

Profil von Wassergehalt und Polymerisationsgrad in der Feststoffisolation von Leistungstransformatoren

Thomas Leibfried, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe, (Leibfried@ieh.uni-karlsruhe.de)

Uwe Thieß, Ivanka Höhlein-Atanasova, Siemens AG, Transformatorenwerk Nürnberg

Silvio Truant, artec Energie - und Umwelttechnik GmbH, Leegebruch bei Berlin

Bernhard Heinrich, Hans Peter Gasser, Weidmann Transformerboard Systems AG, Rapperswil, Schweiz

Bernd Breitenbauch, Thomas Lainck, Jürgen Leißner, E.ON Netz GmbH, Bayreuth

Kurzfassung

Viele der heute betriebenen Leistungstransformatoren sind inzwischen bei einem Lebensalter von 30 Jahren und mehr angelangt und können einen kritischen Alterungszustand erreicht haben. Die Alterungsgeschwindigkeit wird neben der thermischen Belastung vor allem durch den Wassergehalt in der Feststoffisolation bestimmt. Zur Abschätzung des Gesamtwassergehaltes in einem Transformator ist die Kenntnis eines „typischen“ Profils des Wassergehaltes in der Feststoffisolation von Transformatoren, wie es sich nach vielen Betriebsjahren einstellt, sehr hilfreich. Die Entscheidung über eine Aktivteiltrocknung als werterhaltende Maßnahme basiert letztlich auf dem Gesamtwassergehalt des Isolationssystems. In dem vorliegenden Beitrag wird eine Untersuchung des Profils von Wassergehalt und Polymerisationsgrad in der Feststoffisolation eines 31,5-MVA-Transformators (110kV), Baujahr 1955, vorgestellt.

1 Einleitung

Viele der heute betriebenen Leistungstransformatoren haben ein Alter von 30 Jahren und mehr erreicht. Der Wassergehalt in der Feststoffisolation dieser Transformatoren ist von zunehmender Bedeutung für die verbleibende Lebensdauer. Die Lebensdauer eines Transformators wird unter anderem durch die mechanische Festigkeit des Isolationssystems bestimmt. Diese hängt direkt mit der Kettenlänge der Zellulosemoleküle, aus denen die Feststoffisolation besteht, zusammen. Einlagerung von Wasser in die Feststoffisolation führt zu einer beschleunigten Spaltung der Zellulosemolekülketten, was die mechanische Festigkeit der Feststoffisolation verringert. Damit steigt das Risiko einer mechanischen Schädigung des Transformators bei transformatornahen Netzkurzschlüssen.

Eine Aktivteiltrocknung ist eine werterhaltende Maßnahme, da sich durch sie der Wassergehalt in der Feststoffisolation je nach Verfahren deutlich verringern lässt. Wichtig für die Entscheidung für oder gegen eine solche Maßnahme ist vor allem der Gesamtwassergehalt im Transformator. Die Umrechnung des Wassergehaltes im Öl auf den Wassergehalt in der Feststoffisolation mit Hilfe so genannter Gleichgewichtskurven würde zwar ein integrales Ergebnis für den Wassergehalt liefern, diese Methode hat sich jedoch in vielen praktischen Fällen als zu ungenau für eine Entscheidung über die Investition in eine Aktivteiltrocknung herausgestellt. Durch dielektrische Messverfahren (Dielectric Spectroscopy) können prinzipiell bessere

Ergebnisse erzielt werden, wie sich in der praktischen Erfahrung mit Aktivteiltrocknungen in der Vergangenheit gezeigt hat. Allerdings kann mit dielektrischen Messverfahren immer nur in bestimmten Bereichen, z. B. im Isolationssystem zwischen den Wicklungen, der dortige Wassergehalt bestimmt werden. Mit der Kenntnis des Profils des Wassergehaltes in einem Transformator ist - ausgehend von einer dielektrischen Wassergehaltsbestimmung im Isolationssystem zwischen 2 Wicklungen - eine Abschätzung des Gesamtwassergehaltes in Transformatoren möglich. Für die Bestimmung des Gesamtwassergehaltes ist daher die Kenntnis des Profils des Wassergehaltes sehr hilfreich.

