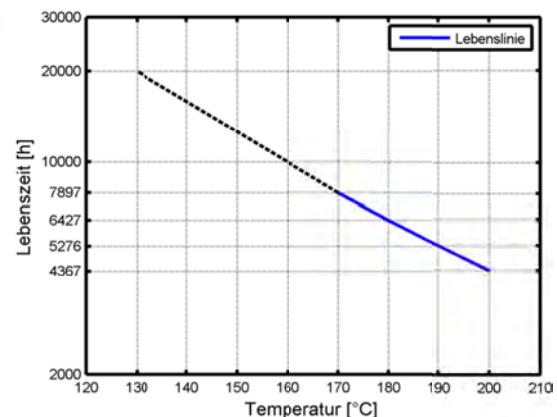
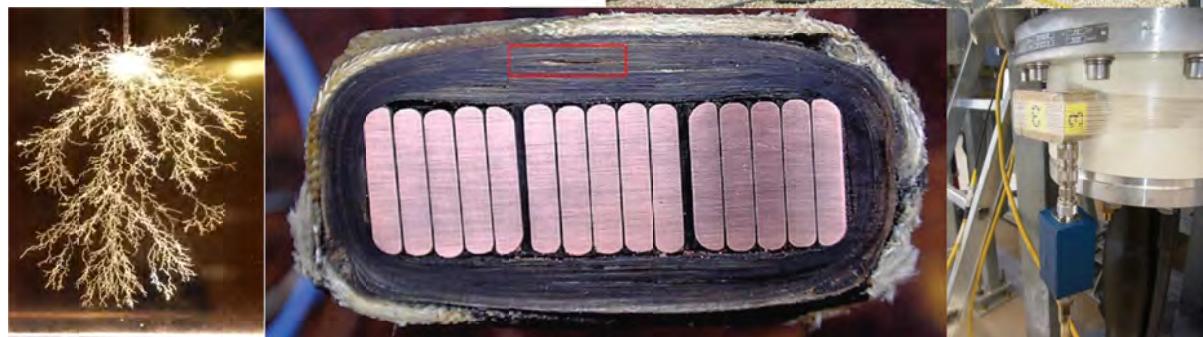
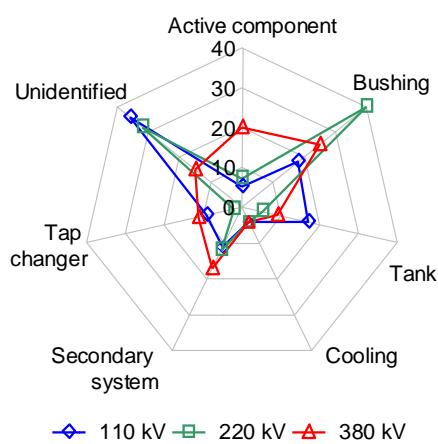


Fachtagung / Journée technique

05.12.2012 Aula de la HEIG-VD Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

Diagnostic d'isolation et détermination de l'état du vieillissement de composants haute tension



*FKH - Fachtagung
05. Dezember 2012
HEIG-VD
Yverdon-les-Bains*

**Isolationsdiagnose und Ermittlung des
Alterungszustands von
Hochspannungskomponenten**

**Diagnostic d'isolation et détermination de l'état du
vieillissement de composants haute tension**

Veranstalter:

*Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH
Voltastrasse 9
8044 Zürich*



Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

Diagnostic d'isolation et détermination de l'état du vieillissement de composants haute tension

Diagnosemessungen an Hochspannungsbetriebsmitteln der Elektrizitätsversorgung haben in den letzten Jahrzehnten eine enorme Entwicklung erfahren. Der grösste Fortschritt ist wohl bei den Diagnosesystemen zu verzeichnen. Die Verbesserungen der Messmittel betreffen die Handhabung, Funktionalität und Auswertemöglichkeiten der Messsignale. Dem Entwicklungsstand der heute verfügbaren Technik ist es zu verdanken, dass der Isolationszustand und allfällige Isolationsfehler zunehmend präziser und zuverlässiger festgestellt werden können. Die verbesserte Aussagekraft der Messmethoden, aber auch die Reduktion des Aufwands für Isolationsdiagnosen mit modernen Gerätschaften, machen die Diagnosemessungen attraktiver und kostengünstiger, was sich auch in der Nachfrage von Analysedienstleistungen niederschlägt. Die Zunahme der Diagnoseaktivität an den Betriebsmitteln der EVUs versteht sich auch als Folge des allgemeinen Trends zu einem Übergang von zeit- auf zustandsbasierte Instandhaltungsstrategien. Ein wachsender Trend stellt die Dauerüberwachung von Isolationssystemen dar. Erfahrungen liegen bisher vor allem bei ölfüllten Transformatoren (Zersetzungsgasbildung) und bei Statorn von rotierenden Maschinen vor.

In acht ausgesuchten Referaten werden Messmethoden vorgestellt aber auch Beispiele von Diagnosefällen diskutiert. Es wird darauf eingegangen, welche Informationen aus Resultaten von Diagnosemessungen herausgelesen werden können und wie sich die Isolationsalterung in messbaren Größen bemerkbar macht. Schliesslich wird auch auf die Grenzen der Methoden eingegangen und es wird darauf hingewiesen, dass oft erst mittels weiterer Zusatzinformationen oder durch die Kombination von Messmethoden eine gesicherte Diagnose über den Zustand eines Isolationssystems gestellt werden kann.

Les mesures et diagnostics sur des équipements haute tension d'approvisionnement en électricité ont connu un développement considérable durant ces dernières décennies. Le plus grand progrès est probablement constaté dans les systèmes de diagnostic. Les améliorations des appareils de mesures concernent la manipulation, les fonctionnalités et les possibilités d'évaluation des signaux mesurés. Le développement des technologies disponibles aujourd'hui permet une reconnaissance plus précise et fiable de l'état d'isolement et d'éventuels défauts d'isolation. Une meilleure interprétation des méthodes de mesures ainsi que la réduction de l'investissement (temps, matériel) pour des mesures de diagnostics d'isolations à l'aide d'appareils modernes rendent les mesures et les diagnostics de plus en plus attrayants et meilleur marché, ce qui se reflète sur la demande des services d'analyses. L'augmentation de l'activité de diagnostic sur des appareillages des services publics démontre la tendance générale du changement de stratégie de maintenance en fonction de l'état des installations, et non plus selon leur durée de vie programmée. Une tendance croissante est le suivi en continu des systèmes d'isolation. Jusqu'à maintenant, des connaissances pratiques étaient disponibles en particulier pour les transformateurs à huile (analyse de gaz dissous) et les stators des machines tournantes.

Des méthodes de mesures ainsi que des exemples de cas diagnostiqués seront présentés durant huit exposés. Il sera notamment évoqué quelles informations peuvent se révéler suite aux résultats des mesures de diagnostic et sur quelles grandeurs électriques agit l'état de vieillissement d'une isolation. Finalement il sera question des limites de ces méthodes et on soulignera que, souvent, des informations supplémentaires ou la combinaison de plusieurs méthodes de mesures sont nécessaires afin de déterminer l'état des isolants dans un système, afin de garantir un diagnostic sûr.

Prof. Jean-François Affolter
Moderateur

Dr. Reinhold Bräunlich
Geschäftsleiter der FKH

Tagungsprogramm / Programme de la journée

Datum / Date: Mittwoch, 5. Dezember 2012, 09⁰⁰ Mercredi 5 décembre 2012, 09⁰⁰
 Ort / Lieu: Aula de la HEIG-VD Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Route de Cheseaux 1, 1400 Yverdon-les-Bains
 Titel / Titre: **Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten**
Diagnostic d'isolation et détermination de l'état du vieillissement de composants haute tension

Tagungsleitung / Modérateur: Prof. Jean-François Affolter, HEIG-VD

	Beitrag / Sujet	Referent / Conférencier
09 ⁰⁰ -09 ¹⁰	Begrüssung durch den Präsidenten der FKH	FKH Präsident Dr. Thomas Aschwanden KWO, Innertkirchen
09 ¹⁰ -09 ²⁵	Introduction au thème de la journée	Modérateur Prof. Jean-François Affolter HEIG-VD Yverdon
09 ³⁰ -10 ⁰⁰	Alterungsprozesse in Isolationssystemen von Hochspannungs-Komponenten	Dr. Jitka Fuhr BKW FMB Energie AG, Netze Ostermundigen
10 ⁰⁵ -10 ³⁵	Neue Isolationsbeanspruchungen durch den Einsatz alternativer Energiequellen	Martin Boss Pfiffner Messwandler AG Hirschthal
10 ⁴⁰ -11 ¹⁰	Kaffeepause / pause café	
11 ¹⁰ -11 ⁴⁰	Röntgenpulsgetriggerte Teilentladungsmessungen	Sedat Adili, ETH Zürich, EEH High Voltage Laboratory
11 ⁴⁵ -12 ¹⁵	Erkenntnisse aus den Verlustfaktormessungen zur Alterung von Statorisolationen	Dr. Thomas Brügger FKH, Zürich
12 ¹⁵ -14 ⁰⁰	Mittagessen / repas	
14 ⁰⁰ -14 ³⁰	Diagnostics des câbles de nos Réseaux Moyenne Tension, Proposition d'uniformisation et retour d'expérience du GRUT (Groupe Romand d'Unification Technique)	Marc Weber SIG, Genève
14 ³⁵ -15 ⁰⁵	Diagnosesysteme aktuelle Entwicklungen und Zukunftsvisionen	Dr. Maik Koch Omicron electronics GmbH A-Klaus
15 ¹⁰ -15 ⁴⁰	Durée de vie de nos câbles	Dr. François Cochet Nexans Suisse SA, Cortaillod
15 ⁴⁵ -16 ¹⁵	Mesures de la FRA en ligne sur des équipements bobinés à haute tension pour la surveillance de l'isolation	Prof. Dr. Joseph Moerschell HES-SO Valais, Sion
ab 16 ¹⁵	Apéro	

Zusammenfassung der Referate

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Alterungsprozesse in Isolationssystemen von Hochspannungs-Komponenten	1
Dr. Jitka Fuhr, BKW FMB Energie AG, Netze, Ostermundigen	
Neue Isolationsbeanspruchungen durch den Einsatz alternativer Energiequellen	21
Martin Boss, Pfiffner Messwandler AG, Hirschthal	
Röntgenpulsgetriggerte Teilentladungsmessungen	35
Sedat Adili, ETH Zürich, EEH High Voltage Laboratory	
Erkenntnisse aus den Verlustfaktormessungen zur Alterung von Statorisolationen	39
Dr. Thomas Brügger, FKH, Zürich	
Diagnostics des câbles de nos réseaux moyenne tension - Proposition d'uniformisation et retour d'expérience du GRUT (Groupe Romand d'Unification Technique)	55
Marc Weber, SIG, Genève	
Diagnosesysteme - aktuelle Entwicklungen und Zukunftsvisionen	65
Dr. Maik Koch, Omicron electronics GmbH, A-Klaus	
Durée de vie de nos câbles	85
Dr. François Cochet, Nexans Suisse SA, Cortaillod	
Mesures de la FRA en ligne sur des équipements bobinés à haute tension pour la surveillance de l'isolation	93
Prof. Dr. Joseph Moerschell, HES-SO Valais, Sion	
Referentenadressen	101
Internetseite zur Fachtagung	103
Notizen	105

FKH - Fachtagung

05. Dezember 2012

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

Alterungsprozesse in Isolationssystemen von Hochspannungs-Komponenten

Dr.-Ing. Jitka Fuhr
BKW-FMB Energie AG, Netze

1974-	Diplom (Elektrotechnik) an der Technischen Universität in Karlsruhe, Deutschland
1974 bis 1980	BBC, Mannheim (Deutschland) Entwicklungs-Ingenieurin für Leistungstransformatoren (Berechnung, Konstruktion, Fertigung, Labor)
1980 bis 1985	Hahn-Meitner Institut für Kernforschung, Berlin (Deutschland) Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Promotion (Elektrotechnik)
1985	Promotion (Elektrotechnik) an der Technischen Universität in Darmstadt, Deutschland
1985 bis 1988	Polytechnic University of New York (USA) Research Associate, Betreuung von Doktoranden, Vorlesungen in Hochspannungsmesstechnik
1988 bis 1989	Tettex Instruments AG, Dietikon (Schweiz) Entwicklungs-Ingenieurin für TE-Mess-Systeme an Hochspannungs-Komponenten“
1989 bis 1995	ABB Forschungszentrum, Dättwil (Schweiz) HochspannungsgruppeProjektleiter „TE-Messungen an Hochspannungs-Komponenten “Entwicklung von Monitoring System für Turbogeneratoren (KKL)
1995 bis 2001	ABB Sécheron, Genf (Schweiz) Abteilung Power Transformers, Entwicklung von Diagnose Methoden für Vor-Ort Messungen an Transformatoren (PSEL-Projekt) Lösung von TE-Problemen an Transformatoren im Labor
2001 bis 2007	ABB Baden (Schweiz) Business Area Power Transformers Spezialistin für Lösung von TE-Problemen an neuen und betriebsgealterten Transformatoren, Schulungen von ABB Mitarbeitern
seit 2007	BKW FMB AG, Engineering Netze, Senior Consultant, Qualitätssicherung und Zustandsbeurteilung von Hochspannungsanlagen der BKW und externen Kunden

Alterungsprozesse in Isolationssystemen von Hochspannungs-Komponenten

Jitka Fuhr
BKW-FMB Energie AG, Netze

1. Einleitung

Während dem Betrieb werden durch eine Kombination von verschiedenen Beanspruchungen die bei der optimalen Auslegung definierten charakteristischen Kenngrößen der Hochspannungs-Komponenten verändert. Als charakteristischen Kenngrößen der Isolationssystemen der Hochspannungstechnik sind die folgenden Beanspruchungen definiert: (1) das elektrische Feld, (2) das magnetische Feld, (3) die mechanischen Kräfte und (4) die Verlustwärme.

Eine Veränderung charakteristischen Größen gegenüber dem Neuzustand wird in der Fachsprache als Alterung bezeichnet. Die Alterungsprozesse der einzelnen Isolationsmaterialien sind aus den zahlreichen Untersuchungen in Labors mit künstlicher Alterung weitgehend bekannt. Die genaue Kenntnis über die Alterungsprozesse in den gesamten Isolationssystemen der Hochspannungstechnik ist schwierig zu erforschen, da eine gefährliche Veränderung einer oder aller charakteristischen Kenngrößen sowohl durch einzelne Belastung als auch durch unzählige Belastungskombinationen verursacht werden kann. Durch solche unvorhersehbare Alterungsprozesse wird die Betriebssicherheit der Komponente reduziert und/oder die Lebensdauer verkürzt.

Das wichtigste Ziel von heutigen Diagnose-Verfahren und von Monitoring-Systemen ist die frühzeitige und zuverlässige Identifikation von gefährlichen Veränderungen (Alterungsprozesse) in den Isolationssystemen um einen ungeplanter Ausfall der Komponenten verhindern zu können.

In diesem Beitrag sollen die vier charakteristischen Kenngrößen und deren Einflussfaktoren erläutert werden, welche schon während der Fertigung und später während dem Betrieb einer Hochspannungs-Komponente eine negative Veränderung dieser charakteristischen Größen bewirken können.

Die Grenzen der heute bekannten Diagnose-Verfahren und Überwachungs-Methoden zur Zustandsbestimmung oder gar zur Abschätzung der „technischen Lebensdauer“ von betriebsgealterten Hochspannungs-Komponenten liegen nicht nur in der sehr lückenhaften Kenntnis des wahren Zustandes einer bestimmten Komponenten, sondern auch in den nicht eindeutig feststellbaren Veränderungen der charakteristischen Kenngrößen infolge von betrieblichen Beanspruchungen.

2. Isolationssysteme der Hochspannungs-Komponenten

Zur Erzeugung und Verteilung der elektrischen Energie werden die im Bild 1 dargestellten Hochspannungs-Komponenten benötigt.

Generatoren



Transformatoren



Schaltanlagen



Kabel



Freileitungen



3. Schlussfolgerung

Die vier charakteristischen Kenngrössen von Hochspannungs-Komponenten - das elektrische Feld, das magnetische Feld, die mechanischen Kräfte und die Verlustwärme - bilden die Grundlage für den gezielten Einsatz von modernen Diagnose-Methoden und Überwachungs-Systemen. Wegen der komplexen Struktur speziell von Generatoren und grossen Leistungstransformatoren müssen diese vier Kenngrössen bei der Auslegung der Konstruktion sorgfältig optimiert und aufeinander abgestimmt werden. In der Betriebspraxis treten bei allen Hochspannungs-Komponenten wegen der Vielfalt von möglichen Beanspruchungen immer wieder Schwachstellen auf, die Ursprung für einen unkontrollierten Ausfall sein können. Als Zielsetzung für die Weiterentwicklung der heutigen Diagnose-Verfahren und Monitoring-Systeme von Hochspannungs-Komponenten steht die Identifikation und Lokalisierung von konstruktiven und betriebsbedingten Schwachstellen im Vordergrund.

Alterungsprozesse in Isolationssystemen von Hochspannungs-Komponenten

BKW®



FKH-Fachtagung 2012
*Isolationsalterung und
Diagnose*
HEIG-VD,
Yverdon-les-Bains

Jitka Fuhr
jitka.fuhr@bkw-fmb.ch



Hochspannungs- (HS) Komponenten

BKW®

Erzeugung und Verteilung der elektrischen Energie

Generatoren



Transformatoren



Schaltanlagen



Kabel

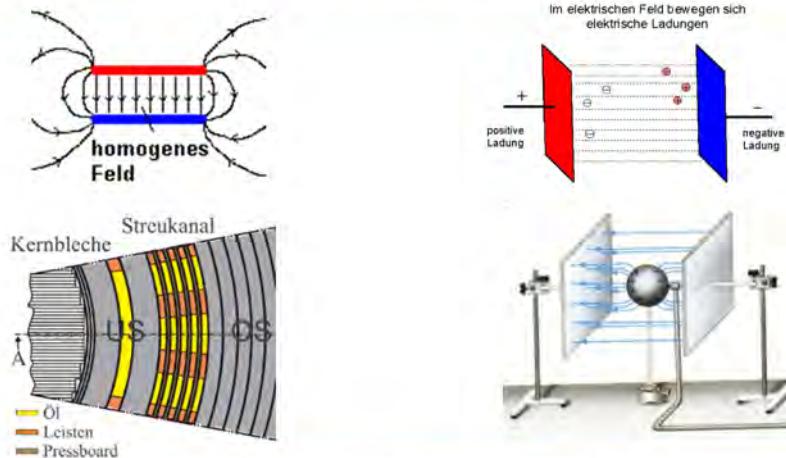


Freileitungen



Was ist ein Isolationssystem?

Isolationssystem -> theoretisch keine Ladungsträger



In jedem Isolationssystem sind Ladungsträger -> Polarisation

Impartiert für
Ito1
energy

Isolationssystem des Generators

Isolationssystem = Glimmerbände und Luft



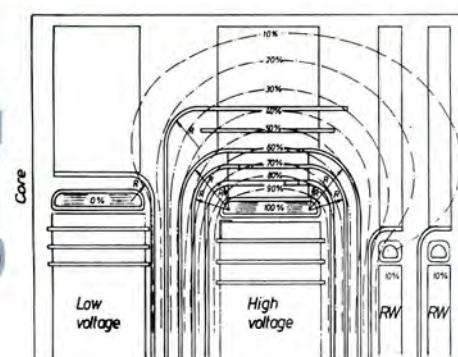
Statorwicklung des Generators

Elektrische Feldstärke

Impartiert für
Ito1
energy

Isolationssystem des Transformators

Isolationssystem = Zellulose und Öl



Wicklungen des Transformators

Elektrische Feldstärke

Der Partner für
Ito1
energy

Isolationssystem der Schaltanlage

Isolationssystem = SF₆ (GIS) und Epoxy Isolatoren



Phasenleiter der GIS

Elektrische Feldstärke

Der Partner für
Ito1
energy

Isolationssystem des Kabels

Isolationssystem = Öl oder Kunststoff (XLPE)



Phasenleiter des Kabels

Elektrische Feldstärke

the partner for
Ito1
energy

BKW®

Isolationssystem der Feileitungen

Isolationssystem = Luft



Freiluft-Schaltanlage

Freileitungen

the partner for
Ito1
energy

BKW®

Alterungsprozesse in Isolationssystemen von Hochspannungs-Komponenten

BKW®

Alle Isolationssysteme altern im Betrieb

Ihr partner für
Ito1
energy

Beanspruchungen in Isolationssystemen

BKW®

Denken in 4 Dimensionen

Beanspruchungen

1. Elektrisches Feld

2. Magnetisches Feld

3. Mechanische Kräfte

4. Verlustwärme

Folgen

Elektrischer Durchschlag

Wirbelstromverluste -> hot spot

Geräusche, Deformation der Wicklungen

Hot spots -> Alterung der Isolation

Erste Kontrolle erfolgt bei der Abnahmeprüfung im Werk -> Fingerprint

Ihr partner für
Ito1
energy

Elektrische Felder

Typische Beanspruchungen im Betrieb

	niederfrequente Spannung/Überspannung dauernd	zeitweilig	langsamer Anstieg	transiente Überspannung schneller Anstieg	sehr schneller Anstieg
Netz					
Prüfung					
	f = 50 Hz oder 60 Hz $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	10 Hz < f < 500 Hz $3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_1 > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} > T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} > T_1 > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_2 \leq 3 \text{ ms}$
	Langzeit-Wechselspannung	Kurzzeit-Wechselspannung	Schaltstoßspannung	Blitzstoßspannung	FKH-Tagung, Karl-Heinz Weck

Standard Tests repräsentieren nicht immer die Betriebsbedingungen



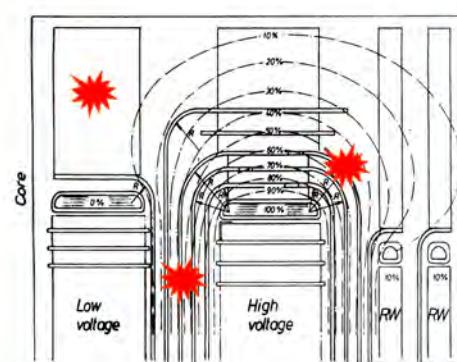
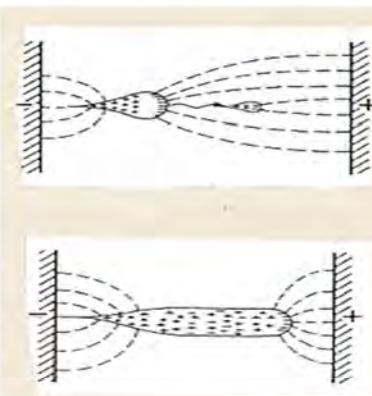
Elektrische Felder

Konsequenzen der Beanspruchungen im Betrieb

Zu hohe elektrische Felder



Elektrischer Durchschlag

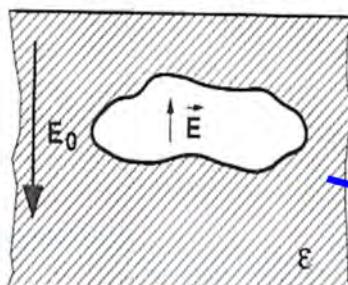


Überspannungen im Betrieb-> lokale Schwachstellen-> TE

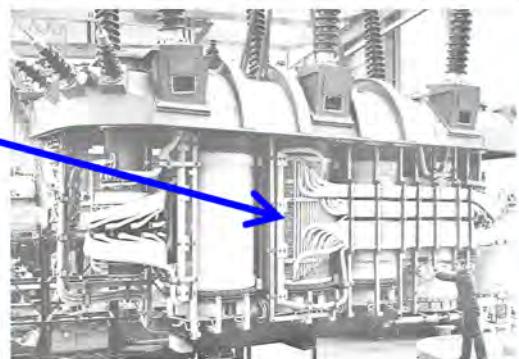
Was ist eine Teilentladung (TE) ?

