

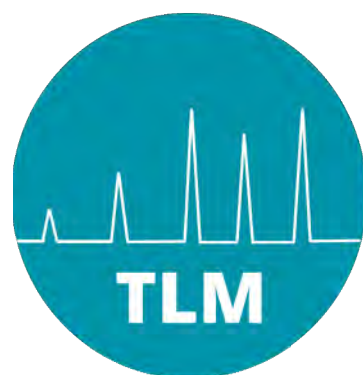
TLM 2026

19. Transformer-Life-Management Konferenz



21. - 22. September 2026
Congressforum Frankenthal

Programm



Tag 1: Montag 21. September

		Seite
10:00 - 11:00	Check-in und Begrüßungssnack	
11:00 - 13:00	Themenblock I - Einleitung	
	Begrüßung und Einführung Prof. Dr.-Ing. Peter Werle (Leibniz Universität Hannover, Schering-Institut)	
	Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende Dr. Fabian Lehretz (TenneT TSO GmbH)	18
	Herausforderungen im Zuge der Energiewende Dr. Johannes Hoffmann (Hitachi Energy)	33
	The role of HD Hyundai Electric in the Energy Transition Javier Mantilla (Hyundai Electric)	44
	Vorstellung der Ausstellung und der Workshops	
13:00 - 15:30	Pause: Workshops, Postersession, Fachausstellung 13:30 Workshop A&B, 14:00 Poster, 14:30 Workshop C&D	
15:30 - 17:00	Themenblock II - Gewusst wie...	
	KI: Grundlagen und Möglichkeiten Prof. Dr. Farouzi Derbel (HTWK Leipzig)	55
	Digital Twins: Grundlagen - Anwendung - Vorteile Ergebnisse der CIGRE WG A/D2.65 Dr. Alexander Alber (Hitachi Energy)	64
	Funktionsweise und Aufbau von Phasenschiebern und HVDC Transformatoren Dr. Bruno Bosnjak (GE Vernova)	77
18:00	Abendveranstaltung	

Programm



Tag 2: Dienstag 22. September

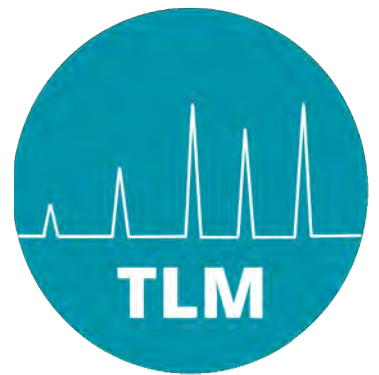
8:00 - 9:30	Themenblock III - Schadensfälle	Seite
	Schadensfälle und Reparaturmöglichkeiten von Mittelspannungs-transformatoren Uli Huchtemeier, Christian Eymael (TSW)	93
	Einzigartige Ofentransformator-Reparatur bei BSW: Aus 3 defekten werden kurzfristig 2 intakte Marc Weber (Siemens energy), Matthias Breithaupt (Badische Stahlwerke)	101
	Leistungssteigerung von Bestandstransformatoren - Alternativen zum Neubau Oliver Derigs (Hitachi Energy)	123
9:30 - 11:30	Pause: Workshops, Postersession, Fachausstellung 9:45 Workshop A&B, 10:15 Poster, 10:45 Workshop C&D	
11:30 - 13:15	Themenblock IV - Diagnose & Monitoring	
	Weltneuheit: Schutzsysteme mit integriertem Monitoring Sebastian Roßmüller und Martin Roye (EMB), Ludwig Bertram (LUH)	131
	Retrofitlösungen zur Digitalisierung von Leistungstransformatoren hin zum ganzheitlichen Flottenmanagement Christian Hofmeister (Reinhausen GmbH)	145
	Advancements in Transformer Safety: Innovations in Arc Detection and Tapchanger Technology O.C. Kolambkar (CTR)	153
	Transformatorenprüfung mit Frequenzumrichtern bei minimaler Störempfindlichkeit Andreas Thiede (HighVolt)	165
13:15 - 14:00	Pause: Mittagessen, Fachausstellung	
14:00 - 15:20	Themenblock V - Isolierflüssigkeiten	
	Wie gelingt die sichere Gas-in-Öl-Analyse von alternativen Isolierflüssigkeiten? Thomas Stockmann (ECH)	173
	Recent Advances in the Condition Monitoring and Health Assessment of Ester filled Transformers Dr. Behrooz Pahlavanpour (Ergon)	184
	Stray Gassing Tests and Data as Powerful Diagnosing Tools - Case-Studies Prof. Dr. Thomas Norrby (Nynas)	192
	Retrofitting Mineral Oil Transformers Robert Copley (Shell Midel)	205
15:20 - 15:30	Zusammenfassung durch Tagungsleiter - Verabschiedung - Ende der Konferenz	

Sponsoren und Aussteller

2026



Workshops



Workshop A:



Mo. 13:30-14:00
Di. 9:45-10:15

Raum A

Leistungsschalter als erste Schutzlinie des Transformators – Diagnostik für fundierte Asset Management Entscheidungen

K. Maurer
Reinhausen GmbH

Workshop B:



Mo. 13:30-14:00
Di. 9:45-10:15

Raum B

Von der Zustandsüberwachung zu kundenfokussierten Services

Stefan Bohr
Siemens Energy

Workshop C:



Mo. 14:30-15:00
Di. 10:45-11:15

Raum A

Online-Monitoring von Leistungstransformatoren – Komplementarität von DGA und Teilentladungs-monitoring

Robert Madarasz
Megger

Workshop D:



Mo. 14:30-15:00
Di. 10:45-11:15

Raum B

FRA-Messung in der Praxis – Durchführung und typische Problemstellungen

Holger Lohmeyer
Hitachi Energy

Poster

Assessment of Aging Related Changes in Transformer Oil Properties for Enhanced Thermal and Aging Model Integration
Ahmad Vosoughi (Hochschule Zittau/Görlitz)

Digitaler Zwilling – Parametrierung physikbasierter Modelle von 110-kV/MS-Netztransformatoren
Prof. Dr.-Ing. Gerd Valtin (HTW Dresden)

Analyse transienter Spannungsformen in Leistungstransformatoren mit unterschiedlichen Wicklungen mittels FEM
Prof. Dr.-Ing. Ebrahim Rahimpour (Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt)

PTDigital - Digitaler Zwilling Leistungstransformator
Prof. Dr.-Ing. Stefan Kornhuber (Hochschule Zittau/Görlitz)

Reduktion des Einflusses von Zuleitungen auf die Messergebnisse der Frequency Response Analysis (FRA)
Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje (Hochschule Bremen)

Low-Cost End-to-End UHF sensing and Processing Chain for Partial Discharge Diagnostics in Power Transformers
Ludwig Bertram (Leibniz Universität Hannover)

Vergleichende Bewertung verschiedener Schwingungsanregungsmethoden für die experimentelle Modalanalyse von Leistungstransformatorkernen
Ali Azeroual (Leibniz Universität Hannover)

Modifizierte DGA-Analyse mit Einbeziehung höherwertiger Kohlenwasserstoffe als Zustandsdiagnose für Transformatorfehler
Kristin Homeier (Leibniz Universität Hannover)

Systematic Analysis of Electric Motor Insulation Systems under Multiple Electrical and Thermal Stress Conditions
Burhan Leventerler (Leibniz Universität Hannover)

Fehlererkennung- und Lokalisierung in Energiekabeln mittels Frequenz Domänen Analyse (FDA)
Christian Kohlsaatt (Leibniz Universität Hannover)

Retrofilling Transformers With Synthetic Ester Liquid
Robert Copley (Shell Midel)



Assessment of Aging Effects on Transformer Oil Viscosity and Oil–Paper Moisture Equilibrium Behavior

Ahmad Vosoughi, Prof. Dr. Stefan Kornhuber

Motivation

- Thermal model outputs directly affect transformer ageing estimation;
- Existing thermal models mainly don't consider the dependency of oil thermophysical properties to aging.
- Oil aging modifies thermophysical properties including kinematic viscosity and influences thermal model accuracy.
- On the other hand, paper moisture is a major aging agent affecting the degradation of solid insulation.
- oil–paper moisture equilibrium behavior can change during transformer aging.
- This work investigates the impact of aging on oil viscosity and evaluates the feasibility of estimating paper moisture from oil moisture.

Test Setup

Accelerated Thermal Aging Test-Setup

- Material:**
 - Thermally Upgraded paper (TUP)
 - GTL-Based Mineral Oil
- Test Conditions:**

Temperature	Moisture	Oil:Paper Ratio
110°C	0,74 %	8:1
120°C	3,25 %	15:1
130°C	-	22:1
100 °C - 140°C	-	-

Measured Parameters:

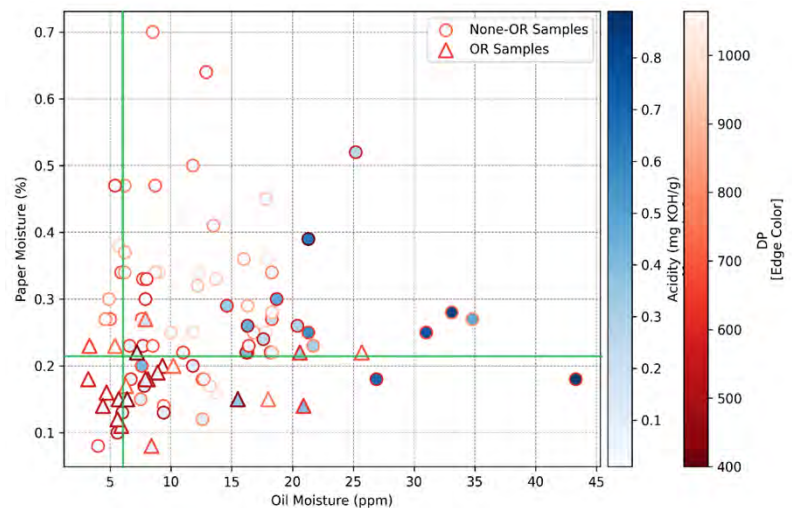
- Kinematic Viscosity
- Water Content in Paper and oil
- Total Acidity
- Interfacial Tension
- Dielectric Dissipation factor
- Degree of Polymerization



Paper Moisture Estimation from Oil Moisture

Measured WCP %	Measured WCO (ppm)	WCP Serena %	WCP ABB %
0,14	9,4	3,58	3,84
0,38	5,7	2,17	2,93
0,22	16,3	6,20	5,18
0,21	39,9	15,19	8,42
0,41	13,5	5,14	4,68

Aging changes the oil–paper moisture equilibrium behavior, limiting the applicability of conventional equilibrium equations for estimating paper moisture.



Higher oil acidity is generally associated with higher oil moisture at similar paper moisture levels. → **Acidity increases oil moisture absorption capability.**
Lower DP is generally associated with lower paper moisture at similar oil moisture levels. → **Paper aging reduces paper moisture retention capability.**
 No unique correlation between oil moisture and paper moisture is observed.

Kinematic Viscosity Analysis

Significant Aging Impact on Thermal Model Outputs

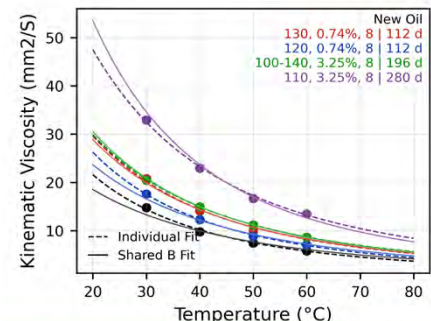
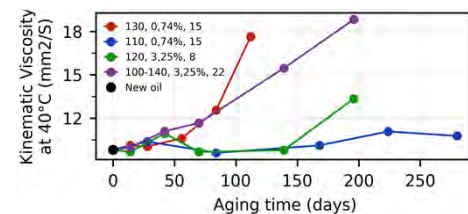
- Increases due to aging under all investigated conditions, by approximately **27–94 %** relative to the fresh oil value.
- Leads to increase **4–6°C** increase in HST.

K_2 : Temperature-dependant coefficient

$$\mu = K_1 \cdot e^{\frac{K_2}{T}}$$

K_1 : Aging-dependant coefficient

- The temperature dependency function remains largely unchanged during ageing.
- Aging effects can be incorporated by updating the ageing-dependent parameter.



ANALYSE TRANSIENTER SPANNUNGSFORMEN IN LEISTUNGSTRANSFORMATOREN MIT UNTERSCHIEDLICHEN WICKLUNGEN MITTELS FEM

Marco Leitschuh*, Martin Meuser*, Ebrahim Rahimpour*, Morteza Eslamian**

* Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Deutschland

** Hitachi Energy, Bad Honnef, Deutschland

HITACHI

1. EINFÜHRUNG

- Während des Betriebs sind Transformatoren verschiedenen Überspannungen ausgesetzt (Blitzeinschläge, Schaltvorgänge, Netzstörungen).
- Im Normalbetrieb verteilt sich die anliegende Spannung im stationären Zustand linear innerhalb der Wicklung.
- Diese lineare Spannungsverteilung gilt nicht mehr, wenn Stoßspannungen einwirken.
- Zur Berechnung der Stoßspannungsverteilung werden die Wicklungen durch ein RLC-Ersatzschaltbild simuliert.
- Die anfängliche Spannungsverteilung wird rein durch Kapazitäten bestimmt.
- Das Verhältnis von Erdkapazität zu Serienkapazität bestimmt die anfängliche Spannungsverteilung.

2. HINTERGRUND

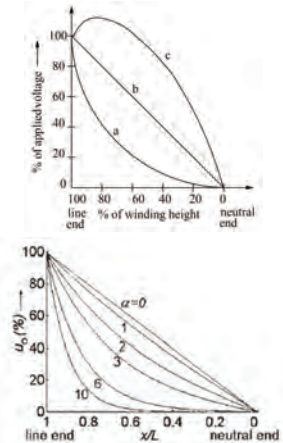
- Die Analyse der Spannungsverteilung in der Wicklung wird mit den Programmen MATLAB, FEMM und LTSpice durchgeführt.
- Die Bestimmung aller Ergebnisse erfolgt rein durch Simulation und nicht durch analytische Berechnungen.
- Die vorgestellte Arbeit wird im Rahmen des Masterstudiums Elektro- und Informationstechnik an der THWS durchgeführt.
- Das Projekt erstreckt sich über drei Semester und bildet die Grundlage der abschließenden Masterarbeit.
- Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation mit Hitachi Energy in Bad Honnef und orientiert sich an praxisrelevanten Fragestellungen.
- Die Simulationsergebnisse dienen als Grundlage für die Bewertung der Spannungsverteilung und der Optimierung des Isolationskonzepts innerhalb der Wicklung.

3. GRUNDLAGEN TRANSIENTER VORGÄNGE IN TRANSFORMATOREN

- Die anfängliche Spannungsverteilung hängt zunächst nur von den Kapazitäten ab.
- Kapazitäten zwischen den Windungen/Wicklungen und zwischen Wicklung und Erde dominieren bei $t \approx 0$.
- Die Wicklungsinduktivitäten haben vorerst keinen Einfluss auf die anfängliche Spannungsverteilung.
- Das Magnetfeld baut sich mit der Zeit auf und ermöglicht dann erst induktive Ströme.
- Ausgehend von der anfänglichen Spannungsverteilung (Kurve a) oszilliert die Wicklungsspannung um den stationären Endwert (Kurve b) und erreicht einen maximalen Überschwingwert, wie in Kurve c dargestellt.
- Die initiale Spannungsverteilung wird durch den Parameter α beschrieben:

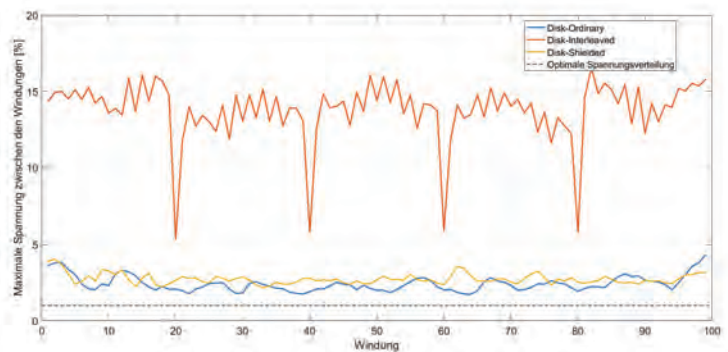
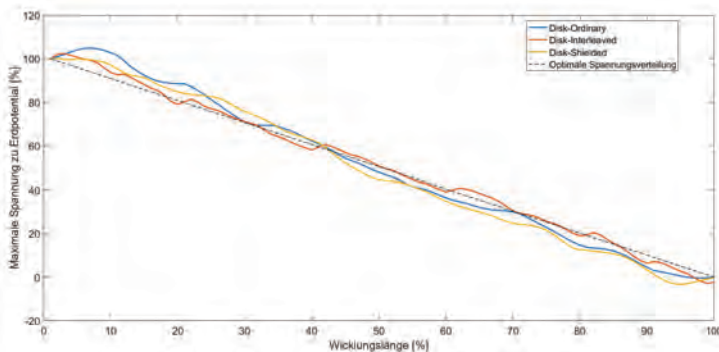
$$\alpha = \sqrt{\frac{C_E}{C_S}}, C_E: \text{Erdkapazität}, C_S: \text{Serienkapazität}$$

- Optimal wäre $\alpha = 0$, was bedeutet, dass sich die gesamte Spannung gleichmäßig über die gesamte Wicklungslänge verteilt. Technisch möglich ist dies jedoch nicht.



4. SPANNUNGSVERLÄUFE

- Die simulierten Wicklungsarten sind Disk-Ordinary, Disk-Interleaved und Disk-Shielded.
- Das linke Diagramm zeigt die maximale Spannung gegen Erde über die gesamte Wicklungslänge.
- Das rechte Diagramm zeigt die maximale Spannung zwischen den benachbarten Windungen innerhalb der Wicklung.



5. ZUSAMMENFASSUNG

- Die Untersuchungen zeigen, dass die Wicklungsart einen wesentlichen Einfluss auf die transiente Spannungsverteilung im Transformator hat.
- Je nach Wicklungsaufbau ergeben sich unterschiedliche Spannungsverteilungen, wodurch verschiedene Isolationsanforderungen entstehen.
- Alle Ergebnisse wurden mithilfe der Finite-Elemente-Methode sowie anschließender Schaltungssimulationen in den Programmen MATLAB, FEMM und LTSpice ermittelt, wobei vollständig auf analytische Berechnungen verzichtet wurde.
- Die Hauptaufgabe war die Automatisierung und die Weiterentwicklung des bestehenden Tools, welches in Zukunft noch erweitert wird.

Digitaler Zwilling – Leistungstransformator – Die Basis für eine prognoseorientierte Zustands- und Risikobewertung von Leistungstransformatoren in elektrischen Energiesystemen

S. Kornhuber⁴, M. Klatt¹, S. Kleyboldt², A. Müller⁵, U. Schmidt⁴, G. Schulze³, S. Taghipour⁴, G. Valtin⁵, A. Vosoughi⁴

Motivation

- Systemkritikalität:** Transformatoren sind das unverzichtbare Rückgrat für eine stabile Energieversorgung.
- Unterstützung der Energiewende:** Sicherer Betrieb trotz volatiler Lasten durch erneuerbare Energien.
- Lebensdaueroptimierung:** Exakte Steuerung des Alterungsprozesses statt pauschaler Schätzungen.
- Unterstützung proaktiver Wartungsstrategie:** Wechsel von reaktiven Aktivitäten zu vorausschauender, prognosebasierter Wartung.
- Erhöhung der Datenqualität:** Umwandlung vorhandener Betriebsdaten in tiefgehende Zustandskenntnisse.
- Überwindung von Informationsgefällen:** Ermöglichung des Aufbaus eines funktionalen Digitale Zwillings auf Basis von Betreiberdaten
- Ganzheitliche Risikominimierung:** Umfassender Schutz vor thermischen, elektrischen und chemischen Risiken.
- Entscheidungssicherheit für Betreiber:** Klare, physikalisch fundierte Entscheidungsgrundlagen für Belastungsgrenzen und Reserven.
- Wirtschaftliche Optimierung:** Präzise Überwachung vermeidet hohe Kosten durch Ausfälle und lange Lieferzeiten.

Projektpartner

Unternehmenspartner

- 1



**Sachsen
Netze**
- 2


- 3



Hochschulpartner

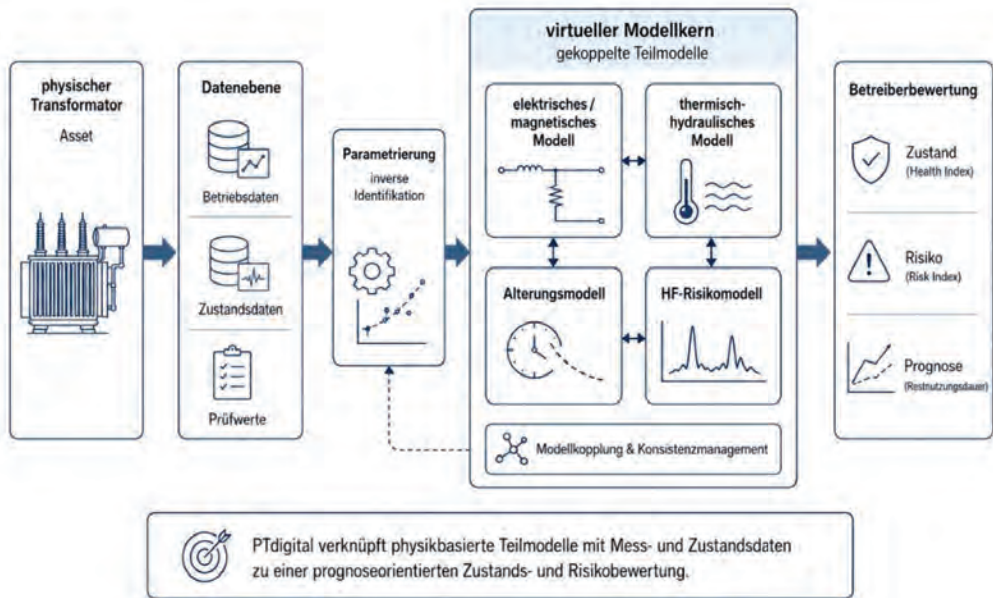
- 4



**Hochschule
Zittau/Görlitz**
- 5



Aufbau des Digitalen Zwillings



Schwerpunkte dieses Projektes:

- Ausgangssituation:** Aus vorliegendem begrenztem und unvollständigem Informationraum (Transformatorhandbuch) soll ein digitaler Zwilling aufgebaut werden
- Erstellung eines physikalischen Zwillings (elektrisches, magnetisches, thermisches Modell)** auf Basis vorliegender Daten beim Betreiber (zB Transformatorhandbuch, Prüfprotokolle) und gegebenenfalls weiterer Informationen aus dem Betrieb unter Nutzung des genetischen Algorithmus.
- Aufbau eines elektrischen Modells zu Ermittlung des höherfrequenten Verhaltens von Transformatoren** auf Basis der geometrischen Anordnung der Wicklungssysteme zur Ermittlung der Potenzialverteilung, Feldstärkenverteilung und Übertragungsverhalten.
- Ermittlung von Alterungsparametern** als auch die Prognostizierbarkeit von Alterungsparametern unter Nutzung von ermittelbaren Ölparametern und deren Evaluierung
- Integration der Resultate in das DaFA** (Defect and Failure Analysis) Schema aus dem vorgänger Projekt SMART-TR

Nutzen und Ausblick

- Berechnung der dynamischen Temperatur** für unterschiedliche Lastszenarien über die Möglichkeiten von IEC und IEEE hinaus auf Basis von Betreiberdaten (Transformatorhandbuch)
- Berechnung der höhrefrequenten Potenzialverteilung** auf Basis des ermittelten geometrischen Modells
- Nutzen von Öldiagnosedaten zur Alterungsindikation und Prognosemöglichkeit** auf Basis der berechneten Temperaturbeanspruchung
- Verbesserung des Digitalen Zwillings** durch mögliche Rückkopplung aus Betriebsdaten (zB Last, Temperatur) und Diagnosedaten (zB SFRA)
- Einbindung in Zustandsbewertungsverfahren** (zB DaFA)

Reduktion des Einflusses von Zuleitungen auf die Messergebnisse der Frequency Response Analysis (FRA)

TLM 2026

15. Transformation des Messergebnisses



Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje¹⁾; M.Sc. Christian Kohlsaat²⁾
¹⁾Fakultät 4 Elektrotechnik & Informatik, Hochspannungslabor, Hochschule Bremen
²⁾Schering-Institut, IfES, LUH, Hannover

Einleitung

Die Frequency Response Analysis (FRA) ist eine seit mehr als 50 Jahren bekannte, nicht invasive, elektrische Methode zur Analyse mechanischer Änderungen des Wicklungszusammenhangs von Transformatoren und Drosseln (DUT), wie sie nach Transport oder nach Kurzschlüssen auftreten können. Dazu wird eine Vergleichsmessung, zB. im Prüffeld, herangezogen.

Eine Messung erfolgt mit kleinen Spannungen eines FRA-Gerätes oder Vektornetzwerkanalysators im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und einigen MHz. Abweichungen werden aus der Verschiebung von Resonanzfrequenzen und den Amplitudenabweichungen interpretiert.

Messaufbau und Interpretation der Messergebnisse ist in Standards festgelegt: DIN EN 60067-18, CIGRE TB 342.

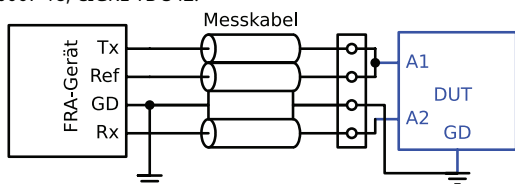


Bild 1: FRA Messaufbau nach Norm

Motivation

Da in der Praxis und in den Anlagen die Anschlüsse der eingebauten Betriebsmittel häufig nicht mit vertretbarem Aufwand so hergestellt werden können, wie bei der Vergleichsmessung, zB. bei einer Speisung über eine GIL, soll der hier vorgeschlagene erweiterte Messaufbau untersucht werden.

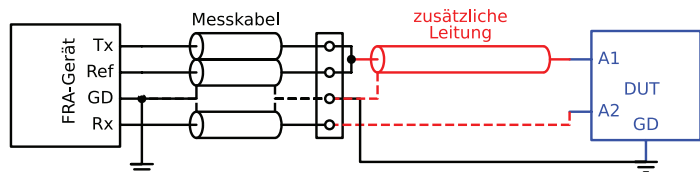


Bild 2: Erweiterter FRA Messaufbau

Die zusätzliche Leitung zwischen Anschlußpunkt und DUT könnte die Messergebnisse verfälschen.

Ziel dieser Untersuchung ist daher, welche Änderungen der Messergebnisse dadurch entstehen und ob diese korrigiert werden können.

Eigenschaften von Zuleitungen

Leitungen werden längenbezogen in einem elektrischen Ersatzschaltbild (Bild 3) beschrieben und zeigen dabei eine komplexe Wellenimpedanz Z_0 und eine komplexe Ausbreitungskonstante γ

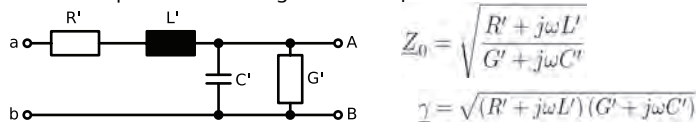


Bild 3: elektrisches Ersatzschaltbild einer Leitung

- Bei energietechnischen Querschnitten wird ab einigen 100 Hz nicht mehr der gesamte Leiterquerschnitt durchströmt, es beginnt der Skineneffekt.
- Der Leitwert G' wird für tiefe Frequenzen aus dem $\tan \delta$ abgeleitet.

Beispielhaft für ein typisches Messkabel ist ein RG58 mit $Z_0 = 50 \Omega$

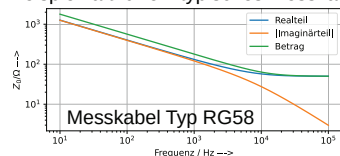


Bild 4: Wellenimpedanz Z_0

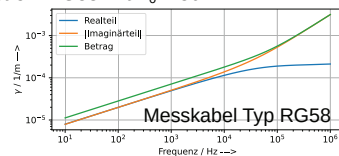


Bild 5: Ausbreitungskonstante γ

transformierte Lastimpedanz

Die Eingangsimpedanz Z_{in} von RG58, bei $l = 100$ m mit verschiedenen Lastwiderständen Z_L wird bestimmt mittels

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma l}$$

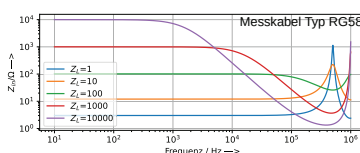


Bild 6: Eingangsimpedanz bei $l = 100$ m

Messobjekt

Bahnstromtransformator, 1-phasig, 16,7 Hz, 160 kVA, $16 / 2 \cdot 0,23$ kV, $u_k = 5,9 \%$

Tabelle 1: verwendete zusätzliche Leitungen nach Bild 2

Anmerkung: = Kabel in Reihe, || parallel

Länge/m	Gesamtlänge/m	Impedanz/ Ω	Typ
0	0	k.A.	k.A.
20	20	50	RG58
80	80	50	RG58
20=80	100	50	RG58
20 20	20	25	RG233
20 20=80	40	25=50	RG233
20 20=80	100	25=50	k.A.



Bild 7: Messobjekt

Messergebnisse

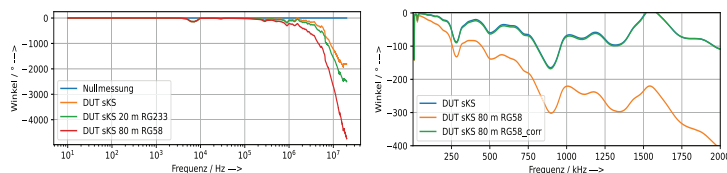


Bild 8: Phasengang bei verschiedenen, zusätzlichen Messleitungen

links: 10 Hz bis 20 MHz;

rechts: Ausschnitt der Darstellung "links" bis 2 MHz; mit rechnerisch korrigierter Messleitung

Die gemessene Eingangsimpedanz Z_{Ltg} der erweiterten Messanordnung mit der Leitungslänge l wird korrigiert mit

$$Z_{korrr} = Z_{Ltg} e^{-j\gamma l}$$

Die Amplitudengänge weisen im interessierenden Frequenzbereich keine wesentlichen Änderung auf. So kann die Korrektur auf den Phasengang beschränkt werden mittels:

$$Z_{korrr} = Z_{Ltg} e^{-j\frac{2\pi f l}{v_p}}$$

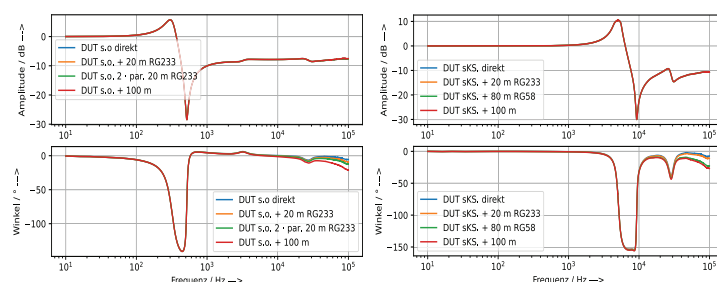


Bild 9: Amplituden- und Phasengangsdarstellung des Messobjektes mit offener (links) und kurzgeschlossener (rechts) Sekundärseite

Zusammenfassung

In der FRA-Untersuchung eines Transformators mit zusätzlichen Messleitungen konnte eine Erweiterung des Messaufbaus nach Norm vorgeschlagen werden. Die Einflüsse auf das Messergebnis im Vergleich zwischen Erweiterung und normgerechten Aufbau zeigen im Einzelnen:

- die analytischen Untersuchungen für die Erweiterung der Anschlüsse des Messobjektes (DUT) über zusätzliche Messleitungen ergaben eine starke Frequenzabhängigkeit der Leitungsparameter Z_0 und γ unterhalb 10 kHz,
- zusätzliche Messleitungen von vielen 10 m Länge können im Frequenzbereich bis wenige MHz eine wertmäßig große Leitungstransformation mit einem Viertel der Wellenlänge erzeugen,
- für energietechnische Zuleitungen mit geringerer Wellenimpedanz wurde die Tabelle der untersuchten Messleitungen erweitert,
- die Amplitudengänge haben keine nennenswerte Änderung gezeigt,
- die Änderungen in den Phasengängen lassen sich analytisch korrigieren.
- Eine Erweiterung des Messaufbaus für die FRA nach Bild 2 scheint möglich.

Low-Cost End-to-End UHF Sensing and Processing Chain for Partial Discharge Diagnostics in Power Transformers

B. Balali¹, M. Kuhnke¹, P. Werle¹, J. Möllering², M. Göhring², P. Bachmann²

¹ Leibniz University Hannover, Institute of Electric Power Systems

Division of High Voltage Engineering and Asset Management, Schering-Institute, Hannover, Germany

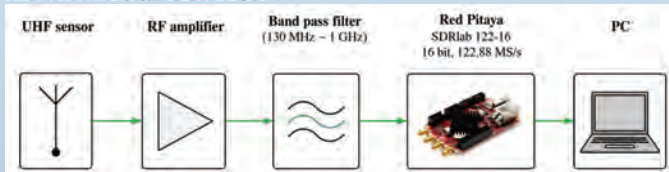
² Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH, Barleben, Germany

Motivation & Objective

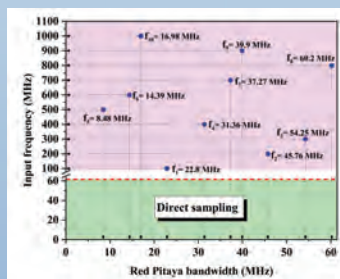
- PD activity is an early indicator of local insulation defects in power transformers.
- UHF detection is a robust complementary method to IEC 60270 : PD pulses radiate detectable EM components.

Objective: an integrated, low-cost, retrofit-capable UHF monitoring system for early detection of partial discharges (PD) in power transformers

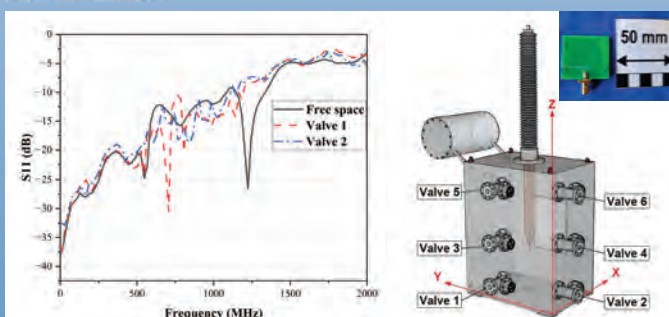
Monitoring Concept



- Amplifier before the filter raises weak PD pulses above its insertion loss.
- 16 bit, 122.88 MS/s; controlled undersampling preserves pulse information.
- FPGA trigger-based acquisition, phase-reference sync → online PRPD on device.



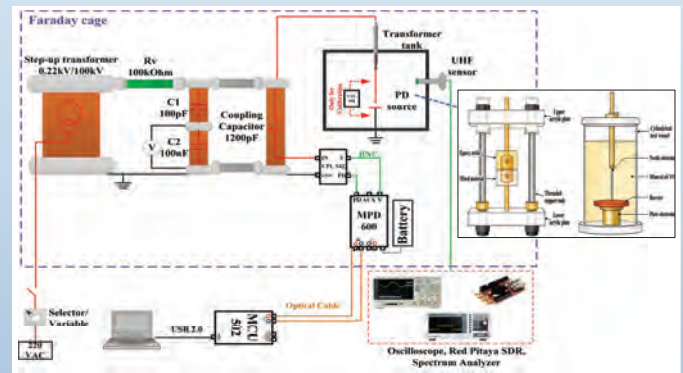
UHF Sensor



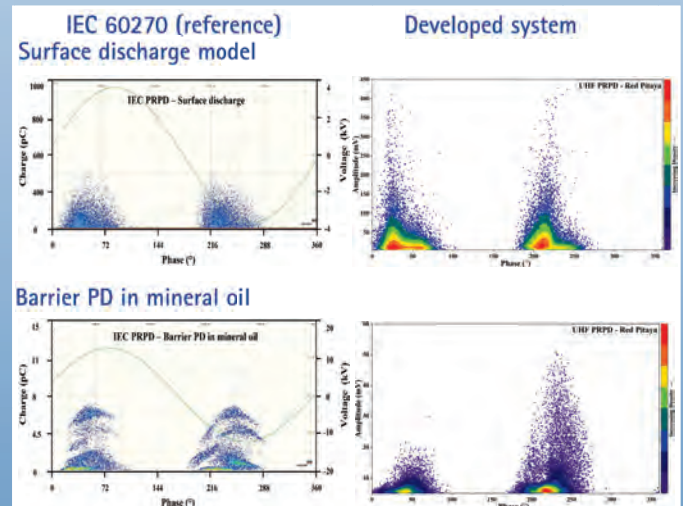
- Compact PCB antenna, 36.4 mm × 30 mm, 50 Ω SMA, POM housing.
- Fits a standard oil valve at 6 cm insertion depth – no tank modification.

Experimental Setup

- Source (a): surface discharge, plate electrodes on epoxy resin / mixed material.
- Source (b): barrier PD in mineral oil, needle-plate with incompletely impregnated barrier.
- Parallel-validation with electrical measurements based on IEC 60270 (PRPD), Oscilloscope 2 GS/s, Spectrum Analyser



Results – PRPD comparison



Key Findings

- Diagnostic information preserved – PRPD morphology matches IEC 60270
- Retrofit-capable and low-cost – standard oil valve, commodity SDR platform
- Automation-ready – broadband acquisition, no operator frequency selection

Vergleichende Bewertung verschiedener Schwingungsanregungsmethoden für die experimentelle Modalanalyse von Leistungstransformatorkernen

Ali Azeroual, Peter Werle

Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme,
Fachgebiet Hochspannungstechnik und Asset Management, Schering-Institut

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden verschiedene Schwingungsanregungsmethoden für die experimentelle Modalanalyse von Leistungstransformatorkernen vergleichend untersucht. Betrachtet werden eine harmonische Einzelanregung, ein Frequenzsweep, weißes Rauschen sowie die Impulsanregung mittels Impulshammer. Die Schwingungsantwort des Transformator-kerns wird mit piezoelektrischen Beschleunigungssensoren erfasst und im Frequenzbereich ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Identifizierbarkeit struktureller Resonanzen. Insbesondere die Impulsanregung ermöglicht eine zuverlässige Erfassung mehrerer Eigenfrequenzen über einen breiten Frequenzbereich und erweist sich damit als besonders geeignet für die experimentelle Modalanalyse.

IMPULSANREGUNG (IMPULSHAMMER)



- Breitbandige mechanische Anregung mittels Impulshammer
- Synchrone Erfassung von Anregungskraft und Strukturantwort

Experimenteller Aufbau und Methodik

Anregungs- und Messprinzip



- Definierte Anregung des Transformator-kerns
- Erfassung der Strukturantwort mittels Beschleunigungssensoren

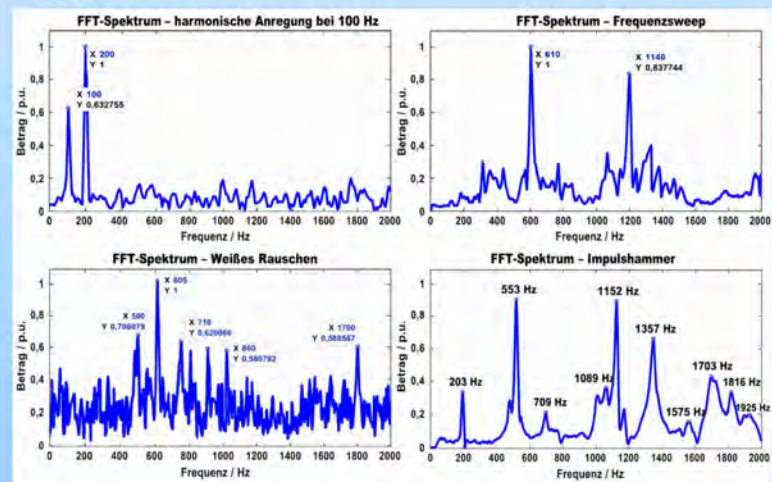
Experimentelle Messanordnung

HARMONISCHE ANREGUNG (Sinus / Frequenzsweep / Weißes Rauschen)



- Anregungssignale: Sinus (100 Hz), Frequenzsweep und weißes Rauschen
- Kontaktlose Schwingungsanregung mittels akustischem Erreger

Ergebnisse



Anregungsmethode	Charakteristik
Harmonisch (100 Hz)	Einzelner dominanter Frequenzpeak
Frequenzsweep	Wenige schwach ausgeprägte Resonanzpeaks
Weißes Rauschen	Mehrere Resonanzpeaks mit hohem Grundrauschen
Impulshammer	Zahlreiche klar ausgeprägte Resonanzpeaks

Zusammenfassung

Der Vergleich zeigt deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Anregungsverfahren. Harmonische Anregung und weißes Rauschen sind für die Modenidentifikation nur eingeschränkt geeignet, während der Frequenzsweep wesentliche Resonanzbereiche erfasst. Die Impulshammeranregung liefert die zuverlässigsten Ergebnisse zur Bestimmung von Eigenfrequenzen, Modenformen und Dämpfung und ist damit das bevorzugte Verfahren für die experimentelle Modalanalyse von Transformator-kernstrukturen.

Modifizierte DGA-Analyse mit Einbeziehung höherwertiger Kohlenwasserstoffe als Zustandsdiagnose für Transformatorfehler

Kristin Homeier¹, Peter Werle¹, Dorit Wilke², Michael Hahn²

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme, Fachgebiet Hochspannungstechnik und Asset Management, Schering-Institut

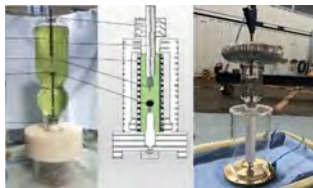
² ECH Elektrochemie Halle GmbH, Halle(Saale), Germany

Kurzfassung

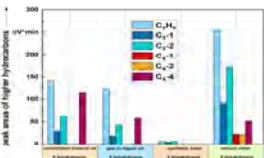
In diesem Beitrag wird das Gasbildungsverhalten von verschiedenen Isolierflüssigkeiten infolge verschiedener Transformatorfehler untersucht. Neben der Generation von konventionellen Fehlern wurde auch die Bildung höherwertiger C₃ bis C₅ Kohlenwasserstoffe (KW) infolge von den verschiedenen Transformatorfehlern untersucht. Es konnten Unterschiede der Gaskonzentration und -verhältnisse bei den Fehlerarten sowie auch Isolierflüssigkeiten festgestellt werden.

Blitzstoßspannungen Vergleich der Isolierflüssigkeiten

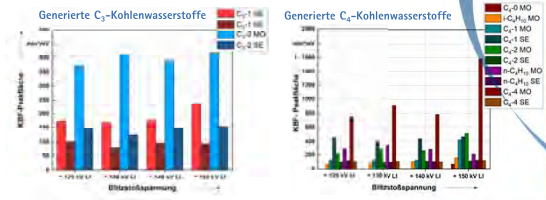
- Nachbildung eines D-Fehlers
- Anlehnung an IEC 60897
- Nadel-Kugel-Elektrode mit 25mm Elektrodenabstand
- PET-Flasche mit 300 ml Ölvolumen



C₃- und C₄-Kohlenwasserstoffe
5 Stöße bei +124 kV Blitzstoßspannung

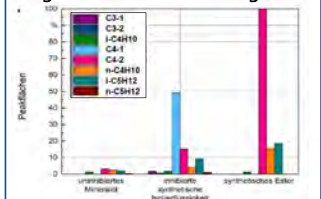


Einfluss der Stoßenergie

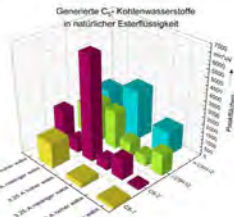
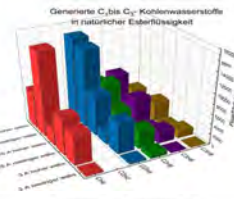


Thermischer Hot-Spot-Fehler

Vergleich der Isolierflüssigkeiten



Einfluss der Temperatur

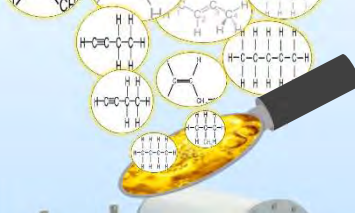


- Nachbildung eines T-Fehlers
- Widerstandswickel aus Konstantan
- Keramikstab mit Gewinde
- Kühlung durch Mantelgefäß



Modifizierte DGA-Analyse

Es wurde ein Prototyp entwickelt, mit dem neben den konventionellen Fehlern ebenfalls höherwertige C₃- bis C₅- Kohlenwasserstoffe detektiert werden können. Dieses System wurde zunächst lediglich für i- und n-Butan und i- und n-Pentan kalibriert. Es wurden aber weitere höherwertige KWs detektiert, die als unbekannte, aber zumindest mit der C-Atom Anzahl gekennzeichnet werden. Diese werden aktuell identifiziert und anschließend kalibriert.

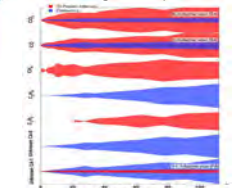


Papieralterung (PA) und Ölalterung (OA)

- Nachbildung einer Papieralterung PA sowie Ölalterung OA im Labor
- 120 °C im Wärmeschrank
- Verschiedene Probenentnahmetage



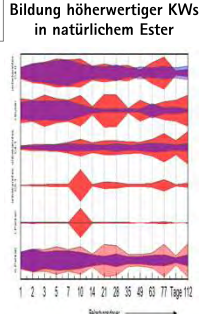
Konv. Fehlergase in synth. Ester



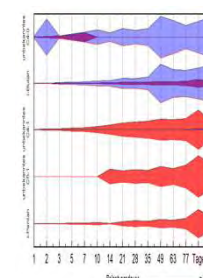
Synthetische Esterflüssigkeit



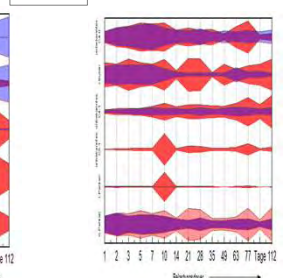
Inhibiertes Mineralöl



Bildung höherwertiger KWs in inhibiertem Mineralöl



Bildung höherwertiger KWs in natürlichem Ester



Zusammenfassung

In den Isolierflüssigkeiten wurden infolge der Nachbildung von Transformatorfehlern (PA/OA-Fehler, T- Fehler sowie D-Fehler) im Labor neben konventionellen Fehlern auch noch verschiedene höherwertige KWs generiert. Je nach Fehlerart wurden auch Unterschiede in der Art der höherwertigen Kohlenwasserstoffe deutlich. Zudem wurden große Unterschiede bei dem Gasbildungsverhalten von verschiedenen Isolierflüssigkeiten festgestellt. Die Einbeziehung der höherwertigen KWs in die DGA scheint somit also eine vielversprechende Möglichkeit zur Verbesserung der DGA-Interpretation für die Transformatorfehlerart sowie auch Schwere der Fehler darzustellen.

Systematic Analysis of Electric Motor Insulation Systems under Multiple Electrical and Thermal Stress Conditions

Burhan Doğan Leventerler, Peter Werle

Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme,
Fachgebiet Hochspannungstechnik und Asset Management, Schering-Institut

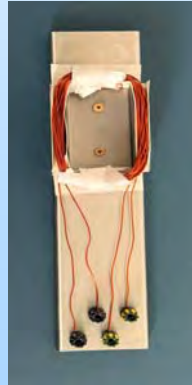
Motivation & Research Question

To investigate the effects of multiple stresses (waveform, frequency, temperature, polarity, and dv/dt) to which motor insulation is subjected in electric vehicle motors and modern drives (inverters).

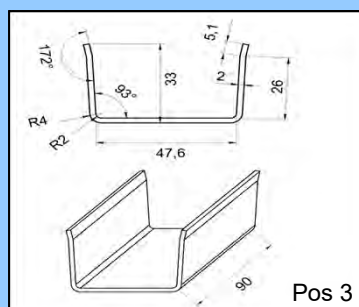
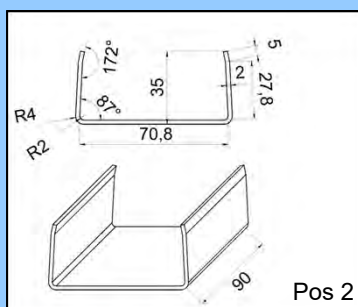
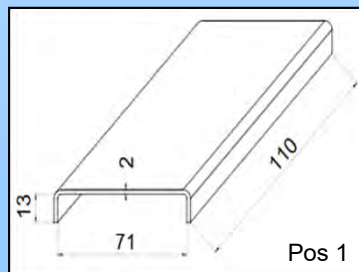
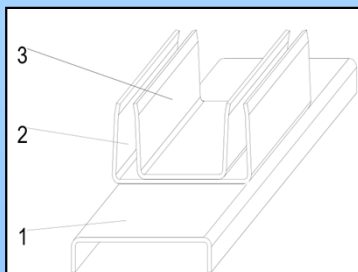
- How combined stresses influence Partial Discharge (PD) characteristics and Breakdown Voltage (BDV).
- Which stress parameter becomes dominant as frequency increases.
- The effect of polarity reversals in rectangular waves on asymmetric aging.
- The deviation of the mathematical trend between dv/dt (rise time) and PD/BDV from the sinusoidal reference.

Motorette Geometry & Construction

- Core Construction: A laminated silicon steel core simulating the actual stator geometry.
- Winding Construction: A 50-turn double-layer construction (two-layer configuration).
- Conductor Type: 1.0 mm diameter, Grade 2 enameled copper wire. IEC 60317-13.
- Insulation Material: 0.38 mm Nomex® T410 paper for phase-to-earth and phase-to-phase insulation.
- Slot Geometry: 10 mm base width and 35 mm slot depth.



Technical Drawing of the Motorette



Experimental Matrix

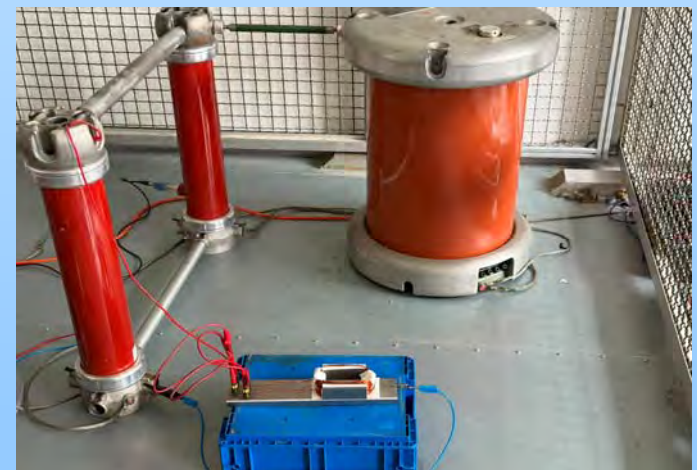
To prevent memory effects and sample degradation, the design comprises 504 identical motorettes, ensuring a fresh sample at every test stage.

Step	Changing Parameters	Constant Parameters	Samples (Pcs)
1	Frequency / Temperature / Thermal Aging	Waveform : Sine	126 Pcs
2	Frequency / Temperature / Thermal Aging	Waveform : PWM	126 Pcs
3	Frequency / Temperature / Thermal Aging	Waveform / Frequency	126 Pcs
4	Frequency / Temperature / Thermal Aging	Waveform / Frequency	126 Pcs

Initial Validation & Commissioning Status

The installation of the test system has been completed, and preliminary tests have been conducted on the initial samples, ensuring the system's stability and functional verification.

Test Setup



Current Status and Next Steps

Current Status:

- Motorette design completed.
- Samples produced.
- Test setup installed and commissioned.

Next Steps:

Initiating systematic multi-stress testing at full capacity and completing data collection automation.

Fehlererkennung- und Lokalisierung in Energiekabeln mittels Frequenz Domänen Analyse (FDA)

Christian Kohlsaatt¹, Hamidrezah Sharifpanah^{1,2}, Younes Norouzi³, Peter Werle¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme, Fachgebiet Hochspannungstechnik und Asset Management, Schering-Institut

² Seaway7, Leer, Germany

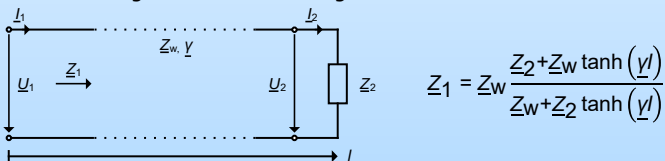
³ Bynoc GmbH, Hamburg, Germany

Kurzfassung

Dieser Beitrag stellt ein Konzept für ein neues System zur Detektion, Lokalisierung und Klassifizierung von Fehlern in Hochspannungskabeln vor. Es basiert auf der Frequenzbereichsanalyse, die Veränderungen der elektrischen Kabelparameter über den Frequenzgang erkennt. Ziel ist eine genauere Fehlerlokalisierung und -klassifizierung ohne zusätzliche Schädigung des Kabels.

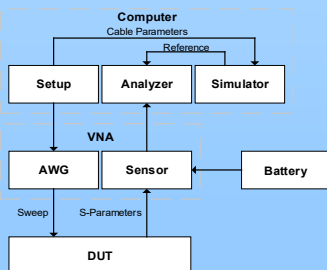
Frequenz Domänen Analyse (FDA)

Die FDA basiert auf der Leitungstheorie. Messtechnisch wird das Antwortverhalten des Kabels auf ein angelegtes Sweep-Signal untersucht. Änderungen der elektrischen Parameter spiegeln sich in der Antwort bzw. komplexen Eingangsimpedanz wider und lassen sich so zur Erkennung, Lokalisierung und Klassifizierung von Fehlern nutzen.



Detektionssystem

Das Detektionssystem besteht aus Computer, Frequenzganganalysator (VNA) und Batterie. Der Computer konfiguriert den Analysator und ermittelt algorithmisch durch Abgleich der fehlerbehafteten Messung mit einer Referenzmessung Art und Ort der Fehler. Der VNA misst den Streuparameter S11, indem er eine Sinusspannung von 0 Hz bis 20 MHz anlegt und die Signalantwort erfasst. Daraus werden die komplexe Eingangsimpedanz und der Reflexionsfaktor bestimmt.

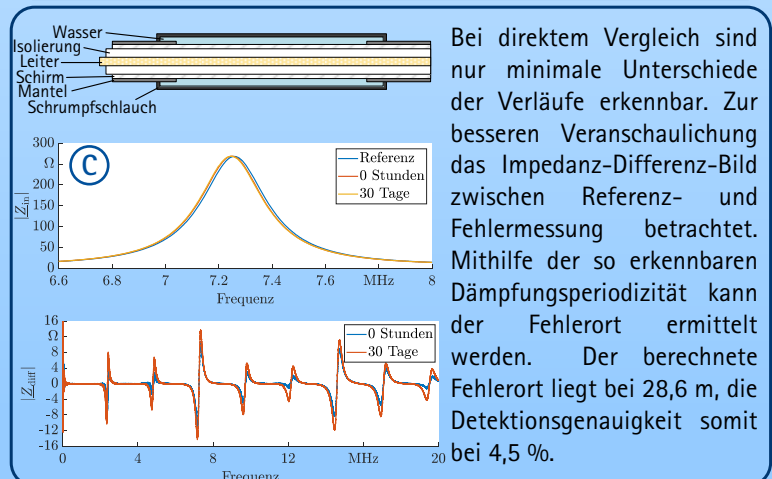
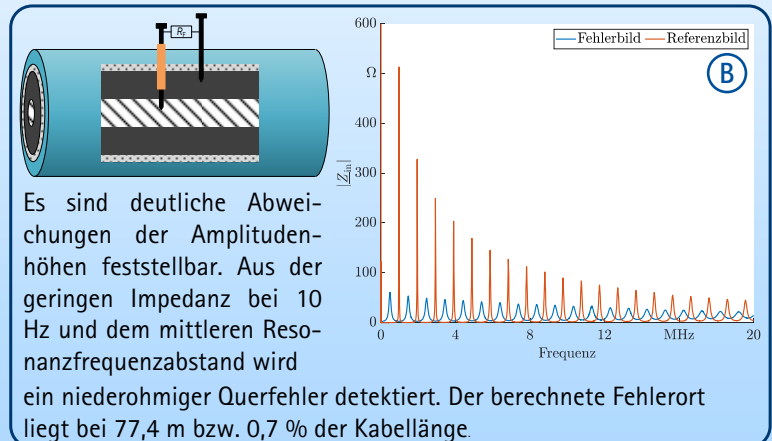
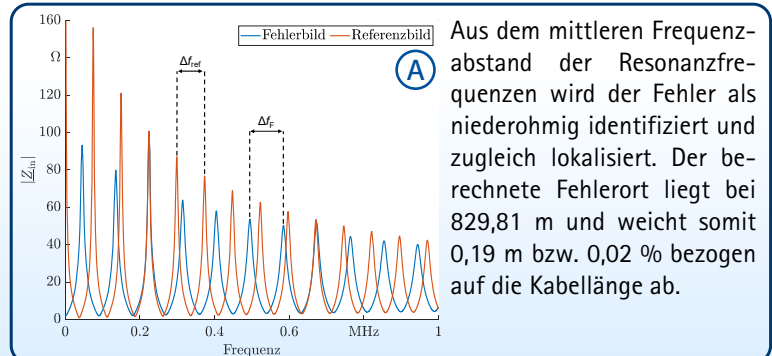


Fehlerbeispiele

Beispiel A: Simulation eines 1000 m Mittelspannungskabels mit Fehlerort bei 830 m mit niederohmigen Querfehler von 1 Ω .

Beispiel B: Messung eines 77,86 m Mittelspannungskabels mit Fehlerort bei 76,85 m mit niederohmigen Querfehler von 1 Ω .

Beispiel C: Messung eines 40 m Koaxialkabels mit Fehlerort bei 26,8 m mit Längsfehler (Feuchtigkeitsfehler)



Zusammenfassung

Das vorgestellte System bietet einen neuen Ansatz zur Fehlerlokalisierung und detektiert sowohl Quer- als auch Längsfehler mit hoher Genauigkeit, ohne zusätzliche Schäden zu verursachen. Eine weitere Optimierung des Algorithmus anhand realer Kabelstrecken ist geplant.

Danksagung

Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

1 WHY RETROFILL?

KEEP THE ASSET. CHANGE THE LIQUID.

A targeted retrofill can address site-specific risks without automatically replacing a serviceable transformer.

EXISTING TRANSFORMER

MINERAL OIL



SYNTHETIC ESTER LIQUID

ASSET RETAINED

01

FIRE & SMOKE

Lower exposure in enclosed or adjacent-unit settings.

02

ENVIRONMENT

Reduce potential impact from mineral-oil leakage.

03

SPACE & COST

Avoid relocation, fire walls or suppression constraints.

04

ASSET LIFE

Retain a sound asset after application-specific assessment.

2 THREE FIELD APPLICATIONS

Same decision - different operating contexts



CASE 1 | 132 kV HYDROPOWER

WHY Lower potential environmental impact from a leak.

HOW On-site retrofit after a >33 kV viability review.

PROOF Post-fill results within IEC 61203 limits.

TAKEAWAY Assess the candidate; establish a post-fill baseline.

CASE 2 | STEEL MILL INDUSTRY

WHY Reduce adjacent-unit fire exposure.

HOW Less-flammable fluid avoids separation or suppression.

PROOF Uptime retained; 6–12 months replacement avoided.

TAKEAWAY Fluid substitution can be practical where barriers are not.



CASE 3 | UNDERGROUND MINING

WHY Reduce underground fire and smoke risk.

HOW K-class fluid avoids costly relocation.

PROOF Fire-safety and spacing benefits observed.

TAKEAWAY Site assessment unlocks fire-risk, space and asset-life benefits.



3 THE DECISION PATH

A managed engineering decision - not a fluid swap alone

01 ASSESS

Design · Condition · Duty

02 PREPARE

Removal · Preparation · Filling

03 COMMISSION

Electrical + Fluid Baseline

04 MONITOR

Data Interpreted Vs Objectives

Every retrofit remains application-specific.