Ein Maß für die (mittlere) Länge der Zellulosemolekülketten und damit auch für die mechanische Festigkeit des gesamten Isolationssystems ist der Degree of Polymerization (DP-Wert). In der Praxis ist die Entnahme von Materialproben aus dem Inneren eines betriebstüchtigen Transformators allerdings aufwendig und risikoreich. Ein interessanter Ansatz, um Informationen über den DP-Wert zu erhalten, ist daher einen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem DP-Wert weiterhin zu untersuchen. Ein solcher Zusammenhang sollte existieren, da neue Transformatoren einen hohen DP-Wert und einen niedrigen Wassergehalt aufweisen, während die Verhältnisse bei gealterten Transformatoren gerade umgekehrt sind.

In einem umfangreich angelegten Versuchsprogramm wurden die Wicklungen eines

31,5 MVA-Transformators (110 kV/60 kV - 20 kV) vor und nach einer Aktivteiltrocknung (LFH-Technik) Stück für Stück zerlegt. Dabei wurden Materialproben entnommen und analysiert. In Zuge der Untersuchung des Wassergehaltes wurden die Materialproben auch gleich einer DP-Analyse unterzogen. In dem vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

2 Ablauf des Versuches am 31,5-MVA-Transformator

Die E.ON Netz GmbH stellte für den im Folgenden beschriebenen Versuch einen zur Verschrottung anstehenden 31,5-MVA-Transformator mit der Übersetzung 110 kV/60 kV - 20 kV, Baujahr 1955, zur Verfügung. Das folgende Versuchsprogramm wurde in Kooperation mit der E.ON Netz GmbH, der Siemens AG, der artec Energie- und Umwelttechnik GmbH, der Weidmann Transformerboard Systems AG (Rapperswil, Schweiz) und dem Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Karlsruhe abgearbeitet:

- 1) Kontrolle und Dokumentation der Betriebsparameter (Temperatur, Ölwerte) über mehrere Wochen vor Versuchsbeginn.
- 2) Abrüstung des Transformators und Transport in den Geräteservice Nürnberg der E.ON Netz GmbH.
- 3) Ablassen des Öls, Ausbau des Aktivteils, schrittweise Demontage des Wicklungsblocks Phase W zur Entnahme der Materialproben. Der Wicklungsblock der Phase W wird vollständig bis auf den Kern abgebaut.
- 4) Herstellen einer einphasigen Schaltung der noch vorhandenen Wicklungsblöcke der Phasen U und V. Der nunmehr einphasige Transformator wird wieder mit Öl gefüllt und für die Aktivteiltrocknung vorbereitet.
- 5) Aktivteiltrocknung (LFH-Trocknung) des nunmehr einphasigen Transformators.
- 6) Ausbau des Aktivteils, schrittweise Demontage des Wicklungsblocks Phase U zur Entnahme der Materialproben. Der Wicklungsblock der Phase U wird vollständig bis auf den Kern abgebaut. Erhalten ist jetzt nur noch die Phase V.
- 7) Aktivteiltrocknung der verbliebenen Phase V.
- 8) Ausbau des Aktivteils und schrittweise Demontage des Wicklungsblocks Phase V zur Entnahme der Materialproben.

Ziel dieses Versuches war die Ermittlung

- des Feuchteprofils und des Profils des DP-Wertes in der Feststoffisolation.

- der Auswirkungen der Aktivteiltrocknung durch die Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik, auf das Feuchteprofil, d. h. insbesondere der Nachweis in welchem Umfang räumlich verteilt ein Wasserentzug erfolgt und der Nachweis, dass die Aktivteiltrocknung mit dieser speziellen Methode keine zusätzlichen Alterungseffekte hervorruft.

