

Neue Diagnoseverfahren für Hochspannungsdurchführungen

New Diagnostic Tools for High Voltage Bushings

M. Krüger^{1*}, A. Kraetge¹, M. Koch¹, K. Rethmeier¹, M. Pütter¹, L. Hulka¹, M. Muhr², C. Summereder²

¹OMICRON Energy, Klaus, Austria, ²TU Graz, Austria

*Email: michael.krueger@omicron.at

Kurzfassung

Dielektrische Antwortmessungen im Frequenzbereich (FDS) oder im Zeitbereich (PDC) werden benutzt, um den Wassergehalt in der festen Isolation von Leistungstransformatoren zu bestimmen. Diese Methoden können auch erfolgreich bei Hochspannungsdurchführungen angewandt werden. Messergebnisse von ölprägnierten (OIP) Weichpapierdurchführungen, harzprägnierten (RIP) Durchführungen und von Hartpapierdurchführungen (RBP) werden präsentiert und Grenzwerte diskutiert. Praktische Beispiele zeigen die Bedeutung und die Wichtigkeit von Kapazitäts- und Verlustfaktormessungen und speziell von Messungen der dielektrischen Antwort auf.

Abstract

Dielectric response measurements in the frequency domain (FDS) or in the time domain (PDC) are applied to transformer insulation to determine the water content in the cellulose. These methods can be applied also for high voltage bushings with good success. Measurement results of Oil Impregnated Paper (OIP), Resin Impregnated Paper (RIP) and Resin Bonded Paper (RBP) bushings are presented for new and aged bushings and limits for the assessment are discussed. Practical examples illustrate the importance and the efficiency of capacitance and dissipation factor and particularly dielectric response measurements on high voltage bushings.

1 Einführung

Hochspannungsdurchführungen sind wichtige Komponenten von Leistungstransformatoren, gasisolierten Schaltanlagen und anderen Betriebsmitteln. Viele Transformatorfehler werden durch defekte Durchführungen verursacht. Ein Durchschlag in einer Durchführung kann den ganzen Trafo beschädigen oder sogar total zerstören. Aus diesem Grund sind systematische Diagnosemessungen an Durchführungen wichtig für einen sicheren Betrieb.

2 Messung dielektrischer Verluste

Die Kapazitäts- und Verlustfaktormessung wird seit vielen Jahrzehnten mit Erfolg zur Beurteilung der Isolation von Hochspannungsdurchführungen angewandt. In der Vergangenheit wurden diese Messungen praktisch ausnahmslos bei Netzfrequenz (50/60Hz) durchgeführt. Tabelle 1 zeigt 50/60 Hz Grenzwerte für Verlustfaktoren bzw. Power Factors und Teilentladungen, wie sie in IEC 60137 und IEEE C57.19.01 angegeben sind. Anfangs wurden manuell abzugleichende Messbrücken wie beispielsweise die Scheringmessbrücke verwendet, die bereits 1928 erstmalig erwähnt wurde. Später folgten Messbrücken, die mittels Mikroprozessoren automatisch abgeglichen wurden. Diese Lösungen haben sich bewährt,

insbesondere dann, wenn bei nur einer bestimmten Frequenz gemessen werden soll. Durch die Anwendung moderner Elektronik ist es möglich, Messungen über einen weiten Frequenzbereich in sehr kurzer Messzeit zu machen. Eine solche Messung wird auch als "dielektrische Antwortmessung" oder "Dielectric Spectroscopy" bezeichnet. Sie ermöglicht eine sehr viel detailliertere Diagnose als dies ausschließlich mit Netzfrequenz möglich ist. In Bild 1 ist das Prinzip einer solchen Messeinrichtung dargestellt.

Type	RIP	OIP	RBP
Main insulation	Resin impregnated paper	Oil impregnated paper	Resin bonded paper
DF tan δ (RT) (IEC 60137)	< 0,7% *	< 0,7% *	< 1,5% *
PF cos ϕ (RT) IEEE C57.19.01	< 0,85% *	< 0,5% *	< 2% *
Typical new values	0.3-0.4% *	0.2-0.4% *	0.5-0.6% *
PD (IEC 60137) Um 1.5 Um ^{1/3} 1.05 Um ^{1/3}	< 10pC < 5cC < 5pC	< 10pC < 5pC < 5pC	< 300pC

* at 1.05 Um^{1/3} and 20°C / 70° F

Tabelle 1 Grenzwerte für dielektrische Verlustfaktoren (DF), Power Factors (PF) und Teilentladungen für Hochspannungsdurchführungen