FIND OUT MORE

Scan for more information and case studies: shell.com/midel



CONTACT

Robert Copley - BDM Western Europe, MIDEI
Robert.copley@shell.com

ESSENTIAL SOURCES

1 132 kV Hydro Power Retrofill, Nordic Region (2026) testimonial
2 Charter Steel Mill, Wisconsin USA (2026) testimonial
3 Mining Transformers Retrofill, Australia (2026) testimonial

DISCLOSURE

Recommendations are given in good faith; users must satisfy themselves of product suitability and safe use in accordance with written instructions. © SOPUS Products. All rights reserved.

Tagungsleitung

Prof. Dr.-Ing Peter Werle

Leibniz Universität Hannover - Schering-Institut

Prof. Werle hat Elektrotechnik an der Universität Hannover studiert und anschließend am Schering-Institut in Hannover promoviert.

Von 2003 bis 2014 war er bei ABB Transformer Service in verschiedenen nationalen und internationalen Positionen insbesondere im Bereich der Diagnose und Prüfung von Leistungstransformatoren tätig. Von 2010 bis 2014 war er Geschäftsführer des Transformer Service in Deutschland und verantwortlich für die Servicewerkstätten in Halle (Saale), Neusäss (bei Augsburg) und Nauen (bei Berlin) mit über 200 Mitarbeitern. Seit Oktober 2014 ist er als Professor für Hochspannungstechnik und Asset Management und Direktor des Schering-Instituts an der Leibniz Universität Hannover.

Er ist Mitglied im VDE, IEEE, DKE K 182 (Isolierflüssigkeiten) und aktiv in CIGRÉ als Liaison Officer A2-IEC TC 10 (A2: Transformer; IEC TC 10: Fluids for electrotechnical applications), sowie in der Advisory Group AG A2.4 und in verschiedenen CIGRÉ Working Groups. Er ist Erfinder von mehr als 20 Patenten und Autor oder Mitautor von mehr als 300 Veröffentlichungen in den Bereichen Asset Management, Zustandsüberwachung, Teilentladungsdia gnose, Isolierflüssigkeiten und Hochspannungsprüfung.



Prof. Dr.-Ing. Habil Hossein Borsi

Leibniz Universität Hannover - Schering-Institut

Prof. Borsi hat Elektrotechnik an der Universität Hannover studiert und promovierte 1976 im Bereich Hochspannungstechnik und erhielt 1979 seine venia legendi an der Universität Hannover, Deutschland.

Im Jahr 1979 begann er an der Ferdowsi-Universität von Mashhad, Iran, an der Fakultät für Ingenieurwesen, wo er bis 1986 als Professor für Energietechnik und Dekan der Fakultät für Ingenieurwesen tätig war. Er gründete die Transformatorenfabrik "Reza Transwerk" in Mashhad und war dort bis 1985 technischer Direktor. Neben seiner Tätigkeit an der Universität wurde er zum wissenschaftlichen Berater des iranischen Energieministers ernannt. Seit 1987 ist er als Professor und akademischer Direktor an der Universität Hannover im Bereich der Hochspannungstechnik tätig. Er ist Mitglied im VDE, arbeitete in verschiedenen CIGRE Task Forces und nationalen Arbeitsgruppen für Normung. Er ist Autor und Co-Autor von mehr als 350 wissenschaftlichen Veröffentlichungen in verschiedenen Sprachen und Co-Autor von drei wissenschaftlichen Büchern und hält mehr als 30 Patentanmeldungen. Er war als Sachverständiger für verschiedene Hochspannungsanlagen tätig und arbeitete als Sachverständiger für Fehlerursachenanalysen bei großen Leistungstransformatoren in verschiedenen Ländern der Welt.



Referenten

Dr. Fabian Lehretz

TenneT TSO GmbH

TenneT TSO GmbH Asset Management – Primary Technology

- Geburtsort: Marktrechwitz
- Studium: Verbundwerkstoffe in der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Berufserfahrung:

10 Jahre Material- und Prozessentwicklung
bei Lapp Insulators in Wunsiedel
Bei TenneT seit dem 01.10.2019



Notizen:

[illegible]



19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

TenneT TSO GmbH

1 TSO in Deutschland⁽¹⁾

ÜBERTRAGUNGSNETZ

14,116km Länge des Onshore- und Offshore-Netzwerks

OFFSHORE-KAPAZITÄT

24 Vernetzte Offshore-Windparks
2,205km⁽⁴⁾ Länge des DC-Offshore-Netzwerks

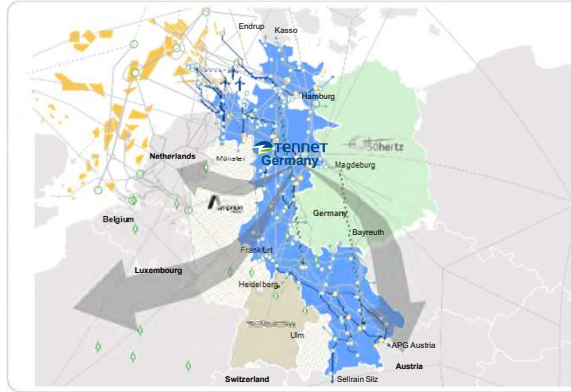
GEOGRAFISCHE PRÄSENZ

Nord-Süd-Korridor

INNOVATIVE NETZTECHNOLOGIEN

Hochspannungs-Gleichstrom-Systeme, Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb, Lastflusssteuerungen

Key Connector Across Europe



Finanzprofil⁽²⁾

€6.8bn
Investitionen in 2024

€14.4bn
2022–2024A

€27.8bn
RAB as of Dec-24

25% CAGR
2022–2024A

€2.2bn
EBITDA⁽³⁾ in 2024

13% CAGR
2022–2024A

Notes:

1. As of 31 December 2024, in terms of length of the transmission network (Stromkreislänge), installed capacity (installierte Leistung), and control area size (based on publicly available information for all German TSOs on their respective websites)
2. TenneT Germany definition of Investments, RAB and underlying EBITDA see Glossary
3. For underlying EBITDA, please refer to Glossary for detailed definition
4. Including entire Nordlink cable

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehtetz



Die Energiewende – eine Herausforderung für die Gesellschaft



Das Ziel:

Wende zur CO₂-Neutralität (Europa bis 2050 und Deutschland bis 2045)



TenneTs Beitrag:

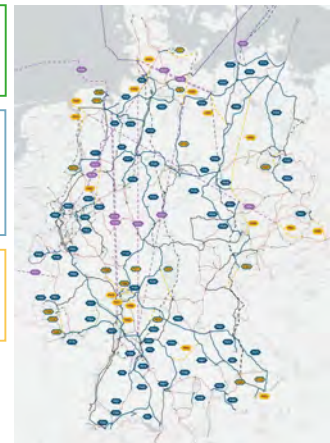
Bereitstellung der Netzinfrastruktur für die Integration erneuerbarer Energien und neuartiger Speichertechnologien und Sektorenkopplung.



Die Herausforderung:

Planung mit häufigen Veränderungen und knappen Ressourcen

- Der Übergang zur Klimaneutralität und zur Versorgungssicherheit in einer der größten Industrienationen der Welt kann nur als gesamtgesellschaftliches Projekt gelingen. Es liegt an Politikern, Wirtschaftsführern, Wissenschaftlern und Bürgern, gemeinsam daran zu arbeiten, damit dies gelingt



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehtetz



19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans NEP 2037/2045 (2025)

	Bestand		NEP 2025 B 2045 (B 2037)
Energiebedarf [TWh]	523,3	+126%	1181,9 (1027,4)
Wind Onshore [GW]	63,5	+151%	160,0 (158,2)
Wind Offshore [GW]	9,2	+661%	70,0 (56,0)
Photovoltaik [GW]	99,8	+301%	400,0 (345,4)
Batteriespeicher [GW]	11,6	+1229%	154,2 (134,8)
Elektrolyse [GW]	0,2		58,5 (42,0)



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz

Strommix in Deutschland (Q1-2026)



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Volatilität und lokale Unterschiede erneuerbarer Energien



Herausforderung:

Nord-Süd-Gefälle mit hohem Übertragungsbedarf



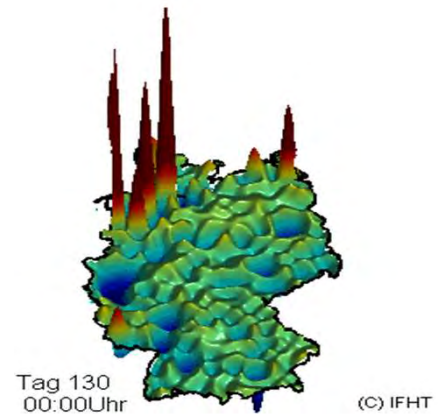
Erneuerbare Energien:

Einspeisung sehr heterogen



Entwicklung der n-1 Verletzungen:

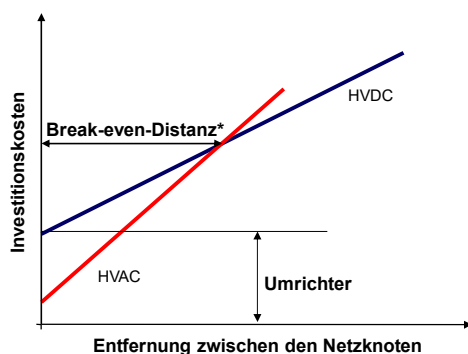
2003: 2 Mal im Jahr
2013: 1.009 Mal im Jahr
2022: 2.660 Mal im Jahr



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehetz



Gleich- vs. Wechselspannung



***Weitere Einflussfaktoren:**
Übertragungsleistung
Kabellänge
Anzahl der Systeme
Bewertung der Verluste

Ab einer bestimmten Länge ist die Übertragung mit Wechselspannung technisch oder wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehetz



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

HVDC – Hohe Übertragungsleistung über weite Distanzen

- 4 x 2 GW Übertragungssysteme
 - Entlastung des AC Übertragungssystem
 - Reduktion von Redispatch
- Optimierung hinsichtlich Verluste, Trassenführung und Raumbedarf

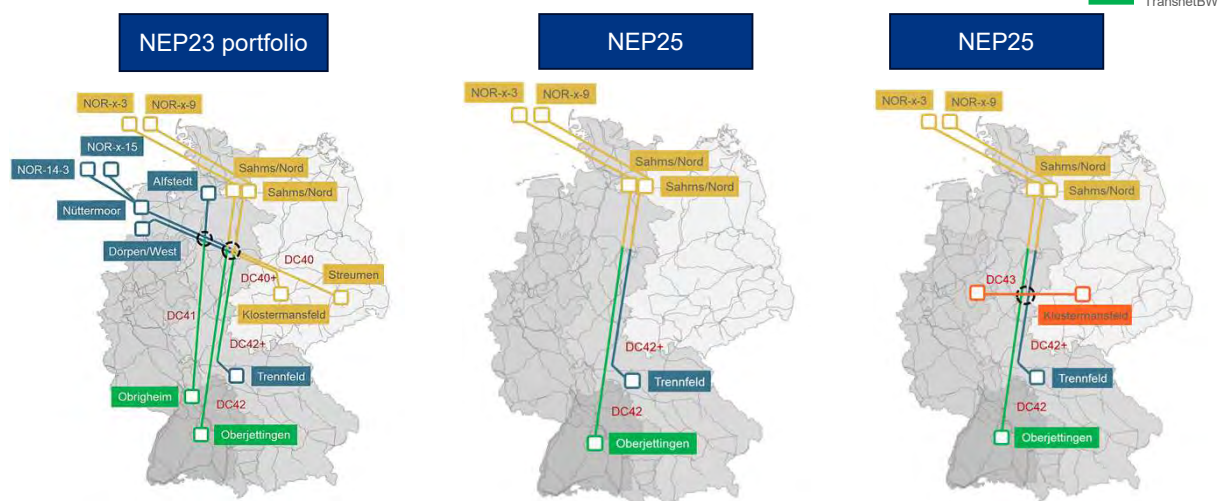
Implementierung der neuen Spannungsebene 525kV DC in Deutschland



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz



Veränderungen der Planungsbasis



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz

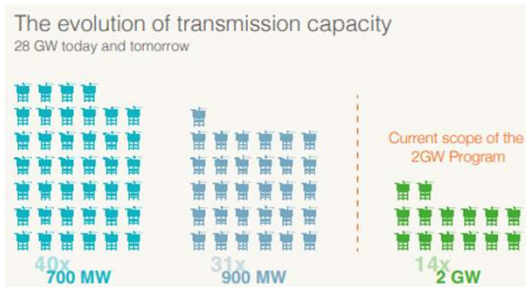


19. Transformer-Life-Management Konferenz

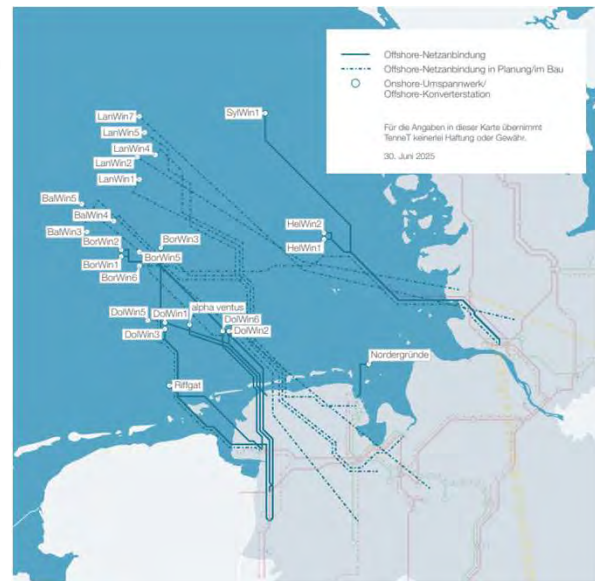
21.-22. September 2026, Frankenthal

Offshore Wind Integration

- Effiziente großflächige Integration von Offshore Strom
Deutsches Ziel 70 GW bis 2045
- Idee: Kostenreduktion durch Standardisierung
Optimierung des aktuellen Programms zum 2GW Programm



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehtetz



tennet

Unsere Offshore-Projekte bis 2031

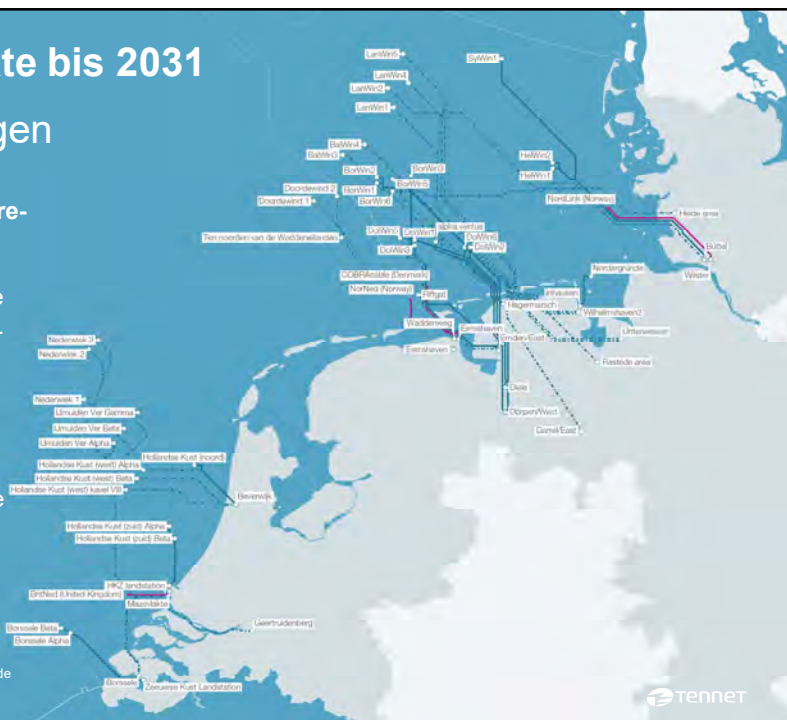
Offshore Anbindungen

Wir betreiben bereits **19 Offshore-Netzanschlüsse** in den Niederlanden und Deutschland sowie vier grenzüberschreitende Verbindungsleitungen in Europa.

Bis 2031 sollen 20 weitere Anschlüsse hinzukommen.

Derzeit werden mehr als 20 Millionen europäische Haushalte mit „Windstrom“ versorgt.

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehtetz



tennet

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

DC-Technologie als Schlüsselfaktor zum Netzausbau und zur Offshore-Integration



HVDC-Korridore sind seit 2012 zentraler Bestandteil des Netzentwicklungsplans (NEP)

- Übertragung hoher Leistungen über große Entfernungen
- Reduzierung des Redispatches
- Großes Potenzial für Netzstabilisierung und -flexibilität



Eine direkte Offshore-Anbindung in den Süden ist technisch und wirtschaftlich suboptimal, weil

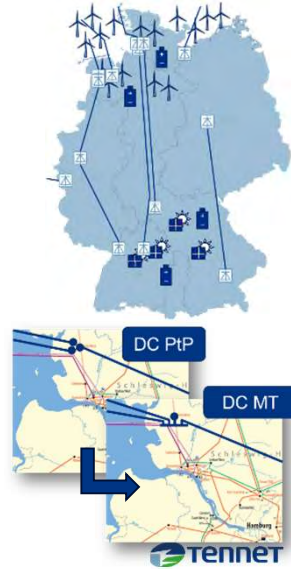
- Versteckte / nicht optimierte Onshore-Routen (geringe Asset-Auslastung)
- Generell höhere Nachfrage nach Onshore-Übertragungsleitungen
- Keine Nutzung von Flexibilitätsoptionen



Effizientere Nutzung der DC-Technologie durch Multi-Terminal-Systeme

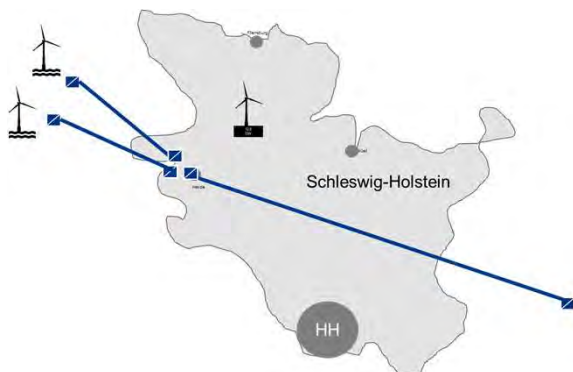
- Glättung von Lastflüssen durch Verknüpfung einzelner HVDC-Strecken
 - Entlastung des AC-Netzes
 - Einsparungen von Konverterstationen
 - Reduzierung des Investitions- und Flächenbedarfs
 - Geringere lokale Konverterdurchdringung und reduzierte Betriebsrisiken
- Schlüsseltechnologie für CAPEX- und OPEX-Einsparungen

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz

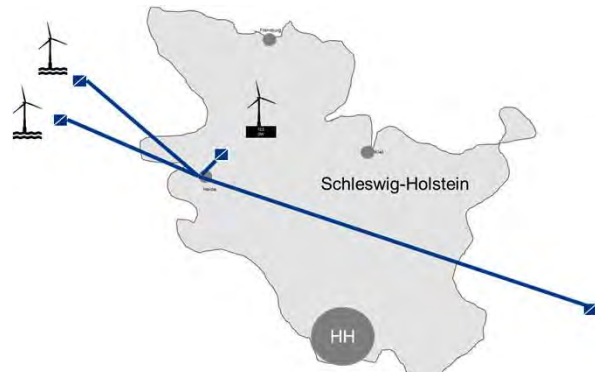


Veränderungen der Planungsbasis

Punkt-zu-Punkt (P2P) Planungsansatz



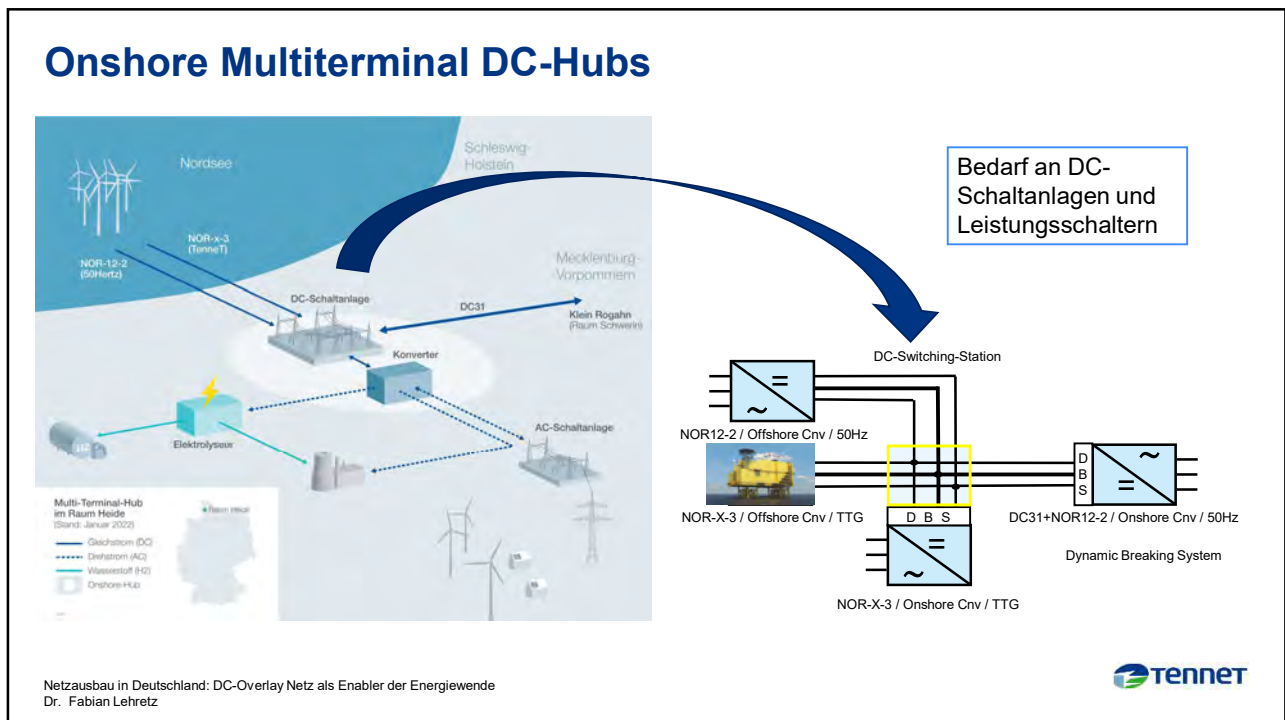
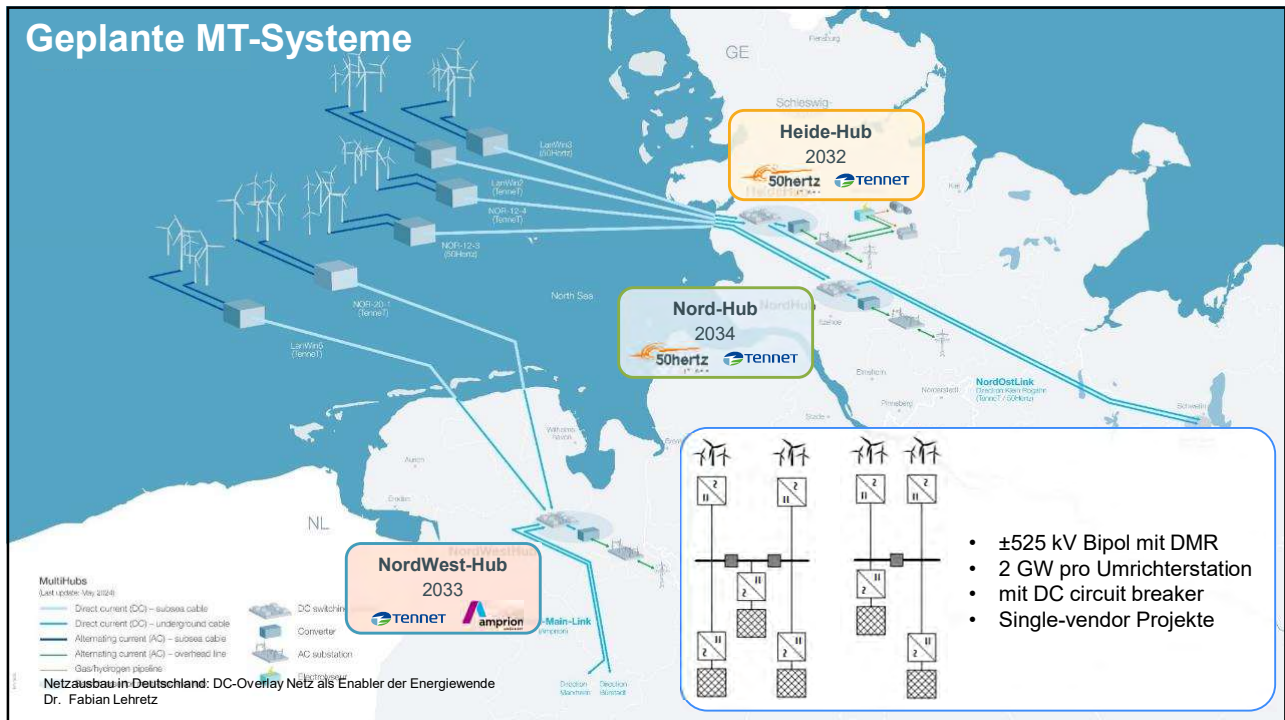
Multiterminal-Ansatz seit NEP2021



Kombination von Onshore- und Offshore-Übertragungsaufgaben bei insgesamt geringerem Anlagenbedarf und effizienterer Anlagennutzung

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz

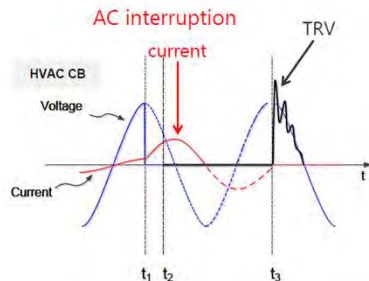
TenneT



19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Kurzschlussstrombegrenzung AC vs. DC

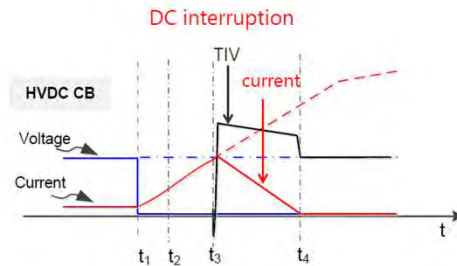


- AC CB passive – system determines short-circuit current
- System imposes TRV
- Synthetic test method can be applied



© PROFACTUM – Progress on Medium HVDC Offshore Transmission Networks
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101017114.

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz



- DC CB is active - determines the peak current
- CB determines the TIV
- Needs MW to test



Navigating the uncertainties with a DC Strategy

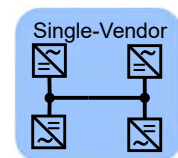


Framework conditions for final expansion became unpredictable

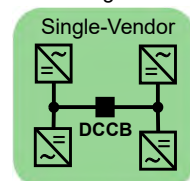
- Spätestens alle zwei Jahre ändern sich die Rahmenbedingungen sowie die politischen und gesellschaftlichen Gegebenheiten, was enorme Auswirkungen auf die langfristige Planung hat.
- How can uncertainties be navigated?

Maintain flexibility in planning

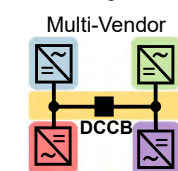
- Standardisierung der Spannungsebene
- Standards in der Planung weiterer Multiterminal Systeme
 - Entwicklung standardisierter Baugruppensysteme (Buildingblocks)
 - Festlegung des Übertragungssystems (2GW) auf zwei Pole und Metallische Rückleitung (DMR)
- Priorisierung von Innovationen für akute Ausbauprojekte
- Weiterentwicklung zur Öffnung der Lieferantenbasis hin zu Multivendorsystemen



Stage 1



Stage 2



Stage 3

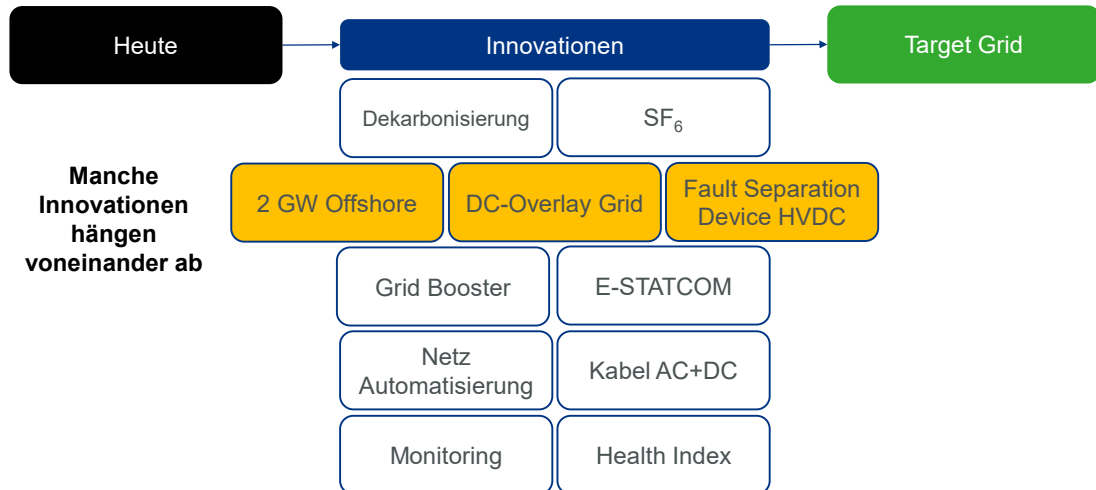


Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Verbundene Innovationen



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz



Herausforderungen (Energiewende)



Vervielfachung des Jahresbedarfs

- Produktionserweiterung beim bisherigen Hersteller erforderlich
- Präqualifikation neuer Hersteller
- Lieferengpässe: Transport und Inbetriebnahme
- Preissteigerungen



Technische Änderungen

- Erhöhung der Leistung an Transformatoren
- Stufbare Komp.-Spulen mit OLTC
- Neue Spezialtransformatoren
 - Step-up Transformator für Blindleistungssteuerung (STATCOMs und rot. Phasenschieber)
 - HVDC Transformatoren (ein- und dreiphasig) für DC-Verbindungen (On/Offshore)
 - Phasenschieber Transformatoren
- Änderung der Netztopologie => Veränderung der Belastungs- und Überlastbedingungen
- alternative Isoliermedien

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende Dr. Fabian Lehnertz



19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Querregeltransformatoren

1200 MVA PST UW Diele



Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende Dr. Fabian Lehetz



PST Prüffeldfoto



SIEMENS		ECO DESIGN	
Phasenschieber Transformator			
Leistung	1200 MVA	Seitenstromart	ST
Nennspannung	525 kV	Seitenstromart B1	
U ₁	525 kV	Kühlung	SAKAT / ODA
Nennstrom	2000 A	Leistungsfaktor	0,99
Frequenz	50 Hz	Leistungsfaktor Typ	0,99
Erkennung	0,99	Abk. Typ	1200 MVA 525 kV 2000 A
Erkennung - Wdgung	0,99	Detail und Fertigungsteile und -kennzeichen	

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende Dr. Fabian Lehetz



19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Alternative Transformer Oils



Biodegradable Oil: Comparable properties to previously used oils e.g. Ester

Example of a 420 kV power transformer filled with natural ester



Source: Siemens Transformers-Case Study, 420-kV Transformator mit natürlicher Ester-Isolierung, 2014.

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende Dr. Fabian Lehnertz

- Advantage fire safety
- Slower ageing of the insulating paper
- Design adaptation of the transformer necessary compared to units filled with mineral oil



Zusammenfassung

- Verlagerung des Zielbilds der deutschen Energiewende hin zu sicheren, resilienten und belastbaren Systemen, die die Integration verschiedener Arten der Energieerzeugung unterstützen.
- HVDC ist ein wesentlicher technologischer Baustein um effiziente Energieübertragung sicherzustellen.
- Einige Innovationen und Entwicklungen sind noch erforderlich, um das Zielbild zu erreichen.
 - HVDC Leistungsschalter 525 kV
 - Grenzwerte
- Prozessuale Anpassungen helfen dabei, die Ziele unter volatilen Rahmenbedingungen erreichen zu können
 - Multivendor, Multiterminal
 - Standardisierung, Harmonisierung
 - Prozessuale Anpassung bei der Abwicklung



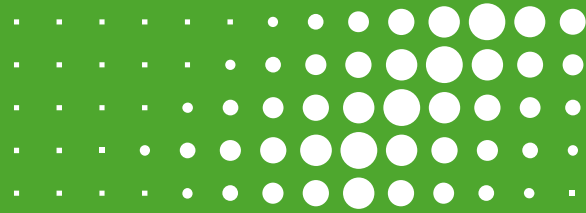
→ WIR KÖNNEN DAS NUR
GEMEINSAM SCHAFFEN!

Netzausbau in Deutschland: DC-Overlay Netz als Enabler der Energiewende
Dr. Fabian Lehnertz



19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

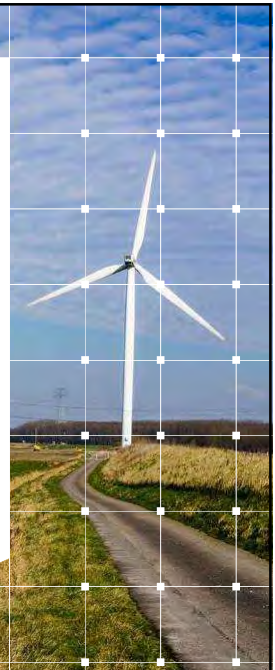


**Vielen Dank für
Ihre
Aufmerksamkeit!!**



TenneT is a leading European grid operator. We are committed to providing a secure and reliable supply of electricity 24 hours a day, 365 days a year, while helping to drive the energy transition in our pursuit of a brighter energy future – more sustainable, reliable and affordable than ever before. In our role as the first cross-border Transmission System Operator (TSO) we design, build, maintain and operate 23,900 km of high-voltage electricity grid in the Netherlands and large parts of Germany, and facilitate the European energy market through our 16 interconnectors to neighbouring countries. We are one of the largest investors in national and international onshore and offshore electricity grids, with a turnover of EUR 4.5 billion and a total asset value of EUR 27 billion. Every day our 5,700 employees take ownership, show courage and make and maintain connections to ensure that the supply and demand of electricity is balanced for over 42 million people.

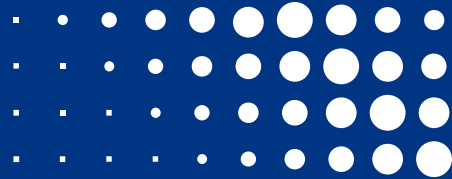
Lighting the way ahead together.



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Disclaimer



This presentation is offered to you by TenneT TSO B.V. ('TenneT'). The content of the presentation – including all texts, images and audio fragments – is protected by copyright laws. No part of the content of the presentation may be copied, unless TenneT has expressly offered possibilities to do so, and no changes whatsoever may be made to the content. TenneT endeavours to ensure the provision of correct and up-to-date information, but makes no representations regarding correctness, accuracy or completeness.

TenneT declines any and all liability for any (alleged) damage arising from this presentation and for any consequences of activities undertaken on the strength of data or information contained therein.



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Dr. Johannes Hoffmann

Hitchi Energy Germany AG

Dr. Johannes Hoffmann studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen. Nach dem Abschluss der Promotion im Gebiet der Energietechnik und Energiewirtschaft begann er 1998 seine berufliche Laufbahn bei der ABB AG.

Nach verschiedenen Führungsaufgaben bei ABB und später bei Hitachi Energy im Bereich Vertrieb und Projektmanagement war er mehrere Jahre für den Vertrieb von Netzleitsystemen und Sekundärtechnik überregional verantwortlich.

Seit 2022 ist er Vertriebsleiter Deutschland bei Hitachi Energy.



Notizen:

[illegible]



HITACHI

Herausforderungen im Zuge der Energiewende

Dr. Johannes Hoffmann
Vertriebsleiter Hitachi Energy Deutschland

TLM / Frankenthal / 21. September 2026

1

Agenda

Herausforderungen

- Wie entwickeln sich der Markt und die Nachfrage?
- Was heisst das für das Stromnetz?

Lösungen

- Welche Netztechnologien sind erforderlich?
- Wie steht es um die Verfügbarkeit der Technologie?
- Wie verändert sich der Life-Cycle?

HITACHI

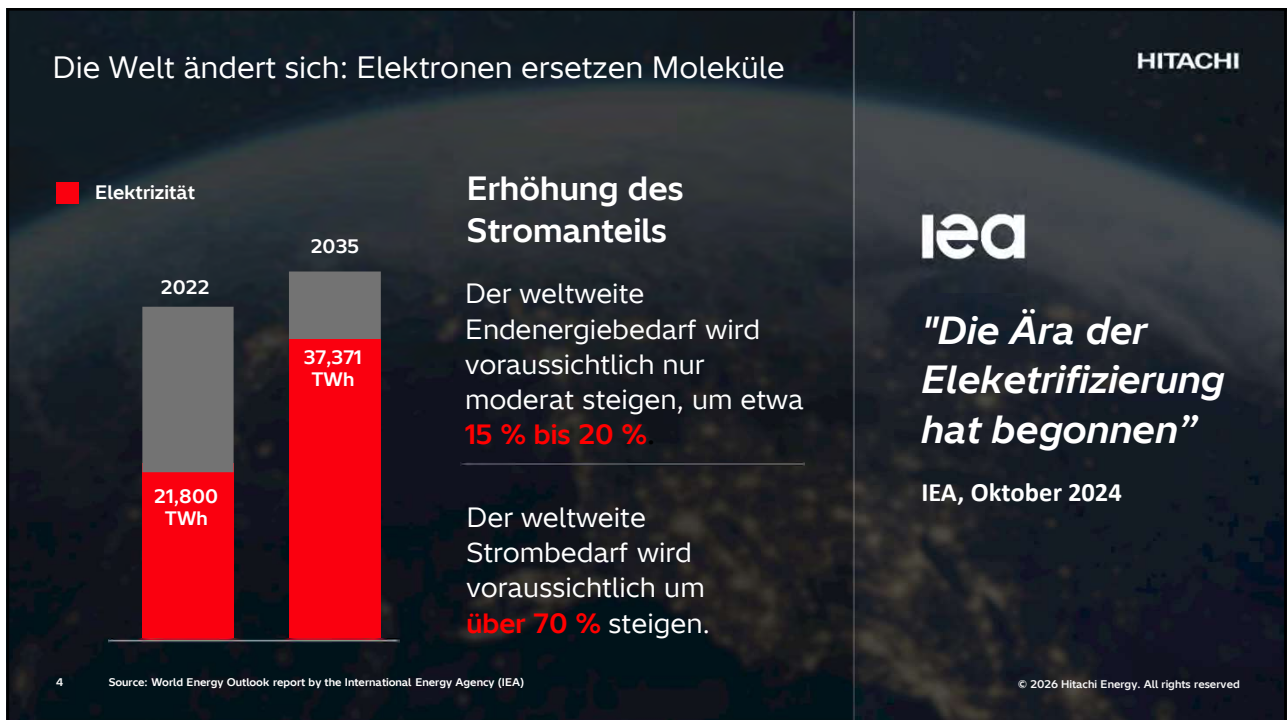
© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

2

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



3



4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Die Elektrifizierung schreitet in allen Branchen immer schneller voran

HITACHI



Stahl-Industrie

Industrielle Wärme

E-Mobilität

Gebäude

Datenzentren

Nachhaltige Kraftstoffe

Es wird erwartet, dass sich die Kapazität von Daten- und Rechenzentren weltweit bis 2030 verdreifacht.

5

Sources: International Energy Agency (IEA)
*The IEA calculates a value in the region of 95GW, while McKinsey and other market reports point out a value above 150 GW

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

5

KI befeuert den Stromhunger und Bedarf an Netztechnologien, global und in Deutschland



**KI-gestützte
Datenzentren¹**
3x mehr
weltweit bis 2030

+125 GW
Ca. 750 grosse
Leistungstransformatoren



**Von 2.000 zu 4.000
Rechenzentren²**
Verdopplung der IT-
Anschlussleistung bis 2030

6

1. McKinsey AI report 2025
2. Laut Prognosen von Branchenanalysten (Bitkom) sowie der Bundesregierung, bezieht sich auf Rechenzentren mit einer Anschlussleistung von mehr als Kilowatt

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

6

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Die Debatte über KI ist auch in den deutschen Medien angekommen

HITACHI

20. September 2025

17. März 2026

05. Juni 2026

Beim größten Problem der Energiewende müssen wir von Trumps Amerika lernen

Beleuchtete Skyline von Chicago (Bundesstaat Illinois): Die USA treiben den Netzausbau entschlossener voran als Deutschland, schreibt Hitachi Energy-CEO Andreas Schierenbeck (Archivbild)

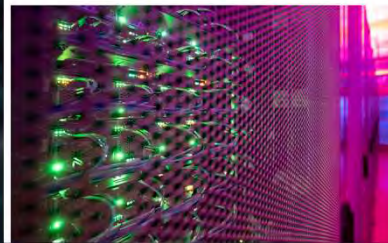
Gerade haben wir bei Hitachi Energy eine Investition von einer Milliarde US-Dollar in den Vereinigten Staaten angekündigt. Manche fragten: „Mit Trump – oder trotz Trump?“ Die Wahrheit ist: Weder noch. Unsere Entscheidung basiert nicht auf einer Wahlperiode, sondern auf Megatrends und Kundenbedürfnissen.

In den USA gilt der Netzausbau seit Jahren als oberste Priorität. Die alternde Infrastruktur wird systematisch erneuert, Milliarden fließen in moderne Leitungen und intelligente Steuerung. Stromnetze sind dort längst als Lebensadern für Wettbewerbsfähigkeit und Versorgungssicherheit anerkannt.

Viermal mehr Leistung für KI Deutschland plant massiven Ausbau von Rechenzentren

17.03.2026, 11:48 Uhr

Artikel anhören (04:30)



Süddeutsche Zeitung

Der Traum vom KI-Kontinent

Die EU-Kommission legt ein Gesetzespaket vor, um abhängig von Amerika und Asien zu werden.

Brüssel – Der Cloud-Sprecher für die Welt, die Software für die Apps, die das meiste davon kommen aus Amerika oder Asien. Kaum etwas aus der EU. Die Europäische Kommission möchte das mit einem neuen Gesetzpaket ändern. Für über 80 Prozent aller digitalen Produkte, Dienste und Infrastruktur werden wir uns auf nichteuropäische Anbieter verlassen. Das ist ein großes Problem für Europas Versorgungssicherheit, sagte Henne Virkkunen, die in der EU-Kommission als Vizepräsidentin für technologische Souveränität zuständig ist.

Um Europa zu einem „KI-Kontinent“ zu machen – dieses Ziel setzte Virkkunen gleich mit vorne – sei auch Infrastruktur nötig. Bei künstlicher Intelligenz bedeuete dies vor allem sehr viel Rechenkapazität. Wenn die KI auf dem Handy antwortet, generiert sie dieses Wissen aus riesigen Datenmengen. Das ist die Hälfte von dem, was die KI-Kontinente zu machen, das meiste davon kommt aus Amerika oder Asien. Kaum etwas aus der EU. Die Europäische Kommission möchte das mit einem neuen Gesetzpaket ändern. Für über 80 Prozent aller digitalen Produkte, Dienste und Infrastruktur werden wir uns auf nichteuropäische Anbieter verlassen. Das ist ein großes Problem für Europas Versorgungssicherheit, sagte Henne Virkkunen, die in der EU-Kommission als Vizepräsidentin für technologische Souveränität zuständig ist.

Die Kommission will künftig genauer überwachen, wie viel Rechenkapazität und Nachfrage es in Europa gibt. Auf dieser Grundlage will sie den Mitgliedsstaaten konkret empfehlen, wo sie ihre Kapazitäten ausbauen sollen. Zudem will die EU einen Mechanismus einrichten, um ungelernte Rechen- und Cloud-Kapazitäten grenzüberschreitend besser auszulasten.

7

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

7

Global wird mehr Leistung benötigt: schnell und kostengünstig!

HITACHI



Kohlekraftwerke

~10-12
Jahre



Wasserkraft

~10-15
Jahre



Grosse
Kernreaktoren

~15
Jahre



Gaskraftwerke

~5-10
Jahre



Kleine modulare
Reaktoren (SMR)¹

~5-10
Jahre



Solar, Onshore-
und Offshore-
Windenergie

~1-7
Jahre

8

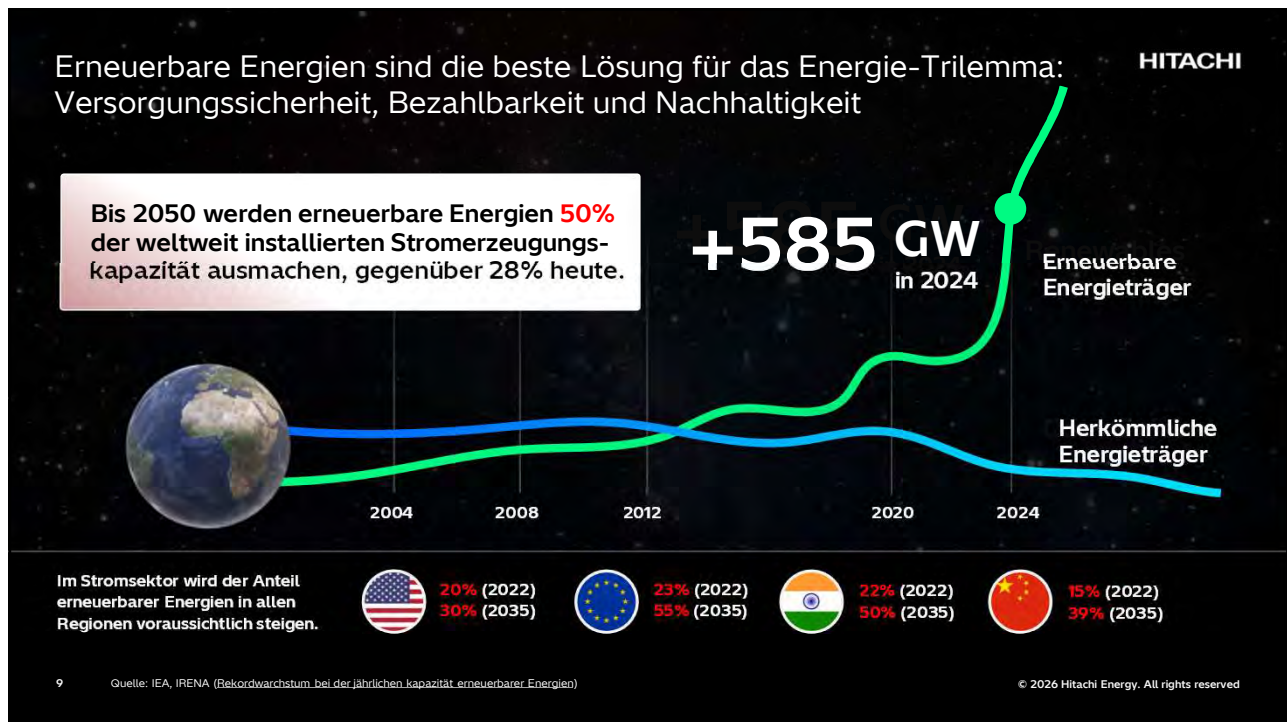
¹Small Modular Reactor (Kleiner, modularer Reaktor)

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

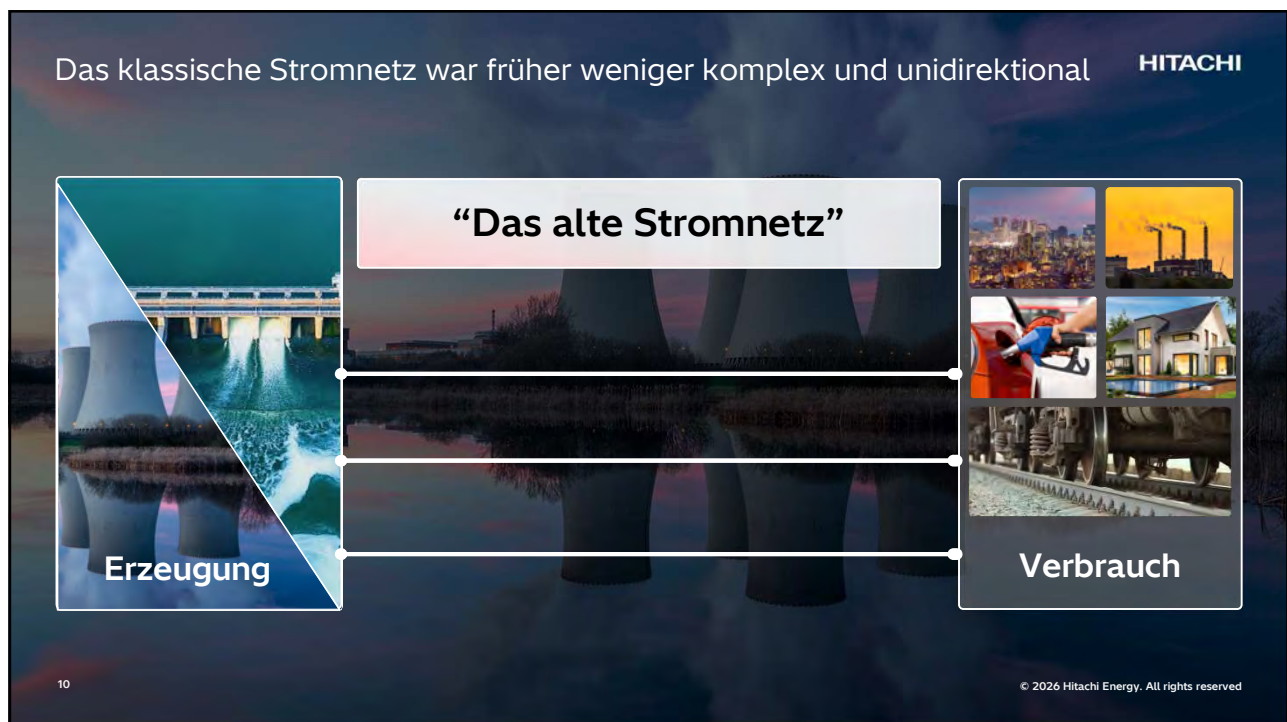
8

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal



9

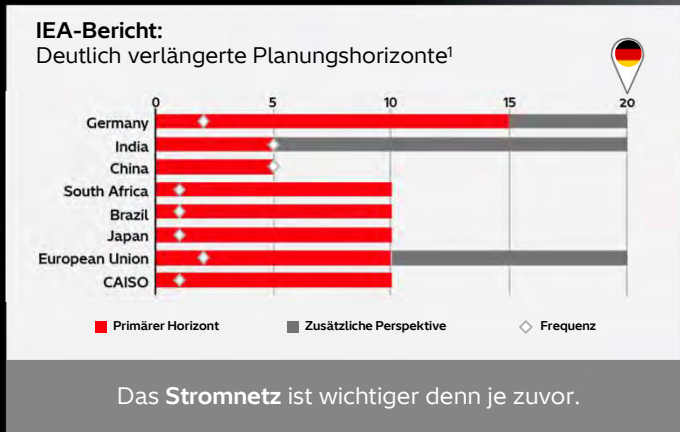


10

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Regierungen weltweit planen moderne Stromnetze voraus

HITACHI



In Deutschland betreiben die vier Übertragungsnetz-betreiber eine strategische Netzplanung in zweijährigen Zyklen. Der aktuelle Planungsprozess NEP Strom betrachtet Zieljahre bis 2045 und impliziert damit eine Langfristplanung von rund 20 Jahren.²

11

Quelle 1: IEA (2023)
Quelle 2: Bundesnetzagentur, Szenariorahmen und NEP Strom (2025)

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

11

Stromnetze sind essenziell, ermöglichen das Zeitalter der Elektrizität und werden in Zukunft viel grösser, komplexer und bidirektional sein

HITACHI



“Das moderne Stromnetz”

Herausforderungen

- Angebot/ Nachfrage-Gleichgewicht
- Trägheit
- Fehlerbehandlung
- Frequenz- und Spannungsstabilität
- Netzüberlastungen
- Nachhaltigkeit

Technische Lösungen

- Digital gesteuerte Leistungselektronik: z. B. HVDC¹, BESS², STATCOM³
- Softwarebasierte Lösungen: z. B. Netzsteuerung, Anlagenmanagement, Energiehandel und -planung
- SMR⁴
- Innovativer Service



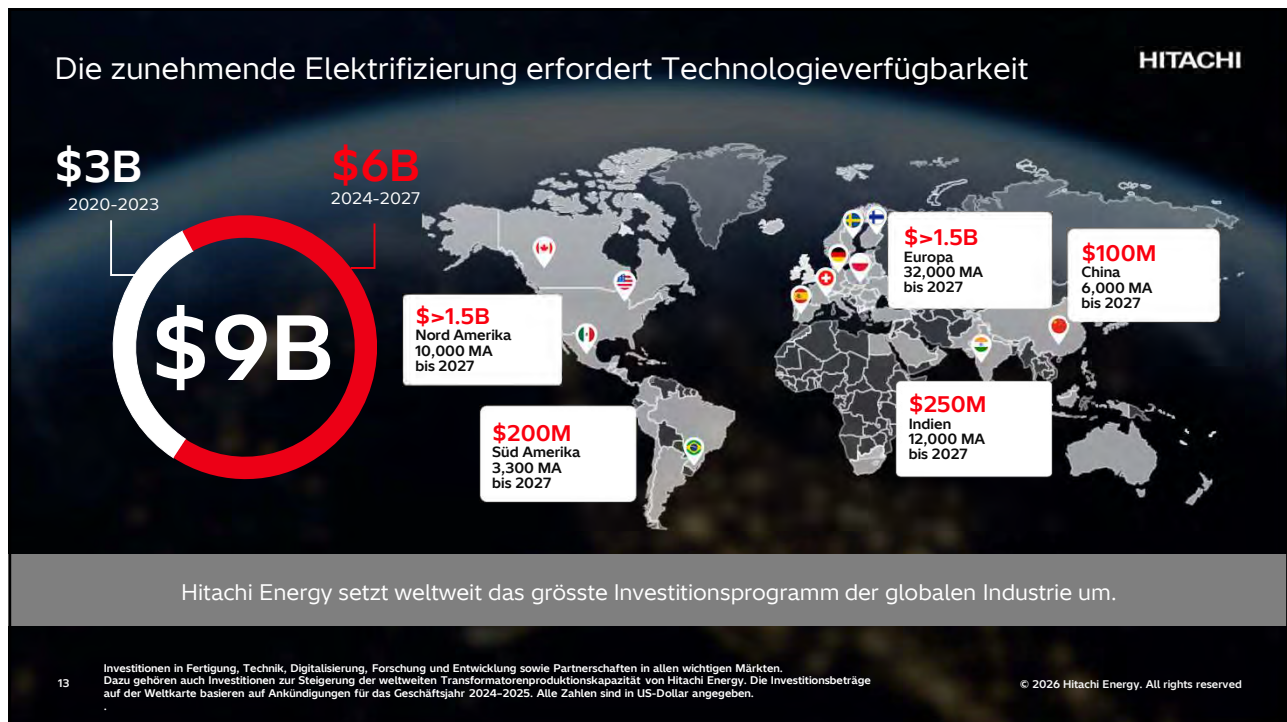
12

¹High Voltage Direct Current (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung)
²Battery Energy Storage System (Batterie-Speicherkraftwerk)
³Static Synchronous Compensator
⁴Small Modular Reactor (Kleiner modularer Reaktor)

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

12

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



13

Investitionen auch lokal in der Deutschland HITACHI

Hitachi Energy Kompetenzen in Deutschland

- Netzautomatisierung
- Netzintegration
- Hochspannungsprodukte
- Transformatoren
- Service

>30 Millionen Euro Investition in Bad Honnef

- Die Erweiterung soll voraussichtlich 2026 abgeschlossen sein
- Ziel ist die Verbesserung von Produktivität, Betriebsabläufen und Arbeitssicherheit
- Es werden rund 100 neue Arbeitsplätze in der Region geschaffen werden



9 Standorte in Deutschland

1. Mannheim
2. Bad Honnef
3. Brilon
4. Halle (Saale)
5. Karlstein
6. Nauen
7. Neusaess
8. Roigheim
9. Berlin

14 © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

14

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Technologie-Innovationen von Hitachi Energy

HITACHI



HVDC



Network Manager



Leistungshalbleiter



EconIQ™
SF₆-freie Schaltanlagen

15

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

15

Innovation

HITACHI

Spannungsregulierung für das Next-Generation-Grid



Effective voltage
regulation for
distribution grids

A complete portfolio of active voltage regulation products to stabilize distribution grids, integrate more renewables, and enable future-proof electrification.

Discover more

260% mehr Solarstrom*

Inbetriebnahme des weltweit ersten
Mittelspannungslängsregler



16

* Pressemitteilung Thüga 1.7.2026: „...Eine Rechnung in einem Beispielnetz hat ergeben, dass es möglich ist, dadurch rund 260 Prozent mehr PV-Leistung zu integrieren...“

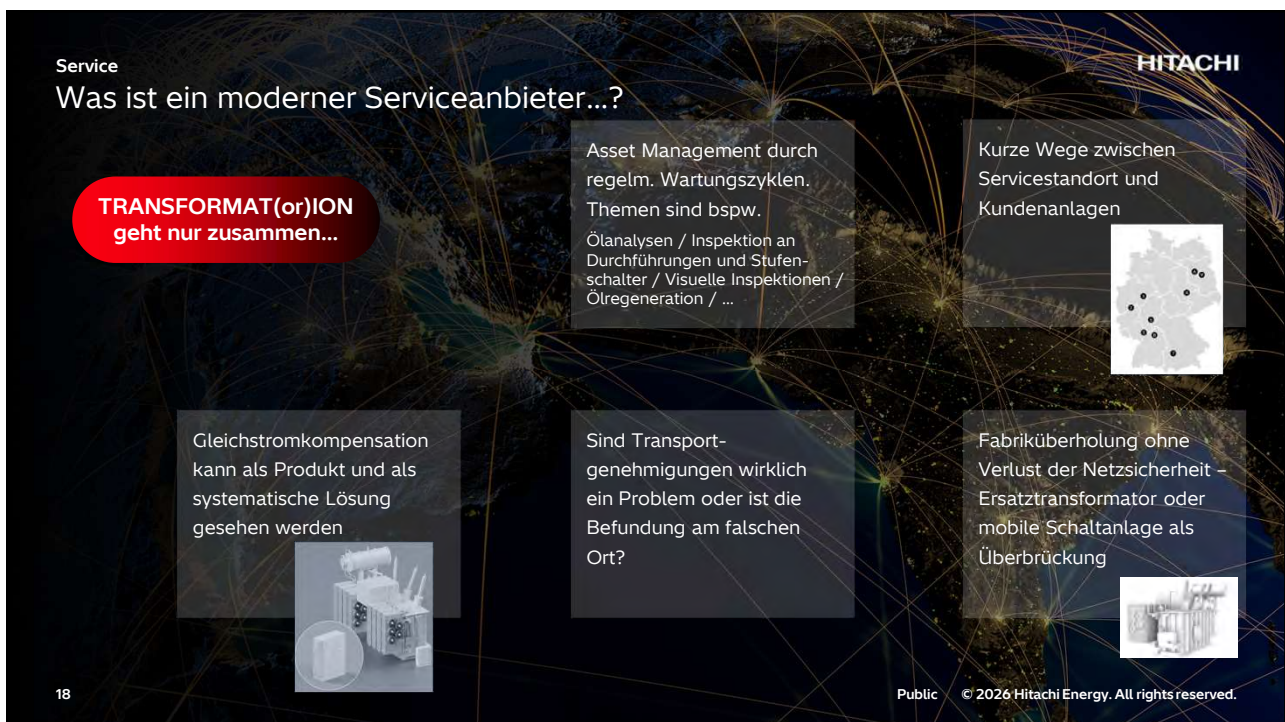
© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

16

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



17



18

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal



Zusammenfassung

Herausforderungen
Nachfrage und Infrastruktur

Der Strombedarf steigt bis 2035 um das 2,5-Fache.
Kapazität der Rechenzentren bis 2030 3,5-Fach.
Die Netzinfrastruktur muss mithalten und modernisiert werden.