Lokaler elektrischer Durchschlag in einer Schwachstelle

VOID INSIDE BULK MATERIAL



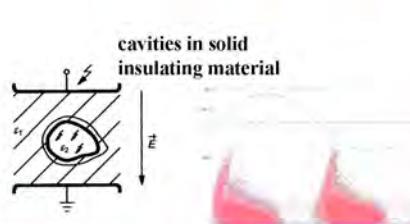
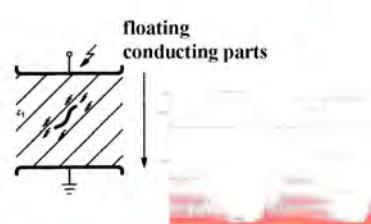
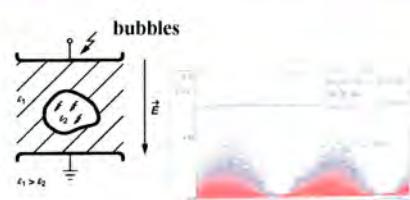
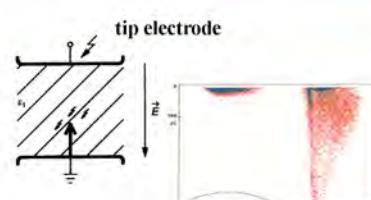
TE-Quelle kann überall im Isolationssystem versteckt sein



Voraussetzung für TE:
 $E > E_{inception}$
 Anfangselektronen sind vorhanden

Typische TE-Quellen in Isolationssystemen

Statistische Analyse der TE-Signale (TE-Muster)

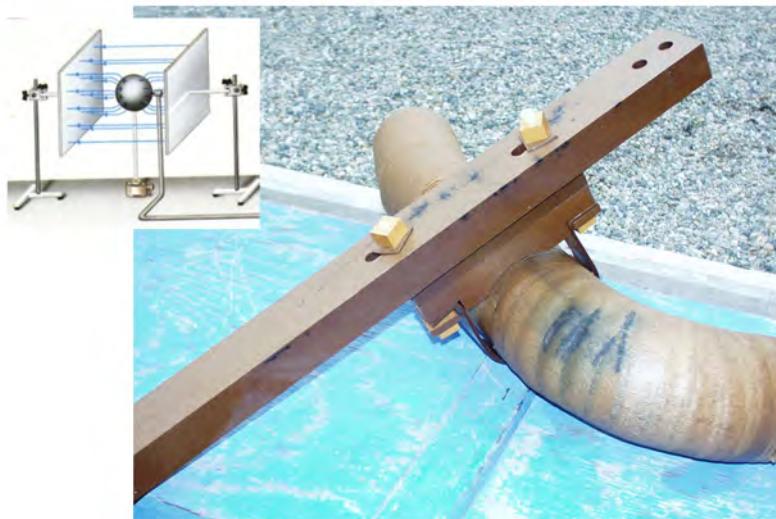


Jede TE-Quelle generiert spezifische TE-Muster

1to1 energy

Folgen von permanenter TE-Aktivität

Zerstörung der Isolation

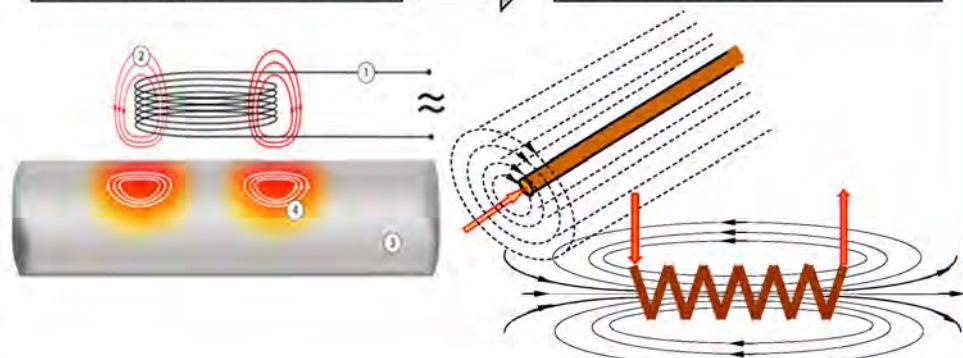


Ihr partner für
1to1
energy

Magnetische Felder

Konsequenzen der Beanspruchungen im Betrieb

Hohe magnetische Felder → Wirbelstromverluste



Wiebelströme in magnetisch leitenden Teilen

Ihr partner für
1to1
energy

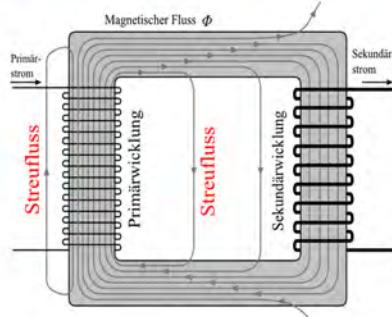
Magnetische Felder

Konsequenzen der Beanspruchungen im Betrieb

Hohe magnetische Felder



Wirbelstromverluste



Heiss-Stellen durch Überlagerung von Streuflüssen

 1to1 energy

Feststellung von Heiss-Stellen

Kontrolle der im Öl gelösten Gase



Resultate von "Hydran"



Monitoring System oder Gas in Öl Analyse

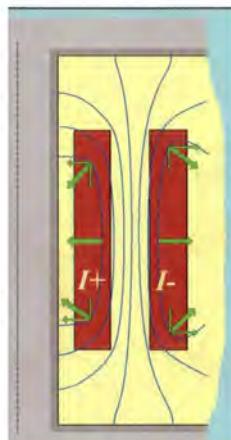
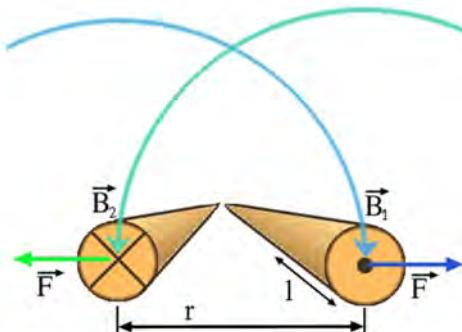
 1to1 energy

Mechanische Beanspruchungen

Konsequenzen der Beanspruchungen im Betrieb

Elektrodynamische Kräfte → Deformation

$$F = \frac{I^2 \cdot l \cdot \mu_0}{2\pi \cdot r}$$

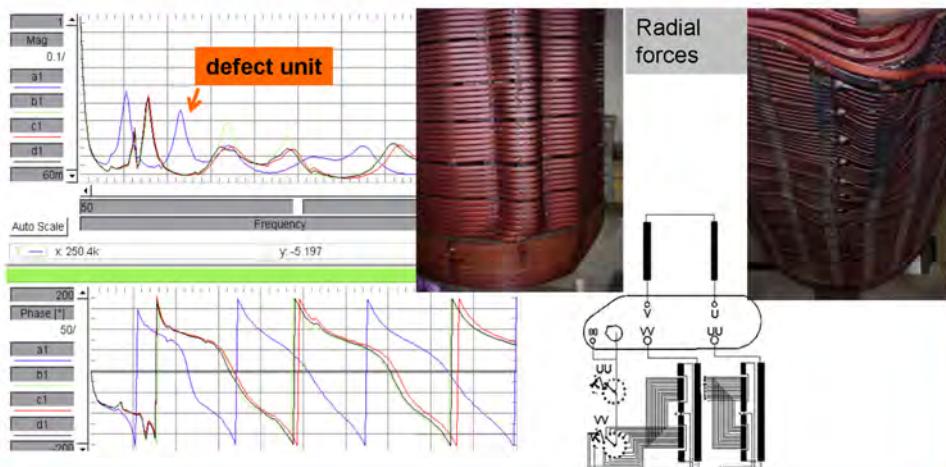


Axiale Kräfte
Radiale Kräfte

Kurzschlüsse im Netz sind nicht vermeidbar

Mechanische Beanspruchungen

Folgen von Kurzschläüssen im Betrieb

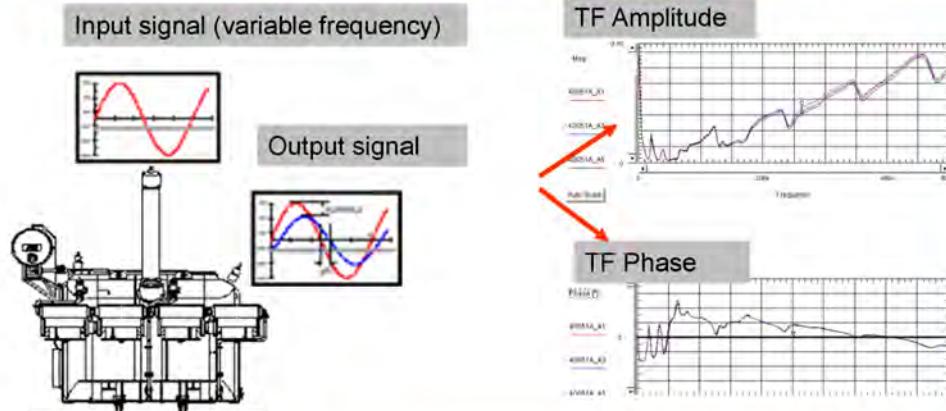


Feststellung von Deformationen mit Hilfe der FRA-Messung

energi

Messung von Deformationen

Messverfahren: "Frequency Response Analysis" (FRA)



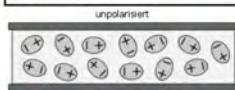
Transfer Funktion: $\text{TF} (j\omega) = \text{Output signal} (j\omega) / (\text{Input signal} (j\omega))$

Ito1
energy

Thermische Beanspruchungen

Konsequenzen der Beanspruchungen im Betrieb

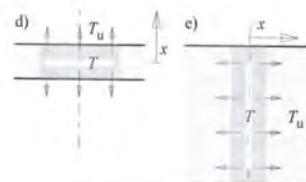
Hot Spots



$E = 0\%$



$E = 100\%$



A. Küller: Hochspannungstechnik, ISBN 978-3-540-78412

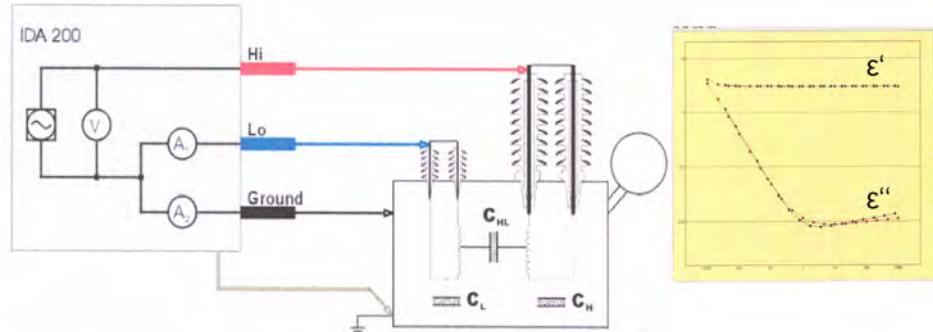


Heiss-Stellen durch Betriebsbedingungen -> thermische Instabilität

Ito1
energy

Dielectric response analysis (DRA)

Typischer Messkreis



$$Z(\omega) = U(\omega) / I(\omega)$$

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)$$

$$\tan \delta = \epsilon''(\omega) / \epsilon'(\omega)$$

Messung der polaren Komponenten im Isolationssystem

1to1
energy

Beispiel Transformator

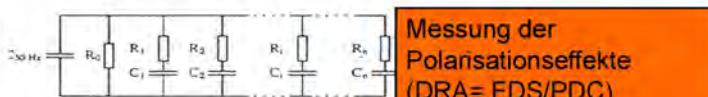
Messung der charakteristischen Größen

Kontrolle der elektrischen Festigkeit



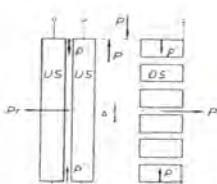
TE-Messung (PD)

Kontrolle der Restfeuchtigkeit



Messung der Polarisationseffekte (DRA= FDS/PDC)

Kontrolle der mechanischen Festigkeit



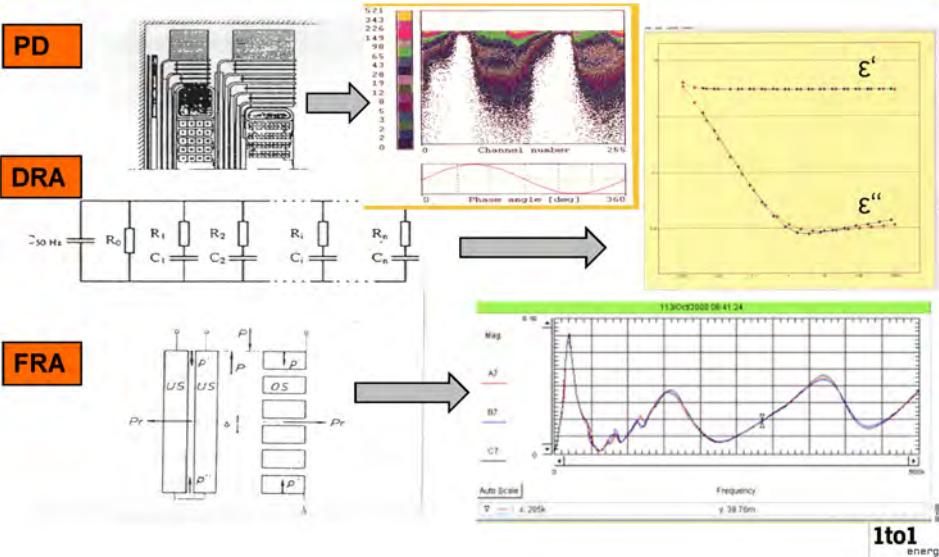
Messung der Transferfunktion (FRA)

Mechanische Festigkeit von Papier

Furan-Komponenten im Öl

Diagnose Methoden für Alterungsprozesse in Isolationssystemen

Typische Resultate



1to1 energy

Vorteile der Diagnose und Monitoring Methoden

Feststellung von langsam sich entwickelnden Defekten

Qualitätskontrolle von neuen HS-Komponenten (Fingerprints)



Lutz Niemeyer

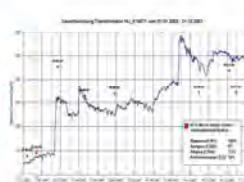
Zustandsbestimmung nach dem Transport und Endmontage



Zustandsüberwachung von HS-Komponenten in Betrieb



Zustandsüberwachung von "Problem" – HS-Komponenten



1to1 energy

Grenzen der Diagnose und Monitoring

BKW®

Wie zuverlässig ist die Interpretation der Resultate?

Vergleich mit Referenzdaten → Abweichung ?
Fingerprints?

Lokalisierung der Fehler → Integrale Methoden ?
TE-Messung?

Kenntnisse der Konstruktion → Technische Unterlagen
Erfahrungen?

Elektrische Kenngrößen sind
nur an den Durchführungen
messbar



Diagnose und Monitoring Systeme

BKW®

**Diagnose ist eine Wissenschaft zur
Zustandsbeurteilung von
technischen Systemen**

**Bestimmung der Restlebensdauer ist
weder mit einer Diagnose noch mit
einem Monitoring System möglich**

FKH - Fachtagung

05. Dezember 2012

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

New Isolations requirements due to the use of alternative energy sources

Dipl. El.-Ing. FH Martin Boss
Pfiffner Messwandler AG, Hirschthal

Seit 1.1.2008 Technischer Leiter; Stv. Geschäftsführer, Pfiffner Messwandler AG, Hirschthal
11.1999 – 12.2007 Produktmanager Hochspannung, Pfiffner Messwandler AG, Hirschthal

05.1996 – 10.1999 Ingenieur Netzführung Hochspannungsnetz Atel

05.1992 – 04.1996 Inbetriebsetzungsingenieur Prüfanlagen, Haefely Test Systems, Basel

04.1989 – 03.1992 Fachhochschulstudium Elektrotechnik,
Vertiefungsrichtung Energie- und Leittechnik, Fachhochschule Burgdorf

Neue Isolationsbeanspruchungen durch den Einsatz alternativer Energiequellen

Martin Boss

Pfiffner Messwandler AG, Hirschthal

Die alternativen Energiequellen beeinflussen die heutige Netzführung massiv. Einerseits verschärft die Energieproduktion der Photovoltaik-Anlagen die Mittagsspitze, auf der anderen Seite sorgen sie gemeinsam mit den Windparks für eine deutlich höhere Witterungsabhängigkeit der Energieproduktion als dies bisher mit den herkömmlichen Energieträgern der Fall war.

Daraus resultiert, dass die bestehenden Regelkraftwerke in einem ganz anderen Stil betrieben werden, als dies früher der Fall war. Generatoren werden heute im Viertelstunden-Takt zugeschaltet und weggeschaltet. Die Belastung aller Geräte im Netz nimmt durch die steigenden Schalthandlungen zu.

An sonnenreichen Sonntagen kann in einzelnen Netzen die Produktion der Photovoltaik und der Windparks grösser sein als der in dieser Schwachlastphase auftretende Bedarf. Während solchen Phasen kann der gesamte Energiebedarf aus wechselrichtenden Anlagen gedeckt werden. Die dabei auftretenden Oberwellen belasten die Hochspannungsisolationen zusätzlich.

Bei der Analyse von Messwandler-Ausfällen in Hochspannungsnetzen suchte die Firma Pfiffner die Zusammenarbeit mit verschiedenen Kunden. Zusätzliche Prüfungen wurden definiert und durchgeführt. Wiederholungen der Typenprüfungen an bereits leicht gealternden Wandlern wurden bestanden und lieferten keine Anhaltspunkte. Auch die Durchführung der Prüfung mit 600 abgeschnittenen Impulsen führte zu keinen weiteren Erkenntnissen.

Erst die Prüfung mit abgeschnittenen Impulsen mit 115% Prüfpegel und höher lieferte das gleiche Schadensbild wie im Netz. Daraus lässt sich ableiten, dass die Belastung mit Spannungsspitzen im heutigen Netz grösser sein muss, als bisher angenommen. Die Analyse ergab, dass dem Isolationsaufbau -insbesondere der Papierschichtung- durch die hochfrequente Belastung eine steigende Bedeutung zukommt.

Mit den heutigen Spannungswandlern (induktiv und kapazitiv) können die höheren Frequenzen nicht korrekt abgebildet werden. Der RC-Teiler ist derzeit die einzige technische Alternative, welche die Messung der hochfrequenten Spannungsanteile im praktischen Umfeld ermöglicht. Erst die korrekte Abbildung des Spannungsverlaufs auf der Hochspannungsseite lässt die heutige Belastung der Geräte im Netz erkennen und trägt bei, angepasste Prüfungen zu definieren.



*Isolationsdiagnose und Ermittlung des
Alterungszustands von
Hochspannungskomponenten*

Neue Isolationsbeanspruchungen durch den Einsatz alternativer Energiequellen



Inhalt

- Veränderte Belastungen im Netz
- Modell zur Erklärung der Belastung durch transiente Vorgänge
- Messreihen zur Simulation der Belastung durch transiente Vorgänge
- Möglicher Ablauf bei Schädigung und Konsequenzen
- Frequenzgang von Spannungswandlern
- Ausblick



Veränderte Belastungen im Netz

- Steigender Oberwellengehalt durch Wechselrichter-Einspeisungen



Zunahme der installierten Leistung durch Wechselrichtereinspeisungen

Installierte Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland seit 1990

	Wasser-kraft [MW]	Wind-energie [MW]	Biomasse [MW]	biogener Anteil des Abfalls [MW]	Photo-voltaik [MW]	Geo-thermie [MW]	Gesamte Leistung [MW]
1990	3.429	55	85	499	1	0	4.069
1991	3.394	106	96	499	2	0	4.097
1992	3.550	174	105	499	3	0	4.331
1993	3.509	326	144	499	5	0	4.483
1994	3.563	618	178	499	6	0	4.865
1995	3.595	1.121	215	525	8	0	5.464

Anmerkungen: Bis einschließlich 1999 beinhaltet die Angaben zur installierten elektrischen Leistung der Biomasseanlagen nur die „Kraftwerke der allgemeinen Versorgung“ sowie die „sonstigen EE-Einspeiser“.

Die Angaben zur installierten Leistung beziehen sich jeweils auf den Stand zum Jahresende.

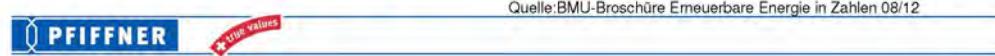
Die vollständigen Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien finden sich auf der BMU-Themensite „Erneuerbare Energien“ Rubrik „Datenservice“ unter

Zum Vergleich: Der Netto-Stromverbrauch in ganz Deutschland entspricht einer Durchschnittsleistung von **und 60GW** (Quelle: AG Energiebilanzen)

1999	3.523	4.435	467	555	32	0	9.012
2000	3.538	6.097	579	585	76	0	10.875
2001	3.538	8.750	696	585	186	0	13.755
2002	3.785	11.989	843	585	296	0	17.498
2003	3.934	14.604	1.091	847	435	0	20.911
2004	3.819	16.623	1.444	1.016	1.105	0.2	24.007
2005	4.115	18.390	1.964	1.210	2.056	0.2	27.735
2006	4.083	20.579	2.620	1.250	2.899	0.2	31.431
2007	4.169	22.194	3.434	1.330	4.170	3.2	35.300
2008	4.138	23.826	3.969	1.440	6.120	3.2	39.497
2009	4.151	25.703	4.519	1.550	10.566	7.5	40.432
2010	4.395	27.191	5.014	1.650	17.554	7.5	55.812
2011	4.401	29.071	5.479	1.700	25.039	7.5	65.698

Quellen: BMU auf Basis AGEE-Stat sowie VDEW [17], [18], [22], [27], [28], [29]; BDEW [30]; EnBW [39]; Fichtner [40]; BWE [47]; DEWI et al.[33]; DEWI [48]; BSW [51]; IE [58]; DBFZ [57]; IIAD [66]; Erdwärme-Kraft GbR [41]; geo x GmbH [42]; Geothermie Unterhaching [43]; Pfalzwerke geofuture [44]; ewb Bruchsal [45]; Energie AG Oberösterreich [46]; BNetzA [52], [74]; ZSW [1].

Quelle:BMU-Broschüre Erneuerbare Energie in Zahlen 08/12

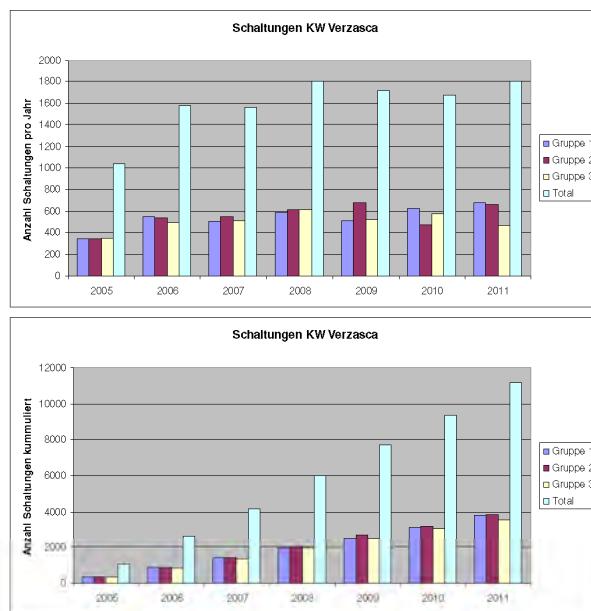


Veränderte Belastungen im Netz

- Steigender Oberwellengehalt durch Wechselrichter-Einspeisungen
- Zunahme der Schalthandlungen in Netzregelungs-Kraftwerken



Zunahme der Schalthandlungen am Beispiel KW Verzasca

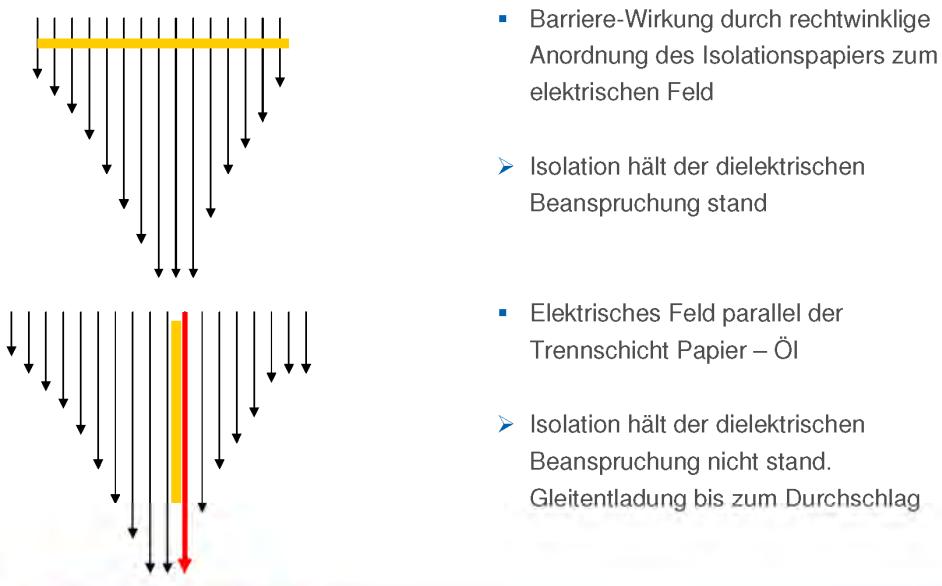


Veränderte Belastungen im Netz

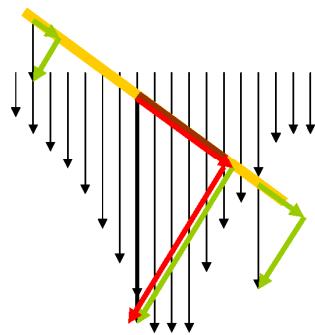
- Steigender Oberwellengehalt durch Wechselrichter-Einspeisungen
- Zunahme der Schalthandlungen in Netzregelungs-Kraftwerken
- Reflexionen der Schaltüberspannungen bei Wellenimpedanzübergängen (z.B. Freiluft-SS auf Kabel)



Modell zur Erklärung der Belastung durch transiente Vorgänge



Modell zur Erklärung der Belastung durch transiente Vorgänge



- Bei schiefwinkliger Anordnung des el. Feldes kann lokal die maximale el. Festigkeit überschritten werden. (lokale Gleitentladungen)
- Bei zeitlich kurzen Impulsen führt dies nicht zu einem kompletten Durchschlag der Isolation
- Die wiederholende Überlastung beschädigt das Papier und reduziert auch die el. Festigkeit der Barriere.
- Der Überschlag tritt somit an einer Stelle auf, die rechnerisch ausreichend dimensioniert ist.

Messreihen zur Simulation der Belastung durch transiente Vorgänge

Ziel der Messreihen ist, die Grenzen der Wandler bei transienter Belastung zu finden!

Durchgeführte Prüfungen:

- 600 abgeschnittene Impulse gem. IEC 60044/61869 (70% LI)
- Erweiterte Prüfungen mit neg. abgeschnittenen Impulsen
- Erweiterte Prüfungen mit neg. Vollwellen und abgeschnittenen Impulsen und positiven Vollwellen

600 abgeschnittene Impulse gem. IEC 60044/61869

- In den letzten Jahren führte die Fa. Pfiffner mehrere Prüfungen mit abgeschnittenen Vielfachstößen durch.
(Auch wenn dieses Verfahren die Prüfung der inneren Ableitungen und Abschirmungen bezweckt, wurde es hier zur Prüfung der Isolation unter transiente Belastung eingesetzt)
- Geprüft wurden fabrikneue Stromwandler JOF362, Kombiwandler der Reihen 170kV, 145kV und 123kV sowie Spannungswandler Reihe 245kV
- Weiter wurden ausser Betrieb gesetzte Kombiwandler der Reihen 170kV und 145kV geprüft.



600 abgeschnittene Impulse gem. IEC 60044/61869

- Der Kombiwandler EJOF170 aus dem Jahr 2004 und die Neugeräte wiesen keine dielektrische Schäden auf.
- Der Kombiwandler EJOF145 aus dem Jahr 2001 hatte bei der nachfolgenden Routineprüfung Windungsschluss.