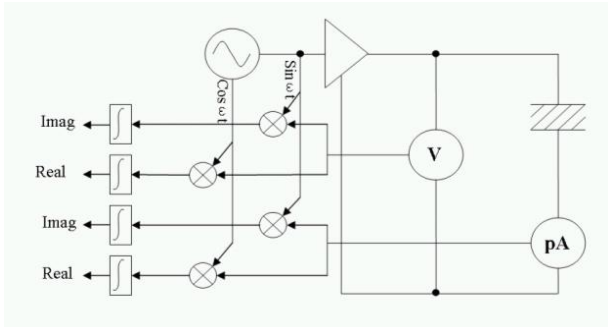


Bild 1 Messprinzip der "dielektrischen Antwort" mit digitaler Filterung

Durch Multiplikation des Prüflingsstromes mit der generierten Prüfspannung $U \cdot \sin(\omega t)$ und einem um 90° phasenverschobenen Signal $U \cdot \cos(\omega t)$ und einer digitalen Filterung der bei der Multiplikation entstehenden Wechselspannungskomponenten der doppelten Frequenz $2\omega t$ wird eine exzellente Unterdrückung der Störungen erzielt. Bei einer Messung bei 55Hz werden 50Hz Störsignale um etwa 110dB abgeschwächt. Moderne Prüfgeräte benutzen heute geschaltete Leistungsverstärker zur Erzeugung der Prüfspannung [1]. Bild 2 zeigt den Prüfaufbau für eine dielektrische Antwortmessung (15-400Hz) von Hochspannungsdurchführungen eines großen Leistungstransformators unter sehr starken Störeinflüssen durch benachbarte Leiterseile. Mit dem beschriebenen System konnte trotz der starken Störungen eine einwandfreie Messung durchgeführt werden.



Bild 2 Vor-Ort-Messung der dielektrischen Antwort von Hochspannungsdurchführungen

3 Dielektrische Antwortmessung an neuen RIP, RBP und OIP Durchführungen

In Bild 3 sind $\tan\delta$ -Kurven von neuen harzimprägnierten Durchführungen (Resin Impregnated Paper RIP), Hartpa-

pierdurchführungen (Resin Impregnated Paper RBP) und ölprägnierten Weichpapierdurchführungen (Oil Impregnated Paper OIP) dargestellt. Die Messungen wurden bei 2kV und Frequenzen zwischen 15 und 400Hz durchgeführt.

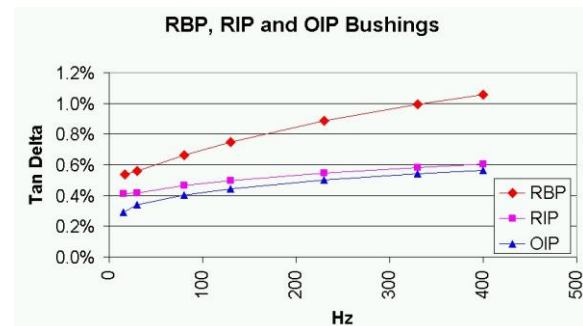


Bild 3 Dielektrische Antwortmessung von neuen RIP, RBP und OIP Durchführungen

Die Kurven verlaufen relativ flach, die Minima für den Verlustfaktor liegen bei sehr niedrigen Frequenzen, teilweise unter 15Hz. Die 50Hz Werte erfüllen die Grenzwertkriterien der Tabelle 1. In Bild 4 ist eine RIP Durchführung gezeigt, die im Freien gelagert wurde. Im Gegensatz zum freiluftseitigen Ende, das mit einem Porzellangehäuse versehen ist, ist das ungeschützte trafoseitige Ende sehr empfindlich gegen eindringende Feuchtigkeit.

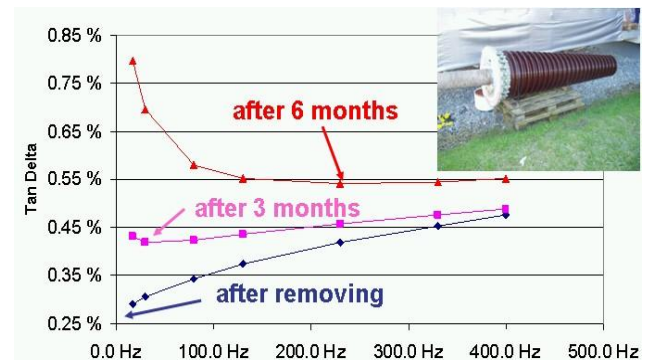


Bild 4 Dielektrische Antwortmessung einer RIP Durchführung, die im Freien gelagert wurde

Die Durchführung hat im Laufe von 6 Monaten sehr viel Feuchtigkeit aufgenommen, wie man aus der Änderung der $\tan\delta$ -Verläufe sehr deutlich erkennen kann. Durch die Feuchtigkeit wird insbesondere bei niedrigen Frequenzen der $\tan\delta$ -Wert stark erhöht, die Minima der $\tan\delta$ -Kurven werden zu höheren Frequenzen verschoben.

Fallbeispiele von Diagnosemessungen an RIP, RBP und OIP Durchführungen

Für Diagnosemessungen an RIP, RBP und OIP Durchführungen wurde das beschriebene Prüfgerät mit Frequenzen zwischen 15 und 400Hz verwendet.

Diagnosemessungen an einer harzimpregnierten RIP-Durchführung mit Verbundisolator

Normalerweise verfügen RIP Durchführungen mit Verbundisolatoren über ein mit Glasfasern verstärktes inneres Stützrohr, auch Filamentrohr genannt. Dieses Rohr hat zwei Aufgaben: es sorgt für hohe mechanische Stabilität und verhindert durch eine Reinharzschicht, dass Wasser von außen in das Epoxidharzaktivteil eindringen kann. In den 80er Jahren produzierten einige Hersteller Durchführungen bis zu 245kV ohne Filamentrohre. Die Silikon-schirme wurden direkt auf das Aktivteil geklebt. Bei diesen Durchführungen kann im Laufe der Zeit Wasser durch die Silikon-schirme in das Aktivteil gelangen und damit zu Ausfällen der Durchführungen führen. Die blaue Kurve in Bild 5 zeigt das Messergebnis einer Durchführung des beschriebenen Aufbaus ohne Filamentrohr mit eingedrungener Feuchtigkeit, die rote Kurve ohne diesen Feuchtigkeitseinfluss. Der Unterschied ist besonders bei niedrigen Frequenzen gut sichtbar.