3 Verteilung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation des 31,5-MVA-Transformators

Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Schenkels des Transformators und die Orte der Probenentnahmestellen, für welche der Wassergehalt in der Feststoffisolation, d. h. im Papier und im Pressspan, bestimmt wurde. Bei den entnommenen Materialproben wurde der Wassergehalt (F in %) durch Karl-Fischer-Titration bestimmt. Dabei wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt, d. h. der schließlich resultierende Wert ergab sich aus der Analyse von 2 Proben eines jeden entnommenen Materialstückes.

Die Stufenwicklung des Transformators bestand aus drei einzelnen Röhren und war als Lagenwicklung ausgeführt. Die US- und die OS-Wicklungen waren Scheibenspulenwicklungen. Die in **Bild 1** dargestellten Zylinder waren aus einzelnen, 1-mm-starken Segmenten zusammengesetzt, die, einander überlappend, einen Zylinder mit einer bestimmten Stärke (zwischen 4 mm und 9 mm) bildeten. Dies ist ein deutlicher Unterschied zu den seit vielen Jahrzehnten verwendeten Zylinderanordnungen, die aus einem Stück in der gewünschten Materialstärke bestehen und die Wicklung vollständig umfassen.

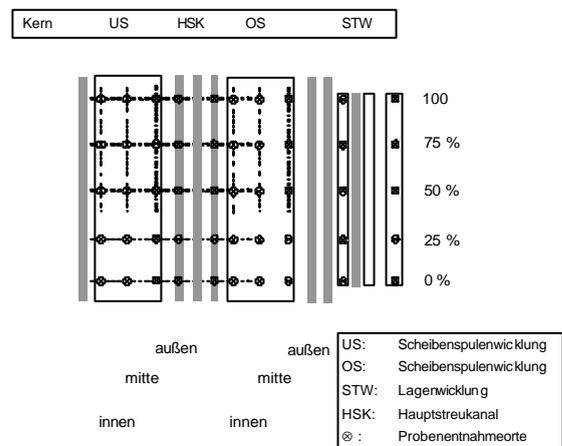


Bild 1 Schematisch dargestellter Aufbau eines Schenkels des 31,5-MVA-Transformators mit den Probeentnahmestellen für die Bestimmung des Wassergehaltes

In **Bild 2** ist der Transformator in I-phasiger Anordnung zu sehen, d. h. der Wicklungsblock der Phase W ist vollständig bis auf den Kern abgebaut.

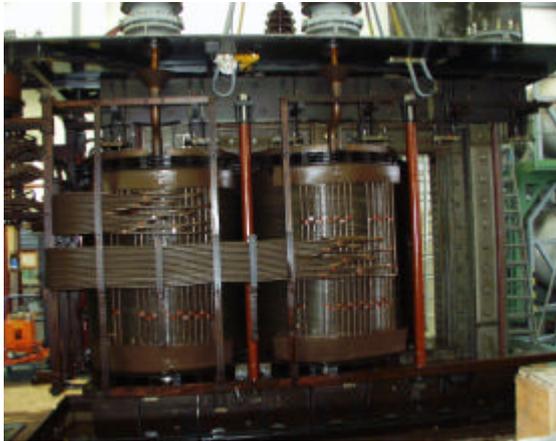


Bild 2 Aktivteil des 31,5-MVA-Transformators mit abgebautem Wicklungsblock Phase W

In **Bild 3** ist der Wassergehalt (F in %) über der Wicklungslänge dargestellt. Aus den jeweiligen Meßpunkten in jeder Ebene der US-Wicklung, des Streukanals, der OS-Wicklung und der Stufenwicklung werden Mittelwerte gebildet. Die in den Diagrammen dargestellten Punkte ergeben sich also im Falle der US- und der OS-Wicklung als Mittelwerte aus 3 Meßwerten und im Falle des Streukanals und der Stufenwicklung als Mittelwert aus 2 Meßwerten in jeder der 5 Ebenen bei 0%, 25%, 50%, 75% und 100% der Wicklungslänge. Es ergibt sich vor der Trocknung ein nach oben etwas abfallender Wert für den Wassergehalt in der Feststoffisolation. Dies liegt daran, dass der gesamte Wicklungsaufbau im Betrieb am oberen Ende wärmer ist als am unteren. Durch die Erwärmung wird das Wasser zum oberen Ende der Wicklung hin aus der Feststoffisolation etwas verdrängt, wodurch sich insgesamt eine Zunahme des Wassergehaltes in der Feststoffisolation von oben nach unten einstellt. Ein derartiger Gradient des Wassergehaltes stellt sich im Verlaufe der Betriebszeit ein.

