

LFH – Trocknung: Erfahrungen und Trends

W. Müntener

1. Einleitung

Kürzere Prozesszeiten bei einwandfreier Trocknungsqualität, genaue Prozessführung und Temperaturüberwachung, Prozessdokumentation im Zusammenhang mit der Qualitätssicherung, sind Anforderungen, die an moderne Transformator-Trocknungsanlagen gestellt werden.

Seit einigen Jahren wird die LFH – Technologie (LFH = Low Frequency Heating) von Verteiltransformatoren, Transformatoren aus dem unteren Leistungsbereich sowie für die Trocknung von Transformatoren im Felde eingesetzt.

In der LFH Technologie hat Micafil während den letzten Jahren grosse Entwicklungen gemacht. Vor allem in den Bereichen Prozessführung und Prozessleitsysteme wurden neue Konzepte aufgestellt und bereits umgesetzt.

Die rasanten Entwicklungen im EDV-Bereich ermöglichen es, komplexe Anlagensteuerungen einfach und benutzerfreundlich zu gestalten und eine hohe Betriebssicherheit zu gewährleisten.

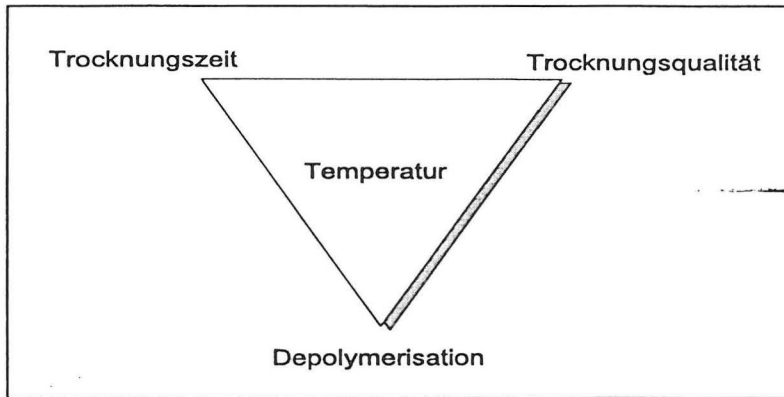
In dieser Präsentation wird auf folgende Themen eingegangen:

- Trocknungstheorie
- Funktionsprinzip der LFH-Trocknung
- Erfahrungen aus dem Einsatz von LFH-Anlagen in Produktionsbetrieben und im Felde
- Trends bei der Trocknung von Transformatoren im unteren Leistungsbereich mittels LFH
- Potentiale für Produktivitätssteigerung mittels LFH-Trocknung
- Messgerät für die Überwachung des Wasserentzuges am Trocknungsende
- Messgerät für die Überwachung der Ölqualität während dem Ölfüllen von getrockneten Transformatoren

2. Trocknungstheorie

Die Temperatur des Trocknungsgutes ist der entscheidende Faktor in einem Trocknungsprozess, da sie:

- die Trocknungsqualität (Restfeuchte) beeinflusst
- die Trocknungsgeschwindigkeit (Feuchteentzug) bestimmt
- die Papierqualität beeinflusst (Depolymerisation)