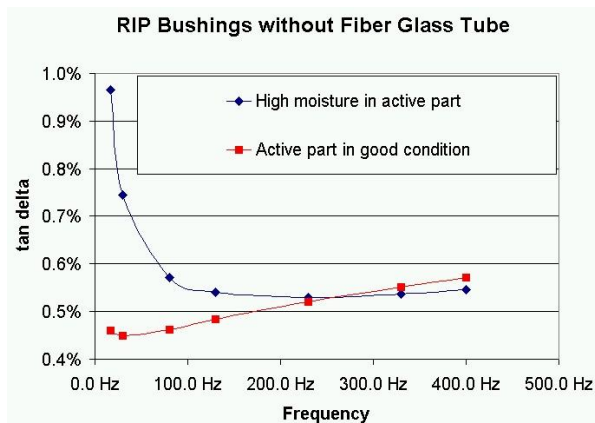


Bild 5 RIP Durchführungen ohne Filamentrohr

Diagnosemessungen an einer 123kV RBP Durchführung

Eine 123kV Hartpapierdurchführung (RBP) zeigte einen auffälligen Kurvenverlauf der dielektrischen Antwort an der Phase C. (Bild 6, rote Kurve, Phase C). Die blaue Kurve wurde an der Phase A gemessen. Der starke Anstieg der $\tan \delta$ Kurve bei hohen Frequenzen ist auffällig.

Die Durchführungen wurden anschließend bei Netzfrequenz mit unterschiedlichen Spannungen von 2 bis 12 kV gemessen. (Bild 7). In diesem Diagramm startet die $\tan \delta$ -Kurve mit recht hohen Verlusten, die mit steigender Spannung geringer werden. Dieses Verhalten weist auf einen mangelhaften Kontakt entweder am Messanschluss oder an der innersten kapazitiven Lage hin. Die Durchführung wurde daraufhin ausgebaut. Der Messanschluss war in Ordnung aber der innerste kapazitive Steuerbelag war nicht richtig mit dem Leiterrohr verbunden. Schlechte Kontakte können die Temperatur der inneren Isolation erhöhen und damit zum Ausfall einer Durchführung führen. Der Austausch der Durchführung war daher die richtige Entscheidung.

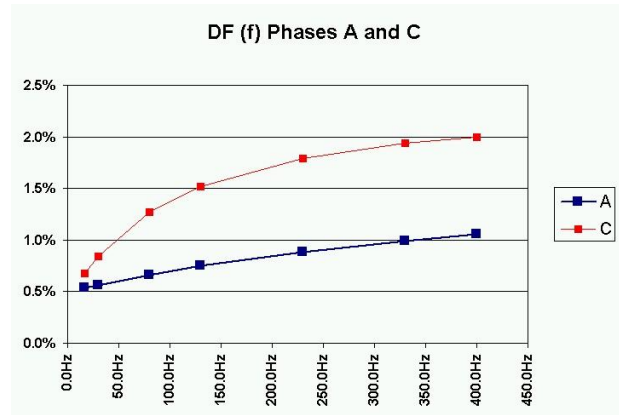


Bild 6 Auffällige dielektrische Antwort einer Hartpapierdurchführung

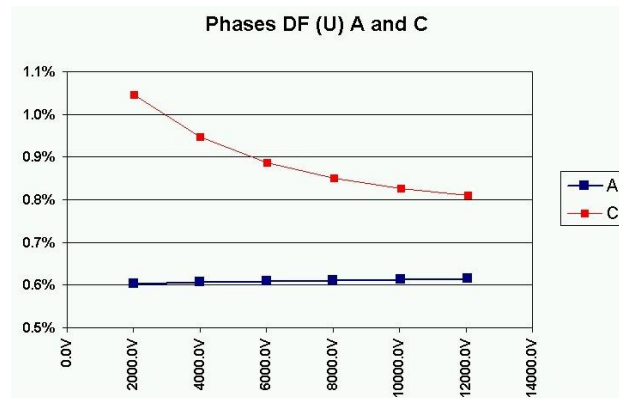


Bild 7 Schlechter Kontakt des innersten kapazitiven Steuerbelages

Diagnosemessungen an Weichpapierdurchführungen (OIP)

33kV Weichpapierdurchführungen wurden ausgetauscht, da der Verlustfaktor sehr groß bei hohen Temperaturen war. Dies ist ein Anzeichen für hohe innere Feuchtigkeit. Bild 8 zeigt den 50Hz Verlustfaktor von Weichpapierdurchführungen mit verschiedenen Wassergehalten abhängig von der Temperatur [2]. Bei hohen Temperaturen reagiert der 50Hz-Verlustfaktor sehr empfindlich auf Feuchtigkeit in der Isolation.