Erweiterte Prüfungen mit neg. abgeschnittenen Impulsen

Prüfobjekt: Spannungswandler EOF 170
 Um=170kV; 325kV AC; 750kV Imp.; 863kV chopp. Imp)

- Routineprüfung gem. IEC 60044-2
- Blitzstossprüfung gem IEC 60044-2
 - 100% 15 neg. Vollwellen + 115% 2 neg. abgeschnittene Wellen
 - 15 pos. Vollwellen
 - Wechselspannungsprüfung
- Weitergehende Blitzstossprüfung
 - 100% 1 neg. Vollwelle
 - 115% 2 neg. abgeschnittene Wellen
 - 100% 1 neg. Vollwelle
 - 115% 10 neg. abgeschnittene Wellen
 - 100% 1 neg. Vollwelle
 - 120% 10 neg. abgeschnittene Wellen
 - 100% 1 neg. Vollwelle
 - 125% 10 neg. abgeschnittene Wellen
 - 100% 1 neg. Vollwelle
 - Wechselspannungsprüfung

Keine Beschädigung!



Seite 13 / 20.11.2012

Erweiterte Prüfungen mit neg. Vollwellen und abgeschnittenen Impulsen und positiven Vollwellen

Prüfobjekt: Spannungswandler EOF 170
 Um=170kV; 325kV AC; 750kV Imp.; 863kV chopp. Imp)

- 100% 1 neg. Vollwelle
- 115% 2 neg. abgeschnittene Wellen
- 100% 2 neg. Vollwellen
- Wechselspannungsprüfung
- 100% 5 pos. Vollwellen
- Wechselspannungsprüfung
- 105% 1 neg. Vollwelle
- 120% 2 neg. abgeschnittene Wellen
- 105% 2 neg. Vollwellen
- Wechselspannungsprüfung
- 105% 5 pos. Vollwellen
- Wechselspannungsprüfung
- 110% 1 neg. Vollwelle
- 125% 2 neg. abgeschnittene Wellen
- 110% 2 neg. Vollwellen
- Wechselspannungsprüfung
- 110% 1 pos. Vollwelle

Durchschlag nach positivem Scheitel
 nach 95 Impulsen $\geq 100\%$ und
 8 Minuten Prüfspannung



Seite 14 / 20.11.2012

Resultate der erweiterten Prüfungen

- Die Wandler bestehen die heutigen IEC-Anforderungen
- Durchschlag in der Isolation erst nach bestandener IEC Impulsprüfung, TE-Prüfungen und zusätzlichen, überhöhten Blitzstossprüfungen

Aber bilden diese Prüfungen die realen Belastungen ab?

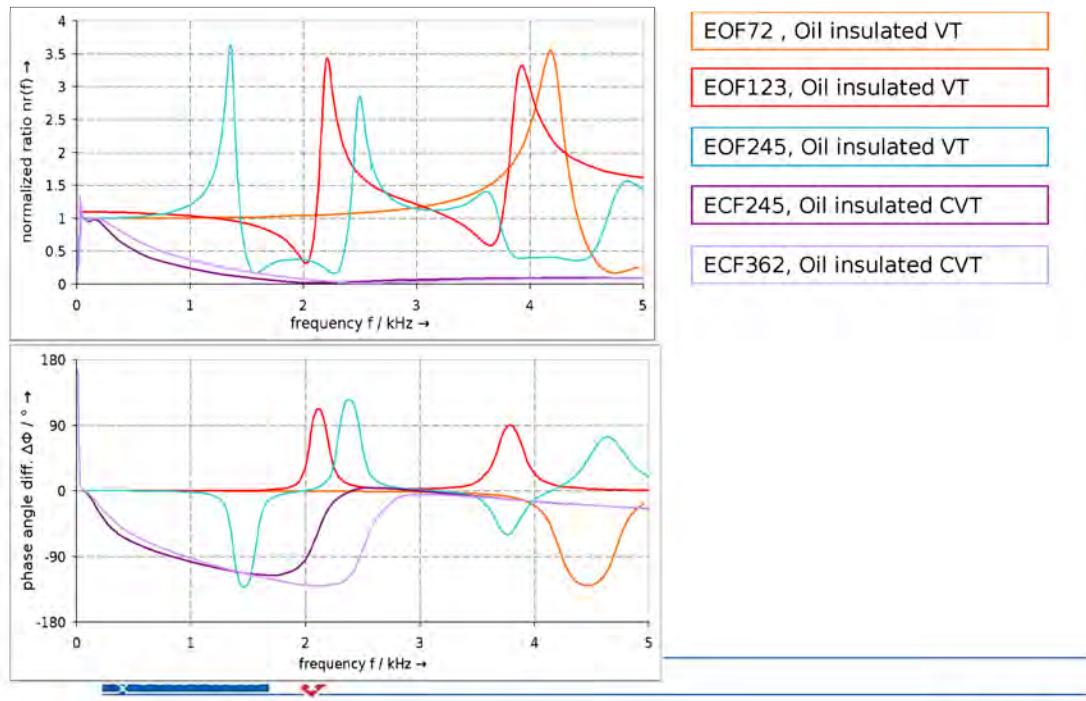


Möglicher Ablauf bei Schädigung und Konsequenzen

- Hochfrequente Spannungsspitzen schädigen die Isolation vor
- Die geschwächte Isolation kann mit zunehmender Beschädigung der eigentlich tieferen Dauerbelastung nicht mehr widerstehen
- Durch hohe transiente Belastung der Papierisolation kommt der Lage des Papiers innerhalb des elektrischen Feldes eine stärkere Bedeutung zu
- Damit wir die Isolationen entsprechend prüfen können, müssen wir wissen, welchen dielektrischen Beanspruchungen die Isolation ausgesetzt ist



Frequenzgang verschiedener Spannungswandler



/ Seite 17 / 20.11.2012

Ohmisch-kapazitiver Spannungsteiler

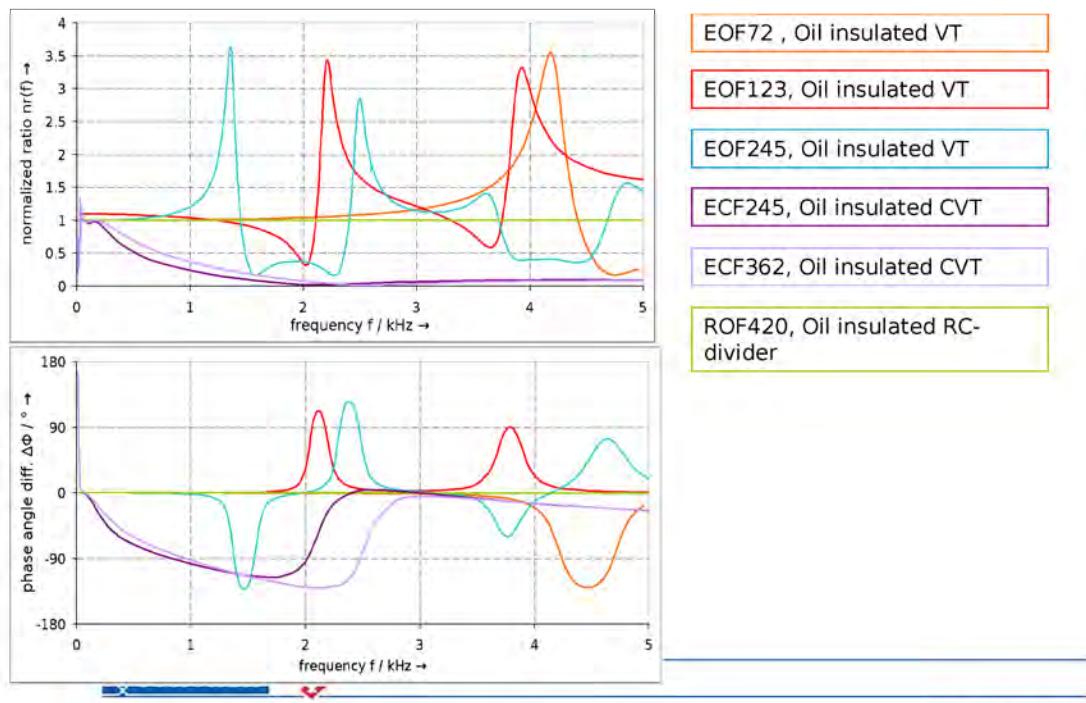


Typ ROF



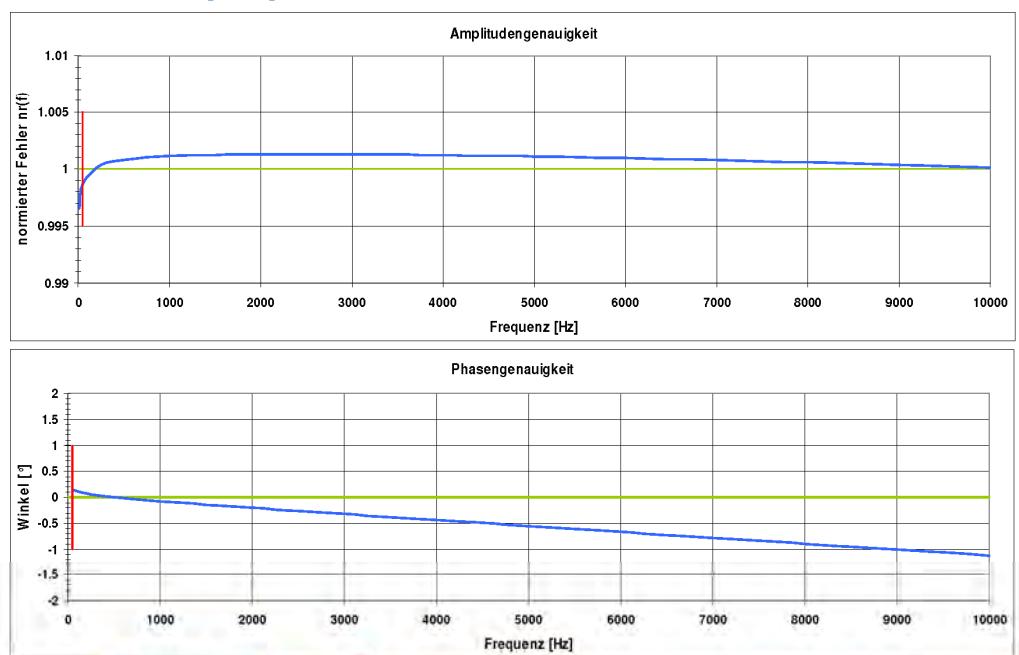
/ Seite 18 / 20.11.2012

Frequenzgang verschiedener Spannungswandler



/ Seite 19 / 20.11.2012

Frequenzgang ROF420



Ausblick

- Mit den geeigneten Messmitteln muss die im Netz real auftretende Spannungsbelastung gemessen werden können
- Die Wirksamkeit der Spannungskoordination ist zu prüfen
- Falls nötig, neue Anforderungen an die Geräte mit den entsprechenden Prüfungen definieren



Seite 21 / 20.11.2012

Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Seite 22 / 20.11.2012

FKH - Fachtagung

05. Dezember 2012

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

Röntgenpulsgetriggerte Teilentladungsmessungen

Dipl.-Ing. Sedat Adili

Inst. für Elektrische Energieübertragung und
Hochspannungstechnik, ETH Zürich

Lebenslauf:

2003 – 2007 TU Wien, Bachelorstudium Elektrotechnik und Informationstechnik

2007 – 2009 TU Wien, Masterstudium Energietechnik

Seit 2009 Doktorand bei der Fachgruppe Hochspannungstechnik, ETH Zürich

Röntgenpulsgetriggerte Teilentladungsmessungen

Sedat Adili, Christian M. Franck

Inst. für Elektrische Energieübertragung und
 Hochspannungstechnik, ETH Zürich

1. Einführung

- Elimination des Zeitverzugs bei der TE-Messung durch Bereitstellung von Startelektronen
- Zuverlässige Detektion aller relevanten Fehlstellen in festen Isolatoren
- TE-Messung bei theoretischer Einsatzspannung um hohe Spannungsbeanspruchung zu vermeiden

2. Phasenaufgelöste und Zeitaufgelöste TE-Messungen; Messaufbau

- Phasenaufgelöste (PRXPD) und Zeitaufgelöste (TRXPD) TE-Messungen mit selbst hergestellten Proben. Sphärische Lunker in Epoxy mit einem Durchmesser von 0.1mm bis 2 mm.
- Vergleich einer natürlichen Zündung mit einer röntgenpulsgetriggerten Zündung

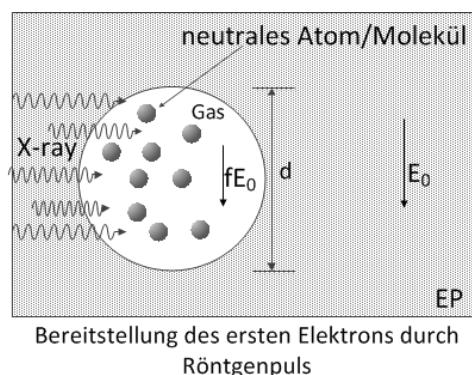


Abbildung 1 Prinzip der TE-Messung mit Röntgenpulsen

- Modifikation des klassischen TE-Messaufbaus für zeitaufgelöste TE-Messungen
- Zeitaufgelöste TE-Messungen zum Verständnis der Wechselwirkung zwischen Röntgenpuls und Fehlstelle

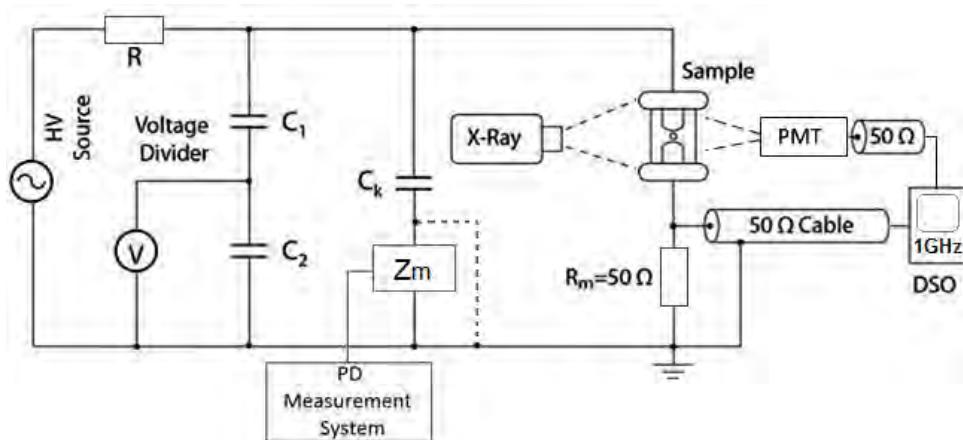


Abbildung 2 TE-Messkreis für phasenaufgelöste und zeitaufgelöste Messungen

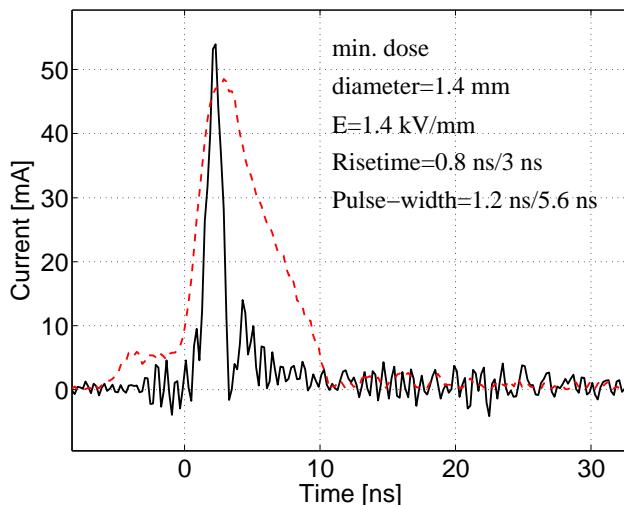


Abbildung 3 Der erste TE-Puls eines sphärischen Lunkers mit 1.4 mm Durchmesser gezündet mit einer minimalen Röntgendiffusionsdosis; (durchgezogen: elektrisches Signal über R_m ; gestrichelt: optisches Signal vom PMT)

3. Schlussfolgerung

- Der Röntgenpuls liefert nur die Startelektronen und eliminiert damit den statistischen Zeitverzug, das TE-Muster unterscheidet sich nicht von dem einer natürlichen Zündung
- Eine erste röntgenpulsgetriggerte TE-Zündung erhöht die Wahrscheinlichkeit einer späteren natürlichen Zündung, aber die nötigen Zündfeldstärken sind sehr hoch
- Zeitaufgelöste Messungen erlauben den Vergleich der einzelnen TE-Pulse bei einer natürlichen Zündung mit einer röntgenpulsgetriggerten Zündung bei unterschiedlicher Röntgendiffusionsdosis
- ❖ Das Projekt ist finanziell unterstützt durch **ABB Schweiz AG**, Corporate Research.

FKH - Fachtagung

5. Dezember 2012

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

Erkenntnisse aus der Verlustfaktormessung zur Alterung von Statorisolationen

Dr. sc. techn. Thomas Brügger
FKH, Zürich

Dr. Thomas Brügger arbeitete zwischen 2008 und 2011 unter der Leitung von Prof. Dr. Klaus Fröhlich am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie (EEH) der ETH Zürich. Seine Doktorarbeit schrieb er zum Thema „Einflussstarker Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolation grosser Hydrogeneratoren“ (siehe Literaturverzeichnis).

Seit 2011 arbeitet Thomas Brügger als Prüfingenieur bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) in Zürich.

Erkenntnisse aus der Verlustfaktormessung zur Alterung von Statorisolationen

Thomas Brügger

FKH, Zürich

Kurzfassung des Vortrags

Die Messung des Verlustfaktors ist eine weitverbreitete Methode in der Zustandsdiagnose von Hochspannungs-Isolationssystemen. Der Vortrag gibt einen Überblick über die physikalischen Hintergründe und Messprinzipien der Verlustfaktormessung. Danach wird auf die spezifischen Gegebenheiten und die Aussagekraft der Verlustfaktormessung bei der Diagnose der Statorisolation grosser Synchrongeneratoren eingegangen. Abschliessend werden aktuelle Entwicklungen und Forschungsanstrengungen im Bereich Verlustfaktormessung zusammengefasst.

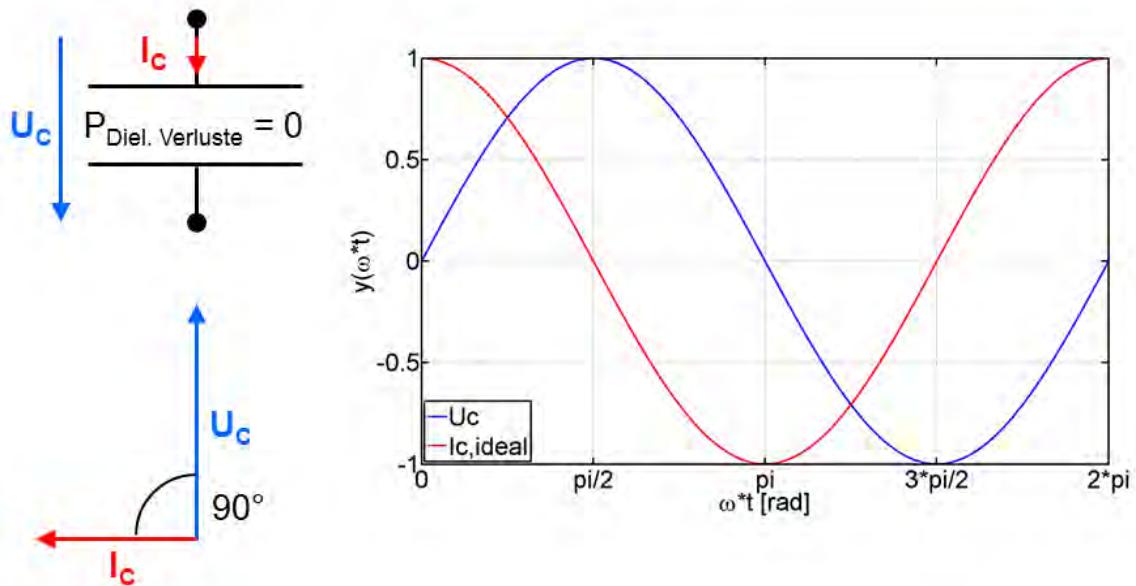
1. Inhalt

- Der Verlustfaktor und sein physikalischer Hintergrund
- Prüfobjekt Statorisolation
- Messtechnik
- Verlustfaktormessung in der Praxis
- Aktuelle Entwicklungen
- Fazit

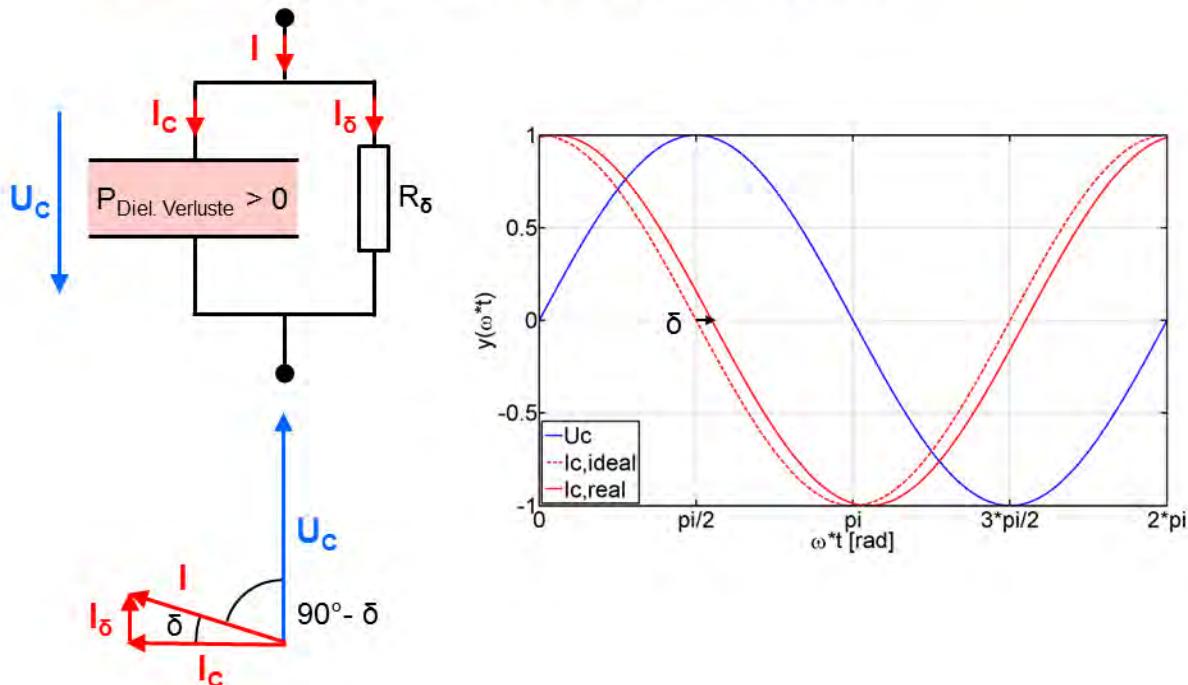
2. Der Verlustfaktor und sein physikalischer Hintergrund

Der Verlustfaktor

- In einem **ideal Kondensator mit verlustfreiem Dielektrikum** eilt der Strom der Spannung um 90° ($\pi/2$) voraus:



- In einem **realen Kondensator mit verlustbehafteten Dielektrikum** eilt der Strom der Spannung um $90^\circ - \delta$ voraus:



- Für den **Verlustwinkel δ** gilt:

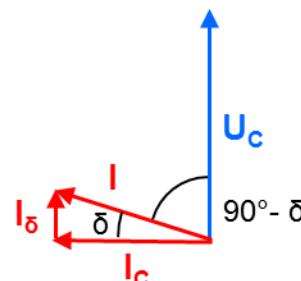
$$\tan \delta = \frac{I_\delta}{I_c}$$

- Mit den Leistungsgrößen

$$P_\delta = U_c * I_\delta \text{ (Wirkleistung)}$$

$$Q_c = U_c * I_c \text{ (Blindleistung)}$$

$$\tan \delta = \frac{P_\delta}{Q_c}$$

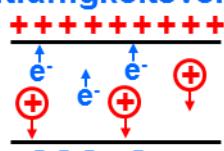


- Der **Verlustfaktor $\tan \delta$** gibt also auch das Verhältnis zwischen der dielektrischen Verlustleistung zur kapazitiven Blindleistung an.