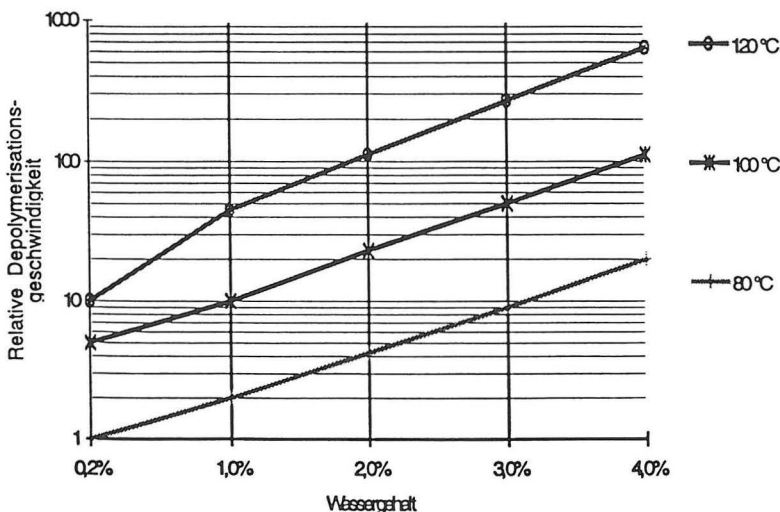
Die Depolymerisation

Der Trocknungstemperatur sind durch die Werkstoffeigenschaften sowie der Depolymerisation des Papiers Grenzen gesetzt. Wird die Trocknung bei höheren Temperaturen und bei höherem Wassergehalt durchgeführt, so findet eine verstärkte Depolymerisation statt.

Die Depolymerisationsrate hängt neben der Temperatur auch von folgenden Faktoren ab:

- die Zeit, während der das Papier der Temperatur ausgesetzt ist
- dem Feuchtegehalt des Papiers
- die Anwesenheit von Sauerstoff

Während dem Trocknungsprozess verändert sich demnach die maximal zulässige Trocknungstemperatur laufend.

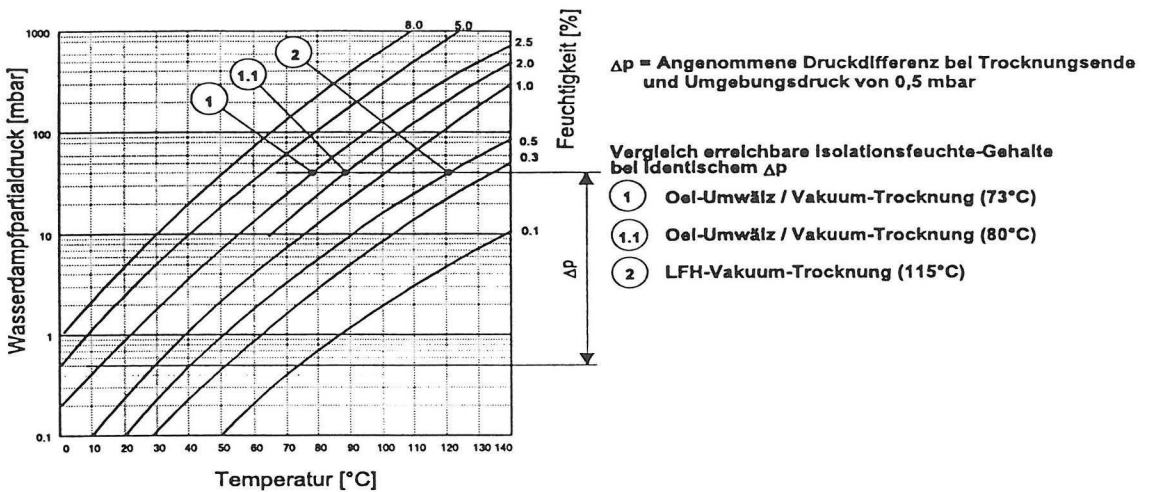


Relative Depolymerisationsgeschwindigkeit in Funktion des Wassergehaltes

Die Trocknungszeit

Der Feuchtetransport von inneren Isolationsschichten an die Oberfläche hängt hauptsächlich vom Wasserdampf-Partialdruck im Inneren ab. Dieser ist direkt von der Temperatur abhängig. Je höher die Temperatur ist, desto grösser ist die für die Diffusion nötige Druckdifferenz und demnach die Trocknungszeit.

