bei US-Wicklung von großen Yd-Trafos (Maschinentrafo) benötigt man viel Zeit zum Stabilisieren
- **Lösung:**
  - Starke Quelle, die neben hohem Strom (>50A) auch ausreichend Spannung (z.B. 50V) liefert
  - Simultane Wicklungs- Magnetisierung (SWM); Stromeinspeisung in beide Wicklungen (OS/US) gleichzeitig!

Megger
Power on

SWM – Verstärken der Magnetisierung



Magnetisierung steigt mit Faktor des Wicklungsverhältnis
10A Prüstrom X 10 Wicklungsverhältnis= **110 A** ”effektiver Magnetisierungsstrom” für die US-Messung!

Megger
Power on

Dynamische Widerstandsmessung DRM - Stufenschalter Diagnose

- Stufenschalter eine Hauptquelle für Fehler im Trafo
- Cigre A2-37 Transformer Reliability Survey (2015)
  - Häufigste Fehler:
    - Wicklung(en), 40%
    - Stufenschalter, 27%
    - Durchführungen, 17%
    - Ausleitungen, 7%
  - Stufenschalter Hauptfehlergrund für Transformatoren älter als 1978
  - Fehlerrate für Stufenschalter ist kleiner geworden, verglichen mit älterer Statistik (1983)

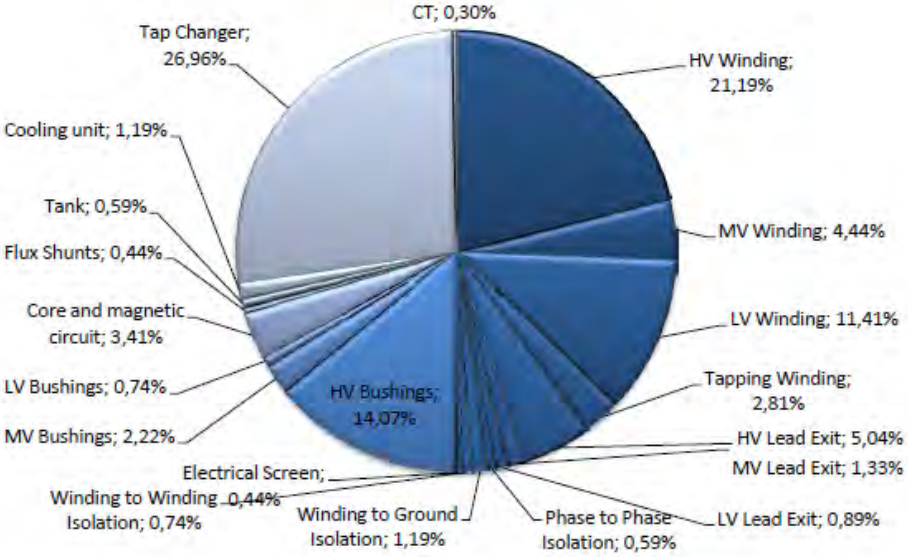
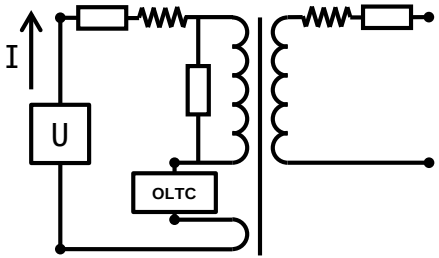


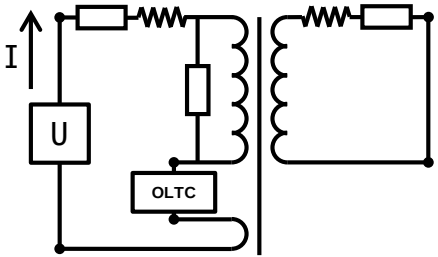
FIGURE 35: FAILURE LOCATION ANALYSIS BASED ON 675 MAJOR FAILURES FOR U≥100KV

Megger. Power on

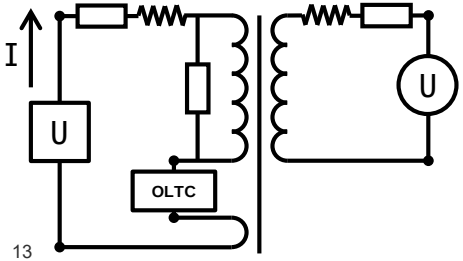
Verschiedene Verfahren



- US offen, keine separate Messung nötig (WRM)
- Ergebnisse Stromabhängig (Ripple & Slope)



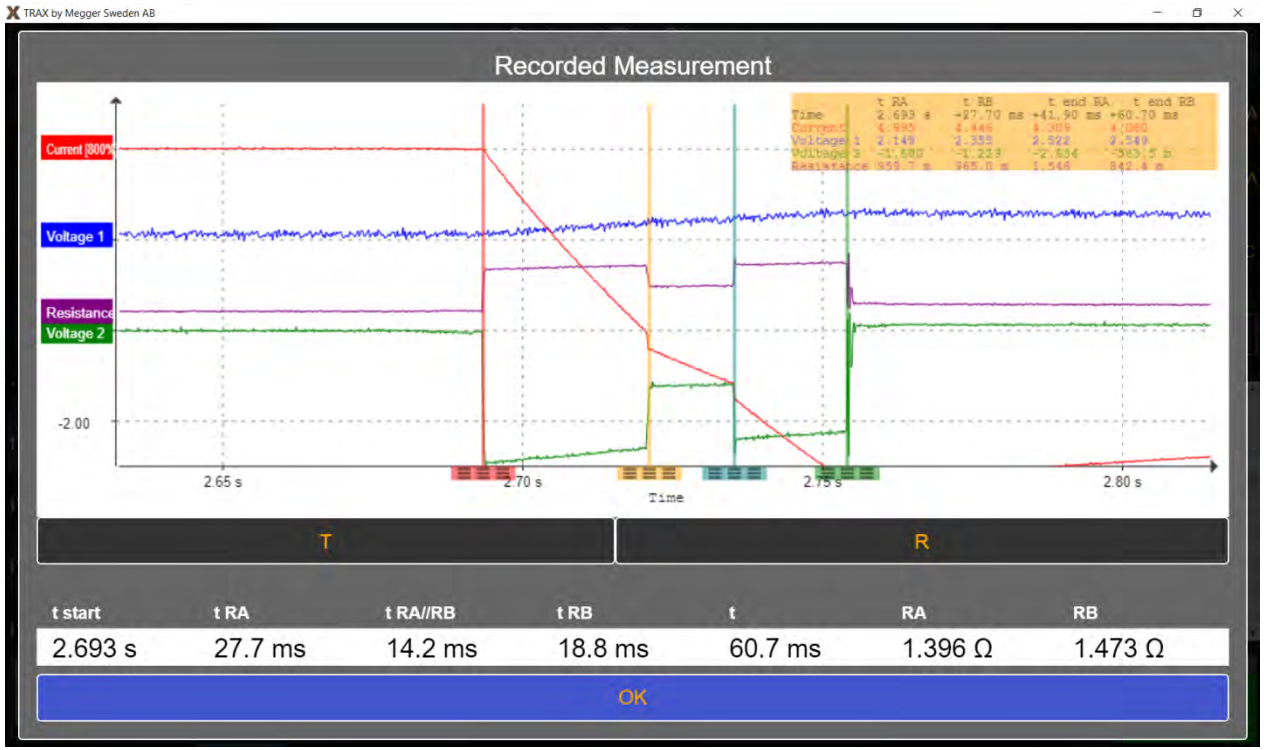
- US Kurzschluß, separate Messung
- Schaltzeiten und Schaltwiderstände messbar



- US offen, Spannungsmessung auf US, keine separate Messung nötig (WRM)
- Schaltzeiten und Schaltwiderstände messbar