Die OS- und die US-Wicklung waren auf eine Länge von ca. 100 mm am oberen und unteren Ende verklebt. An den verklebten Stellen ist der Wassergehalt deutlich unterschiedlich zu den Werten bei 25%, 50% und 75% der Wicklungslänge. Bei der US-Wicklung ist dieser Effekt auch schon in der Verteilung des Wassergehaltes über der Wicklung vor der Trocknung gut erkennbar. Der Wassergehalt im Isoliermaterial an den Randbereichen nach der Trocknung weichen bei der US-Wicklung und im Hauptstreukanal deutlich von den 3 Messwerten bei 25%, 50% und 75% der Wicklungslänge ab.

Offensichtlich behindert die Verklebung an den Randbereichen der US-Wicklung das Austreten von Wasser, trotz des während der LFH-Trocknung um die Feststoffisolation anstehenden Vakuums mit einem Druck von ca. 1 mbar. Für den vorliegenden Transformator entsprechen diese Meßwerte zwar der Realität, die Verklebung der Randbereiche von Wicklungen ist jedoch eher untypisch für Transformatoren, die ab etwa den 60er Jahren gebaut wurden. Bei den Zylindern des Hauptstreukanals ergibt sich in den Randbereichen ein geringerer Wasserentzug als bei 25%, 50% und 75% der Wicklungslänge aufgrund einer Verdickung der Isolation durch die Überlappung der Zylinder mit Winkelringen und Kappen, welche die Isolation im Endbereich der Wicklungen bilden.

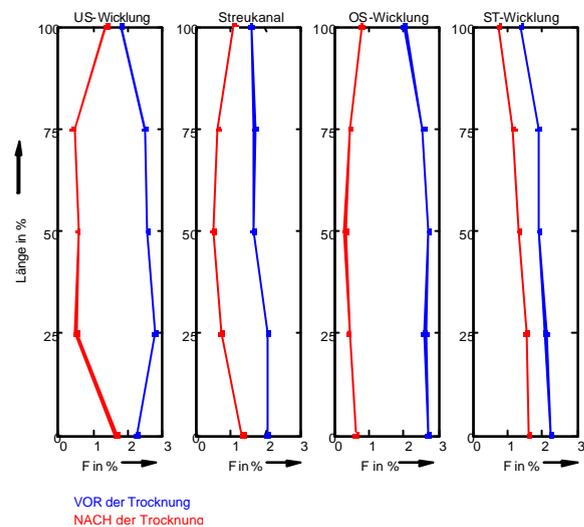


Bild 3 Verteilung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation des Schenkels W vor und des Schenkels U nach der Aktivteiltrocknung

Deutlich sichtbar ist der Wasserentzug infolge der Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik (SMART DRY). In der US- und der OS-Wicklung werden durchschnittlich Wassergehalte von etwas über 2% des Isolationsgewichtes entzogen, so dass der Restwassergehalt bei ca. 0,5% des Isolationsgewichtes liegt, was dem Neuzustand entspricht. In den weiter von den stromdurchflossenen Wicklungen entfernten Isolierteilen ist der Wasserentzug etwas geringer, so beträgt er in den Zylindern des Hauptstreukanals durchschnittlich etwa 1 – 1,5%; aber auch hier wird ein Restwassergehalt von deutlich unter 1% erreicht. Lediglich in der Stufenwicklung ist der Wasserentzug geringer, was daran liegt, dass die außen liegenden Windungen der Stufenwicklung mit einem Isolierlack bestrichen waren, der einen Wasseraustritt behindert.

Dickere Teile wie Leisten und Druckklötze brauchen eine längere Trocknungszeit. Bei diesen Teilen sowie bei wicklungsfernen Teilen lag der Wasserentzug im Bereich von 0,5 - 1 %. Der Restwassergehalt dieser Teile lag im Bereich von 0,5 - 1,5 %.