Wasserdampfpartialdruck in der Isolation in Funktion der Temperatur bei verschiedenen Isolationsfeuchten



Ausgehend von obigen Randbedingungen kann unter Einhaltung folgender Punkte die Trocknungszeit reduziert werden.:

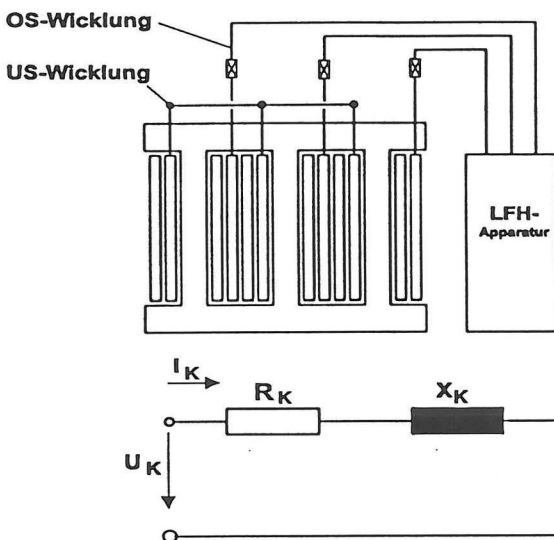
- die Isolationstemperatur ist während des ganzen Prozesses so gleichmässig und so nah wie möglich an der max. zulässigen Temperatur
- die Druckdifferenz zwischen dem Inneren der Isolation und der Oberfläche ist so gross wie möglich
- das Endvakuum liegt unter einem gewissen Minimum.

3. Funktionsprinzip von LFH-Trocknungsanlagen

3.1 Technologische Grundlagen

Während dem Erwärmen von Transformatoren ist der Transformator im Kurzschlussbetrieb. Die Aufheizung der Wicklungen erfolgt auch unter Vakuum. Durch Reduktion der Frequenz ist sicherzustellen, dass der Kurzschlussblindwiderstand reduziert wird, aber trotzdem die induktive Kopplung im Transformator erhalten bleibt. Durch geeignete Regulierung wird erreicht, dass bei möglichst kleiner Spannung ein möglichst hoher Strom in den Wicklungen fließt. Damit wird sichergestellt, dass keine „Spannungsüberschläge“ am Transformator auftreten (Paschen-Gesetz).

Anschluss-Diagramm / Ersatzschaltbild für Transformator im Kurzschluss



U_K = Kurzschluss - Spannung

I_K = Kurzschluss - Strom

R_K = Kurzschluss - Wirkwiderstand

X_K = Kurzschluss - Blindwiderstand

$$X_K = 2 \times \pi \times f \times L$$

L = Induktivität

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

Z_K = Kurzschluss-Scheinwiderstand

3.2 Prozessablauf

Am Beispiel einer Trocknung im Felde sollen die typischen Prozessphasen aufgezeigt werden.

Phase 1: Vorbereitung

Im Vorfeld einer Transformatortrocknung im Felde sind die Transformator-daten zusammenzutragen und die elektrischen Eigenschaften sind zu messen (z.B. $\tan \delta$, Durchschlagsspannung). Auf Grund der vorliegenden Informationen muss der geplante Trocknungsprozess mit dem Transformatorbetreiber diskutiert und festgelegt werden.

Am Tag des Trocknungsbeginns wird die Ölaufbereitungsanlage (inkl. Vakuumanschluss) und die mobile LFH-Anlage an den Transformator angeschlossen. Die Unterspannungswicklungen werden kurzgeschlossen und die Oberspannungswicklungen werden mit dem Konverter verbunden.

- Phase 2: Aufheizen und Temperatur halten (1. Stufe)**
Der Transformator wird in der gewünschten Geschwindigkeit mit der LFH-Anlage und mittels Ölumwälzung über die Ölaufbereitungsanlage aufgeheizt. Nach Erreichen der Solltemperatur sowie einer Temperaturstabilisierung, wird das Transformatoröl in einen bereitgestellten Tank entleert.
- Phase 3: Aufheizen unter Vakuum (2. Stufe)**
Der Druck wird unter Berücksichtigung des Paschen Gesetzes kontrolliert abgesenkt.. Während der Druckabsenkung erfolgt eine intensive Verdampfung der in der Isolation enthaltenen Feuchtigkeit.
Start der individuellen Temperaturmessung in der OS-Wicklung und US-Wicklung sowie Nachheizung der OS-Wicklung (Micafil-DTMH-System).
- Phase 4: Temperaturstabilisierung und Feinvakuum**
Die Temperaturmessung und die Temperatursteuerung erfolgt mittels Micafil-DTMH-System. Das Isolationsmaterial wird unter Vakuum getrocknet. Durch eine geeignete LFH - Pulsationsheizung mit reduziertem Stromfaktor erfolgt eine optimierte Temperaturstabilisierung, was die Bildung von „Hotspots“ verhindert. Die spezifische Wasserrate wird in Intervallen mit dem Messinstrument VZ403 gemessen. Am Ende der Trocknung wird der Transformator mit der LFH – Anlage entmagnetisiert.
- Phase 5:** Der Transformator wird mit aufbereitetem Isolieröl unter Vakuum gefüllt. Die Ölqualität kann kontinuierlich mit dem Messinstrument VZ210 überwacht und registriert werden.
- Phase 6:** Belüftung des Transformators und Stromanschlüsse, Ölschläuche und Vakuumschlauch entfernen. Elektrische Messungen durchführen und Transformator wieder komplettieren.