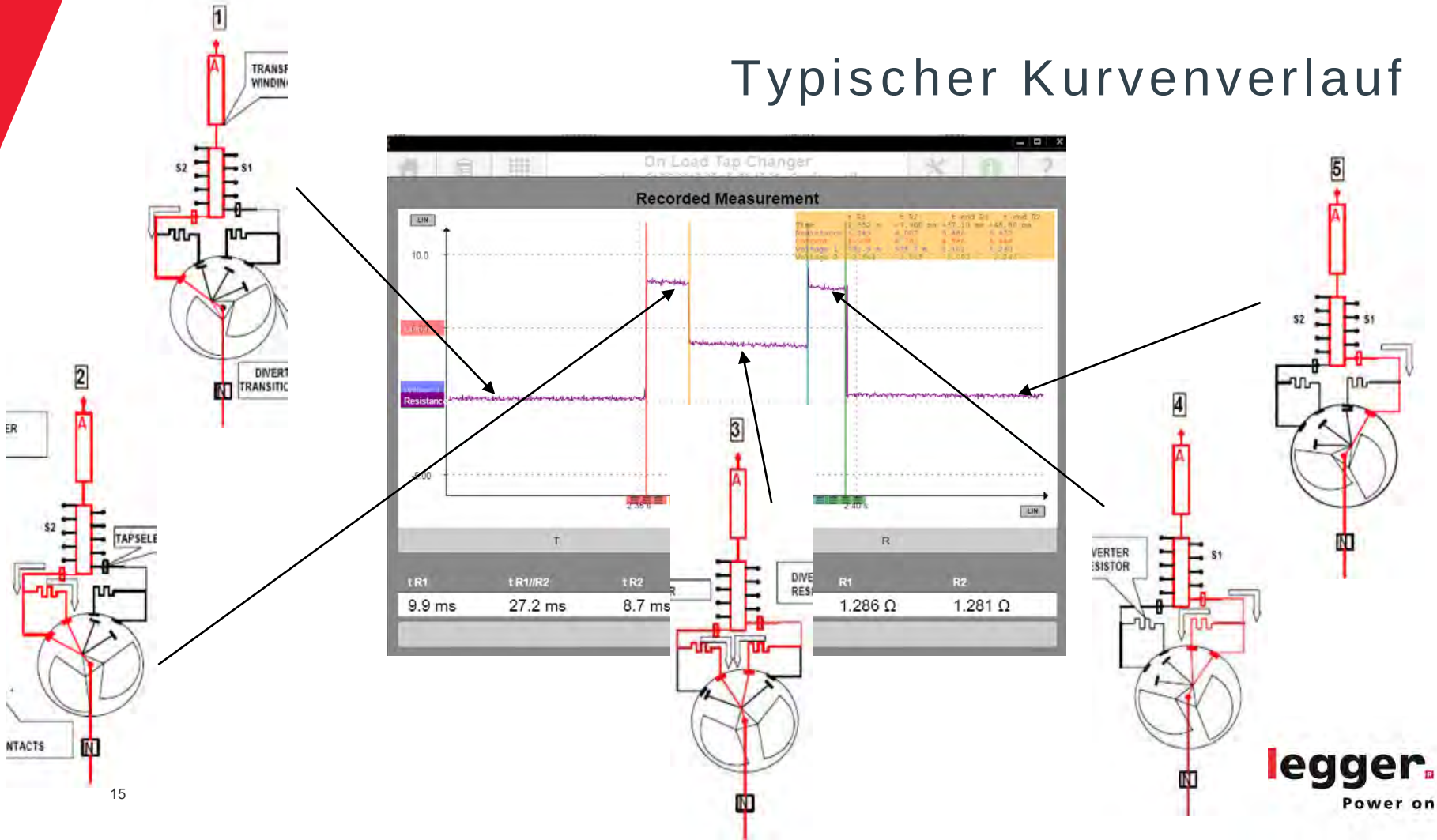
Megger
Power on

DRM Messergebnis



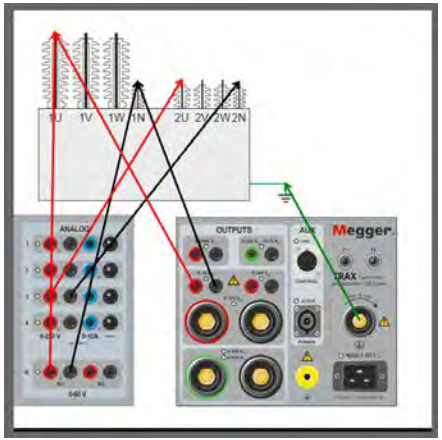
Megger.
Power on

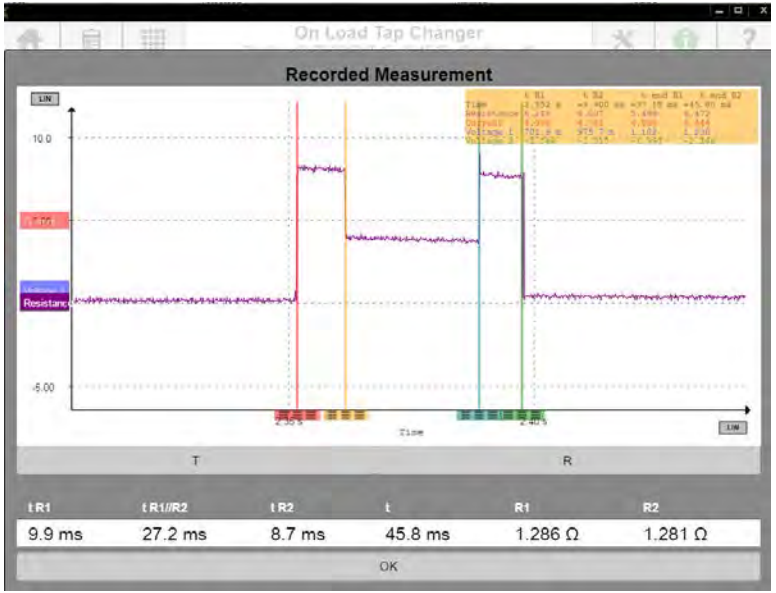
Typischer Kurvenverlauf

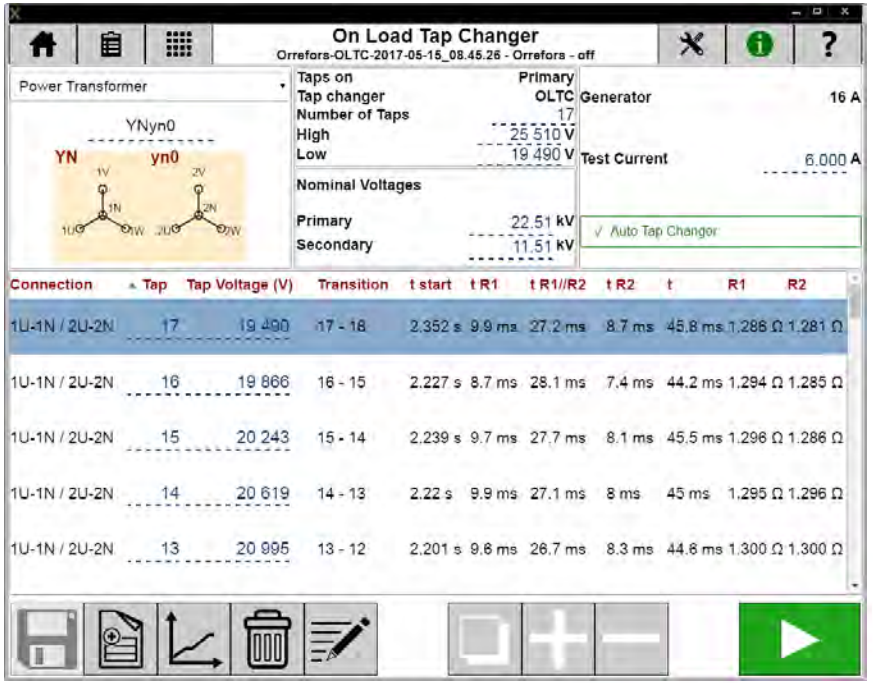


legger
Power on

OLTC DRM


1U 1V 1W 1N
2U 2V 2W 2N
ANALOG
OUTPUTS
AUX
Megger
TRAX


On Load Tap Changer
Recorded Measurement
10.0
-5.00
Resistance
Time
T
R
t R1
t R1//R2
t R2
t
R1
R2
9.9 ms
27.2 ms
8.7 ms
45.8 ms
1.286 Ω
1.281 Ω
OK


On Load Tap Changer
Orrefors-OLTC-2017-05-15_08.45.26 - Orrefors - off
Power Transformer
YNyn0
YN
yn0
Taps on Primary
Tap changer OLTC
Number of Taps 17
High 25.510 V
Low 19.490 V
Nominal Voltages
Primary 22.51 kV
Secondary 11.51 kV
Generator 16 A
Test Current 6.000 A
Auto Tap Changer
Connection Tap Tap Voltage (V) Transition t start t R1 t R1//R2 t R2 t R1 R2
1U-1N / 2U-2N 17 19.490 17 - 18 2.352 s 9.9 ms 27.2 ms 8.7 ms 45.8 ms 1.286 Ω 1.281 Ω
1U-1N / 2U-2N 16 19.866 16 - 15 2.227 s 8.7 ms 28.1 ms 7.4 ms 44.2 ms 1.294 Ω 1.285 Ω
1U-1N / 2U-2N 15 20.243 15 - 14 2.239 s 9.7 ms 27.7 ms 8.1 ms 45.5 ms 1.296 Ω 1.286 Ω
1U-1N / 2U-2N 14 20.619 14 - 13 2.22 s 9.9 ms 27.1 ms 8 ms 45 ms 1.295 Ω 1.296 Ω
1U-1N / 2U-2N 13 20.995 13 - 12 2.201 s 9.8 ms 26.7 ms 8.3 ms 44.6 ms 1.300 Ω 1.300 Ω

Frequenzantwort der Streuverluste

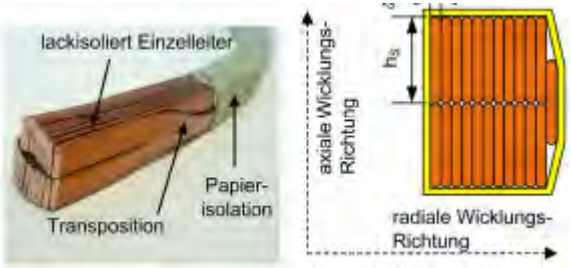
Frequency Response of the Stray Losses (FRSL)