4 Polymerisationsgrad der Feststoffisolation des 31,5-MVA-Transformators

Die DP-Analyse einer Vielzahl von Isolierstoffproben ist sehr zeitaufwendig. Deshalb wurden nur die an der Wicklungsmitte (50 %) und an den Wicklungsenden (0 % und 100 %) entnommenen Materialproben analysiert. **Bild 4** zeigt die Orte an denen Materialproben entnommen wurden, deren Polymerisationsgrad (DP-Wert) bestimmt wurde.

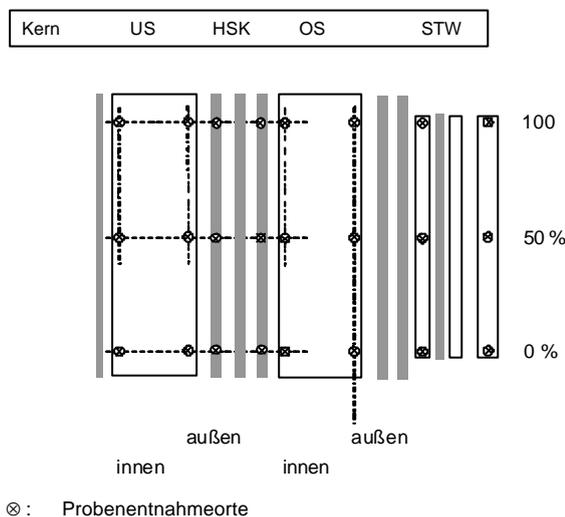


Bild 4 Orte, an denen die Materialproben entnommen wurden, für die der Polymerisationsgrad (DP-Wert) bestimmt wurde

In **Bild 5** sind die DP-Werte der US-, OS- und der Stufenwicklung dargestellt. Der DP-Wert des Papiers ist am oberen Ende der Wicklungen aufgrund der stärkeren Erwärmung niedriger, als am unteren Ende. Offensichtlich ist die beschleunigende Wirkung der Temperatur größer als die beschleunigende Wirkung des Wassergehaltes. Dieser Effekt ist bei der OS- und US-Wicklung besonders stark ausgeprägt. Bei der Stufenwicklung hängt es davon ab, in welcher Stufenschalterstellung der Transformator am häufigsten betrieben wurde. Die Materialproben wurden nicht notwendigerweise jenem Teil der Stufenwicklung entnommen, der mit höchsten Stromdichten betrieben wurde und somit die höchste Beanspruchung erfahren hat.

Eine genauere Analyse der DP-Werte vor und nach der Aktivteiltrocknung zeigt, dass sich die Werte nur geringfügig unterscheiden. Bei genauer Be-

trachtung stellt man fest, dass abhängig vom Probeentnahmeort einmal der DP-Wert vor der Trocknung größer als jener nach der Trocknung ist und umgekehrt. Die Differenzen der DP-Werte vor und nach der Trocknung liegen im Bereich der Messgenauigkeit des Analyseverfahrens. Das Meßverfahren wird durch ISO 5351/1 beschrieben; die Anwendung erfolgt nach DIN IEC 450. Erwartungsgemäß kommt es durch die Aktivteiltrocknung zu keiner signifikanten Verringerung des DP-Wertes der Feststoffisolation, d. h. zu keiner signifikanten Alterung des Isoliermaterials durch die LFH-Trocknung, obwohl die letzte Trocknungsphase über einen Zeitraum von 72 h mit 110 °C durchgeführt wurde.