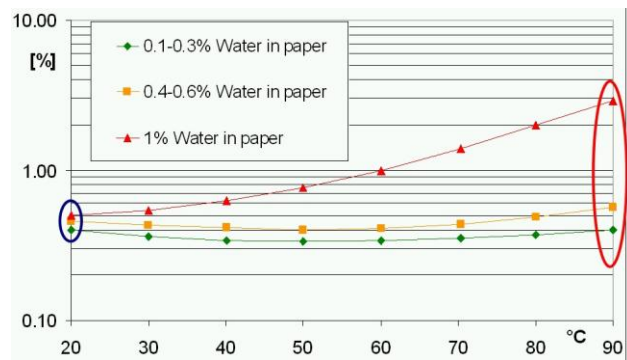


Bild 8 $\tan \delta$ (T) bei 50Hz für unterschiedliche Wassergehalten

Die neuen und die alten Durchführungen wurden bei 30°C von 15 bis 400Hz gemessen. Große Unterschiede zeigten sich bei niedrigen Frequenzen (Bild 9).

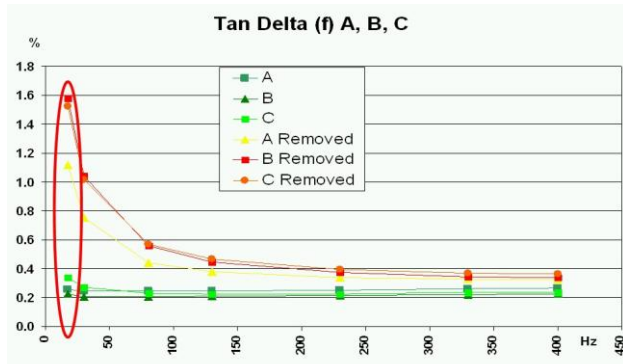


Bild 9 Unterschiedlicher Wassergehalt: $\tan \delta (f)$ bei 30°C

Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, dass die Verlustfaktormessung mit niedrigen Frequenzen auch bei Umgebungstemperatur sehr viel empfindlicher Feuchtigkeit aufzeigt, als die "normale" Messung mit Netzfrequenz.

4 FDS und PDC Messungen an Durchführungen

Die Messung der dielektrischen Verluste kann im Frequenzbereich (FDS=Frequency Domain Spectroscopy) oder im Zeitbereich (PDC=Polarization Depolarization Current) erfolgen. Die Messresultate können vom Zeitbereich in den Frequenzbereich und umgekehrt vom Frequenzbereich in den Zeitbereich transformiert werden. Die FDS ermöglicht die Messung für alle Frequenzen, aber die Messung bei sehr niedrigen Frequenzen benötigt eine sehr lange Messzeit. Die PDC Messung ist schneller, deckt aber den Bereich hoher Frequenzen über 1Hz nicht ab. Ein neues Verfahren nutzt die Vorteile beider Methoden und misst die Frequenzen von 5kHz herunter zu 0.1Hz mit der FDS, die tiefen Frequenzen unterhalb von 0.1Hz mit der PDC-Methode. Die PDC-Daten werden in den Frequenzbereich transformiert und als Verlustfaktorwerte angezeigt [3]. Bild 10 zeigt das Prinzip der kombinierten Messung und Bild 11 den DIElectric Response ANALyser (DIRANA) mit dem Prüfaufbau. Die Messströme können bei RIP und OIP Durchführungen kleiner als 1pA sein. Deshalb wurde die Durchführung zur Störunterdrückung mit einem Aluminiumrohr abgeschirmt. [4].

Die Temperatur beeinflusst die Ergebnisse. Mit zunehmender Temperatur werden die Verluste bei niedrigen Frequenzen höher, wohingegen die Verluste bei hohen Frequenzen zurückgehen, das Minimum des Verlustfaktors verschiebt sich zu höheren Frequenzen (Bild 13). Dies muss berücksichtigt werden, wenn FDS-PDC Resultate verschiedener Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen verglichen werden.

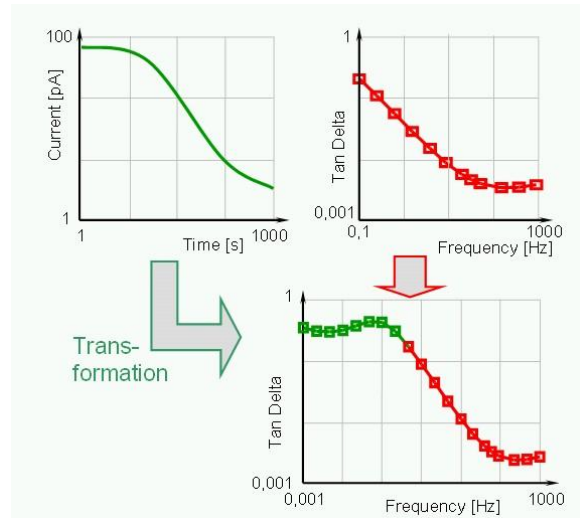


Bild 10 Kombinierte PDC-FDS Messung



Bild 11 Kombinierte FDS-PDC Messung an einer RIP Durchführung mit einem Aluminiumschirm zur Störunterdrückung