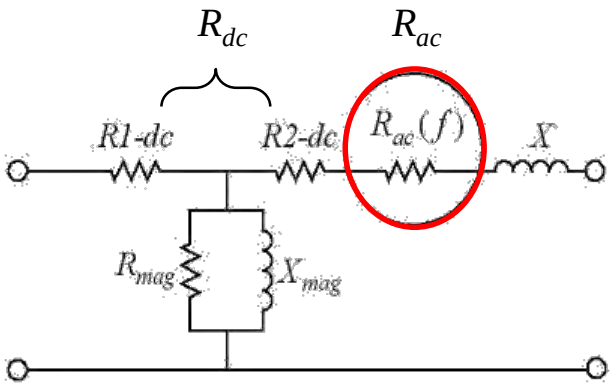
Detectable failures	Local overheating due to excessive eddy current losses linked by the stray flux. Short circuits between parallel strands of Continuously Transposed Conductors (CTC)
Indication	If parallel strands of CTC have short circuits between them, the losses in the stray channel are increased. This results in high internal temperatures, normally indicated by the DGA
Test method	An AC source with variable frequency (typically some Hz up to some hundred Hz) is connected to each phase of the HV winding with the corresponding LV winding short circuited. The source current and the voltage across the HV winding are measured. The stray losses are represented by the AC resistance of the short circuit impedance at higher frequencies. The resistive part of the complex impedance has to be measured. This can be done by using a complex impedance measuring device. Instead of the complex impedance measuring device, a wattmeter can be used to determine the real part of the complex impedance.
Reference	Comparison of the three phases, fingerprint measurements (one phase test)
Interpretation	ΔL: Less than 2.5% between phases ΔR: Less than 15% between phases
Comments	The test can be done also from the LV side. For comparison of the results the values have to be corrected by the square of the winding ratio.

Table 44: Frequency Response of the Stray Losses (FRSL)

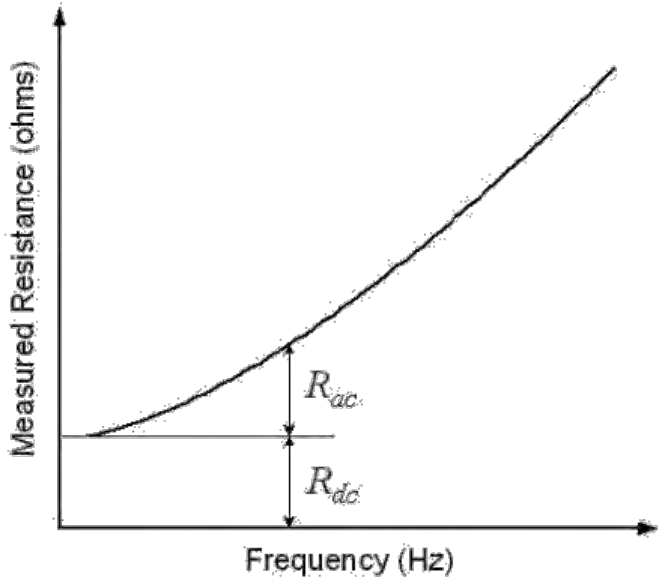
Megger
Power on

FRSL - Widerstand und Frequenz



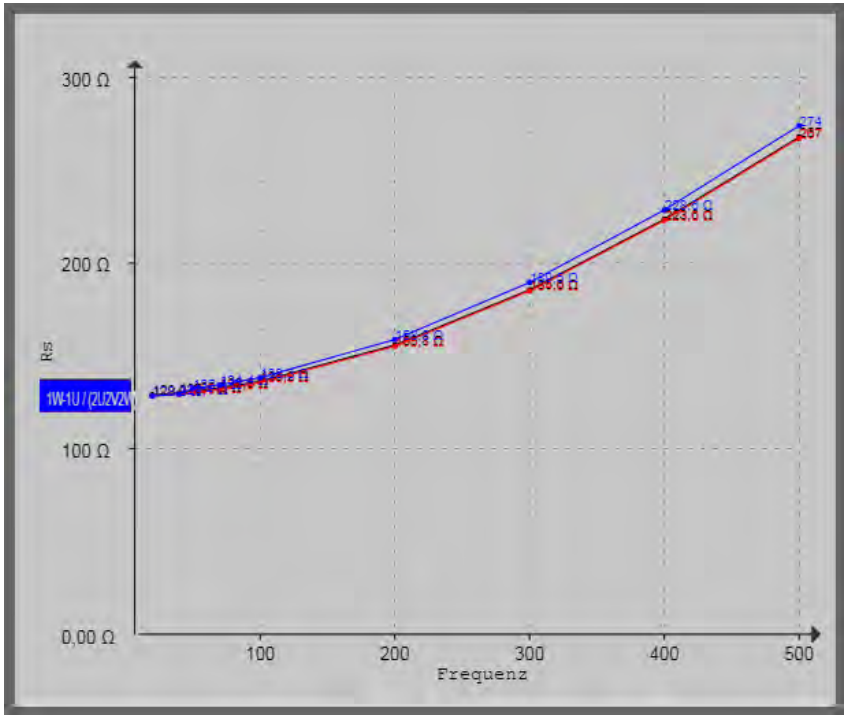


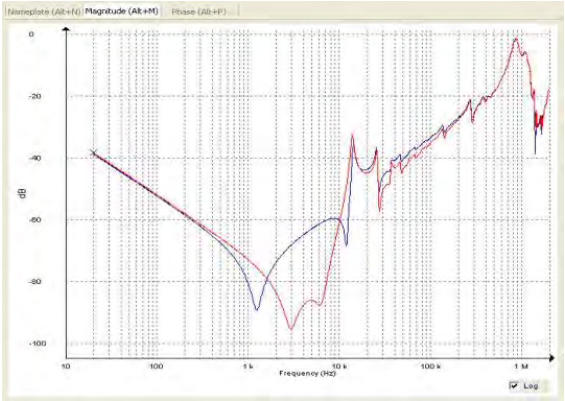
$$R = \frac{P_W}{I_{rms}^2} = R_{dc} + R_{ac}$$



Der Widerstand steigt mit der Frequenz

FRSL - Messergebnisse





SFRA –Sweep frequency Analysis

Megger
Power on

Fehlererkennung mit SFRA

- Wicklungsfehler
  - Deformation
  - Verschiebung
  - Kurzschlüße
- Kernfehler
  - Verschiebung
  - Erdung
  - Abschirmung
- Mechanische Fehler
  - Press-Vorrichtung
  - Verbindungen
- Und mehr...

Megger
Power on

SFRA Normen und Guides

- Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers, DL/T 911-2004, The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China
- Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA), CIGRE report 342, 2008
- IEC 60076-18 Ed. 1, Power Transformers - Part 18: Measurement of Frequency Response, 2012
- IEEE PC57.149™/D9, Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers, 2012
- Internal standards by transformer manufacturers, e.g. ABB FRA Standard v.7, 2009
- National/Utility standards, e.g. Eskom South Africa, 2009