Lösungen
Netztechnologien und Life Cycle Management für die Energietransformation

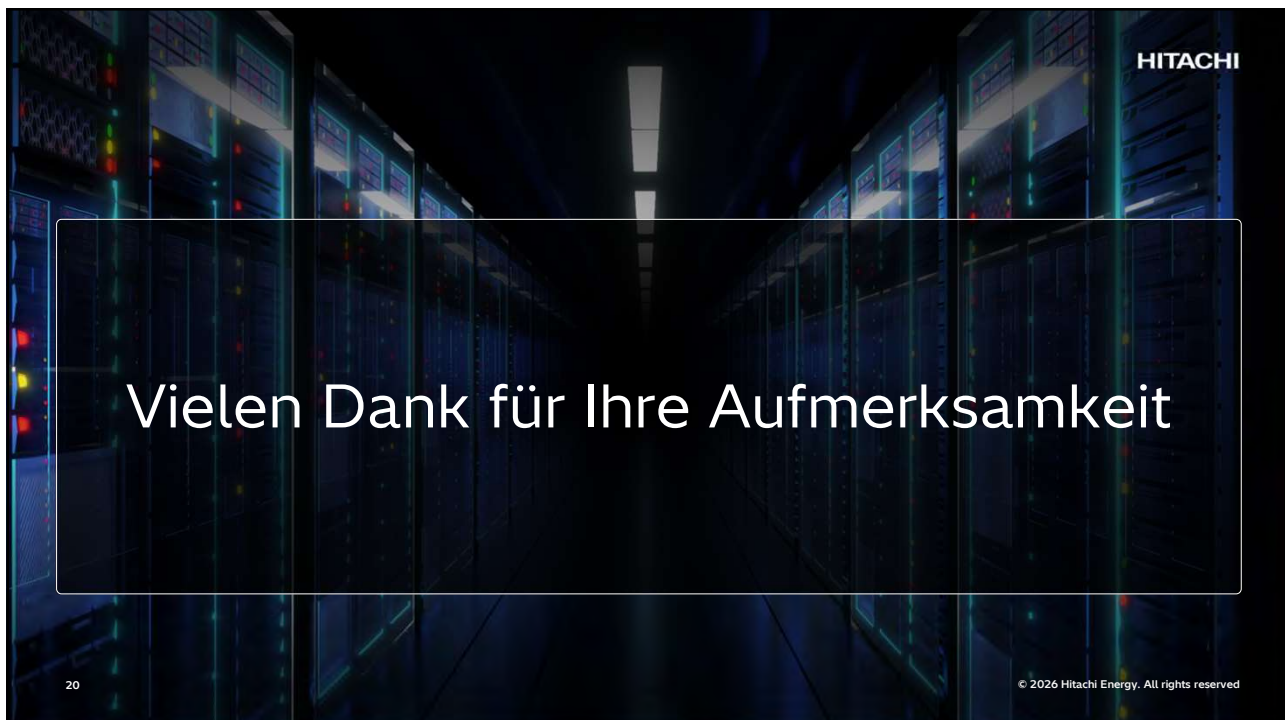
Die Technologien sind vorhanden
– kein Grund zu warten.
Was fehlt, lässt sich bei der Skalierung der Infrastruktur entwickeln.

HITACHI

19

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

19



HITACHI

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

20

© 2026 Hitachi Energy. All rights reserved

20

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Javier Mantilla

Hyundai Electric

An electrical engineer with an M.Sc. in Power Engineering from RWTH Aachen and an Executive MBA from the University of Cambridge.

He began his career at ABB in Zurich in 2006 as an R&D Project Manager, before taking on feasibility studies for next-generation switchgear from 2014, work that included ABB's world-first commissioning of an eco-efficient gas-insulated switchgear installation.

In 2018 he moved to HD Hyundai Electric Switzerland as Group Head of GIS, and became Chief Executive Officer the following year, a role he holds today.

Since 2023 he has also served as a Guest Professor at ETH Zürich, teaching the Technology of Electric Power System Components.

He is active in CIGRE and IEEE working groups on digital twins, AI in the power industry, ecodesign, and SF6-free switchgear.



Notizen:

[illegible]



TLM 2026

The role of HD Hyundai Electric in the Energy Transition

Javier Mantilla

Chief Executive Officer - HD Hyundai Electric Switzerland

September 21st 2026

1

Introduction



- Universe ~13.7 billion years (?)
- Milky Way ~13.6 billion years
- Earth ~4.5 billion years
- Humans ~200 thousand years
- Electricity ~320 years
- First power transformers (oil-insulated, air-cooled, etc.) ~100 years
- Modern high-voltage power transformers ~60 years
- Mineral-oil insulation in power transformers ~60 years
- Eco-friendly (ester-based) transformer alternatives ~10 years
- You 20 – 100 years
- LLMs ~5 years

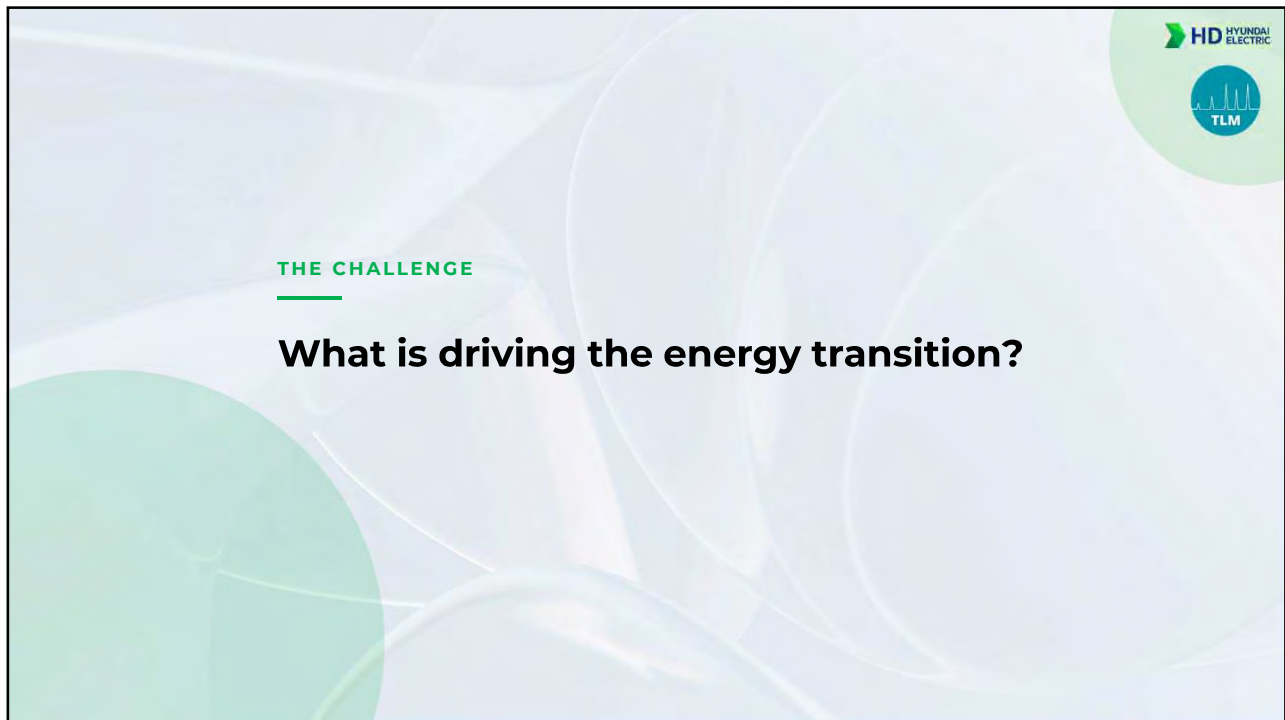


[Dall-E2 rendering of a HV substation in Mars]

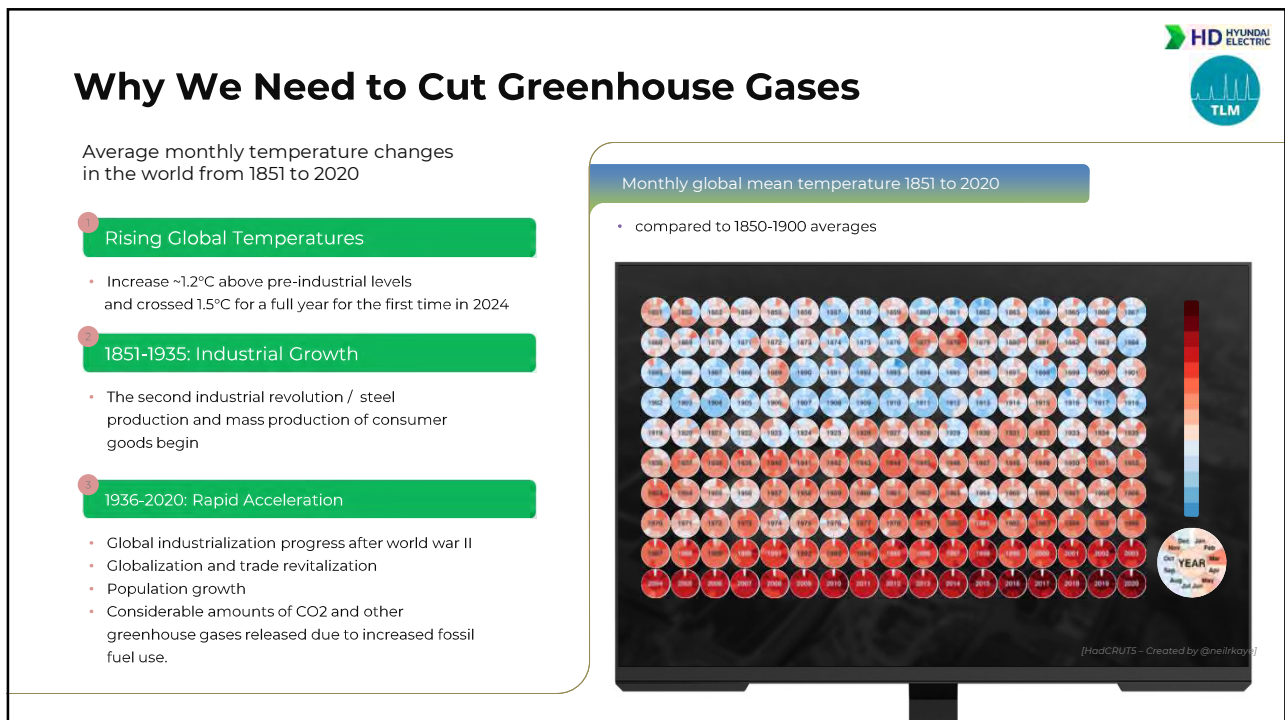
2

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal



3



4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Agreements to Reduce Greenhouse Gases

Paris 2015
climate Agreement



The Paris Agreement

- Agreement at the United Nations Climate Change Conference in 2015

Goals

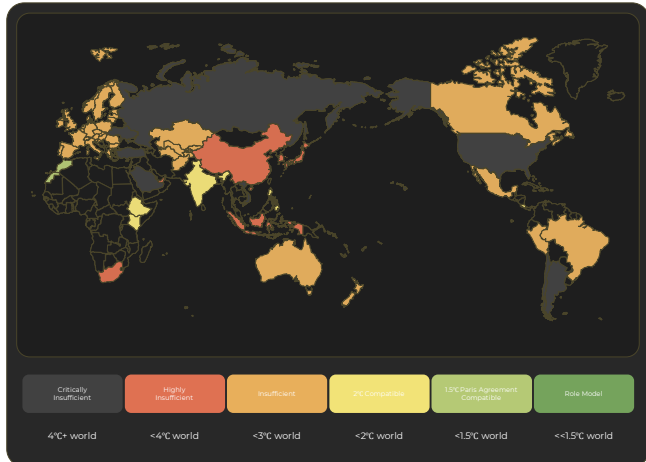
- Limit global average temperature increase to less than 1.5 degrees compared to pre-industrial

NDCs: National Commitments

- National Determined Contributions
- National greenhouse gas reduction targets set by the participating countries in the Paris climate agreement

The maps displayed are for reference only

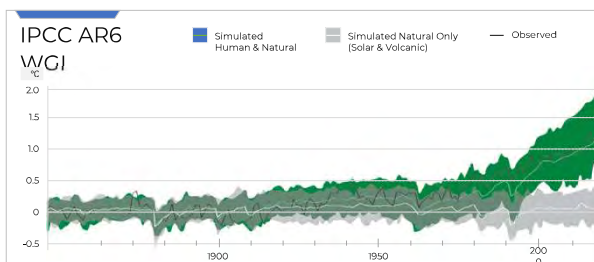
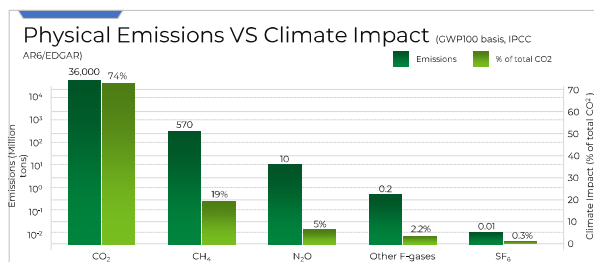
As of November 2020



5

Why Environmentally Friendly Equipment?

From the latest IPCC AR6, it is estimated that atmospheric SF₆ concentrations increased by about 36% over the last decade, with China as the largest emitter.



The GWP of SF₆ has been corrected several times

AR5: GWP₁₀₀

23,500

AR6: GWP₁₀₀

25,200

These values are mainly relevant for reporting, accounting, and LCA calculations

- ▶ Over a 100-year period, 1 ton of SF₆ traps as much heat in the atmosphere as 25,200 tons of CO₂. Its atmospheric lifetime is about 3,200 years.
- ▶ In terms of total GHG emissions (CO₂, CH₄, N₂O), SF₆ accounts for less than 1%. However, roughly 80% of SF₆ emissions come from the electrical power industry.

Leaking 1kg SF₆

~ 120'000 km by car



6

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

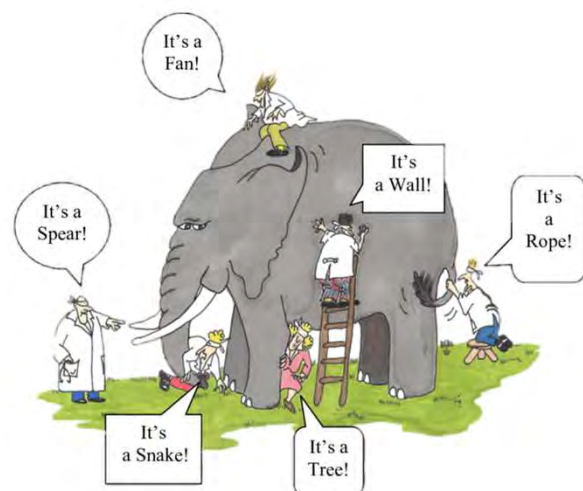
THE BALANCING ACT

Regulators · Environmentalists · Expertise

7

The role of legislators

- Technological advancements are usually led by private industry, with government regulations introduced years later, often resulting in mixed outcomes.
- Recent examples of this lag include cryptocurrency oversight, ride-sharing regulation, data privacy (GDPR), and AI, where legislative frameworks are still catching up with the technology.
- Fragmented or reactive regulation can create uncertainty for industry and slow the adoption of better alternatives, underscoring the need for timely, well-informed regulatory frameworks.
- The car industry shows how multiple alternatives (NGVs, EVs, hydrogen fuel cells) can coexist and compete. Transformer fluids show the same healthy pattern: synthetic and natural esters both meet fire-safety and biodegradability requirements, without regulators forcing a single winner.
- Fire-safety and biodegradability standards for transformer fluids, such as K-class ratings and water-protection zone rules, show what well-targeted, technology-neutral regulation looks like: several fluid chemistries qualify, and none gets singled out the way some other industrial gases now do.



8

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

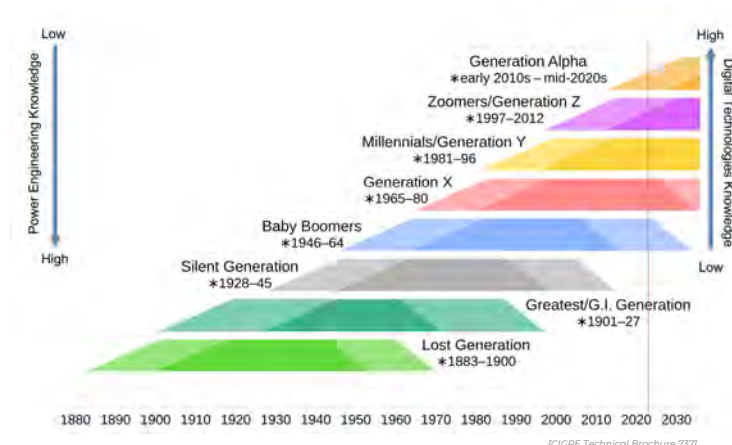
What Is Really an Environmentally Friendly Product?

- The product with the lowest GWP?
- The product that does not cause cancer? (e.g. by emitting ionizing radiation)
- The product that does not cause respiratory diseases?
- The product that is not toxic to humans? (e.g. combustion byproducts from an insulating-fluid fire)
- The product that does not damage other species? (marine, terrestrial, etc.)
- The product that does not deplete resources?
- Some of the above? All of the above?

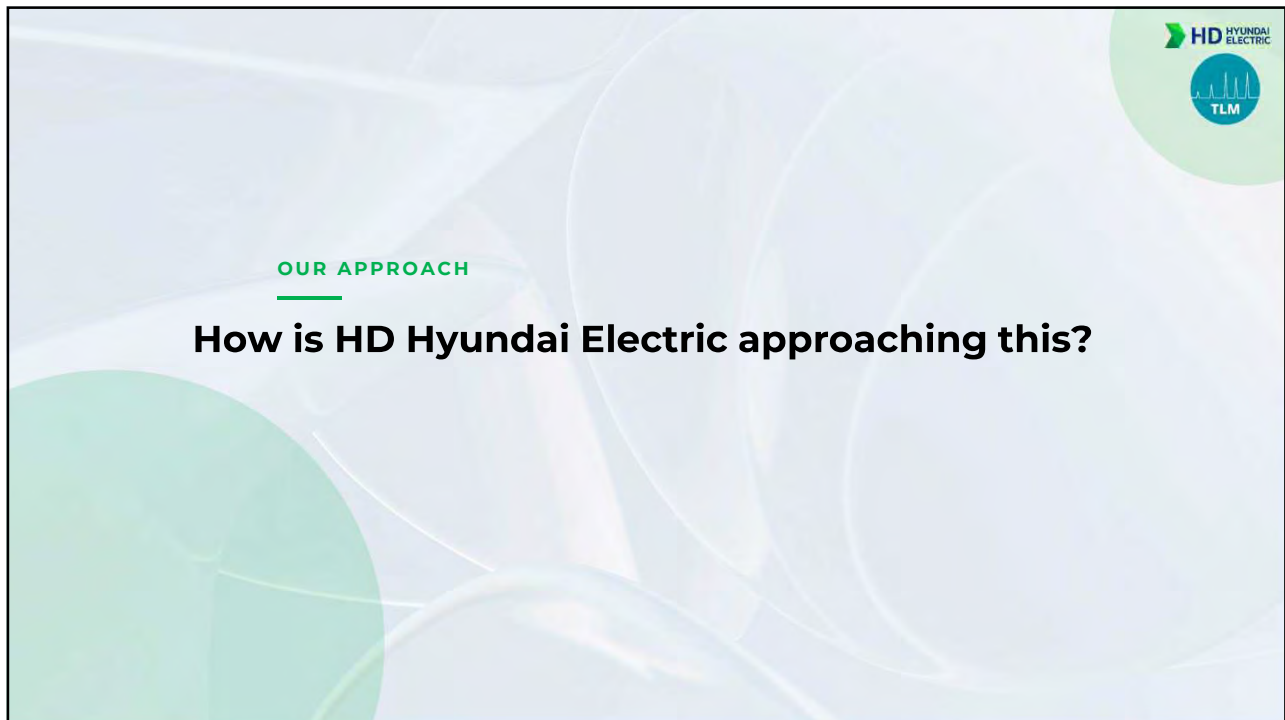
9

The conundrum

- “The industry environment has changed radically in the last years. There used to be a large powerful workforce and a depth of knowledge with limited computer power. Now there are large powerful computers and a small workforce with a limited depth of knowledge”



10



11



12

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



HD Hyundai Electric



Company name	HD Hyundai Electric 1984, spun-off from Hyundai Heavy Industries in 2017
presence	Inside the top 10 of Electric Equipment Manufacturers
CEO	Youngki Kim
Key business	Transformer, GIS, Rotating Machinery, Switchgear
Revenue (2025)	3,044M USD
# of Employees	2,200 25% in Engineering and R&D



Power transformers
Used to convert electricity to a higher or lower value of voltage to supply current from source to destination



Gas Insulated Switchgear (GIS)
Used to protect high voltage electrical circuits from damage caused by overload or short circuit



Rotating Machinery
Used to convert electrical energy to mechanical energy or vice versa (Motor, Generator)



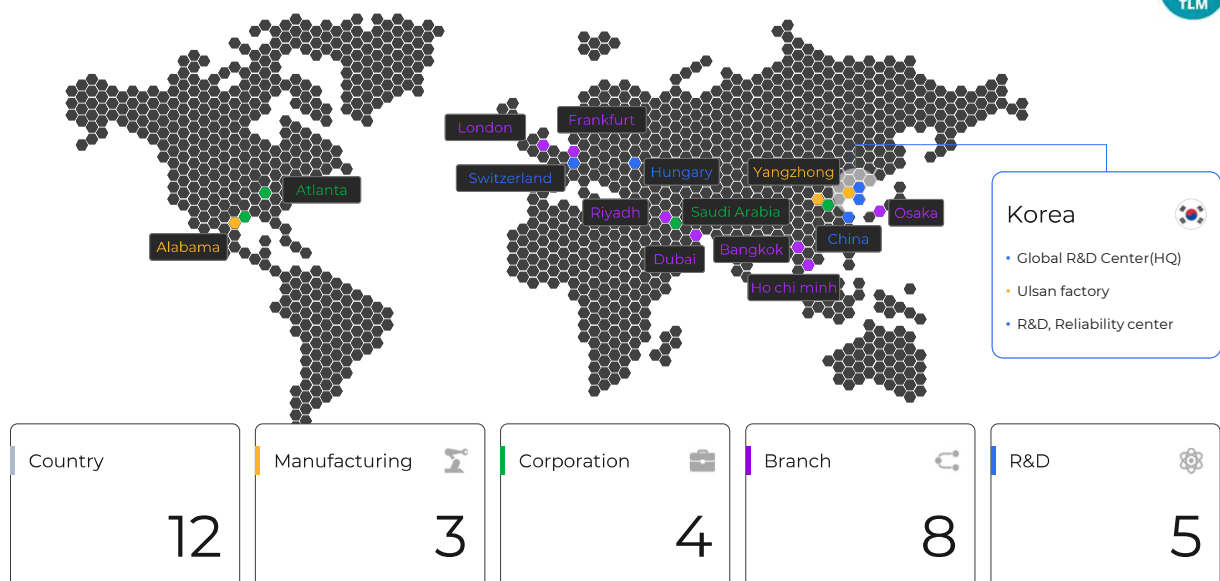
MV/LV Switchgear
Used to control, protect and isolate electrical equipment



13

13

Global Network



14

Evolution of Transformer Technology



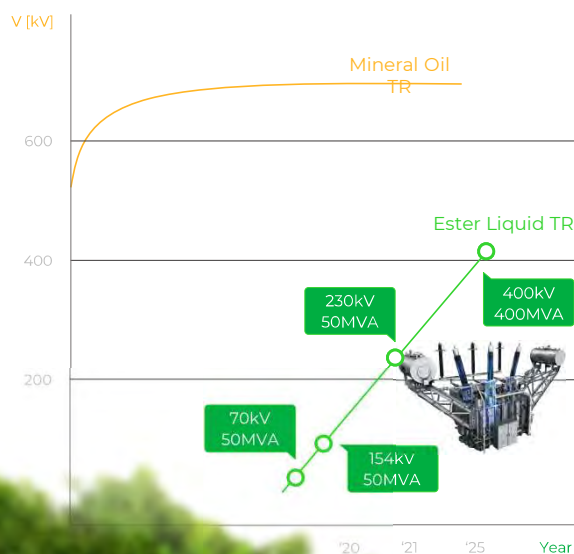
Mineral oil replaced by flame retardant/environmentally friendly synthetic/natural, non-toxic ester oils

Ignition point > 300°C, plus high biodegradation rate reduces the risk of environmental pollution in case of leakage

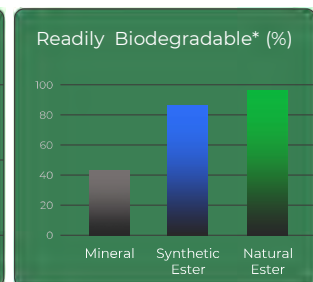
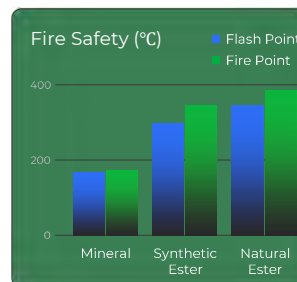
DPRS (Dynamic Pressure Resistant System) increased structural integrity, safety, electrical life and reliability

15

Eco-friendly Fluids



	Mineral oil	Synthetic Ester (Midel 7131)	Natural Ester (FR3)
Flash point [Safety class]	170 °C ["O" Class]	316 °C ["K" Class]	360 °C ["K" Class]
Biodegradation rate	10%	89%	97%
Saturation [ppm]	55	2600	1100

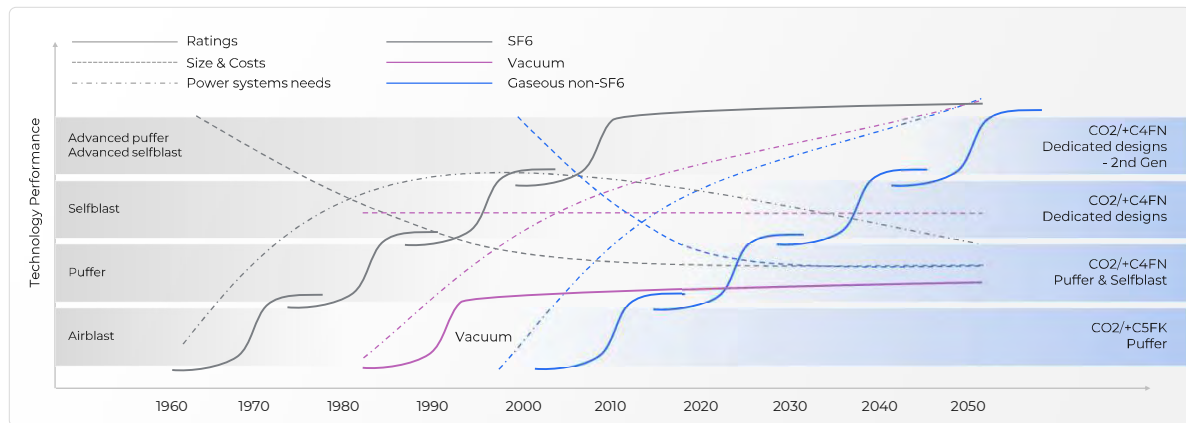


*Readily biodegradable is defined as the ability of a product to biodegrade quickly and completely. (% to ThCO₂ in 28 days.)

16

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

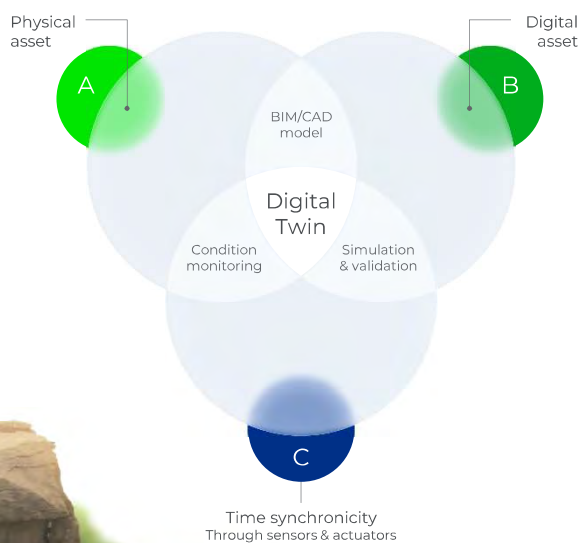
Evolution of Switchgear Technology



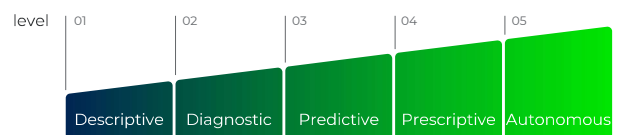
17

17

Digital Twins



A digital twin is a virtual representation of a **physical asset or system**. It is a digital counterpart that mimics the behaviour and characteristics of its physical counterpart **with a time synchronicity** appropriate for the application's purpose.



18

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal



1. Regulation is changing the landscape. **Engineering should lead it.**
2. **Sustainability is not a checkbox** on a datasheet. It has to drive the design, not decorate it.
3. AI is not a silver bullet. The real work is **passing on** power-engineering judgment before it retires with the generation that holds it.



19



Contact:
javier.mantilla@hyundai-electric.ch

GREENTRIC



20

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Prof. Dr. Farouzi Derbel

HTWK Leipzig

FAOUZI DERBEL ist Prorektor für Forschung und Nachhaltigkeit der HTWK Leipzig und seit 2013 Professor für Smart Diagnostics und Online Monitoring am Institut für Elektrische Energietechnik an dieser Hochschule. Er ist Senior Member des IEEE.

Er erhielt das Dipl.-Ing. in Elektrotechnik und Informationstechnik von der Technischen Universität München sowie den Dr.-Ing. von der Universität der Bundeswehr München.

Von 2000 bis 2012 war er in verschiedenen Positionen im Industriebereich tätig, u. a. als strategischer Produktmanager und Systemingenieur bei Siemens Building Technologies in München sowie als Leiter Forschung und Entwicklung bei Siemens Building Technologies in Mühlhausen und QUNDIS Advanced Measuring Solutions. 2006 gewann er gemeinsam mit seinem Team den weltweiten „Top+ Award for Product Innovation“ innerhalb der Siemens AG für die Wireless Sub-Metering Solution und 2009 den „Product Success Story Award“ von Texas Instruments.

Prof. Derbel ist aktiv in nationalen und internationalen Gremien u. a. bei der DKE „Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik im DIN und VDE“.

Seine Schwerpunkte liegen in der Erforschung und Entwicklung von verteilten energieautarken Sensor- und Messsystemen einschließlich effizienter Signalverarbeitung zur Zustandsschätzung von Anlagen und Smart Grids.



Notizen:

[illegible]



KI: Grundlagen und Möglichkeiten

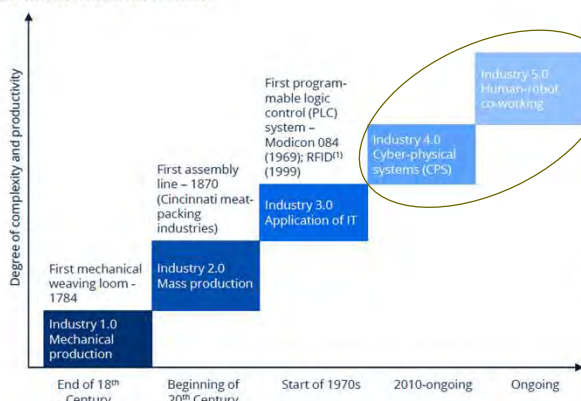


TLM 2026 Transformer Life Management Konferenz
Frankenthal, 21.- 22.09.2026

1 Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

Industry 5.0 and Digitalization of the Manufacturing Ecosystem

Industrial evolution timeline



Industrial evolution themes and features

Revolution	Theme	Key features
Industry 1.0	Mechanical production	Mechanical production powered by water and steam power
Industry 2.0	Mass production	Introduction of assembly lines and use of electrical energy Introduction of telegraphy in 1840 and telephony in 1880 Ford used 'Taylorism' ⁽²⁾ to implement car assembly line
Industry 3.0	Application of IT	Use of electronics, IT, and industrial robotics to improve automation of production First micro-computer in 1971 Apple founded in 1976
Industry 4.0	Cyber-physical production systems	Digital supply chain Digital products, services, and new business models Autonomous machines and virtual environments
Industry 5.0	Human-robot co-working	AI Integration Sustainability

Statista Industry 4.0: in-depth market analysis
Market Insights report 2025

2 Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Key enabling Technologies of Industry 5.0 including Cobots and 6G



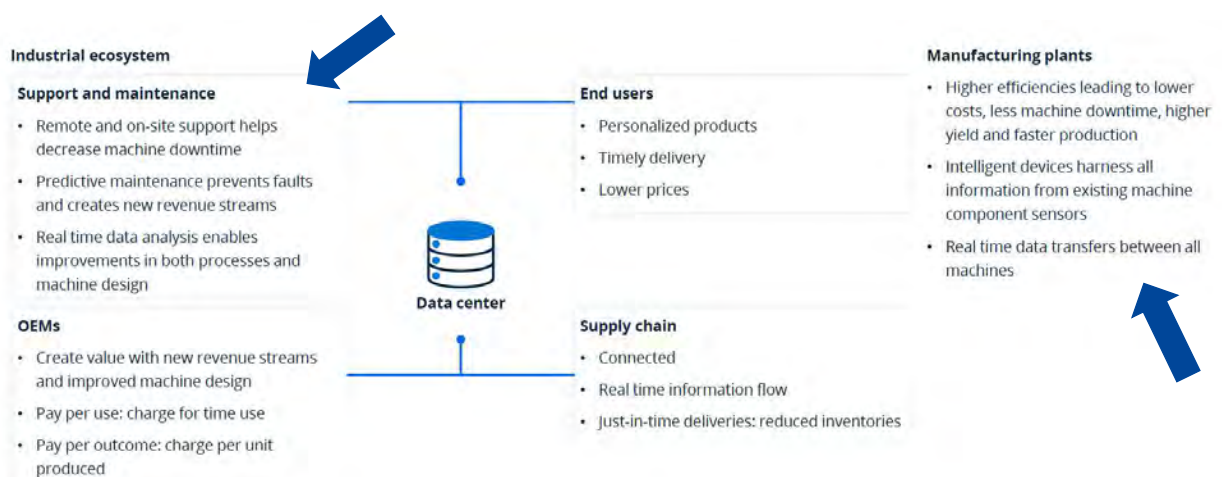
Statista Industry 4.0: in-depth market analysis
Market Insights report 2025

3

Prof. Dr.-Ing. Fawuzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

Digitalization and the Industrial Ecosystem



Statista Industry 4.0: in-depth market analysis
Market Insights report 2025

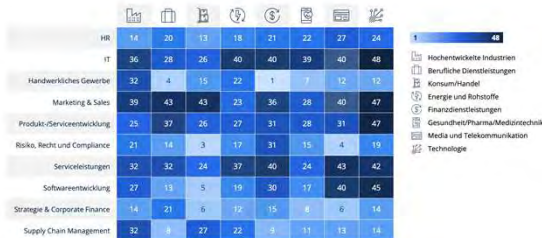
4

Prof. Dr.-Ing. Fawuzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

KI-Einsatz nach Branche und Bereich



Statista, Weltweit; McKinsey&Company; 22. Februar bis 5. März 2024; 1.363 Befragte; Unternehmen, die KI nutzen
McKinsey & Company; ID: 1248554

Welche Rolle werden KI-Agenten in ihrem Unternehmen im Jahr 2025 spielen?



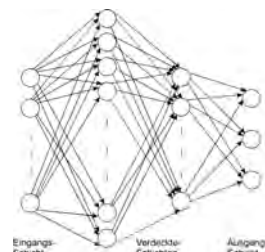
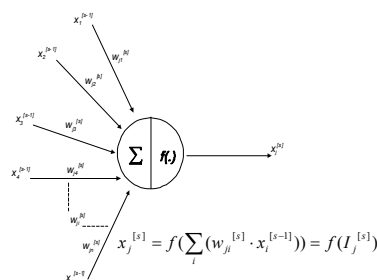
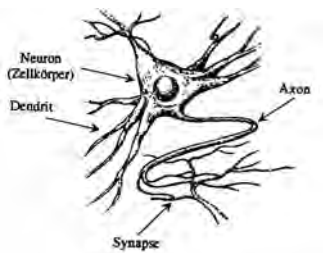
Statista, Weltweit; September bis Dezember 2024; 1.803 Befragte; C-Level executives
BCG; ID: 1552226

5 Prof. Dr.-Ing. Faozi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

KI und künstliche Neuronale Netze

- Künstliche Intelligenz (KI) umfasst Algorithmen und Modelle, die aus Daten lernen, Wissen ableiten und auf dieser Grundlage Entscheidungen oder Vorhersagen treffen können → Simulation menschlicher Intelligenz
- Das Neuron im künstlichen Neuronalen Netz ist eine stark idealisierte Form der Nervenzelle im Gehirn.
- Analog zu den Neuronen im Gehirn bestehen künstliche Neuronen aus drei wesentlichen Komponenten:
 - Dendriten → Ausgabe anderer Neuronen in der Zelle aufsummieren
 - Zellkörper → Transformation der Eingabe
 - Axon → Weiterleitung der Ausgabe der Zelle zu den Dendriten anderer Zellen über Synapsen. Die Stärke der Synapsen wird durch Gewichtungsfaktoren bzw. Gewichte simuliert.



Struktur eines Feed-Forward-Netzes

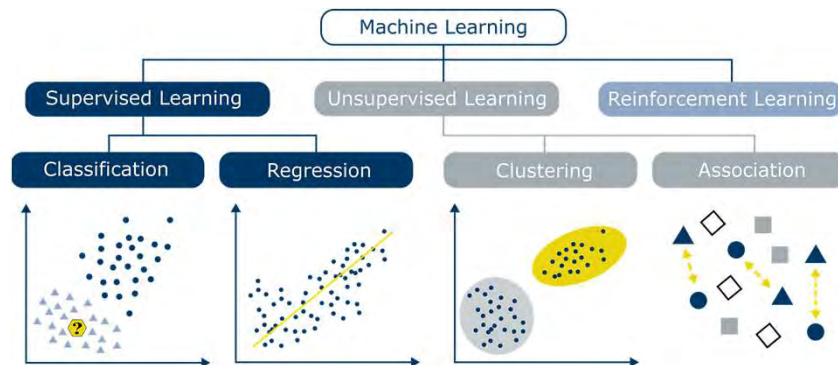
6 Prof. Dr.-Ing. Faozi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Machine Learning



- Überwachtes Lernen
 - Modell lernt eine Abbildung $f: X \rightarrow Y$ aus gelabelten Beispielen (x_i, y_i) .
- Unüberwachtes Lernen
 - Modell erkennt Struktur oder Muster in ungelabelten Daten X , ohne Zielvariable.
- Reinforcement Lernen
 - Agent lernt durch Interaktion mit einer Umgebung, gesteuert durch Belohnungssignale.

7 Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

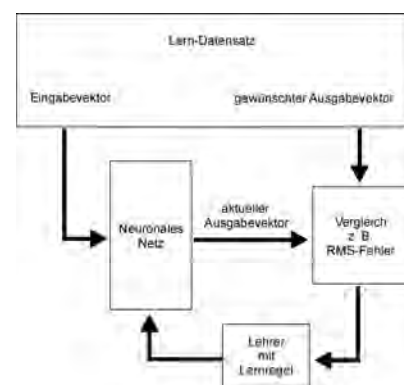
Neuronale Netze

Kriterien:

- Codierung der Ein-/Ausgabemuster $\rightarrow$ Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Netzes.
 - Die Art der Modifikation der Gewichte, so dass das Lernen rasch und sicher funktioniert (z. B. Gradientenabstiegsverfahren).
 - Die Bestimmung der Güte eines Lernalgorithmus.
 - Das Terminieren des verwendeten Lernalgorithmus, d.h., das Netz muss nach einiger Zeit einen optimalen Zustand erreichen.
-
- Beurteilung des Lernerfolges, z. B. durch RMS-Fehler (Root-Mean-Square-Fehler).

$$RMS_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (gew_i - ber_i)^2}{kl}}$$

Trainingsmuster mit kl Neuronen in der Ausgangsschicht



Überwachtes Lernen

$$RMS_g = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (RMS_e)^2}{tr}}$$

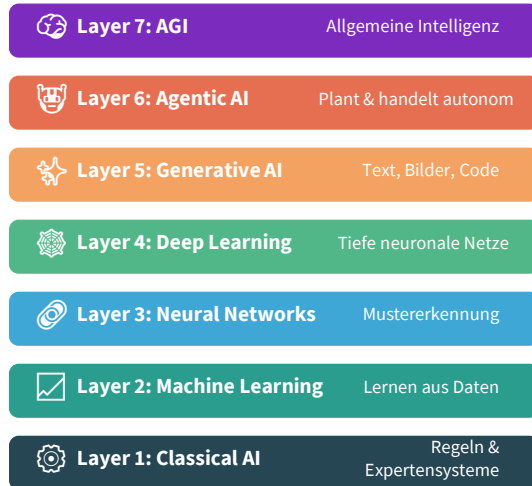
tr: Anzahl der betrachteten Muster

Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Arten der Künstlichen Intelligenz



Aktueller Fokus

- ✓ Classical AI
- ✓ Machine Learning
- ✓ Neural Networks
- ✓ Deep Learning
- ✓ Generative AI
- Agentic AI
- AGI

Mit jeder Ebene steigen Lernfähigkeit, Kreativität, Autonomie und Problemlösungskompetenz.

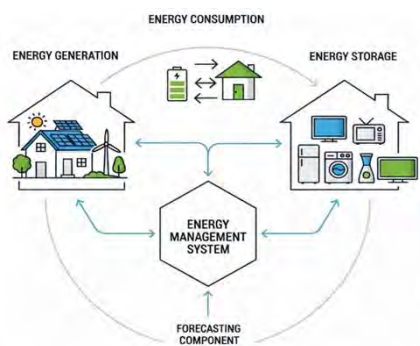
9 Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

AI-Enhanced Energy Consumption Forecasting

Modern energy grids are evolving into complex ecosystems with:

- Renewable energy sources
- Intelligent appliances with varying consumption patterns
- Dynamic user behaviors



A critical need: Accurate energy forecasting, balance supply-demand in real-time for grid stability.

Energy forecasting
=
Time series forecasting challenge

10

Dipl.-Ing. Maissa Taktak, Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

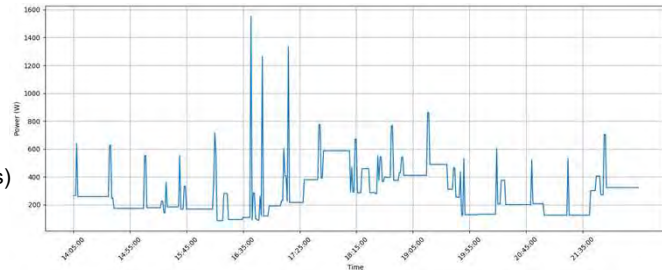
19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Key Challenges

Multi-Scale Patterns

Energy consumption contains both:

- Low-Frequency Components (daily routines, seasons)
- High-Frequency Components (appliance switching)



Forecasting Methods Comparison

Method	Characteristics	Limitations
Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)	• Linear statistical model • Good for stationary data	• Struggles with non-linear patterns • Fails with sudden spikes
Deep Learning Models	• Captures temporal dependencies • Learns complex relationships	• Struggles with multi-scale patterns • Processes raw signals directly

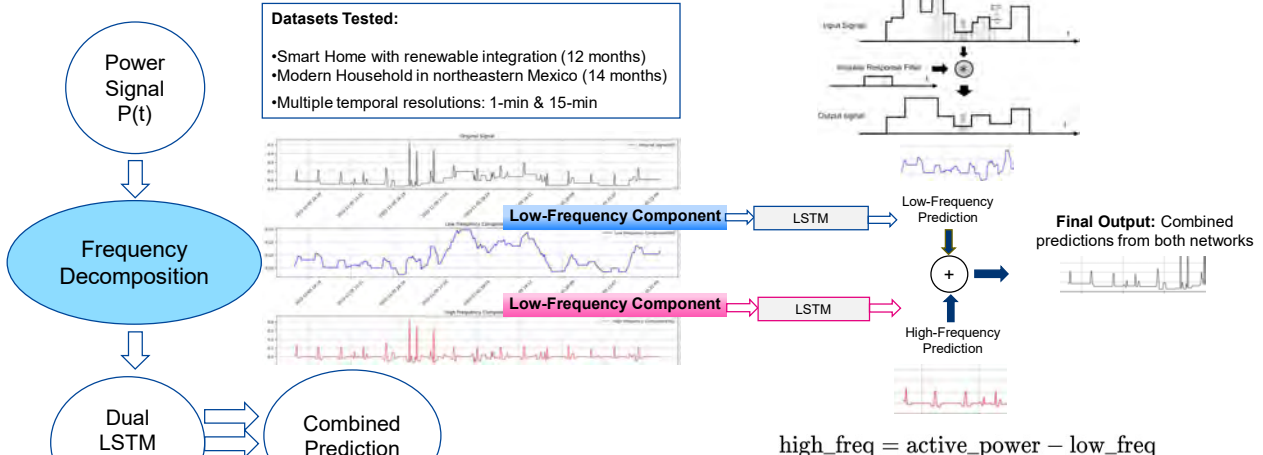
Major limitation: Challenges in handling both low- and high-frequency signals

11

Dipl.-Ing. Maissa Taktak, Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

Proposed Methodology



12

Dipl.-Ing. Maissa Taktak, Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

Results

Comparison with State-of-the-Art Methods

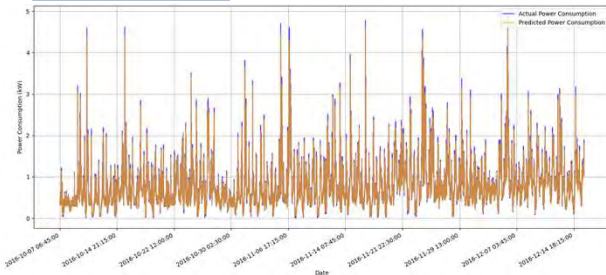
30% R^2 Improvement
70% MAE Reduction
80% RMSE Reduction

Metric	Smart House	Mexican House
RMSE	0.048 kW	11.274 W
MAE	0.036 kW	8.763 W
R^2	0.992	0.991

Comparison: With and Without Frequency Decomposition

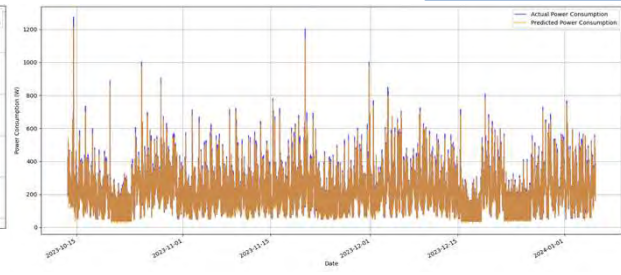
70% R^2 Improvement
41% MAE Reduction
53% RMSE Reduction

Smart House



Results at 15min granularity

Mexican House



13 Dipl.-Ing. Maissa Taktak, Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

Machine Learning for Transformer Insulation Diagnosis

The diagnostic gap

- Paper insulation ageing (Degree of Polymerization, DP) decides a transformer's remaining life.
- Measuring DP directly means opening the unit and cutting paper samples: invasive, costly, rarely done.
- Oil tests are routine and non-invasive, but no single parameter predicts DP, as DP is multivariate.

Where AI fits

Machine learning turns routine oil tests into a single condition signal, a non-invasive proxy for paper ageing that classifies every transformer automatically.

Question:

Can ML predict insulation DP from non-invasive oil tests alone?

How the model works - Inputs to prediction

9 routine oil tests (SOT)

Refractive index · Colour · Breakdown voltage · Dissipation factor ($\tan \delta$) · Acidity · Water · Temperature · Interfacial tension · Inhibitor

Gradient-boosted model (LightGBM)

IEEE C57.119 condition class

Fine

DP ≥ 500

Not Fine

Critical

350–500

Replace

< 350

Trained & validated on $n = 105$ transformers with measured DP (repeated 5-fold CV, 20 seeds, no leakage).

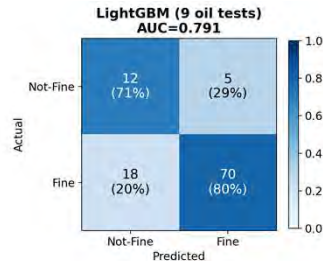
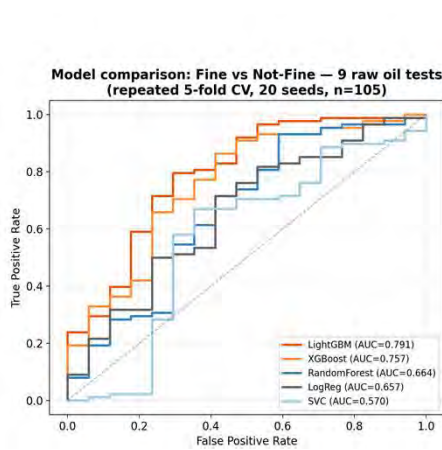
14 Dipl.-Ing. Maissa Taktak, Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Results: Strengths and Boundaries



Model	AUC
LightGBM	0.791
XGBoost	0.757
Random Forest	0.664
LogReg	0.657
SVC	0.570

Key Strengths

- Uses oil-test data already collected, no invasive sampling needed.
- AUC ≈ 0.79 : reliably separates healthy units from those needing inspection.
- Correctly clears 80% of healthy (Fine) transformers for routine monitoring.

Current Limitations

- Cannot replace direct DP measurement for end-of-life decisions.
- Model quality is bounded by data quality: more units and cleaner labels are needed.
- Richer diagnostic features would help: e.g. adding 2-FAL (furan) enables the validated Chendong DP estimator, but requires a new dataset.

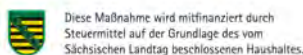
Takeaway: AI ranks transformers by condition from routine oil data : identifying which units require detailed inspection.

15 Dipl.-Ing. Maissa Taktak, Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring

Thank You for Your Attention



Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel
Leipzig University of Applied Sciences
E-Mail: faouzi.derbel@htwk-leipzig.de
Tel. +4934130761148



<https://fing.htwk-leipzig.de/fakultaet/professuren/prof-faouzi-derbel/>



16 Prof. Dr.-Ing. Faouzi Derbel, Chair of Smart Diagnostic and Online Monitoring
Leipzig University of Applied Sciences, Faculty of Engineering

HTWK

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Dr. Alexander Alber

Hitachi Energy

Alexander Alber arbeitet seit 2018 in unserer Branche, erst bei der Maschinenfabrik, nun bei Hitachi. Er beschäftigt sich mit Themen wie Statistik, thermische Modellierung und DGA.

Er hat Abschlüsse in Maschinenbau und Informationstechnik, über 30 Veröffentlichungen und Patente, und hat zuletzt die statistische Auswertung für die IEEE-Arbeitsgruppe zur Überarbeitung von C57.155 (DGA in esterisolierten Transformatoren) beigesteuert.

Heute ist er hier als Sekretär der CIGRE-Arbeitsgruppe zu digitalen Zwillingen, die vor kurzem fertig wurde.



Notizen:

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

CIGRE JWG A2/D2.65

Digital twins for power transformers – Concept and future perspectives

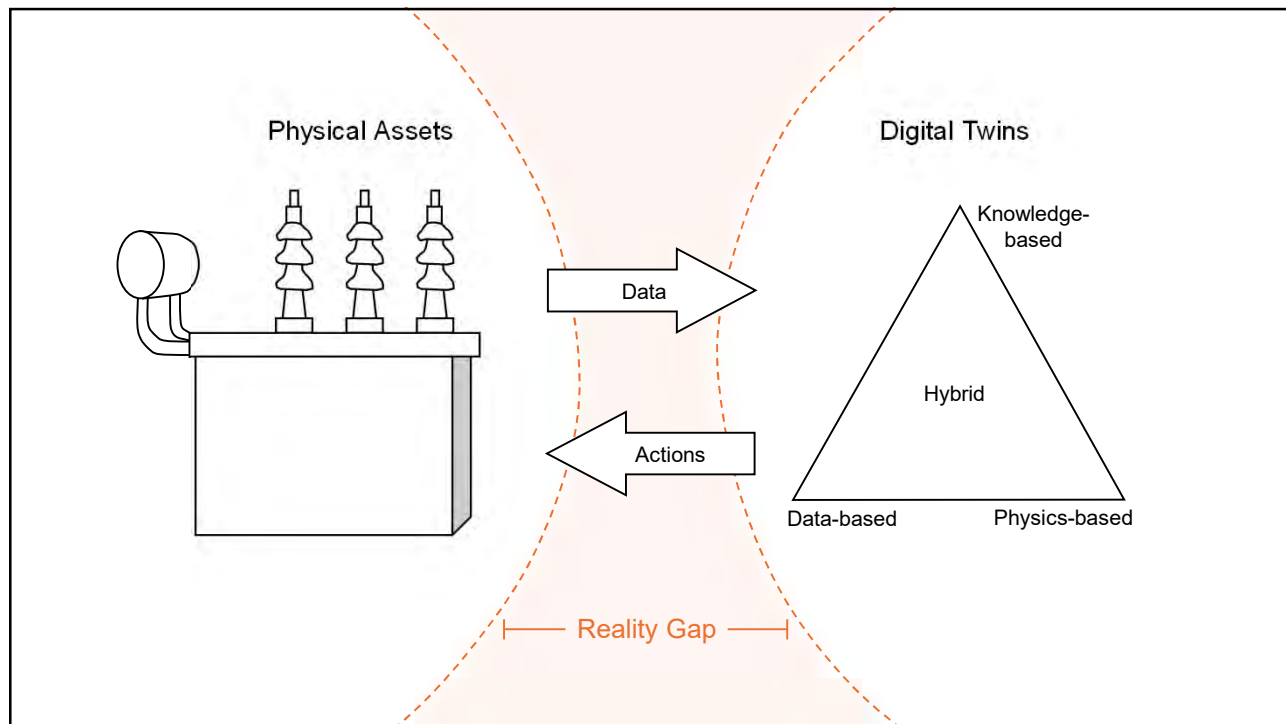
Convener: Patrick Picher, Secretary: Alexander Alber

1

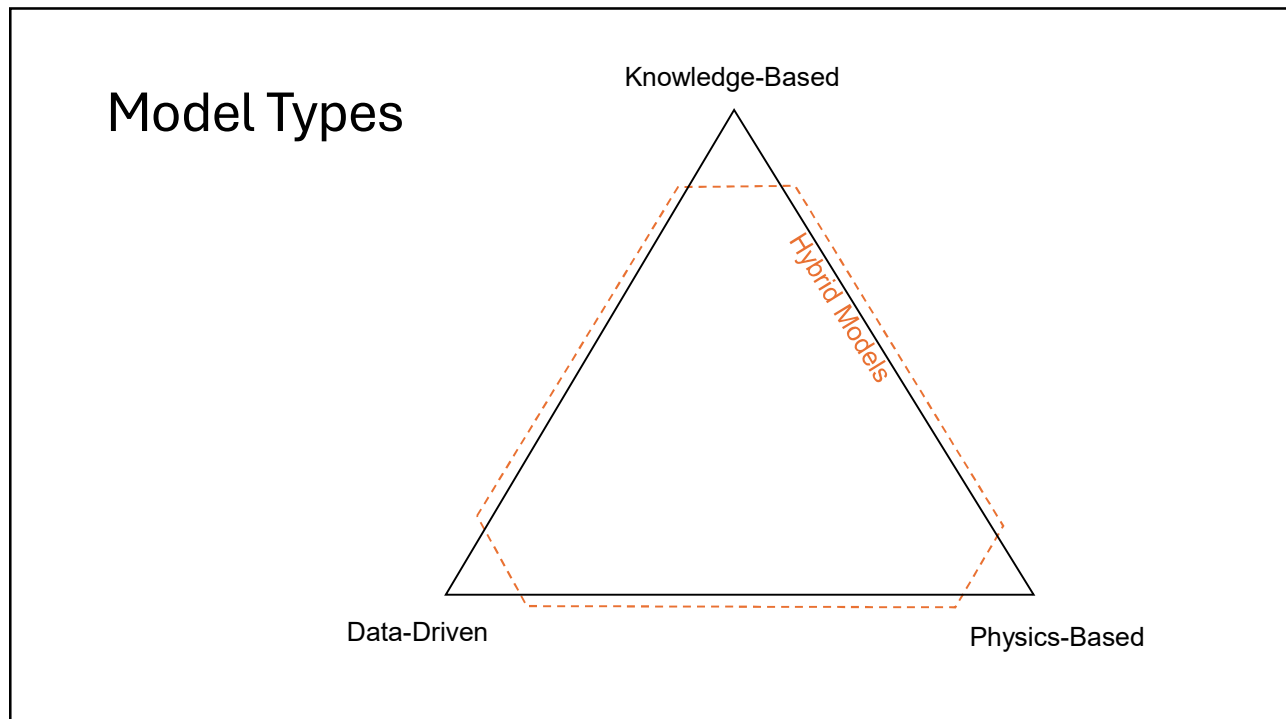
Definition

“A digital twin is a **virtual representation** of an asset or system that is **dynamically updated** using data from its physical counterpart, incorporates predicting capabilities, and supports decision-making to realise value. The **bidirectional interaction** between the virtual and the physical is central to the digital twin.”