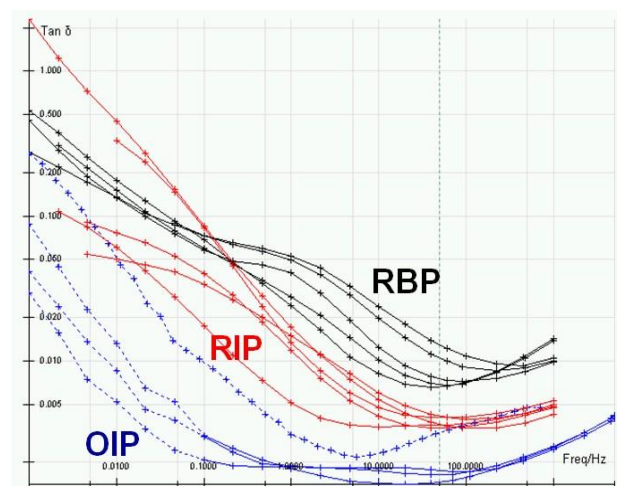


Bild 12 FDS-PDC Ergebnisse für RBP, RIP und OIP Durchführungen

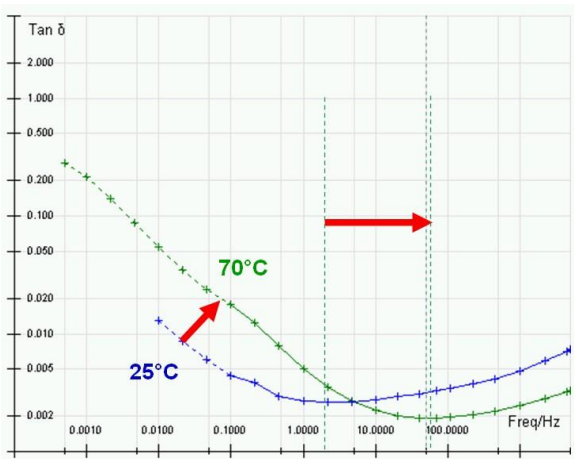


Bild 13 Temperatureinfluss von FDS-PDC Kurven

Experimente mit einer RIP Durchführung

Eine RIP Durchführung wurde in einer Klimakammer unterschiedlichen Temperaturen und relativen Feuchten ausgesetzt. Das Experiment wurde bei 20°C und 38% relativer Feuchte gestartet. Am zweiten Tag wurde die Durchführung auf 70°C aufgeheizt, bei einer relativen Feuchte von 10% (grüne Kurve in Bild 14). Während der nächsten Tage wurde die Durchführung mit einer hohen relativen Feuchte von 80% bei einer Temperatur von 70°C beaufschlagt. Am neunten Tag wurde bei unveränderten Klimabedingungen (80% RH und 70°C) die violette Kurve gemessen. Am 10. Tag wurde die relative Feuchte wieder auf 10% gesenkt. Die rote Kurve wurde am 12. Tag bei unveränderten Umgebungsbedingungen (10% RH und 70°C) gemessen. In der Harzoberfläche ist immer noch Feuchtigkeit gespeichert. Am 13. Tag wurde eine letzte Messung unter Normalbedingungen (38% RH und 25°C) gemacht. Die $\tan \delta$ Werte sind für Frequenzen oberhalb 10Hz identisch mit denen vor Versuchsbeginn, bei niedrigen Frequenzen macht sich die Feuchtigkeit aber noch deutlich bemerkbar.