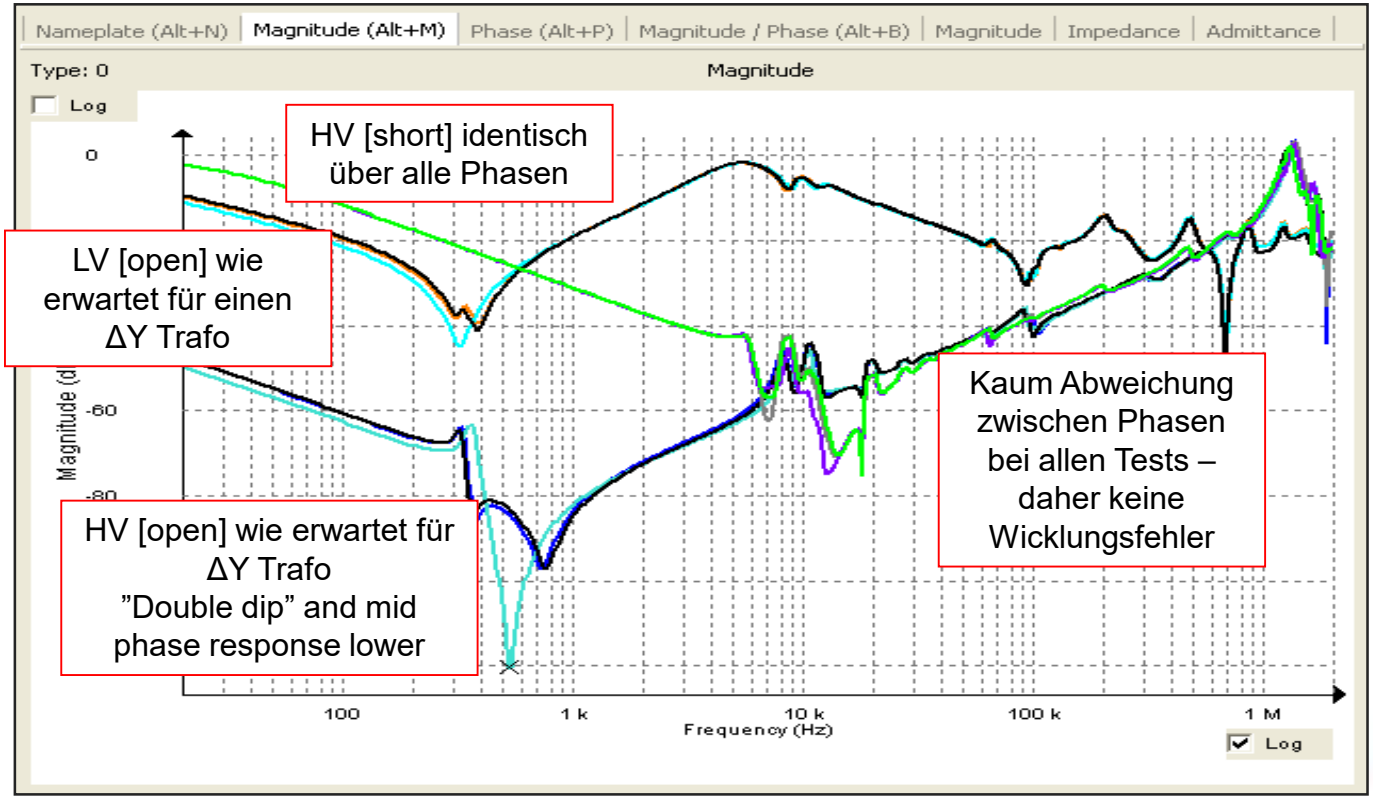
Megger.
Power on

SFRA Analyse

- Kurvenvergleich ist die primäre FRA-Methode für die Analyse des Ergebnisses
  - Niederfrequenter Bereich für
    - [Open] (Erregerimpedanz)
    - [Short] (Kurzschlußimpedanz)
  - Vergleich des Fingerabdruckes zu;
    - Dem selben Trafo (baseline)
    - Einem ”Zwilling” (indentisch) oder ”Schwester” (ähnlich) Trafo
    - Symmetrischen Phasen
    - Suche nach neuen oder fehlenden Resonanzen
- Korrelationsanalyse
  - DL/T 911 2004 Norm

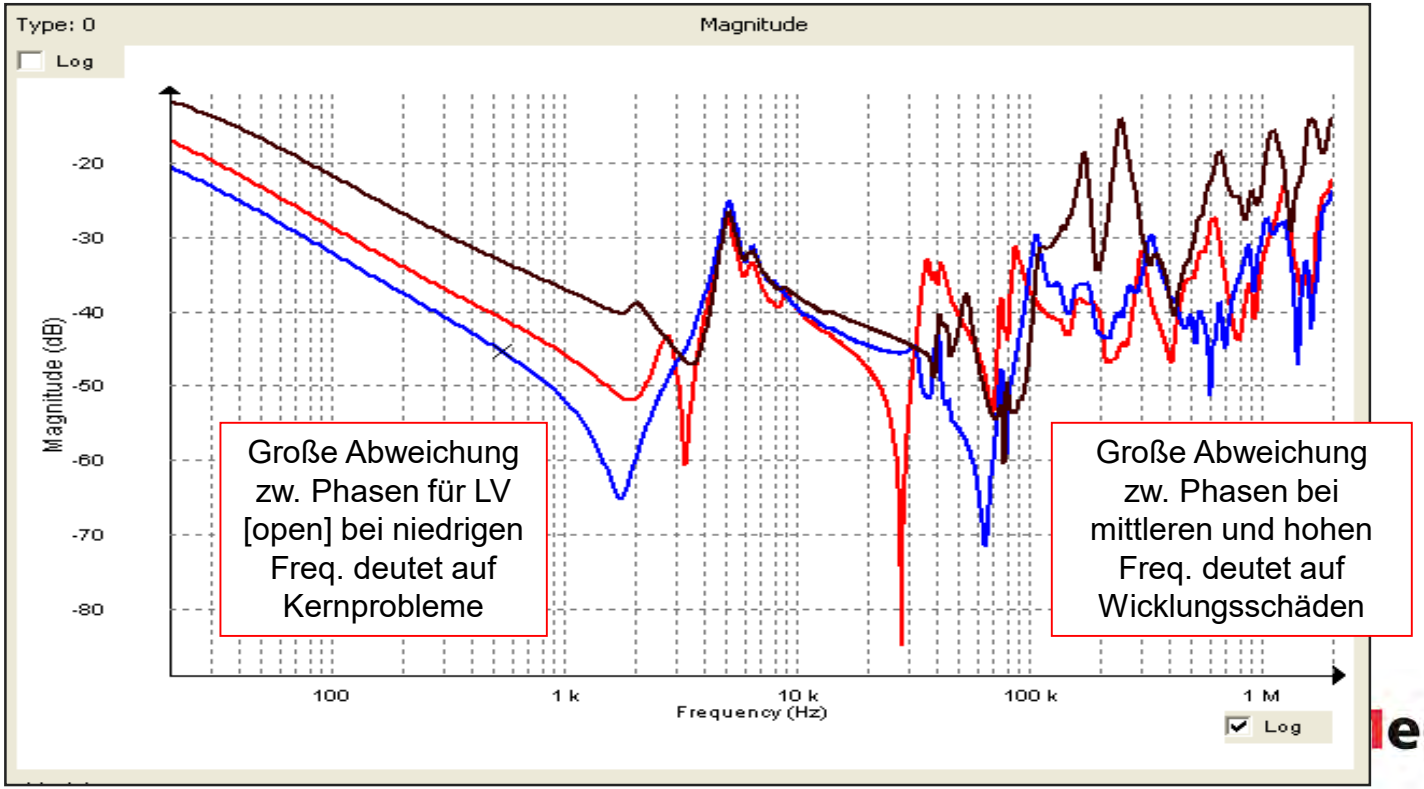
Megger
Power on

Typische Messung von einem gesunden Trafo



Megger
Power on

Trafo mit schwerwiegenden Fehlern...



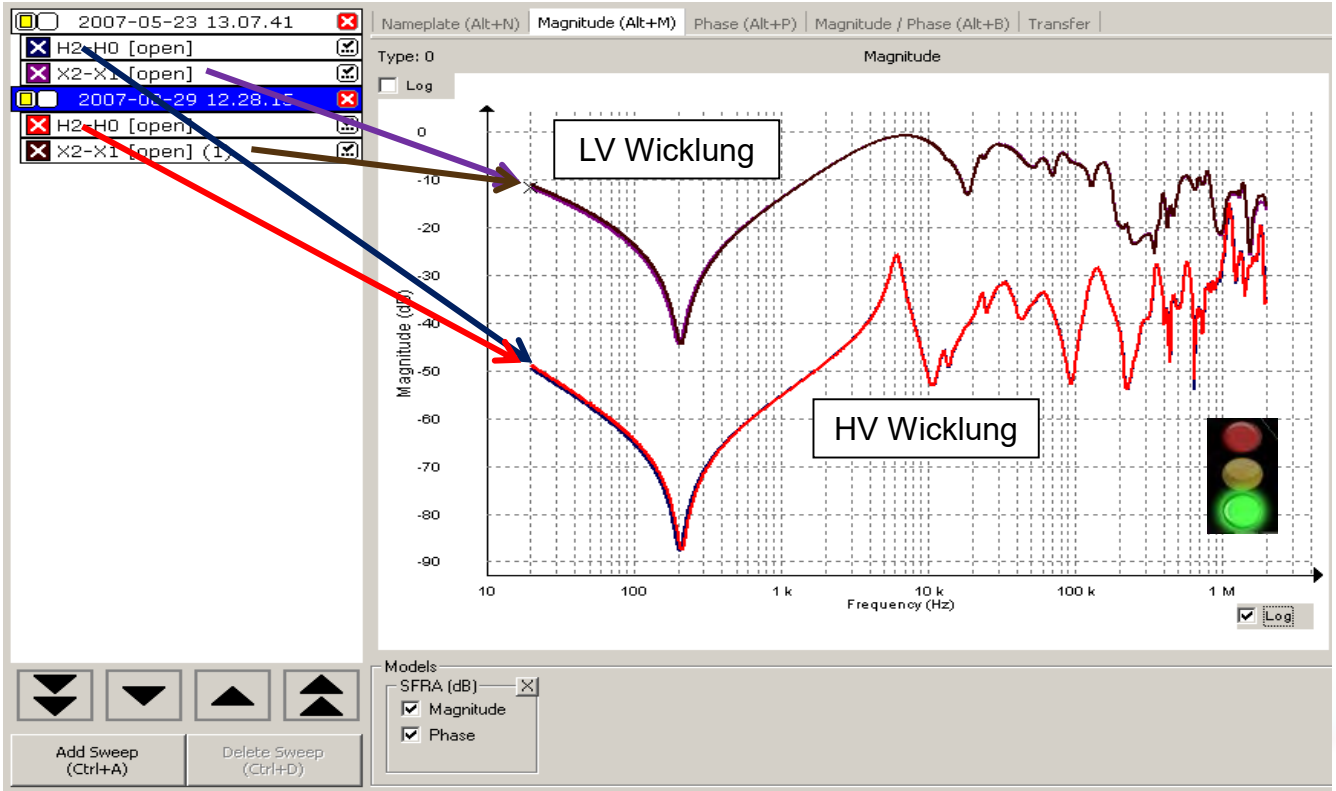
legger
Power on

Beispiel der Wiederholbarkeit

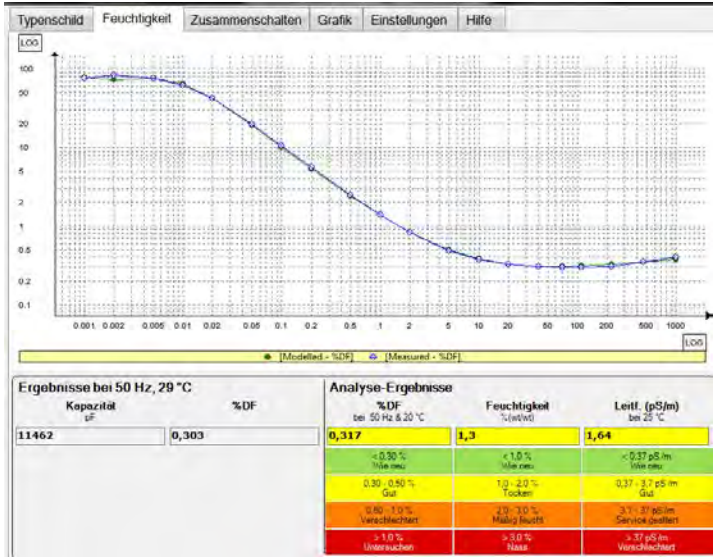
- 105 MVA, einphasiger Maschinentrafo (GSU)
- SFRA Messungen mit FRAX 101 vor und nach einen großen Kurzschluß im Generator
  - 2 unterschiedliche Messgeräte
  - Durchgeführt durch 2 unterschiedlichen Messtechniker
  - An unterschiedlichen Daten