2



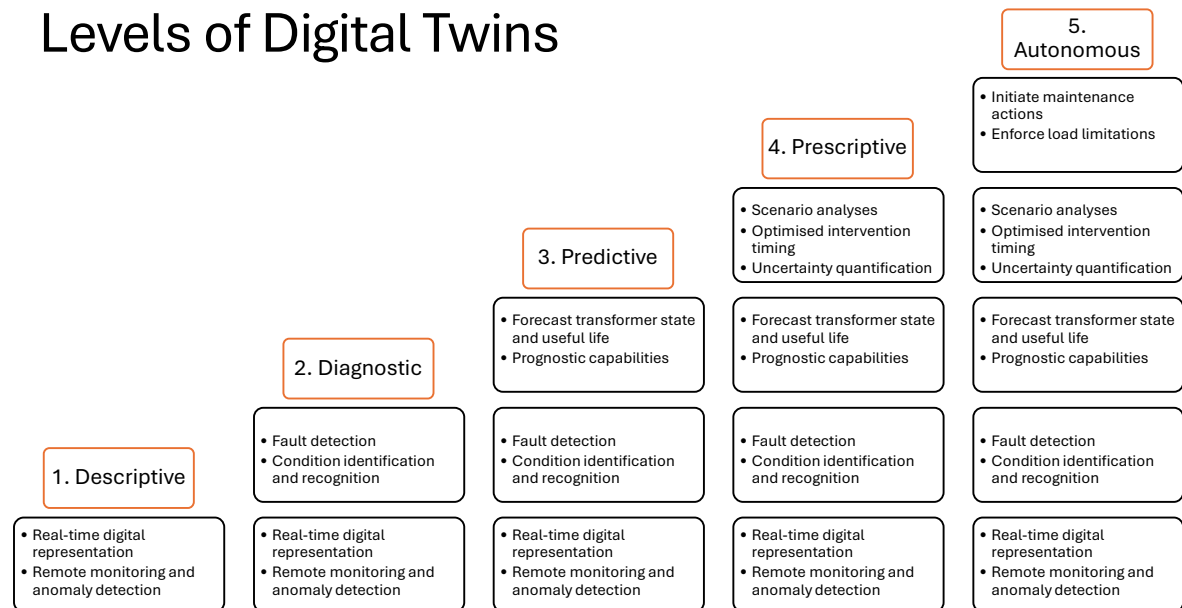
3



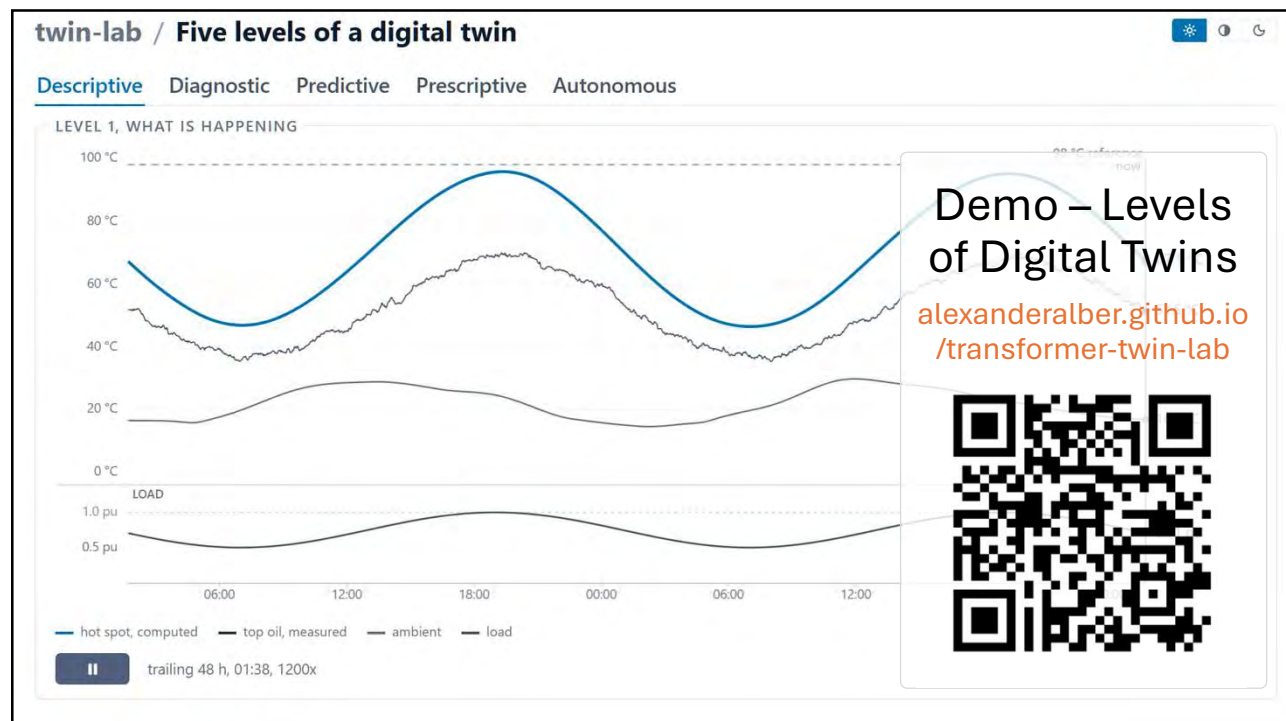
4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Levels of Digital Twins

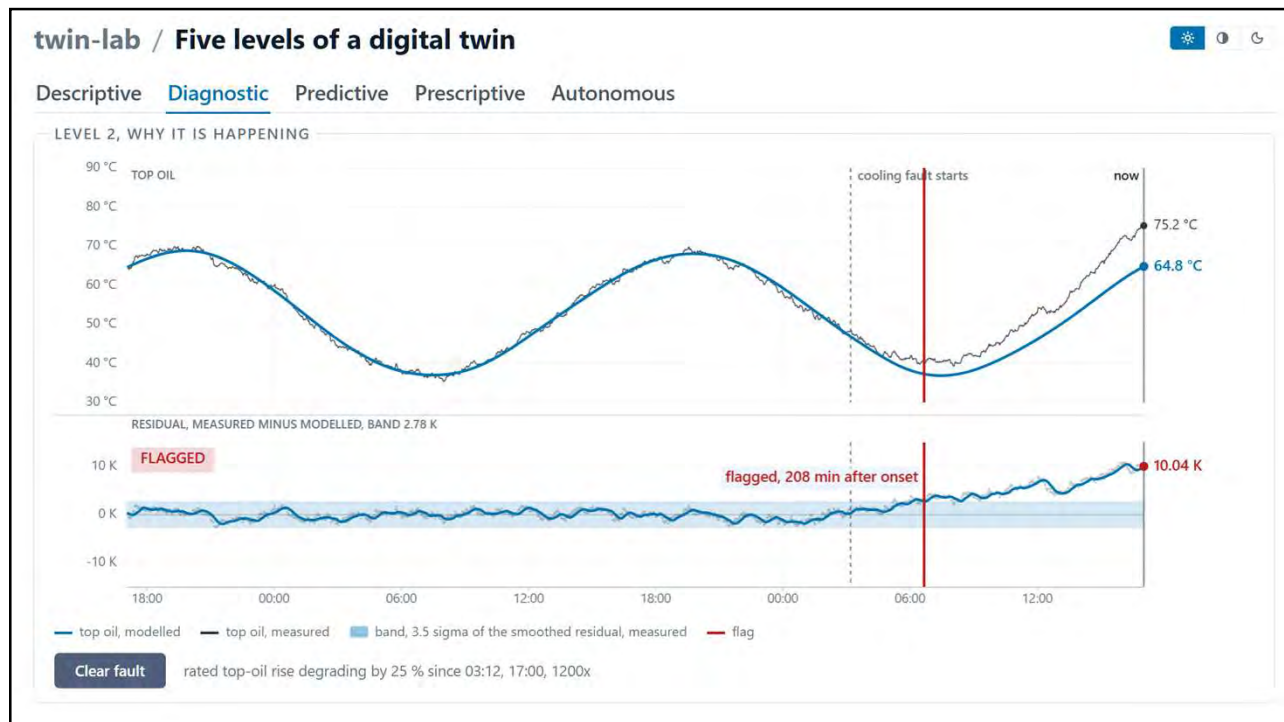


5

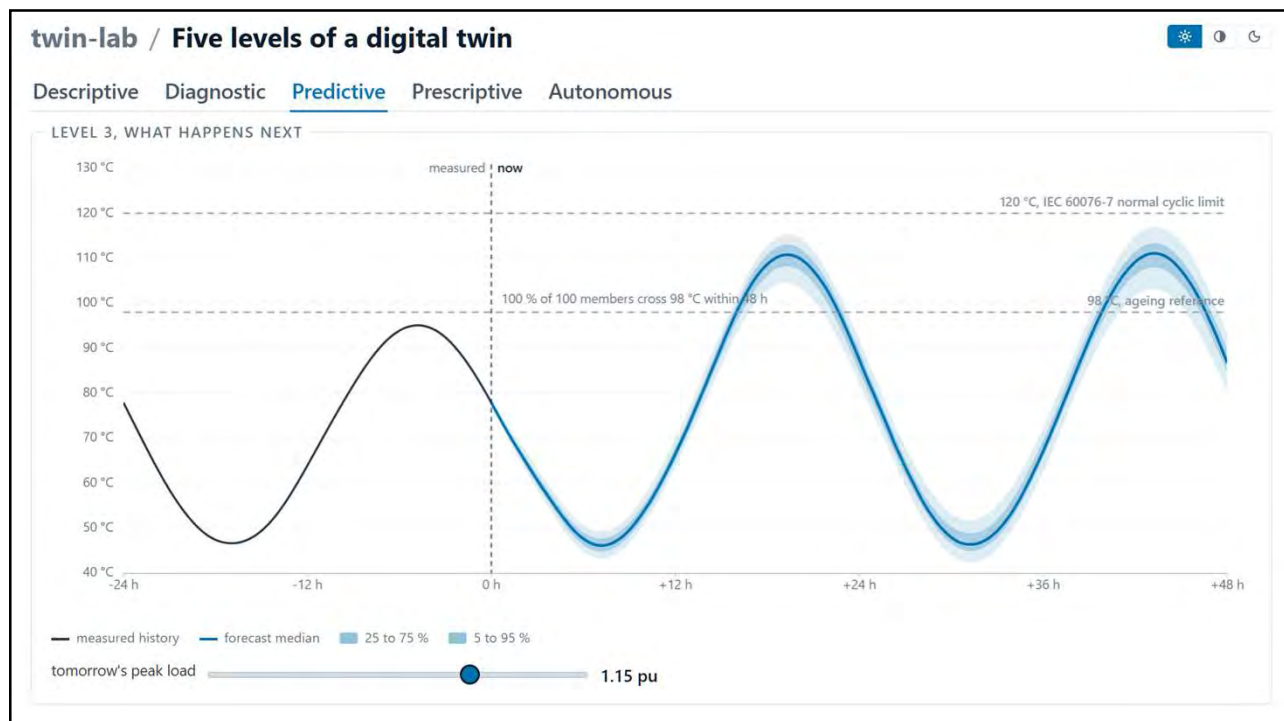


6

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

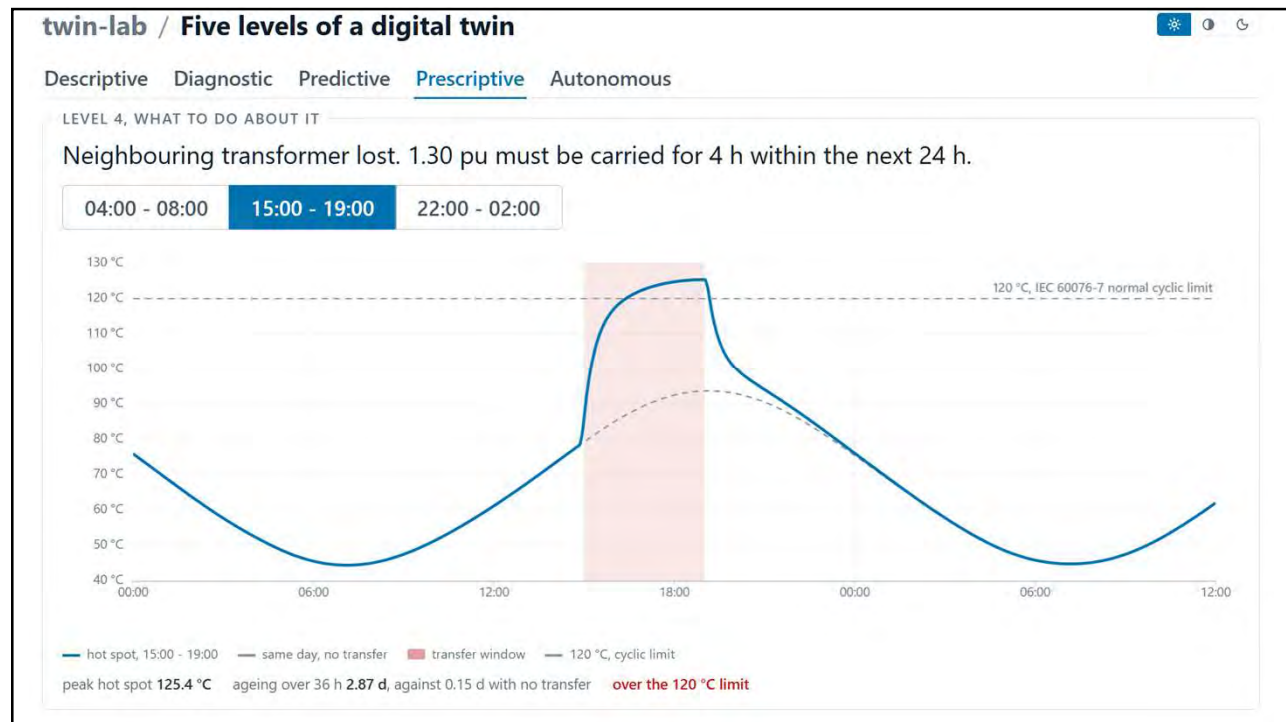


7

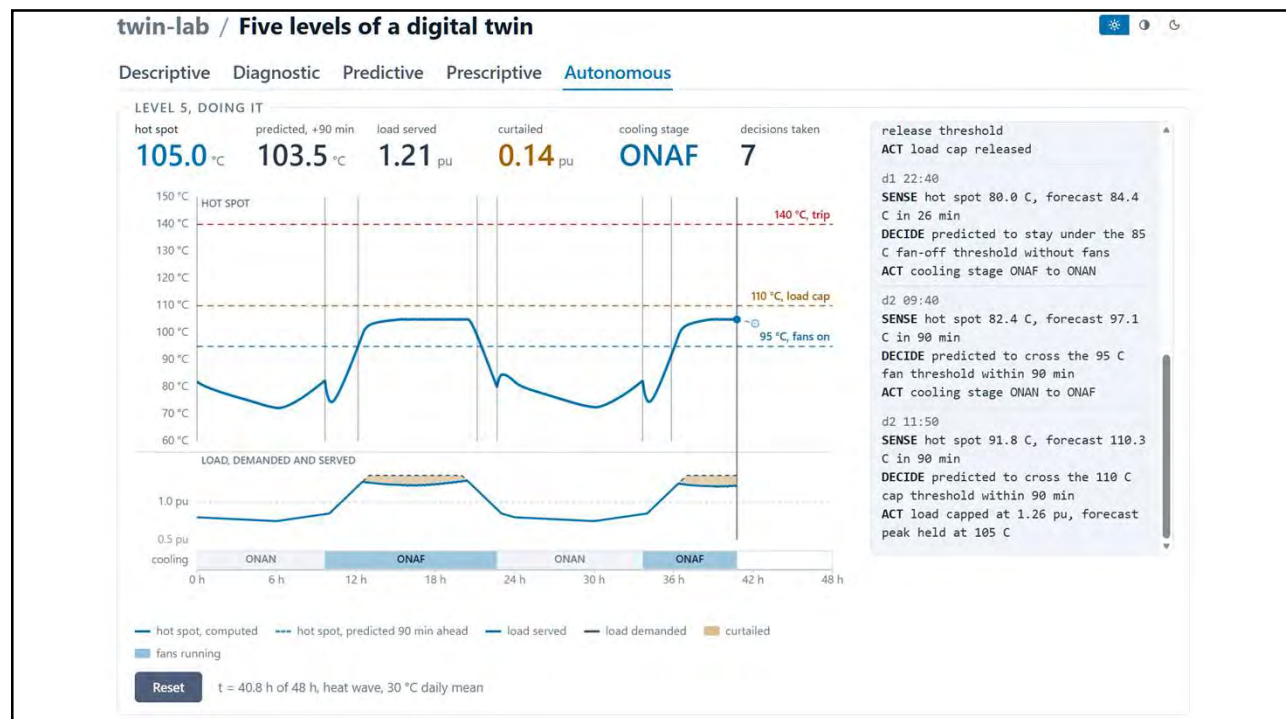


8

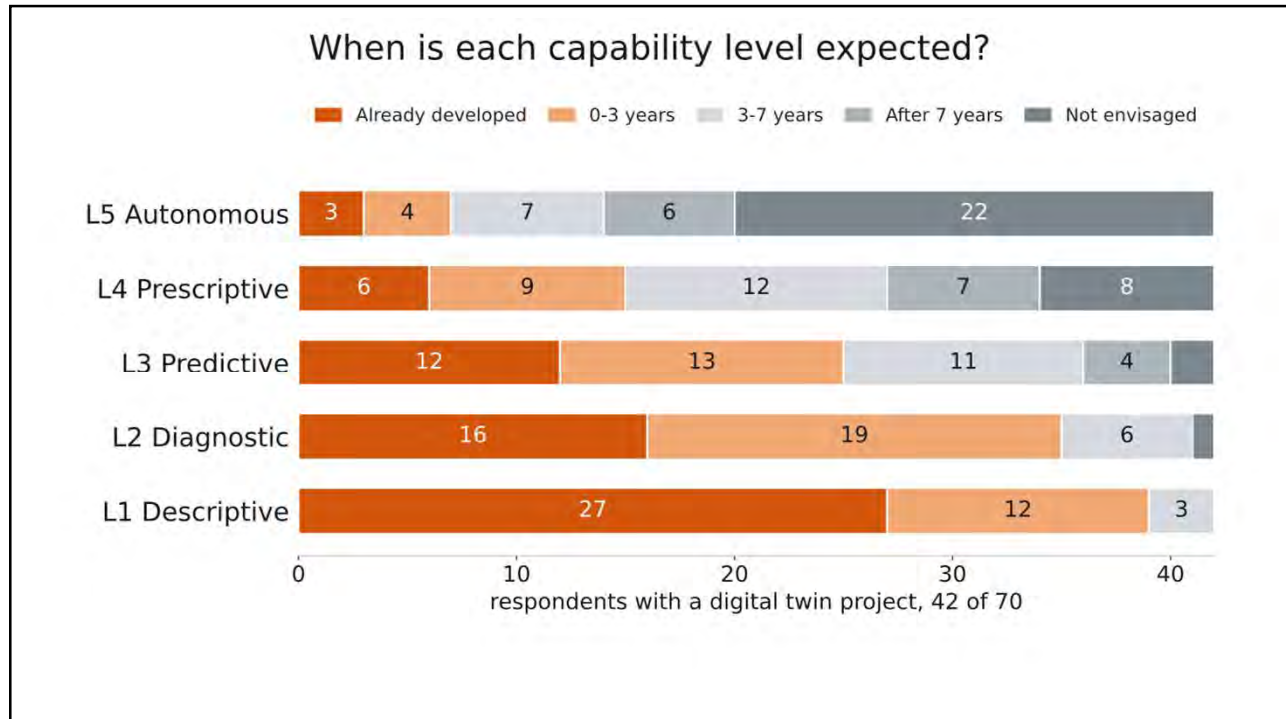
19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



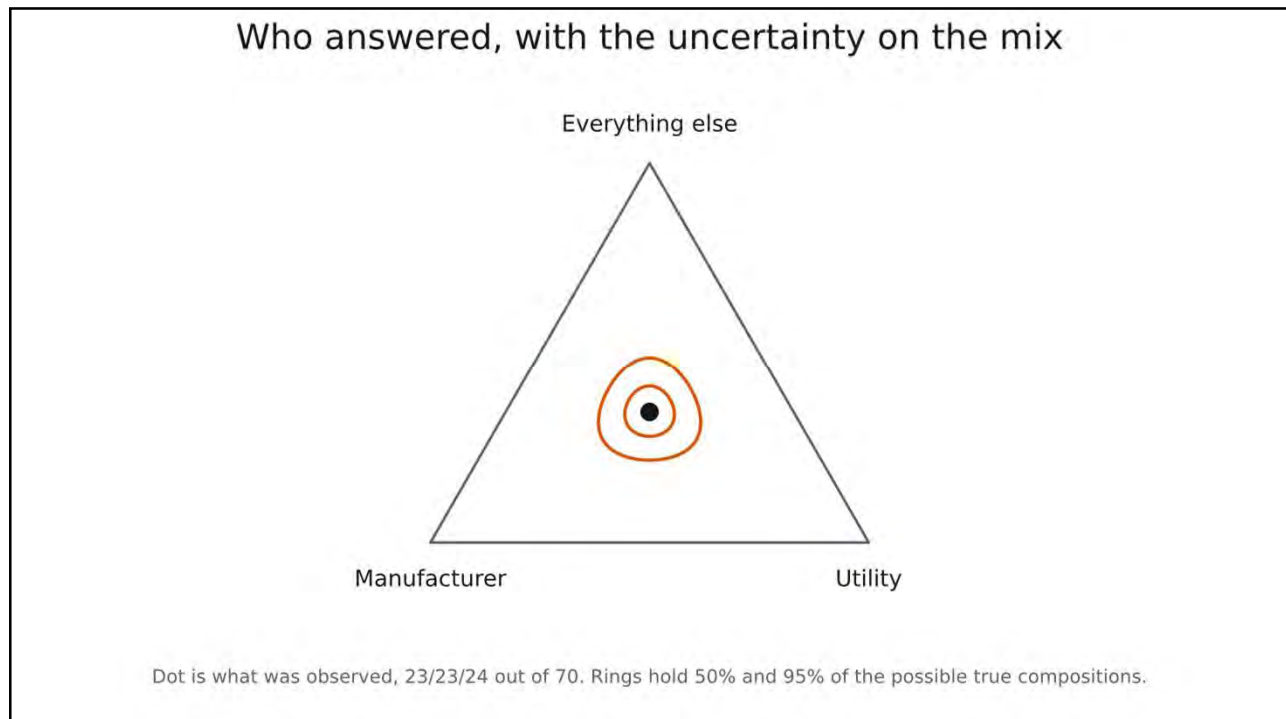
9



10

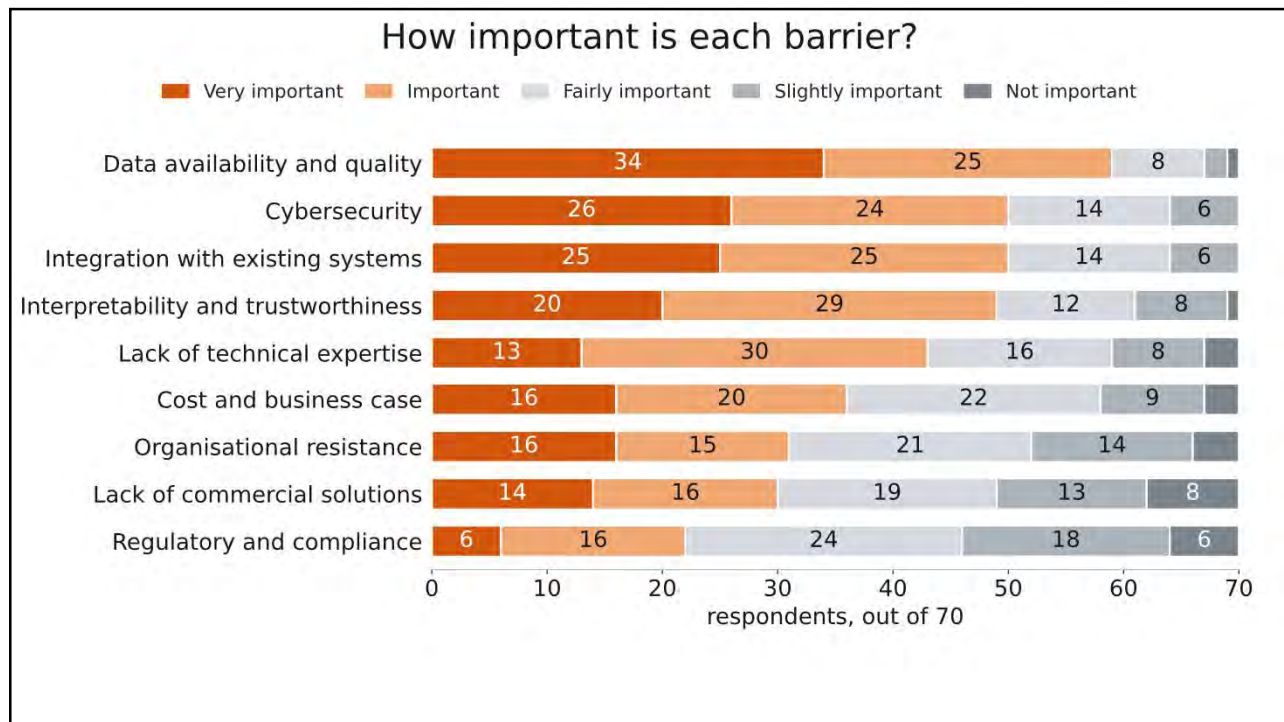


11

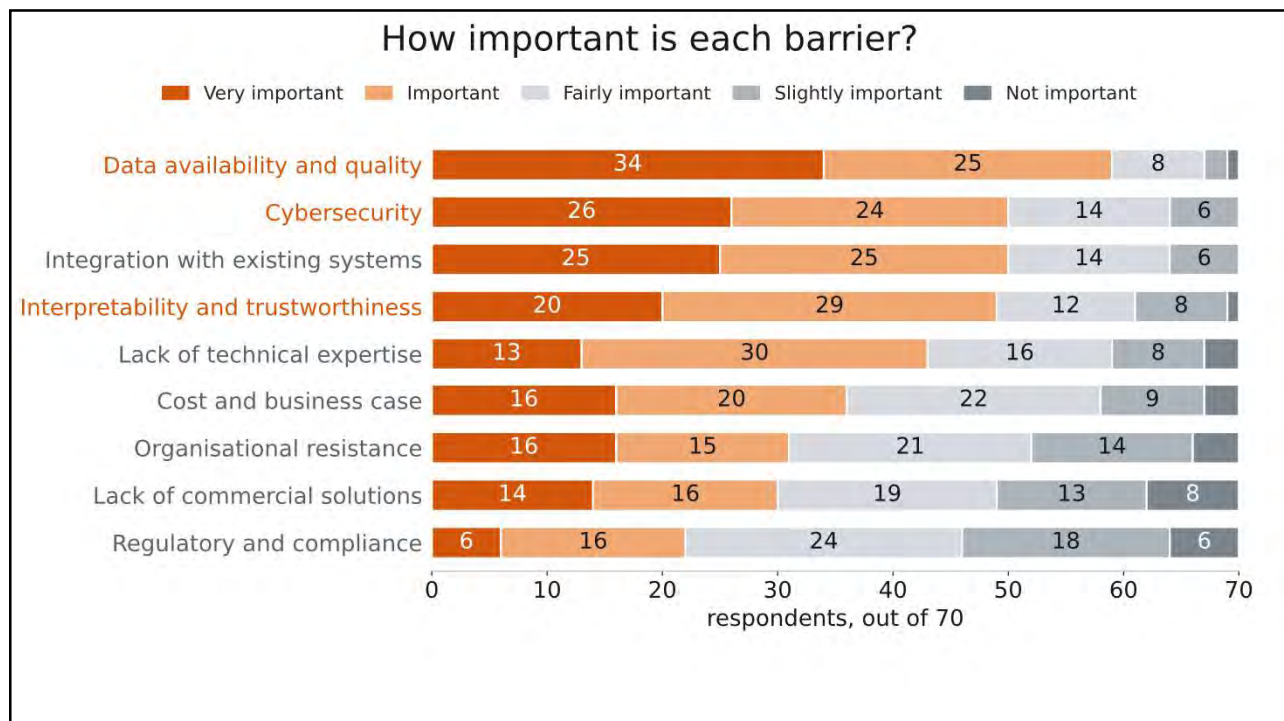


12

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

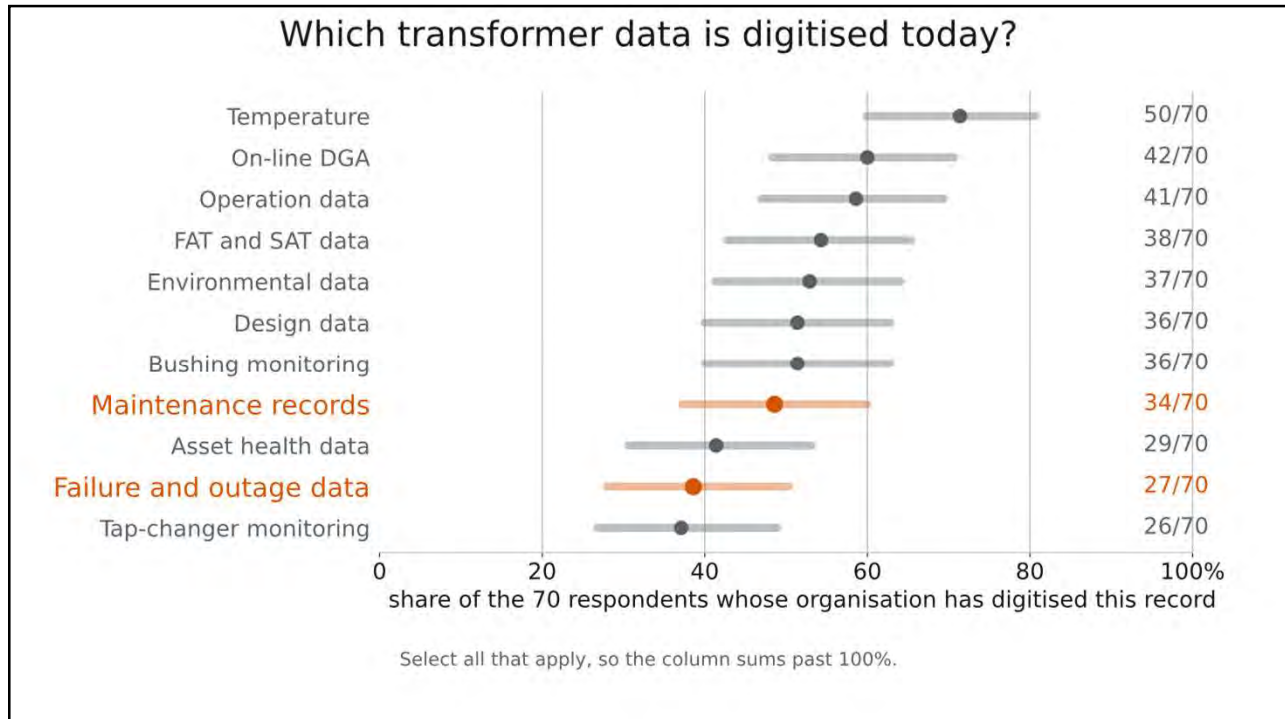


13



14

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



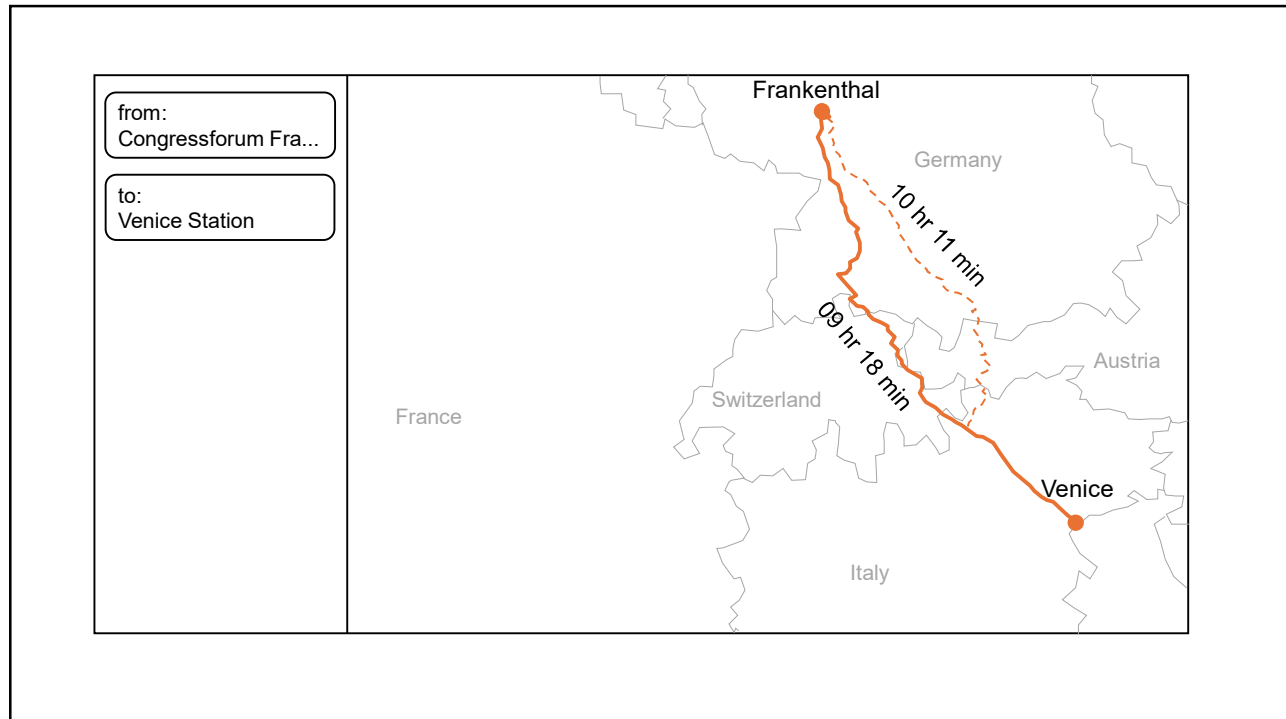
15

part 2

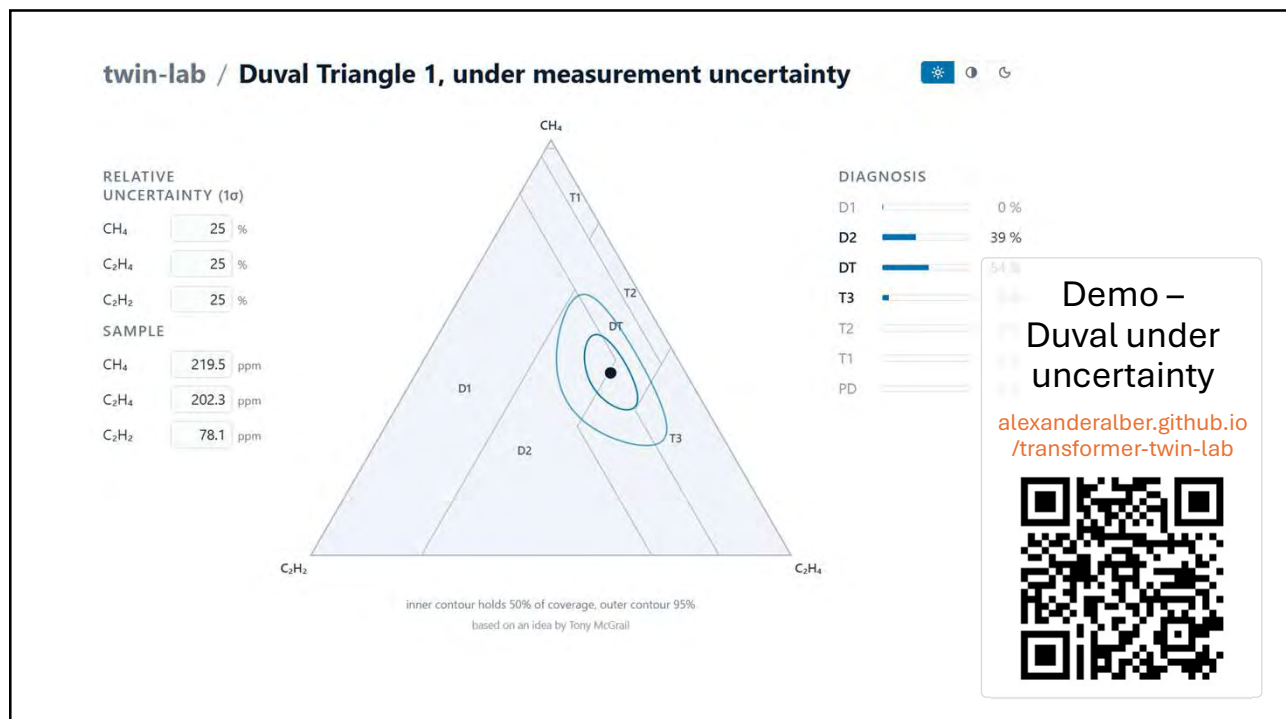
The map is not the territory

16

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



17



18

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



twin-lab / Thermal mini-twin, IEC 60076-7

Transformer Live Lifetime Model

SITE
Desert **City / overload** Northern EAF Custom

AIR AROUND THE TANK
yearly average C
seasonal swing K
day/night swing K
latitude deg

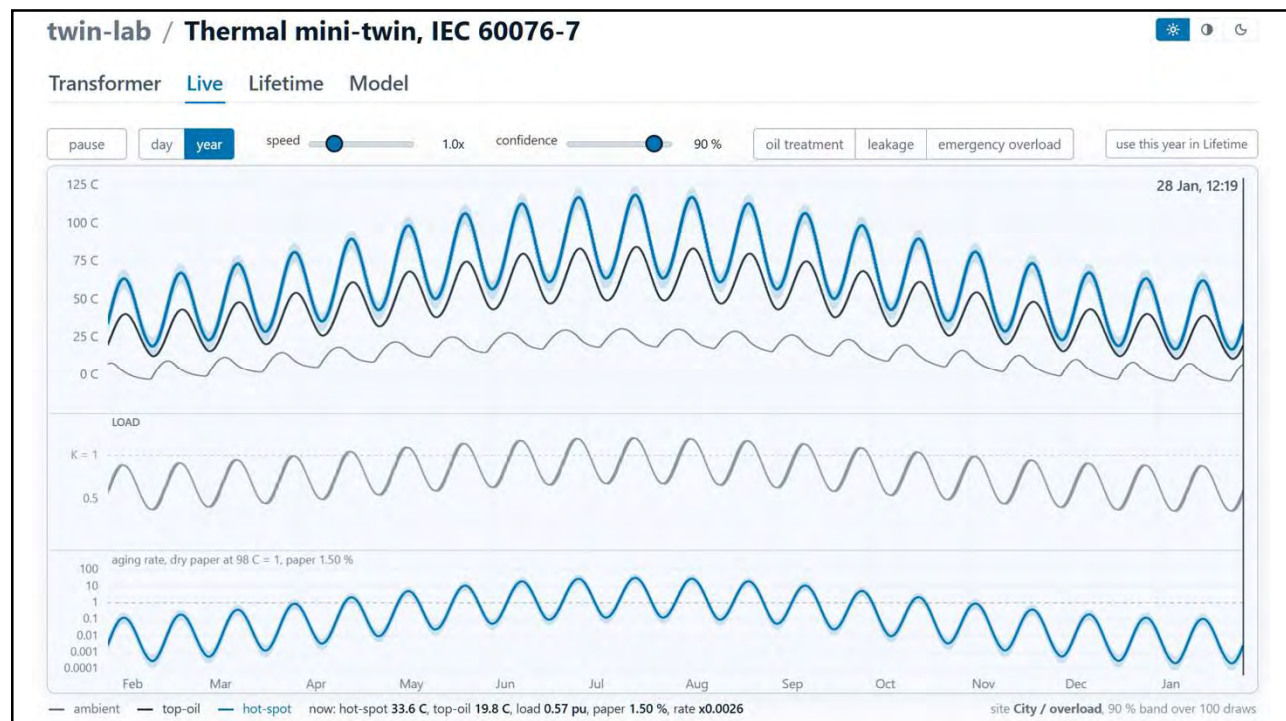
LOAD
average load pu
day/night swing pu
peak at hour h
seasonal swing pu
furnace ripple x
oil heater floor C
busiest season

PAPER
paper moisture %
DP today

HOW WELL DO WE KNOW IT (1 sigma)
ambient sensor K
parameters %
model residual K
moisture %
DP today

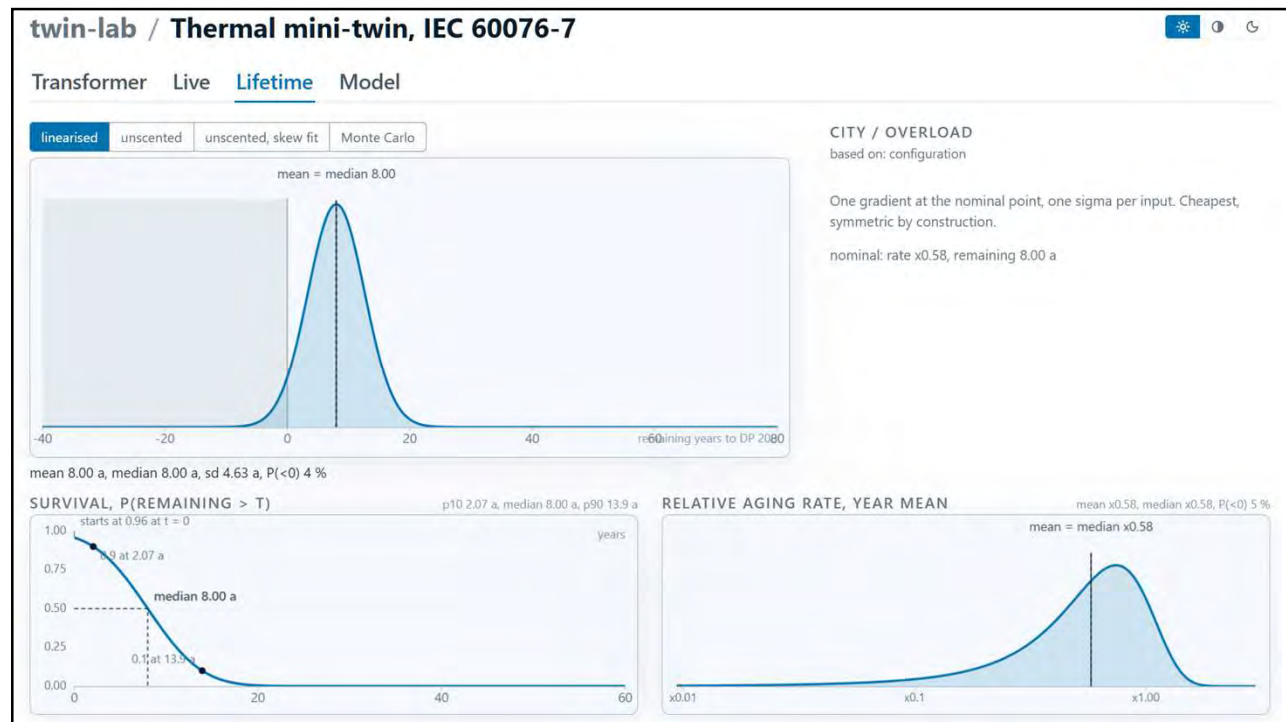
Demo – Thermal Twin
alexander.alber.github.io/transformer-twin-lab

19

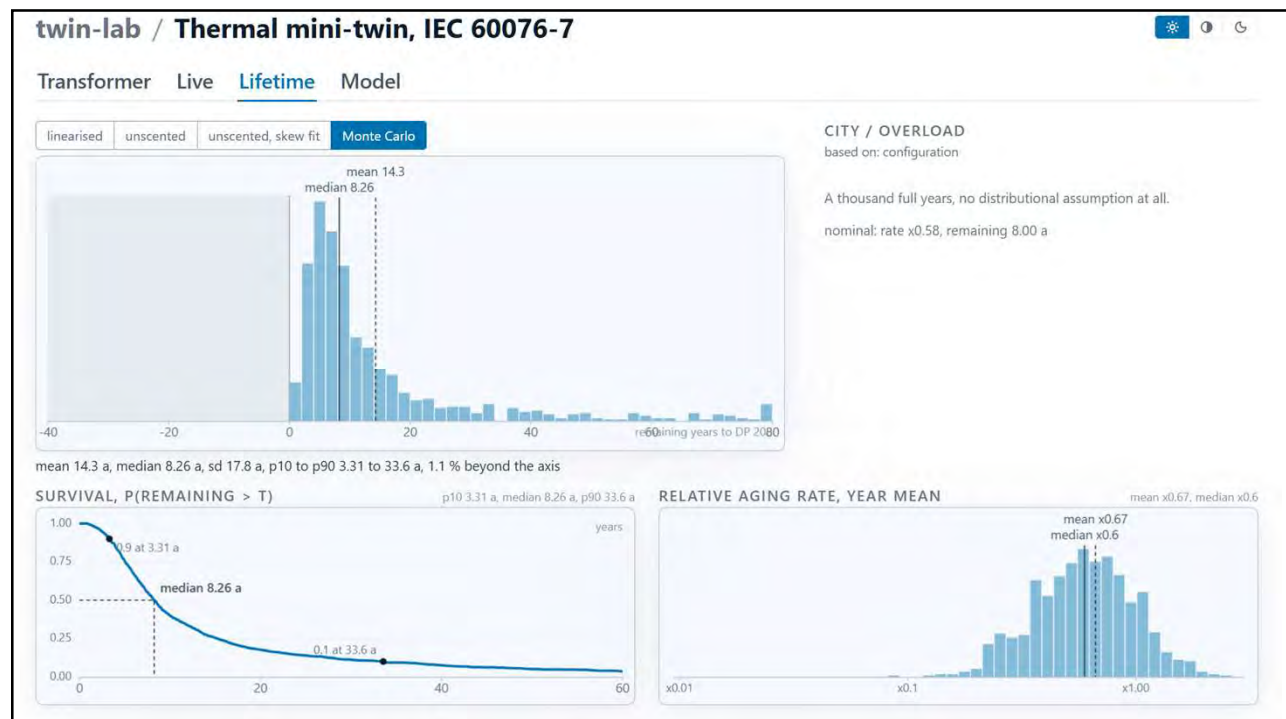


20

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



21



22

Recommendations

Data quality

- Investment in **data quality** and integration efforts
- Adoption of robust data collection and cleaning methods

Standardisation

- Data formats
- Communication protocols

Flexibility

- Range of data-analysis methods and data granularity
- Evolution of sensors
- Scalable data-acquisition systems

Reliability

- Monitoring the reality-gap
- Auditing, validation and **iterative refinements** of DTs
- Periodic validation of sensors
- DT should remain operational even when sensors fail

Connectivity and hybrid approaches

- Enabling data exchange and fusion across model domains
- Integrating data across the lifecycle
- Adopting **multi-physics and hybrid modelling**

Data governance

- Establishment of clear data governance and ownership
- Development of robust security frameworks

Usability

- Development of appropriate documentation
- Communication of model performance

Organisation

- Definition of clear objectives and success criteria
- Prioritisation of high-impact use cases
- Development of workforce skills and external collaboration

Referenten

Dr. Bruno Bošnjak

GE Vernova

Bruno Boššnjak ist Elektroingenieur mit einem Dokortitel in Maschinenbau und bringt fundierte Erfahrung in der Hochspannungsindustrie mit. Sein fachlicher Schwerpunkt liegt auf der Planung, Validierung und Umsetzung komplexer elektrotechnischer Projekte, insbesondere in der Forschung und Entwicklung von Hochspannungstechnologien. Er verfügt über umfassende Expertise in der Entwicklung elektrischer Transformatoren – von Mittelspannungs-Verteiltransformatoren bis hin zu HGU-Transformatoren mit bis zu 1100 kV und 800 MVA. Derzeit ist er als Team Leiter und Senior Technical Expert in der Abteilung für Power Transformer Technology bei GE Vernova tätig.



Notizen:

[illegible]



GE VERNOVA

Funktionsweise und Aufbau von

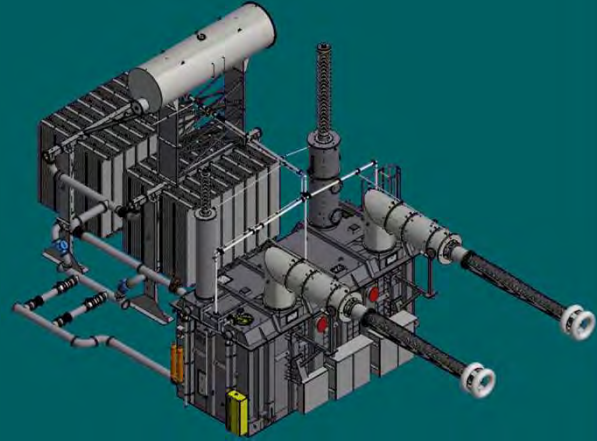
PHASENSCHIEBERN & HVDC-TRANSFORMATOREN

Dr. Bruno Bošnjak

Senior Technical Expert @ GE Vernova

Transformer Lifecycle Management

User Forum • 2026



Agenda - zwei Sondertransformatoren



Teil 1 • Phasenschieber (PST)

Warum Lastflusssteuerung?

Wirkprinzip: Zusatzspannung & Phasenwinkel

Bauarten: Einkern / Zweikern

Aufbau, Kenndaten, Betrieb

Teil 2 • HGÜ-Transformatoren

Rolle im HGÜ-System, LCC vs. VSC

Konfigurationen & Wicklungsanordnung

AC/DC-Mischbeanspruchung der Isolierung

Konstruktive Besonderheiten, Prüfung, Zuverlässigkeit

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

PHASENSCHIEBER

Phase Shifting Transformer (PST) - der Lastfluss-Regler des Drehstromnetzes



© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Warum Lastflusssteuerung?

Im vermaschten Netz teilt sich der Lastfluss nach Impedanzen auf – nicht nach Verträgen oder Leitungskapazität

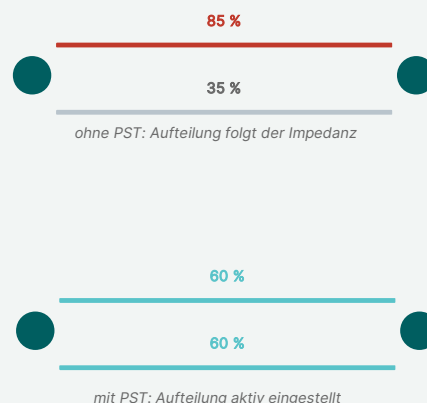
Folge: einzelne Leitungen werden überlastet, während parallele Wege ungenutzt bleiben

Treiber: Marktliberalisierung, grenzüberschreitender Handel, Einspeisung erneuerbarer Energien

Der PST fügt eine steuerbare Zusatzspannung ein und verschiebt gezielt Wirkleistung zwischen parallelen Pfaden

- In den USA seit Jahrzehnten verbreitet, in Europa stark zunehmend (Grenzkuppelstellen)

Parallelbetrieb zweier Leitungen



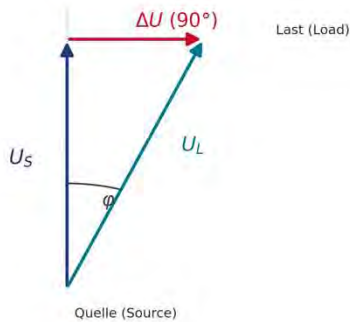
© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Wirkprinzip: Zusatzspannung erzeugt Phasenwinkel



Zusatzspannung ΔU senkrecht zur Phasenspannung
→ einstellbarer Phasenwinkel φ zwischen Quelle und Last



Der PST addiert eine Zusatzspannung ΔU senkrecht (90°) zur Phasenspannung → Winkel φ zwischen Quelle und Last

Übertragene Wirkleistung: $P \approx (U \cdot U/X) \cdot \sin(\delta \pm \varphi)$ – der PST verändert δ gezielt

Voreilend (advance) oder nacheilend (retard) → Lastfluss erhöhen oder begrenzen

Betrag von ΔU wird über einen Stufenschalter (OLTC) unter Last verstellt

- Amplitude der Spannung bleibt (nahezu) unverändert – geregelt wird der Winkel

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Wie entsteht die 90° -Zusatzspannung?



Serienwicklung liegt im Leitungszug; gespeist aus Regelwicklung(en) anderer Phasen/Schenkel

Spannung anderer Phasen ist um 120° verschoben → geeignete Kombination ergibt 60° - oder 90° -Zusatzspannung

OLTC verändert die wirksame Windungszahl der Regelwicklung → Winkel in Stufen, unter Last, $\pm$ (advance/retard)

Einkern (Single-Core)

Serien- und Regelwicklung auf einem Aktivteil · wirtschaftlich · OLTC liegt auf Leitungspotenzial · z. B. Hexagonal-/Delta-Schaltung

Zweikern (Two-Core)

Serientransformator + Erregertransformator · OLTC netzgetrennt · für große Leistungen und hohe Spannungen · ggf. zwei Kessel

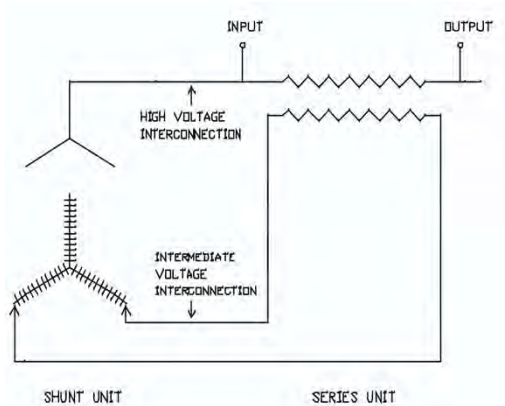
Symmetrisch / asymmetrisch

symmetrisch: $|U|$ bleibt bei Winkeländerung konstant · asymmetrisch: Betrag ändert sich mit dem Winkel

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Einkern-PST: Hexagonal-Schaltung (Spartransformator)



Nur ein Aktivteil: Serien- und Regelwicklungen aller drei Phasen verkettet auf einem Kern

Kompakt und wirtschaftlich - weniger Material, ein Kessel, geringere Verluste

Stufenschalter liegt auf Leitungspotenzial → Isolation des Stufenschalters wird bemessungsrelevant

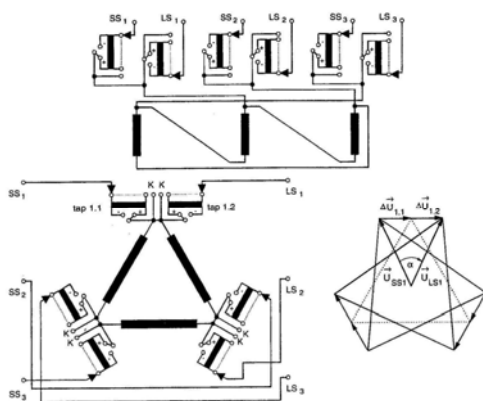
Zeigerbild wird zum Sechseck: Winkel und Betrag ändern sich gemeinsam mit der Stufe

Varianten: festes Hexagon, mit Wendeschalter oder Advance-Retard-Schalter

- Einsatz: mittlere Leistungen und Winkel; bei Großanlagen dominiert der Zweikern-Typ

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Einkern-PST: Hexagonal-Schaltung (Spartransformator)



Nur ein Aktivteil: Serien- und Regelwicklungen aller drei Phasen verkettet auf einem Kern

Kompakt und wirtschaftlich - weniger Material, ein Kessel, geringere Verluste

Stufenschalter liegt auf Leitungspotenzial → Isolation des Stufenschalters wird bemessungsrelevant

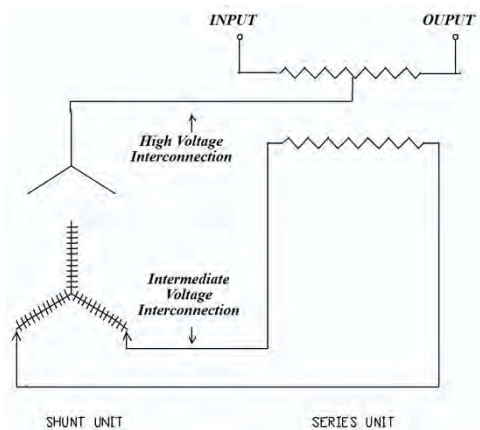
Zeigerbild wird zum Sechseck: Winkel und Betrag ändern sich gemeinsam mit der Stufe

Varianten: festes Hexagon, mit Wendeschalter oder Advance-Retard-Schalter

- Einsatz: mittlere Leistungen und Winkel; bei Großanlagen dominiert der Zweikern-Typ

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Klassische Bauform: Zweikern-PST (Typ „Quadratur“)



Serientransformator: Serienwicklung im Leitungszug, mittig angezapft

Erregertransformator: speist über Regelwicklung + OLTC die Serienwicklung

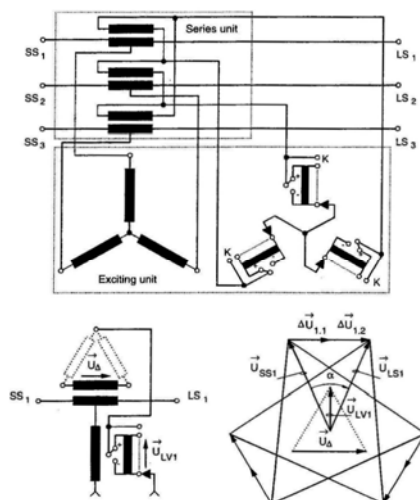
Zusatzspannung steht senkrecht (90°) auf der Phasenspannung $\rightarrow$ symmetrischer Winkel $\pm\varphi$

OLTC arbeitet netzgetrennt auf niedrigerem Potenzial $\rightarrow$ beherrschbare Schalterbeanspruchung

Vorteil: große Leistungen/Winkel; Nachteil: zwei Aktivteile, mehr Material und Verluste

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Klassische Bauform: Zweikern-PST (Typ „Quadratur“)



Serientransformator: Serienwicklung im Leitungszug, mittig angezapft

Erregertransformator: speist über Regelwicklung + OLTC die Serienwicklung

Zusatzspannung steht senkrecht (90°) auf der Phasenspannung $\rightarrow$ symmetrischer Winkel $\pm\varphi$

OLTC arbeitet netzgetrennt auf niedrigerem Potenzial $\rightarrow$ beherrschbare Schalterbeanspruchung

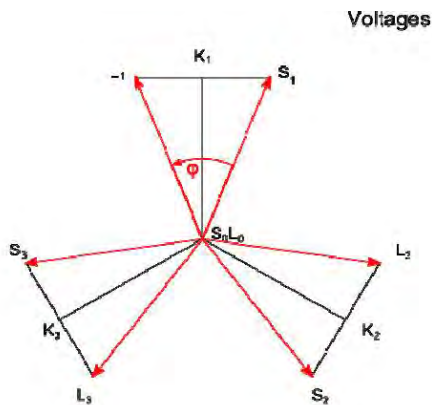
Vorteil: große Leistungen/Winkel; Nachteil: zwei Aktivteile, mehr Material und Verluste

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Zeigerdiagramm des Zweikern-PST



S = Quellseite, L = Lastseite; K = Anzapfung der Serienwicklung

Winkel φ zwischen S und L symmetrisch: $|U_S| = |U_L|$ im Leerlauf

Typische Winkelbereiche: $\pm 10^\circ \dots \pm 40^\circ$ (Leerlauf), unter Last kleiner

Wichtig für den Betrieb: Impedanz ändert sich deutlich über den Stufenbereich (z. B. 9 % $\rightarrow$ 13 %)

- Der Netzplaner „sieht“ den PST als steuerbare Winkelquelle mit variabler Reaktanz

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Bauform-Matrix: direkt / indirekt, symmetrisch / asymmetrisch



Direkt

Regel- und Serienwicklung unmittelbar im Leitungszug (Einkern) - einfach, kostengünstig, OLTC auf Leitungspotenzial

Indirekt

Serien- + Erregereinheit (Zweikern) - OLTC netzgetrennt, skaliert zu höchsten Leistungen und Spannungen

Symmetrisch

$|U|$ bleibt über den ganzen Stellbereich konstant - reiner Winkelsteller, aufwändigere Schaltung

Asymmetrisch

Winkel UND Spannungsbetrag ändern sich mit der Stufe - einfacher, für kleinere Winkelbereiche

Auswahlkriterien

Durchgangsleistung · max. Winkel unter Last · Netzspannung · Kurzschlussleistung · OLTC-Beanspruchung · Transportlimit

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Ausgeführtes Beispiel: 2750 MVA Quadbooster im Prüffeld



2750 MVA

Durchgangsleistung

$\pm 11.3^\circ$

Winkel im Leerlauf (± 16 Stufen)

uk=5.50%

Minimum Stufe für Zero Boost

400 kV / 3790 A

Nennspannung und Strom

uk=19.25%

Maximale Stufe

$\pm 20\% U_n$

Injizierte Quadratische Spannung

Zwei Aktivteile, Verbindung über ölsolierte Verbindungsleitungen / Wanddurchführungen

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Wo Phasenschieber eingesetzt werden - und wie man sie betreibt



Grenzkuppelstellen

Handels- und Transitflüsse zwischen Regelzonen einstellen und begrenzen (z. B. an vielen europäischen Grenzen)

Parallelleitungen

Aufteilung zwischen Leitungen unterschiedlicher Impedanz ausgleichen - Überlast der starken Leitung vermeiden

Ringflüsse (Loop Flows)

Ungeplante Durchleitungen durch Nachbarnetze reduzieren, Netzverluste senken

Einspeise-Integration

Wind-/PV-bedingte Flussschwankungen beherrschen, N-1-Sicherheit bei hoher Auslastung

Betriebsweise

Sollwert als Winkelstufe oder MW-Fluss; manuell aus der Leitstelle oder als Automatik mit Totband

Koordination

Benachbarte PSTs und TSOs abstimmen - gegeneinander arbeitende Regler vermeiden

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



PST im Betrieb - was den Lebenszyklus prägt



OLTC

Häufige Schaltungen unter Last – das mechanisch meistbeanspruchte Bauteil; Wartung nach Schaltspielzahl planen

Serienwicklung

Trägt den vollen Leitungsstrom, auch bei Netz-Kurzschlüssen – Kurzschlussfestigkeit ist auslegungsbestimmend

Impedanzgang

Wird stark über die Stufen – Schutz-Einstellungen und Netzmodelle müssen das abbilden

Monitoring

DGA, OLTC-Überwachung, Durchführungsüberwachung – wie Netztrafo, plus Winkelstellung / Regelverhalten

Prüfung

IEC 62032 / IEEE C57.135 als maßgebliche Regelwerke für Spezifikation und Test

Redundanz

Einzelanfertigungen mit langen Lieferzeiten – Ersatzteilstrategie (Durchführungen, OLTC) früh festlegen

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Spezifikation eines PST - worauf es ankommt



Elektrische Auslegung

Durchgangsleistung (MVA) und Netzspannung

Winkelbereich: im Leerlauf UND unter Nennlast spezifizieren

Impedanzgang über den Stufenbereich inkl. Toleranzen – für Netzberechnung und Schutz

Kurzschlussfestigkeit der Serienwicklung (voller Netz-Kurzschlussstrom)

Verlustkapitalisierung (Leerlauf-/Lastverluste)

Mechanik, Betrieb, Nachweise

OLTC-Typ und erwartete Schaltspielzahl → Wartungskonzept

Geräuschgrenzwert (ggf. Schallschutzhaus einplanen)

Transport: Masse, Profil, ggf. Aufteilung in zwei Kessel

Monitoring-Umfang (DGA, OLTC, Durchführungen)

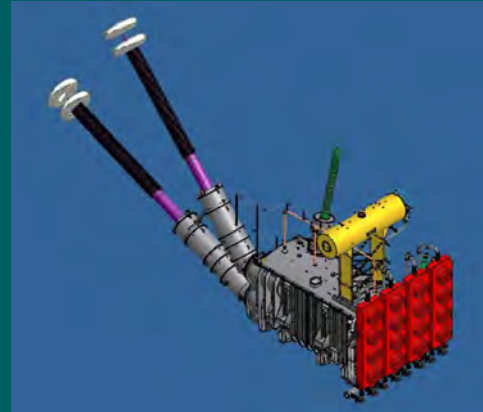
Regelwerke: IEC 62032 / IEEE C57.135; Ersatzteilpaket ab Bestellung

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

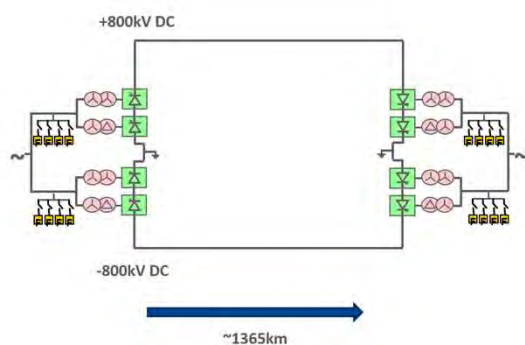
HGÜ-TRANSFORMATOREN

HGÜ Transformatoren
Das Bindeglied zwischen Drehstromnetz und Gleichstromübertragung



© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Der HVDC-Transformator im HGÜ-System



HGÜ: Wirtschaftliche Übertragung großer Leistung über weite Strecken, Seekabel, Kupplung asynchroner Netze

Aufgaben des Stromrichtertransformators:

- Netzspannung auf die benötigte Ventilspannung übersetzen
- Galvanische Trennung und DC-Isolation zur Ventilbrücke
- Kommutierungsreaktanz für den Stromrichter bereitstellen
- Spannungsregelung über OLTC (großer Stellbereich)

Er ist die teuersten und ausfallkritischsten Betriebsmittel der Konverterstation



© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Zwei Technologien - zwei Anforderungsprofile

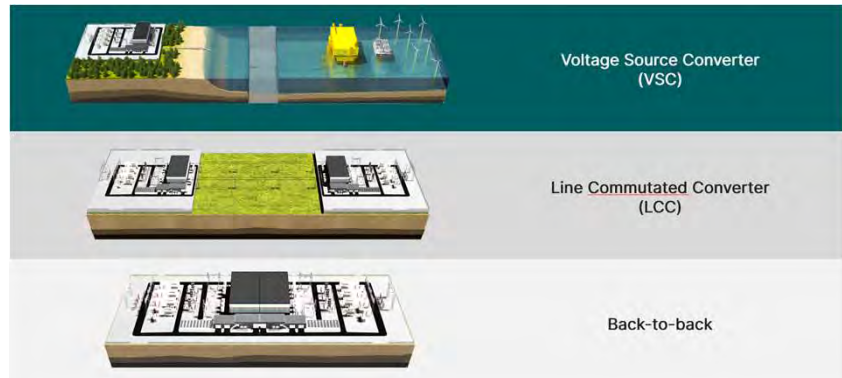


LCC (netzgeführt): Thyristoren, sehr große Leistungen, volle DC-Beanspruchung des Trafos

VSC (selbstgeführt): IGBT, kompakt, Schwarzstart, Offshore

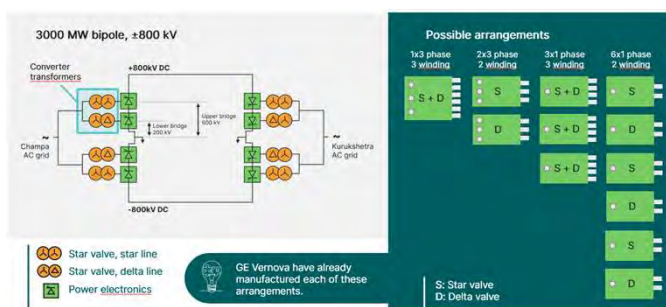
VSC: Transformator meist nahezu konventionell (kaum DC-Beanspruchung)

Der „klassische“ HVDC-Trafo im Folgenden: LCC



© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Konfigurationen: Bank-Aufbau nach Leistung und Transport



12-Puls-Gruppe braucht Stern- UND Dreieck-Ventilwicklung (30° Versatz) → geringere Harmonische

Übliche Varianten: 1-ph/2 Wickl. (UHVDC 800 kV), 1-ph/3 Wickl. (500/600 kV), 3-ph bis ca. 400 MVA, 1-ph/4 Wickl. für Back-to-Back

Auswahl bestimmt durch: Projektgröße, Transportgrenzen (Masse/Profil!), Zuverlässigkeit & Ersatzeinheiten-Strategie

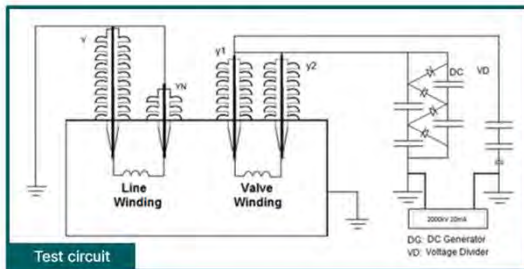
- Einphasige Einheiten: eine Reserveeinheit deckt alle Phasen ab

Faustregel: Je größer das Projekt, desto mehr wird die Konfiguration vom Transport diktiert – nicht von der Elektrotechnik.