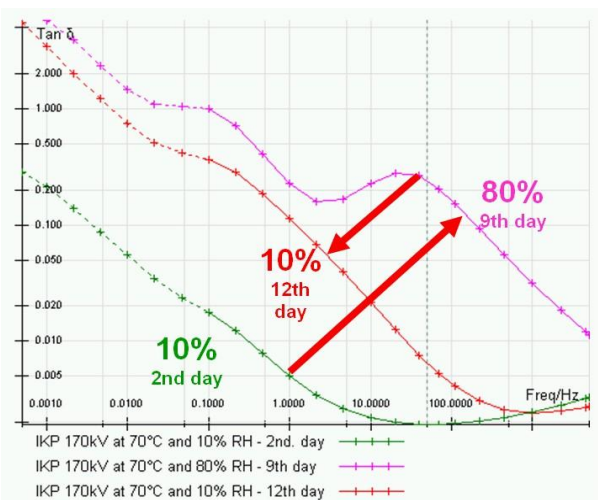


Bild 14 RIP Durchführung bei unterschiedlicher Feuchtigkeit

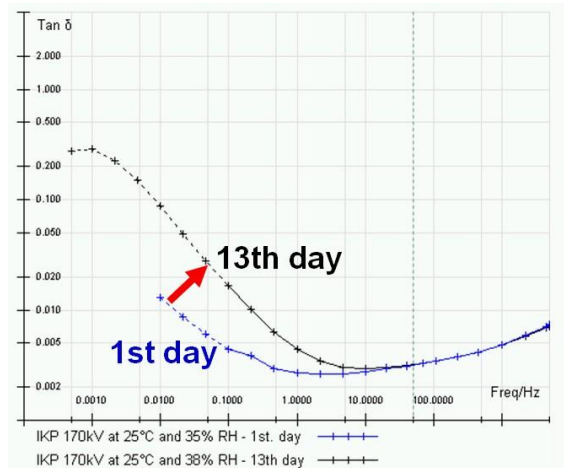


Bild 15 RIP Durchführung vor und nach Befeuchtung

5 Trocknung von RBP und RIP Durchführungen

Durchführungen werden normalerweise in einer Holzkiste geliefert, ein kleines Säckchen Silikagel hält sie für einige Tage bzw. Wochen trocken. Viele Durchführungen werden in diesen Kisten viele Jahre oder sogar Jahrzehnte ohne weitere Maßnahmen gelagert. Und das bei zum Teil hoher Umgebungsfeuchte wie z.B. in Kavernenkraftwerken oder sogar im Freien. Wie bereits erwähnt, ist die Freiluftseite der Durchführung gut geschützt, das trafoseitige Ende kann jedoch durch den Einfluss von Feuchtigkeit Schaden nehmen. In Bild 16 ist der Unterschied der Oberflächen von einwandfreier und durch Feuchtigkeit geschädigter Harzoberfläche zu sehen. Die linke Harzoberfläche ist zwar wieder trocken, im deutlich durchscheinenden Krepppapier sind aber Luftpneinschlüsse zu sehen.



Bild 16 Durch Wasser geschädigte Harzoberfläche

Durchführungen mit derartig geschädigten Harzoberflächen sollten nicht mehr eingesetzt werden [5].

Beispiele für Trocknungen von RBP Durchführungen

145kV RBP Öl-Öl Durchführung

Die 145kV RBP Durchführung in Bild 17 wurde 30 Jahre in der Originalverpackung in einem Kavernenkraftwerk gelagert.



Bild 17 Falsch gelagerte 145kV RBP Öl-Öl Durchführung

Der Verlustfaktor bei 50Hz betrug 30%! Zusätzlich zur 50Hz Messung wurde auch eine FDS-PDC (Bild 18) durchgeführt. Bild 19 zeigt das Messergebnis nach einem Trocknungsversuch über 12 Wochen in einem Trockenofen bei etwa 60°.

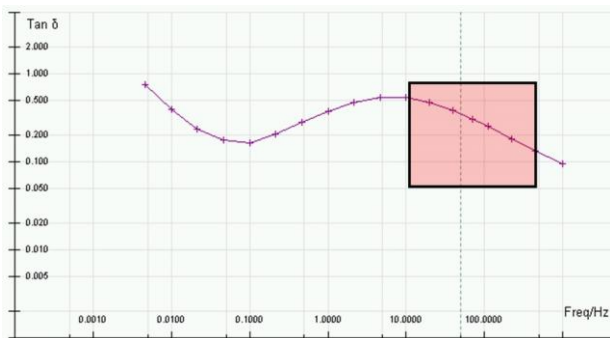


Bild 18 FFS-PDC Messung an einer feuchten RBP Durchführung

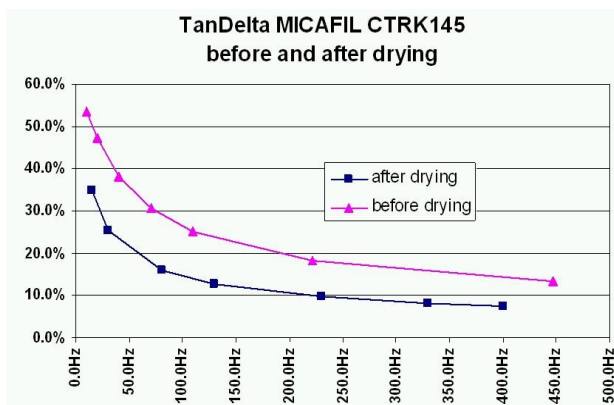


Bild 19 RBP Durchführung vor (violett) und nach (blau) Trocknungsversuch

Nach dem Trocknungsversuch über 12 Wochen hat die Durchführung immer noch einen 50Hz-Verlustfaktor von mehr als 20%. Durchführungen mit derartig hohen Verlusten können nicht mehr getrocknet und somit auch nicht mehr eingesetzt werden.

45kV RBP Durchführungen

Auch diese Durchführungen wurden in der Originalverpackung über viele Jahre gelagert. Bild 20 zeigt das FDS-PDC Ergebnis von drei Durchführungen im feuchten Zustand und einer baugleichen Durchführung (rote Kurve), die eine Woche lang bei etwa 70°C getrocknet wurde.

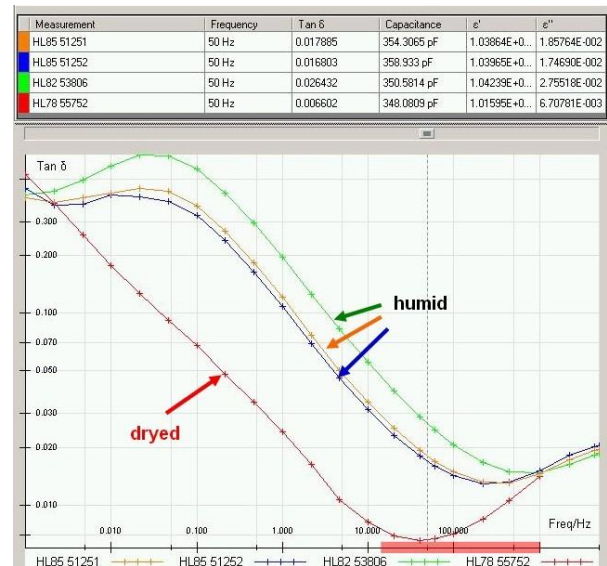


Bild 20 Trocknung von 45kV RBP Durchführungen

Durch die Trocknung konnte eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Der 50Hz-Verlustfaktor konnte von mehr als 2% auf einen akzeptablen Wert von 0.66% gesenkt werden.