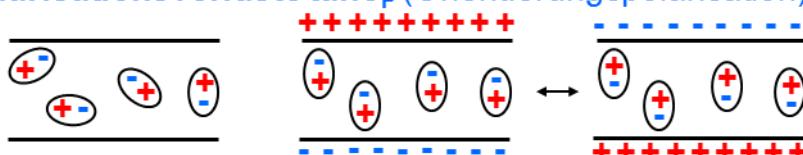
Dielektrische Verluste

haben drei Ursachen:

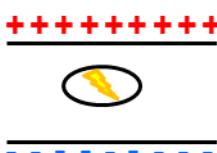
- **Leitfähigkeitsverluste $\tan \delta_L$** durch freie Ladungsträger



- **Polarisationsverluste $\tan \delta_P$** (Orientierungspolarisation)

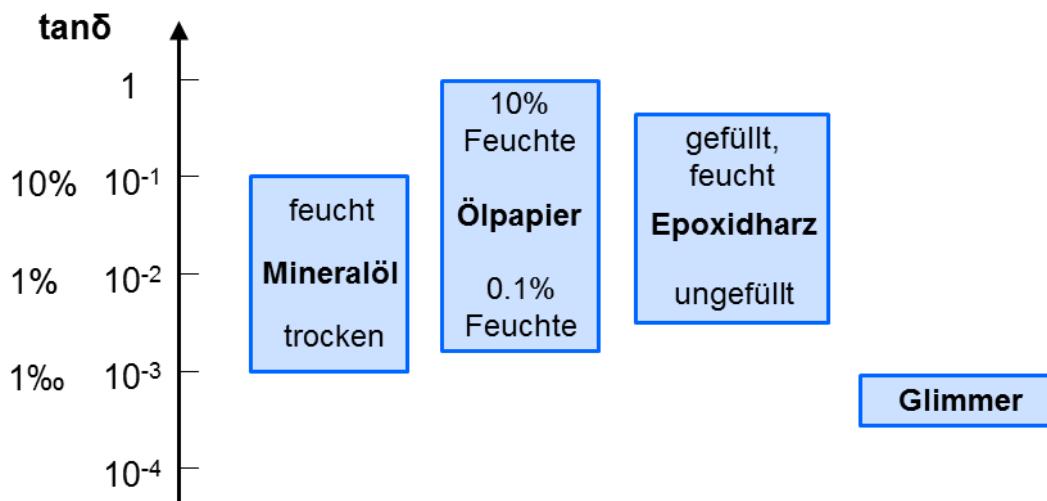


- **Ionisationsverluste $\tan \delta_{TE}$**



Hoher Verlustfaktor $\tan\delta$ bei:

- **Ausgeprägter Orientierungspolarisation** durch polare organische Moleküle im Dielektrikum)
- **Wasser (H_2O)**



Frequenzabhängigkeit von $\tan\delta$

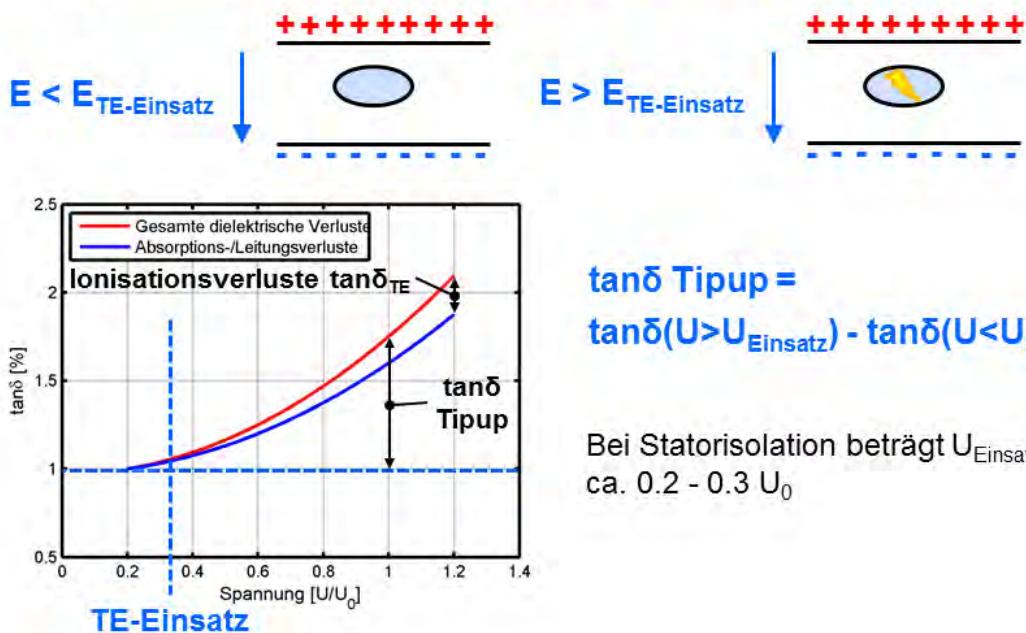
- Bei niedrigen Frequenzen folgen die Dipole dem Feld praktisch unverzögert, bei hohen Frequenzen können sie dem Feld nicht mehr folgen (abhängig von der Art der Dipole)
- Das Maximum der Polarisationsverluste liegt dort, wo die Dipole dem Feld noch folgen können und durch Wechselwirkung mit anderen Molekülen ein Maximum von "Reibungswärme" abgeben
- Da bei tiefen Frequenzen das Verhältnis von Leitungsverlusten zu Blindleistung ansteigt, nimmt $\tan\delta$ für $f \rightarrow 0$ stark zu

Temperaturabhängigkeit von $\tan\delta$

- Mit steigender Temperatur werden die Dipole beweglicher (sie "tauern" auf), damit nehmen die "Reibungsverluste" zu und $\tan\delta$ steigt
- Bei noch höheren Temperaturen stört die Wärmebewegung die Ausrichtung der Dipole und $\tan\delta$ sinkt
- Die überlagerten Leitungsverluste führen bei weiter steigender Temperatur zu einem erneuten Anstieg von $\tan\delta$

Einfluss von Teilentladungen im Dielektrikum:

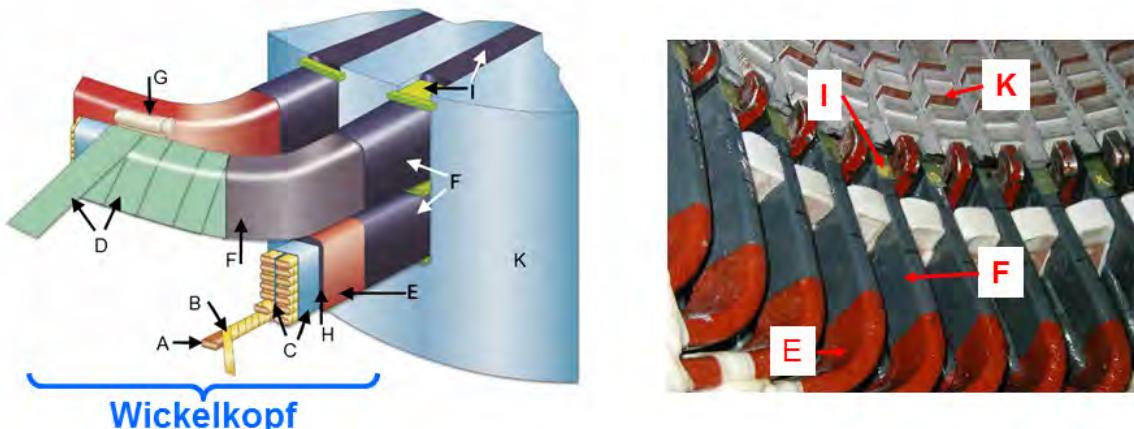
- Ionisationsverluste $\tan\delta_{TE}$
- Zunahme des Verlustfaktors oberhalb des TE-Einsatzes



$$\tan\delta_{Tipup} = \tan\delta(U > U_{Einsatz}) - \tan\delta(U < U_{Einsatz})$$

Bei Statorisolation beträgt $U_{Einsatz}$
ca. 0.2 - 0.3 U_0

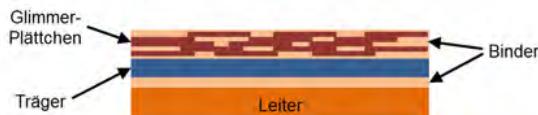
3. Prüfobjekt Statorisolation



- A: Teilleiter
- B: Teilleiter-Isolation
- C: Innen-Glimmschutz
- D: Hauptisolation
- E: Aussenschutzband
- F: Nut- und Endglimmschutz
- G: Wickelkopf-Versteifung
- H: Imprägnierharz
- I: Nutverkeilung
- K: Stator-Blechpaket

Hauptisolation

- Isoliert den Leiter gegen den Stator
- Glimmerbänder, mit Kunstharz imprägniert

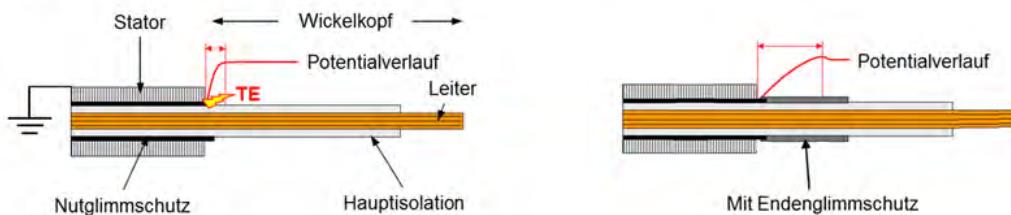


- Feldstärken ca. 3 – 5 kV/mm



Endglimmschutz

- Steuert den Potentialverlauf beim Übergang vom Stator zum Wickelkopf
- Halbleitende Bänder

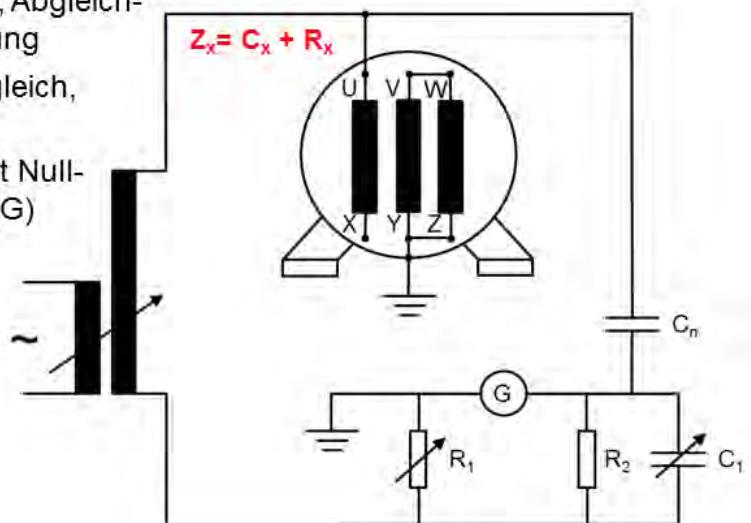


4. Messtechnik

Schering-Brücke

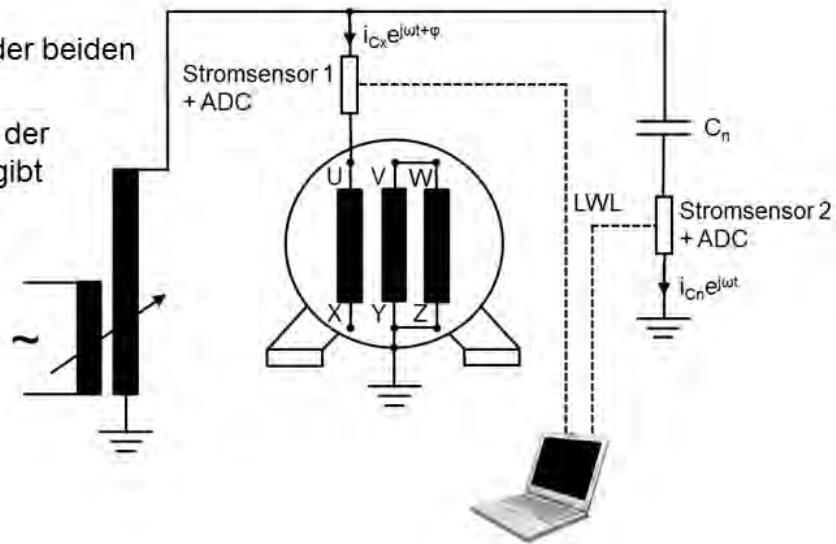
- Erstmals 1920 von Schering verwendet, danach lange unverändert angewandt
- Z_x und verlustarmer Vergleichskondensator C_n an Hochspannung, Abgleichselemente auf Niederspannung
- Ursprünglich manueller Abgleich, dann automatisch
- Messung durch Abgleich mit Nullindikator im Brückenzweig (G)
- Bei $I_G = 0$ gilt:

$$\tan \delta = \omega R_2 C_1$$



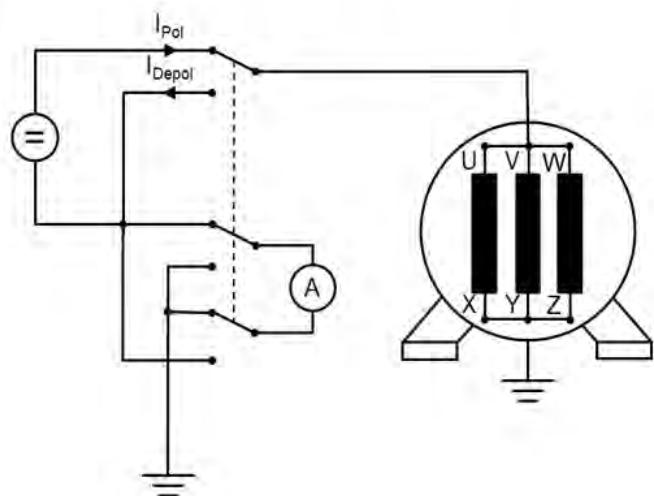
Messung mit Stromsensoren

- Moderne Messung, auch von der FKH verwendet
- Strommessung in Prüf- und Vergleichszweig
- Digitale Auswertung der beiden Stromsignale
- Phasenverschiebung der Grundschwingung ergibt den Verlustfaktor



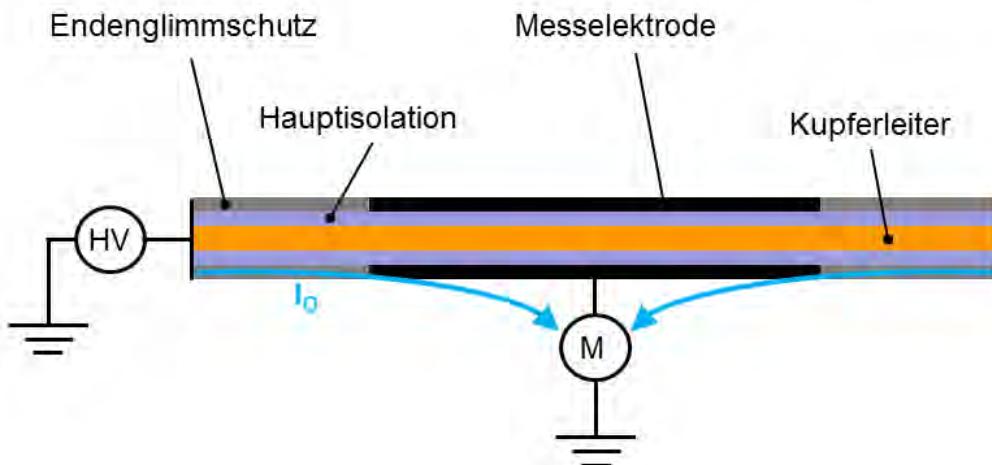
Polarisationsstrom-Messung

- Der Verlustfaktor lässt sich aus den dielektrischen Materialparametern (komplexe Dielektrizitätszahl ϵ_r^* , Leitfähigkeit κ)
- Diese lassen sich z.B. mittels Messung der dielektrischen Systemantwort im Zeitbereich (Sprungantwort) und anschliessender Transformation in den Frequenzbereich bestimmen (PDC-Messung)
- Dabei erhält man aber *keine* Information über TE-Aktivität oder den Zustand des Wickelkopfes



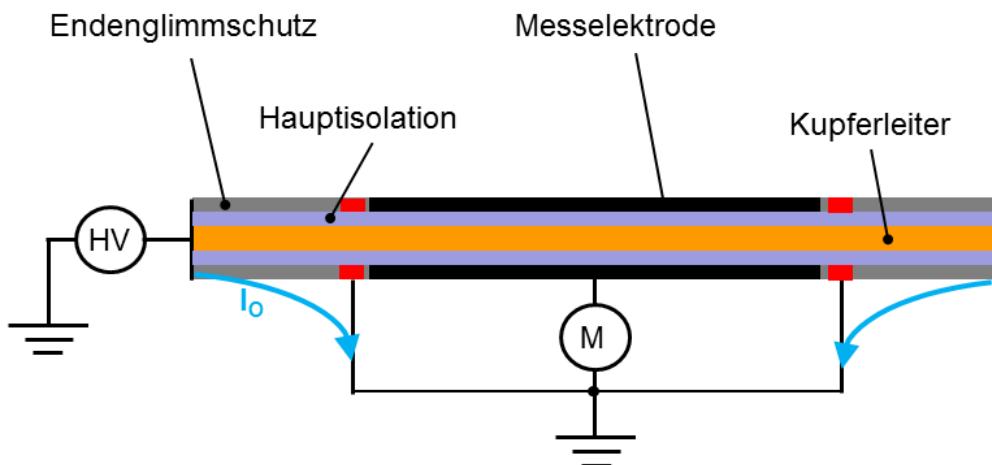
Messung mit Schirmelektroden

- Mit Schirmelektroden kann bei der Messung an Einzelstäben der Beitrag des Endglimmschutzes zum Verlustfaktor unterdrückt werden:



Messung mit Schirmelektroden

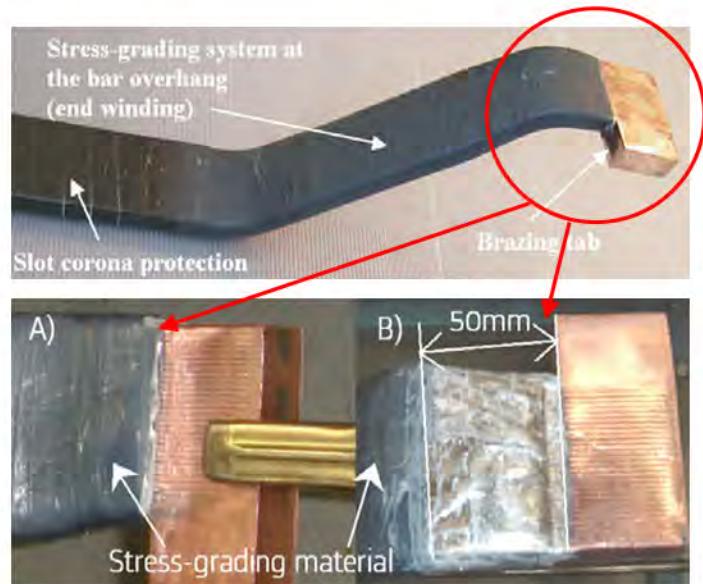
- Mit Schirmelektroden kann bei der Messung an Einzelstäben der Beitrag des Endglimmschutzes zum Verlustfaktor unterdrückt werden:



- Vergleich von geschirmten und ungeschirmten Messwerten nicht möglich!

Einfluss der Wickelkopf-Konstruktion

- Bei der Messung an ganzen Maschinen hängt der Beitrag des Endglimmschutzes auch von der Konstruktion ab:
- Bei einem Spalt zwischen Endglimmschutz und Leiter wird der Oberflächenstrom über den halbleitenden Glimmschutz weitgehend unterdrückt
- Der Verlustfaktor ist dann kleiner
- Der Vergleich von $\tan\delta$ -Werten nicht baugleicher Maschinen ist heikel**

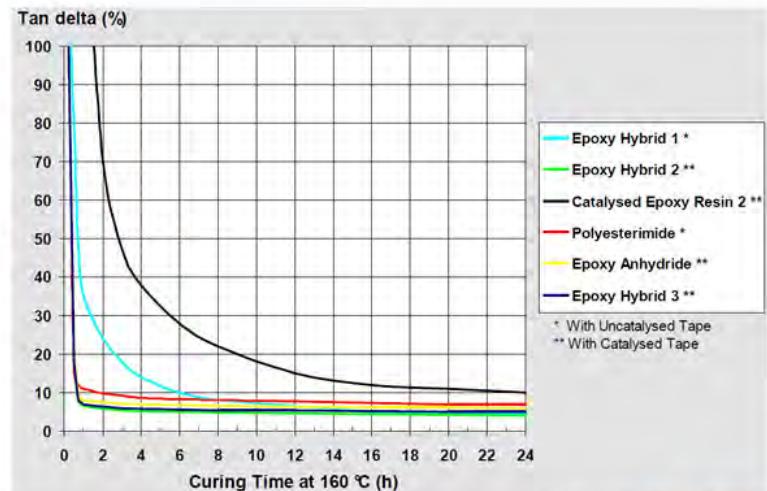


QUELLE: KLAMT, T.; NOEL, S.: *Influence of Stress-Grading Systems on Insulation Resistance and Polarization Index*, IEEE ISEI, 2008.

5. Verlustfaktormessung in der Praxis

Bei der Herstellung von Generatorstäben:

- Kontrolle der Epoxid-Aushärtung
- Bei der Aushärtung nimmt die Beweglichkeit der polaren Epoxidmoleküle ab und die Verluste durch Orientierungspolarisation nehmen ab



Quelle: **wonRoll**

Bei der Zustandsdiagnose von Maschinen

- Grad thermischer Alterung: bei oxidativer Aufspaltung von Epoxid-Molekülketten entstehen zusätzliche polare Fragmente, die zu einem Anstieg des Verlustfaktors führen
- Zunehmende Teilentladungsaktivität führt zu einer Erhöhung des Verlustfaktor-Tipups, speziell bei starker TE-Zunahme infolge flächigen Ablösungen der Hauptisolation von den Kupferleitern aufgrund zyklischer Belastung
Achtung: Die Verlustfaktor-Messung erfasst die TE-Aktivität *integral*, d.h. einzelne möglicherweise gefährliche TE-Quellen können nur mit "echter" TE-Messung erfasst werden!
- Verunreinigungen und Alterung des Endglimmschutzes im Wickelkopfbereich (z.B. mit Bürstenabrieb) führen zu einer Erhöhung der Oberflächenströme auf dem Endglimmschutz und damit zu einer Erhöhung des $\tan\delta$

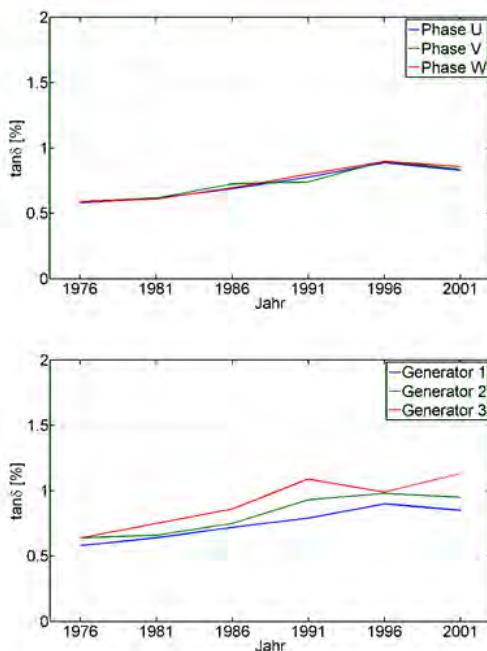


Analyse von Langzeitmessdaten von Hydrogeneratoren

- Im Rahmen von ETH-Dissertation: "*Einfluss starker Lastwechsel-dynamik auf das Alterungsverhalten der Isolierung grosser Hydrogeneratoren*" untersucht
- 3 baugleiche 60-MVA-Hydrogeneratoren, Neuwicklung mit Glimmer/Epoxid-Stäben Mitte 1970er Jahre
- Verlustfaktormessungen immer gleich durchgeführt, deshalb Resultate gut vergleichbar

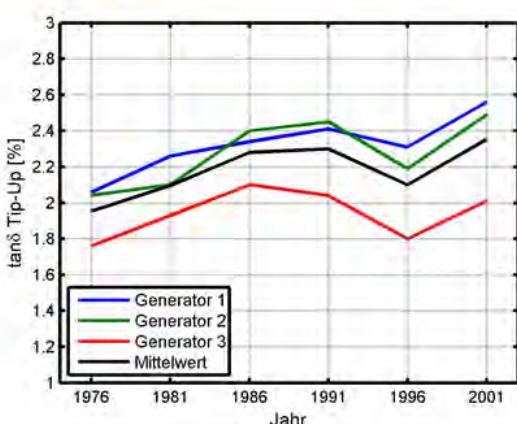
Leistung	MVA	60
Nennspannung	kV	15.5
Statorlänge	mm	2'300
Kühlung	-	Luft
Isolation	-	Glimmer/Epoxid, VPI
Temperaturklasse	-	F

tan δ bei 0.1 U_n (unterhalb der TE-Einsetzspannung)



- Gute Übereinstimmung der drei Phasen der gleichen Maschine
- Bei baugleichen, am gleichen Ort aufgestellten Maschinen gibt es bereits deutliche Abweichungen
- Der Anstieg kann durch die thermische Alterung der Isolation erklärt werden

tan δ Tipup von 0.1U_n - U_n



- Alle drei Maschinen zeigen ähnliche Entwicklung: anfängliche Zunahme, dann Abflachung
- Zunahme kann durch Zunahme der TE-Aktivität erklärt werden
- Abflachung durch verringerte Bildung von Ablösungen, sowie durch Karbonisierung von Hohlräumen
- Vergleich von absoluten Werten zwischen den Maschinen ebenfalls problematisch

6. Aktuelle Entwicklungen

- **Weiterentwicklung der Messtechnik für die Messung der dielektrischen Antwort**

→ Kombination der Messungen in Frequenz- und Zeitbereich reduziert Messdauer (z.B. omicron DIRANA)

- **Messung des Verlustfaktors bei anderen Frequenzen**

→ Sensitivität für spezifische Fehler ist frequenzabhängig

→ Hier besteht noch Forschungsbedarf!

- **Online-Messung des Verlustfaktors**

→ Wird mittels Differenzstrom-Messung bei kleineren Maschinen schon angewandt

(Younsi, K. et al.: *Online Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Motor Stator Insulation*, Power Modulator and High Voltage Conference, 2010 IEEE International, pp.530-533, 2010.)

7. Fazit

Stärken der Verlustfaktor-Messung

- **Einfache Anwendung**
- **Relativ unkomplizierte Auswertbarkeit (wenige Kennwerte)**
- **Werte oft auch bei älteren Maschinen seit Inbetriebnahme vorhanden**
- **Online-Messung für zustandsbasierte Wartung**
- **Probleme einer Einzelphase sind leicht erkennbar**

Schwächen der Verlustfaktor-Messung

- **Integrale Messung, einzelne TE-Quellen werden nicht erfasst, bzw. können nicht beurteilt werden**
- **Vergleiche zwischen verschiedenen Maschinen sind schwierig**
- **Temperatur-/Feuchtigkeitseinfluss**

Empfehlungen für den Anwender

- Aufnahme eines Fingerprints bei Inbetriebnahme
- Wenn möglich, gleiche Umgebungsbedingungen für die Messung schaffen
- Verlustfaktormessung mit anderen Diagnosemethoden (TE-Messung) kombinieren

Ausblick

- Verlustfaktor Messung birgt noch ungenutztes Potential
- Anwendung von dielektrischer Antwortmessung (PDC in Zeit-/Frequenzbereich)
- Durch weitere Forschung im Bereich der Frequenzabhängigkeit der $\tan\delta$ -Messung kann die Aussagekraft gesteigert werden

Literaturverzeichnis

- BRÜGGER, T.: *Einfluss starker Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolation grosser Hydrogeneratoren*, ETH DISS. NR. 19839 (<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:4554/eth-4554-02.pdf>)
- EMERY, F.T.: *Basics of Power Factor Measurements on High Voltage Stator Bars and Stator Windings*, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 20, no. 3, pp. 40-45, May/June, 2004
- ZAENGL, W.S.: *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I. Theoretical Considerations*, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, September/October, 2003.
- SUMEREIDER, C.; MUHR, H.M.; et al.: *Observation of Dielectric Parameters at Generator Stator Windings under Changing Environmental Conditions*, Conference Record of the International Symposium on High Voltage Engineering ISH, Capetown, pp. 190-190, 2009.
- FARAHANI, M.; BORSI, H., GOCKENBACH, H.: *Study of Capacitance and Dissipation Factor Tipup to Evaluate the Condition of Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines*, Electrical Engineering, Springer, vol. 89, no. 4, pp. 263-270, March, 2007.
- STONE, G.C., BOULTER, E.A., CULBERT, I.; DHIRANI, H.: *Electrical Insulation for Rotating Machines*, IEEE Press, Piscataway, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-44506-1, 2004.