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Wicklungsanordnung: Regel - Netz - Ventil



R = Regelwicklung, L = Netzwicklung (Line), V = Ventilwicklung (Valve)

R-L-V (Ventil außen): DC-Ausleitung einfach, AC-/Regel-Ausleitungen anspruchsvoller

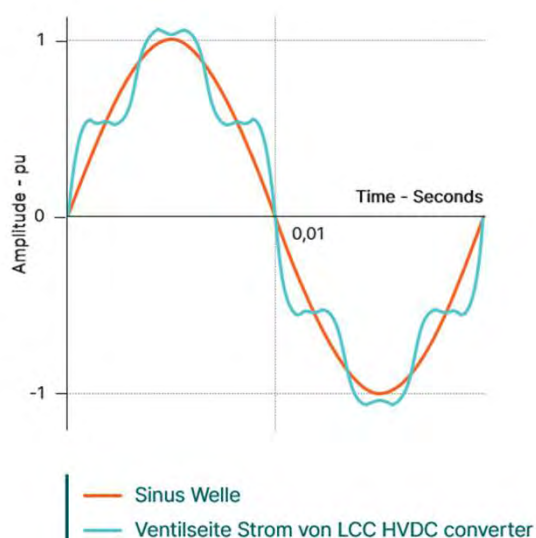
V-L-R (Ventil innen): AC- und Regel-Ausleitung einfach, DC-Ausleitung heikler

Ventilwicklung trägt AC + DC-Potenzial → aufwändige „Kokon“-Isolation, eigene Ventildurchführungen

- Regelwicklung nahe der Netzwicklung, nie zwischen Netz und Ventil

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Beanspruchung der Ventilwicklung: AC + DC + Transienten



Dauerbeanspruchung: DC-Anteil + verzerrte AC-Spannung mit periodischen Kommutierungssprüngen

Potenzial gegen Erde wächst mit der Brückenposition: $U \approx (n - 0,5) \cdot U_d + 0,7 \cdot U_{v0}$

Kurzzeitig: Blockieren/Deblockieren, Polaritätsumkehr, Erdfehler am Nachbarpol, Kommutierungsfehler

Isolationssystem muss AC- (kapazitiv) und DC-Verteilung (resistiv) gleichzeitig beherrschen

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

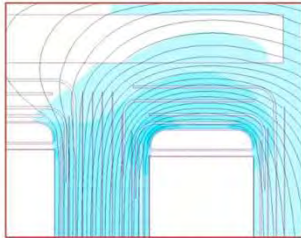
19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

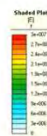
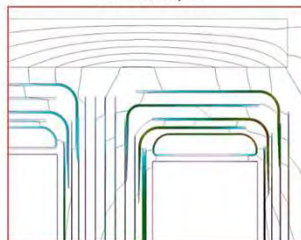
Isolation im DC-Feld: Öl vs. Zellulose



AC field plot



DC field plot



E-Feldverteilung – Weidmann

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

AC verteilt sich nach Permittivität (ϵ) → Hauptbeanspruchung im Öl

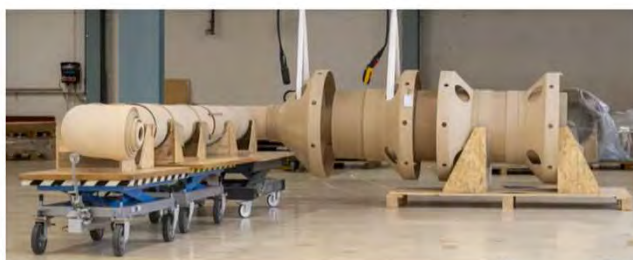
DC verteilt sich nach spezifischem Widerstand (ρ) → Hauptbeanspruchung in der Zellulose (Pressspan/Papier)

ρ ist stark temperatur-, feuchte- und zeitabhängig → Feldbild wandert im Betrieb

Polaritätsumkehr: Verteilung ist zunächst wieder kapazitiv → kurzzeitig hohe Beanspruchung des Öls

Deshalb: eigene Prüfphilosophie (DC-, Polarity-Reversal-Test) und sorgfältiges Barrierendesign

Ausleitungsisolation



Same structure as on BTA where the bushing is inserted

- Test voltages lower than on BTA

Different variations possible

- base insulation type
- number of phases



29 | WEIDMANN

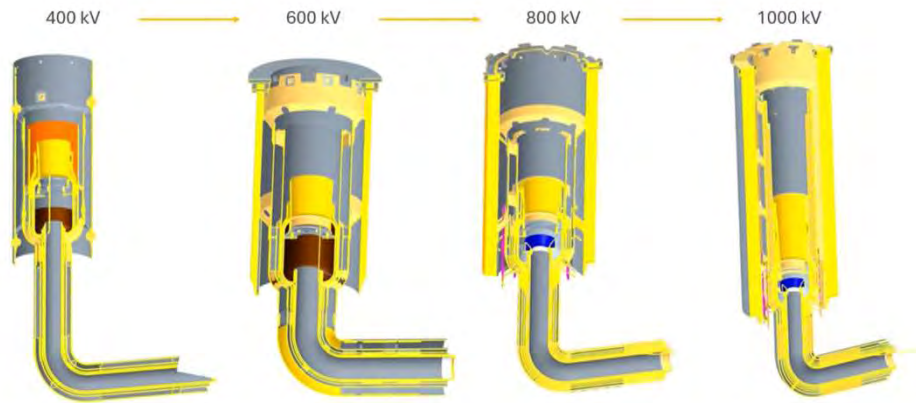
Ventilwicklung Ausleitungsisolation – Weidmann

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Ausleitungsisolation



WEIDMANN HVDC LEAD EXIT FAMILY



Ventilwicklung Ausleitungsisolation – Weidmann

31 WEIDMANN

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Der Stufenschalter: meistbeanspruchtes Bauteil des HVDC-Trafos



± 20 %

Stellbereich der Ventilspannung

20 - 30

Stufenstellungen, alle unter Last

7.000 - 14.000

Schaltungen pro Jahr

~ 4 Jahre

Wartungsintervall (RCM-basiert)

Netztrafo-Vergleich: dort oft nur einige hundert Schaltungen pro Jahr - hier das 20- bis 50-fache

Nicht-sinusförmige Ströme verändern di/dt am Lastumschalter → wiederkehrende Spannung an den Kontakten und Auslegung der Übergangswiderstände anpassen

OLTC-Gehäuse vom Haupttank getrennt - Wartung ohne Öffnen des Kessels, kein Schaltgas im Haupttank

Zustandsüberwachung (Drehmoment, Schaltspielzähler, Ölqualität des Diverters) fest einplanen

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Konstruktive Besonderheiten gegenüber dem Netztransformatoren



© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Ventildurchführungen (Öl/SF6 bzw. Öl/Luft) ragen direkt in die Ventilhalle

OLTC mit sehr großem Stellbereich ($\pm 20\%$, 20–30 Stufen) und 7.000–14.000 Schaltungen pro Jahr

Stromharmonische $6n \pm 1$ (bis zur 49.) → Zusatzverluste, Hot-Spots an Wicklungsenden, Schirmung des Streufelds

DC-Vormagnetisierung des Kerns → erhöhte Geräusche und Verluste

Masse/Abmessungen am Transportlimit (Bahnprofil, Schwertransport)

Thermische Nachweise und Prüfablauf



Thermik: Hot-Spots dort, wo Harmonische sich bündeln

Harmonische Streuflüsse konzentrieren sich an den Wicklungsenden; im 12-Puls-Trafo addieren sich die 6-Puls-Flüsse

DC-Isolations-„Kokon“ behindert die Ölströmung → zusätzliches Hot-Spot-Risiko

Äquivalenter Sinusstrom bildet lokale Verlustverteilung nicht exakt ab → Glasfasersonden an kritischen Stellen

Wärmelauf auf der Stufe mit höchstem Strom; Langzeit-Laststromlauf ≥ 12 h (oft 48 h) mit DGA-Verlauf

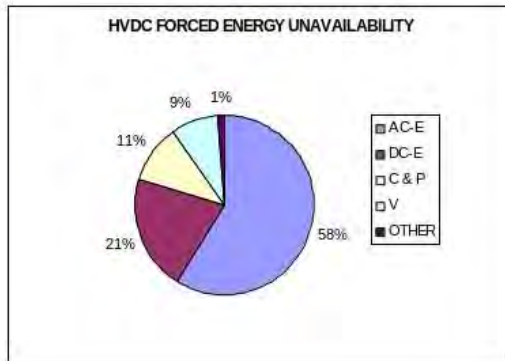
Typische Prüfsequenz (Ventilwicklung)

- 1 Wärmelauf (Temperature Rise)
- 2 Langzeit-Laststromprüfung
- 3 Blitzstoss (LI) · 4 Schaltstoss (SI)
- 5 AC-Fremdspannung mit TE-Messung
- 6 DC-Stehspannung · 7 Polaritätsumkehr mit TE
- 8 Induzierte Spannung mit TE-Messung
- Vor Punkt 8: 3–6 h bei 1,1 p.u. entmagnetisieren/entladen - DC-Raumladungen verfälschen sonst die TE-Messung

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.



Zuverlässigkeit: Was die CIGRE-Statistik zeigt



Erzwungene Energie-Nichtverfügbarkeit von HGÜ-Anlagen - CIGRE 2006 (AC-E: v. a. Stromrichtertrafos)

Stromrichtertransformatoren (AC-Equipment) sind der größte Einzelbeitrag zur erzwungenen Nichtverfügbarkeit

Erste 2-3 Betriebsjahre kritisch: anfangs monatliche Ölproben, Alarmpegel schrittweise anheben

Online-DGA von Anfang an; Alarm auf Anstiegsrate (stündlich/täglich/wöchentlich), nicht nur Absolutwert

Reserveeinheit je Trafotyp am Standort; Schaltanlage so planen, dass der Tausch in 2-3 Tagen möglich ist

Design Review nach CIGRE-Leitfaden vor Fertigungsbeginn; Glasfasersonden an erwarteten Hot-Spots

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Fragen & Diskussion



GE VERNOVA

Dr. Bruno Bošnjak · bruno.bosnjak@gevernova.com

Transformer Lifecycle Management
User Forum - 2026

© 2026 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Uli Huchtemeier

TSW Transformatoren Service West GmbH

Ausbildung bei Vogelsang Elektromotoren GmbH in Bochum absolviert

Anschließend bei Vogelsang Elektromotoren in der Transformatoren Abteilung

Danach bei diversen Firmen im Bereich Elektromotoren und Transformatoren in den Werkstätten, auf Montagen und Prüffeldern gearbeitet.

Seit 2014 im Technischen Außendienst tätig für diverse Firmen.

Im Unternehmen TSW Transformatoren Service West GmbH & Co. KG seit 2020



Christian Eymael

TSW Transformatoren Service West GmbH



Ausbildung bei Montanhydraulik GmbH in Gelsenkirchen absolviert

2018 – 2019 | Parker Hannifin

Werkstattarbeiten

Zusätzliche Verantwortung für Versandabwicklung und aller Zollformalitäten

2019 – 2025 | Vogelsang Elektromotoren

Werkstattarbeiten und zusätzlich gelegentliche Einsätze im Bereich Montage

Mitglied im Wirtschaftsausschuss

Seit Mitte 2025 | TSW Transformatorenservice West

Projektleiter im Bereich Transformatoren



vogelsang.com

Schadensbilder an Transformatoren

Erkennen – Bewerten - Handeln

Uli Huchtemeier & Christian Eymael

TSW Transformatorenservice West GmbH & Co. KG

TLM 2026

VOGELSANG



TSW

Transformatorenservice West GmbH & Co. KG
Service · Revision · Instandsetzung · Instandhaltung

- seit 2007 in der Vogelsang Group
- 45 Mitarbeiter
- Prüffelder zur Prüfung nach DIN VDE und IEC bis 110 kV Oberspannung (max. Prüfspannung 220 kV)
- Mobile Messtechnik zur Zustandsbewertung vor Ort

VOGELSANG

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Wer sind wir ?

Großtransformatoren & Leistungstransformatoren



VOGELSANG

Warum über Schadensbilder sprechen?

- Transformatoren gehören zu den wichtigsten elektrischen Betriebsmitteln
- Viele Anlagen sind seit Jahrzehnten im Betrieb
- Alterung, thermische Belastung, elektrische Beanspruchungen und äußere Einflüsse hinterlassen Spuren

Doch wann wird aus einer Auffälligkeit ein Schaden?



Anzapfmittenumsteller

Ein Schadensbild aus der Praxis



Vogelsang Group

Befund:

- deutliche thermische Auffälligkeit
- Starke Ablagerung / Ölkohle
- Schadstelle im Bereich des Umstellers

Was könnte die Ursache sein?

Vogelsang Powerpoint Template | 24.08.2026 | Seite 5

Anzapfmittenumsteller

Ein Schadensbild aus der Praxis



Vogelsang Group

mögliche Ursache:

- fehlende Revisions-/Schaltfahrten
- thermische Schädigung
- lokale Erwärmung
- Kontaktprobleme

Kontaktproblem → Erwärmung → Schädigung

Vogelsang Powerpoint Template | 24.08.2026 | Seite 6

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Anzapfmittenumsteller

Wie lassen sich solche Fehler frühzeitig erkennen?

Regelmäßige Wartung:

- Sichtkontrolle
- Revisionsfahrten
- Funktionsprüfung

Elektrische Messung:

- Wicklungswiderstände
- Übersetzungsverhältnis
- Phasen- & Stufenvergleich

DGA / Ölanalysen:

- Fehlergase
- Trend beobachten
- Veränderungen früh erkennen

Betriebsbeobachtung:

- Erwärmung
- Schaltauffälligkeiten
- Veränderungen Dokumentieren

Korrosiver Schwefel

Wenn das Isolieröl zum Risiko wird

Schadensbilder aus der Praxis



Korrosiver Schwefel

Korrosive Schwefelverbindungen im Öl →

Reaktion mit Kupfer (Cu_2S) →

Bildung von Kupfersulfid



↓
Ablagerungen in Papier-/Zelluloseisolation
↓
Isolationsversagen



Korrosiver Schwefel

Warum ist korrosiver Schwefel so gefährlich?

Von außen nicht erkennbar

Bildung leitfähiger Ablagerungen

Schleichender Schadensprozess

Gefahr eines Isolationsversagens

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Wicklungsschaden

Ein Schadensbild aus der Praxis



Befund:

- deutliche thermische Auffälligkeit
- Wicklung defekt

Was könnte hier passiert sein?



Vogelsang Group

Vogelsang Powerpoint Template | 24.08.2026 | Seite 11

Wicklungsschaden

Vom Schaden zum Produktionsstillstand

Fehlende / unzureichende
Instandhaltung



Schleichende Veränderungen
bleiben unentdeckt



Elektrischer / thermischer
Wicklungsschaden



Transformator fällt aus



KEINE REDUNDANZ



Produktion steht während
der Reparatur / Neuwicklung



Vogelsang Group

Vogelsang Powerpoint Template | 24.08.2026 | Seite 12

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Wicklungsschaden

Wie lassen sich solche Fehler frühzeitig erkennen?

DGA / Ölanalysen:

- Fehlgase
- Trend beobachten
- Veränderungen früh erkennen

Elektrische Prüfung:

- Wicklungswiderstände
- Übersetzungsverhältnis

Regelmäßige Wartung:

- Sichtkontrolle
- Revisionsfahrten
- Funktionsprüfung

Betriebsbeobachtung:

- Temperaturentwicklung
- Schutzmeldungen
- Veränderungen Dokumentieren



Vogelsang Group

Vogelsang Powerpoint Template | 24.08.2026 | Seite 13

Schäden entstehen selten ohne Vorzeichen

Früh erkennen - Gezielt handeln - Ausfälle vermeiden

Wartung:

- Sichtprüfung
- Inspektion
- Revision

Diagnose:

- DGA
- Elektrische Prüfungen

Trends:

- Messwerte
- Veränderungen vergleichen
- Veränderungen Dokumentieren



Vogelsang Group

Vogelsang Powerpoint Template | 24.08.2026 | Seite 14

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Marc Weber

Siemens energy

Head of Transformer Diagnostic Services
Siemens Energy Global GmbH & Co. KG · Nürnberg

Erfahrener Transformatoren-Diagnose-Experte mit langjähriger Führungsverantwortung in Service, Fieldservice, Engineering und Diagnostik. Schwerpunkt auf Bewertung, Prüfung und Weiterentwicklung von Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren.

Seit 10/2025

Leitung der Expert Group Transformer Diagnostic Services im Transformatorenwerk Nürnberg.

Ausbildung:

Bachelor of Engineering
Energie- und Automatisierungstechnik
Hochschule Karlsruhe
Lehre Energieanlagenelektroniker

Transformer Diagnostics

Aktives Mitglied in Cigré und IEC TC 14

Veröffentlichungen, Fachvorträge und Patente



Matthias Breithaupt

Badische Stahlwerke

Professional Experience

- Ab 2021 Betriebschef, Badische Stahlwerke
- 2010 - 2021 Stellvertretender Betriebschef, Badische Stahlwerke
- 2009 - 2010 Betriebsingenieur, Badische Stahlwerke
- 2005 - 2009 Leiter Kernfertigung Eisengießerei, Bosch Thermotechnik
- 2004 - 2005 Betriebsingenieur, Bosch Thermotechnik

Education

- 2006 - 2008 Studium Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Produktionsmanagement (berufsbegleitendes Fernstudium)
- 2000 - 2004 Studium Material- und Fertigungstechnologie (Schwerpunkt: Gießereitechnik)
- 1997 - 2000 Ausbildung zum Gießereimechaniker in Eisengießerei Dhonau





1



2

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

KURZ VORGESTELLT

Die Badischen Stahlwerke GmbH (BSW)



- **Sitz:** Kehl am Rhein
- **Geschäftsfeld:**
 - Produktion von Betonstahl als Halb- und Fertigerzeugnisse für die Bauindustrie in Deutschland und dem angrenzenden Ausland
- **Produkte:**
 - Betonstahl in Stäben, Ringen
 - Walzdraht
 - Bewehrungsprodukte für den Stahlbetonbau



- **Produktionsvolumen 2026:** 2,5 Mio. Tonnen
- **Tagesproduktion:** 8.270 t/ Tag
- **Mitarbeiter:** ca. 880 in Kehl
- **Elektrischer Energieverbrauch:** 1,2 TWh/ a



3

KURZ VORGESTELLT

Die Badischen Stahlwerke



- **Neue Holding seit 2025 in Almelo (NL)**
- **Reinforcing Steel Europe**
- **Mitarbeiter: > 2500**
- Stahlwerk in Kehl (2 x E-Ofen, 2 x Pflannenofen, 2 x Stranggießanlage)
- 2 Walzwerke in Kehl (Walzdraht- und Stabstahlwalzwerk)
- 1 Walzwerk in Trier
- 8 Drahtwerke in Deutschland
- 4 Drahtwerke in Niederlande, Belgien und Frankreich
- **Absatzvolumen: 3 mio. Tonnen Stahl pro Jahr**

4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



02 Der Wechselstromlichtbogenofen

5

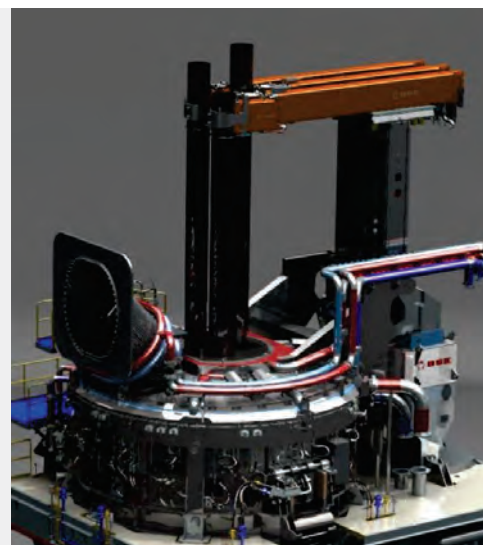
TECHNOLOGIE UND PROZESS

Der Wechselstromlichtbogenofen

SIEMENS
energy
E.ON

Einschmelzaggregat für Stahlschrott

- Tap : Tap: 37 Minuten/ Charge (ca. 109t)
- 90 MVA Ofentransformator (jetzt 100MVA)
- El. Energieverbrauch: 335 kWh/t_{gute Erzeugung}
- Elektrodenstrom: 59kA
- Wirkleistung: 75 MW
- Ca. 70% el. Energie + 30% chem. Energie



6

6

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

TECHNOLOGIE UND PROZESS

Recycling von Stahlschrott im E-Ofen



7

TECHNOLOGIE UND PROZESS

Der Einschmelzprozess von Schrott



- Einschmelzen von Schrott
- Übergang zur Flachbadphase
- Stromspitzen bei Schrotteinfall

8

8

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



9

TRAFOSCHADEN

Schadenshergang

Trafoausfall 1:

Extremes Unwetter über Kehl mit Starkregen und Wind

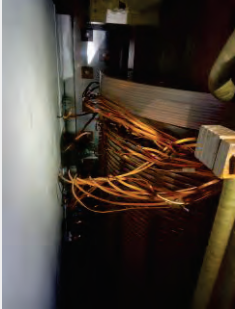
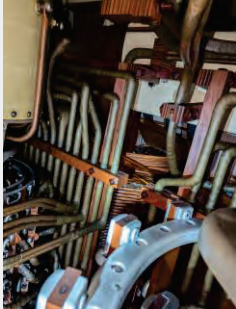
→ Wassereintritt an Fassade mit der Folge eines Trafoschadens

Baujahr 2010
Leistung 90 MVA
Schadensfall Juli 2024 an E-Ofen 1
Bauteilversagen innerhalb des Trafogehäuses



TRAFO 150820

Feststellungen:




1. Juli 2024

Maßnahme: Einbau 90 MVA(102125)

10

10

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

TRAFOSCHADEN

Schadenshergang

Trafoausfall 1:

Extremes Unwetter über Kehl mit Starkregen und Wind

→ Wassereintritt an Fassade mit der Folge eines Trafoschadens

Baujahr 2010
Leistung 90 MVA
Schadensfall Juli 2024 an E-Ofen 1
Bauteilversagen innerhalb des Trafogehäuses



TRAFO 150820

Feststellungen:



- Keine wirtschaftliche Reparatur möglich
- Festlegung für BSW:
 - Neubeschaffungsprozess gestartet
 - welches zukünftige Layout?
 - 90 MVA vs. 100 MVA?

1. Juli 2024

Maßnahme: Einbau 90 MVA(102125)

11

11

TRAFOSCHADEN

Schadenshergang

Trafoausfall 1:

Extremes Unwetter über Kehl mit Starkregen und Wind

→ Wassereintritt an Fassade mit der Folge eines Trafoschadens

Baujahr 2010
Leistung 90 MVA
Schadensfall Juli 2024 an E-Ofen 1
Bauteilversagen innerhalb des Trafogehäuses



TRAFO 150820

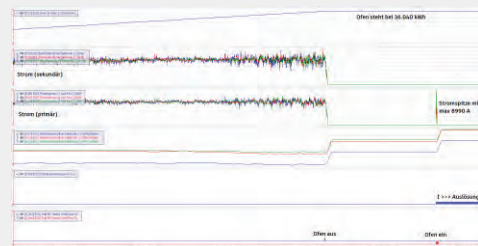
Trafoausfall 2:

Wicklungsschaden innerhalb vom Trafogehäuse

Baujahr 2004
Leistung 90 MVA
Schadensfall Juni 2025 an E-Ofen 2
Bauteilversagen innerhalb des Trafogehäuses



TRAFO 101891



Feststellungen:

- Ofen wird kurz vor Chargenende ausgeschaltet
- Bei Wiedereinschalten nach 1,12 Minuten Stromspitze auf Primärseite → I >>> → max. Strom Phase 1 bei 8890 A (primär)
- Kein Lichtbogen am Elektroofen gezündet
- Öl-Austritt am Trafo (Überdruckventil)

1. Juli 2024

20. Juni 2025

Maßnahme: Einbau 75 MVA TU Baujahr 1995

12

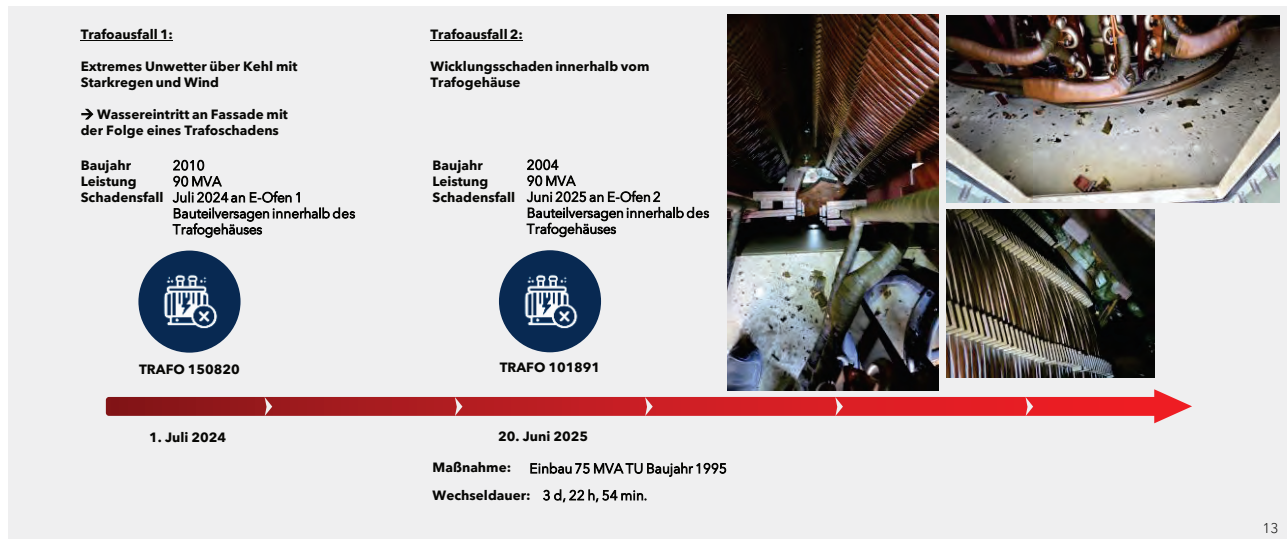
12

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

TRAFOSCHADEN



Schadenshergang

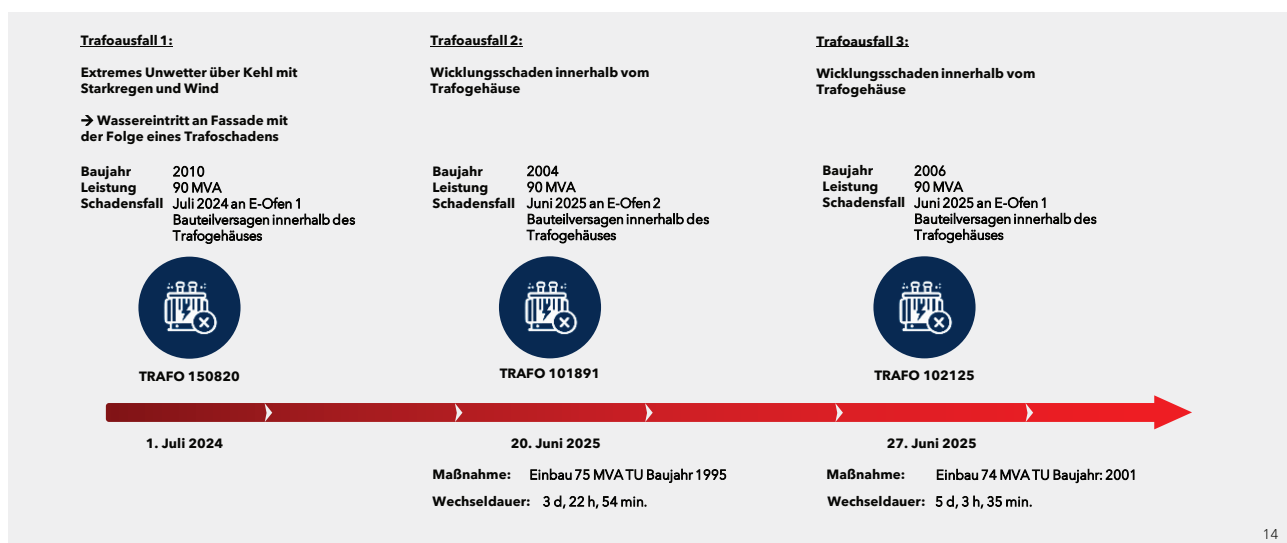


13

TRAFOSCHADEN



Schadenshergang



14

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

TRAFOSCHADEN

IST - Zustand



- **Produktionsverlust:** 1.200 t/ Tag (-15%)
- **Reservetrafo:** keiner

Maßnahmen:

- Umfassende Prüfung aller Optionen
- Detaillierte Prüfung des IST-Zustandes der Transformatoren
- Prüfung der Machbarkeit → 3 baugleiche Transformatoren → „aus 3 defekten werden 2 intakte“

15

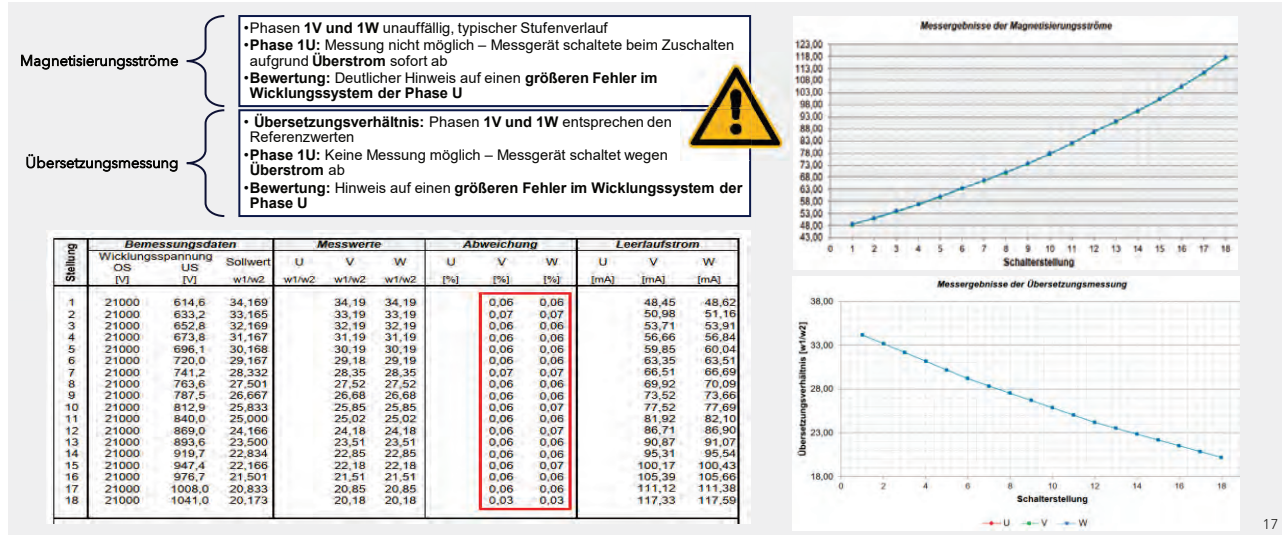
15



16

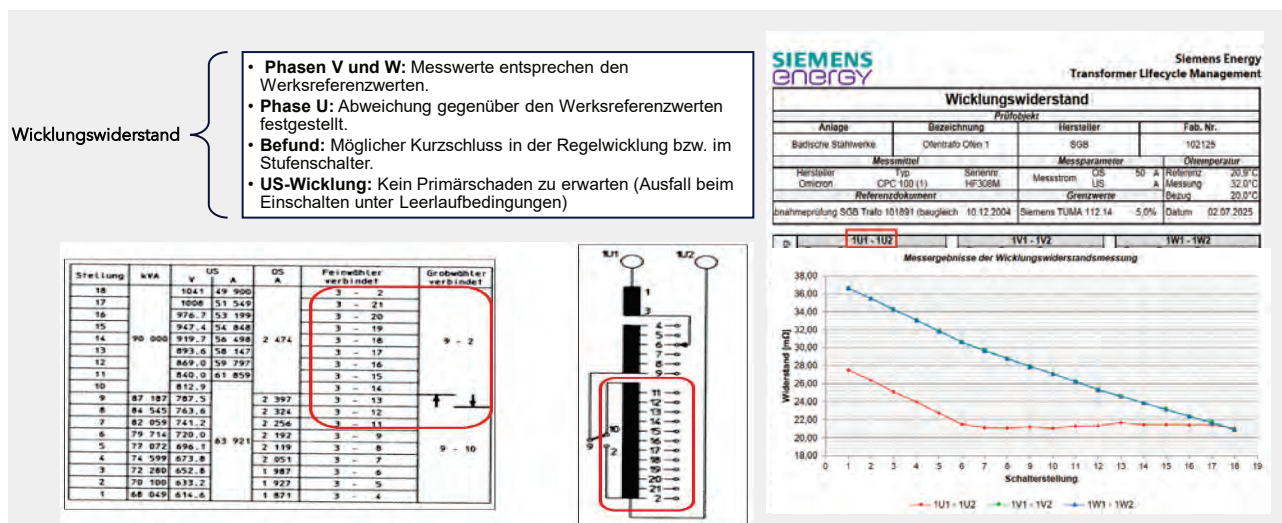
19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Diagnosemessungen Transformator 102125



17

Diagnosemessungen Transformator 102125

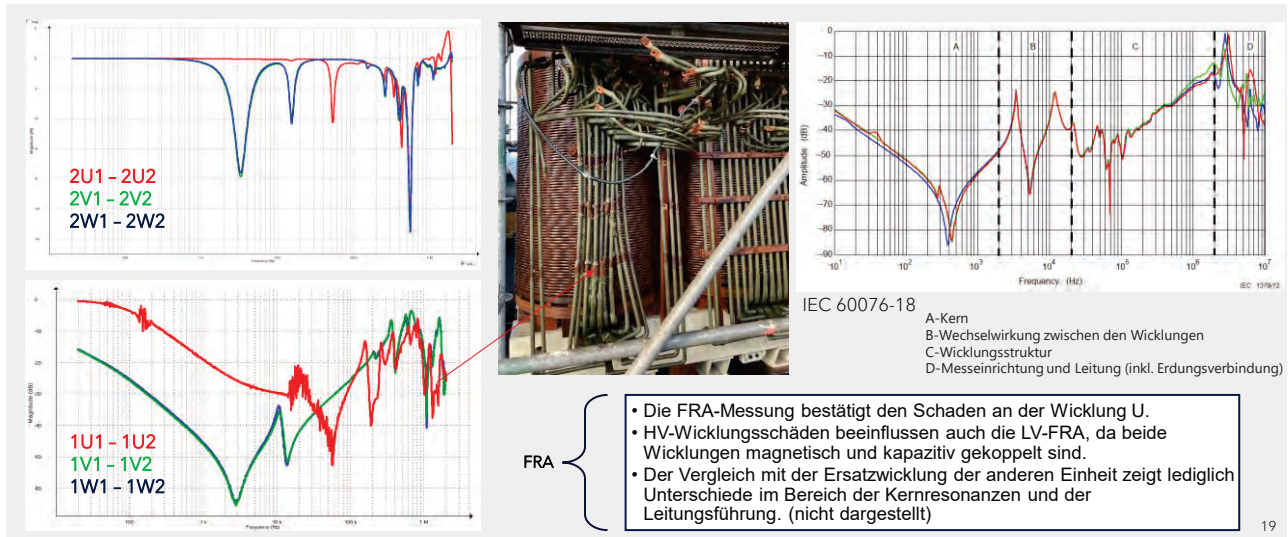


18

19. Transformer-Life-Management Konferenz

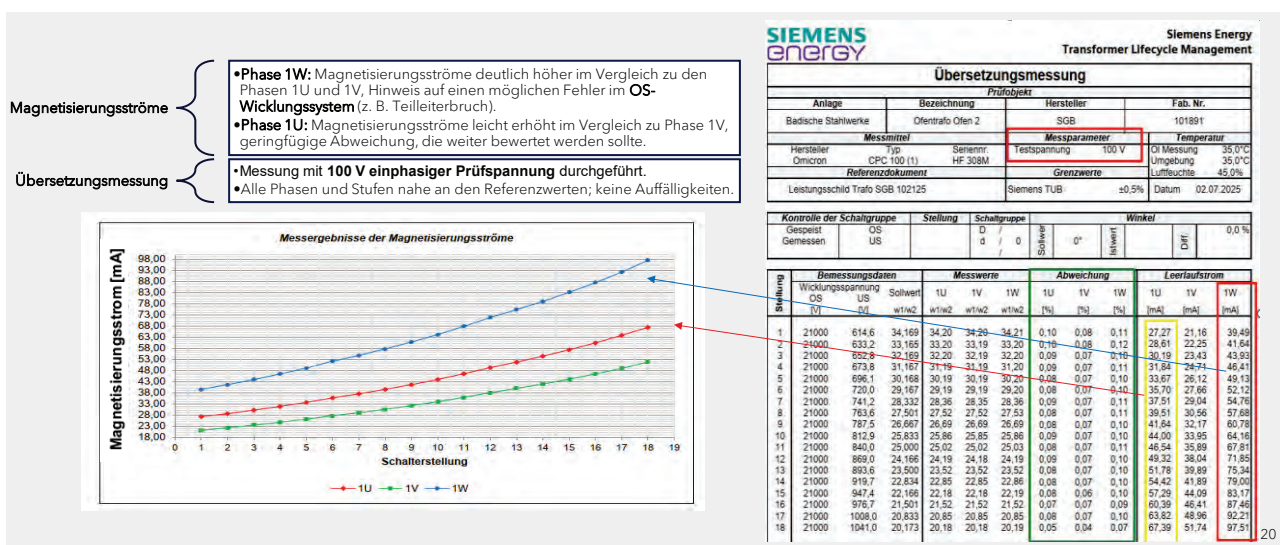
21.-22. September 2026, Frankenthal

Diagnosemessungen Transformator 102125



19

Diagnosemessungen Transformator 101891



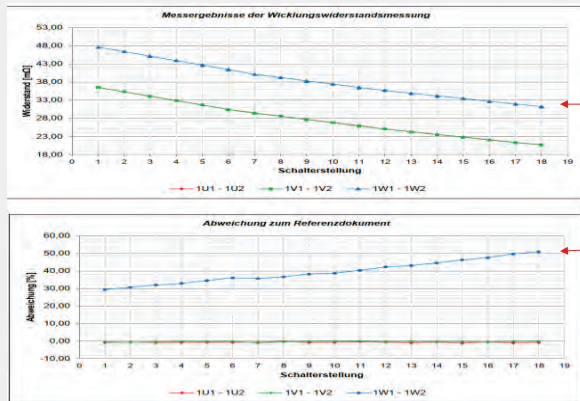
20

TRAFOREPARATUR

Diagnosemessungen Transformator 101891

Wicklungswiderstand

- **Phasen 1U und 1V:** Wicklungswiderstände innerhalb der Referenzwerte; keine Auffälligkeiten festgestellt.
- **Phase 1W:** Widerstandswerte in allen Stufen um ca. 11 mΩ erhöht, Hinweis auf einen möglichen Fehler in der Stammwicklung des OS-Systems oder in den Wicklungsausleitungen.



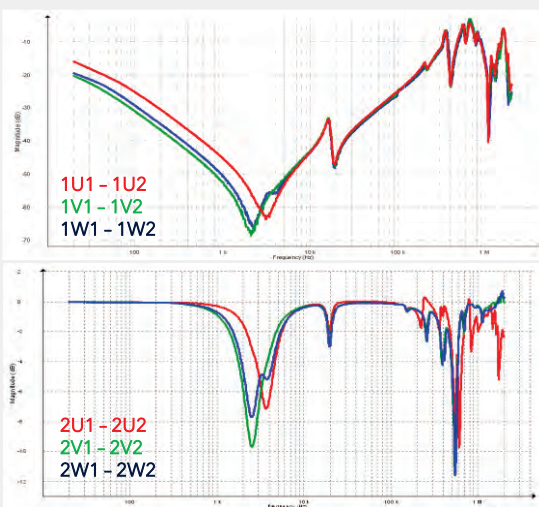
Siemens Energy				Siemens Energy Transformer Lifecycle Management				
Wicklungswiderstand								
Anlage		Bezeichnung		Hersteller		Fab. Nr.		
Badische Stahlwerke		Offenstromer 02n		SGB		101891		
Messmittel		Messstrom		Messparameter		Messwert		
Händler Omron		Typ IPC		Sensor HPC30		Referenz 50 A		
Händlercode		Grenzabweichung		Messung		Bekannt		
Abnahmeprüfung SGB 10.12.2004		Siemens TUM 112.14		-5.0%		Datum 02.07.2025		
TUT - 102								
R _{1U1-1U2}	R _{1V1-1V2}	R _{1W1-1W2}	ΔR	R _{1U1-1U2}	R _{1V1-1V2}	R _{1W1-1W2}	ΔR	
32.0°C	20.0°C	20.0°C	(mΩ)	32.0°C	20.0°C	20.0°C	(mΩ)	
1	36.53	34.89	35.22	-0.94	36.54	34.90	35.09	-0.55
2	35.32	33.74	33.98	-0.73	35.31	33.72	33.99	-0.79
3	34.10	32.57	32.87	-0.93	34.09	32.55	32.73	-0.54
4	32.91	31.43	31.89	-0.82	32.89	31.41	31.49	-0.26
5	31.67	30.25	30.48	-0.78	31.67	30.24	30.34	-0.32
6	30.43	29.08	29.28	-0.76	30.41	29.04	29.11	-0.25
7	29.47	28.15	28.35	-0.71	29.41	28.09	28.40	-1.07
8	28.69	27.31	27.37	-0.22	28.68	27.30	27.41	-0.47
9	27.72	26.47	26.71	-0.88	27.65	26.41	26.48	-0.27
10	26.83	25.63	25.83	-0.79	26.79	25.59	25.62	-0.13
11	25.90	24.84	24.95	-0.45	25.88	24.71	24.75	-0.16
12	25.03	23.91	24.07	-0.68	25.02	23.89	23.99	-0.40
13	24.31	23.22	23.48	-1.08	24.25	23.16	23.23	-0.31
14	23.54	22.48	22.83	-0.63	23.51	22.45	22.56	-0.48
15	22.83	21.81	22.07	-1.21	22.77	21.75	21.82	-0.32
16	22.07	21.08	21.21	-0.63	22.03	21.04	21.18	-0.68
17	21.33	20.38	20.59	-1.06	21.29	20.33	20.38	-0.23
18	20.69	19.78	19.93	-0.87	20.66	19.73	19.77	-0.19

21

21

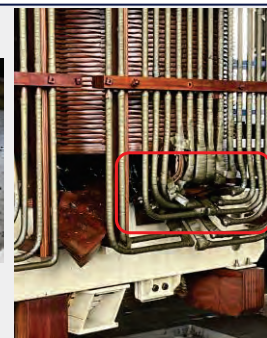
TRAFOREPARATUR

Diagnosemessungen Transformator 101891



FRA

- **Phase 1U:** Deutlich abweichender Frequenzgang im Vergleich zu den Referenzphasen.
- **Phase 1W:** Abweichungen im niederfrequenten Kernbereich erkennbar, Hinweis auf mögliche Veränderungen im Kern-/Wicklungsbereich.
- **US-Wicklung:** Phasenvergleich zeigt erkennbare Abweichungen, jedoch keine eindeutigen Anzeichen für einen Windungskurzschluss.

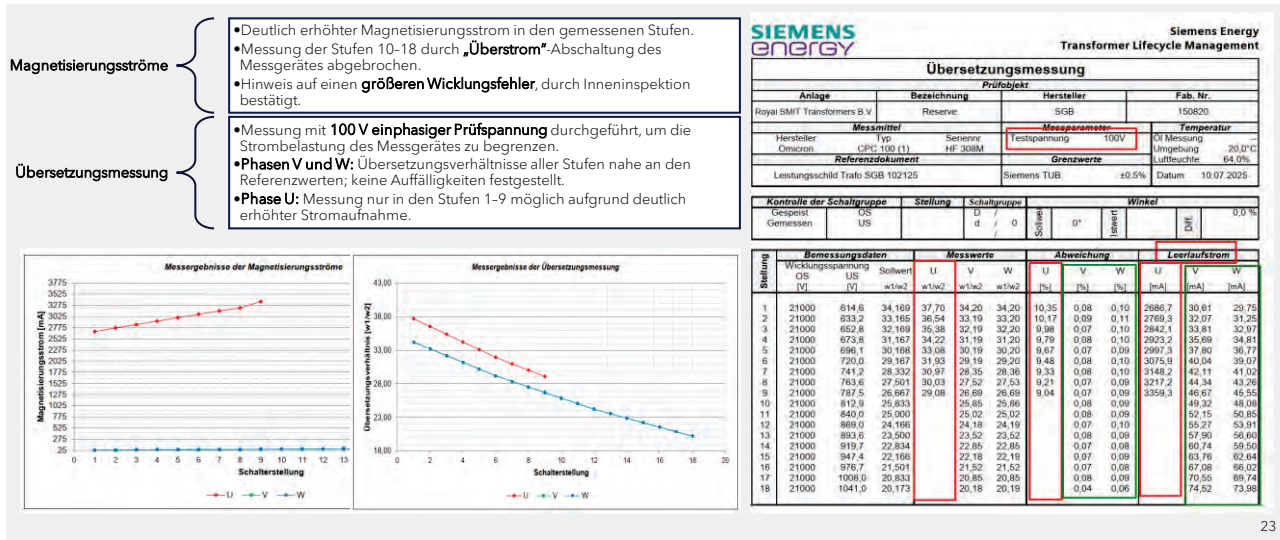


22

22

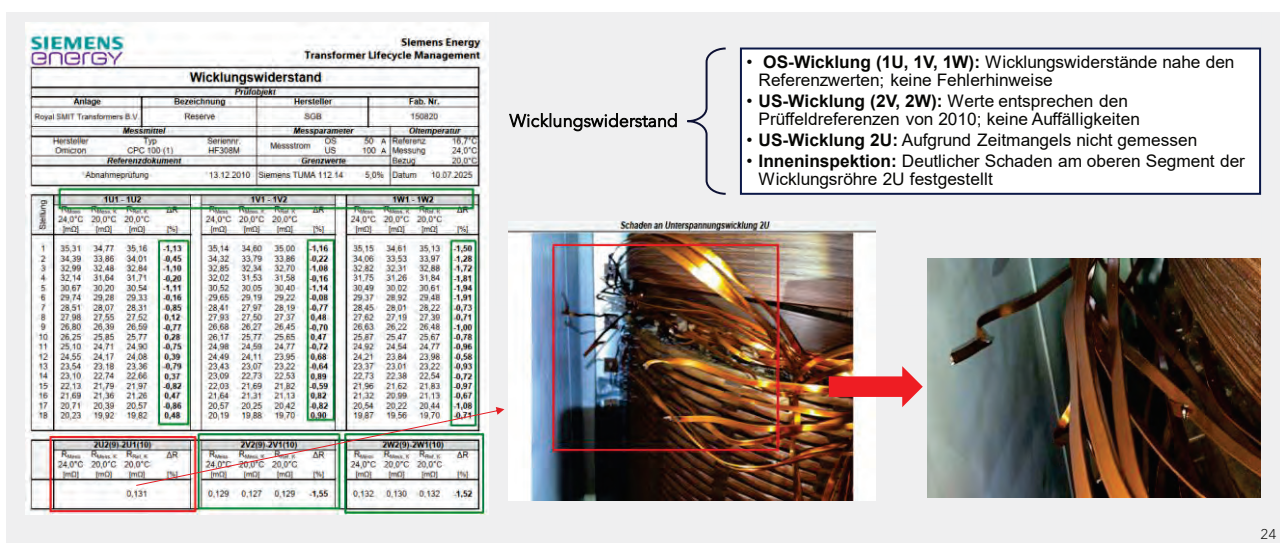
19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Diagnosemessungen Transformator 150820



23

Diagnosemessungen Transformator 150820

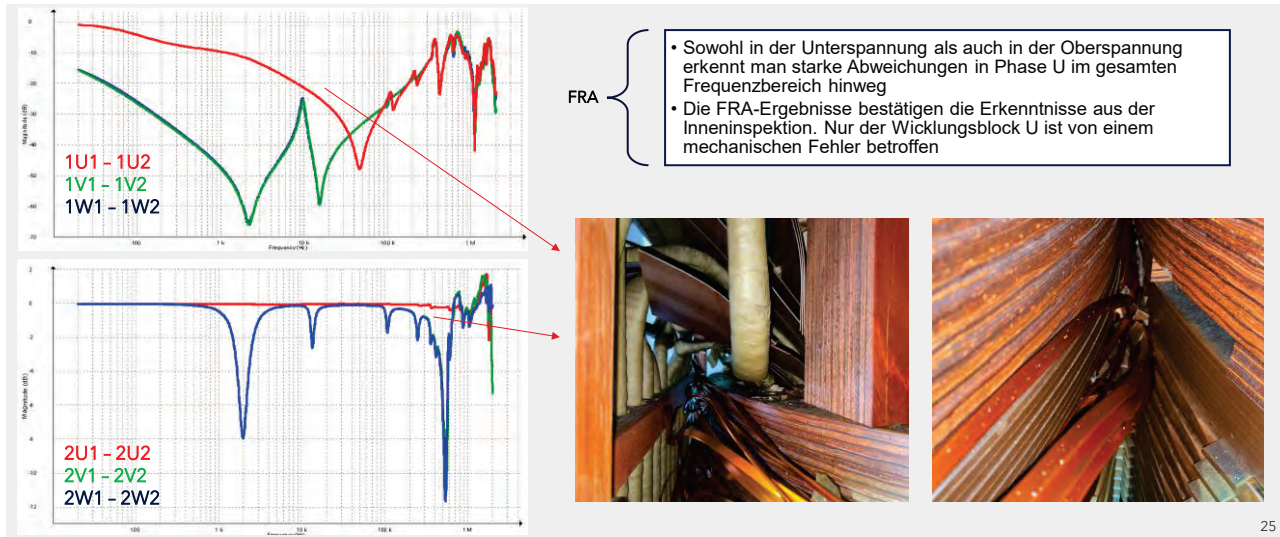


24

TRAFOREPARATUR



Diagnosemessungen Transformator 150820

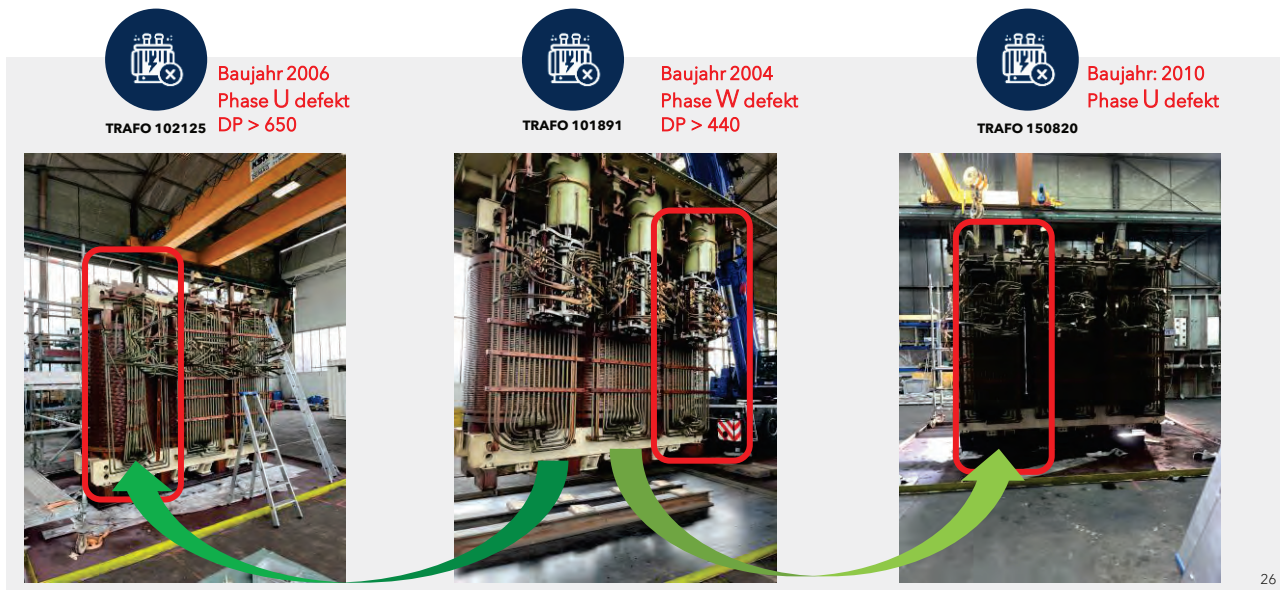


25

TRAFOREPARATUR



Reparaturkonzept



26

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

TRAFOREPARATUR

Vorbereitung & Aufbau der Infrastruktur

SIEMENS
energy
SEW



27

27

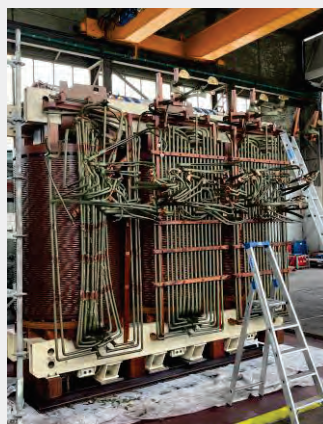
TRAFOREPARATUR

Demontage & Schadensanalyse

SIEMENS
energy
SEW



TRAFO 102125



28

28

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

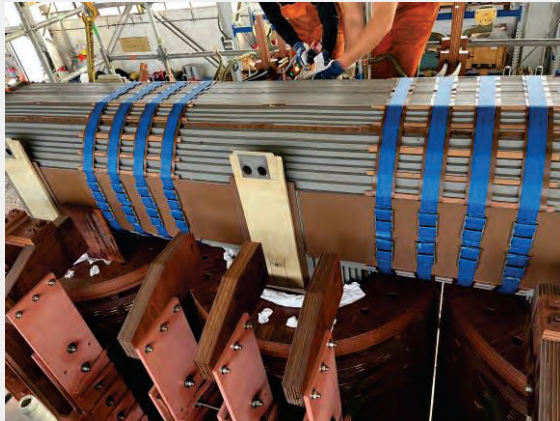


TRAFOREPARATUR

Ausschachteln des oberen Joch



TRAFO 102125



29

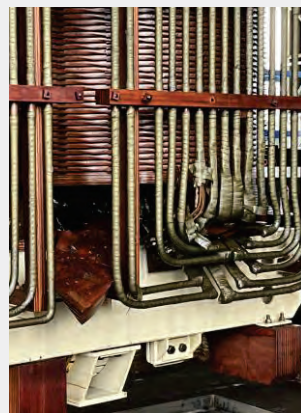
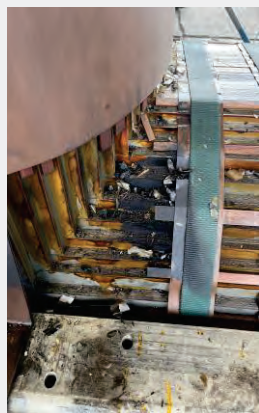
29