Megger
Power on

Bevor (2007-05-23) und danach (2007-08-29)



Megger
Power on



DFR – Dielectric Frequency Response

Megger
Power on

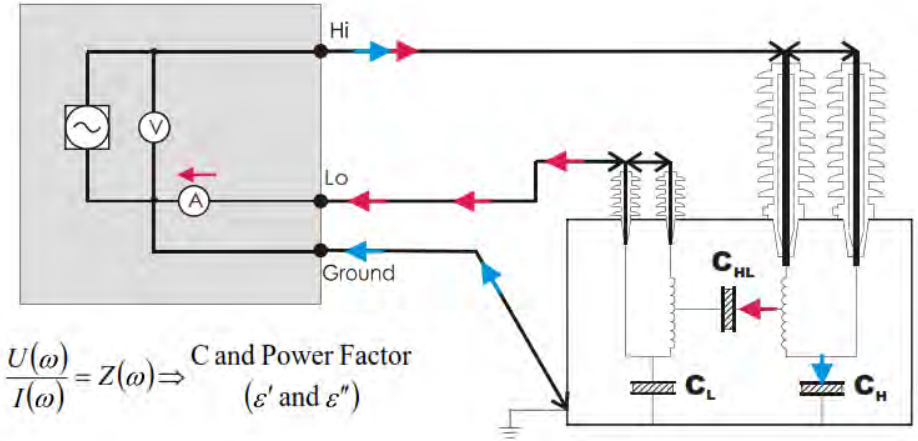
Normenlandschaft

- **2004:** CIGRE report 254, ”Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers” wird publiziert
- **2006:** Projekt REDIATOOL berichtet auf CIGRE, DFR wird empfohlen als bevorzugte Methode zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Transformatoren
- **2009:** CIGRE report 414, “Dielectric response diagnoses for transformer windings” wird publiziert
- **2011:** CIGRE report 445, ”Guide for Transformer Maintenance” wird publiziert (FDS/DFR wird als “Special or Advanced Measurements” aufgeführt)
- **2013:** IEEE C57.152 Annex G Dielectric Frequency Response
- **2018:** IEEE C57.161 ”Guide for DFR Test”

Megger
Power on

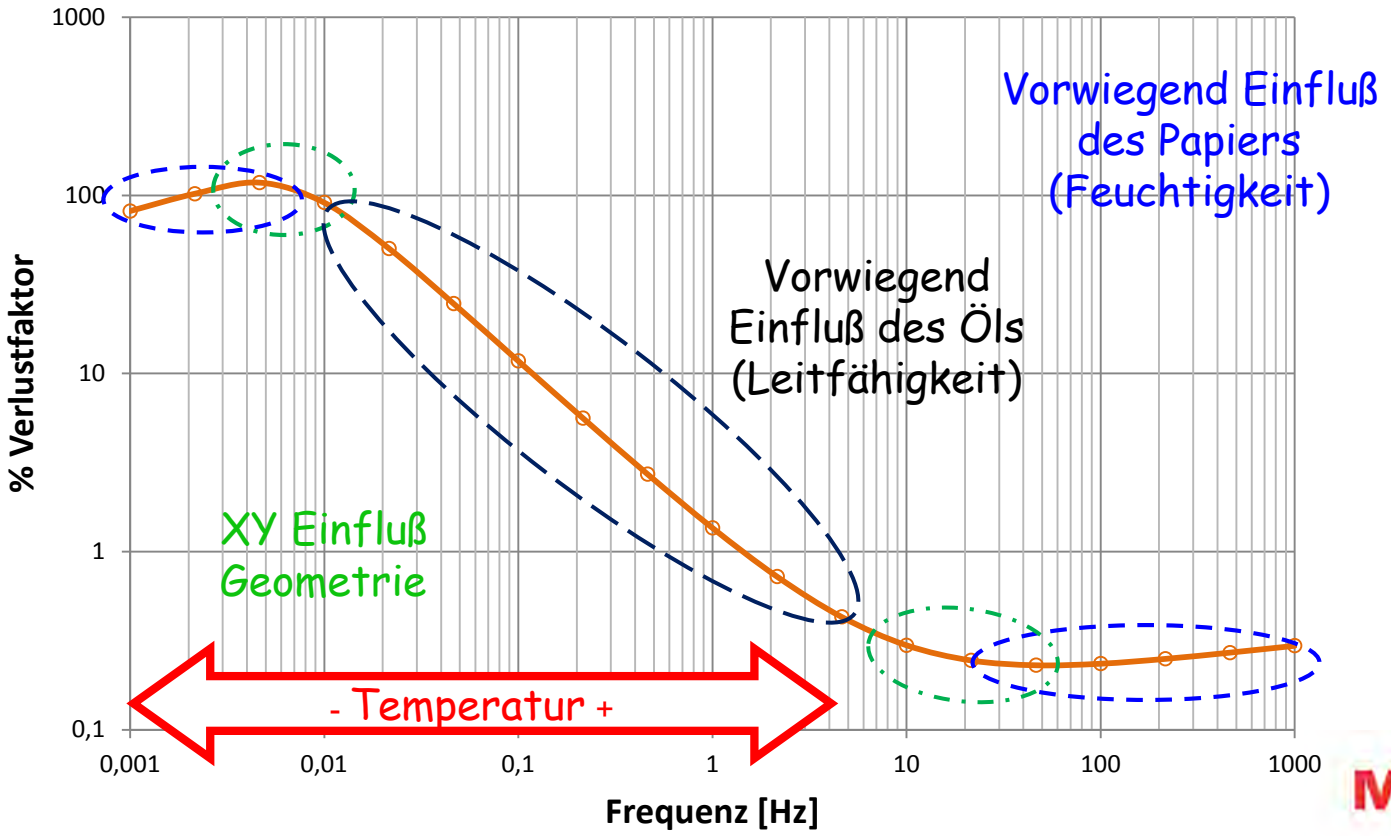
DFR - Theorie

- DFR Messaufbau ist identisch mit dem für Kapazitäts- & tan Delta-Messung, sowie für Isolationswiderstandsmessung.
- Unterschied ist größeres Frequenzspektrum (1kHz – 1mHz) und kleinere Spannung (normalerweise 140 V_{rms}).



Megger
Power on

DFR – Transformator typische Kurve

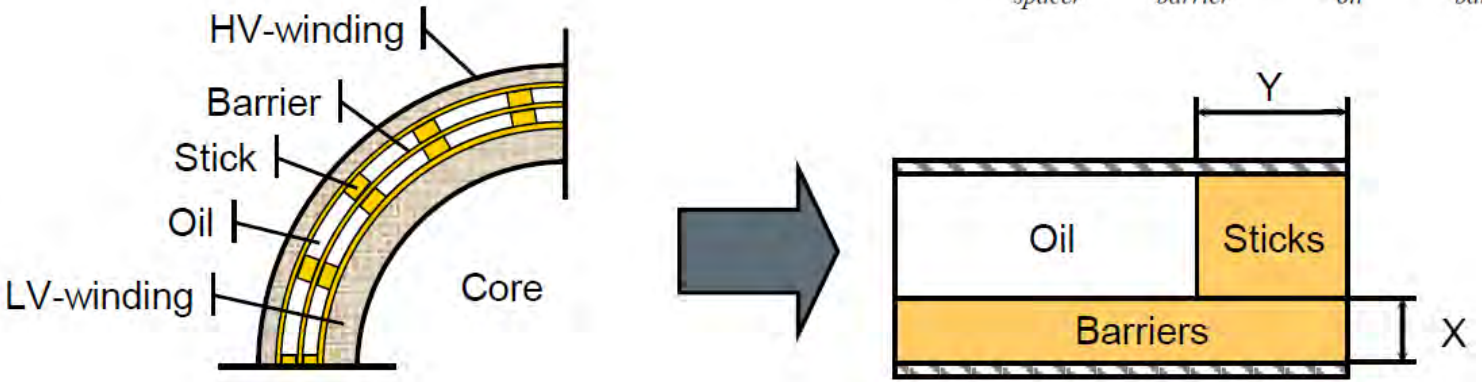


Megger. Power on

DFR – Transformator X-Y Modell

Geometrische Komponenten (TB 414)

$$\varepsilon(\omega,T)_{duct} = \frac{Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{spacer}} + \frac{X}{\varepsilon_{barrier}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{oil}} + \frac{X}{\varepsilon_{barrier}}}$$