145kV RBP Durchführung

Eine 145kV RBP Durchführung wurde in einem Trockenofen über 12 Wochen bei 60°C getrocknet. Bild 21 zeigt die Messwerte vor der Trocknung.

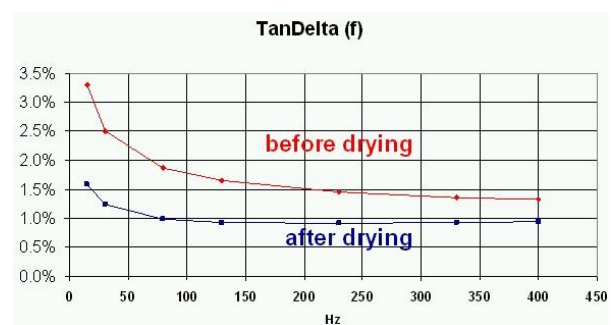


Bild 21 Dielektrische Antwort vor und nach der Trocknung

Der 50Hz-Verlustfaktor wurde durch den Trocknungsvorgang von 2.2% auf 1.1% reduziert. Dieser Wert ist für eine 145kV Durchführung immer noch relativ hoch. Eine Teilentladungsmessung wurde durchgeführt um festzustellen, ob durch die Trocknung Risse und Hohlräume in der Durchführung entstanden sind. Bild 22 zeigt den Prüfaufbau mit dem an den Messanschluss der Durchführung angeschlossenen Quadrupol und dem TE-Messgerät.

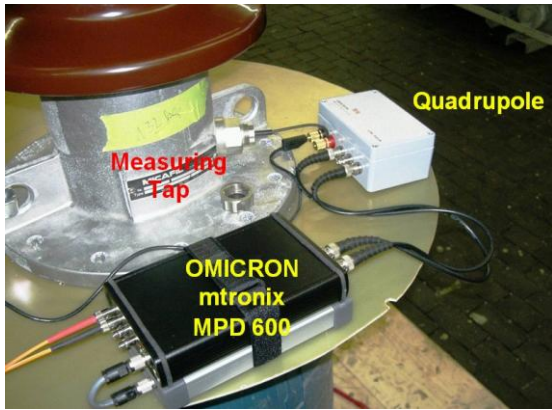


Bild 22 Messaufbau für die TE-Messung

Bild 23 zeigt die phasenbezogene TE-Messung ohne eine Filterung durch das sogenannte 3 Center Frequency Relation Diagram (3CFRD). Die Summe aller TE-Signale ist hier zu sehen. Ein klares Muster ist nicht erkennbar.

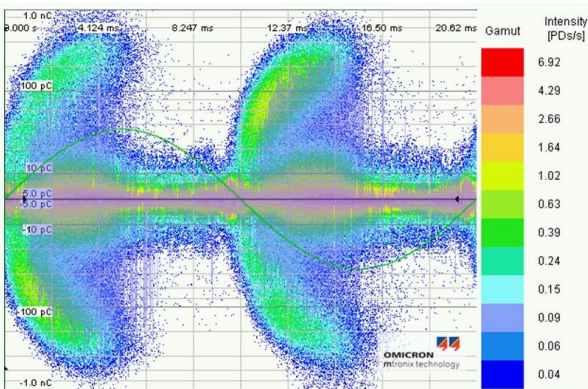


Bild 23 TE-Messung ohne Filterung mit dem 3CFRD

Um die TE-Signale der verschiedenen TE-Quellen voneinander zu trennen wurde eine Filterung mittels 3CFRD durchgeführt. Die Teilentladungen werden dabei simultan bei drei verschiedenen Frequenzen gemessen, in diesem Fall bei 500kHz, 2.8MHz und 8MHz. Wenn die TE-Quellen unterschiedliche Frequenzspektren aufweisen, können sie durch dieses Verfahren voneinander getrennt und somit die Muster der einzelnen Quellen ohne Überlagerung der Signale andere Quellen sichtbar gemacht werden. Außerdem lassen sich mit diesem Verfahren auch Störsignale von TE-Ereignissen trennen. Dies ist ein großer Vorteil bei Messungen außerhalb geschirmter Messkabinen. In Bild 24 sieht man das 3CFRD Sternendiagramm und die vektorielle Addition der bei den drei Frequenzen gemessenen TE-Amplituden eines TE-Fehlers.