TRAFOREPARATUR

Demontage & Schadensanalyse



TRAFO 101891



30

30

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

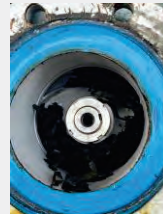
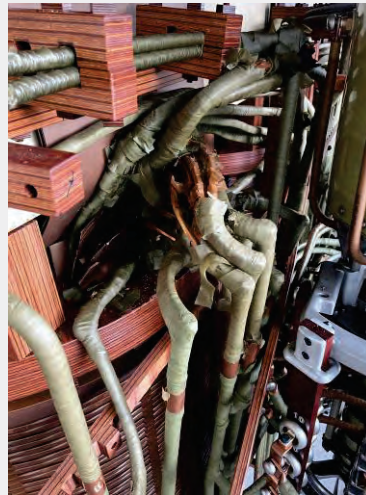
TRAFOREPARATUR

Demontage & Schadensanalyse

SIEMENS
energy
SEW



TRAFO 150820



31

31

TRAFOREPARATUR

Wicklungstausch

SIEMENS
energy
SEW



TRAFO 102125

Phase U auf Phase U



TRAFO 101891



32

32

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

TRAFOREPARATUR

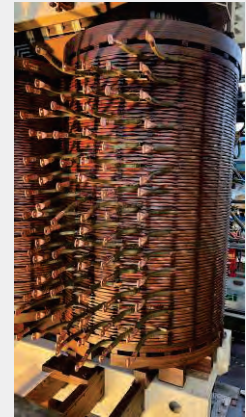
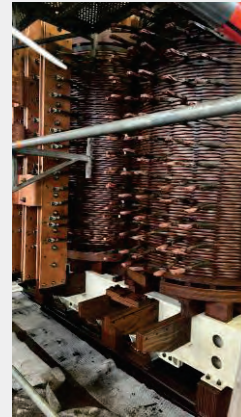
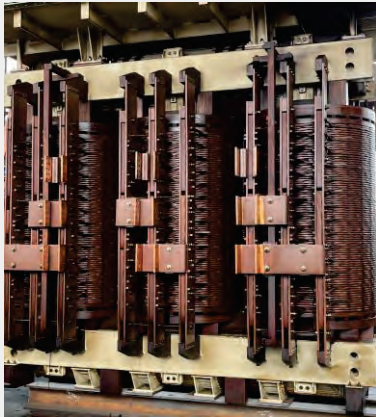
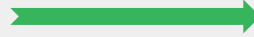
Wicklungstausch

SIEMENS
energy
SEW

Besonderheiten bei der Maßnahme aus 3 mach 2:
Phase V auf Phase U
Unterspannungsausleitung



Phase V auf Phase U



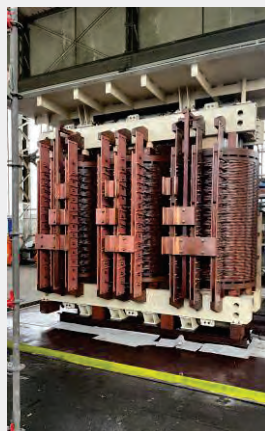
33

33

TRAFOREPARATUR

Aktivteilmontage und Einbau

SIEMENS
energy
SEW



34

34

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

TRAFOREPARATUR

Aktivteilmontage und Einbau

SIEMENS
energy
S&W



TRAFO 150820



35

35

TRAFOREPARATUR

Reparatur Ende

SIEMENS
energy
S&W



TRAFO 102125

Baujahr 2006
Phase U defekt
DP > 650



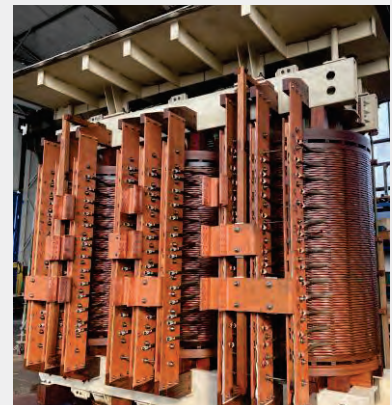
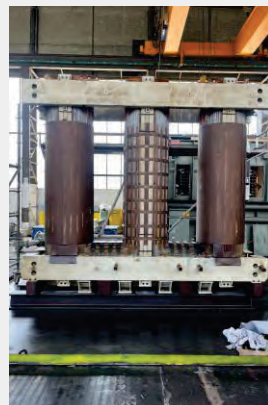
TRAFO 101891

Baujahr 2004
Phase W defekt
DP > 440



TRAFO 150820

Baujahr: 2010
Phase U defekt



36

36

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



TRAFOREPARATUR

Aufbereitung und Trocknung



TRAFO 102125



TRAFO 150820



37

37

TRAFOREPARATUR

Reparaturverlauf



TRAFO 102125

Erfolgreiche Hochspannungsprüfung mit mobilem Prüffeld: 15.10.2025



38

38

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



TRAFOREPARATUR

Reparaturverlauf



TRAFO 150820

Erfolgreiche Hochspannungsprüfung mit mobilem Prüffeld: 09.12.2025

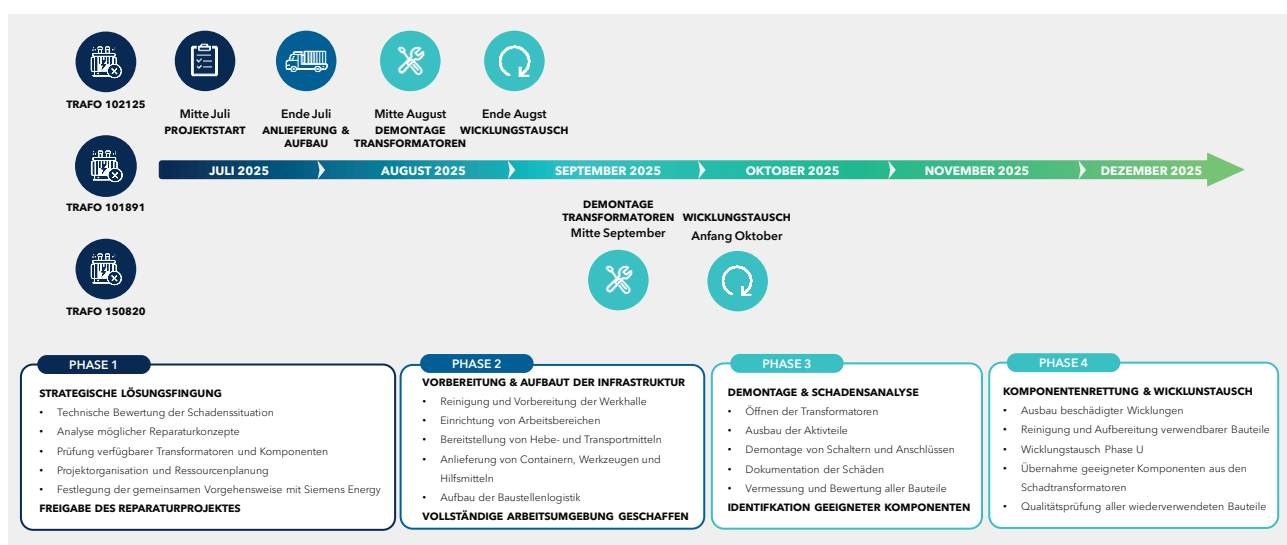


39

39

TRAFOREPARATUR

Projektverlauf



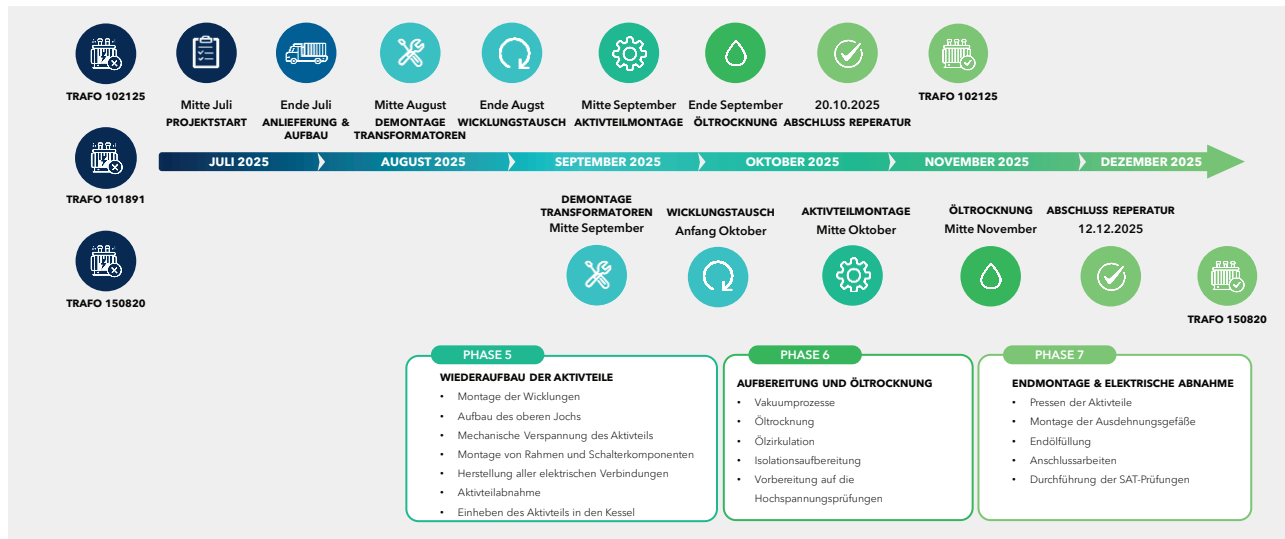
40

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



TRAFOREPARATUR

Projektverlauf



41

TRAFOREPARATUR

Zusammenfassung



Herausforderungen:

- Onsite Reparatur / Schaffung geeigneter Infrastruktur
- Beschaffung von Ressourcen und mobilem Equipment
- Keine Zeichnungen des Aktivteils verfügbar
- Reinigen der kontaminierten Transformatoren Kessel und Aktivteile
- In-Kessel-Trocknung
- Hochspannungsprüfung vor Ort

Erfolgsfaktoren:

- Kooperative und jederzeit transparente Kommunikation in allen Schritten
- Erfahrungsträger im Transformatoren-Service Nürnberg
- Volle Bereitschaft und Unterstützung durch BSW
- Teamspirit → Ein Ziel, zwei Teams = gemeinsamer Erfolg

Ergebnisse:

- Transformator 102125 wurde innerhalb von 15 Wochen repariert
- Transformator 150820 wurde innerhalb von 12 Wochen repariert
- Transformatoren waren bis Mai 2026 in 100% Lastbetrieb unauffällig im Einsatz
- Siemens Energy interner Service Award für besten Kundenservice erhalten



„Nur nicht überall das tödende Wort
„Es geht nicht“ aussprechen!“
Zitat: Werner von Siemens



42

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Oliver Derigs

Hitachi Energy Germany AG

Oliver Derigs hat sein Bachelorstudium in elektrischer Energietechnik und sein Masterstudium im Bereich der Wirtschaftswissenschaften an den Hochschulen in Hannover und Darmstadt absolviert.

Seit 2013 ist er Teil der heutigen Hitachi Energy (vormals ABB Power Grids). Hierbei hat er verschiedenste lokale und globale Positionen durchlaufen, die sich zum einen im Rahmen des Neubaus und zum anderen im Rahmen des Transformatoren Service befanden. Dabei lagen die Schwerpunkte in den Bereichen Engineering, Qualität und der operativen Steuerung von Leistungstransformatorenwerken und Service Standorten. Seit 2024 ist er verantwortlich für den Geschäftsbereich Transformatoren Service mit den Servicewerkstätten in Halle (Saale), Nauen und Neusäß. Seit 2026 ist er zusätzlich Operations Manager der deutschen Service Organisation, welche die bisherigen Produktservices zusammenführt.



Notizen:

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.



HITACHI

TLM 2026 - Congressforum Frankenthal

Leistungssteigerung von
Bestandstransformatoren -
Alternativen zum Neubau

Oliver Derigs
LSU Operations Manager



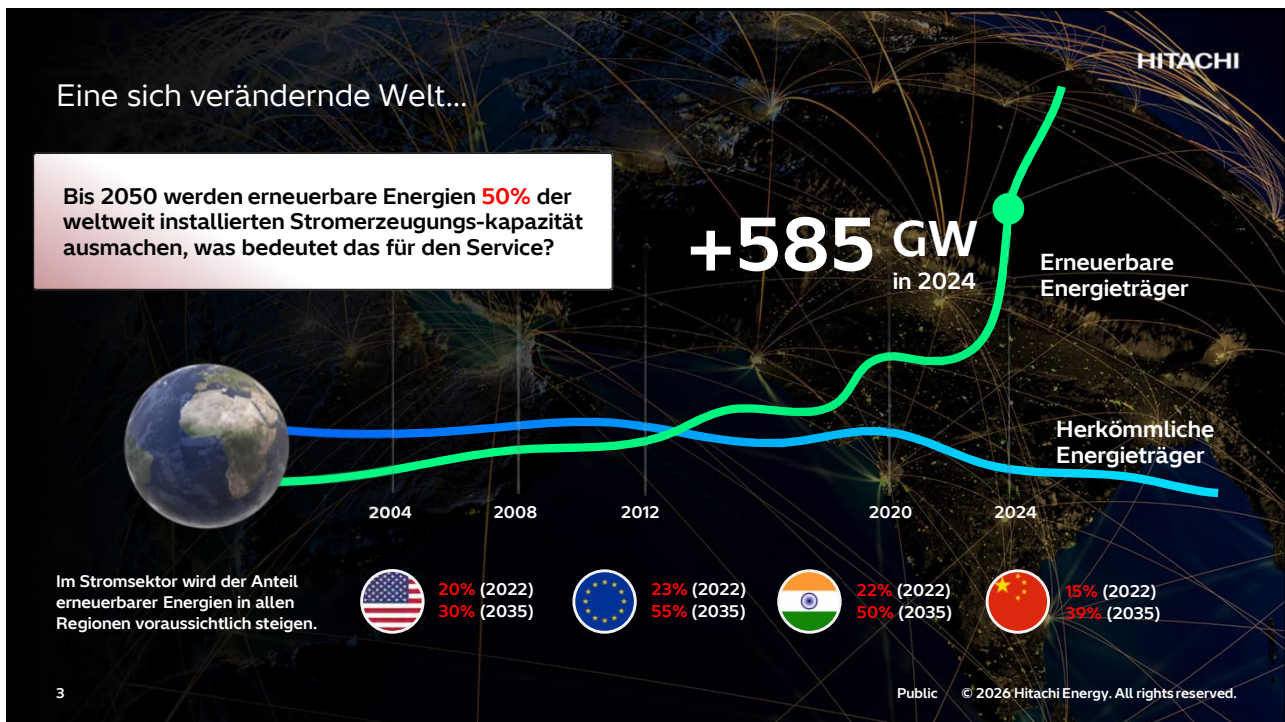
Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

1

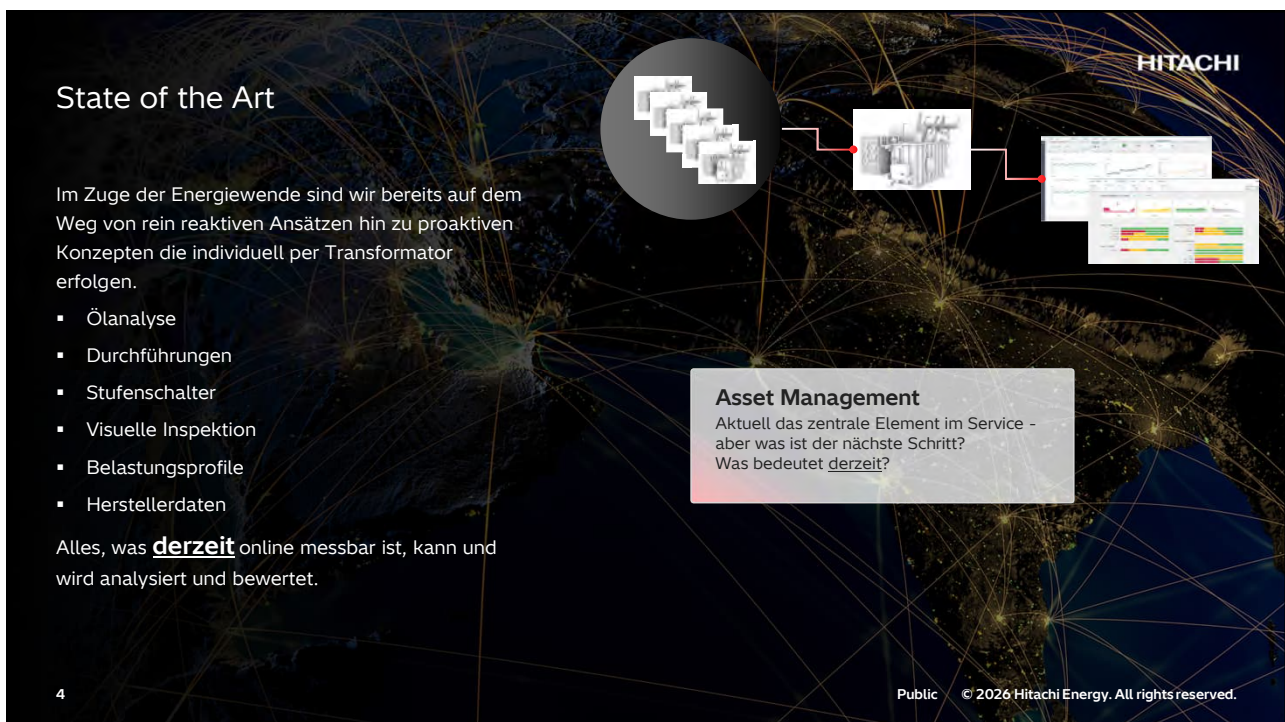


2

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



3



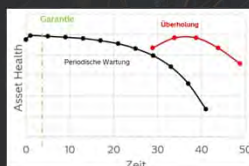
4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Was machen wir also aktuell?

Time-based maintenance

Basierend auf Herstellerdaten und internen Statistiken werden Wartungspläne erstellt, um in regelmäßigen Einsätzen bestimmte Komponenten/ Baugruppen zu überprüfen. Basierend auf der Lebensdauer des Transformators werden der Austausch oder eine Überholung rechtzeitig geplant.

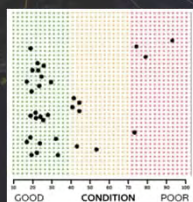


01

Condition-based maintenance

Wartungstätigkeiten werden anhand von gemessenen Daten angepasst und entsprechend durchgeführt.

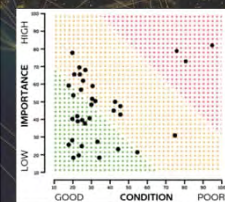
Die Wichtigkeit des Transformators und die Auswirkungen durch einen Fehler sind jedoch nicht mit bewertet.



02

Reliability-centered maintenance

Wartungstätigkeiten werden basierend auf den gemessenen Daten sowie der Risikoabschätzung durchgeführt.



03

5

Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

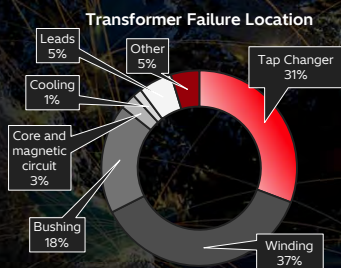
5

Was wissen wir also bereits?

20% der Fehler passieren bereits zu Beginn des Lebenszyklus (Design, Produktion, Aufrüstung)

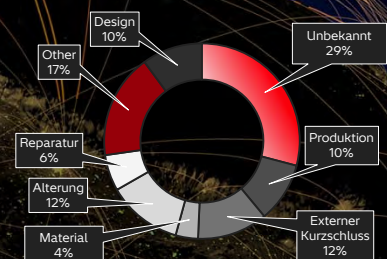
70% der Fehler passieren über die geplante Lebenszeit, sind aber oftmals auf besondere Ereignisse zurückzuführen. Hier greift **derzeit** das Condition Assessment

10% der Fehler passieren gegen Ende der Lebenszeit, stark beeinflusst durch Alterungseffekte → Hier greift dann ein Ersatz oder eine Überholung



Baujahr > 1980 / U > 100kV / 342 Fehlerfälle

Transformer Failure Cause



Spannungsebene 69 bis 700kV / 964 Fehlerfälle

6

Quelle: CIGRE WG A2.37 Transformer Reliability Survey 2015

Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

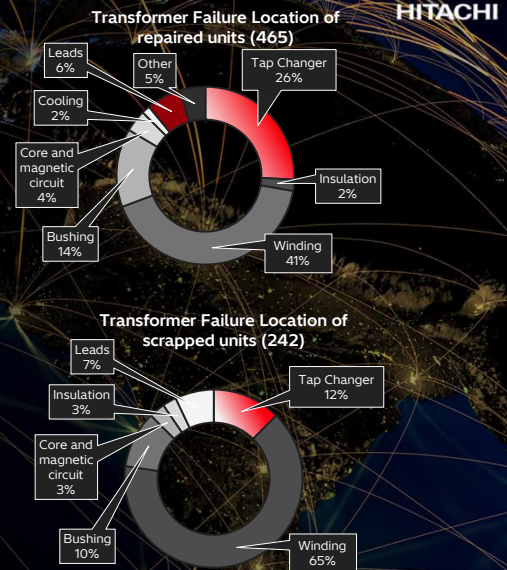
6

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Ersatzteilmanagement neu gedacht

Was machen wir mit den Wicklungen?

- Brauchen wir ein Konzept, um Wicklungen schnell austauschen zu können
- Ersatzteile = Wicklungen???
- Monitoring nach der Überholung
- **Leistungssteigerung**



7

Quelle: CIGRE WG A2.37 Transformer Reliability Survey 2015

Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

7

Beispiele aus der Praxis, aber was fehlt...?



Technische Daten

Leistung: 440 / 280 / 160 MVA
Spannung: 400 / 230 / 25.5 KV
Technologie: Core Type 2007
Anwendung: GSU
Land: Italien (2023)



Umfang

Wiederverwendung: Kessel, Durchführungen, Kern, Kühlung
Erneuert: Wicklungen, Stufenschalter, Öl
 --
 Erhöhung des PEI durch verbessertes Wicklungsdesign



Rahmenbedingungen

Vor-Ort Reparatur 11 Monate
 Ersatztransformator (1zu1) 24 Monate
 Neudesign >36 Monate

WAS FEHLT...?

- Ausweisen der Leistungssteigerung
- Messung vom Wicklungsdruck
- ...

8

PEI: Peak Efficiency Factor

Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

8

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

HITACHI

Beispiele aus der Praxis, aber was fehlt...?



Technische Daten
Leistung: 150 MVA (Auto)
Spannung: 220 / 132 / 10 KV
Technologie: Core Type 2004
Anwendung: MPT
Land: Spanien (2023)



Umfang
Wiederverwendung: Kessel, Durchführungen, Kern, Wicklungen, Kühlung
Erneuert: Stufenschalter, Ableitungen, Öl
 --
 Keine kommunizierte Leistungssteigerung



Rahmenbedingungen
 Reparatur 4 Monate
 Ersatztransformator (1zu1) 24 Monate

WAS FEHLT...?

- Monitoring der Wicklungen
- Alter der Papierisolation
- ...

9 PEI: Peak Efficiency Factor
Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

9

HITACHI

Beispiele aus der Praxis, aber was fehlt...?



Technische Daten
Leistung: (2+2) TRs x 106 MVA
Spannung: 245 / 12 kV
Technologie: Core Type 1982
Anwendung: GSU Hydro
Land: Spanien (2023-2027)



Umfang
 Austausch des gesamten Aktivteils inclusive eines Neudesign
 Vorfertigen der weiteren Aktivteile und anschl. ein rollierender Austausch der weiteren Einheiten
 Zusätzlicher Austausch der Durchführungen, Stufenschalter und der Kühlung



Rahmenbedingungen
 Reparatur 11 Monate
 Ersatztransformator (1zu1) 24 Monate

WAS FEHLT...?

- Erweitern der Kühlungskapazität
- Warmlauf
- ...

10 PEI: Peak Efficiency Factor
Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

10

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

HITACHI

Beispiele aus der Praxis, aber was fehlt...?



Technische Daten
Leistung: 48.5 MVA
Spannung: 118.7 / 10.5 kV
Technologie: Core Type 1989
Anwendung: SPT
Land: Deutschland (2023)



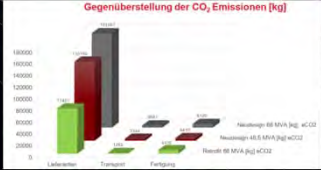
Umfang
 Neudesign der Wicklungen und der Kühlung, sowie die Überarbeitung vom Kessel.
Leistung: 68 MVA
Spannung: 20 / 20 kV



Rahmenbedingungen
 Reduktion der CO2 Emissionen

WAS FEHLT...?

Gegenüberstellung der CO₂ Emissionen [kg]



Modell	CO ₂ Emissionen [kg]
Neudesign 68 MVA (kg) wC122	~10000
Bestand 68 MVA (kg) wC122	~15000
Bestand 48 MVA (kg) wC122	~18000

11
PEI: Peak Efficiency Factor
Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

11

HITACHI

Was wäre wenn....? Was heißt derzeit...?

Wir kennen die möglichen Fehler und haben auch die Tools an der Hand, um Vorhersagen treffen zu können. Warum gehen wir jetzt nicht den nächsten Schritt und erweitern unseren Horizont.

Wenn Überholung, dann...

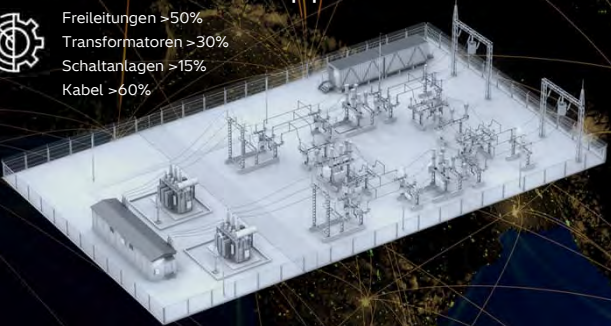
- Bewertung des Alters der Isolation
- Bewertung der Kühlung und Erweiterung der Kühlkapazität
- Erneuten Warmlauf, um neue Leistungsgrenzen festlegen zu können
- Erfassen von Wicklungstemperaturen und Presskräften

Was ist eigentlich mit Freileitungen, Schaltanlagen und Kabeln...?



Reserven im aktuellen Equipment

- Freileitungen >50%
- Transformatoren >30%
- Schaltanlagen >15%
- Kabel >60%



12
Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

12

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

HITACHI

Zusammenfassung

- Wir sind auf einem guten Weg und die notwendigen Produkte sind größtenteils vorhanden
- Intelligentes Vernetzen der Produkte zu Lösungskonzepten, die über die aktuellen Grenzen hinaus gehen



Level 1 (Komponenten)

- Durchführungen, Stufenschalter
- Sensoren
- Kühlerart und -leistung



Level 2 (Produkt)

- Wicklungen, Kern, Ableitungen
- Neubewertung der Leistungsgrenze



Level 3 (System)

- Transformator
- Schaltanlage
- Kabel, Freileitung

13
Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

13

HITACHI

Vielen Dank



Oliver Derigs
LSU Operations Manager
oliver.derigs@hitachienergy.com

Sales Contact:
de-transformer-service@hitachienergy.com

Follow us

[in](#) [X](#) [f](#) [@](#) [v](#)

www.hitachi.com

14
Public © 2026 Hitachi Energy. All rights reserved.

14

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Sebastian Roßmüller

EMB GmbH

Sebastian Roßmüller, B. Eng. Wirtschaftsingenieurwesen, ist Vertriebsleiter der EMB GmbH und verantwortet die nationale und internationale Vertriebs- und Marktentwicklung.

Seine berufliche Laufbahn führte ihn vom Produktmanagement über die Leitung einer Business Unit bis in die Geschäftsleitung und heutige Vertriebsverantwortung. Seine Schwerpunkte liegen im internationalen technischen B2B-Vertrieb, Business Development sowie in der markt- und kundenorientierten Weiterentwicklung von Produkten und Lösungen. Bei EMB beschäftigt er sich insbesondere mit internationalen Markt- und Kundenanforderungen sowie innovativen Lösungen für Transformatorenschutz und Zustandsüberwachung.



Martin Roye

EMB GmbH



Martin Roye ist Entwicklungsingenieur bei der Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH (EMB).

Nach seinem Bachelor- und Masterstudium im Maschinenbau an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ist er seit 2023 in der Forschung und Entwicklung von EMB tätig.

Parallel engagierte er sich über viele Jahre im Formula-Student-Team UMD Racing e.V., in dem er verschiedene technische und leitende Funktionen bis hin zum Vorstandsvorsitz übernahm.

Seine Arbeitsschwerpunkte bei EMB liegen in den Bereichen Konstruktion, Produktentwicklung und Sensorintegration.



Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH Germany



SMART GasSense Relay

Sept. 2026 | www.buchholzrelay.com

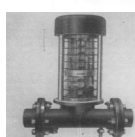
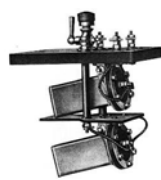
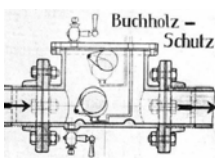
Historie








- 1863 Gründung als Zuckerfabrik
- 1921 Entwicklung d. Buchholzrelais durch Max Buchholz
- 1951 Produktion von Buchholzrelais
- 1963 Einführung Buchholzrelais für Traktionstransformatoren
- 1965 Produktion von Überwachungsrelais für Stufenschalter
- 1970 VEB Elektrotechnik und Gerätebau Magdeburg; EGEM
- 1993 Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH; EMB
- 2005 Einführung der neuen Buchholzrelais NM mit kapazitivem Sensor
- 2006 Übernahme der Buchholzrelaisproduktion von Siemens
- 2009 Inbetriebnahme der neuen Produktionsstätte in Barleben
- 2015 Start Kooperation mit Gatron GmbH
- 2021 Einführung HTS (Hermetic Transformer Switch)
- 2025 Einführung Buchholzrelais mit kapazitiver Gasmessung und digitalem Ausgang
- 2026 Einführung der neuen Buchholzrelais mit H2-Sensor (SmartGas Sense Relay), Sentinel 100 (Temperaturwächter), VTR (Vacuum Tap Changer Relais)

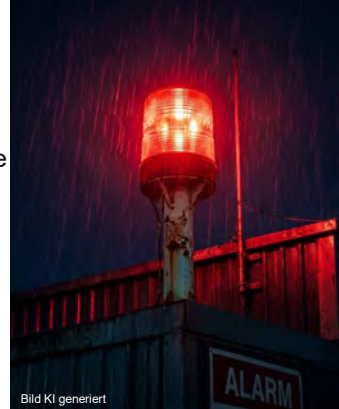
19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Fehlgasalarm



Wann passieren Alarmmeldungen aufgrund von Fehlgas im Transformator?

- In der Praxis häufig außerhalb regulärer Arbeitszeiten: Sonntags, feiertags oder nachts.
- Alarm des Buchholzrelais geht in der Leitwarte ein und eine sofortige Entscheidung muss getroffen werden.
- Kernfrage: Unverzügliche Anfahrt zur Anlage oder kontrolliertes Vorgehen am nächsten Arbeitstag?
- Die Antwort hängt von der Qualität und Geschwindigkeit der verfügbaren Diagnoseinformationen ab.

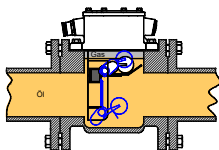


Grundfunktion des Buchholzrelais (2-Schwimmer)



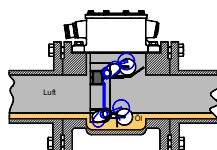
Alarm bei Fehlgas-ansammlung

- Der obere Schwimmer löst aus
- Ausgabe Warnsignal an Leitwarte bei Gasansammlung im Bereich 200-300cm³



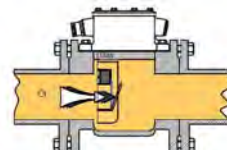
Abschaltung bei Isolierflüssigkeitsverlust

- Der untere Schwimmer löst aus
- Abschaltung des Transformators



Abschaltung bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit

- Die Stauklappe kippt bei einem definierten Wert
- Abschaltung des Transformators



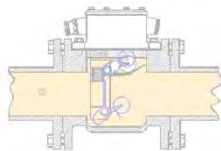
SMART GasSense Relay



Grundfunktion des Buchholzrelais (2-Schwimmer)

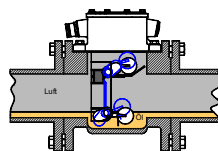
Alarm bei Fehlergasansammlung

- Der obere Schwimmer löst aus
- Ausgabe Warnsignal an Leitwarte bei Gasansammlung im Bereich 200-300cm³

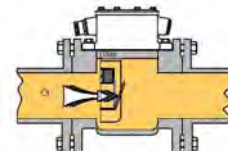


Abschaltung bei Isolierflüssigkeitsverlust

Abschaltung bereits erfolgt, Problem muss früher erkannt werden!



Abschaltung bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit



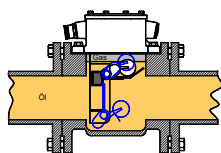
SMART GasSense Relay



Grundfunktion des Buchholzrelais (2-Schwimmer)

Alarm bei Fehlergasansammlung

- Der obere Schwimmer löst aus
- Ausgabe Warnsignal an Leitwarte bei Gasansammlung im Bereich 200-300cm³



Fehlergasalarm erfolgt.

Die Erkennung muss noch früher liegen und

- bei der Entstehung,
- vor der Entstehung greifen.



SMART GasSense Relay



Fehlgasdetektion bereits vor definiertem Alarmwert von 200-300cm³?

Detektion von Problemen bereits vor bzw. während Fehlgasentwicklung?



Bild KI generiert

SMART Buchholz Relay (mit NM-Sonde)



Kapazitive Gasvolumenmessung im Bereich von 50-300cm³.

24/7 Überwachung des Gasvolumens.

Analoge Rückmeldung 4-20mA und digitale Rückmeldung Modbus RTU.

Wichtiger Indikator für frühzeitige Erkennung der Bildung von Gas.

Noch keine Bestimmung ob Luft oder Fehlgas. DGA zur Bestimmung erforderlich.

IEC 60599:22 Abs. 7 – „...nach einem Alarm schnellstmöglich Gas entnehmen und analysieren bzgl. Fehlgas (H₂).“



IEC-Empfehlung zum direkten Handeln



Warum eine schnelle Fehlergas-Erkennung entscheidend ist

i IEC-Normen empfehlen nach einem Buchholzalarm eine möglichst schnelle Gasentnahme und -analyse – insbesondere zur Vermeidung diagnostischer Informationsverluste bei H₂.



1 | IEC-Empfehlung

- IEC 60599: Gas nach Buchholzalarm möglichst schnell sammeln und analysieren
- IEC 60567: Gasprobe mit minimaler Verzögerung entnehmen
- Analyse ohne unnötige Verzögerung, um Wasserstoffverluste zu minimieren



2 | Praktische Herausforderung

- Zwischen Alarm und Laboranalyse geht wertvolle Zeit verloren
- Die Gaszusammensetzung kann sich während der Verzögerung verändern
- Wasserstoff als wichtiger Indikator kann verloren gehen oder verfälscht werden
- Die Fehlerbewertung wird verzögert oder erschwert



3 | Unsere Lösung

- Buchholzrelais mit integriertem H₂-Sensor
- Direkter Hinweis auf relevantes Fehlergas am Relais
- Einschätzung jederzeit vor und nach dem Alarm
- Bessere Grundlage für zügige Instandhaltungsentscheidungen
- Überbrückt die Lücke zwischen Normempfehlung und Praxis



IEC empfiehlt Schnelligkeit – unsere Lösung liefert diagnostisch relevante H₂-Information direkt am Buchholzrelais.

Quellen: IEC 60599:2022 | IEC 60567:2023

SMART GasSense Relay



Messung des Gasvolumens im Bereich von 50-300cm³.

24/7 Monitoring des Gasvolumens.

Detektion von Wasserstoff

- im Öl (ab 50ppm)
- im Fehlergas (ab 0,1Vol.-%)

Regelmäßige Selbstkalibrierung.

DGA oder Ölprobe kann hinzugezogen werden, aber Daten liegen in Echtzeit vor.

Entscheidungsgrundlage für weiteres Handeln! Kritisch oder Zeit vorhanden.

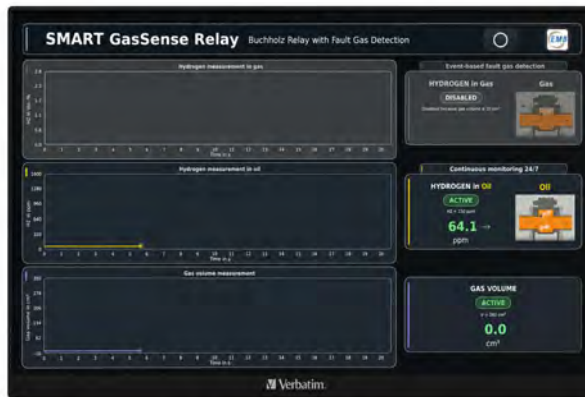


19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

SMART GasSense Relay



Wasserstoffanteil in der Ölphase als frühes Diagnose-Signal



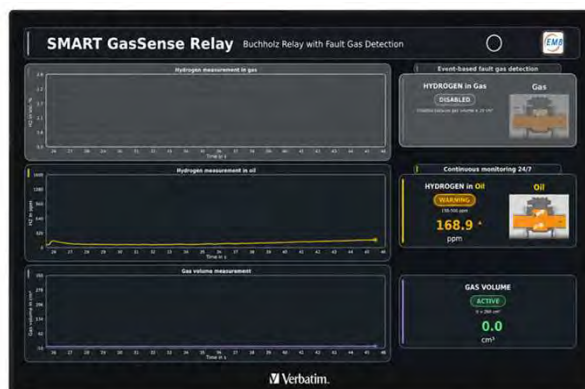
- Kontinuierliche Messung und Ausgabe des Wasserstoffanteils in ppm.
- Erkennung bereits während der Fehlergasentwicklung möglich.
- Trendinformation unterstützt eine frühere Einordnung der Anlagenentwicklung.
- Keine zusätzliche Öffnung am Transformator erforderlich.

Nutzen: aus einem reinen Gasvolumen-Alarm wird ein kontinuierlich bewertbares Diagnose-Signal.

SMART GasSense Relay



Kundenindividuelle Schwellenwerte machen Echtzeitdaten handlungsfähig



- Grenzwerte können vorab kundenseitig definiert werden.
- Reaktion von reiner Warnung als Alarm bis zur Abschaltung möglich.
- Schnellere Unterscheidung zwischen beobachtbarer Entwicklung und kritischer Situation.
- Unterstützung der Leitwarte bei Eskalations- und Instandhaltungsentscheidungen.

Vom Messwert zur Handlung: schneller, nachvollziehbarer und näher an der Anlage.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

SMART GasSense Relay



Echtzeitdaten aus der Gasphase.



- Ausgabe des Wasserstoffanteils im Fehlergas in Vol.-%.
- Detektion ab 0,1 Vol.-% H₂ in der Gasphase.
- Direkter Hinweis, ob ein Gasalarm diagnostisch relevant ist.
- Ergänzung der klassischen Buchholzfunktion um eine qualitative Fehlergasinformation.

Damit entsteht eine frühere Entscheidungsgrundlage – unmittelbar am Ort der Gasansammlung.

SMART GasSense Relay



Möglichkeit der Anzeige an einem externen lokalen Bildschirm



Geeignet sowohl für neue Transformatoren als auch als Retrofit für Bestandsanlagen.

Signalausgabe über Modbus RTU / RS-485

Das System ergänzt bestehende Schutzkonzepte, ohne die bewährte mechanische Schutzfunktion zu verändern.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Vorteile für Betrieb und Instandhaltung



Sicherheit

- Sofortige Rückmeldung
- 24/7-Monitoring
- Frühe Reaktion bei kritischen Entwicklungen

Entscheidung

- Kritisch oder Zeit vorhanden?
- Direkte H₂-Information am Relais / in der Leitwarte
- Bessere Eskalationsgrundlage

Integration

- Keine zusätzliche Öffnung am Transformator
- Modbus RTU / RS-485
- Einfaches Retrofit an Bestandsanlagen
- Hermetik-, Verteil- und Leistungstransformatoren

Technik

- Klassische Schutzfunktionen bleiben erhalten
- Sensor in patentiertem System (patent pending)
- CRA- und EMV-Konformität

Kerngedanke: Nicht nur Gas erkennen – sondern schneller verstehen, ob Fehlgas relevant ist.

Integriertes UHF-Teilentladungsmonitoring für Leistungstransformatoren

Vorstellung des Monitoringsystems



Leibniz
Universität
Hannover



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Motivation



Frühe Teilentladung (TE) Erkennung ist entscheidend zur Vermeidung von Transformatorausfällen

- IEC 60270 ist das Referenzverfahren, im Dauerbetrieb aber durch Störeinflüsse und Interferenzen begrenzt
- Teilentladungen strahlen im UHF-Bereich ab
- Eine UHF-Detektion erfasst die abgestrahlten Impulse

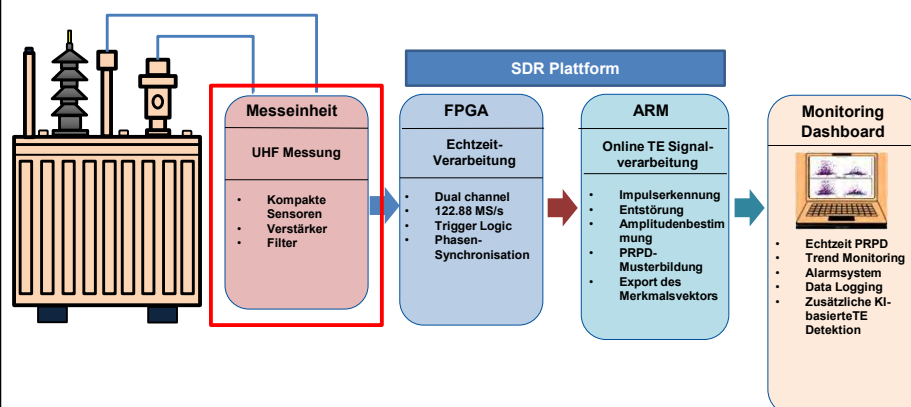


Unser Ziel: Integration eines kostengünstigen UHF-TE-Monitoring-Systems in die bestehende Hardware

Systemarchitektur



Das System besteht aus einer Messeinheit, einer Verarbeitungseinheit und dem Monitoring Dashboard



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Messeinheit



Die Messeinheit erfasst die abgestrahlten UHF-Impulse und bereitet diese auf.

Kompakte Leiterplattenantenne

100 MHz – 1 GHz · breitbandige Anpassung

Rauscharmer Verstärker

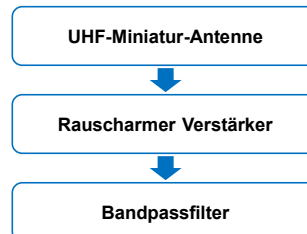
17,5 dB · dem Filter vorgeschaltet

Bandpassfilter

130 MHz – 1 GHz · begrenzt die Signalanteile vor der Digitalisierung

Einführtiefe und Messband wurden in vorangegangenen Arbeiten systematisch bestimmt.

Der Einbau der Antennen erfolgt über das Buchholz-Relay.



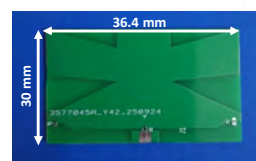
Messeinheit



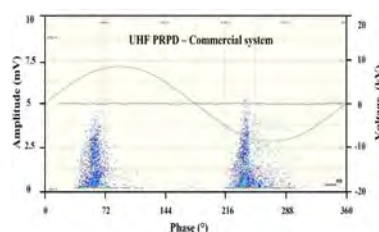
Die Miniaturantenne liefert vergleichbare TE-Muster wie eine konventionelle Stabantenne.



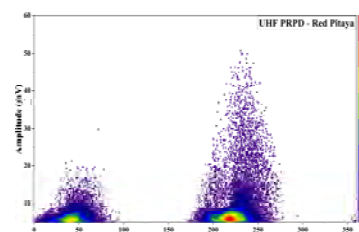
Konventionelle UHF-Stabantenne



Miniaturantenne, 36,4 mm × 30 mm



PRPD, konventionelle Stabantenne



PRPD, Miniaturantenne

Aufbau der Einheit

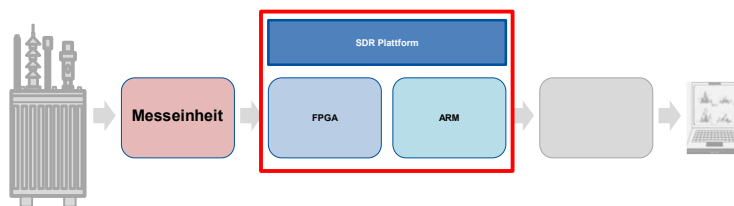


Bandpassfilter und SDR Plattform sitzen in einem gemeinsamen Gehäuse.

Die Anbindung der Messeinheit an den Transformator erfolgt über das vorhandene Buchholz-Relais. Die Filter und SDR-Plattform werden im Schaltschrank montiert.



Modul im Schaltschrank



Betriebsweise



**Die Erfassung erfolgt kontinuierlich und ereignisbasiert:
Die reduzierte Datenmenge ist Voraussetzung für den Dauerbetrieb.**

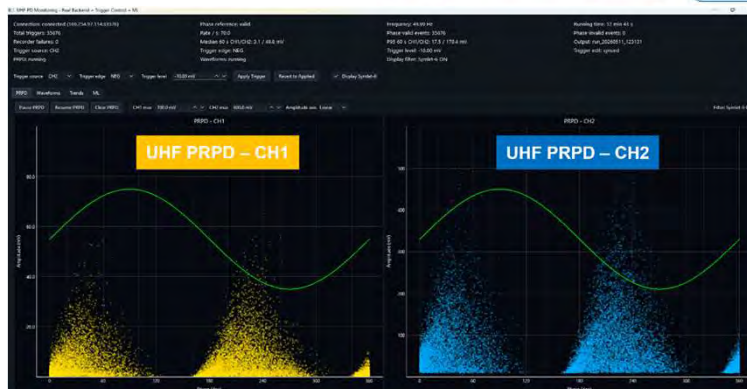
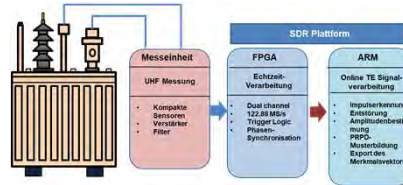
- Statt kontinuierlicher Breitbandaufzeichnung wird je Ereignis ein kurzes Signalfenster gespeichert
- Ausgelöst wird bei Überschreitung der Triggerschwelle; der Abstand zum Grundrauschen von etwa 1 mV begrenzt Fehlauslösungen
- Der FPGA übernimmt Triggerung, Zeitstempelung und Phasensynchronisation in Echtzeit
- Der ARM-Prozessor führt Impulserkennung, Entstörung, Amplitudenbestimmung und den Export des Merkmalsvektors aus



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Monitoring Dashboard

Das Monitoring Dashboard fasst die einzelnen Ereignisse zu Mustern, zeitlichen Verläufen und einer Bewertung zusammen



Monitoring Dashboard



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Einsatz beider Systeme in Transformatoren



Windkraft

- Netzanschluss- und Parktransformatoren mit starken Lastwechseln



Industrie

- Ofen-, Gleichrichter- und Werktransformatoren im Dauerbetrieb



Offshore

- Plattform- und Konvertertrafos, schwer zugänglich und teuer im Ausfall



Verteilnetz

- Orts- und Verteilnetztransformatoren in sehr großer Stückzahl



HGÜ / HVDC

- Konvertertransformatoren mit hoher Oberwellenbelastung



Bahnbereich

- Bahnstrom- und Unterwerktransformatoren mit pulsierender Last

Kerngedanke: Überall dort im Einsatz, wo ein Transformatorausfall teuer wird.

Bilder KI generiert



**Elektromotoren und
Gerätebau Barleben GmbH**

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**

www.buchholzrelay.com | www.emb-online.net

**19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal**

Referenten

Christian Hofmeister

Reinhausen GmbH

Ausbildung:

M.Eng. Informationstechnologie, OTH Regensburg

B.Eng Wirtschaftsingenieurwesen, Diploma FH

Staatl. gepr. Techniker der Elektrotechnik, Dr.
Robert Eckert Akademie

Position:

Projektmanager, Service Solutions

Aufgaben:

Fachliche Teamführung der Projektabteilung von Digitalisierungs- und Automatisierungslösungen für Leistungstransformatoren



Notizen:

[illegible]



100 Years
THE POWER
BEHIND POWER

Retrofitlösungen zur Digitalisierung von Leistungstransformatoren hin zum ganzheitlichen Flottenmanagement

© MR 21.08.2026 | Christian Hofmeister



Digitalisierung als Schlüsselfaktor



Herausforderungen

Alternde Transformatoren



Eine hohe Anzahl der weltweit installierten Transformatoren ist >30 Jahre alt und braucht Ersatz, Reparatur oder moderne Überwachung. *

Zunehmende Netzeinflüsse



Anstieg durch erneuerbare Energien, Rückspeisung ins Netz (Reverse Power Flow)

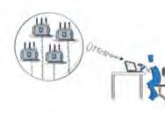
Ressourcennutzung



Zeitbasierte Wartung bietet nur begrenzten Mehrwert, da Transformatorausfälle über die Lebensdauer weitgehend zufällig auftreten.

Lösungen

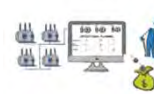
Betriebliche Zuverlässigkeit sichern und Risiken minimieren: durch kontinuierliche Überwachung und präzise Zustandskenntnis.



Datenerhebung und optimierte Betriebsmittelauslastung: Monitoring & Nachrüstung einer intelligenten Kühlanlagensteuerung

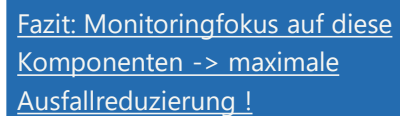


Betriebskosten optimieren: Zustandsbasierte Wartung erkennt Anomalien frühzeitig und löst Maßnahmen nur bei Bedarf aus.



* (TB 939 – Analysis of AC Transformer Reliability: CIGRÉ WG A2.62, 2024, S. 63ff)





(TB 939 – Analysis of AC Transformer Reliability: CIGRÉ WG A2.62, 2024, S. 51)

21.08.2026 | 3 

Retrofit Praxisbeispiel



Problembeschreibung

- + 45 MVA; 110/21 kV Trafo, Baujahr 2012
- + Erhöhte Auslastung durch Rückspeisung aufgrund von erneuerbaren Energien im Sommer einhergehend mit hoher Umgebungstemperatur
- ➔ Höhere Belastung der Komponenten
- ➔ Erhöhung der Ausfallrate

Ziel des Assetmanagements:

- + Reduzierter Lebensdauerverbrauch
- + höhere Auslastung
- + Kontinuierliches Monitoring

21.08.2026 | 5



Retrofit Praxisbeispiel



Mögliche Lösungsansätze:

1. Netzausbau: Installation weiterer Transformator zur Lastverteilung

Lieferzeit:	mind. 3-5 Jahr
Kosten:	1.350.000,- EUR
Betriebsausgaben:	CAPEX

2. Retrofitlösung: Installation von Lüftern am Tx (ONAN → ONAF)

Lieferzeit:	12 Wochen
Kosten:	80.000,- EUR
Betriebsausgaben:	OPEX

Fazit

- + Lüfternachrüstung nach Bahrwertmethode ist wirtschaftlicher als Neuanschaffung eines weiteren Transformators
- + Lieferung und Umsetzung in kürzerer Zeit möglich als Netzausbau
- + Installationsdauer 3-5 AT

21.08.2026 | 6



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Retrofit Praxisbeispiel



Retrofitlösung

- + All-in-one Monitoring- und Kühlanlagensteuerschrank
- + Nachrüstung von 10 frequenzgesteuerten Lüftern

Überwachungs- und Steuer-Funktionen

- + OLTC-Monitoring
- + Trafotemperaturmonitoring
- + Durchführungsmonitoring
- + Intelligente last- und temperaturabhängige Kühlanlagensteuerung



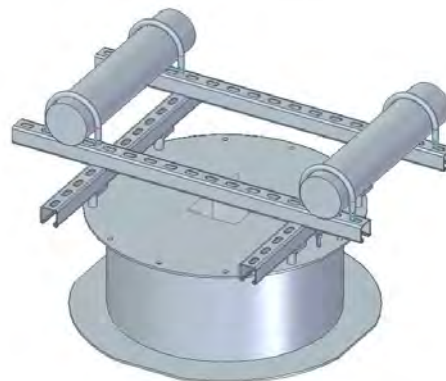
21.08.2026 | 7



Retrofit Praxisbeispiel

Lüfter Retrofit an vorhandene Radiatoren

- + Vor Ort Aufmaß
- + CAD-Model zur Entwicklung einer Montagelösung
- + Montage der Lüfter via flexiblen Montageschienensystem



21.08.2026 | 8



19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

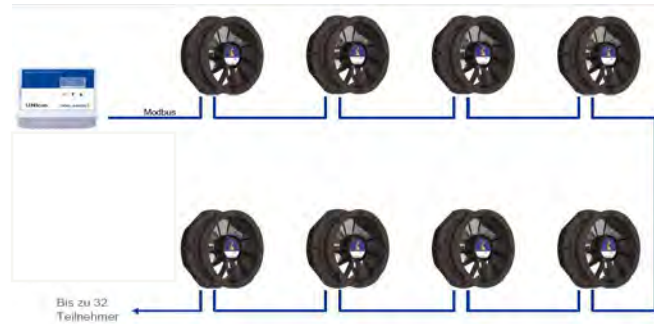


Retrofit Praxisbeispiel



Funktion der frequenzgesteuerten Lüftersteuerung

- + Stufenlose Regelung der Kühlanlage abhängig von Öltemperatur und Lastfaktor des Transformators.
- + Die Lüfterdrehzahl wird über eine frei parametrierbare Kennlinie in Abhängigkeit von Öltemperatur und Lastfaktor gesteuert.



21.08.2026 | 9

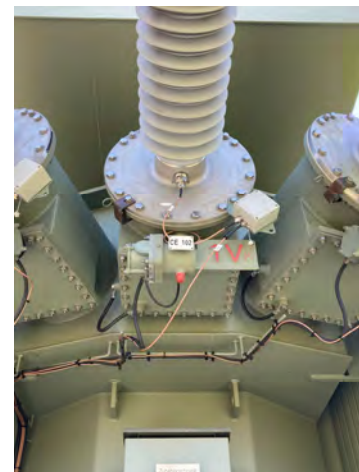


Retrofit Praxisbeispiel



Lieferumfang / Dienstleistungen:

- + Installation des ETOS® Schaltschrank via Standkonsole
- + Installation von 10 Lüfter
- + Anbindung der Meldungen der Trafoschutzgeräte
- + Installation des Durchführungsmonitorings
- + Anbindung des OLTC Motorantriebs an das Monitoring
- + Kabelführungssysteme
- + Dokumentationsänderungen



21.08.2026 | 10



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Retrofit Praxisbeispiel



Simulation des Betriebs vor und nach Retrofit nach IEC 60076-7-2018

Kennwert	Vorher (ONAN)	Nachher (ONAF)
Kühlungsart	ONAN	ONAF
Top-Oil bei 90 % Last & 30°C Umgebungstemperatur	75 °C	ca. 65–70 °C
Hot-Spot	99 °C	ca. 84–89 °C
Relative Alterung	100 %	17–32 %
Lebensdauerfaktor	1,0 ×	3–6 ×

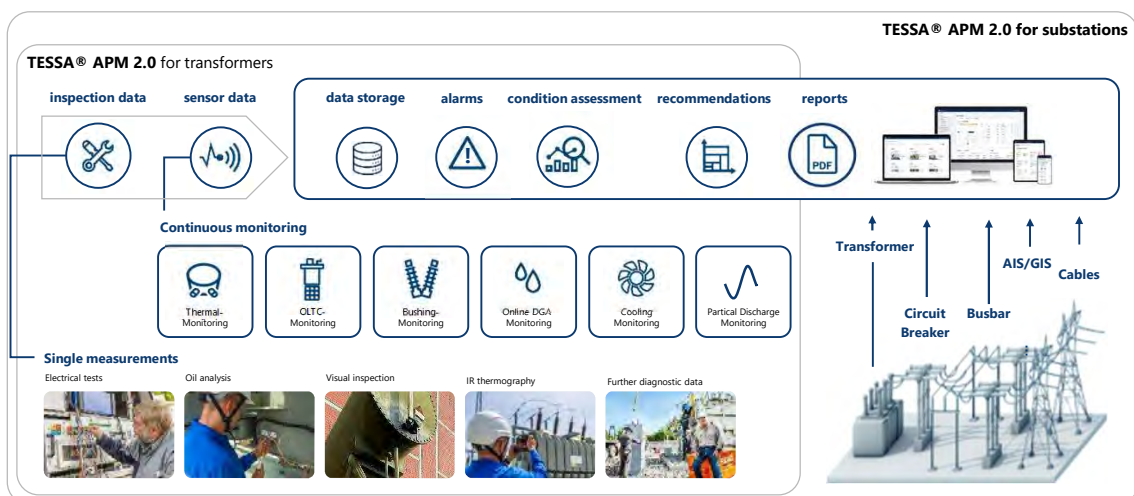
Resultat nach Retrofit

- + Die relative Alterung wurde um 68-83 % reduziert bei gleicher Spitzenauslastung
- + Ausfallwahrscheinlichkeit durch das kontinuierliche Monitoring reduziert
- + Die Betriebsausgaben reduziert, da die Neuinvestition zu einem späteren Zeitpunkt anfällt

21.08.2026 | 11



Asset Flottenmanagement



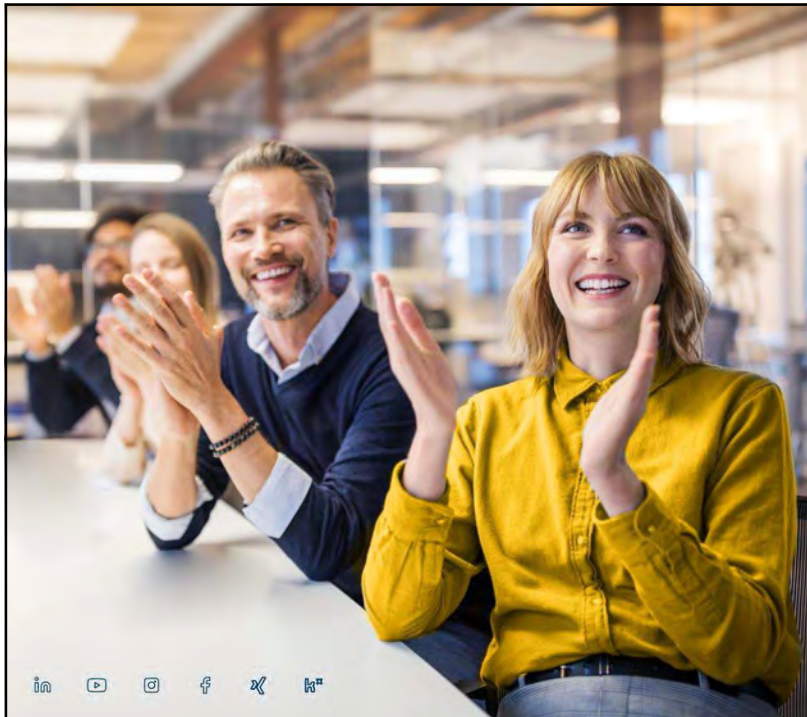
21.08.2026 | 12



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



TLM 2026



**Vielen Dank
für Ihr Interesse!**

Bitte kontaktieren Sie uns:

M. Eng. Christian Hofmeister
TPO, Projektmanager Service Solutions

+49 941 4090-7033

c.hofmeister@reinhausen.com



21.08.2026 | 13



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Onkar Kolambkar

CTR Ltd., India

Mr. Onkar Kolambkar is a Bachelor in Electrical Engineering from University of Pune, India.