Typische Werte für Transformatoren in Kernbauweise:
X = % barriers (15-55%)
Y= % spacers oder sticks (15-25%)

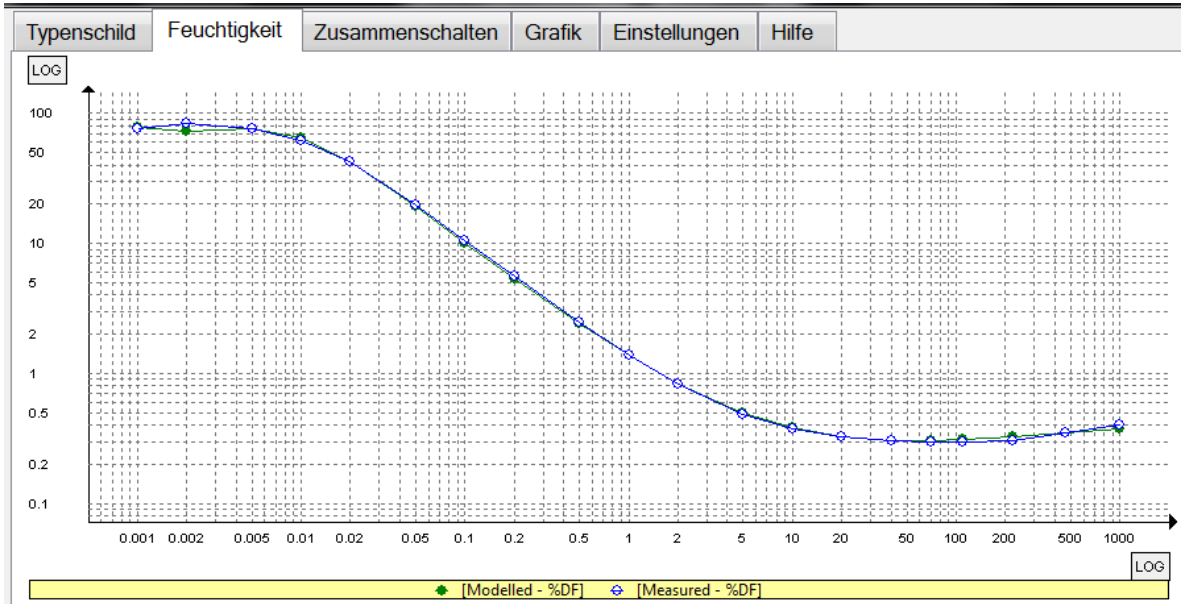
Megger. Power on

DFR - Transformator

- Basierend auf 2 Materialien (Öl & Zellulose) wird eine Modellierung vorgenommen, die bestmöglich mit der gemessenen Kurve übereinstimmt.
- Isolieröl wird basierend auf Dielektrizität und Leitfähigkeit modelliert
- Zellulose wird basierend auf einer Datenbank modelliert, die aus Messungen von Laborproben unterschiedlicher Feuchte gewonnen wurde
- Datenbank ist nicht frei für jeden verfügbar
- Ergebnisse sind Feuchtigkeitsgehalt, Leitfähigkeit des Öls (bei 25°C) und tan Delta (bei 20°C) bei Nennfrequenz

Megger
Power on

DFR - Transformator



Ergebnisse bei 50 Hz, 29 °C

Kapazität pF	%DF
11462	0,303

Analyse-Ergebnisse

%DF bei 50 Hz & 20 °C	Feuchtigkeit %(wt/wt)	Leitf. (pS/m) bei 25 °C
0,317	1,3	1,64
< 0,30 % Wie neu	< 1,0 % Wie neu	< 0,37 pS /m Wie neu
0,30 - 0,50 % Gut	1,0 - 2,0 % Tocken	0,37 - 3,7 pS /m Gut
0,50 - 1,0 % Verschlechtert	2,0 - 3,0 % Mäßig feucht	3,7 - 37 pS /m Service gealtert
> 1,0 % Untersuchen	> 3,0 % Nass	> 37 pS /m Verschlechtert

- In einer einzigen Prüfung:
  - Feuchtigkeit,
  - DF/PF bei 20 °C
  - Ölleitfähigkeit bei 25 °C

Megger
Power on

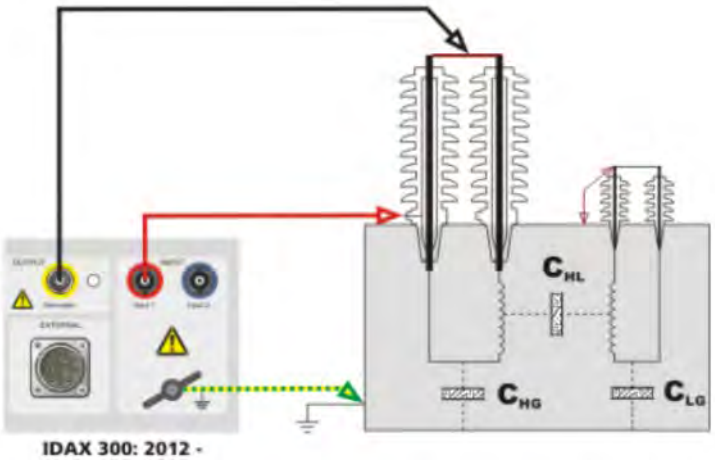
ITC – Individual Temperature Correction

- Frequenzantwort wird genutzt um Temperaturabhängigkeit zu bestimmen
  - Höhere Temperatur (des Prüflings) bedeutet, daß äquivalente Frequenz zu 50/60 Hz bei höherer Frequenz ist
  - Niedrigere Temperatur (des Prüflings) bedeutet, daß äquivalente Frequenz zu 50/60 Hz bei niedriger Frequenz ist
- Verfahren ermöglicht Korrektur der Messung bei beliebiger Temperatur auf Referenztemperatur (20° C)
- Zwei Modelle stehen zur Verfügung für einfache (ITC1) oder aus zwei Materialien (ITC2) bestehende Isolationen