FKH - Fachtagung

05. Dezember 2012

Diagnostic d'isolation et détermination de l'état du vieillissement de composants haute tension

Diagnostics des câbles de nos Réseaux Moyenne Tension Proposition d'uniformisation et retour d'expérience du GRUT (Groupe Romand d'Unification Technique)

Dipl. Ing. Marc Weber

Services Industriels de Genève, Ingénieur HES en Electricité
Adjoint au responsable de l'unité Réseau
Spécialiste câbles et accessoires BT, MT et 130 kV

Diplômé en 1986, puis 4 ans dans l'industrie (oscilloscopes numériques, électrosolaire, éolien), à SIG depuis décembre 1990: 9 ans dans les projets HT (câbles et postes 130kV) et 13 ans au réseau. Responsable du GRUT groupe B7 depuis 8 ans.

Diagnostics des câbles de nos Réseaux Moyenne Tension Proposition d'uniformisation et retour d'expérience du GRUT (Groupe Romand d'Unification Technique)

Marc Weber

Services Industriels de Genève pour le groupe B7 du GRUT

Résumé :

Nos réseaux câblés: ils vieillissent, en général, nous n'arrivons pas à remplacer les câbles que nous souhaiterions, les extensions sont imposées par les besoins des clients et les rénovations tributaires du génie civil et des travaux de tiers (routes, collecteurs, etc.).

Les exploitants souhaitent remplacer les câbles le plus tard possible (après amortissement), mais avant ! la panne pour ne pas perturber les clients (SAIDI).

Les membres du Groupe B7 se sont posés la question de savoir, selon les expériences de chacun quelles seraient les meilleurs moyens de diagnostiquer l'état des câbles du réseau. Au bout de plusieurs campagnes de mesures (tangente delta, essai de tension, mesures de décharges partielles en service et hors service, etc.) et de nombreuses investigations, nous sommes à même de proposer une méthodologie uniformisée pour diagnostiquer un réseau MT.

Le GRUT (voir plaquette) travaille sur des sujets techniques liés aux réseaux dans 4 axes :

Partages de l'expérience

Uniformisation de méthodes, produits (PDIE, raccordement uniifié)

Représentation commune (vis à vis de l'ELCOM, AES, etc)

Etudes communes (déTECTEURS ICC, diagnostics de câbles, cahier des charges transformateurs et compteurs, etc.)

En 2012, le GRUT comprend les membres suivants:

- Multidis (Vallée de l'Orbe Énergie Holding SA, L'Energie de Sion-Région, Service Electrique Intercommunal Vernayaz, Viteos, Forces Motrices de l'Avançon, Service Electrique Intercommunal Gland),
- Groupe E, •Services Industriels de Genève, •Romande Energie, •Service de l'Electricité de Lausanne. Membres partiels: Alpiq et Hydro-Exploitation, Forces Motrices Bernoises.

Et voici les 14 groupes de projet

		Chef de projet		Répondant	
B1	Transformateurs MT/BT	Pierre-André Ormond	RE	Pierre-André Ormond	RE
B2	Métrologie	Bernard Cottier	SEL	Bernard Krummen	SEL
B3	Equipements MT/BT <i>DISSOUT</i>				
B4	Qualité de fourniture	Manuel Gonzalez	Groupe E	Roger Neuhaus	Groupe E
B5	PDIE	Pierre-Alain Monney	SIG	Maurice Genier	SIG
B6	CORSE	Charles Rochat	Groupe E	Roger Neuhaus	Groupe E
B7	Diagnostic câbles et accessoires	Marc Weber	SIG	Maurice Genier	SIG
B8	Protection	Olivier Bissat	SIG	Maurice Genier	SIG
B9	SIT - Système d'information du territoire	Stéphane Laurion	RE	Pierre-André Ormond	RE
B10	ORN	Mme Nell Reimann	Alpiq EnerTrans	Bernard Krummen	SEL
B11	MT unifiée <i>DISSOUT</i>				
B12	Défauts à la terre dans les réseaux de distribution MT <i>DISSOUT</i>				
B13	Tarification de l'acheminement	Cédric Chanez	Groupe E	Roger Neuhaus	Groupe E
B14	Raccordements aux réseaux BT-MT-HT	Christophe Monay	RE	Pierre-André Ormond	RE
B15	Détecteurs directionnels de défauts	John Epars	RE	Pierre-André Ormond	RE

Exemple de liaison 20 kV ayant demandé un diagnostic

GRUT B7 diagnostic câbles MT

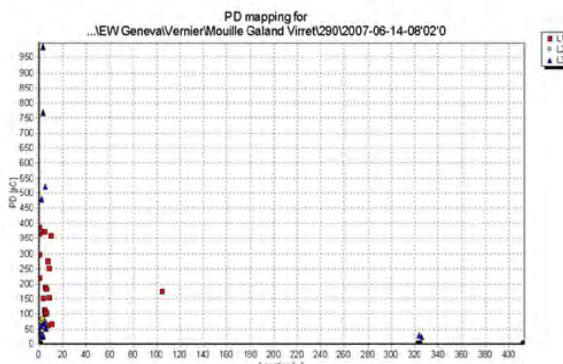
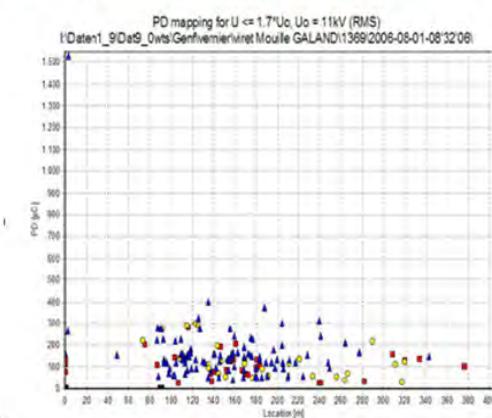
Nous avons testé à SIG une méthode alternative au remplacement : le siliconage des câbles en PE non réticulés (TT) : Cablecure®

Comment valider de manière **SUISSE donc NEUTRE** la méthode, malgré les assurances (20 ans) données par le vendeur ?

→ dP avant et après le « siliconage »

→ OWTS **1.8.06** et **14.6.07**

Cable from
CableSection
Phase to Ground Voltage
290
12 kV (RMS)
Year
1975
Length
413 m



Alternative

Cablecure® à SIG

Commentaire : Après 5 ans : câble parfait ! 9 autres tronçons de TT siliconnés (4 km) 5 fois moins cher que la pose de nouveau câbles.
Siliconage = coût du câble neuf en CHF/m



Exemples de problématique de tension d'un réseau :

SIL passe de 6 à 12 puis montera à 20 kV

DP: Cycle de test (~ 90 Minutes/3 Phases)				Résultat mesure IMCORP Milan - Milcret											
				SEL Date: 9. 11. 2005											
				Câble Nr. 20 de Milan à Milcret				Longeur: 789m							
				section:	164	79	298	20	228						
				manchon:	164	243	541	561	709						
				Phase:	émission d'essai (kV)	no. de CP par période de 50Hz	Grandeur CP (pC)	distance (m)	prob. Manchon	dans câble masse	dans câble PE	dans câble XLPE	remarques / recommandations		
				L1	6.3	2	215	475-485	x?	x?					
				L1	11	2	1616	520	x?	x?			Surveiller l'évolution de la décharge de 50 pC		
				L1	16	3	1306	510-535	x?	x?					

L'énergie d'une décharge de 50pC d'un câble 6KV mesuré à 3,5-6-9,1 KV est très inférieure à celle d'une même DP de 50 pC mesurée sur un câble 20KV entre 11 et 30 kV, ce qui peut expliquer le plus long délai d'apparition d'un défaut.

Les défauts ne sont donc pas toujours apparus là où on les attendait et surtout les câbles ont tenu bien plus longtemps que ce qui était annoncé (parfois ils sont toujours en service)

Mesures Td

Les mesures de **Tanδ** ne sont pas valables pour des câbles mixtes, mais très valables pour du mono type ou 2 tronçons distincts :

mesures de **Tanδ** faites avec M Leplattenier (Gasenzer).

Verlustfaktor-Messung:

Diese Messung beurteilt den integralen Alterungsfaktor der Kabelstrecke. Die Messungen ergaben Werte innerhalb der Toleranz für betriebsbereite PE-Kabel. Über die drei Spannungsstufen steigen die Werte aber bereits relativ stark an, von min. 0.297 E-3 bis auf max. 0.860 E-3. Dies deutet auf eine gewisse Alterung des Isolationsmaterials hin, jedoch für ein 31 Jahre altes PE Kabel noch im „normalen“

Bereich. Beim Kabel handelt es sich entgegen den ersten Angaben um ein unvernetztes PE-Kabel („Mischtyp“) TKT-?. Mit seinen ca. 30 Jahren hat das Kabel 75 % seiner theoretischen Lebensdauer erreicht.

Auf Grund der gemessenen Werte scheint die Betriebssicherheit des Kabels nicht gefährdet zu sein.

Wir empfehlen Kabel dieses Typs ab einem gewissen Alter regelmässig, ca. alle 5-10 Jahre, zu kontrollieren.

Couplées avec les dP VLF-Truesinus : TE-Messungen:

Im Kabel selber konnten keine TE festgestellt werden.

Bei 22.0 kVeff. Sind an der Schaltanlage in Poste MT

/BT 870 vereinzelte TE Entladungen bis max. 225 pC feststellbar. → OK



Mesures de dP (TE)

GRUT B7 diagnostic câbles MT OWTS M 28

- Le câble U<Uo, quelques DP de faibles niveaux.
- Sur la jonction située à 247m., dP max de 150 pC
- mais nombre dP très élevé + dP dans jonction 98m.

Recommandations :

Comme des DP apparaissent déjà à la tension de service Uo dans la jonction située à 247m, elle se détériorera progressivement.

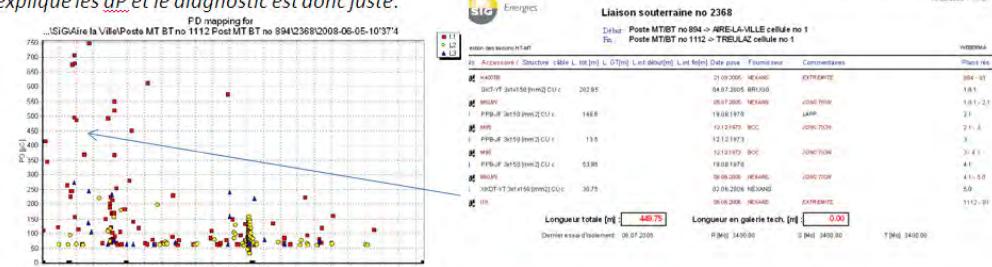
En cas de surtensions des DP de très hauts niveaux peuvent être générées dans la jonction située à 82 m et en provoquer la défaillance
→ Ces deux jonctions doivent être changées.

→ Un diagnostic devrait être répété afin de re-contrôler si il ya bien la jonction située à 31m.

sebakMT



Il y a bien une jonction à 31 mètre, puis une à 84 m et une à 98 mètres et une à 246 mètres la jonction à 84 m manque, elle explique les dP et le diagnostic est donc juste.



On line

Puis nous avons eu la volonté de regarder les mesures « ON LINE »

En effet une mesure « Off Line » nécessite :

- Mise HS de la liaison → manœuvres/coupe (pas partout possible)
- planning de travaux compliqué, ressources monteurs et exploitation
- Démontage des têtes (+dégraissage)
- Eloignement cosse/cellule
- Mesure par spécialiste
- Remontage (délicat pour les embrochables-vissables)
- Test de la liaison (SIG)
- Manœuvres pour remettre la ligne ES

Tandis qu'une mesure « ON Line » demande :

- **pas de mise HS de la liaison**
- éventuelle manœuvres pour la pose des capteurs(pas partout possible)
- Pas de planning de travaux compliqué, pas de ressources monteurs
- Juste labo et/ou exploitation
- Mesure automatique et simultanée station/lignes
- **pas de remontage et pas de tests !**

•Et donne une image du câble et de la station !

Stratégie

Il nous faut connaître le moment juste avant le claquage...

Pour faire des analyses, il faut pouvoir connaître son réseau : km, nombre de lignes, de tronçons, accessoires, année, localisation, mode de pose (tubes, caniveau, etc); cela est indispensable pour être précis et fiable. Il faut aussi connaître l'historique du câble (Charge, 0°C, mode de pose, corrosion, contraintes mécaniques

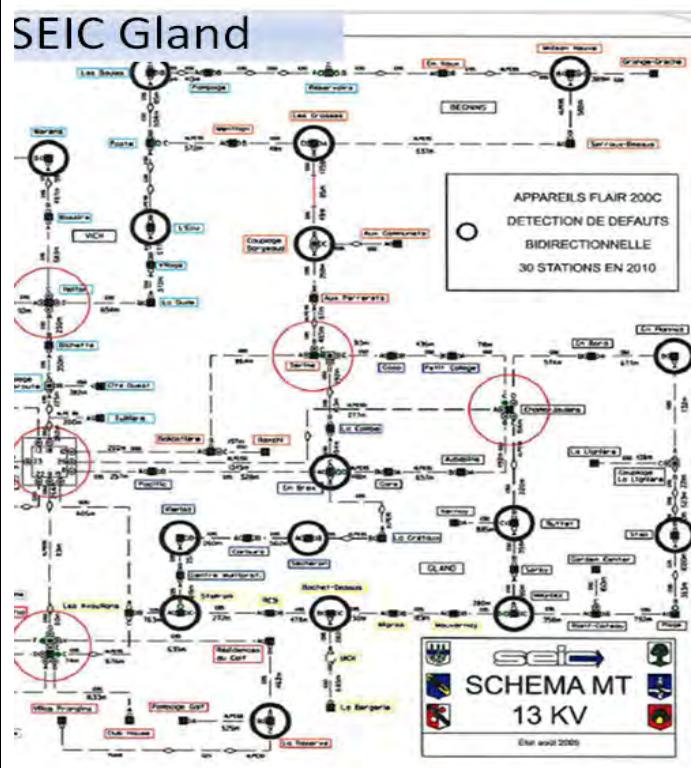
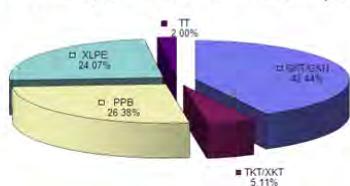


Diagramme des diagnostics



Cas pratique

<p>Cas d'étude</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Distance</th> <th>Position</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 m</td> <td>Extremité</td> </tr> <tr> <td>429 m</td> <td>Jonction</td> </tr> <tr> <td>876 m</td> <td>Jonction</td> </tr> <tr> <td>1354 m</td> <td>Jonction</td> </tr> <tr> <td>1650 m</td> <td>Extremité</td> </tr> </tbody> </table>	Distance	Position	0 m	Extremité	429 m	Jonction	876 m	Jonction	1354 m	Jonction	1650 m	Extremité	<p>Mesures décharges partielles On-line</p> <ul style="list-style-type: none"> Contexte <ul style="list-style-type: none"> 154 mesures sur lignes pulsées et de distribution Retour d'expérience <ul style="list-style-type: none"> Lignes pulsées → signaux trop pollués ☹ Lignes de distribution → résultats exploitables ☺ Période d'acquisition minimale de 12 heures Préparation préalable des points de mesure Interprétation des résultats nécessitant une grande expérience dans le domaine Deux lignes détectées comme très problématiques Conclusion <ul style="list-style-type: none"> Mesures On-line donnent une première idée d'une éventuelle dégradation à confirmer par des méthodes/mesures plus précises Pour les réseaux pulsés du CERN, la méthode On-line ne peut se faire que hors charge
Distance	Position												
0 m	Extremité												
429 m	Jonction												
876 m	Jonction												
1354 m	Jonction												
1650 m	Extremité												

<p>Mesures décharges partielles Off-line</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contexte <ul style="list-style-type: none"> – Localisation précise de décharges après analyse On-line • Retour d'expérience <ul style="list-style-type: none"> – Test rapide mais nécessitant la déconnexion des câbles de puissance – Exécution des mesures nécessite une expérience accrue dans le domaine des mesures de décharges partielles – Interprétation des résultats nécessite de l'expérience • Conclusion <ul style="list-style-type: none"> – Les mesures Off-line ont confirmé la présence de décharges initialement détectées avec la méthode on-line – Très bonne précision de localisation 	<p>Résultats - Off-line</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Mesures initiales</th> <th style="text-align: center;">Après échange jonctions</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">@ 1.7 Uo</td> <td style="text-align: center;">@ Uo</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td style="text-align: center;"></td> </tr> </tbody> </table>	Mesures initiales	Après échange jonctions			@ 1.7 Uo	@ Uo		
Mesures initiales	Après échange jonctions								
@ 1.7 Uo	@ Uo								

Conclusion « CERN »

Mesure On-line

- On souhaite développer* des moyens (filtres numériques) pour adapter cette méthode à des réseaux pulsés en charge
- On optimise l'accessibilité aux points de mesure dans toute sous-station neuve ou à renouveler

Mesure Off-line

- On a acheté un système de mesure Off-line
- Cette méthode fait partie du programme de qualification de nouvelles lignes (Mapping Energy=0)
- Planification sur 3-4 ans d'un "mapping" de tout le réseau CERN $\leq 18 \text{ kV}$

* avec le fournisseur

FKH - Fachtagung

05. Dezember 2012

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

Diagnosesysteme - Aktuelle Entwicklungen und Zukunftsvisionen

Dr.-Ing. Maik Koch
Omicron Energy Solutions, Berlin, Germany

Maik Koch, Dr.-Ing., leitet das Team "Produktmanagement & Asset Experts" bei Omicron in Berlin. Seine berufliche Laufbahn begann mit einer Lehre zum Elektromonteur. Danach studierte er an der FH "Lausitz" Elektrische Energietechnik und nach einigen Jahren beruflicher Praxis ein zweites Mal für das Universitätsdiplom an der TU Cottbus. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart promovierte er über Alterung und Feuchtemessung in Öl-Papier-Isolierungen. 2007 startete er bei Omicron als Produktmanager, leitete dann das Produktmanagement und ist jetzt am Aufbau des Geschäftsfelds Monitoring in Berlin beteiligt.

Maik Koch verfasste mehr als 70 wissenschaftliche Veröffentlichungen und engagiert sich in Arbeitsgruppen von VDE, CIGRÈ und IEEE.

Diagnosesysteme - Aktuelle Entwicklungen und Zukunftsvisionen

Maik Koch

Omicron Energy Solutions, Berlin, Germany

Kurzfassung

Spätestens seit dem Transformator-Brand im Kernkraftwerk Krümmel sind Zustandserfassung und Diagnostik an Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik in den Fokus der Öffentlichkeit getreten. Der Einbau einer Teilentladungs-Messeinrichtung war damals "schlicht vergessen" worden, was entsprechende Konsequenzen für die Kraftwerksleitung nach sich zog und auch einen Beitrag zur Meinungsfindung der deutschen Öffentlichkeit zur Atomenergie lieferte.

Tatsächlich verlangen der alternde Gerätelpark und zustandsorientierte Instandhaltungsstrategien nach neuen diagnostischen Verfahren, um den Zustand der Betriebsmittel des Hochspannungsnetzes zuverlässig und ggf. auch on-line, also während des Betriebs, bestimmen zu können.

Der vorliegende Artikel legt seinen Fokus auf *Trends und Neuheiten* zur Diagnostik und Zustandsbestimmung elektrischer Betriebsmittel, insbesondere am Transformator:

- Analyse der gelösten Gase DGA
- Wasserbestimmung im Öl
- Ölleitfähigkeit
- Messung und Bewertung von Teilentladungen (PD, UHF-PD)
- Analyse der dielektrischen Antwort (PDC, FDS)
- Analyse der Frequenzantwort FRA
- Online-Diagnose von Durchführungen

Nach einer knappen Vorstellung des jeweiligen Verfahrens werden Neuheiten und Diskussionen unter Experten umrissen.

Durch wissenschaftliche Forschung und erweiterte messtechnische Möglichkeiten machte die Diagnostik an Hochspannungs-Betriebsmitteln eine Reihe von Fortschritten. Beharrungserscheinungen in der eher konservativen Welt der elektrischen Energietechnik sind dabei normal. Zwar konnte die Brücke zwischen Messwert und dessen Interpretation nicht für jedes Verfahren gebaut werden, doch gibt es dafür positive Beispiele wie z.B. bei der Feuchtigkeit im Isoliersystem. Für andere Verfahren versprechen Software-basierte Lösungen wirklichen Anwendernutzen.



OMICRON

Diagnosesysteme

Aktuelle Entwicklungen und Zukunftsvisionen

Maik Koch, Dr.-Ing

Diagnostische Verfahren

OMICRON

Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit

Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Übersetzung
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- FRA
- Furane im Öl
- Methanol

Online Monitoring

- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

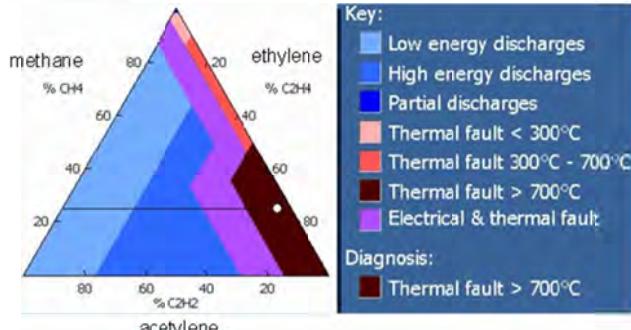
DGA – Analyse Gelöster Gase



- Messverfahren
 - Messung und Analyse von Schadgasen in Ölprobe
- Interpretation
 - Verschiedene wissenschaftlich gesicherte Interpretationsschemata
→ www.uni-stuttgart.de/ieh
- Modern und neu?
 - Interpretation für Ester: dieselben Gase, aber:
Thermisches Verhalten
 - Interpretation für OLTC
 - Transformator-Atmung

Bitte wählen Sie die gewünschte Methode:

- Doernenburg Ratios
- Duval Method
- General Electric Method
- IEC60599
- Müller-Schlesing-Soldner
- Rogers Ratios
- Cigre Method



Ester – Vor und Nachteile



Vorteile

- ✓ Biologisch abbaubar
- ✓ Schwer entflammbar
- ✓ Wasserlösungsvermögen
- ✓ Durchschlagsspannung
Alterung, Vergleich durch RS
- ✓ Papierfreundlich

Besonderheiten

- ✗ Hohe Viskosität durch Oxydation
- ✗ Durchschlagsverhalten bei inhomogenen Anordnungen



Diagnostische Verfahren

Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit

Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Übersetzung
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- FRA
- Furane im Öl
- Methanol

Online Monitoring

- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

Wasser im Öl

▪ Traditionell: Wassergehalt

< 20 ppm für $U_r > 170 \text{ kV}$

< 40 ppm für $U_r > 72,5 \text{ kV}$

tropfenfrei $U_r < 72,5 \text{ kV}$

▪ Neu: Wassersättigung

IEC 60422

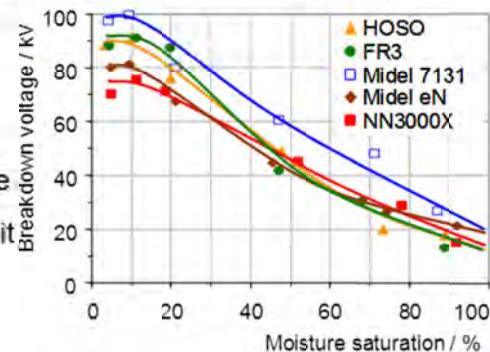
< 6% dry,

7-21 % mäßig feucht

21-30 feucht, > 30 extrem feucht

▪ Vorteile der Wassersättigung

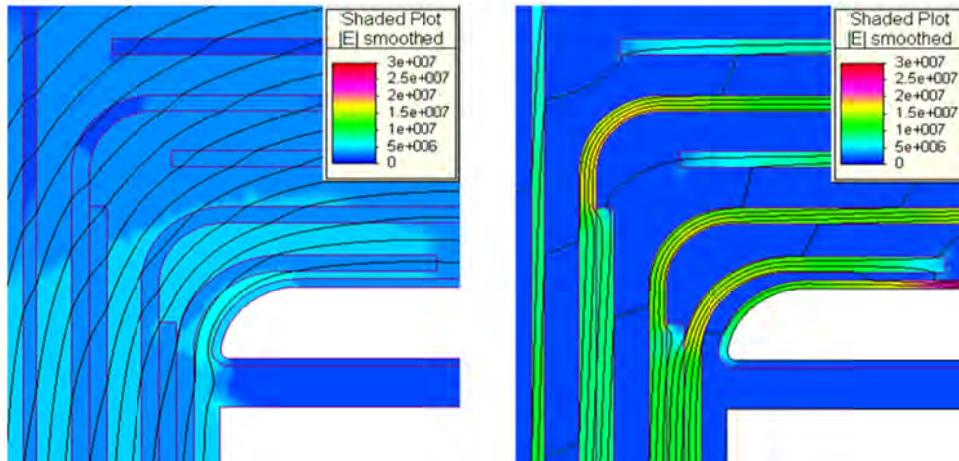
- ✓ Genauer und on-line messbar
- ✓ Bessere Korrelation mit schädigenden Effekten von Feuchte
- ✓ Aussage über Trocknungs-Fähigkeit