He joined CTR Manufacturing Industries Private Limited in 2011 and works as Senior Technical Manager for Tapchangers.

He represents India as member of IEC MT 60214-1. He is also member of CIGRE working groups related to tapchangers.

Previous to that he was involved in Infrastructure Project Management for distribution utility in India. He was nominated by Indian National Committee for IEC Young Professional in 2015 at Minsk, Belarus. He has presented several papers at various international conferences.

His major work is on application of non-vacuum tapchanger using alternate fluids.



Notizen:

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.



50
YEAR

CTR

**TAPCHANGERS
FOR
TRANSFORMERS**

Advancements In Arc Detection
And Tapchanger Technology

TLM 2026
21 and 22 September 2026
Mr. Onkar Kolambkar

22.9.2026

Introduction and Motivation

- **How to avoid transformer explosions due to internal arc faults ?**
(main reason for explosions according to IEEE)

CTR

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Arc Detection



- By change of pressure
 - Buchholz Relay
 - Pressure relief valve

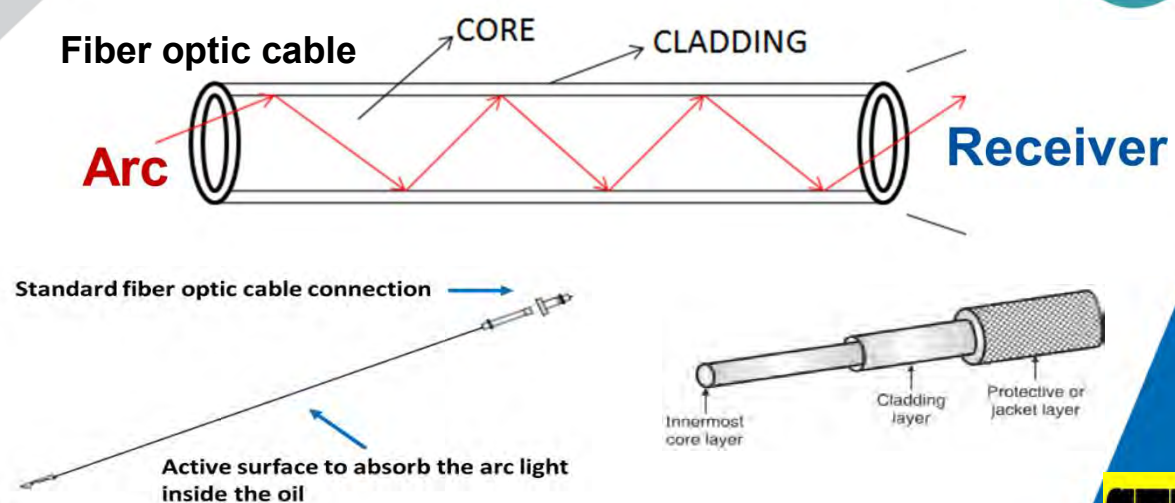
Reliable, approved
No false alarm
Lifetime similar to transformer
Too slow !

- Light Detection
 - Photodiodes/LDR inside the tank

Relatively fast
Sensitivity depending on various parameters (oil condition, how many sensors, distance, etc.)
False alarm possible (EMC)
Not reliable
Lifetime limited

CTR

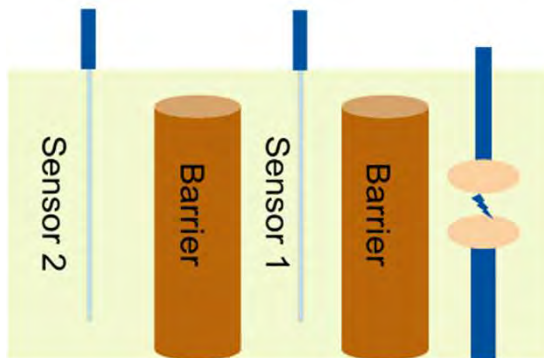
Patented Functional Principle



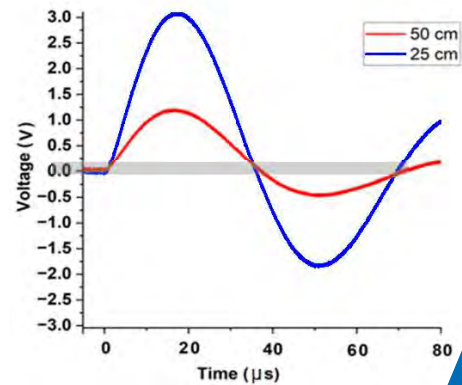
CTR

Development – Basic Investigations

Plate-plate electrodes with pressboard barriers



The signal profile received at breakdown



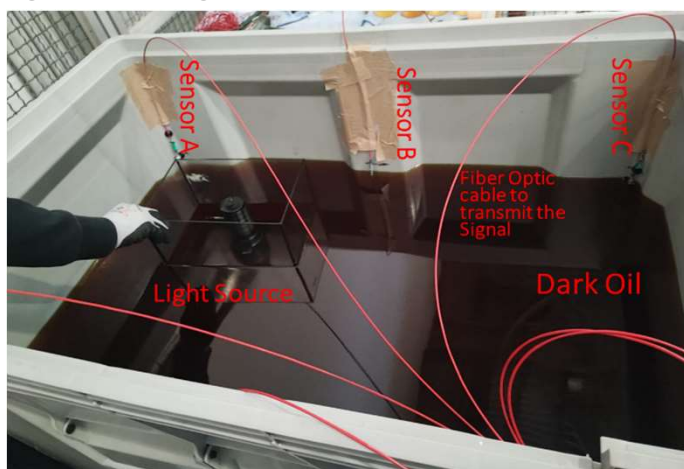
Parameter variation: Different liquids, different ageing conditions, different temperatures, different distances, light sources....etc.



CTR

Worse Case Condition Tests

Test setup for measuring light propagation



Worse case because

- Highly aged oil
- Bad reflecting tank
- Light source 120 degree field of view
- Light intensity much lower than a real arc



CTR

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

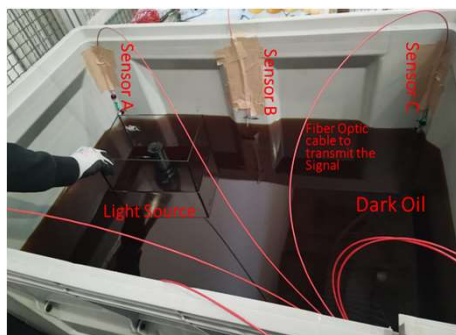
Worse Case Condition Tests

Test setup for measuring light propagation

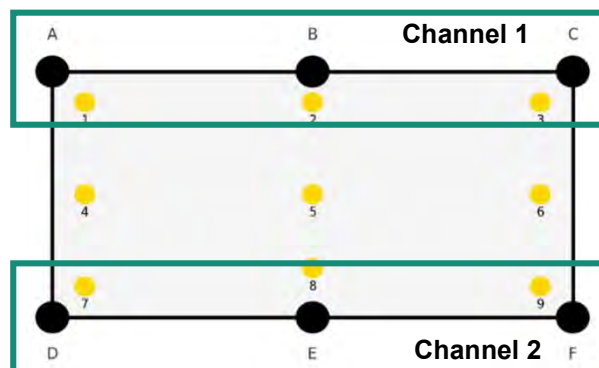


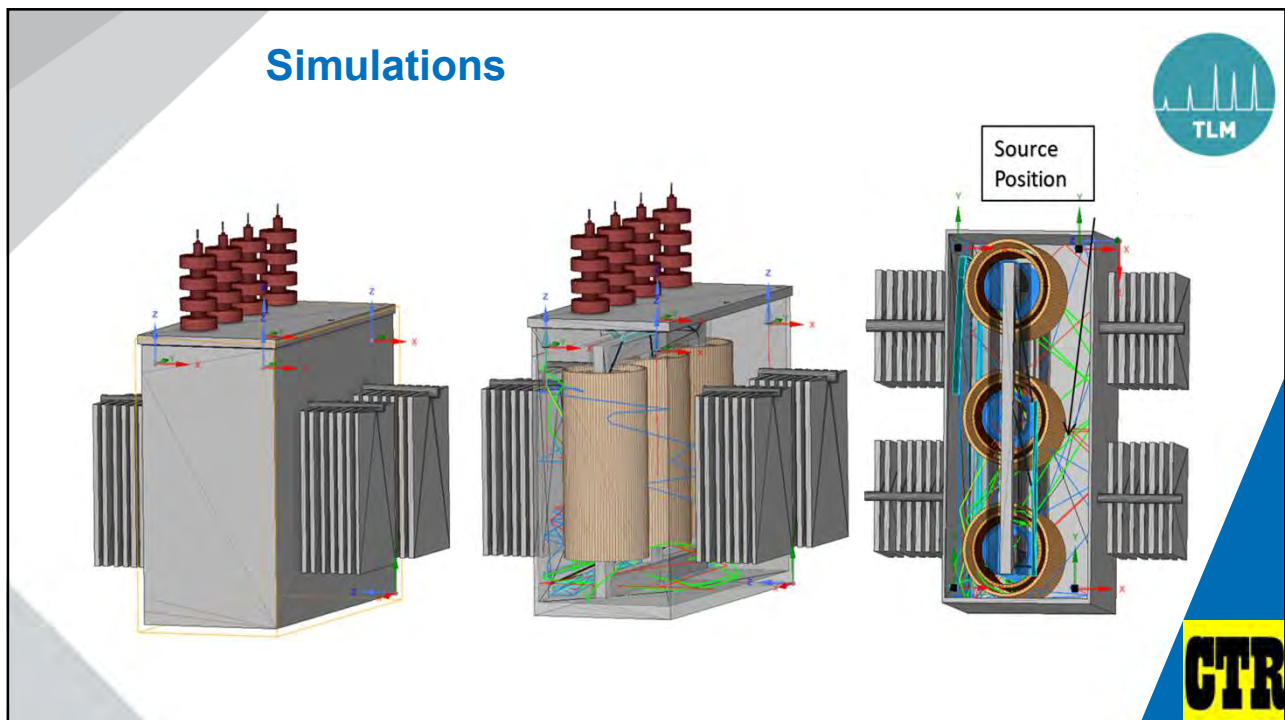
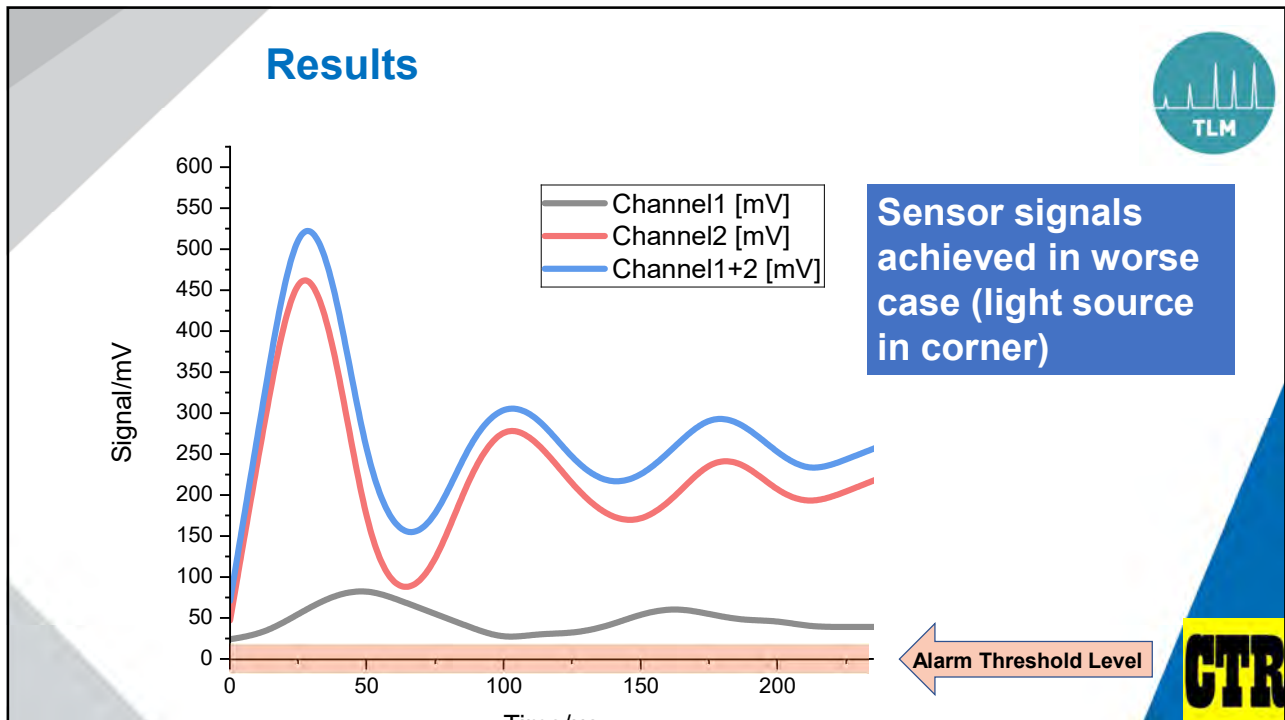
Worse Case Condition Tests

Test setup for measuring light propagation



Defined light source positions





Tests on Transformers



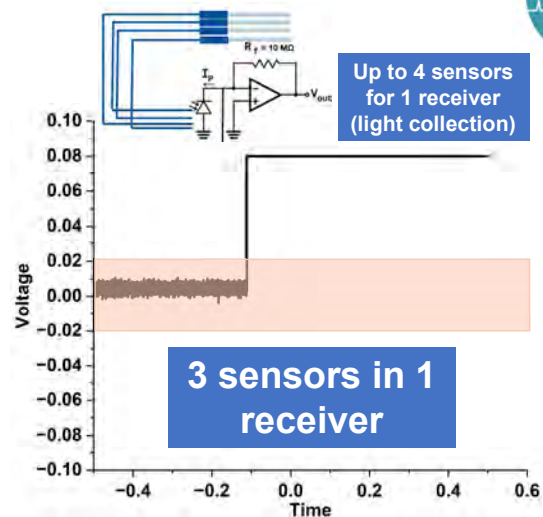
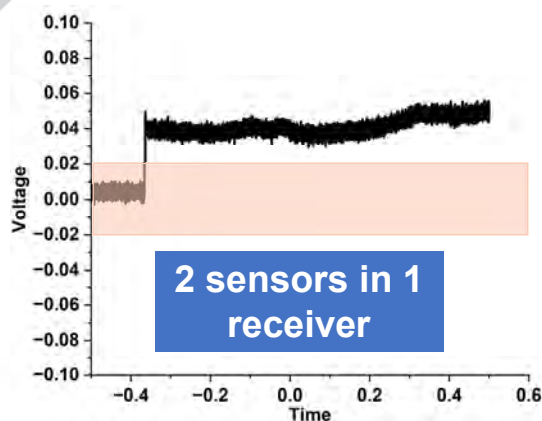
110kV / 20MVA



CTR

Tests on Transformers

65.000 lumen



Increasing sensitivity by combining sensors

CTR

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Conclusion Arc Detector



- A new patented internal arc sensor system that can prevent transformer explosions has been developed
- The optical detection system demonstrated a consistent and stable signal output, even under challenging test conditions such as aged insulating oil and low reflectivity
- Optical system detects arc light in microseconds, much more faster than Buchholz or differential relays, enabling rapid internal fault detection.
- Additional field tests are running in order to determine the best setup



Innovations in OLTC



- Tapchangers for alternate fluids
- Protection requirements for OLTC
- Challenges and need for innovation
- Solutions offered

22.9.2026

- Validation



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Tapchangers with alternate fluids

- Non vacuum tapchangers from Um 12 kV to 245 kV
- Power ratings upto 200 MVA
- Field experience of more than 10 years
- More than 500 nrs. in field



Protection requirements for OLTC

- Pressure Relief devices viz. Pressure Relief Valve, Rupture Disc
- Oil Surge Relay



22.9.2026



Challenges and need for innovation



- Breathing: Free or sealed breathing systems
- Venting of switching gases

22.9.2026

CTR

Solutions offered



- Oil Surge relay with gas release function:
 - Float operating device
 - Periodic release of switching gases
 - Independent of power supply



22.9.2026

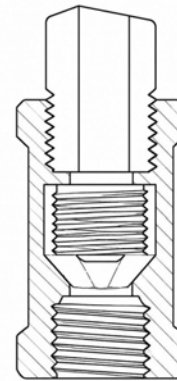
CTR

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Solutions offered

- Controlled breathing
 - Backup to OSR
 - Gases venting through conservator
 - One way action
 - Minimum pressure setting

22.9.2026



DETAIL - A

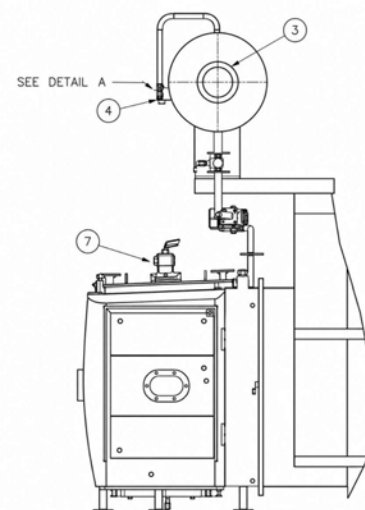


CTR

Validation tests

- Venting tests
 - Pressure based
 - Switching based

22.9.2026



CTR

Validation tests

- Switching tests
 - Gas release through OSR
 - Resealing test



22.9.2026



CTR

Conclusion

- Suitability of non vacuum OLTC for operation in sealed environments
- Oil parameters in field show normal ageing characteristics
- Risk of moisture ingress mitigated though solutions offered

22.9.2026



CTR

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Andreas Thiede

HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH

Andreas Thiede studierte Elektroenergietechnik an der Technischen Universität Dresden mit der Vertiefungsrichtung Leistungselektronik.

Von 1995 bis 1999 begann er seine berufliche Karriere als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Dresden mit dem Schwerpunkt Prüfung von Leistungshalbleitern.

Seit 1999 arbeitet er bei der HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, bei der er seine Laufbahn als Entwicklungsingenieur Leistungselektronik und ab 2008 als Teamleiter Leistungselektronik mit der Entwicklung und Applikation von Frequenzumrichtern zur Prüfung von Leistungstransformatoren fortsetzte.

Seit 2023 ist er Abteilungsleiter Innovation im Bereich Technik der HIGHVOLT und koordiniert die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Bereichen Leistungselektronik, Messtechnik und Monitoring.

Er arbeitet in verschiedenen IEEE PES TC Arbeitsgruppen mit.



Notizen:

This image shows a blank sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.



Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

Andreas Thiede, Robert Nowak

HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH

1



Inhaltsverzeichnis

Transformatorenprüfungen – Arbeits- und Einsatzbereiche Frequenzumrichter

Frequenzumrichter – Leistung und Modularität

Einhaltung der Prüfspannungsqualität

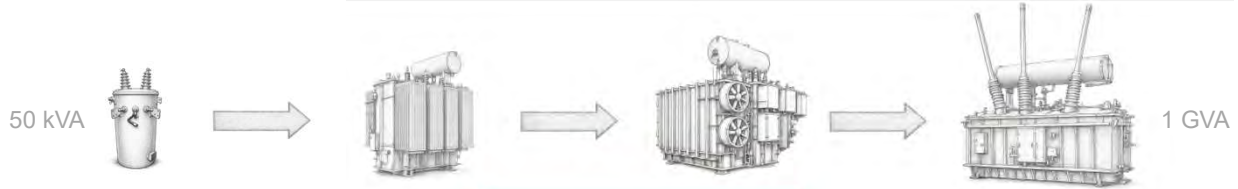
Teilentladungsmessungen in Frequenzumrichterumgebung

2

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Arbeitsbereich FU bei Transformatorenprüfungen

**HIGH
VOLT**



Transformatorenprüfung	Frequenz	P _{Konverter}	S _{Konverter}
Leerlaufprüfung (100%)	(16 ⅔ Hz), 50 Hz, 60 Hz	0,2 kW 300 kW	0,5 kVA 1500 kVA
Leerlaufprüfung (110%)		0,3 kW 500 kW	1 kVA 5000 kVA
Lastverluste		0,5 kW 1800 kW	1 kVA 2000 kVA
Wärmefahrt		0,8 kW 2500 kW	2 kVA 3000 kVA
Induzierte Spannungsprüfung	100 Hz ... 200 Hz (400 Hz)	0,5 kW 500 kW	0,6 kVA 1500 kVA
Angelegte Spannungsprüfung	50 Hz, 60 Hz	(... 250 kW)	(2 kVA 3000 kVA)

Diese Folie wurde mit KI-gestützten Bildern illustriert.

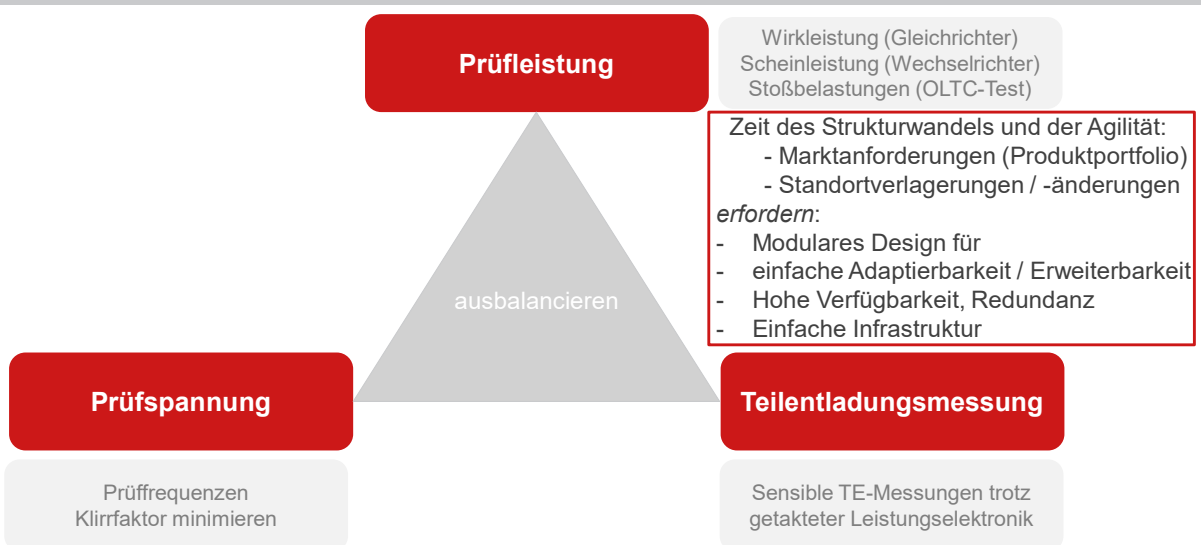
21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

3

3

Herausforderungen – Leistung und Modularität

**HIGH
VOLT**



21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

4

4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Modulares Frequenzumrichterdesign

**HIGH
VOLT**

Eingang:
Spannungsbereich: 210...690 V
Frequenzen: 50/60 Hz
Phasenanzahl: 3~



Ausgang:
Spannungsbereich: 0...690 V
Frequenzen: 0...500Hz
Phasenanzahl: 2~/3~

Active-Front-End Gleichrichter:

- Geschlossenes Design
- Spannungsfiler inkludiert
- Sinusförmige Stromaufnahme
- Nur Wirkleistungsaufnahme ($\cos(\phi)=1$)

Wechselrichter:

- Geschlossenes Design
- Spannungsfiler inkludiert
- Optimierte IGBT-Ansteuerung für niedrigen THD
- Direkter Prüfsystemanschluss

Optimierter Aufbau, um niedrige Teilentladungsgrundstörspegel an einer Prüfanlage zu erreichen:
IGBT-Topologie, Filter-Topologie, Ansteuerungsverfahren

21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

5

5

Modulares Frequenzumrichterdesign

**HIGH
VOLT**



- Modular Leistungsanpassung
- Upgradefähig
- Getrennte Dimensionierung für Wirk- und Scheinleistung (Optimierung der Kundeneinspeisung)



Einspeisung: 440V (3-phasig)
Ausgangsspannung: 690V (3-phasig)

21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

6

6

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Herausforderungen - Prüfspannungsqualität

**HIGH
VOLT**

Eine Prüfleistungsquelle für alle
Trafoprüfungen
erfordert:

- Hohe Spannungsstabilität
- Hohe Frequenzauflösung
- Aktive Oberschwingungskompensation

Prüfleistung

Wirkleistung (Gleichrichter)
Scheinleistung (Wechselrichter)
Stoßbelastungen (OLTC-Test)

ausbalancieren

Prüfspannung

Prüffrequenzen
Klirrfaktor minimieren

Teilentladungsmessung

Sensible TE-Messungen trotz
getakteter Leistungselektronik

21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

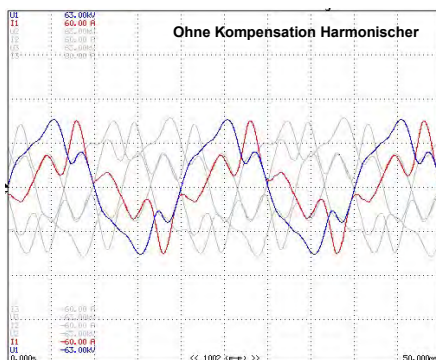
7

7

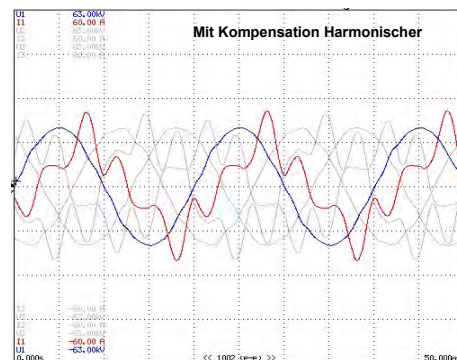
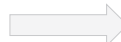
Aktive Oberschwingungskompensation

**HIGH
VOLT**

Messung der Leerlaufverluste: 3~ 725 MVA / 420 kV / 27 kV Maschinentransformator



Prüfspannung THD: 19,8 %



Prüfspannung THD: 2,4 %

21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

8

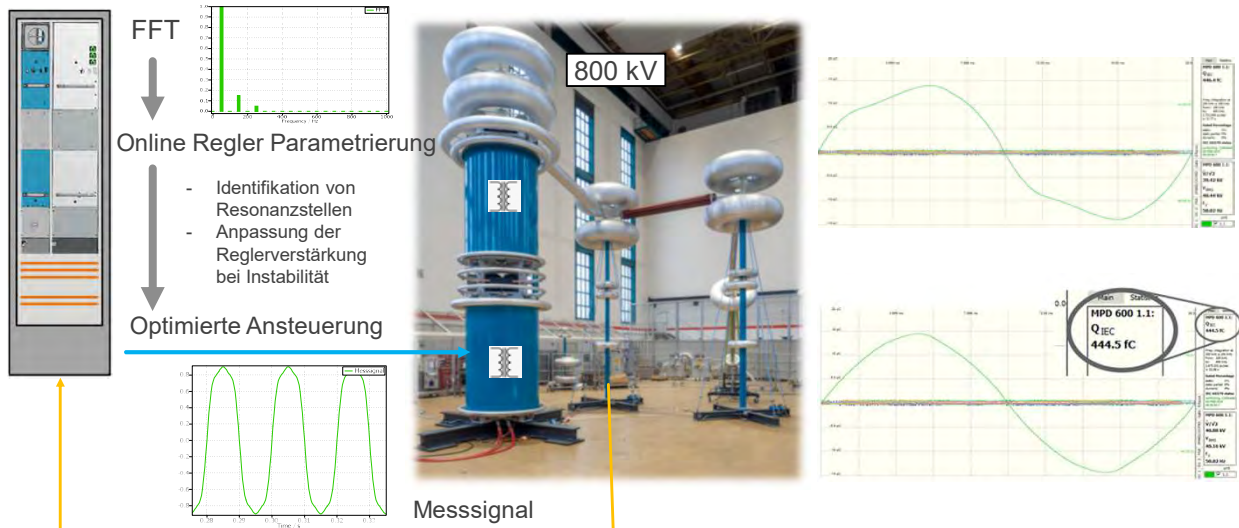
8

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Aktive Oberschwingungskompensation

**HIGH
VOLT**



21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

9

9

Herausforderungen - Teilentladungsmessung

**HIGH
VOLT**



21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

10

10

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

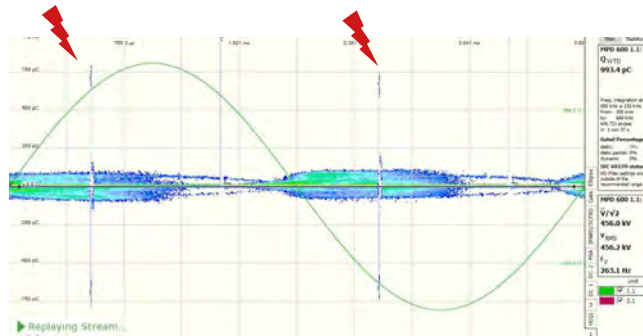
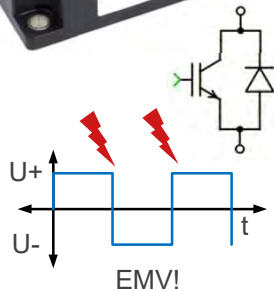
EMV-Einfluss auf die Prüfanlage

HIGH VOLT



Übersprechen auf den Prüfkreis

Leitungsgebunden
Strahlung
Erdeinkopplung



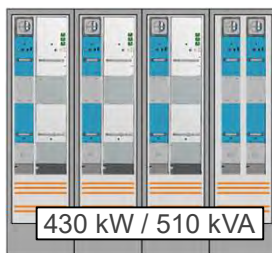
21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

11

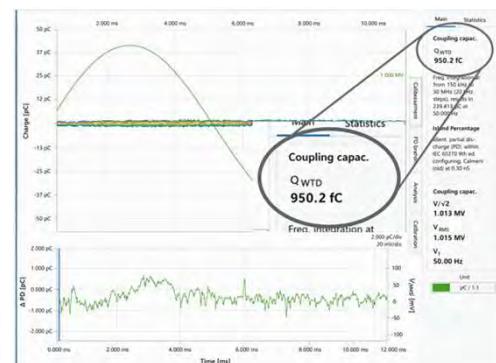
11

Wechselspannungsresonanzanlage

HIGH VOLT



Ohne zusätzliche
Filter zwischen EPS
und Prüfsystem



21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

12

12

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal



Zusammenfassung



- Frequenzumrichter: universelle Speisequelle für alle Leistungsprüfungen an Transformatoren:
 - nur ein zentrales Stellglied für alle Prüffrequenzen erforderlich,
 - Leistungsbedarf für Prüfungen von Transformatoren bis in den GVA-Bereich kann mit FU abgedeckt werden,
- Modulares Design der FU ermöglicht einfache Anpassungen an geänderte Markterfordernisse sowie hohe Verfügbarkeit und Redundanz,
 - Luftgekühlte Konvertermodule 300 kVA und 1 MVA als standardisierter Grundbaustein,
- Die große Dynamik der Frequenzumrichter ermöglicht die Sicherstellung der Prüfspannungsqualität (automatische Erkennung und aktive Unterdrückung von Oberschwingungen),
 - Signalkückführung vom Prüfobjekt, FFT und Injektion von phaseninversen Kompensationsspannungen,
 - Stabilität auch bei transienten Ereignissen,
- Gekapselte Konvertermodule und innovatives Sinusfilterdesign minimieren die Störemissionen und ermöglichen Teilentladungsmessungen im IEC-Bereich mit Grundstörpegeln von <1 pC.
 - Streng eingehaltene EMV-Bedingungen im Prüffeld (Schirmkabine, Erdung, Einspeisung): <1 pC
 - Ohne Schirmkabine, nur Einhaltung grundsätzlicher EMV-Maßnahmen: < 5 pC

21.-22.09.2026 TLM 2026 - Congressforum Frankenthal - Transformatorenprüfung mit umrichter gespeisten Prüfanlagen

13

Referenten

Thomas Stockmann

Elektrochemie Halle GmbH

Nach einer erfolgreichen Ausbildung zum Mechatroniker im Jahr 2006 sammelte ich erste beruflich Erfahrungen bei Technologieherstellern und der Automobilindustrie in den Bereichen Instandhaltung und Produktion.

In 2009 wechselte ich zur ECH Elektrochemie Halle GmbH. Dort war ich anfangs für die Produktion von Vakuumentgasungen verantwortlich, welche wiederum für die DGA benötigt wurden.

Kurze Zeit später erweiterte ich mein Aufgabengebiet und unterstützte Kunden als Servicetechniker in Deutschland und international.

Mein Tätigkeitsfeld umfasste dabei die Inbetriebnahme, Anwenderschulung, Jahreswartung und Reparaturen von Gaschromatographen, Karl Fischer Titratoren und H2S-Analysatoren.

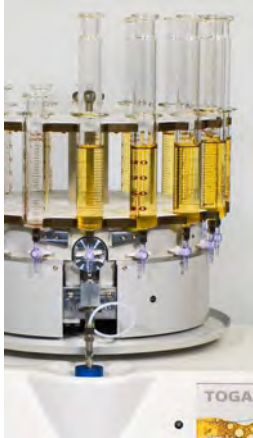
Neben diesen vielseitigen Aufgaben stand die parallele Fortbildung im Fokus. Deswegen schloss ich nebenberuflich ein Fernstudium in Englisch (C1) im Jahr 2011 ab. Dazu kam anschließend ein Meisterstudium zum Industriemeister Elektrotechnik in 2018.

Im Jahr 2012 übernahm ich die Leitung des Bereiches Fertigung und Service der ECH Elektrochemie Halle GmbH. Seither konnte ich ein umfangreiches Wissen im Bereich DGA und Probennahme entwickeln und dieses Know-How erfolgreich bei der Weiterentwicklung des MobilGC2, TOGA GC2 und Oil Sampling Box PRO anwenden.



Notizen:

[illegible]





Wie gelingt die sichere Gas-in-Öl-Analyse von alternativen Isolierflüssigkeiten?

Thomas Stockmann, Markus Willbrandt,
Dr. Michael Hahn

ECH Elektrochemie Halle GmbH

Inhalt

Inhalt

1. Problematik
2. Einfluss der Feuchte in der DGA
3. Optimierung der DGA für alternative Fluide
4. Herausforderungen bei der Probenahme
5. Neues sicheres Probenahmemodul für alle Fluide
6. Fazit


www.ech.de
Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)
2

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten

Vergleich einiger relevanter Stoffeigenschaften der untersuchten Öle gemäß Herstellerangaben

Parameter/Probe	Shell Diala S3 ZX-I [1]	Shell Diala S4 ZX-I [2]	Midel 7131 [3]	Midel eN 1204 [4]	Paryol Electra 7426 [5]	Enviro-temp™ FR3 [6]
Quelle	Mineralöl	GTL	Synthetischer Pentaerythriolester	Rapsöl	Mandel-/ Haselnussöl	Sojaöl
Dichte (20 °C) [kg/m³]	878	805	970	920	920	920
Stockpunkt [°C]	-60	-42	-56	-31	-25	-21
Durchbruchspannung [kV]	>70	70	>75	>30	>60	>45
Viskosität (40°C) [mm²/s]	8	10	29	37	40	34
Flammpunkt [°C]	138	191	260	>315	>310	330
max. Wasserlöslichkeit [ppm]	<100		2700	1100		1100

[1] www.shell-livdocs.com/data/published/de/07c5f86f-0530-4615-b125-68af99072324.pdf

[2] www.shell-livdocs.com/data/published/en/30d610d9-392b-4fb1-acca-fe6344f8f31f.pdf

[3] www.midel.com/midel-range/midel-7131

[4] www.midel.com/midel-range/midel-en1204

[5] www.greenstar.it/images/products/catalog/docs/136045_scheda%20tecnica.pdf

[6] www.cargill.com/bioindustrial/fr3-fluid/why-fr3-fluid



www.ech.de

Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)

3

Wasserlösevermögen der neuartigen Isolier-Fluide



Hergestellte Mischungen von Wasser in Fluiden (1200 ppm)

- sehr gutes Wasserlöseverhalten bei synthetischen Estern:
Shell S4, Midel 7131
bei pflanzenbasierten Fluiden:
bis 1000 ppm in Midel 1204, FR3
- Wassergehalt analysierbar mittels Karl-Fischer-Titration als direkte coulometrische oder volumetrische Titrationen oder mit Ofentechniken
- Wassergehalt bestimmbar direkt im Öl mit kalibrierten kapazitiven Feuchtesensoren



www.ech.de

Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)

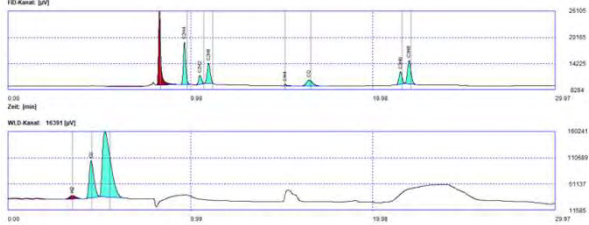
4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Dissolved Gas Analysis

Gasfreisetzung aus Fluid + Gaschromatographie = DGA (Dissolved Gas Analysis)





- Gelöste Gase in Isolierölen als Diagnoseverfahren zur Zustandsbewertung von Transformatoren
- Gasfreisetzung durch Unterdruck (Teil- oder Vollvakuumentgasung) oder Gleichgewichtseinstellung mit einer abgeschlossenen Gasphase - Headspacetechnik

www.ech.de
Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)
5

Feuchteinfluss

Wie beeinflusst Wasser die DGA?

Wasserdampf-verdünnte Probe!

```

graph LR
    A[Gelöstes Wasser im Öl] -- "Headspace: 80 °C Erhitzen" --> B[Wasserdampf und Gase im Gasraum des Vials]
    B --> C[Absaugen der Gasprobe komplett aus Vial]
    C --> D[Anteil in Probenschleife dosieren]
    D --> E[GC]
            
```

Gasdruck verfälscht - erhöht!

```

graph LR
    F[Gelöstes Wasser im Öl] -- "Vollvakuum-entgasung 0,5 mbar" --> G[Wasserdampf und Gase im Vakuum]
    G --> H[Gase sammeln im Normaldruck]
    H --> I[Anteil in Probenschleife dosieren]
    I --> J[GC]
            
```

Wasser-kondensat

- Bei Headspacetechnik: Gesamtgasgehalt als Summe der Konzentrationen der Einzelgaskomponenten - Probleme durch Verdünnung mit gasförmigem Wasseranteil
- Bei Vakuumentgasung: Gesamtgasgehalt als Druckdifferenz zwischen Startvakuum und freigesetzten Gasen - Probleme durch Druckanstieg durch Wasserdampf

www.ech.de
Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)
6

Neue DIN EN IEC 60567 (VDE 0370-9):2024-06

Berücksichtigt den Einfluss von hohen Wasserdampfanteilen in **esterbasierten** Isolierflüssigkeiten durch Korrekturfunktionen (Anhang F):

- Vollvakuumentgasung und Teilvakuumentgasung:
 1. Druckanstieg entspricht Gesamtgasgehalt mit partiellem Wasserdampfanteil, **KF-Titration** o. a. Methode im Öl vor dem Vakuum und nach dem Vakuum als Differenzwert für verdampftes (störendes) Wasser
 2. Alternativ zu Differenzmessung im Öl auch **HID-Messung** der Wasserkonzentration im Gas möglich, die als berechnetes Idealgas im Druckanstieg berücksichtigt wird
- Headspace-technik:

Jeweils **Kalibrierfunktionen** für jede Fluid-Arten mit entsprechend passenden Gasgehalten und Feuchtigkeiten aufnehmen



Integrierter Feuchtesensor in der Vakuumkammer der DGA

ECH Elektrochemie Halle GmbH:

- in Anlehnung an die HID-Methode:

ermittelt freigesetzten Wasseranteil in der Vakuumentgasung mittels **kapazitivem Feuchtesensor** und zieht diesen vom Druckanstieg ab



www.ech.de

Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)

7

Untersuchungen zum Feuchteinfluss auf die DGA

- Versuche mit entgasen Fluiden der verschiedenen Fluid-Arten
- Zugabe von definierten Wasseranteilen für den reinen Wassereinfluss
- Messung mit Karl-Fischer-Titration parallel zur kapazitiven Feuchtesensorik im Vakuumschritt der DGA
- Vergleich des Wasserabgabeverhaltens der verschiedenen Fluide bei gleicher Wasserkonzentration im Öl
- Vergleich der Korrekturfunktionen mittels KFT und Sensorik
- Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Herstellung von Wasserstandards

Ausgangsstoffe der Versuche:

	Shell Diala S3 ZX-I	Shell Diala S4 ZX-I	Midel® 7131	Midel® eN 1204	Enviro-temp™ FR3™	Paryol Electra® 7426
Gasgehalt [%] original	12	11	12	14	12	13
Gasgehalt nach Aufbereitung [%]	0,1	0,2	0,9	0,9	1	0,9
Wassergehalt [ppm] original	25	17	208	228	348	187
Wassergehalt [ppm] nach Aufbereitung	3	2	40	40	30	20

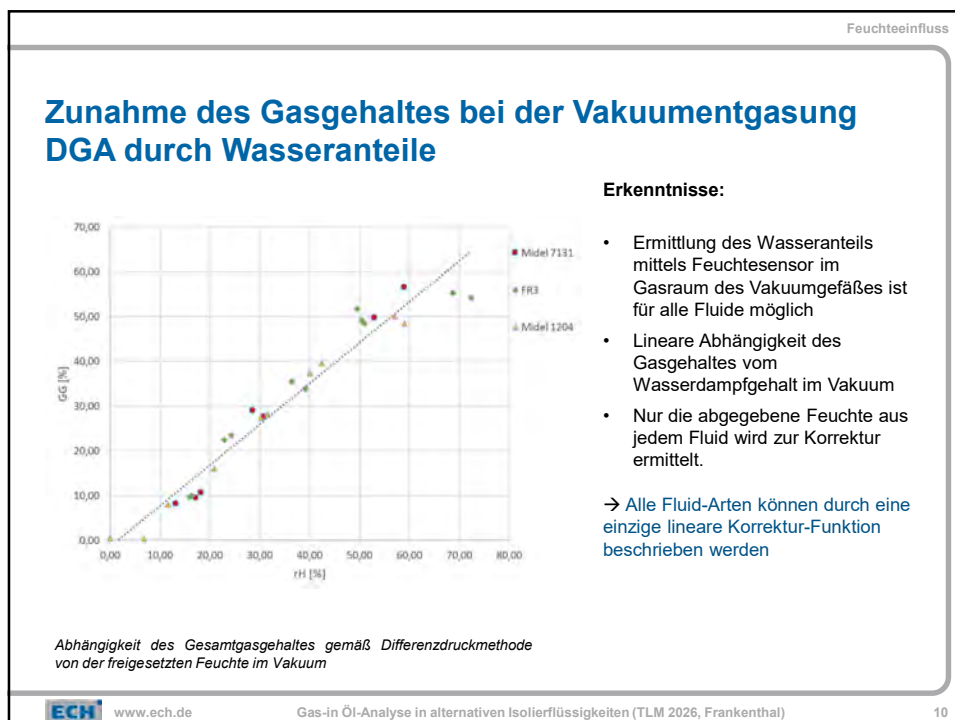
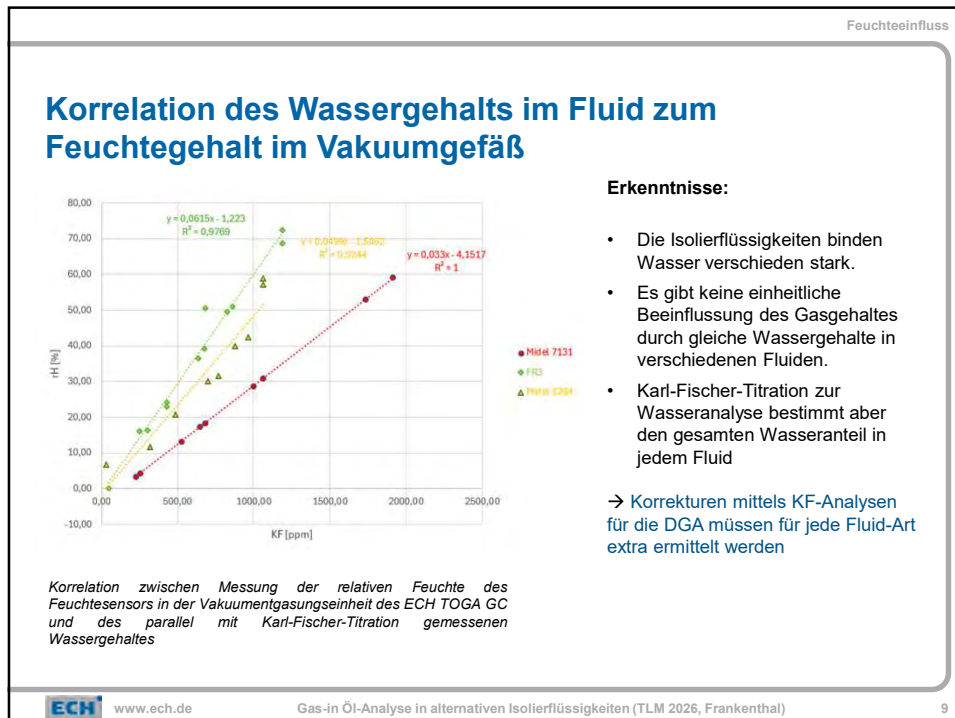


www.ech.de

Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)

8

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Feuchteinfluss - Korrekturfunktion ermitteln

Korrigierbarkeit des ermittelten Gasgehaltes als Basis für die automatische Korrektur der Gaskonzentrationen in der DGA-Analyse mittels Vollvakuumentgasung

Korrekturfunktion

$$GG_{\text{korr}} = GG - WD$$

$$WD = m \cdot rH + K$$

$$GG_{\text{korr}} = GG - (m \cdot rH + K)$$

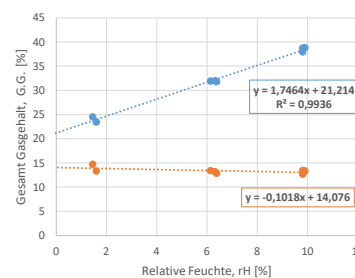
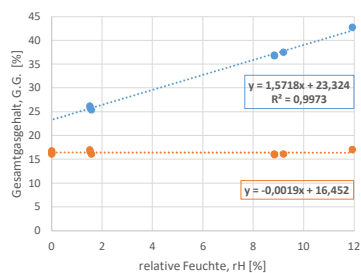
WD: Gasgehalt von Wasserdampf [%]
 m: Steigung der Korrekturfunktion [%/ppm]
 rH: Feuchtwert (relative Feuchtigkeit) [%]
 K: Konstante der Korrekturfunktion [%]
 GG: Gesamtgasgehalt [%]
 GG_{korr}: Gesamtgasgehaltkorrektur [%]

Messergebnisse für PARYOL Electra 7426 bei zugesetzten Wasser-Konzentrationen (Wasser-Öl-Standards der ECH)

Sollwert [ppm]	Vakuum-Feuchte rH [%]	KF [ppm]	GG [%]	GG _{korr} [%]
Blind	0	/	16,8	/
Blind	0	/	16,4	/
Blind	0	/	16,1	/
300	1,5	287,6	25,8	16,6
300	1,6	287,6	25,4	16,1
300	1,5	287,6	26,2	17,0
600	8,8	603,1	36,9	16,2
600	9,2	603,1	37,5	16,2
600	8,8	603,1	36,8	16,0
750	11,9	731,7	42,8	17,1
750	12,4	731,7	42,8	16,4
750	12,4	731,7	42,8	16,4

GG = Gesamtgasgehalt
 GG_{korr} = korrigiert
 KF = Karl-Fischer-Titration

Automatische Inline-Feuchtekorrektur mittels Feuchtesensorik im Gasraum der DGA



Gemessener Gesamtgasgehalt (blau) und über die relativen Feuchte des Ölstandards korrigierter Gasgehalt (orange)
 PARYOL Electra 7426 (linkes Diagramm), FR3 (rechtes Diagramm) – Standard-Öle der ECH

Feuchteinfluss - vom Vakuum abhängig

Messreihe mit Mide® 7131 mit verschiedenen Wassergehalten an ECH-Messgeräten Vergleichsmessung :
Vollvakuumentgasung TOGA GC (0,5 mbar) und Teilvakuumentgasung Mobil GC (25 mbar)

Wassergehalt, H ₂ O [ppm]	Gesamtgasgehalt GG [%]	
	TOGA GC	Mobil GC
0	0,8	0,0
200	3,7	0,9
400	8,8	1,1
800	19,9	1,6
1.600	41,5	3,2
2.600	112,9	-

Erkenntnis:

- Entsprechend der Aussagen der DIN EN IEC 60567 sind die Einflüsse unterschiedlich zu bewerten
- Die Isolierflüssigkeiten geben das Wasser entsprechend weniger ab, wenn der Unterdruck geringer ist – somit ist die Entgasung allerdings auch für die Gase geringer
- Feuchtigkeiten bis 200 ppm sind vernachlässigbar bei der Teilvakuumentgasungsmethode

Stabilität und Reproduzierbarkeit der Wasser-Öl-Standards der ECH

Wassergehalt bei Lagerung einer Charge der 300 ppm H₂O- Ölstandards
(PARYOL Electra 7426)

Woche	Wassergehalt [ppm]	RSD
1	298,0	1,23%
2	301,3	0,97%
3	297,9	0,97%
4	298,8	1,35%

Anmerkung:
Die Entgasungszeiten der Ester-Flüssigkeiten mussten sowohl in der DGA als auch der Aufbereitung deutlich verlängert werden – wie in Anhang F der DIN EN IEC 60567 beschrieben.



Automatische Öl aufbereitungseinheit



Gelagerte Wasser-Öl-Standards

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

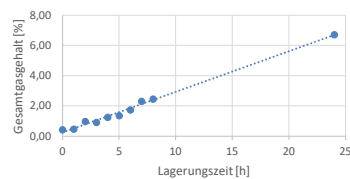
Herausforderungen bei der Probenahme

Versuchsanordnung

Shell Diala S4 ZK-I, GTL-Öl

- Entgasung bis 1,1 mbar
- Abfüllung in 1000 ml Aluminiumflasche, 200 ml Luft, 800 ml Öl
- 5541 mm² Kontaktfläche des Öls zur Luft
- TOGA-GC-Analyse, 50 ml Proben zeitversetzt jede Stunde entnommen, ohne Schütteln

→ Der CO₂-Gehalt ist innerhalb von zwei Stunden um 238 %, O₂-Gehalt um 259 %, N₂-Gehalt um 170 % gestiegen.



Sample name	Storage time [hours]	GG	CO ₂	O ₂	N ₂
Initial sample	0	0.43	18	1044	3877
Contamination after 1 hour	1	0.46	22	1306	3882
Contamination after 2 hours	2	0.98	43	2710	6619
Contamination after 3 hours	3	0.91	45	2786	6027
Contamination after 4 hours	4	2.32	58	3512	7594
Contamination after 5 hours	5	1.37	64	3890	8260
Contamination after 6 hours	6	1.75	81	5142	10157
Contamination after 7 hours	7	2.32	106	6767	13145
Contamination after 8 hours	8	2.47	118	7155	13889
Contamination after 24 hours	24	6.72	345	20816	39251

- Luftverunreinigung hat erhebliche Auswirkungen auf die Diagnose-Ergebnisse.
- Zusätzliche Luftbestandteile (O₂, N₂ und CO₂) in der Flüssigkeit lösen sich und erhöhen den Gesamtgasgehalt.
- Flüchtige Gase wie Wasserstoff oder Acetylen entweichen schnell aus der Flüssigkeit.
- Zusätzliche Luftfeuchte kann in moderne Fluide leicht eingelöst werden.

Neues sicheres Probenahmemodul – für alle Fluide

- Vermeidung von jeglicher Luftkontamination bei der Öl-Probenahme
- durch vollautomatisierten Vorgang auch für ungeübte Probenehmer sicher handhabbar
- Automatische Abfüllung in 50 ml-Glasspritze oder Aluminiumflaschen (600 und 1200 ml) (blasenfrei!)



Probenahmemodul

Schritte im Probenahmemodul

- Luftpumpe erzeugt Über- oder Unterdruck, ein Zylinder bewegt das Öl
- druckgeregelt, Kraft dadurch steuerbar, Viskositäten berücksichtigt, Entgasungen vermeidend
- Temperatur kontinuierlich messbar
- *Purging*-Volumen wählbar, 0,5 - 4 Liter
- *Filling* für Spritze: 2x vorspülen, 3. Schritt voll, Begrenzung des Zylinders elektronisch kontrolliert, absolut blasenfrei
- Bei Flaschenbefüllung sauberes Überfüllen!
- *Emptying*-Sequenz zum Entleeren der Schläuche
- Vorgang dauert entsprechend der Fluid-Art (siehe Beispieltabelle)



Process	Duration
Purging 2 litres Shell Diala S3 (40°C)	9:54 min
Filling Shell Diala S3 (40°C)	3:36 min
Purging 2 litres MIDEL eN 1204 (40°C)	17:15 min
Filling MIDEL eN 1204 (40°C)	7:09 min

www.ech.de
Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)
17

Fazit

Fazit

- Die alternativen, nachhaltigen Isolierflüssigkeiten sind für die Analyse sowohl bezüglich der Gewinnung richtiger Analysenergebnisse als auch in der Interpretation der Ergebnisse eine Herausforderung.
- Die hohe Wasserlösekapazität, Hygroskopie und Viskositäten erfordern optimierte Messmethoden.
- Die Karl-Fischer-Titration als Goldstandard der Wassergehaltsbestimmung im Spurenbereich kann zur Ermittlung von Korrekturfunktionen für die Analysenmethoden, z. B. DGA herangezogen werden, benötigt aber für jede Fluid-Art eigene Korrekturfunktionen oder ist durch die Vorher-Nachher-Analyse der analysierten Ölprobe fehlerbehaftet (DIN EN IEC 60567).
- Vorteilhaft und einfacher ist die Bestimmung der tatsächlich in der Analyse abgegebenen Wasseranteile aus den Fluiden mittels Sensorik direkt im Gasraum. Dadurch ist nur eine einzige Korrekturfunktion für alle Fluid-Arten notwendig.
- Die korrekte Probennahme ist in der Transformatorenüberwachung der entscheidende Schritt für die Richtigkeit der anschließenden Analysen, bei Nutzung der neuartigen Isolierflüssigkeiten ist er noch sensibler zu betrachten – Umgebungseinflüsse wie Luft oder Feuchtigkeit durch jeden Vorbereitungsschritt der Probe können das Ergebnis stark beeinflussen. Somit ist ein deutlich größerer Fokus als bisher auf die korrekte Probenahme zu legen sowie die Vermeidung unnötiger Arbeitsschritte.

Gefördert durch:




aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

www.ech.de
Gas-in Öl-Analyse in alternativen Isolierflüssigkeiten (TLM 2026, Frankenthal)
18

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



ECH Elektrochemie Halle GmbH

Headquarters in Germany

ECH Elektrochemie Halle GmbH
Otto-Eißfeldt-Str. 8
D-06120 Halle (Saale)
Germany
Tel.: +49 (0) 345 2795700
Mail: info@ech.de
Web: www.ech.de



ENERGY SUPPORT

Energy Support GmbH
Sperberweg 47
41468 Neuss
Deutschland
Tel: +49 (0)2131 40 39 60 7
Mail: info@energy-support.de
Web: www.energy-support.de

ECH Scientific Ltd.

*Sales and Service Center
International*

Building 69, Wrest Park, Silsoe
Bedfordshire, MK45 4HS
United Kingdom
Tel.: +44 (0) 1525 404747
Mail: info@echscientific.com
Web: www.echscientific.com

ECH America Inc.

*Sales and Service Center
America*

3430 S Sam Houston Pkwy E#400
Houston TX 77047
USA
Tel.: +1 (713) 805-7525
Mail: info@echamerica.com
Web: www.echamerica.com

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Dr. Bruce Pahlavanpour

Ergon International

Dr Bruce Pahlavanpour BSC, DIC, PHD from Imperial College, London.

He joined Ergon International as senior consultant in 2023.

Dr Pahlavanpour was Chief Specialist for the Electrical industry application group within Nynas TDMS. He joined Nynas during 2002.

He was chairman of IEC, TC10 (insulating fluids) and chairman of BSI, GEL10.

Previous to that he was professor of petroleum chemistry at Cranfield University working for National Grid UK, University lecturer and head of Environmental studies department. Dr Bruce is world recognised expert in the filled of insulating oil. He is IEC2006 and Lloyds Register of Shipping award winner. He received special commendation from British Standardization Institute in 2015. Dr Pahlavanpour published over 380 articles, reports in international journals, seminars, technical reports, chapters in Nynas transformer oil hand book, two chapters in CRC Rubber hand book (CRC publication, USA) and one chapter in petro Analysis 87 (Butterworth publication UK).



Notizen:

[illegible]



RECENT ADVANCES IN THE CONDITION MONITORING AND HEALTH ASSESSMENT OF ESTER FILLED TRANSFORMERS

Dr. Bruce PAHLAVANPOUR* – Ergon International Inc. Belgium

ABSTRACT

Dissolved gas analysis is a well-established technique for assessing the condition of transformers filled with mineral insulating liquids. This technique has been used for monitoring the condition of transformers from the early 1970s and has improved since then. The procedures for sampling and analysis are well defined but the interpretation of results, although guidelines are established, is an art. International research organisations, such as CIGRE, conduct research to improve interpretation of test results. IEC 60599 has been revised many times and improved using CIGRE research outcomes.

The use of natural and synthetic esters as insulating liquids has increased in recent years. Guidelines for maintenance of these liquids are developed and used but the interpretation of dissolved gas analysis for monitoring the condition of the transformer is currently under development by international organisations. The DGA of esters is different than for mineral oils due to the different chemical structures present in esters, notably the ester linkages and the olefin unsaturation in the natural esters.

Previous interpretation schemes have been limited due to the relatively low number of in-service DGA data and the use of laboratory generated data which may not correlate to in-service data. This paper discusses the development of an international standard for interpretation of DGA for natural and synthetic esters.

KEYWORDS

Health/condition monitoring
DGA for alternative fluids
Development of IEC standard

INTRODUCTION

As the demand for reliable energy infrastructure increases, so does the need for advanced monitoring techniques that enable early fault detection, deferred maintenance, and informed asset management. In particular, assessing the condition and ageing of transformers is critical for long-term operational planning.

DISSOLVED GAS ANALYSIS

The universally accepted technique for monitoring the condition of transformers is **dissolved gas analysis (DGA)** of oil samples taken periodically from the main tank and any separate tap-changer selector compartments. This technique is critical to detect potential faults at an early stage.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Thermal and electrical faults in power transformers decompose insulating material and generate gases which dissolve in the oil. As the insulating oil circulates through the transformer, it carries within it solids and gases. This is similar to the human blood circulation system, and as a doctor can detect the early warning signs of many abnormalities from blood tests, it is possible to detect early signs of abnormalities in a transformer by sampling and analysing the gases in the insulating liquid.