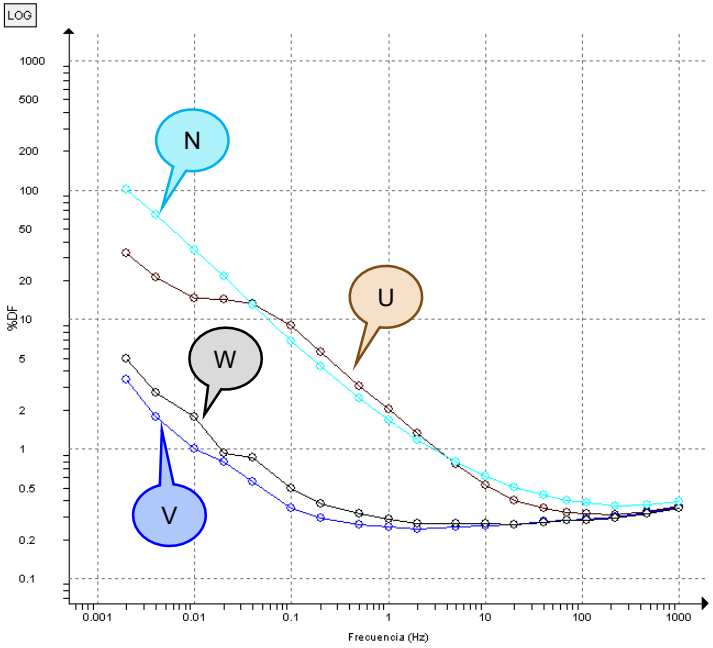
Megger
Power on

DFR - Durchführungen

Anschluß-Schema



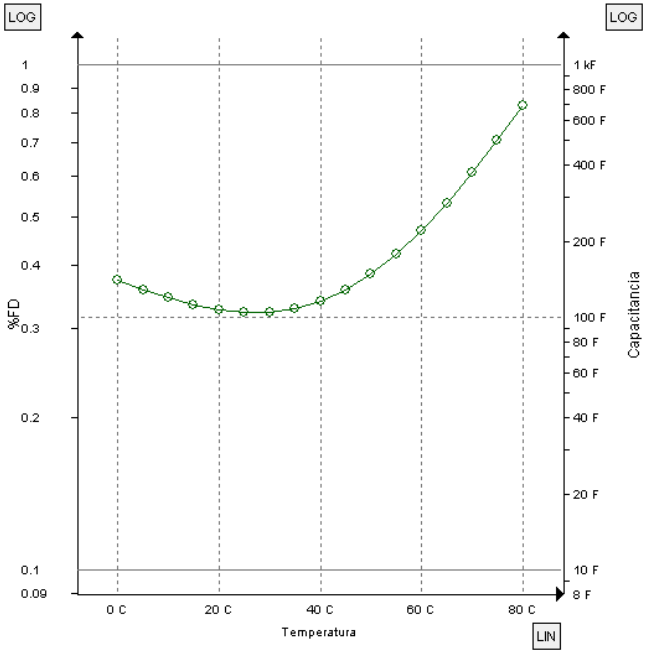
DFR @ 31ºC



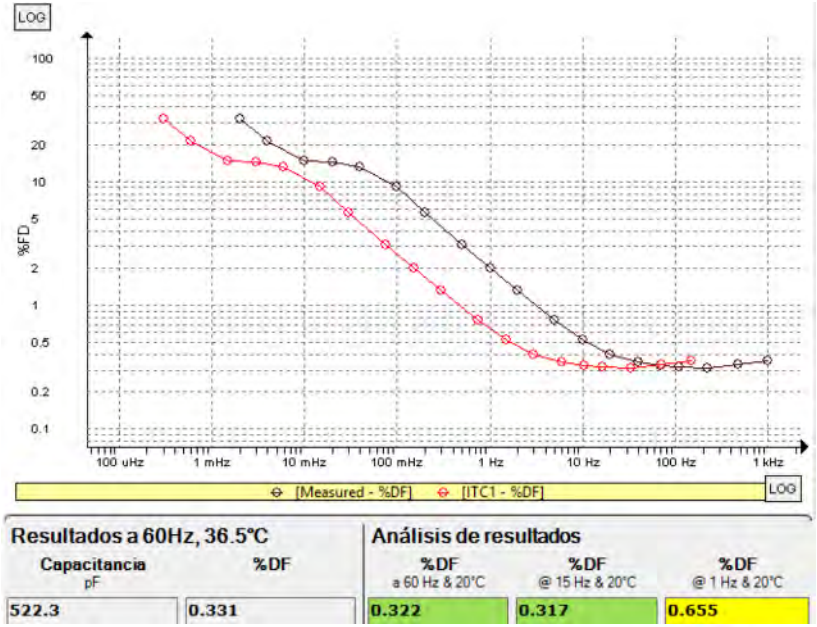
Megger.
Power on

DFR – Individual temperature Correction

ITC Korrektur U (60Hz)



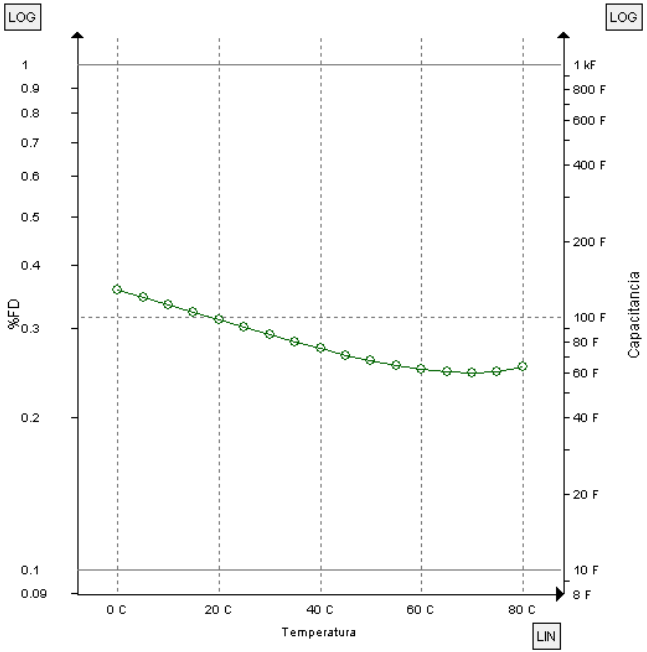
ITC Durchführung U



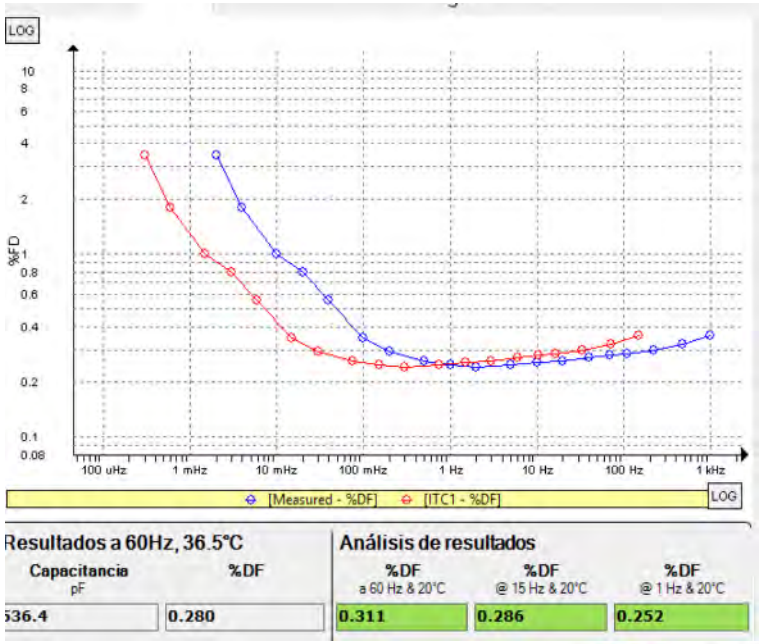
Megger. Power on

DFR – Individual temperature Correction

ITC Korrektur V (60Hz)



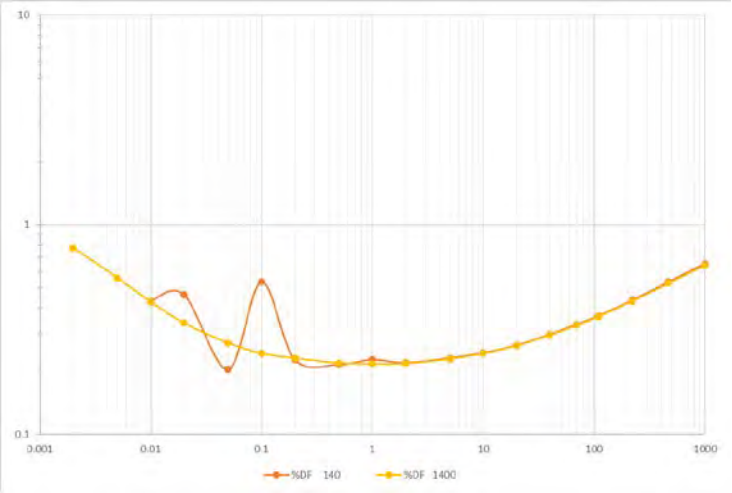
ITC Durchführung V



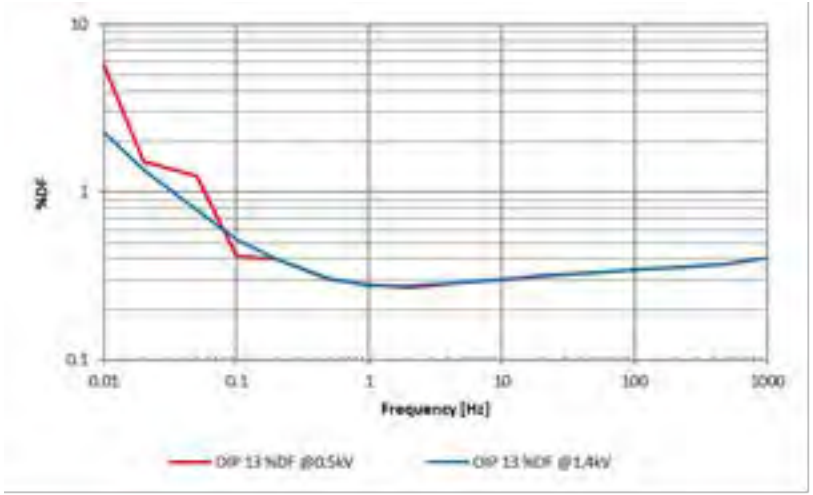
Megger. Power on

DFR – Verstärkertechnologie

500 kV ~ 600pF



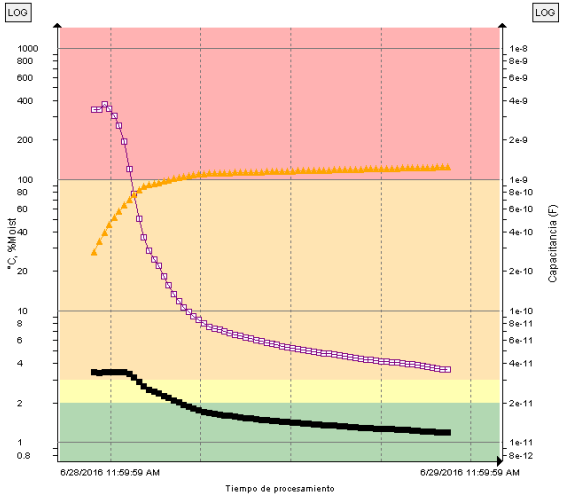
OIP 800kV Durchführung



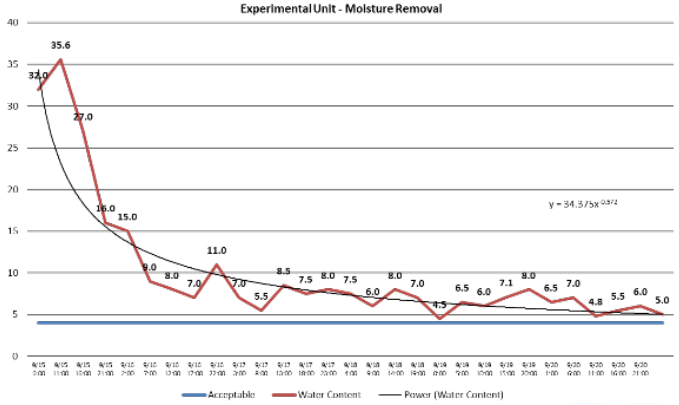
Megger.
Power on

DFR – Überwachung Trocknungsprozeß

- Wiederholende DFR Messungen mit fixem Zeitintervall
- Simultane Messung der (Ofen-)Temperatur
- Verbessert Effizienz – Prozeß kann beendet werden, wenn Ziel erreicht