Leitfähigkeit des Öls



- Entscheidend für Feldverteilung in HGÜ-Transformatoren

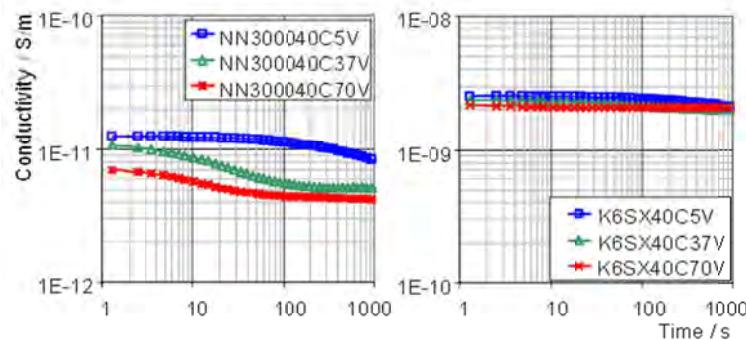


- Wechselspannung:
Feldverteilung bestimmt durch Permittivität
- Gleichspannung:
Feldverteilung bestimmt durch Leitfähigkeit

Leitfähigkeit: Neuer Standard



- Zeit- und Feldstärkeabhängiges Verhalten



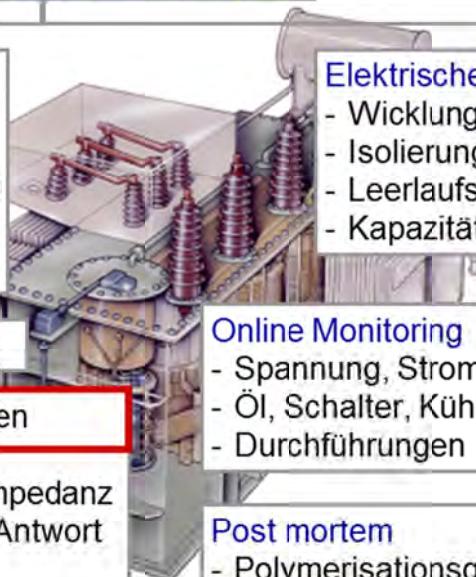
- Bisher von keinem Messverfahren berücksichtigt
- Bestimmung on-site mit Analyse der dielektrischen Antwort?
- Neue Working Group in Cigré: JWG D1.41
→ Ziel neuer Standard

Diagnostische Verfahren

Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit



Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- FRA
- Furane im Öl

Online Monitoring

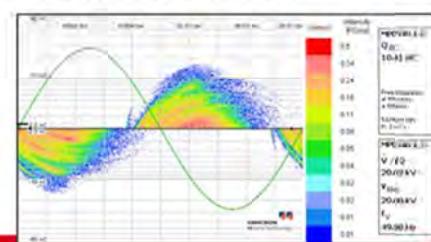
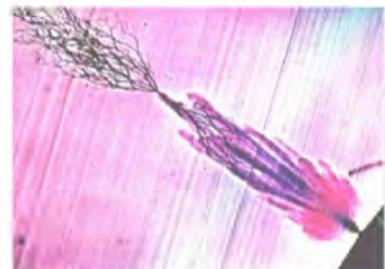
- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

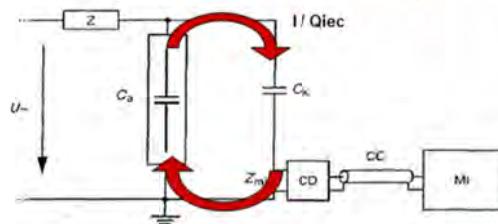
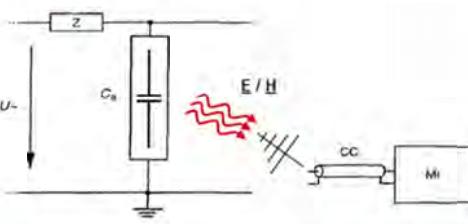
Teilentladungs-Diagnostik

- Messverfahren
 - Messung kleinster Entladeimpulse als früher Indikator für Durchschlag
- Interpretation
 - Mustererkennung durch Experten
- Modern und neu?
 - Scheinbare Ladung - Apparent Charge
 - “IEC 60270 measurements just as detection method (YES/NO)”
 - “Focus on Trend not on values”
 - Standardisierung nicht-konventioneller TE-Messverfahren
 - HF-elektrisch, UHF, Akustisch
 - Ergebnis nicht vor 2013
 - Mustererkennung



Elektrische und UHF-Messung

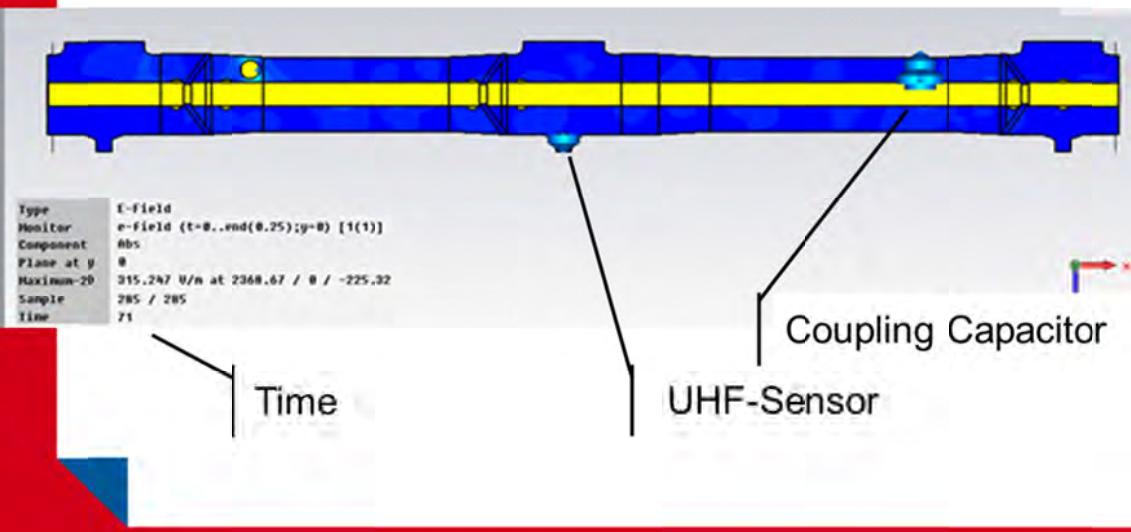
OMICRON

$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \epsilon \frac{dE(t)}{dt}$		Maxwell's Law of Total Currents
	Propagation displacement current	
Coupling	coupling capacitor	antenna
Frequency	kHz – some MHz	100 – 2000 MHz
Calibration	Possible for electrically small setups and low frequencies	magnitude and damping depend on sensor position

Can we compare electrically measured pC to μ V in UHF range?

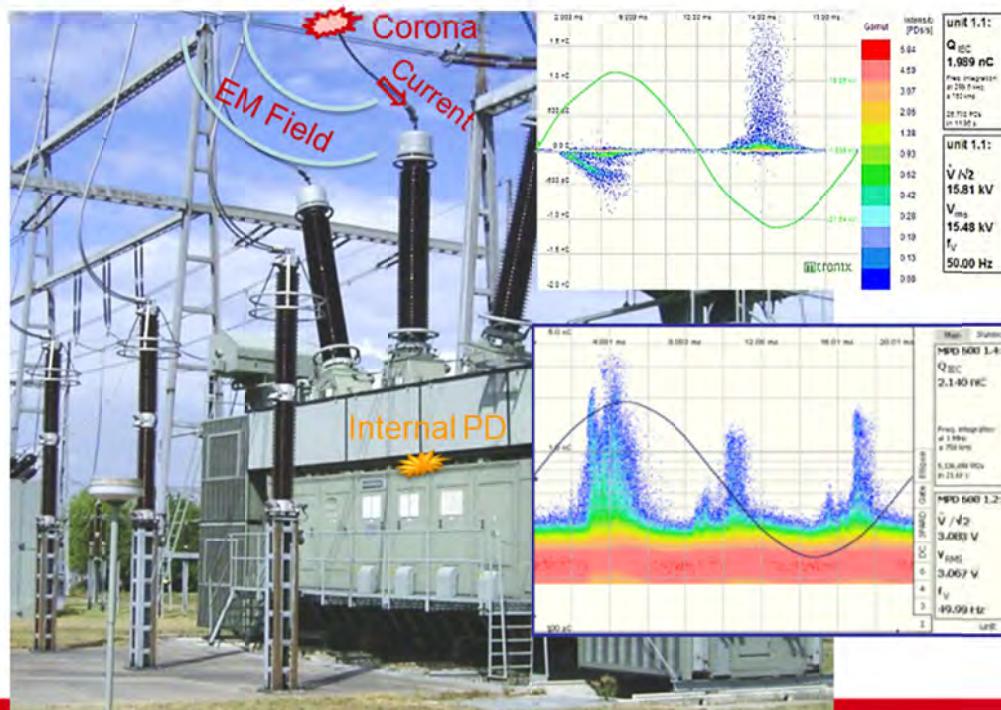
Impulsausbreitung in GIS

OMICRON



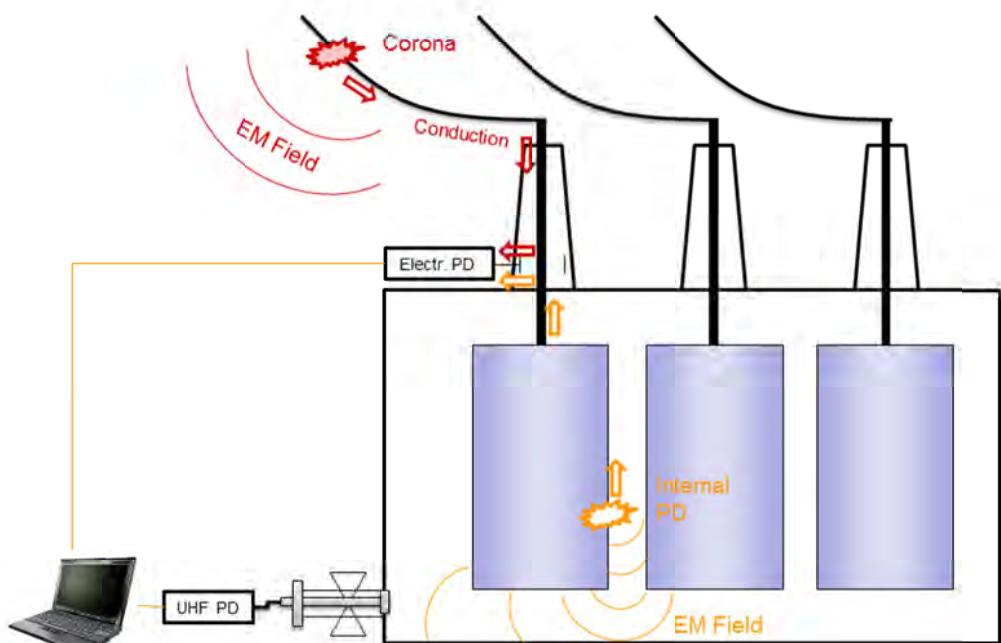
Internal PD or Noise?

OMICRON



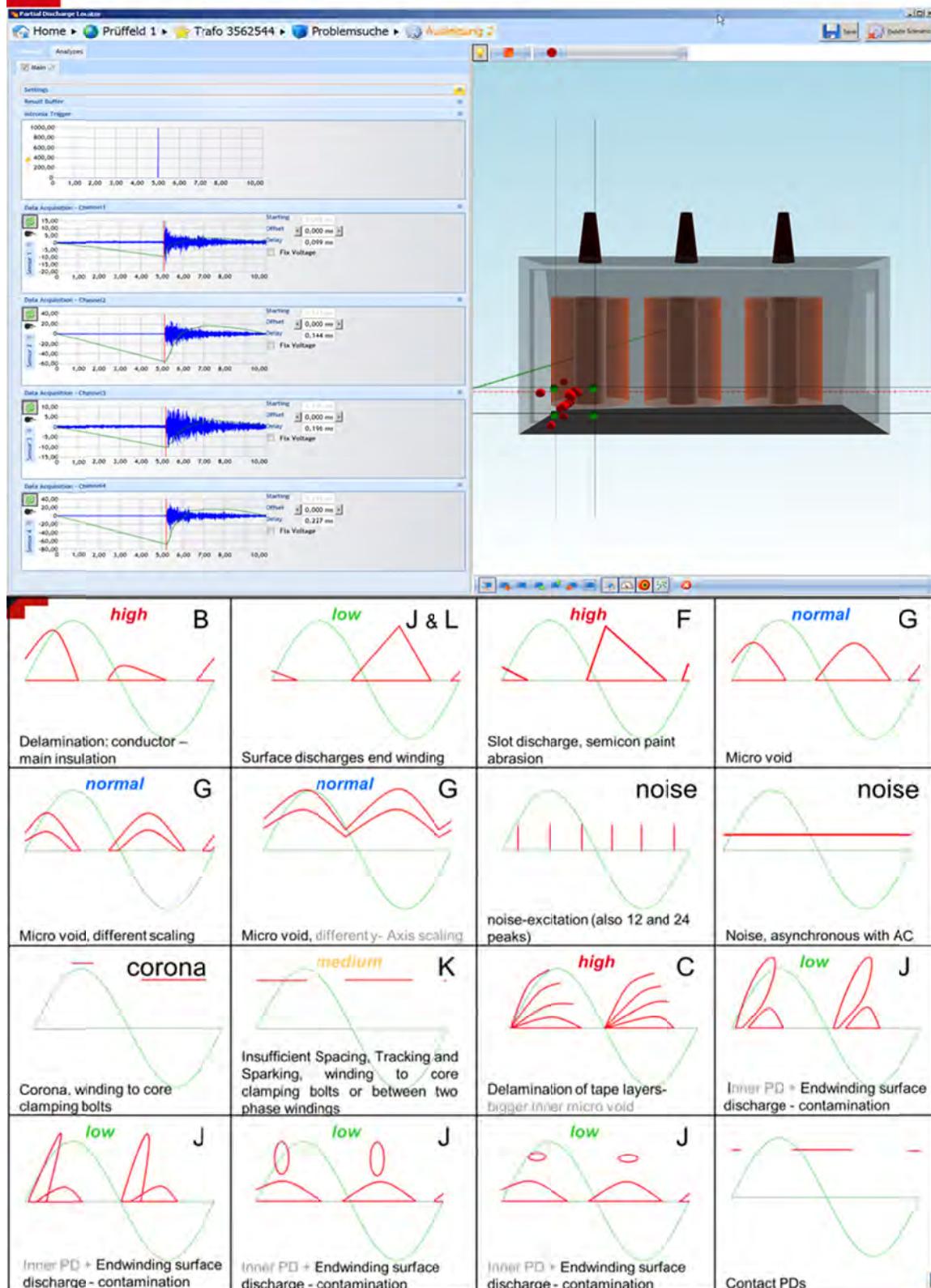
Fighting Noise: UHF Gating

OMICRON



Acoustic Localization

OMICRON

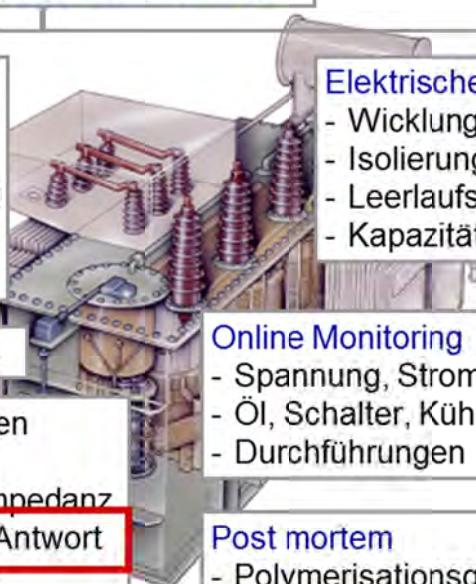


Diagnostische Verfahren

Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit



Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort**
- FRA
- Furane im Öl

Online Monitoring

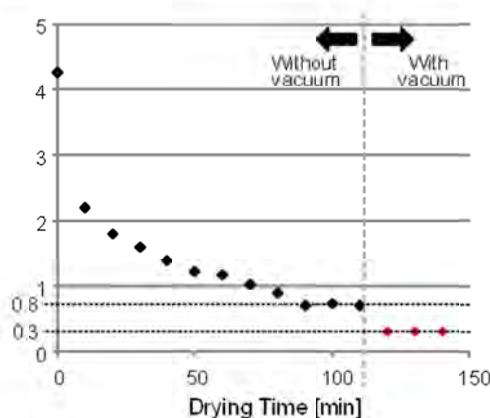
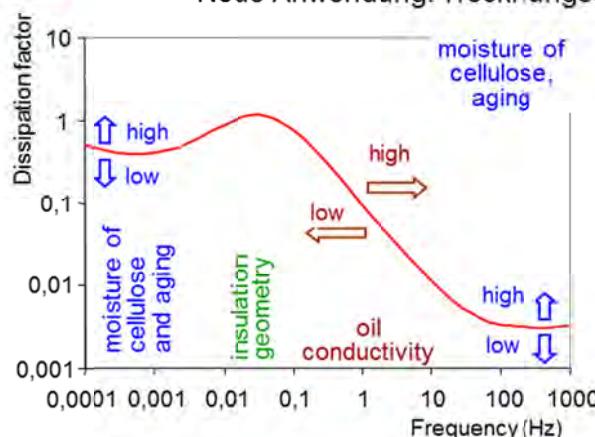
- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

Analyse der Dielektrischen Antwort - PDC / FDS / DFR

- Messverfahren
 - Kapazität und Verlustfaktor über breiten Frequenzbereich
- Interpretation: Berechnung der Papierfeuchte und der Ölalterung
- Modern und neu?
 - Streit über Frequenzbereich beigelegt – abhängig vom Zustand!
 - Neue Anwendung: Trocknungsüberwachung



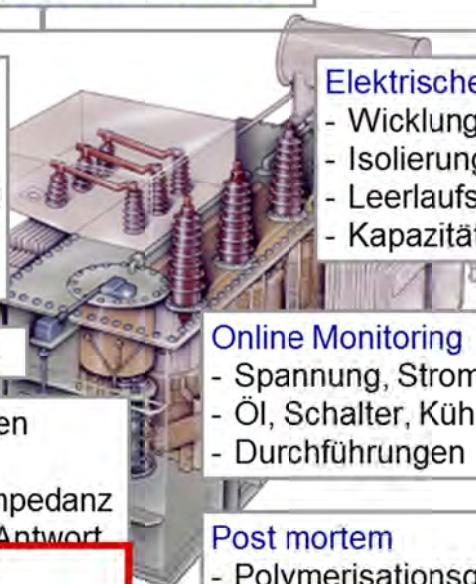
Diagnostische Verfahren



Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit



Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- FRA
- Furane im Öl

Online Monitoring

- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

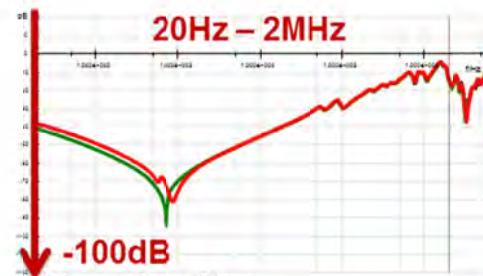
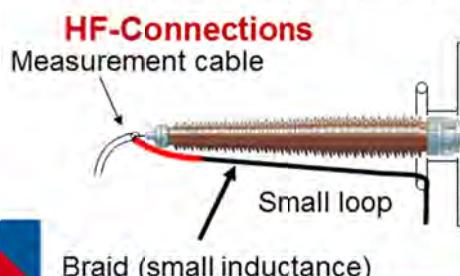
Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

Analyse der Frequenzantwort - FRA



- Messverfahren
 - Frequenzantwort einer Wicklung über breiten Frequenzbereich
- Interpretation:
 - Bestimmung der mechanischen Integrität durch Vergleich mit Referenz
- Modern und neu?
 - Wiederholbarkeit der Messungen – Ergebnis der Cigré A2.26
 - Standardisierung durch IEC
 - Guide in IEEE
 - Automatisierte, objektive Auswertung?



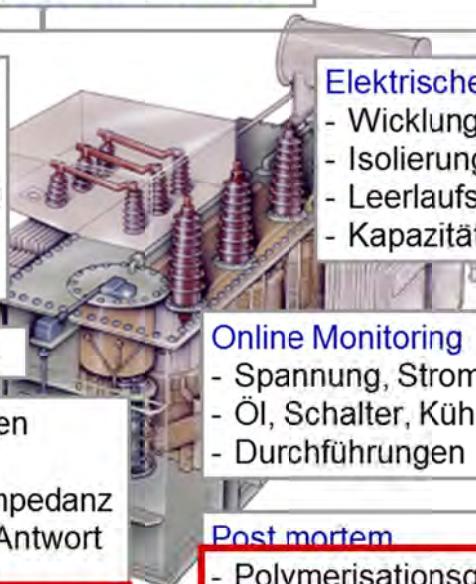
Diagnostische Verfahren



Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit



Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- ERA
- Furane und Methanol

Online Monitoring

- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

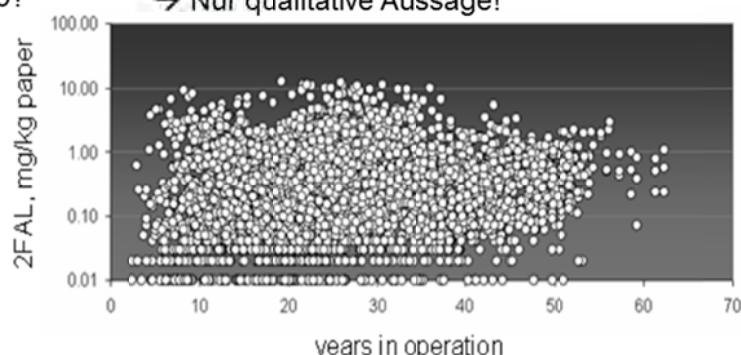
Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

Furane und Methanol



- Messverfahren
 - Furan- und Methanolgehalt in Ölprobe
 - Interpretation:
 - Berechnung des DP (Papierfestigkeit)
 - Modern und neu?
 - Schwache Korrelation mit tatsächlichem DP
 - Temperatur?
 - Cellulosetyp?
 - Atmung?
 - Methanol sehr flüchtig
 - Atmung
 - Probenahme
- Nur qualitative Aussage!



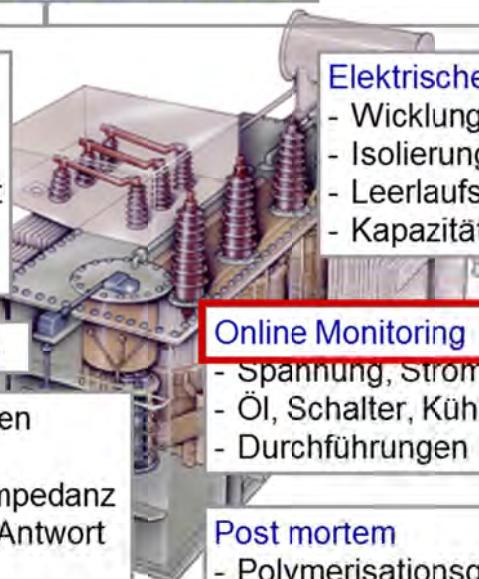
Diagnostische Verfahren



Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit



Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- FRA
- Furane und Methanol

Online Monitoring

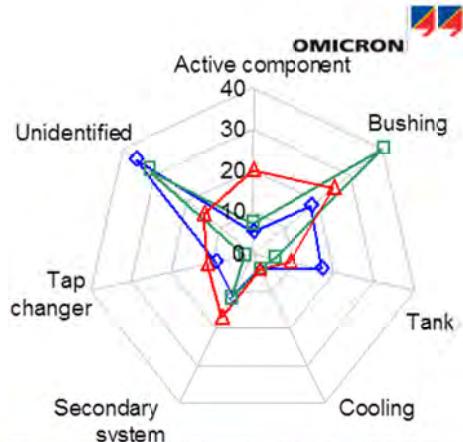
- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

Online Monitoring

- Messverfahren
 - Kontinuierliche Messung für
 - Maximale Messdatendichte
 - Früherkennung von Fehlern
 - Nutzung der Restsubstanz
- Modern und neu?
 - Durchführungs-Monitoring
 - Kombination C-TD-PD
 - Absolute TD-Messung
 - Online DGA



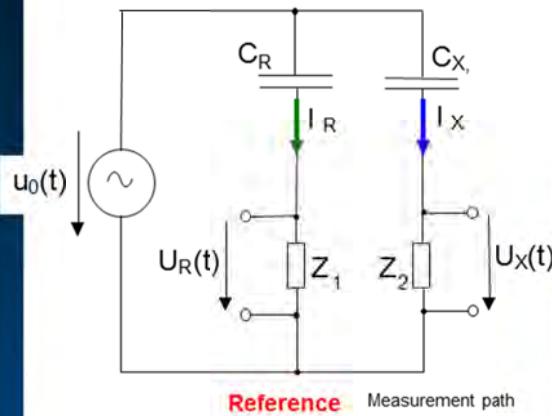
A2 Cigre Session Paris, August 25th 2010,
Preferential Subject 2, Question 2-4

SIEMENS

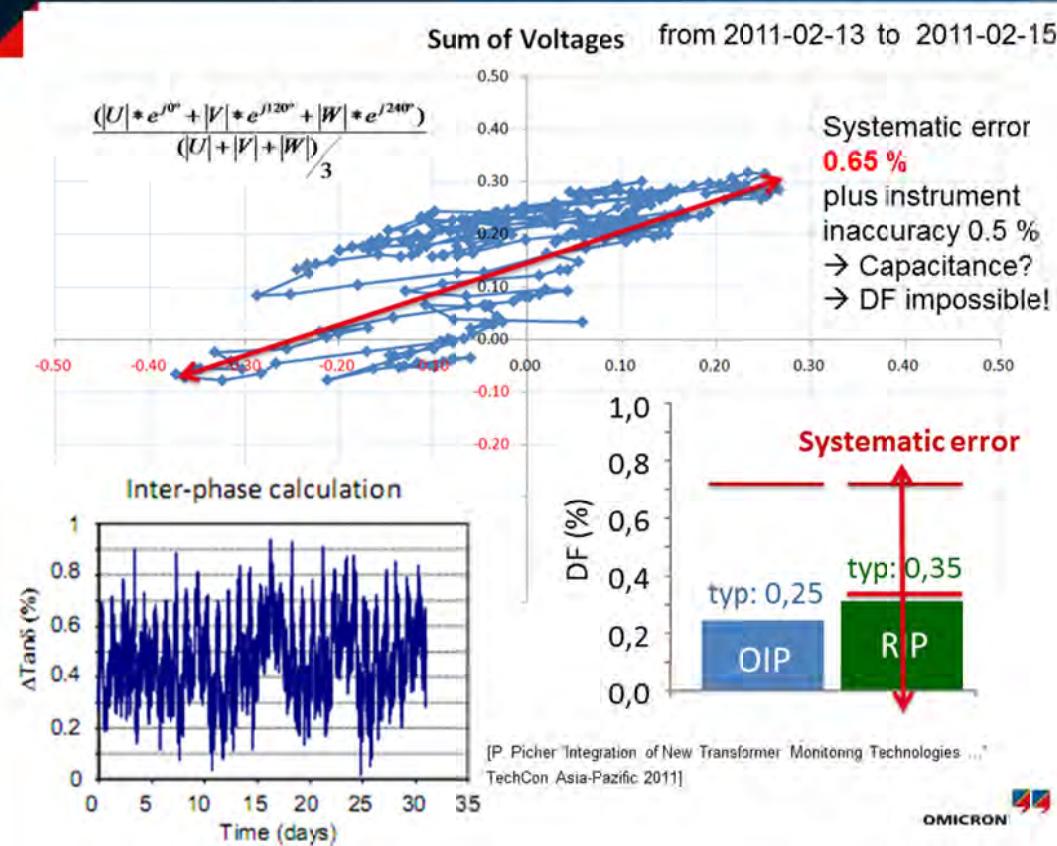
On-Line Monitoring as a Powerful Tool –
it enables a very powerful trend development,
especially for fault gases with low solubility
(like hydrogen and carbon monoxide),
which may be lost during sampling.