The first step in DGA is to obtain an oil sample. The international standard, IEC 60567 [1] describes the recommended procedure for taking and analysing oil samples from electrical oil filled equipment.

The first stage in the analysis of an oil sample is the **extraction** of dissolved gases. The traditional vacuum method is a low-cost assembly of glassware, mercury, and vacuum pump, known as the Toepler pump method. Other alternative methods are available. The stripper method uses a purge gas to remove dissolved gas. Other methods do not seek to achieve full gas extraction and can also lead to cheaper sample tests. The extracted gases can be measured in a variety of commercially available gas chromatography instruments.

Although the extraction and analysis of the dissolved gases are now effectively standardised, the **interpretation** of DGA analyses is not so uniform, and is often described as more of an art rather than a science. The key feature in any interpretation scheme is the method used to relate the measured gases to suspected fault conditions.

Halstead, using thermodynamic calculations, predicted the gas sequence of methane, ethane, ethylene and acetylene with increasing fault temperatures. Experimental studies on the degradation of octane, a model compound containing carbon-carbon (C-C) and carbon-hydrogen (C-H) bonds, provided invaluable information on minimum temperatures required to produce each gas. These approaches provided some insights, but the most successfully used interpretation methods are empirical in nature. Empirical methods are based on correlations of “key” gases or ratios of gas concentrations with potential fault types. The concept of gas concentration ratio plots was first introduced by Dornenburg and Strittmatter [2]. Their plots are a useful method for the characterisation of potential fault types, corona or partial discharge, overheating, and arcing. Rogers [3] developed a ratio method that involved ratio calculations, assignment of a numeric key based on the ratio and a lookup table for the interpretation of the four-digit key code. Church et al. [4] developed a nomograph that used linear segments to connect gas concentrations plotted on logarithmic scales. The slopes of the plotted lines are determined by the gas concentration ratios and can then be used to interpret the gas data. Graphical representations of gas ratios are convenient to visually follow this evolution of gases. This method of diagnosis is based on calculating the relative percentage of three gases. Each corner of the triangle represents 100% of one gas and 0% of the other gases [5-6]. Plotting the percentage of the three gases on the triangle indicates the type of potential fault.

CIGRE attempted [7] to reconcile the different interpretation schemes being used and proposed revisions to the international standard IEC 60599 to seek wider acceptance.

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Care is always needed when attempting to apply these various DGA interpretation schemes. It should be remembered that their leading role is to give an indication of what type of potential fault may exist - once other indicators have indicated that a problem exists in the first place. Clearly dividing one small amount of detected gas by an equally small amount of another gas may give a “good” indicative ratio - but the gas levels may be too small to be significant. The better approach will rely upon a repeatable gas extraction system and a large database containing many years of testing of transformers in the same design family. Trending can then give indications of increasing gas levels of one unit within the family. This may then be related to the known weaknesses or failure patterns in the design family, the related history of gas production, and indicators from the various DGA analytical methods outlined above.

Alternative insulating liquids, such as esters, have been used successfully in electrical equipment since the late 70s. Generally, ester insulating liquids (synthetic and natural) exhibit lower environmental impact relative to most mineral insulating liquids (see IEC 61099, IEC 62770, and IEC 61039). Esters are also used in susceptible environmental areas and inland and offshore wind applications due to their inherently lower toxicity and higher biodegradability. The disposal of esters, chemicals, and sample containers mentioned in this standard, however, can be subject of regulatory requirements and every precaution should be taken to prevent their release into the environment. They have higher flash and fire points and are preferred insulating liquids at stringent fire requirements. Nevertheless, they should not be considered “not flammable”, but only as “less flammable”. Smoke formation in case of fire is much less than with mineral oils.

There are some standards for the maintenance of the liquid itself but few for the interpretation of the dissolved gas analysis. These interpretation techniques have been developed and used for mineral oil for over fifty years. Although the same method of interpretation is applied to esters, the chemistry of esters is significantly different from mineral oil. This leads to significantly different gas formation and the amount of generated gases from mineral oil. This led CIGRE to start data gathering for this work.

Development of IEC standard

Based on market demand and industry request, International Electrotechnical Commission (IEC) technical committee TC10, established a working Group to develop a standard for interpretation of DGA for esters liquids.

Gas generation in a natural and synthetic ester-filled transformer

Esters have a different chemistry from the hydrocarbons of mineral oil. Esters contain the ester functionality, i.e., the carbonyl group and the alkoxy group, which react differently than hydrocarbons. In addition, the natural esters contain various amounts of unsaturation, i.e., olefins, in the hydrocarbon chains. There might be one, two, or three olefins in each chain. The reactivities of these unsaturated hydrocarbons are different from the saturated hydrocarbons of mineral oil. The different properties result in different values in the maintenance procedures, e.g., acidity, as described in IEC 61203 and IEC 62975 and can influence the gassing behaviour of synthetic and natural esters. Ester liquids have already been used for many years in electrical equipment. The most common use is with distribution and industrial (traction and offshore)

transformers. Up to now the experience with medium and power transformers is limited, due to the relative low number of ester-filled transformers in those applications. This is reflected in the limited databases.

Gases generated in ester liquids under potential fault conditions are the same as those generated in mineral oil, however, the ratios and rates may be different. This can be due to the differences in their molecular structure in comparison to mineral oils.

Gassing behaviour under dielectric breakdown and thermal stress from user experience shows that the main fault manifestations in gas-in-oil analyses is similar to those of mineral oil. A lot of systematic research on gassing experience and comparison has been carried out. Results of gas-in-oil behaviour under vacuum extraction of uninhibited mineral oil (acc. IEC 60296), synthetic ester (IEC 61099) and natural ester on soybean basis (IEC 62770) under dielectric and thermal conditions are summarised below. For esters, under dielectric breakdown conditions, mainly hydrogen and acetylene, with a lower quantity of ethylene, are generated.

During gas generation under thermal faults, the amount of methane and ethene produced is much higher than that seen in laboratory ageing testing. For example, thermal stray gassing, 120°C for 64h in air saturated insulating liquid, generally produces low levels of gases in severely hydrotreated inhibited insulating liquids. Uninhibited, or insulating liquids with certain additives, will generate more gases.

Similarity in the gas pattern between ester liquids and mineral oil under corona partial discharge conditions have been reported [8, 9]. Although the gas patterns of synthetic and natural esters for partial discharge, discharge and thermal faults are like those for mineral oils, the individual gas concentrations may be different. Since many ester-filled transformers can have paper or aramid insulation (or both at this stage), it is difficult to evaluate the source of high carbon dioxide concentrations.

Stray Gassing under thermo-oxidative stress

Stray gassing investigations on the presence and absence of air, as well as in presence and absence of copper have been carried out by CIGRE WG D1.70 at 105°C for 48h [10]. The results for synthetic ester (IEC 61099) and for soybean based natural ester (IEC 62770) were compared to uninhibited mineral oil (IEC 60296). Results for hydrogen, methane, and ethane are much higher than mineral oil. No acetylene has been generated under these test conditions. The amount of ethylene generated under these conditions using those insulating liquids was negligible. Behaviour of other types of natural esters can be different due to their chemistry (olefin) differences.

Interpretation Schemes

Transformers and liquid filled electrical equipment have different designs and are operated differently. The gas formation and the proportion of potential fault gases depend on the type and location of faults, as well as the volume, age, and type of the transformer.

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

The interpretation of gas-in-oil analysis presented in the CDV of IEC 63585 consists of combination of four major elements:

1) 90 or 95 percentiles of gas concentrations

2) Two-gas ratios, triangles, or pentagons

Increasing gas ratios combined with higher concentration values are an indication of problems with higher criticality and need to be carefully monitored.

The Duval Triangles and Pentagons for ester insulating liquids allow for the identification of the six potential faults of IEC 60599, and the four additional potential faults of CIGRE, by extrapolation from Pentagons and Triangles for mineral oils [11, 12].

3) Rates of gas increase

Rates of gas increase are dependent on the insulating liquid volume and the temperature involved in the potential fault.

4) Trend development

The trend analysis shows the development of the gas formation over time and can show valuable correlations with other methods – e.g., load dependency of the potential fault gases developed.

Interpretation Scheme

The proposed interpretation scheme is a combination of percentiles, two-gas ratios, gas increase rates, and trend analysis. Gas increase rates and trend analysis may not always be available.

Step			Value	Assessment
1.1	Initial Condition D	$C_2H_2 \geq 90\%$	No Comply	-
1.2	Ratio condition for D	$C_2H_2/C_2H_4 \geq 0,2$	0,001	-
	Evaluation of D fault			No indication of D fault
2.1	Initial Condition T	$C_2H_4 \geq 90\%$	No Comply	-
2.2	Condition for T	$C_2H_4/C_2H_6 > 1$	< 0,1	-
	Evaluation T Fault			No indication of T fault
3.1	Initial Condition PD	$H_2 \text{ and } CH_4 \geq 90\% \text{ and even } > 98\%$	Comply	Indication of PD, see also remarks in 3.2.5
3.2	Ratio condition for PD	$1,0 > CH_4/H_2 > 0,1$	0,57	Indication of PD, consider sampling conditions, see also 3.2.1



3.3	Additional ratio condition for PD	$6,0 > \text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 4,0$	5,46	Indication of PD
	Evaluation of PD Activity			Indication of PD

D = Discharge; T – Temperature; PD – Partial Discharge

Conclusions

IEC TC10 WG45 was established with the task to prepare a standard for the interpretation of Dissolve Gas Analysis (DGA) in natural and synthetic esters. This standard is going to publish as IEC63585 with an expected publication date the beginning of year 2026. This document will report gas formation in different esters depending on their source and type of liquid. This will include stray gassing and different methods of DGA interpretations, such as gas ratio, 90, and 95% percentile of gas concentration, trend of and rate of gas formation, graphical presentation, and key gases.

REFERENCES

- [1] IEC 60567, Guide for the sampling of gases and oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases, 1992.
- [2] Dornenburg, E., & Strittmatter, W. (1974). Monitoring oil-cooled transformers by gas-analysis. *Brown Boveri Review*, 61(5), 238-247.
- [3] Rogers, R. R. (2007). IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis. *IEEE transactions on electrical insulation*, (5), 349-354.
- [4] Church, J.O., Hauptert, T. J. and Jakob, F. (1987). Analysis incipient faults with dissolved gas nomograph. *Electrical World*, 40-44.
- [5] Kan, H. (1980). Automated dissolved gas analysis for transformer monitoring. *Mitsubishi Electric Advance*, June.
- [6] Duval, M. (2002). Dissolved gas analysis: It can save your transformer. *IEEE electrical insulation magazine*, 5(6), 22-27.
- [7] Mollmann, A., & Pahlavanpour, B. (1999). New guidelines for interpretation of dissolved gas analysis in oil-filled transformers. *Electra*, 186, 31-51.
- [8] Wang, Z., Wang, X., Yi, X., Li, S., & Hinshaw, J. V. (2013). Gas generation in natural ester and mineral oil under partial discharge and sparking faults. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 29(5), 62-70.



- [9] Meira, M., Ruschetti, C., Álvarez, R., Catalano, L., & Verucchi, C. (2019). Dissolved gas analysis differences between natural esters and mineral oils used in power transformers: a review. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(24), 5441-5448.
- [10] CIGRE Brochure 927, New laboratory methodologies for investigating of insulating liquids. Further developments in key functional properties, 2024.
- [11] Duval, M. (2008). The Duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(6), 22-29.
- [12] Duval, M., & Lamarre, L. (2014). The Duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30(6), 9-12.

Referenten

Prof. Dr. Thomas Norrby

Nynas AB, Sweden

Thomas Norrby is Technical Manager for Lubricants and Electrical Industry applications at Nynas AB, where he leads product development and technical support for naphthenic base oils and transformer liquids.

With more than 25 years of industry experience, Thomas has extensive expertise in lubricants and transformer oil formulation, application modelling, and tribology. Prior to joining Nynas in 2014, he spent over 15 years at Statoil Lubricants, including more than a decade as R&D Manager.

Thomas holds a Ph.D. in Organic Chemistry from KTH Royal Institute of Technology (1997). He is also Adjunct Professor at KTH, specialising in tribology and tribochemical studies of base oils and lubricants.

He is a frequent speaker at international conferences and an active contributor to industry-academia collaboration.



Notizen:

[illegible]



Stray gassing tests and data as powerful diagnosing tools – case-studies



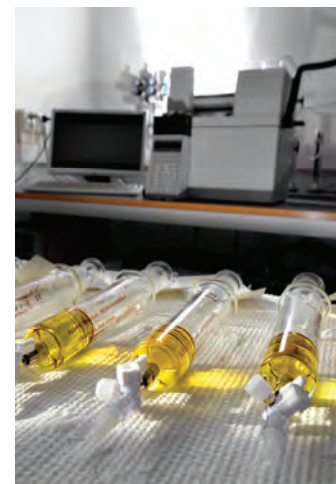
Prof. Thomas Norrby, Technical Manager ELI & LUB
Dr. Hugo Campelo, Senior Technical Advisor ELI

1

Outline



- Stray gassing in transformer oils results from slow oxidative degradation at moderate temperatures (90–150 °C), producing mainly hydrogen, methane, ethane, and carbon monoxide
- The specific gas pattern depends on oil composition and is well characterized by standardized tests (ASTM D7150, IEC 60296)
- Notably, acetylene is not produced under these conditions, allowing differentiation from fault-induced gassing
- For practical diagnosis, it is essential to recognize the typical gas ratios for each oil type

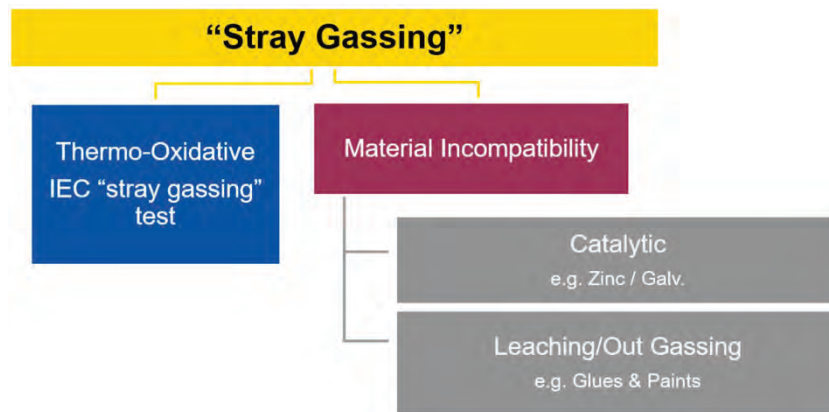


2 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

2

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Introduction



- Illustration of the different sources of gas generation occurring – simultaneously (or not) inside a transformer

3 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

3

Stray gassing reaction mechanisms

- Stray gassing in transformer oils results from slow oxidative degradation at moderate temperatures (90–150 °C), producing mainly hydrogen, methane, ethane, and carbon monoxide
- The specific gas pattern depends on oil composition and is well characterized by standardized tests (ASTM D7150, IEC 60296)
- Notably, acetylene is not produced under these conditions, allowing differentiation from fault-induced gassing
- For practical diagnosis, it is essential to recognize the typical gas ratios for each oil type



4 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

4

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Stray gassing reaction mechanisms (II)



- At the moderate temperatures involved in stray gassing (typically 90–150 °C in service, or 120 °C in lab tests), the primary gas-generation mechanism is a slow oxidative degradation of the oil – essentially a free-radical chain reaction often termed autoxidation
- This process does not require extreme heat; it proceeds gradually whenever oxygen is available
- The four classical steps are:
 - Initiation
 - Propagation (Oxidation)
 - Decomposition
 - and Termination



5 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

5

Stray gassing tests and typical results



- The net effect of autoxidation in oil is a cocktail of small gases dissolved in the fluid: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , CO (and some CO_2)
- This corresponds to the “stray gassing” signature observed empirically in laboratory testing
- Importantly, no Acetylene (C_2H_2) is produced by these low-temperature chemical reactions – if any acetylene is found in DGA, it cannot be due to stray gassing and indicates a true electrical fault, or very high-temperature conditions

6 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

6

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Multiple DGA results after stray gassing tests in NYTRO TVBU



- Multiple stray gassing NYTRO TVBU over five years
- ASTM D7150 air sparged samples after 164 h at 120 °C

	2021	2022	2023	2024	2025	Average
Gas	(µ/l)	(µ/l)	(µ/l)	(µ/l)	(µ/l)	
Hydrogen (H ₂)	157	175	165	137	142	155
Methane (CH ₄)	168	96	78	173	167	136
Ethane (C ₂ H ₆)	158	94	72	149	139	122
Ethylene (C ₂ H ₄)	5	4	3	4	4	4
Acetylene (C ₂ H ₂)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Carbon Monoxide (CO)	214	221	207	256	216	223
Carbon Dioxide (CO ₂)	678	541	516	377	505	523
Nitrogen (N ₂)	66148	53779	51160	>50000	61935	58256
Oxygen (O ₂)	2803	2773	3355	<500	1093	2506

Ratios:

1.0
0.9
0.8

1.4

3.4

7 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

7

Case study - 110 kV Network Transformer



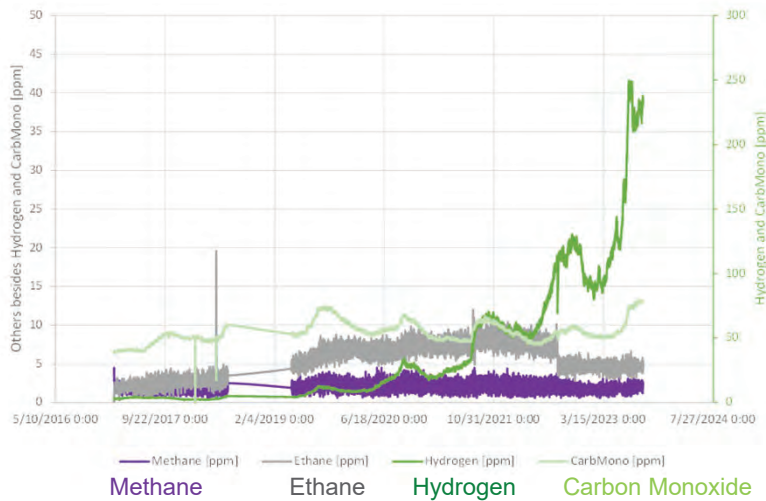
- In operation in Europe since 2017
- 25 MVA / 110 kV free breathing unit immersed in 14.5 mt of NYTRO TVBU
- The unit was energized early 2017
- The full DGA and water content monitoring from energization showed very low diagnostic gas and water content until summer 2020, when the online hydrogen rose above baseline, although never went above 50 ppm
- Alternating cycles of elevated (summer) and lowered (winter) hydrogen levels, with time of year 2020 to 2022
- Spring of 2023 the online hydrogen began to rise sharply reaching just over 250 ppm by the middle of the summer

8 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

8

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Case study - 110 kV Network Transformer (II)



9 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

9

Case Study - 110 kV Network Transformer (III)

- Stray gases concentrations, in ppm and normalized in ratios, extracted from **online DGA** data series plotted side-by-side with the average **laboratory** stray gassing (ASTM D7150) results for the same unused TVBU oil

	Online DGA 9/11/2023	Online DGA* 9/11/2023	TVBU Oil (ASTM D7150) Air	TVBU Oil* (ASTM D7150) Air
Hydrogen (H ₂)	231.1	1.0	155.0	1.0
Methane (CH ₄)	2.3	0.0	136.0	0.9
Ethane (C ₂ H ₆)	4.6	0.0	122.0	0.8
Carbon monoxide (CO)	79.4	0.3	223.0	1.4

10 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

10

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Case Study - 110 kV Network Transformer (IV)

- Full DGA and water content in **in-service** samples before and after stray gassing tests according to ASTM D7150 Method A
- Three clay treatments and addition of DBPC required to pre-condition sample
- Highly unusual **negative** KF values (!) found (repeatedly)

Gas	Method	Unit	After N ₂ sparging	N ₂ sparged	After Air sparging	Air sparged
				164 h at 120 °C		164 h at 120°C
Hydrogen (H ₂)	IEC 60567	μL/L	< 5	1673	< 5	2199
Methane (CH ₄)	IEC 60567	μL/L	< 1	373	< 1	237
Ethane (C ₂ H ₆)	IEC 60567	μL/L	< 1	357	< 1	244
Ethylene (C ₂ H ₄)	IEC 60567	μL/L	< 1	16	< 1	20
Acetylene (C ₂ H ₂)	IEC 60567	μL/L	< 1	<1	< 1	< 1
Carbon Monoxide (CO)	IEC 60567	μL/L	< 25	640	< 25	1049
Carbon Dioxide (CO ₂)	IEC 60567	μL/L	33	505	414	1356
Nitrogen (N ₂)	IEC 60567	μL/L	70828	72386	58274	59462
Oxygen (O ₂)	IEC 60567	μL/L	1328	411	26223	439
Water Content	IEC 60814	mg/kg	-2,1	87	-1,9	83

11 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

11

Case Study - 110 kV Network Transformer (V)

- Chemical analysis by GC-MS revealed benzyl alcohol and its oxidation product benzaldehyde
- This caused the abnormal Hydrogen levels
- Benzyl alcohol is a solvent (25%) in the Novolac epoxy paint utilized to paint the inner tank walls
- The paint was never cured properly
- Areas where the paint was missing were clearly seen on the inner ceiling
- The paint could be removed with just wiping with a gloved finger
- The chemical contaminant interfered with the analytical reagent in the KF analysis



12 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

12

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Case Study – Solar power plant (I)



- › A fleet of 54 medium power transformers 33 kV / 0.8 kV with 6.75 MVA
- › Manufactured in 2021, commissioned 2022
- › Each with two inverters, meaning they have a **double** low-voltage winding
- › Oil type TVUB
- › Thermally Upgraded Kraft paper (TUK)
- › Rubber bag in the conservator
- › Oil analysis from units #49 & #51; all good

Property	Method (Unit)	Transformer #51	Transformer #49
Colour	ISO 2049	L1.0	L1.0
Appearance	IEC 60296	Clear, Free	Clear, Free
Breakdown Voltage	IEC 60156 (kV)	88	73
Water Content	IEC 60814 (ppm)	14	15
Total Acid Number	IEC 62021 (ppt)	0.01	0.02
DDF @ 90 °C	IEC 60247	0.0051	0.0046
IFT	ASTM D971 (mN/m)	32.8	32.4
2-FAL	IEC 61198 (ppm)	<0.05	<0.05

13 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

13

Case Study – Solar power plant (II)



- › DGA for unit #49
- › Analysis of an original in-service TVUB oil sample, in a further degassed sample, and in a sample after stray gassing testing according to IEC 60296
- › Methane and ethane levels are **high**
- › CO₂ to CO ratio of 20 is **higher** than expected
- › Gas ratios in third column are as expected for TVUB, no *contamination* warning

Transformer #49	Original Sample	Degassed Sample	Air, No Copper @ 105 °C
Hydrogen (H ₂)	7	0	191
Methane (CH ₄)	216	0	90
Ethane (C ₂ H ₆)	729	0	90
Ethylene (C ₂ H ₄)	16	0	2
Acetylene (C ₂ H ₂)	0	0	0
Carbon Monoxide (CO)	265	0	162
Carbon Dioxide (CO ₂)	6092	1	361

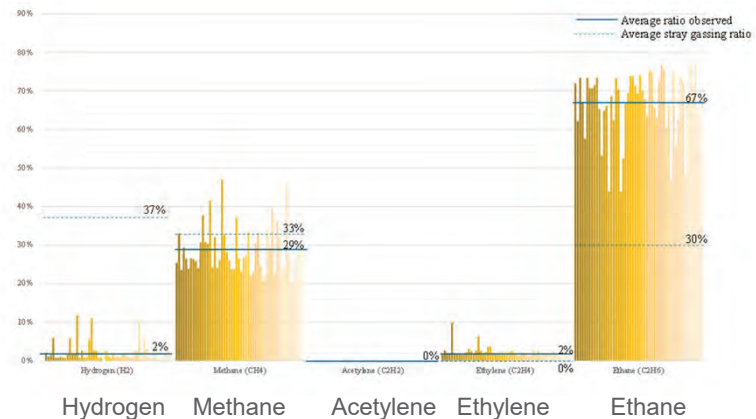
14 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

14

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Case Study – Solar power plant (III)

- The observed gas pattern of all the transformers is very different from the stray gassing pattern of the correspondent unused oil
- The in-service TVUB oil samples exhibit predominantly Ethane and Methane in an average ratio of around 2.5
- In some units there are traces of hydrogen and ethylene
- No Acetylene is observed
- The average $\text{CO}_2:\text{CO}$ ratio is around 18 (*reference value free-breathing ca.10*)



15 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

15

Case Study – Solar power plant (IV) – Preliminary assessment

- The elevated –for rubber bag units – ratios of $\text{CO}_2:\text{CO}$ together with prominent ratios of ethane and methane (without hydrogen) led us to a preliminary assessment of mildly overheated transformers,
- ...or simply transformers that have higher ratios of hot areas to oil due to the double low voltage winding configuration
- It is important to recall that, up to our best knowledge, there is currently no relevant public statistics on the gassing patterns of solar power plant transformers
- **Increase sample frequency was the recommendation. Focus further testing on three representative units of the fleet and conduct more stray gassing tests in a different laboratory. Include methanol measurements as these transformers have TUK paper.**

16 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

16

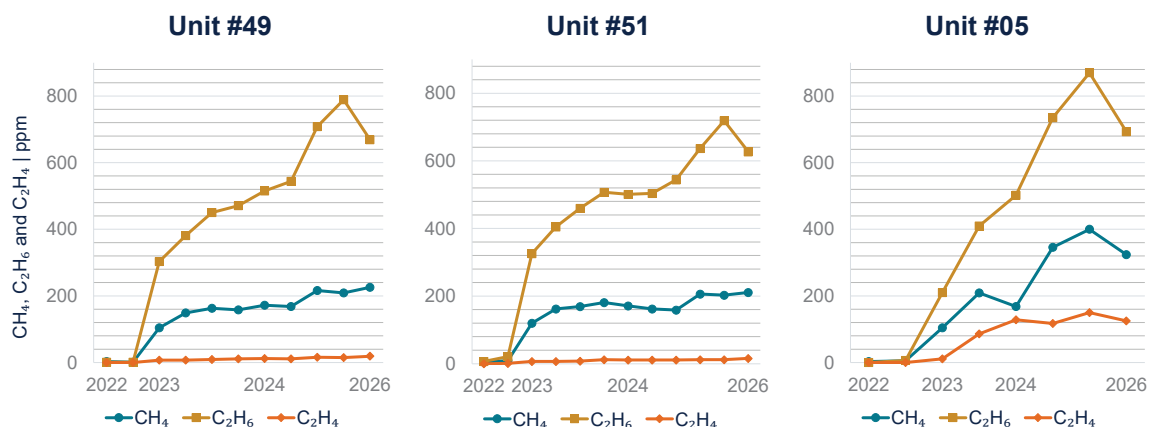
19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Case Study – Solar power plant – Continuation

- After sampling the three units with highest concentrations of thermal-gases (in January 2026)...

Six Months Later

Case Study – Solar power plant (V) – Thermal-gases evolution



- Unclear if the thermal gases (methane, ethane and ethylene) are growing or stabilizing. The last results are lower or very similar. Not a clear increase over the last six months....

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal



Case Study – Solar power plant (VI) – Detailed stray gassing



- DGA and Stray Gassing, Unit #51
- TVBU *as-is*, and with DBPC added

Gas	Method	Unit	P1-B51 sample				P1-B51 sample + 0.38% DBPC (Inhibitor)			TVBU (unused)		TVBU (unused) + 0.38% DBPC	
			DGA as received	After AIR sparging	Stray Gassing IEC 60296 AIR saturated with copper strip	Stray Gassing ASTM D7150 AIR saturated	After AIR sparging	Stray Gassing IEC 60296 AIR saturated with copper strip	Stray Gassing ASTM D7150 AIR saturated	Stray Gassing IEC 60296 AIR saturated with copper strip	Stray Gassing ASTM D7150 AIR saturated	Stray Gassing IEC 60296 AIR saturated with copper strip	Stray Gassing ASTM D7150 AIR saturated
Hydrogen (H ₂)	IEC 60567	µL/L	8	< 5	781	824	< 5	603	666	103	142	11	109
Methane (CH ₄)	IEC 60567	µL/L	211	< 1	145	207	< 1	7	24	142	167	2	10
Ethane (C ₂ H ₆)	IEC 60567	µL/L	627	< 1	144	180	< 1	1	6	173	139	1	3
Ethylene (C ₂ H ₄)	IEC 60567	µL/L	16	< 1	5	7	< 1	4	6	2	3	1	1
Acetylene (C ₂ H ₂)	IEC 60567	µL/L	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Carbon Monoxide (CO)	IEC 60567	µL/L	322	< 25	676	886	< 25	539	858	208	226	116	182
Carbon Dioxide (CO ₂)	IEC 60567	µL/L	7765	461	1500	1740	477	1511	1891	466	498	436	487
Oxygen (O ₂)	IEC 60567	µL/L	3827	28946	301	265	29049	2590	2011	2397	1093	11752	10684
Nitrogen (N ₂)	IEC 60567	µL/L	76922	63792	62963	64009	62689	63017	62442	58274	60862	59506	61347

Lab testing shows a hydrogen-dominant stray-gassing pattern. It does not reflect oil in service, where H₂ remains moderate to low and ethane/methane ratios differ markedly.

19 |

© Nynas AB (publ). All rights reserved.

19

Case Study – Solar power plant (VII) – Methanol on top of 2-FAL



- 2-FAL remains non-detectable (TUK paper)
- By contrast methanol and ethanol concentrations are clearly above detection limits of 0.025 ppm
- Methanol ranges from 370 ppb to 600 ppb. 600 ppb is for Unit #05 which shows some ethylene

Property	Method	Unit	P1-B49 Sample	P1-B05 Sample	P1-B51 Sample
Appearance	IEC 60422	NA	Clear, free from sediment and suspended matter	Clear, free from sediment and suspended matter	Clear, free from sediment and suspended matter
Colour	ISO 2049 / ASTM D1500	NA	0,5	< 1,0	< 0,5
Water Content	IEC 60814	mg/kg	9,1	11	10
Breakdown Voltage	IEC 60156	kV	64	59	61
Inhibitors / Antioxidants (phenolic)	IEC 60666	% m/m	ND (< 0.01)	ND (< 0.01)	ND (< 0.01)
Interfacial Tension	IEC 62961	mN/m	29,7	27,6	29,5
DDF at 90°C	IEC 60247	NA	0,0076	0,0092	0,0084
Acidity / Neutralisation Value	IEC 62021	mgKOH/g	0,02	0,02	0,02
2-furfural (2FAL)	IEC 61198	mg/kg	ND (< 0.05)	0,07	ND (< 0.05)
2-furfural (2FOL)	IEC 61198	mg/kg	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)
5-hydroxymethylfurfural (5HMF)	IEC 61198	mg/kg	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)
2-acetyl furan (2ACF)	IEC 61198	mg/kg	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)
5-methylfurfural (5MEF)	IEC 61198	mg/kg	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)	ND (< 0.05)
Methanol	IEC TR 63025	mg/kg	0,45	0,60	0,37
Ethanol	IEC TR 63025	mg/kg	0,21	0,36	0,27

20 |

© Nynas AB (publ). All rights reserved.

20

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Case Study – Solar power plant (VIII) – Methanol on top of 2-FAL



Review

Methanol Marker for the Detection of Insulating Paper Degradation in Transformer Insulating Oil

Jocelyn Jalbert ^{1,*}, Esperanza M. Rodriguez-Celis ¹, Oscar H. Arroyo-Fernández ², Steve Duchesne ¹ and Brigitte Morin ¹¹ Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ), Varennes, QC J9V 1S1, Canada; rodriguez.marielalireq.ca (E.M.R.-C.); duchesne.steve@ireq.ca (S.D.); morin.brigitte@ireq.ca (B.M.)² Research Chair on the Aging of Power Network Infrastructure (VIAHT), Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), Chicoutimi, QC G7H 2B1, Canada; arroyo.oscar@ireq.ca

* Correspondence: jalbert.jocelyn@ireq.ca; Tel.: +1-450-652-8996

Received: 12 August 2019; Accepted: 19 September 2019; Published: 18 October 2019

**Abstract:** This manuscript presents a comprehensive literature review with the aim to provide readers a reference document with up-to-date information on the field of methanol use as a chemical marker. It has been a little more than a decade since methanol was first introduced as a marker for assessing solid insulation condition in power transformers. It all started when methanol was identified in the

Table 6. Methanol threshold level and its condition [87].

[CH ₃ OH] * (ppb)	Mean Calculated DP _v	Paper Condition
0–50	1000–700	Healthy
51–200	700–450	Moderate deterioration
201–1440	450–250	Extensive deterioration
>1440	<250	End-of-life criteria

* Corrected at 20 °C using an equation published in reference [79].

- No definitive relationship between degree of polymerization (DP_v) and methanol concentration is established in IEC or IEEE guidance, and the published evidence remains limited and inconsistent.
- According to the reference ranges above, the transformer's **insulating paper may be near the transition from moderate to extensive degradation**, supporting—but not independently confirming—the overheating diagnosis.

21 |

© Nynas AB (publ). All rights reserved.

Case Study – Solar power plant (IX) – Way(s) forward



Level of Complexity / Cost

Option 0 (preferred): Gas levels seem potentially stable. No transformers tripped. Keep monitoring.

Option 1: Degass the P1-B05

Option 2: Degass the P1-B49 and inhibit with DBPC 0.38%

Option 3: Reclaim/Regenerate the P1-B51 and inhibit with DBPC 0.38%

Option 4: Drain + Flush + Replace type B by the correspondent type A oil

Option 5: Do all the options in different transformers in different blocks of the solar power plant.

22 |

© Nynas AB (publ). All rights reserved.



Concluding remarks



- › Stray gassing tests and data provide a robust diagnostic tool for distinguishing between normal oil behaviour and genuine transformer faults or chemical contamination
- › The case studies demonstrate that understanding the specific stray gassing patterns of each oil type is essential for accurate interpretation of DGA results and for avoiding misdiagnosis
- › Standardised tests such as ASTM D7150 and IEC 60296 enable reliable benchmarking
- › Real-world cases highlight the importance of considering oil composition, operational context, and potential contaminants
- › Ongoing monitoring and further laboratory investigations remain crucial, especially for new transformer designs and applications such as solar power plants, where public data on gassing patterns is still limited



23 | © Nynas AB (publ). All rights reserved.

23

Advancing the transition to a sustainable society



24

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Referenten

Robert Copley

Shell Midel

Robert Copley is the Business Development Manager for Western Europe at Shell Midel. With more than ten years of experience at Midel, Robert has supported numerous utilities and organisations in adopting ester-based insulating fluids as a safer, more sustainable approach to asset management.

A qualified electrical engineer, Robert has spent his career working with high-voltage equipment across global markets. He specialises in replacing mineral oil with synthetic and natural ester dielectric fluids for power transformers and distribution assets, helping customers improve fire safety, meet environmental requirements, and increase operational flexibility through enhanced overload capability.



Notizen:

[illegible]



Keeping the lights on is more complex than ever

Power Sector: Core Challenges

Population Growth and Societal Shifts

Growing populations, powering remote areas, electrification of transport, 'always on' due to data centre and AI growth.

More Diversification in the Energy Mix

Energy grids are decarbonising and accelerating the adoption of renewable energy sources.

Grid Resiliency Challenges

Ageing infrastructure. Asset and network management decisions influenced by CAPEX/OPEX constraints.

8 September 2026 2

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



What are Shell MIDEI ester transformer liquids?

Synthetic Ester



Created through the reaction of an alcohol with short chain fatty acids.

Natural Ester



95%+ Bio-based.
Derived from canola and soybean seed oil.

Date appears here

3

What are Shell MIDEI ester transformer liquids?

Advanced products and an exciting growth category

Natural esters

Seed crop base oil

Shell MIDEI eN 1215

1 Soybean

Shell MIDEI eN 1204

2 Rapeseed



Synthetic esters

Multiple potential sources

Shell MIDEI 7131

3 Synthetic

Shell MIDEI Regen

4 Regenerated Synthetic

Company name appears here

4

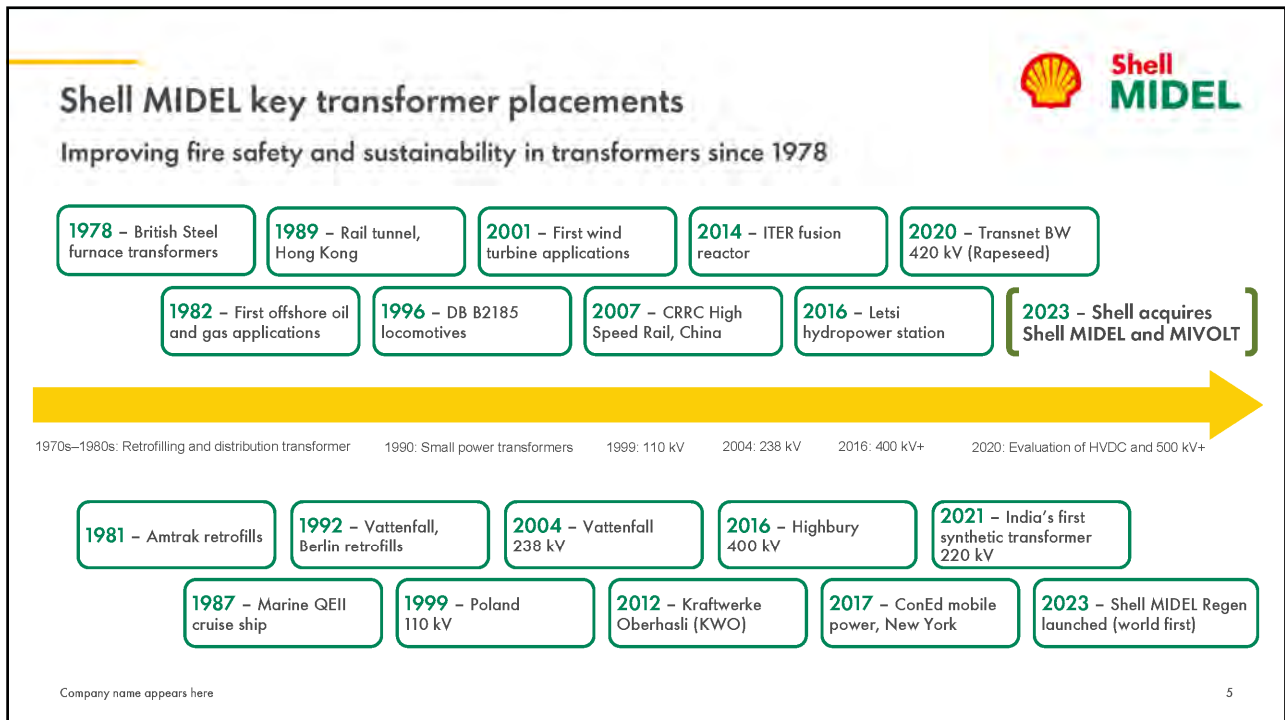
19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

207



TLM 2026



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Asset Challenges & Drivers



[Age, location, power demands]

[Increase fire safety]

[Buildings and Standards]

[Reduce environmental risk]

[New fire suppression]

[Business continuity]

[More civil work]

[Insurance]

Company name appears here

Date appears here

7

Shell MIDEL range of natural and synthetic ester liquids⁹

Established alternative to conventional mineral oil



Property	Conventional mineral oil	Shell MIDEL eN 1215 (Soybean)	Shell MIDEL eN 1204 (Rapeseed)	Shell MIDEL 7131 (Synthetic)	Shell MIDEL Regen (Recycled)
Fire safety class	O1	K2	K2	K3	K3
Fire point (°C)	170 °C	>300 °C	>300 °C	>300 °C	>300 °C
Flash point (°C)	140 - 170 °C	>315 °C	>315 °C	>250 °C	>250 °C
Net calorific value	46.0 MJ/kg	37.2 MJ/kg	<37.5 MJ/kg	<32 MJ/kg	<32 MJ/kg
Biodegradable	✗	✓	✓	✓	✓
Moisture saturation at 20 °C	55 ppm	1,100 ppm	1,100 ppm	2,700 ppm	2,700 ppm
Oxidation ASTM D2112	300 min	<20 min	<40 min	421 min	
Pour point typical	- 50 °C	-18 °C	-31 °C	-56 °C	-56 °C
Kinematic viscosity at 40 °C (mm ² /s)	8.7 - 11	32	37	29	29
High-temperature profile	Standard	Good	Good	Excellent	Excellent

Company name appears here

8

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal

Shell MIDEI for fire safety?

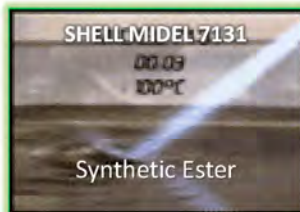
Ignition Resistance Test: SHELL MIDEI Vs Mineral Oil



3 mins



4 mins



3 mins



70 mins

Company name appears here

Date appears here

9

New unit? There is another option

Upgrading the existing asset in-situ with a 'Retrofill'



NEW UNIT



RETROFILL

Company name appears here

Date appears here

10

19. Transformer-Life-Management Konferenz

21.-22. September 2026, Frankenthal



Retrofilling with SHELL MIDEAL



- Replacing mineral oil with SHELL MIDEAL ester transformer fluid
- Expedited solution vs time for purchasing new transformer
- Straightforward, cost effective and proven
- Underpinned by 40+ years of SHELL MIDEAL retrofilling experience
- Performed by a local qualified transformer service company
- Minimal downtime and network disruptions, with most retrofills being completed in under a day

Company name appears here

Date appears here

11



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal



Technical Considerations Include



- Distribution transformer <33kV – no issues envisaged
- Transformers >33kV, consult SHELL MIDEL technical team
- Miscibility guidance
- On Load Tap Changers
- Transformer checks to confirm suitability include:
 - Previous oil results i.e. DGA, ideally 2 results prior to retrofill
 - Furan analysis for indication of paper condition
 - Can't repair paper insulation - but does prolong cellulose life

Company name appears here

Date appears here

13

The Retrofilling Process



1

DRAIN



2

RINSE



3

DRIP



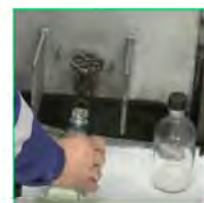
4

REFILL



5

TEST



Company name appears here

Date appears here

14

19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Duquesne Light & Power

Utility Retrofill – Avoiding expensive civil works on the Ohio River



Relocation of a spare 138/23 kV transformer next to existing substation building, situated on an island on the Ohio River

Risk assessment required intervention before re-energizing

Several options considered:

- 1) Instal reinforced concrete blast walls
- 2) 'Retrofill' with Shell Middel 7131 (OEM recommended)

The synthetic ester liquid mitigated transformer fire risk

– and removed the need to instal blast walls in the substation

The fluid's non-hazardousness and readily biodegradable ester base oil formulation (according to OECD 301B test criteria) also supported the safeguarding of potential leaks into the Ohio River



Retrofilling with Shell Middel 7131 negated expensive, carbon-heavy reinforced concrete blast walls.

Company name appears here



19. Transformer-Life-Management Konferenz
21.-22. September 2026, Frankenthal

Service für alle Transformatoren – aus einer Hand



Transformatoren sind das Herzstück Ihrer Energieinfrastruktur. Mit unserem Life-Time-Extension Programm verlängern Sie die Betriebsdauer Ihrer Anlagen – sicher, wirtschaftlich und nachhaltig

- Leistungssteigerung durch Umstellung, Upgrade und Überholung der Kühlanlage
- Erhöhung der Leistungsdichte durch Erneuerung des Aktivteils
- Upgrade einzelner Komponenten
- Ölregeneration und Aufbereitung
- Austausch und Recycling von Transformatoren sowie einzelner Transformatorenkomponenten



Akustische Messung und Optimierung von Transformatoren



Mit gezielten Schallmessungen identifizieren wir relevante Geräuschquellen und reduzieren akustische Emissionen in Energieanlagen, städtischen Versorgungsnetzen und Wohngebieten durch maßgeschneiderte Lösungen.

- Identifizierung von Geräuschquellen durch Geräuschmessungen vor Ort mit modernstem Equipment
- Wirksamkeitsprognose und Bewertung von Geräuschminderungslösungen
- Beratung zu Wirtschaftlichkeit, Gesetzeskonformität und technischer Umsetzbarkeit



Service für Transformatoren

Nachhaltig, wirtschaftlich,
verbindlich.

Alles aus einer Hand.



[siemens-energy.com/tlm](https://www.siemens-energy.com/tlm)

Maximale Verfügbarkeit und Kostenoptimierung durch intelligenten Transformatoren-Service

Siemens Energy bietet umfassende Dienstleistungen für alle Transformatorentypen und -hersteller über deren gesamte Lebensdauer hinweg.

Von Beratung und Consulting, Installation und Inbetriebnahme über Diagnose, Reparatur und Modernisierung bis hin zu langfristigen Wartungsprogrammen, ist jedes Angebot darauf zugeschnitten, hohe Zuverlässigkeit, betriebliche Effizienz und ökologische Nachhaltigkeit zu gewährleisten.

Lösungen wie „Transformer as a Service“ ermöglichen einen schnellen Einsatz in Notfällen. Sie stellen die Netzstabilität rasch wieder her und sind speziell auf Betreiber von Anlagen für erneuerbare Energien zugeschnitten.

Mit globaler OEM-Expertise und einem weltweiten Netzwerk lokaler Servicezentren ermöglicht Siemens Energy Energieversorgern und Industriekunden, Ausfallzeiten zu reduzieren, die Lebensdauer von Transformatoren zu verlängern sowie regulatorische und leistungsbezogene Anforderungen zu erfüllen.

Wenden Sie sich gerne direkt an unsere Mitarbeiter vor Ort oder schreiben eine Email an: tlm.de@siemens-energy.com

Detaillierte Informationen
zu unserem Service für
Transformatoren

www.siemens-energy.com/tlm



Siemens Energy Kunden profitieren von:

Kostenoptimierung: Individuelle Serviceverträge und Lebenszyklusprogramme bieten vorhersehbare Kosten, Verfügbarkeitsgarantien und maßgeschneiderte Servicepakete.

Zuverlässigkeit: Maximale Verfügbarkeit u.a. durch intelligente Wartungsstrategien.

Leistung: Optimierte Auslastung, maximal effizienter Transformatorbetrieb und minimierte Energieverluste.

Qualität, Sicherheit und Compliance: Einhaltung von IEC und IEEE Normen sowie lokalen Sicherheitsstandards schützen Personal und Umwelt.

Nachhaltigkeit: Verringerte Umweltbelastung z. B. durch Services zur Modernisierung und Aufrüstung von Transformatoren.

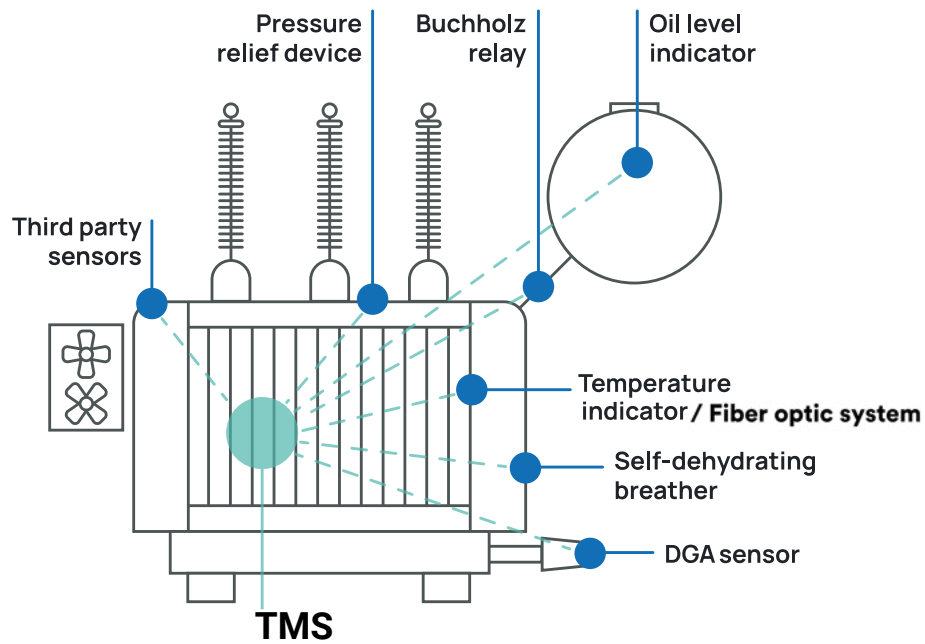
Langjähriger Expertise: Jahrzehntelange Erfahrung sichert fundierte Lösungen und innovative Ansätze für die Herausforderungen unserer Kunden.



The fastest way forward
is in a circle

To achieve our sustainability goals, we are developing circular product flows. Take our premium re-refined transformer fluid, NYTRO RR 900X, for example. It delivers performance equal or superior to conventional transformer oils.





Modular ecosystem of sensors & TMS

Service
Installation & Commissioning

Customer support
Dedicated hot line

Consulting services
Data interpretation, reports, consultancy



Contact us & get support :

medica@comem.com

www.comem.com



Trust. Service. Experience.

For nearly 30 years, Ergon has earned a reputation as a trusted and reliable producer and supplier of HyVolt insulating liquids.

Wherever You Power, There's a HyVolt Solution.

ERGON

HyVolt
| Dielectric Fluids

HyVolt.com

Alterungsprozesse wie Oxidation oder thermischer Abbau wirken sich auf die Isoliermedien unterschiedlich stark aus, führen aber immer zur Verschlechterung der chemischen und dielektrischen Eigenschaften. Mit unseren Messgeräten sind sie in der Lage frühzeitig auf Fehler zu reagieren und reduzieren unplanmäßige Wartungsarbeiten. Sie erhalten eine detaillierte Zustandsprüfung des Transformators und erkennt frühzeitig Gasbildungen aufgrund thermischer Fehler oder elektrischer Entladungen. Dadurch können Sie sicherstellen, dass ihre kritische Infrastruktur für die Anforderungen von heute und morgen gerüstet ist.

OSM2 Pro

- Vollautomatische Kontaminationsfreie Isolierölproben Entnahme am Trafo
- nach Norm DIN EN 60475
- für alle Isolieröle, für Hermetik und offene Trafo's geeignet
- Wiederbefüllung mit Isolieröl nach der Probenahme möglich



MobilGC2

- Mobile normgerechte Gas in Öl Analyse nach ASTM D3612 und IEC 60567
- eine Kalibrierung für alle neuen und gebrauchten Isolieröle
- Analyse der Buchholzgase
- Hohe Empfindlichkeit
- Auswertung der Analyse mit Software Expertsystem
- 40 Stunden vor Ort Dauerbetrieb möglich

TOGAGC2

DGA Analyse mit Vacuumentgasung quecksilberfrei zur Analyse der gelösten Gase nach ASTM D3612 und IEC 60567

- Vollautomatischer Ablauf
- Messung des Gesamtgasgehalt
- eine Kalibrierung mit einem günstigen rückführbaren Kalibriergasgemisch geeignet für alle neuen oder gebrauchten Isolieröle
- Bedienerfreundliche Menüführung
- keine zusätzliche Probenvorbereitung
- Säulen mit individuellen Regelungen zur sensitiven Trennung
- sehr schnelle Messung dank Quick Cooling zum Start der neuen Messung
- Leistungsaufnahme unter 500W
- empfohlen für den Heat Run Test
- optional aufrüstbar mit einem Autosampler für 16 oder 32 Ölproben



Ölaufbereitung und Ölreinigung

Transformatoren sind wartungsarm, aber nicht wartungsfrei sie benötigen Pflegemaßnahmen, mit zunehmendem Alter steigt die Anzahl der Teilentladungen. Hauptsächliche Ursache dieser lokalen Kurzschlüsse ist die chemische Alterung der Isolierstoffe (Öl und Zellulose) im Transformator. Diese Alterung wird neben Sauerstoff und Säuren in erster Linie durch Wasser bewirkt.

Durch eine kontinuierliche Entgasung, Entwässerung und Filtration des Isolieröles wird der Sauerstoffgehalt, der Wassergehalt sowie die partikuläre Verschmutzung im Trafo auf einem konstant niedrigen Niveau gehalten, die Durchschlagspannung des Isolieröles erhöht und damit eine Erhöhung der Betriebssicherheit und eine Verlängerung der Lebensdauer der Isolierung erreicht.

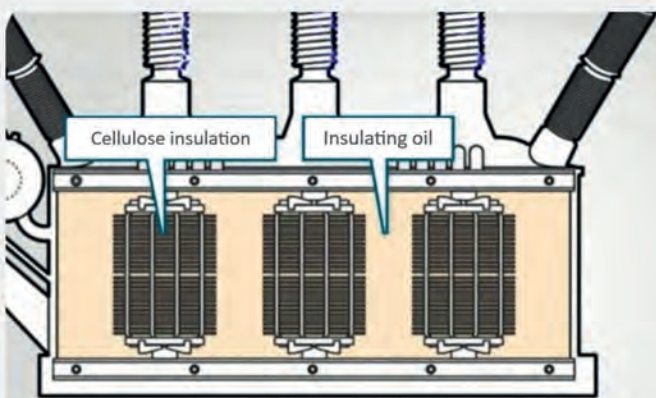
Wir bieten Ihnen mit unseren Filter und Entgasungssystemen die Möglichkeit die Lebensdauer ihres Transformators wesentlich zu erhöhen.

Challenges

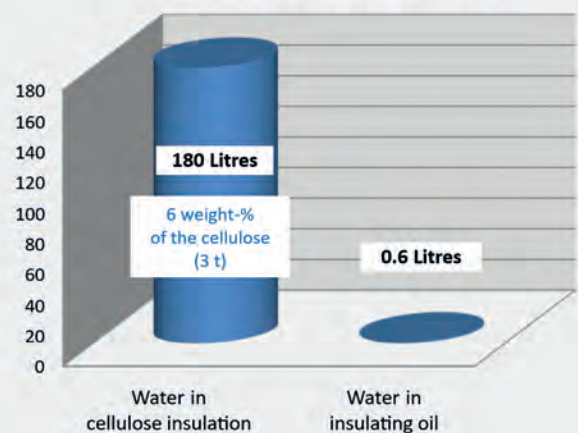
The water is located in the cellulose insulation

Why temporary oil drying and oil changes are suboptimal

Oil weight: 20,000 Litres
Cellulose insulation: 3 Tons



Distribution of water in transformers
30 ppm water measured in oil at 30 °C



MEHR INFORMATIONEN

Erfahren Sie mehr über unsere Lösungen zur Zustandsüberwachung, Analyse und Aufbereitung von Transformatoröl. Scannen Sie den QR-Code und entdecken Sie weitere Informationen, technische Details und Anwendungsmöglichkeiten.



Das Öl-Seminar

für Transformatoren
mit praktischen Messungen im Labor



Steigern Ä! %! &\$'(" \$) #*+",(#- eit

. #/ !% \$ Ä! 0 issinterpr tationen
45# #&\$('61 \$ # ",,\$!11 7

Öl-Seminare im Überblick

Öl-Seminar 1

Im Öl-Seminar 1 vermitteln wir die Grundkenntnisse der Ölanalyse, welche Öle z.Zt. verwendet werden, Handhabung und richtiger Umgang mit der Ölprobe und worauf Sie achten sollten um reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen. Mit Praxisanteil Öl-Probenentnahme und Analyse.

Öl-Seminar 2

Im Öl-Seminar 2 (Aufbauseminar) vertiefen Sie Ihre Fähigkeiten in der Bewertung der Ölanalysen, wie beispielsweise Standard Oil Tests (SOT) sowie im speziellen Gas-in-Öl-Analyse (DGA), bei unterschiedlichen Fehlerfällen.

Öl-Seminar 3

Im Öl-Seminar 3 wird das in den vorherigen beiden Teilen erreichte Expertenwissen rund um das Thema Isolierölanalytik erweitert und die anhand der Beurteilung einzuleitenden Gegenmaßnahmen erläutert. Im Praxisteil werden weitere Diganosemethoden, z.B. FRA und FDS, vorgestellt.

TE-Seminar 1

Wir führen Sie in das komplexe Thema der Teilentladungen ein und bauen ein fundiertes Fachwissen rund um die Teilentladungsmesstechnik auf. Mit praktischen TE-Messungen im Labor.

TE-Seminar 2

Im zweiten TE-Seminar wird die Bewertung komplexer Fehlerfälle und die Behandlung von Störquellen erläutert. Zudem werden weitere TE-Messverfahren, wie UHF und akustische TE-Lokalisierung, vorgestellt und können praktisch im Labor ausprobiert werden.

ÄÄÄ [.oel-seminar.de](http://oel-seminar.de)

Komplexes Prüf-Setup? Vereinfachte Bedienung.

ICMneo

Moderne, leistungsstarke
und mobile Teilentla-
dungsdiagnostik



Das ICMneo von Megger verfügt über eine branchenführendes Benutzeroberfläche und vereint mehrere TE-Prüffunktionen in einer universellen Plattform. Durch die Kombination umfassender Diagnosefunktionen mit intuitiver Touchscreen-Bedienung und akkubetriebener Mobilität unterstützt das ICMneo die zuverlässige Entscheidungsfindung für Werksabnahmeprüfungen und Felddiagnosen bei HV- und MV-Anlagen und -Komponenten – einschließlich Kabeln, Transformatoren, rotierenden Maschinen und mehr.

Nutzen Sie das volle Potenzial der TE-Diagnostik. Besuchen Sie die Produktseite, um detaillierte Spezifikationen und erweiterte Funktionen des ICMneo zu sehen.



- Stand-Alone-Design Design macht komplexe Software-Einrichtungen überflüssig.
- Attraktive Preise bieten umfangreiche Prüfmöglichkeiten mit einer einzigen Investition.
- Durch die integrierte Touchscreen-Oberfläche sind keine externen Laptops oder Computer notwendig.
- Fünf Stunden Akkubetrieb ermöglichen völlig mobile Prüfungen – ganz ohne Netzanschluss.
- Universelle Plattform für diagnostische 4-Kanal-Diagnosen im Labor und vor Ort.



Shell
MIDEL

WHAT IF YOU COULD BUILD YOUR NEXT SUBSTATION IN A MUCH SMALLER FOOTPRINT ?

Smaller, safer substation design starts with what you put inside the transformer
- and you may be surprised by what that decision is costing you in space.

30 minutes with our experts could help you see things differently.

Safety Inside



shell.com/MIDEL



Fachgebiet

Hochspannungstechnik und Asset Management

Schering-Institut

Prof. Dr.-Ing. Peter Werle

Leistungsangebot

- Beratung und Gutachten im Bereich der Hochspannungstechnik
- Begutachtung von Schäden an Hochspannungskomponenten (Transformatoren, Kabel, GIS, Motoren/Generatoren)
- Hochspannungsprüfungen von Geräten und Isolierstoffen
- Unterstützung bei Entwicklungsprojekten
- Prüfung von Isolierstoffen für Motoren (e-Mobility)
- Kolloquien und Seminare

Technische Ausstattung

- Prüfquellen:
 - Stoßspannung 3 MV, 300 kJ
 - Wechselspannung 800 kV, 1A, 50 Hz
 - Stoßstrom 200 kA, 300 kWs
 - Gleichspannung 800 kV, 100 mA
- Geschirmte Räume für Teilentladungsmessung und Teilentladungsortung
- Klimatisierte Messzellen für dielektrische Untersuchungen an flüssigen und festen Isolierstoffen
- Verlustfaktormesseinrichtungen: bei Hochspannung (50 Hz) und Niederspannung (10 Hz – 100 kHz)
- Nachbildung direkter und indirekter Effekte von Blitzentladungen
- Dauerversuchsstände für Materialuntersuchungen mit hohen Losgrößen
- Anlagen zur Herstellung von Prüfkörpern mit Kunststoffpressen, Extrudern und Harz-Gießanlage
- Umfangreiches Labor zur Analyse von Isolierflüssigkeiten sowie von gelösten und ungelösten Gasen

Save the Date

TLM 2027

20. Transformer-Life-Management Konferenz



28. - 29. September 2027
Congress Union Celler
www.tlm-konferenz.de