Trocknung im Werk

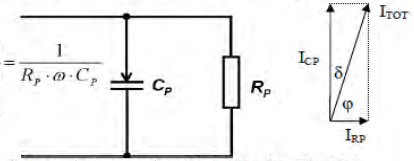


Trocknung Vor-Ort

Megger Power on

Kapazität & Verlustfaktor

Capacitance and Dielectric Dissipation Factor (or Power Factor)

Detectable failures	- Capacitance: Winding to winding: change of the geometry between windings due to high currents or mechanical damage - Winding to ground: change of the geometry between winding and ground due to high currents or mechanical damage - Core to ground: change of the core position to the tank due to mechanical damage - Condenser bushings: breakdowns between grading layers - Dielectric Dissipation Factor or Power Factor: Insulation failures, contamination of insulation liquids with particles, acids, water in solid and liquid insulation, partial discharges due to bad contacts on bushing test tap, breakdown in bushing condenser layers
Indication	Moisture, tests on regular bases (e.g. on high voltage bushings)
Test method	A sinusoidal HV AC source (preferable with variable frequency) is connected to the test object in parallel to a low loss reference capacitor. The currents through the test object and through the reference capacitor are measured and the time difference between their zero crossings is determined. The loss angle delta can be calculated from this time difference. Normally this test is done at 10 kV for on-site measurements. The following figure shows the equivalent parallel circuit of an insulator (capacitance) with its losses (resistance) and the comparative definitions of Dissipation Factor (DF) and Power Factor (PF), expressed as a ratio of currents in the equivalent circuit components. For historical reasons, European countries mostly use DF, whereas PF is mostly used in North America. For values up to 10%, the typical range for insulating material, DF and PF are numerically equivalent anyway $\mathrm{DF}: \tan\delta = \frac{\lvert I_{RP}\rvert}{\lvert I_{CP}\rvert} = \frac{1}{R_P \cdot \omega \cdot C_P}$ $\mathrm{PF}: \cos\varphi = \frac{\lvert I_{RP}\rvert}{\lvert I_{tot}\rvert}$  **Figure 12: Insulation equivalent circuit and Definitions for DF and PF** **Terminology:** This test method, and its result, may be referred to by many terms such as: loss factor, loss angle, dielectric loss angle (DLA), tan δ, tangent delta, δ, dielectric dissipation factor (DDF), dissipation factor (DF) , power factor (PF), Cos φ or Cos θ. The units of measure can also vary : radians, milli-radians (mR), %, ‰ (rarely used) The absence of units usually means the result is the arithmetic value of cos φ or tan δ
Reference	Test report, fingerprint measurements, trend analysis, comparison to identical units Nameplate values for bushings
Interpretation	For measurements on windings, values are normally in the order of 0.5%. A measurement higher than 1% is questionable. For bushings, the following values are given in IEC and IEEE standards:
Comments	This is the most common technique for assessing the bushing condition (see information below)

Typ	RIP	OIP	RBP
Insulation	Resin impregnated paper	Oil impregnated paper	Resin bonded paper
DF tan δ (RT) (IEC 60137)	< 0,7% *	< 0,7% *	< 1,5% *
PF cos φ (RT) IEEE C57.19.01	< 0,85% *	< 0,5% *	< 2% *
Typical new values	0.3-0.4% *	0.2-0.4% *	0.5-0.6% *

* at 50/60Hz and 20°C

Table 33: Capacitance and Dielectric Power/Dissipation Factor

- Messung typischerweise bei Nennfrequenz und 10kV
- Absolute Grenzwerte in Normen (Feuchtigkeit / Verschmutzung)
- Temperaturabhängigkeit -> ITC!
- Spannungsabhängigkeit -> VDD
- Wichtige Messung bei kapazitiv gesteuerten Durchführungen (Vergleich C und tan Delta nach Norm)
- Ausblick „Narrow Band DFR“

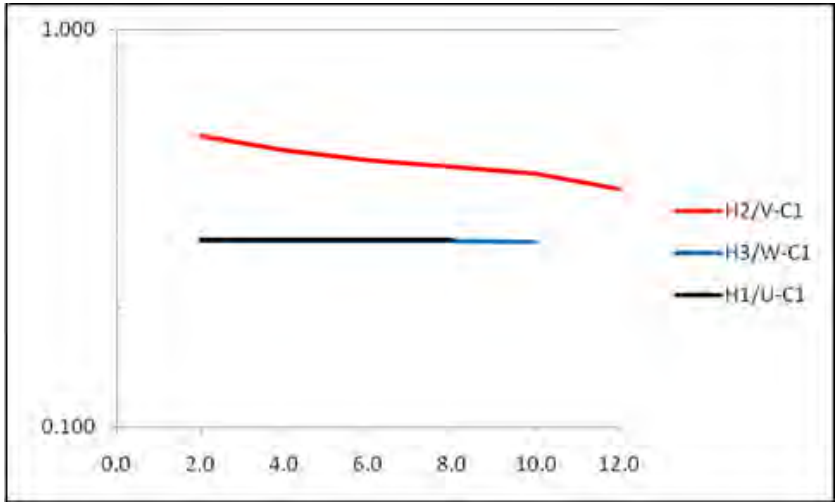
Megger Power on

Voltage dependence Beispiel – Durchführung

BUSHING C1 TESTS

Individual Temp Comp ☐

TEST NO.		BUSHING NAMEPLATE				TEST MODE	TEST kV	Freq Sweep	CAPACITANCE C (pF)	DISSIPATION FACTOR %			DIRECT		%VDF	IR
		DSG	SERIAL #	POWER FACTOR	CAPACITANCE					MEASURED	@ 20°C	CORR FACTOR	mA	WATTS		
HI KV	11	H1				UST-R	10.00	☐	159.43	0.30			0.5005	0.0148	0.025	
	12	H2				UST-R	10.00	☐	159.90	0.43			0.5020	0.0216	0.054	
	13	H3				UST-R	10.00	☐	159.83	0.29	0.28	0.953	0.5018	0.0147	0.026	
	14	H0				UST-R	10.00	☐								



Durchführung H2/V hat fallende Tendenz bei steigender Spannung. Dies kann auf Verbindungsprobleme deuten, z.B. Widerstand in Reihe zur Kapazität

Megger Power on

Transformator Prüfungen

		OTS	OTD	MIT/S1	DLRO/ MoM	TTR	MTO	MWA	Delta	FRAX	IDAX	TRAX
Öl	Dielektrische Festigkeit	x										
	Verlustfaktor		x									
Basic eletrical	Übersetzungsverhältnis					x		x				x
	Wicklungswiderstand						x	x				x
	TanDelta & Kapazität								x			x
	Erregerstrom					x			x			x
	Kurzschlußimpedanz											x
	Isolationswiderstand			x								
	Kernerdung				x							x
Advanced electrical	Frequenzantwort (SFRA)									x		
	Dielektrische Frequenzantwort (DFR)										x	
	Stufenschalter Widerstand (DRM)											x
	Frequency response of stray losses (FRSL)											x

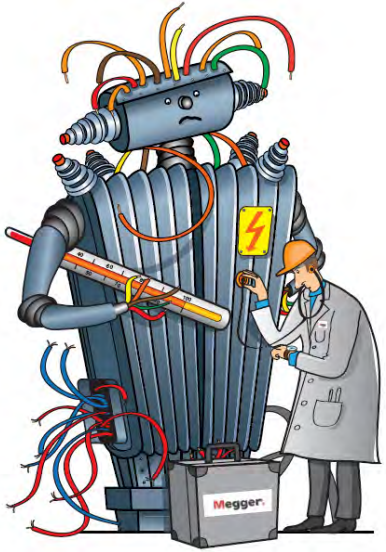
Megger
Power on

Zusammenfassung

- Es hat sich viel getan in den letzten 20 Jahren
- Neue Diagnoseverfahren (FRSL, DRM, SFRA, DFR) erweitern Spektrum der Zustandsbewertung
- Moderne Prüfgeräte machen Prüfungen sicherer (für Personal und Asset)
- Moderne Prüfgeräte unterstützen den Prüfer
  - Erstellen Prüfplan
  - Anschlußhinweise
  - Allfällige Berechnung (z.B. Temperaturkorrektur)
  - Auswertung am Gerät (Assessment)

Megger
Power on

Fragen?



Power on

At Megger, we understand that keeping the power on is essential for the success of your business. That is why we are dedicated to creating, designing and manufacturing safe, reliable, easy-to-use portable test equipment backed by world-leading support and expertise.

We can assist your acceptance, commissioning and maintenance testing for predictive, diagnostic or routine purposes. By working closely with electrical utilities, standards bodies and technical institutions, we contribute to the dependability and advancement of the electrical supply industry.

Megger®

Power on