Where Can I Get the Reference from?

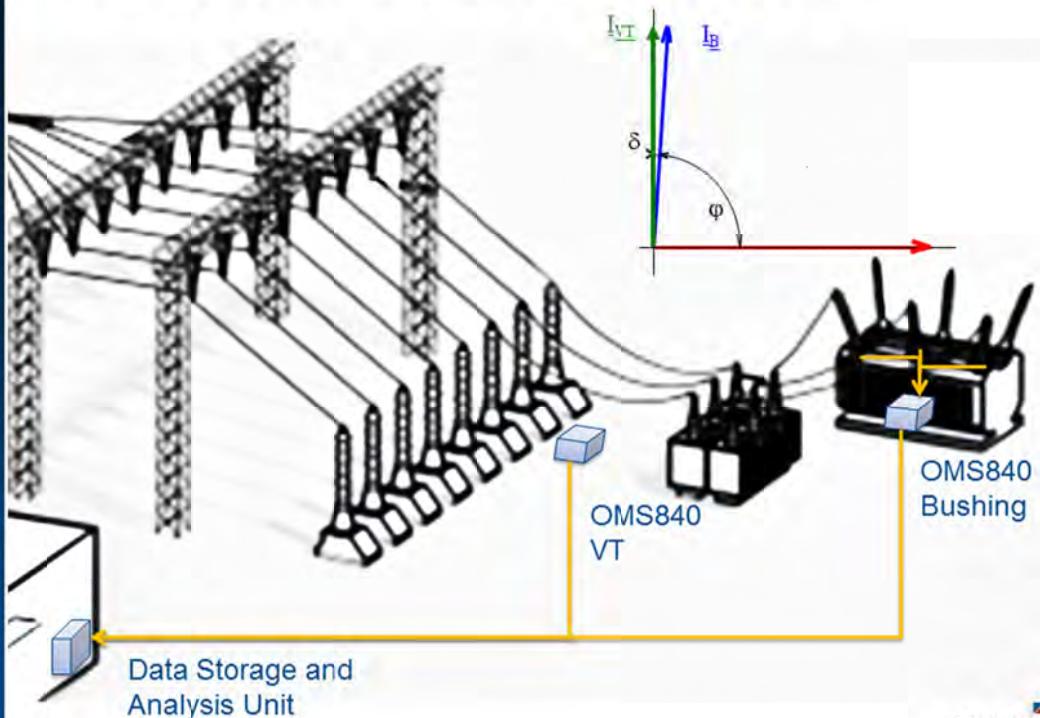
- Off-line test: Reference from HQ capacitor



- On-line test: Reference?



Connection Diagram VT Reference



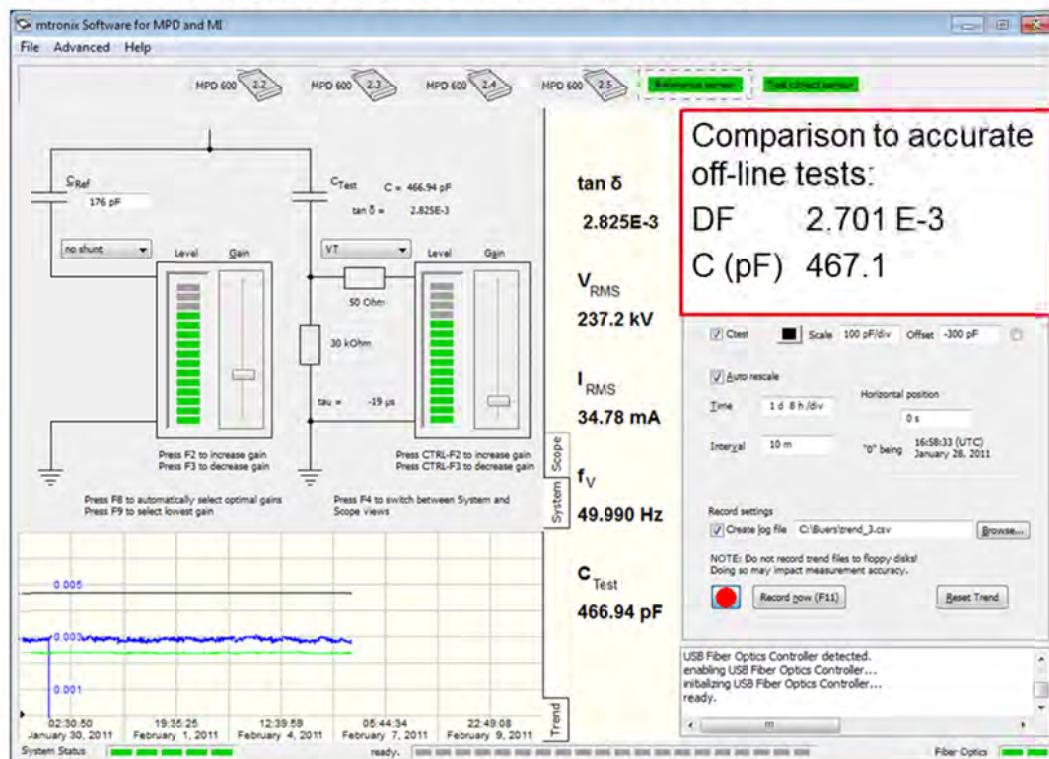
OMICRON

Pilot Project Transformer 405kV / 450MVA

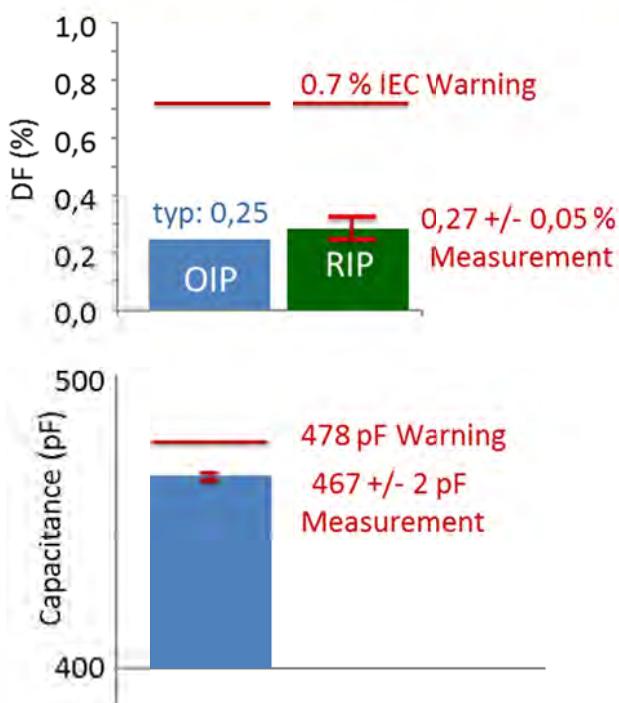


OMICRON

TanDelta Measurement Phase U



Measurement Results over 1.75 Years



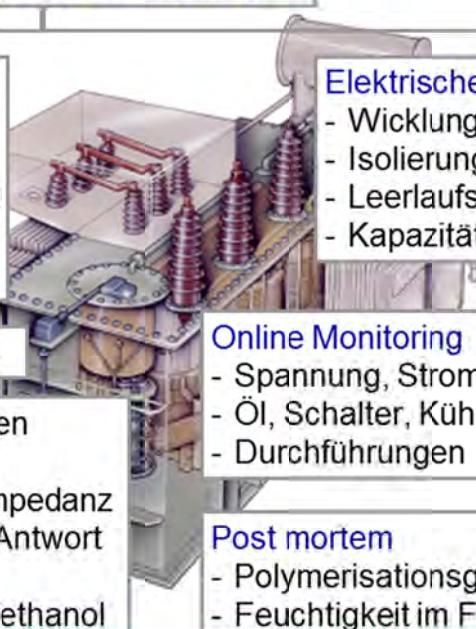
Diagnostische Verfahren



Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit



Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- FRA
- Furane und Methanol

Online Monitoring

- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

Post mortem

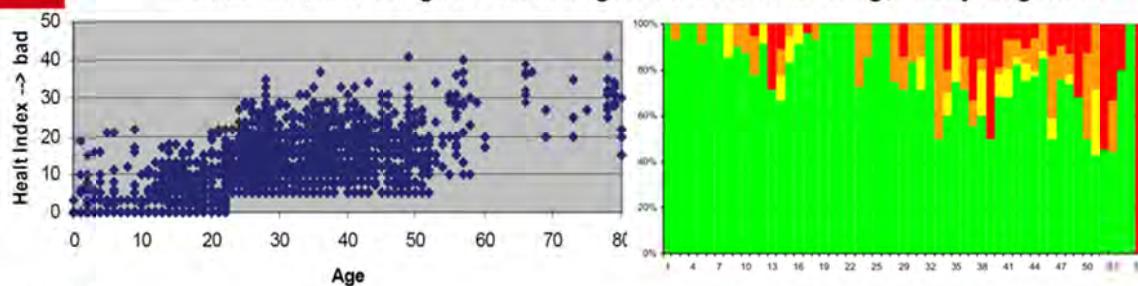
- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

Verdichtung der Methoden



1. Übergreifende Bewertung einer Transformatorflotte

- Zusammenfassung von Messungen durch Gewichtung, Fuzzy-Logik etc.



2300 Transformers, 49-765 kV, Hydro Quebec, CA

Asset Health Index, National Grid, UK

2. Berechnung der Restlebensdauer?

- Lebensdauer vs. Substanz
- Statistik genügt nicht – viele zufällige und bauartbedingte Fehler
- Besser: designorientierte Bewertung
- Bewertung verschrotteter Trafos
- Primäres Kriterium ist thermisches Design

Diagnostische Verfahren - Heute

OMICRON

Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- DGA
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit

Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- Dielektrische Antwort
- FRA
- Furane und Methanol

Online Monitoring

- Spannung, Strom, Temperatur
- Öl, Schalter, Kühlung
- Durchführungen

Post mortem

- Polymerisationsgrad
- Feuchtigkeit im Feststoff

Diagnostische Verfahren - Morgen

OMICRON

Periodisch / Routineuntersuchung

Ölanalyse

- **DGA - Online**
- Durchschlag
- Wassergehalt
- Säuregehalt
- Leitfähigkeit

Elektrische Verfahren

- Wicklungswiderstand
- Isolierungswiderstand
- Leerlaufstrom
- Kapazität und TanDelta

Fortgeschritten

- Teilentladungen
- Übersetzung
- Kurzschlussimpedanz
- **Dielektrische Antwort**
- FRA
- **Furane und Methanol**

Online Monitoring

- Spannung, Strom, **Temperatur**
- **Öl, Schalter**, Kühlung
- Durchführungen

Messgröße

Verlustfaktor

Zustandsgröße

Wassergehalt

Maßnahme

Trocknung

FKH - Fachtagung

15. November 2012

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

MESURES PRISE LORS DE LA FABRICATION DES CABLES MT POUR GARANTIR UNE DUREE DE VIE OPTIMALE

Dr.-Ing. François Cochet
Nexans Suisse SA, CH-2016 Cortaillod

- 2002 à 2005, directeur adjoint du programme national suisse de recherche dans le domaine de la Photonique Quantique, basé à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, tout en étant conseiller scientifique de Nexans Suisse à temps partiel.
- 1998 à 2001, directeur de l'unité de production de fibres optiques d'Alcatel Suisse, à Cortaillod, après avoir été le responsable de la R&D de 1986 à 1897.
- 1982 à 1985, post-doc au CSEM, Neuchâtel, dans le domaine des capteurs opto-mécatroniques sur base silicium, après une thèse de Docteur-Ingénieur dans le domaine de l'Optique Intégrée à l'INPG.
- Responsable du projet de recherche du groupe Nexans « Smart Grids »
Membre expert des groupes de travail Cigré WG B1.23 et B1.28
- Responsable du projet de recherche du groupe Nexans « Smart Grids »

MESURES PRISE LORS DE LA FABRICATION DES CABLES MT POUR GARANTIR UNE DUREE DE VIE OPTIMALE

François Cochet

Nexans Suisse SA, 2016 Cortaillod

1 Introduction

Depuis environ 20 ans, les câbles Moyenne Tension (MT) sont isolés avec une matière plastique de haute pureté, le Polyéthylène réticulé (XLPE). La réticulation est obtenue par réaction chimique à chaud dans une atmosphère neutre (généralement de l'azote) à partir d'une faible quantité de peroxyde mélangé au PE. Bien que toutes les mesures soient prises pour éviter la présence de contaminants dans la matière d'isolation, et bien que cette matière soit filtrée au moment de l'extrusion avant d'être appliquée sur le conducteur au moyen d'une tête triple, il peut toujours arriver que quelques impuretés ou quelques bulles apparaissent dans l'isolant après réticulation.

Ces défauts résiduels sont tellement petits qu'ils ne conduisent généralement pas à des claquages instantanés lorsque l'on soumet un câble à la tension de service. Par contre leur présence dans l'isolant impacte le gradient local de champ électrique et peut dégrader le plastique dans leur voisinage immédiat. Cette dégradation peut finalement conduire à la formation d'une arborescence par où un courant électrique va passer, conduisant instantanément au claquage. Ce phénomène peut prendre de quelques mois à plusieurs dizaines d'années, rendant incertain la fiabilité de l'isolation.

2 Essais de routine

Afin d'éliminer cette population de défauts « à risque » deux essais de routine ont été mis en place par les organismes de normalisation : l'essai de tension et les mesures de décharges partielles durant cet essai de tension.

L'essai de tension se pratique à un niveau beaucoup plus élevé que la tension de service. La loi de vieillissement des défauts généralement admise n'est pas linéaire, mais en puissance, et s'exprime par la relation suivante :

$$E_1 \cdot t_1^n = E_2 \cdot t_2^n \quad (1)$$

où t_1 et t_2 sont les temps jusqu'au claquage et où E_1 et E_2 sont les stress électriques appliqués (exprimée en kV/mm). Le facteur n est typiquement compris entre 12 et 15 et dépend des conditions de vieillissement. Nous considérerons dans cette présentation des conditions normales, en particulier un isolant sec. Le tableau suivant donne une idée de la vitesse à laquelle le claquage s'accélère si l'on applique 4 ou 5 fois la tension de service, à des défauts qui auraient claqués au bout de respectivement un an et trente ans, et ceci pour des valeurs de n de 12 et 15 (les temps sont donnés en minutes) :

n=12	U=4U ₀	U=5U ₀
t=1 an	0.031	0.002
t=30 ans	0.940	0.065
n=15	U=4U ₀	U=5U ₀
t=1 an	0.000	0.000
t=30 ans	0.015	0.001

On constate que si l'on applique au minimum quelques minutes un essai à $5U_0$ à l'ensemble de la production, on garantit une durée de vie de 30 ans pour des conditions normales d'utilisation.

Les décharges partielles sont aussi enregistrées pendant l'essai de tension. Elles permettent de déceler un défaut qui ne claquerait pas pendant l'essai mais qui aurait claqué si l'essai avait duré plus longtemps. Un magnifique exemple de ce cas est montré à la figure 1 suivante qui se rapporte à un essai « durci » à 20 kV/mm et qui montre l'apparition de décharges de 15 pC 15 minutes avant le claquage, alors que le bruit de fond est de l'ordre de 5 pC:

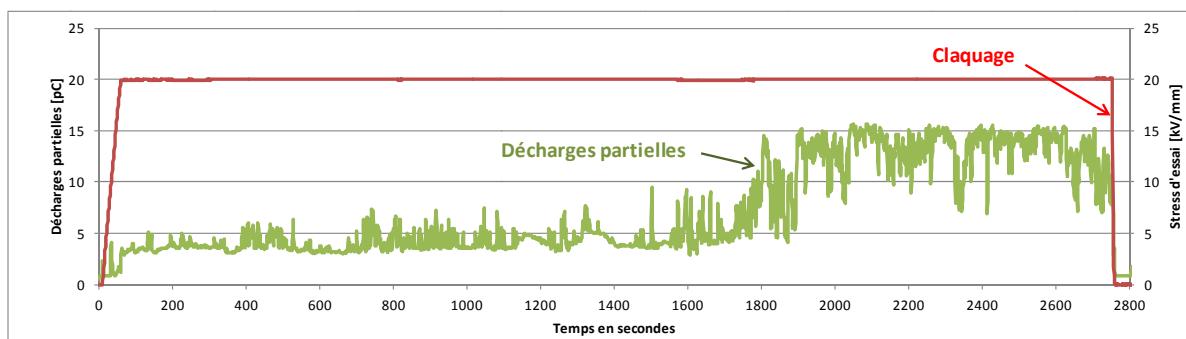


Figure 1

L'apparition de décharges partielles en cours d'essai n'est donc pas bon signe et doit conduire au rejet du défaut qui en est à l'origine (il existe pour cela des méthodes de localisation de DP).

En première conclusion, il semble que les essais que nous appliquons à nos fabrications ($5U_0$, 30 minutes) garantissent largement la durée de vie au-delà de trente ans. C'est sans compter sur le fait qu'il y a des situations moins favorables, ponctuelles, où le vieillissement peut être accéléré : présence d'eau, température élevée (canalisation d'eau chaude à proximité), déformation locale de l'isolant suite à un écrasement accidentel, etc... Ces conditions font que la durée de vie locale d'un élément de câble pourrait être singulièrement diminuée, ceci à condition bien sûr qu'il se trouve un point faible qui soit soumis à ce genre de vieillissement accéléré. Pour que toute la longueur du câble soit impactée, il faut donc la conjonction de deux phénomènes : la présence d'un point faible et des conditions de vieillissement accélérées. Si ces conditions ne sont pas de la responsabilité du fabriquant de câble, celui-ci peut par contre donner une indication sur la probabilité de trouver un point faible à partir de la compilation des essais de routine.

3 Statistiques de défauts ponctuels

Afin d'illustrer notre propos, nous avons choisi une population homogène (même matière d'isolation, même procédé de fabrication, même type de câble essayés à 15

kV/mm) et nous avons compilé les claquages observés sur une période de quelques années (le tonnage observé est d'environ 2000 tonnes). Lorsque ces différents claquages sont reportés sur un graphe de Weibull, la probabilité cumulative de défaut en fonction du temps jusqu'au claquage suit approximativement une droite. Nous observons de la sorte la distribution des défauts que nous avons éliminés, et qui sont représentés par des triangles verts sur le graphe de la figure 2. Ils sont environ une dizaine, et si l'on considère que chaque échantillon essayé pèse une tonne (environ 3000m de câble), cela veut dire que la première occurrence a une probabilité de 1/2000. Elle correspond au plus gros défaut, tous les autres ayant claqués après un temps plus long sont par essence plus petits. On constate par ailleurs qu'il n'y a pas de défauts dont la durée de vie dépasse 10 minutes : ceci ne veut pas forcément dire qu'il n'existe pas de tels défauts, cela tient au fait que l'on n'a pas assez de statistique vu la très faible probabilité de présence. Il aurait fallu essayer encore plusieurs milliers de tonnes pour découvrir la suite de cette distribution.

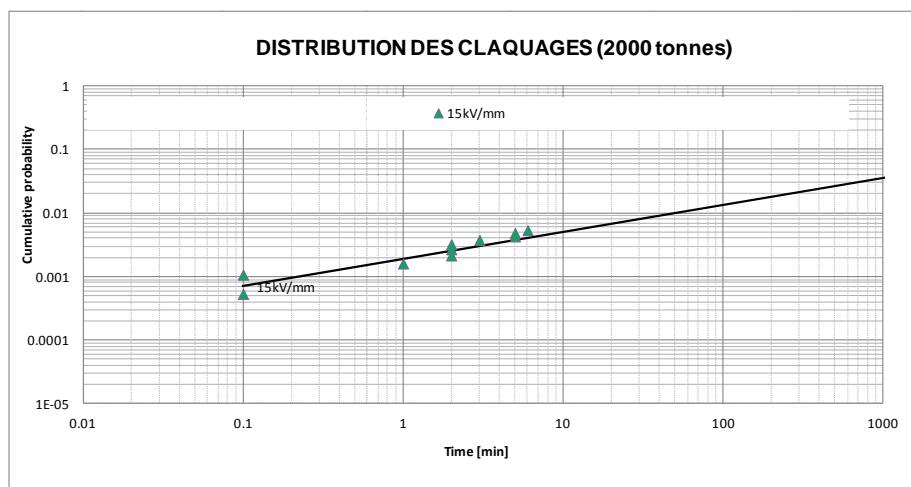


Figure 2

Afin d'obtenir plus rapidement cette distribution, on peut faire des essais « durcis » bien au-dessus de la norme et sacrifier une partie de la production à des essais sous plus grand stress. Nous avons essayé 200 tonnes à 20 kV/mm (environ $6.5U_0$) : nous avons observé les claquages représentés par des diamants bleus sur la figure 3. Puis nous les avons transposés en utilisant la relation (1) avec $n=14$: de façon qu'elle s'ajuste à la droite précédente (diamants rouges). Les temps équivalents à 15 kV/mm peuvent aller jusqu'à 500 minutes, ce qui correspond à des défauts extrêmement petits (ils n'ont aucune chance de vieillir en service même après 50 ans !!)

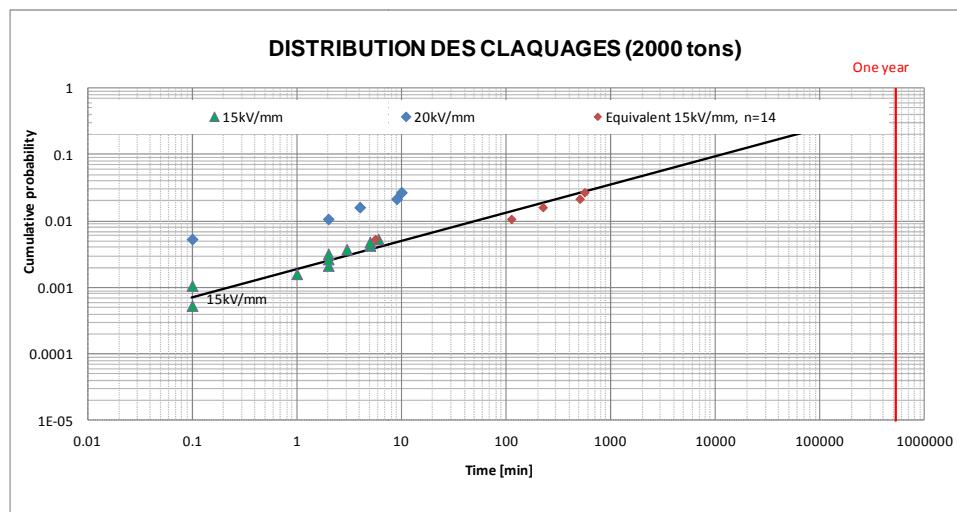


Figure 3

Cette statistique va alors nous permettre d'évaluer la population de défaut que nous laissons dans l'isolation en pratiquant un essai à 15kV/mm pendant 30 minutes. C'est ce que l'on appelle l'effet de troncature (fig.4), où l'on simule les claquages que l'on observerait si l'on refaisait des essais de routine à 15 kV/mm sur les câbles livrés aux exploitants de réseaux : Le premier défaut apparaîttrait avec un temps de quelques minutes et la distribution n'est plus droite mais incurvée puisqu'on a artificiellement tronqué une distribution naturelle.