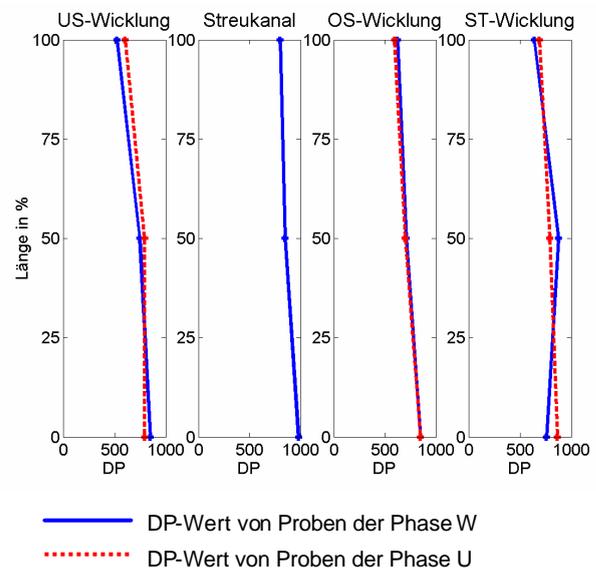
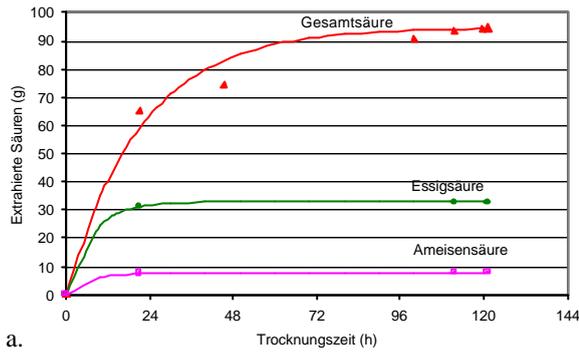


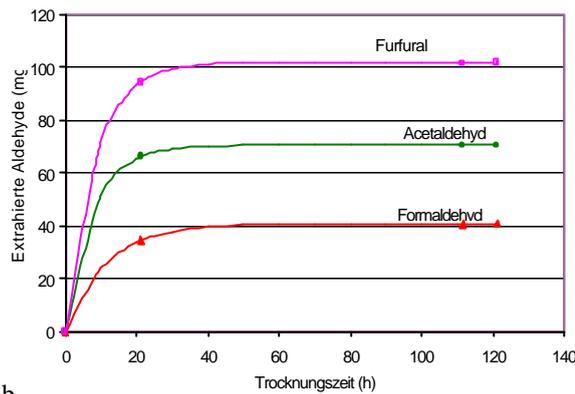
Bild 5 Verteilung des DP-Wertes der Feststoffisolation des Schenkels W vor und des Schenkels U nach der Aktivteiltrocknung

5 Extraktion weiterer Zersetzungsprodukte durch die LFH-Trocknung

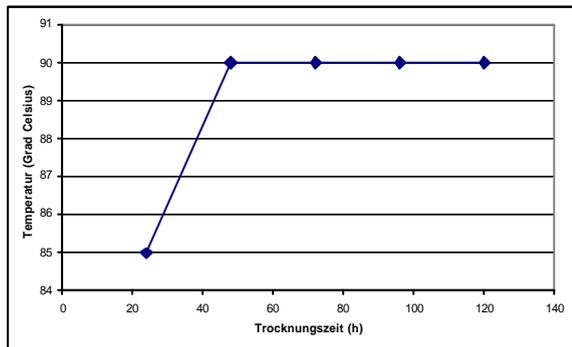
Bei der LFH-Trocknung erfolgt der Wasserentzug aus der Feststoffisolation durch Anlegen eines Vakuums an den Transformator. Wie Untersuchungen des extrahierten Wassers an mehreren getrockneten Transformatoren ergaben, werden bei der LFH-Trocknung neben dem Wasser auch große Anteile an organischen Säuren, hauptsächlich Ameisen- und Essigsäure, extrahiert (**Bild 6a**). Diese Säuren entstehen bei der Zersetzung vom Öl und Papier. Durch die Gegenwart von Feuchte wird ihre Bildung zusätzlich beschleunigt. Sie werden hauptsächlich in der festen Isolation festgehalten. Die Verteilung dieser hochpolaren Alterungsprodukte zwischen fester und flüssiger Isolation ähnelt dem temperaturabhängigen Gleichgewicht Wasser-Öl-Papier.