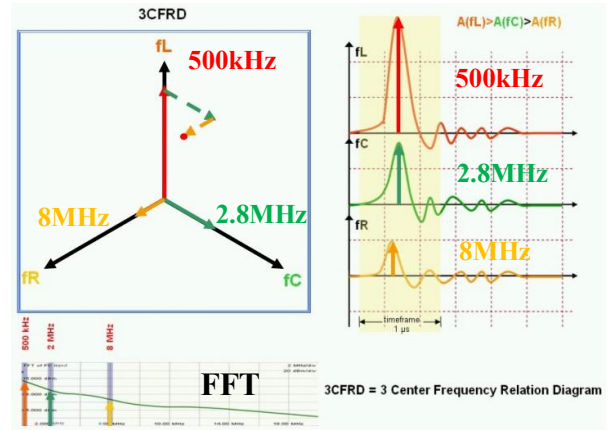


Bild 24 3CFRD mit der vektoriellen Addition der TE-Amplituden eines TE-Fehlers bei drei verschiedenen Messfrequenzen

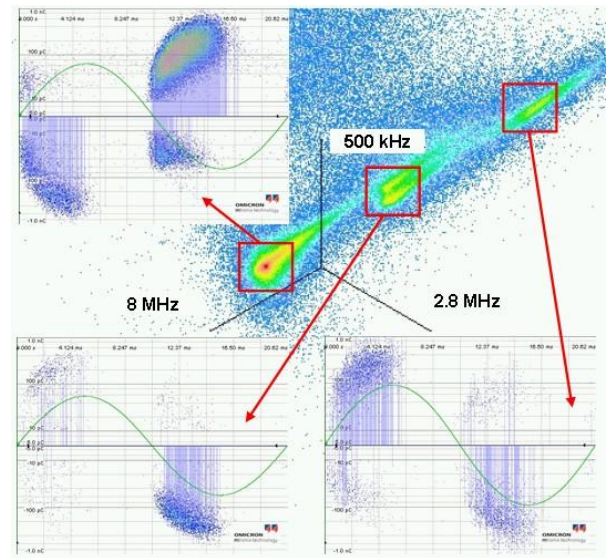


Bild 25 Trennung der TE-Signale verschiedener Quellen mit dem 3CFRD

In Bild 25 ist das Sternendiagramm für die drei Frequenzen mit den Clustern der verschiedenen TE-Fehler zu sehen. Die Software ermöglicht es, die einzelnen Cluster durch Fenster zu markieren. Bei aktiviertem Fenster werden in der phasenbezogenen TE-Darstellung nur noch die TE-Impulse dargestellt, die das Kriterium für dieses Fenster erfüllen.

Wegen der hohen $\tan\delta$ -Werte und der hohen TE-Intensitäten von über 1nC wurde diese Durchführung nicht mehr eingesetzt.

6 Zusammenfassung

Moderne Technologien ermöglichen eine sehr effiziente Diagnose von Hochspannungsdurchführungen. Die Messung der dielektrischen Antwort (Dielectric Spectroscopy) hat sich als sehr erfolgversprechend herausgestellt. Sie liefert weit mehr Informationen als die bisher übliche

Verlustfaktormessung bei 50Hz. Mit dem 3CFRD Verfahren besteht jetzt die Möglichkeit, empfindliche TE-Messungen vor-Ort ohne geschirmte Messkabinen durchzuführen. Es ermöglicht auch, verschiedene TE-Quellen voneinander zu trennen und die TE-Muster der einzelnen TE-Fehler ohne Überlagerung durch die TE-Signale der anderen TE-Quellen zu analysieren.

7 Literatur

- [1] Hensler, Th., Kaufmann, R., Klapper, U., Krüger, M., Schreiner, S., 2003, "Portable testing device", US Patent 6608493
- [2] ABB, "Dissipation factor over the main insulation on high voltage bushings", product information, ABB 2002
- [3] Borsi, H., Gockenbach, E., Krüger, M.: "Method and apparatus for measuring a dielectric response of an electrical insulating system" US2006279292
- [4] Muhr, M., Summereder, C., Weingärtner, M.: Diagnose von Durchführungen mit Hilfe von frequenzabhängigen Verlustfaktormessungen, OMICRON transformer conference, Bregenz, Austria, 2007
- [5] Frei, K., Koch, N.: Zustandsbeurteilung von Durchführungen im Praxiseinsatz, OMICRON transformer conference, Bregenz, Austria, 2007

Contact address:

Dr. Michael Krüger
OMICRON Energy
Oberes Ried 1
A-6833 Klaus – Austria

OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 140 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Niederlassungen in Europa, Nordamerika, Südostasien, Australien und im Nahen Osten, ein weltumspannendes Netz von Vertriebspartnern sowie etablierte Plattformen für den internationalen Erfahrungsaustausch stellen sicher, dass das breite und tiefe Anwendungswissen und der erstklassige Kundenservice allen Anwendern zur Verfügung steht.

Europa, Naher Osten, Afrika

OMICRON electronics GmbH
Oberes Ried 1
6833 Klaus, Austria
Tel.: +43 5523 507-0
Fax: +43 5523 507-999
info@omicron.at

Nord- und Lateinamerika

OMICRON electronics Corp. USA
12 Greenway Plaza, Suite 1510
Houston, TX 77046, USA
Tel.: +1 713 830-4660
+1 800-OMICRON
Fax: +1 713 830-4661
info@omicronusa.com

Asien, Pazifischer Raum

OMICRON electronics Asia Limited
Suite 2006, 20/F, Tower 2
The Gateway, Harbour City
Kowloon, Hong Kong S.A.R.
Tel.: +852 3767 5500
Fax: +852 3767 5400
info@asia.omicron.at