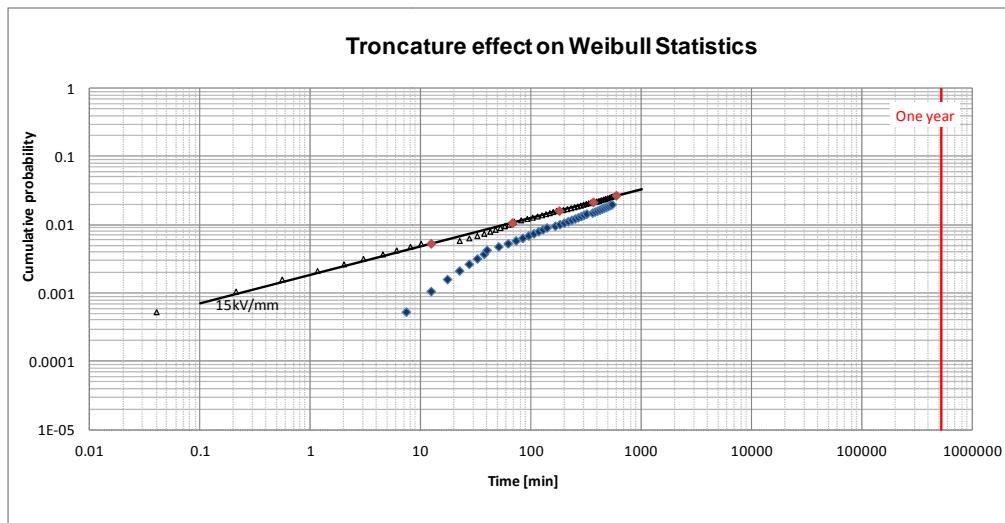


Figure 4

Il reste maintenant à replacer cette distribution non pas essayée à 15 kV/mm, mais vieillie en service sous 3 kV/mm où nous avons supposé n=10 pour tenir compte de la température plus élevée : c'est la courbe bleue sur la figure 5 et le défaut le plus faible présente une probabilité de claquage après trente ans inférieure à 10^{-5} .

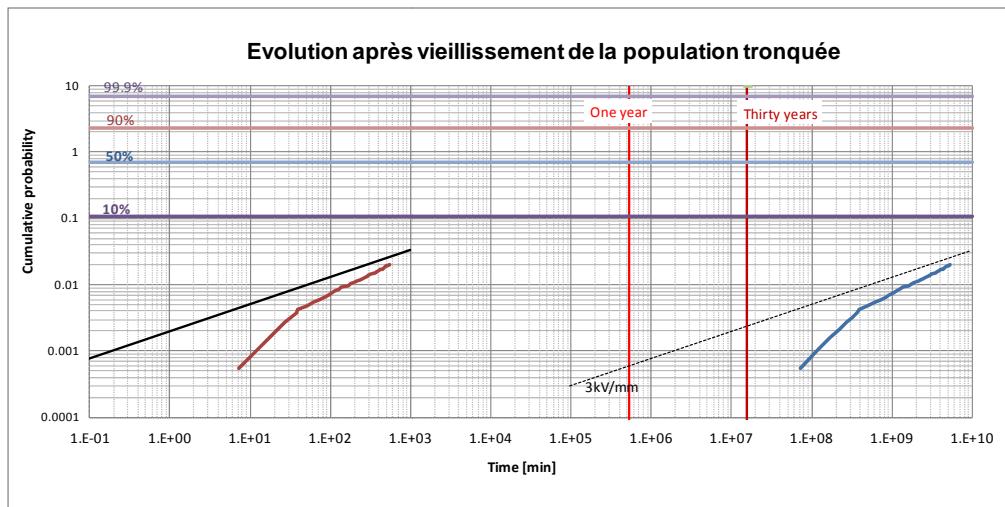


Figure 5

En traitillés, on aurait la probabilité de claquage après trente ans si on n'avait pas essayés ces câbles. Il serait intéressant de comparer cette statistique avec les observations faites par les exploitants de réseaux sur certains anciens modèles de câbles.

4 Conclusion

Si l'on considère la fiabilité d'un câble moyenne tension en service, on constate que les points faibles qui ont été laissés dans l'isolant après les essais de routine sont très peu nombreux et que la probabilité qu'ils claquent après trente ans est très faible même si les conditions de vieillissement sont durcies. La probabilité que l'on ait à la fois des conditions d'exploitation extrêmes à l'endroit même où se trouve le point faible est de l'ordre de 10^{-5} après 30 ans. De par notre (petite) expérience en localisation de défauts, ce fait semble d'ailleurs se confirmer dans la mesure où les installations de moins de 20 ans ne présentent pratiquement jamais de claquages en pleine ligne qui ne soient le fait d'accident ou d'erreur de montage. Ce haut degré de fiabilité est un atout pour le réseau, dans la mesure où il est toujours plus facile de réparer ponctuellement (que ce soit un accident ou un accessoire défectueux) plutôt que d'avoir à retirer des lignes complètes.

FKH - Fachtagung

05. Dezember 2012

Isolationsdiagnose und Ermittlung des Alterungszustands von Hochspannungskomponenten

Mesures FRA d'appareils bobinés de haute tension, pour la surveillance d'isolation en ligne

Prof. Dr. sc. techn. Joseph Moerschell
HES-SO Valais/Wallis, Sion

Etudes d'électricité à l'ETHZ et à l'EPFL, diplôme en 1987.

Assistant chez H. Bühler à l'EPFL, 1993 thèse de doctorat sur une méthode de régulation de moteurs asynchrones.

1993 - 1999 au CSEM (Centre suisse d'électrotechnique et microtechnique) à Neuchâtel, ingénieur de développement, puis chef de projet en électronique industrielle.

A partir de 1999, enseigne l'électronique et la mécatronique à la HES-SO Valais/Wallis à Sion.

Développement d'électroniques d'acquisition de mesure et de traitement de signaux, en particulier pour des grands rapports signal-sur-bruit, et pour des grandeurs évoluant lentement.

Depuis 3 ans, travaux sur la surveillance en ligne d'appareils de haute tension.

Mesures FRA d'appareils bobinés de haute tension, pour la surveillance d'isolation en ligne

Joseph Moerschell
HES-SO Valais/Wallis, Sion

1. Mesure en ligne avec injection d'un signal de test à fréquence variable

Les mesures de haute tension qui visent à qualifier l'état d'isolation d'un équipement, sont généralement effectuées hors ligne, avec l'équipement déconnecté du réseau, et fonctionnant dans un circuit de mesure particulier. La seule exception notable à cela est la détection en ligne de décharges partielles utilisant des diviseurs capacitifs pour la mesure de tensions aux bornes des appareils.

Le développement présenté ici a pour but de réaliser une mesure de surveillance d'un équipement bobiné – transformateur ou alternateur – de haute tension, en opération normale, sans le déconnecter du réseau. Un signal de test à fréquence supérieure de celle d'opération, et qui peut éventuellement être variée, est injecté dans l'équipement à tester, par un coupleur. La réponse à ce signal de test est relevée par des mesures de tension et/ou courant aux bornes. Etant donné que les signaux de mesure à fréquence d'opération seront très supérieurs à ceux à la fréquence de test, un filtrage et une démodulation synchrone doivent être appliqués afin de récupérer les réponses aux signaux d'injection.

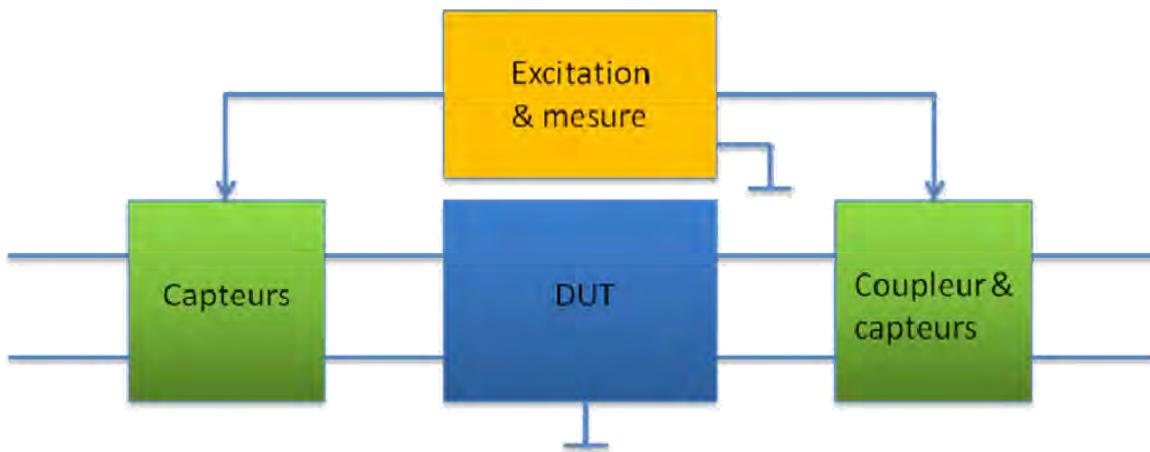


Figure 1: Schéma-bloc de base avec circuits d'injection et de mesure entourant l'appareil à tester (DUT = device under test).

La figure 2 montre que l'injection du signal de test peut être réalisée par modification d'un diviseur capacitif. Une source est connectée au point milieu du diviseur. Comme le signal de test serait en majeure partie absorbé par la capacité du pied du diviseur, celle-là est remplacée par une inductance. La valeur est choisie, pour qu'à la fréquence d'opération (p.ex. 50Hz), le facteur de division de la haute tension corresponde à un

diviseur habituel, p.ex. 1 :2000. Des éléments de protection – varistor et éclateur à gaz – sont nécessaires en parallèle avec cette inductance pour protéger la source et l'inductance de transitoires rapides. L'injection est régulée en courant afin de s'affranchir de l'influence sur la mesure de l'inductance L_2 du pied, qui possède elle-même une réponse fréquentielle avec des résonances et anti-résonances. Avec une capacité de couplage C_1 de 1nF, il est possible d'injecter un courant de test de 1mA à partir de 2kHz, avec 10nF à partir de 200Hz etc.

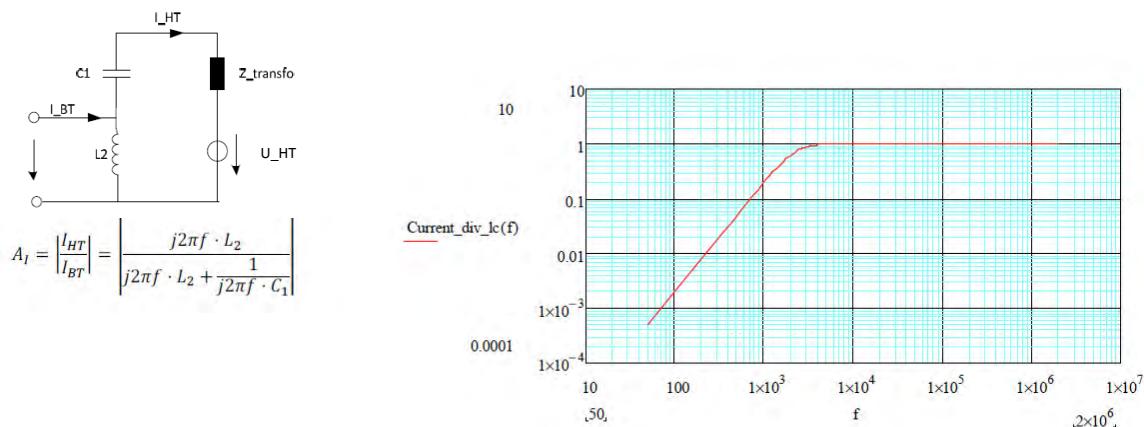


Figure 2: Circuit de principe de l'excitation, avec diviseur capacitif/inductif.

2. Circuits de mesure pour transformateurs et générateurs

Lorsqu'un équipement triphasé doit être surveillé, un ensemble de points d'injection et de mesure seront nécessaires. La figure 3 les montre à l'exemple d'un alternateur avec transformateur bloc. L'idée consiste à réaliser des unités de mesure (DMU = Data Merging Unit) comportant 4 canaux. Une première est connectée aux trois bornes de l'alternateur, et au point milieu, qui selon les cas peut être relié par une impédance – résistance ou capacité – à la terre. Outre les coupleurs capacitifs qui permettent d'injecter des signaux de test et de mesurer la tension aux bornes, il est utile de disposer de capteurs de courant. La mesure de courant permet notamment de savoir quelle partie du signal injecté traverse l'alternateur. Celui-ci ayant en principe une impédance inférieure à celle du réseau connecté, il s'agit de la plus grande partie du signal injecté. Comme la mesure proposée travaille à des fréquences supérieures à celle d'opération, des bobines de Rogowski (HF-CT = High-frequency Current Transformer) sont appropriées.

Deux autres DMU sont connectées aux côtés primaires et secondaires du transformateur bloc. Suivant le schéma de couplage, un canal de mesure sera dédié au point milieu. L'injection des signaux de test se fait au primaire. En mesurant les courants et tensions au secondaire, il est possible de distinguer la réponse du réseau connecté de celle du transformateur.

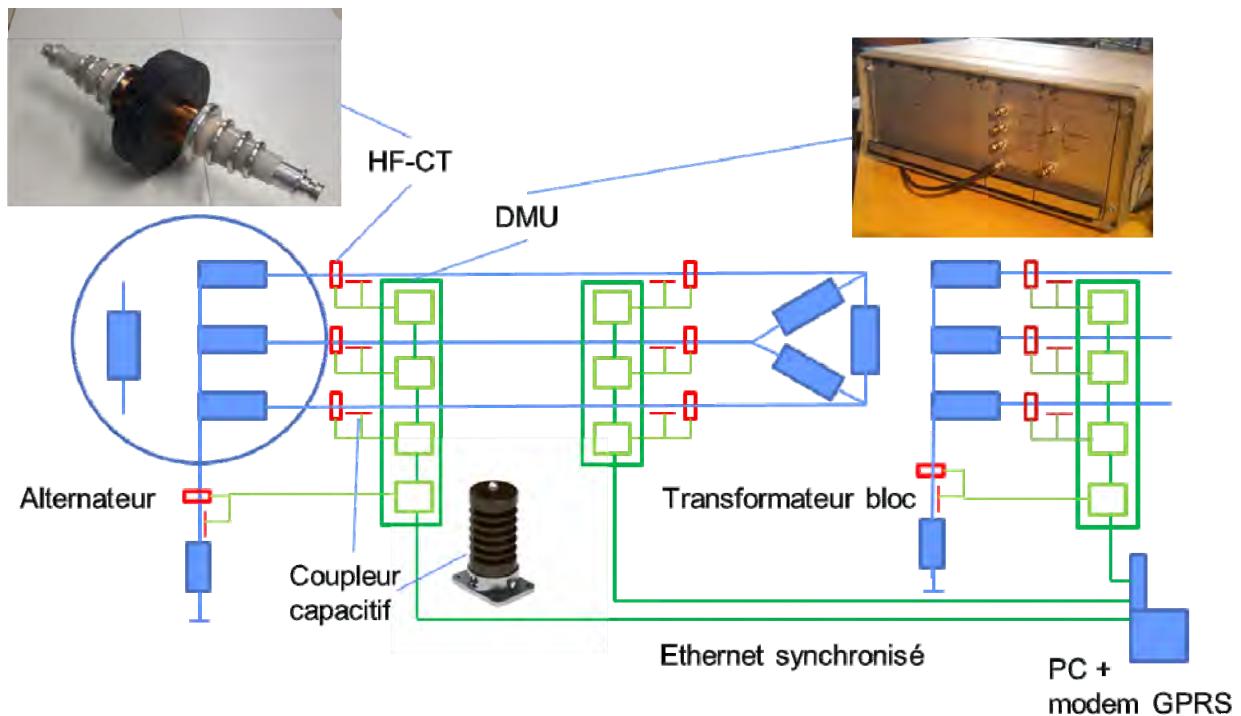


Figure 3: Schéma bloc d'installation sur un groupe alternateur/transformateur

3. Lien avec les mesures hors ligne : FRA, facteur de perte

Le schéma de mesure proposé permet d'effectuer des mesures de réponse fréquentielle par balayage de la fréquence du signal d'injection, telles qu'elles se pratiquent actuellement hors ligne, dans le but de suivre l'évolution mécanique des enroulements, en partant d'un spectre de référence initial. La plage de fréquence est cependant limitée vers le bas par le coupleur. Hors ligne, la mesure FRA se fait entre 20Hz et 2MHz. En ligne, il ne sera pas possible de descendre en dessous de 200Hz.

En plus, une mesure de l'angle de perte d'enroulements peut être réalisée. Dans ce but, l'injection doit être faite en asservissant la tension réglée plutôt que le courant. En mettant les deux bornes d'un enroulement à la même tension, à la fréquence d'injection choisie, le courant circulant vers la terre peut être évalué. Si le point milieu de l'équipement possède une – comparativement faible – impédance contre terre, le courant circulant dans celle-ci est mesuré séparément par le capteur de courant du point milieu.

4. Démonstrateur au laboratoire de haute tension

Pour démontrer le concept, un montage d'essai a été réalisé au laboratoire de haute tension de la HES-SO Valais/Wallis à Sion, figure 4. Un capteur de Rogowski avec une largeur de bande de 700kHz a été réalisé, voir figure 5. Il est posé sur une borne de traversée qui permet de travailler jusqu'à des tensions de phase de 20kV. Son interface, tout le circuit d'injection ainsi qu'un commande digitale qui comprend la génération du signal injecté, la démodulation et le filtrage du signal mesuré, ont été intégrés dans un coffret, voir figure 6. Ce coffret communique via une interface Ethernet avec un PC, où les résultats de mesure sont stockés et peuvent être analysés. La figure 7 montre une réponse fréquentielle acquise avec cet équipement.



Figure 4: Installation de laboratoire avec transformateur monophasé de haute tension.

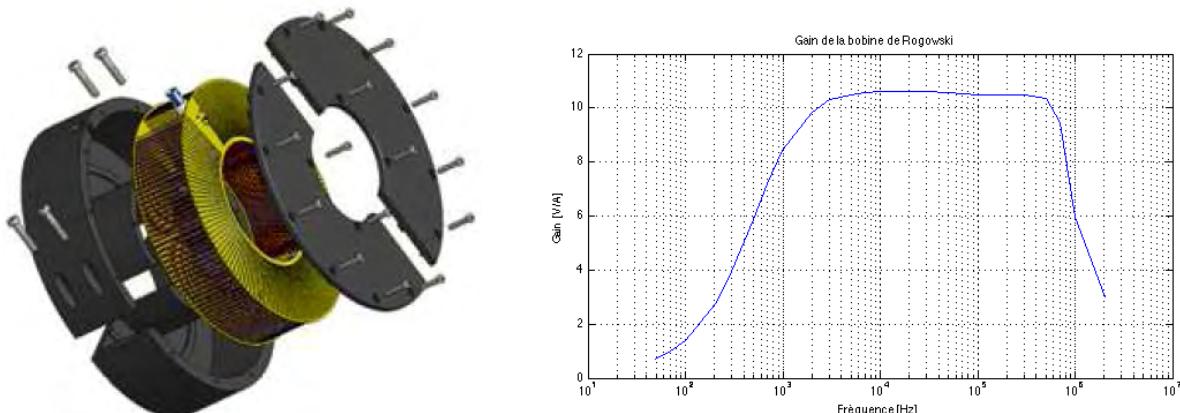


Figure 5: Capteur de courant large bande par bobine de Rogowski.





Figure 6: Coffret d'excitation/mesure (DMU).

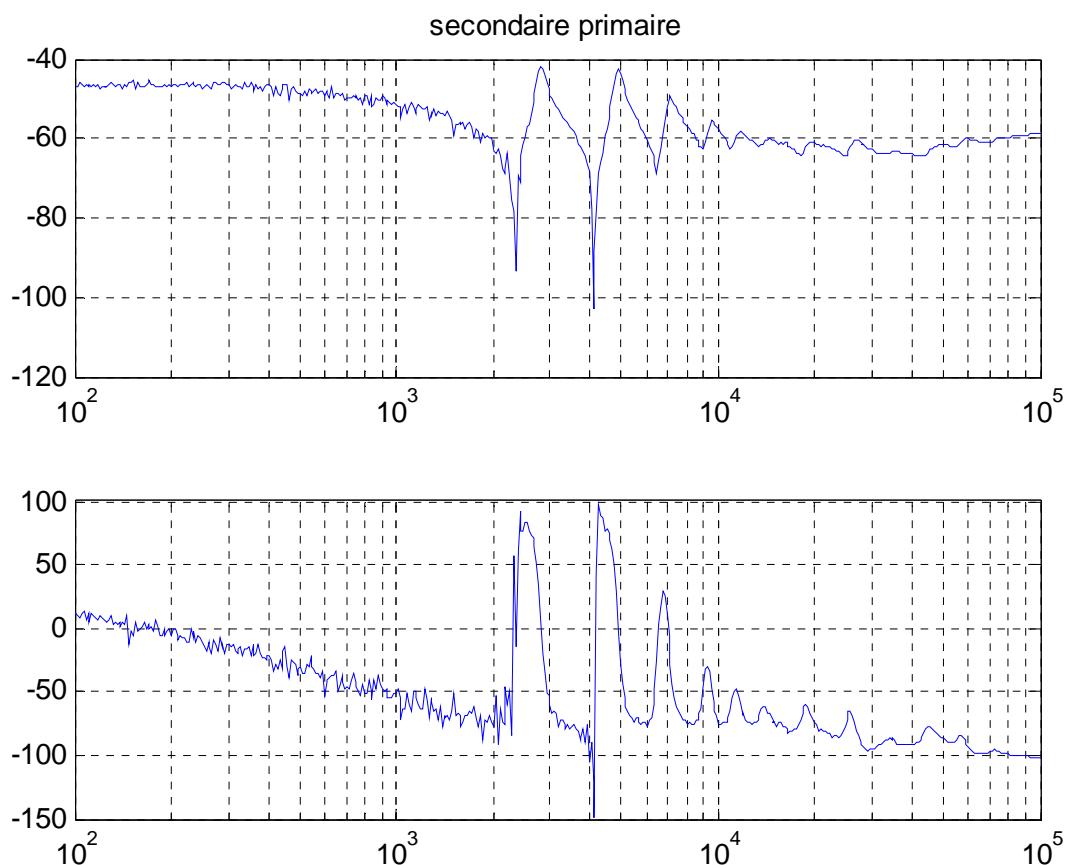


Figure 7: Réponse fréquentielle du courant secondaire à une excitation du côté primaire.

Zusammenfassung

Hochspannungsprüfungen zur Isolationsdiagnose eines Apparats werden gewöhnlich ausser Betrieb durchgeführt, ausser bei der on-line Messung von Teilentladungen mit Hilfe von kapazitiven Kopplern.

Die Grundidee dieses Projektes besteht darin, on-line ein höherfrequentes Testsignal den Betriebsgrössen zu überlagern, und die Antwort darauf durch breitbandige Strom- und Spannungswandler zu messen. Zur Unterdrückung der Betriebsgrössen im Empfang wird eine Synchrondemodulation angewandt. Durch geeignete Anordnung der Sensoren kann der Einfluss des gekoppelten Netzes auf die Messung entfernt werden.

Im Hochspannungslabor der HES-SO Valais/Wallis wurde ein Messaufbau realisiert, um eine on-line Messung durchzuführen. Dazu wurden die benötigten Geräte selbst entwickelt: kapazitiv/induktiver Spannungsteiler zur Einkopplung, breitbandiger Rogowski-Sensor, Verstärker des Anregungssignals, Messverstärker, digitale Demodulation, Kommunikation mit einem PC zur Aufzeichnung und Auswertung der Daten.

Die on-line Messungen erlauben die Aufnahme einer FRA, welche der kommerziell verfügbaren sehr ähnlich ist. Zusätzlich steht eine on-line Verlustfaktor-Messung in Entwicklung.

Referentenadressen

Adili	Sedat	Eidg. Techn. Hochschule Zürich EEH- High Voltage Laboratory Physikstrasse 3 8092 Zürich	adilis@ethz.ch Tel.: +41 44 632 27 77 Fax: +41 44 632 12 02
Affolter, Prof.	Jean-François	HEIG-VD Route de Cheseaux 1 1401 Yverdon-les-Bains	jean-francois.affolter@heig-vd.ch Tel. +41 24 557 63 30 dir.: +41 24 557 63 06 Fax: +41 24 557 64 04
Aschwanden, Dr.	Thomas	Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) Postfach 3862 Innertkirchen	ast@kwo.ch Tel.: +41 33 982 20 52 dir.: +41 33 982 20 82 Fax: +41 33 982 20 06
Boss	Martin	Pfiffner Messwandler AG Lindenplatz 17 5043 Hirschthal	martin.boss@pmw.ch Tel.: +41 62 739 28 41 Fax: +41 62 739 28 12
Brügger, Dr.	Thomas	Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH Voltastrasse 9 8044 Zürich	bruegger@fkh.ch Tel.: +41 44 253 62 68 Fax: +41 44 253 62 60
Cochet, Dr.	François	Nexans Suisse SA 2, rue de la Fabrique 2016 Cortaillod	francois.cochet@nexans.com Tel.: +41 32 843 54 57 Fax: +41 32 843 54 43
Fuhr, Dr.	Jitka	BKW FMB Energie AG Engineering Netze Bahnhofstrasse 20 3072 Ostermundigen	jitka.fuhraschwanden@bkw-fmb.ch Tel.: +41 31 330 58 24 Fax.: +41 31 330 53 33
Koch, Dr.	Maik	Omicron electronics GmbH Oberes Ried 1 A-6833 Klaus	maik.koch@omicron.at Tel.: +43 5523 507 389 Fax: +43 5523 507 7322
Moerschell, Prof. Dr.	Joseph	HES-SO Valais/Wallis 47, rte du Rawyl 1950 Sion	joseph.moerschell@hevs.ch Tel.: +41 27 606 87 67 Fax: +41 27 606 85 75
Weber	Marc	Services Industriels de Genève Chemin de Château-Bloch 2 Le Lignon 1211 Genève 2	marc.weber@sig-ge.ch Tel.: +41 22 420 80 72 Fax: +41 22 420 96 70

Internetseite für nachträgliche Informationen zur Fachtagung

Internetseite: <http://212.147.58.143>

Benutzername: ft2012

Passwort:
(wird anlässlich der Tagung angegeben)

Die Gross-/Kleinschreibung muss bei der Eingabe des Benutzernamens und des Passwortes berücksichtigt werden.

Bei der Benutzung des Microsoft Internet-Explorers Version 7.0 muss die Freigabe zum Download aus Web-Seiten vor dem Aufruf des FKH-Fileservers erfolgen, sonst tritt ein Fehler auf. Bei allen anderen Versionen und Browsern kann der Download auch bei Rückfrage des Browsers noch bestätigt werden.

Notizen