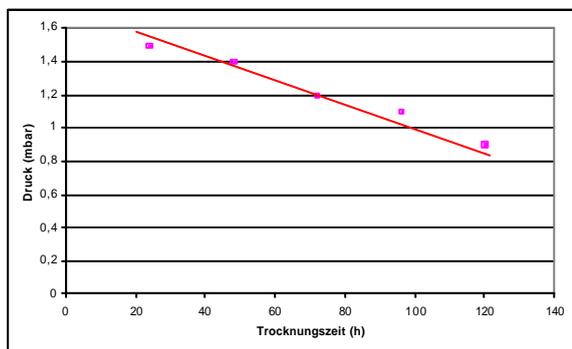
a.



b.



c.



d.

Bild 6 Extraktion von organischen Säuren und Aldehyden während der LFH-Trocknung

- Extraktion von organischen Säuren
- Extraktion von Aldehyden
- Mittlere Wicklungstemperatur
- Druck

Ebenfalls extrahiert werden Aldehyde wie Formaldehyd, Acetaldehyd aber auch Furane z.B. 2-Furfural (**Bild 6b**).

Im Verlauf der LFH-Trocknungen wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten (nicht äquidistant) Proben der extrahierten Flüssigkeit entnommen und analysiert. Die Resultate zeigten, dass schwerer flüchtige Säuren und Furane auf der Papieroberfläche in den ersten Vakuumphasen schnell entzogen werden. Daraus entsteht ein Konzentrationsgradient, der diese Komponenten aus dem Inneren des Papiers durch Diffusion an die Oberfläche transportiert. Dieser Effekt dürfte zur Folge haben, dass auch bei einem getrockneten Transformator der Alterungszustand immer noch durch eine Furananalyse bestimmt werden kann.

Zur besseren Interpretation der während der Trocknung entzogenen Säuren und Aldehyde sind die Temperatur und der Druck während der Trocknungsphase (Vakuumphase) in den **Bildern 6c** und **6d** angegeben.

6 Wicklungspressung

Im Betrieb, wie auch durch den Wasserentzug bei der Trocknung schrumpft die Wicklung in ihrer Höhe.

Im Folgenden seien die Ergebnisse der Messung der Wicklungspresskraft vor und nach der Trocknung für die US-Wicklung und die Stufenwicklung der Phase U angegeben. Messtechnisch wurden die Drehmomente bestimmt, mit denen die Pressschrauben angezogen waren. Aus den Drehmomenten lassen sich bei bekannten Gewindedaten (Flankendurchmesser, Steigungswinkel, Reibungswinkel) die Presskräfte bestimmen. Zusammen mit der Auflagefläche der US-Wicklung und der Stufenwicklung kann man schließlich die Flächenpressung bestimmen.

1 N/mm ² = 1 MPa	US-Wicklung	ST-Wicklung
Vor der Trocknung	3,2 N/mm ²	5,45 N/mm ²
Nach der Trocknung	2,2 N/mm ²	4,62 N/mm ²

Bei der US-Wicklung ergibt sich eine Abnahme der Flächenpressung infolge der Aktivteiltrocknung von ca. 30 %, bei der Stufenwicklung beträgt die Reduktion der Flächenpressung sogar nur ca. 15 % (von 5,45 MPa auf 4,62 MPa).

Die Berechnung der Wicklungspressung der OS konnte nicht erfolgen, da von 8 Druckschrauben nur jeweils 4 zugänglich waren. Aufgrund der vorgefundenen Drehmomente kann man jedoch von einem ähnlichen Ergebnis wie bei der US ausgehen.

7 Längenänderung der Wicklung

Bei der Messung der Drehmomente wurde aus der Gewindesteigung eine Längenänderung von ca. 1,5 mm sowohl für die US-Wicklung als auch für die Stufenwicklung infolge der Schrumpfung der Wicklung durch die Aktivteiltrocknung bestimmt.

Dieses Ergebnis muß in Relation zur Längenänderung der Wicklung infolge von Temperaturschwankungen gesehen werden. Hierzu sei folgende Überlegung angestellt. Die Wicklung besteht aus Kupfer und Feststoffisolation. Die Ausdehnungskoeffizienten sind

$$\alpha_{Cu} = 0,000017 \text{ 1/K}$$

und

$$\alpha_{Iso} = 0,000045 \text{ 1/K.}$$

Beide Materialien dehnen sich unter einem Temperatureinfluß aus. Die Längenausdehnung des Eisenkerns wirkt jedoch einer Veränderung der Presskraft durch die Längenänderung der Wicklung entgegen, da die Wicklung zwischen oberem und unterem Pressrahmen eingespannt ist. Es ist

$$\alpha_{Fe} = 0,000011 \text{ 1/K.}$$

Mit

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_0$$

lässt sich die Längenänderung bestimmen. Für eine Temperaturänderung von 10 K ergeben sich für den untersuchten 31,5-MVA -Transformator die folgenden Werte:

$\Delta T = 10\text{K}$	Stufenwicklung	US-Wicklung
Eisenlänge	1860 mm	1860 mm
Anteil Kupfer	760 mm	1010 mm
Ant. Isolation	1040 mm	750 mm
Δl_{Cu} [mm]	0,13	0,17
Δl_{Iso} [mm]	0,47	0,34
Δl_{Fe} [mm]	0,20	0,20

Für die gesamte effektive Längenänderung, die für eine Veränderung der Presskraft wirksam wird, ergibt sich damit:

$$\Delta l_{eff} = (\Delta l_{Cu} + \Delta l_{Iso}) - \Delta l_{Fe} .$$

Für die US-Wicklung und die Stufenwicklung ergeben sich:

$$\Delta l_{eff,US} = 0,31 \text{ mm} \quad \text{und} \quad \Delta l_{eff,ST} = 0,40 \text{ mm} .$$

Eine Temperaturänderung von 40 K führt demnach zu einer Längenänderung der Wicklung von ca. 1,2...1,6 mm. Dieser Wert liegt damit in der Größenordnung für die Schrumpfung der Wicklung, wie sie durch eine Abkühlung um 40 K auftritt. Eine derartige Temperaturschwankung ist jedoch für Leistungstransformatoren absolut nichts Unge-

wöhnliches. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Schrumpfung von Wicklungen durch die LFH-Trocknung in einem Bereich liegt, der im normalen Betrieb von Transformatoren ebenfalls auftritt.

8 Zusammenfassung

Dem Wassergehalt im Feststoff von Öl-Papier-Isolationssystemen kommt eine wichtige – und möglicherweise bisher zu wenig berücksichtigte – Bedeutung zu.

Zur Bestimmung des Gesamtwassergehaltes in einem Transformator können neben chemischen Methoden auch dielektrische Analyseverfahren (PDC- und FDS-Analyse) zum Einsatz. Mit diesen Verfahren ist eine Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation zwischen den Wicklungen mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Die theoretischen Überlegungen hinsichtlich des Profils von DP-Wert und Wassergehalt konnten durch das Experiment bestätigt werden. Die Kenntnis des typischen Profils des Wassergehaltes in betriebsgealterten Transformatoren erlaubt nun auch eine Abschätzung des Wassergehaltes, der in anderen Bereichen der Feststoffisolation enthalten ist. In weiteren Untersuchungen soll ermittelt werden, ob das bei dem 31,5-MVA -Transformator gefundene Profil des Wassergehaltes als typisch angesehen werden kann.

9 Literatur

- [1] „Loading Guide for oil-immersed transformers“ (International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 354, 1972)
- [2] Transformerboard II, HP. Moser/V. Dahinden, H. Weidmann AG, CH-8640 Rapperswil, 1987
- [3] The Impact of Drying and Oil Impregnation Conditions and of Temperature Cycles on the Clamping Force of Power Transformer Windings, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10, 2002
- [4] Du, Y.; Zahn, M.; Lesieutre, B.C.; Mamishev, A.V.; Lindgren, S.R.: Moisture equilibrium in transformer oil paper systems, IEEE Electrical Insulation, Vol. 15, No.1, January/February 1999