3.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung der Oberspannungs- und der Unterspannungswicklung erfolgt bei modernen LFH-Trocknungsanlagen individuell für beide Wicklungen (DTMH Temperaturmess- und Heizsystem, Micafil-Patent).

Das DTMH-Temperaturmess- und Nachheizsystem erlaubt:

individuelle Temperaturerfassung von Ober-/Unterspannungswicklung

Kurz vor Erreichen der mittleren Solltemperatur der Ober-/Unterspannungswicklung wird die Frequenz auf sehr tiefe Werte abgesenkt und so der Transformator in die Sättigung gebracht.

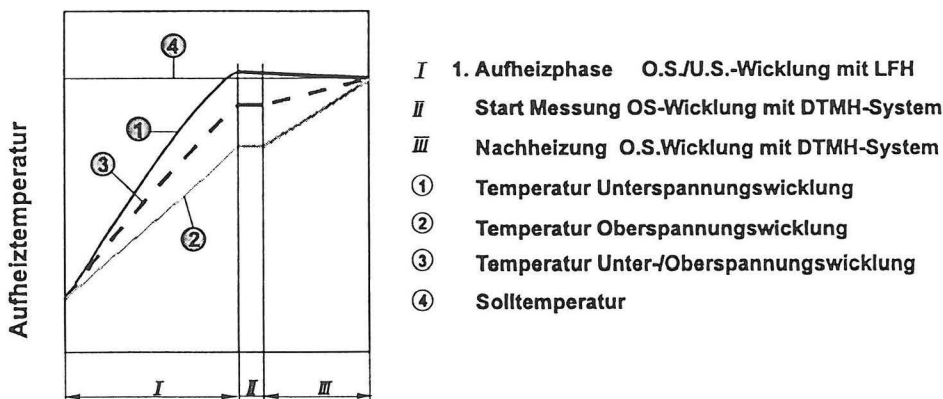
Danach ermittelt der Computer den Widerstand respektive die Temperatur der Oberspannungswicklung. Basierend auf dem vorgängig ermittelten Mittelwert von Ober- und Unterspannungswicklung kann ebenfalls die mittlere Unterspannungswicklungstemperatur durch den Computer berechnet werden.

Nachheizung der Oberspannungswicklung

Das DTMH-System erlaubt ebenfalls die Nachheizung der Oberspannungswicklung, beziehungsweise Temperatenausgleich zwischen Ober-/Unterspannungswicklung. Erfahrungsgemäss erwärmt sich im Kurzschluss die Unterspannungswicklung infolge höherer Stromdichte sowie kleineren Isolationsgewichten während der LFH-Phase etwas schneller als die Oberspannungswicklung.

Durch das Absenken der Frequenz auf Werte bei denen die induktive Kopplung vernachlässigbar klein ist, wird nur noch die Oberspannungswicklung so lange nachgeheizt, bis die gewünschte Solltemperatur erreicht ist.

Nachheizung OS-Wicklung mit DTMH System



3.4 Steuerung

Dank moderner Computer-Technologie ist es möglich, benutzerfreundliche Bedienoberflächen zu schaffen, welche trotz komplexer Prozessparametrierung eine einfache Bedienung der Anlage erlauben.

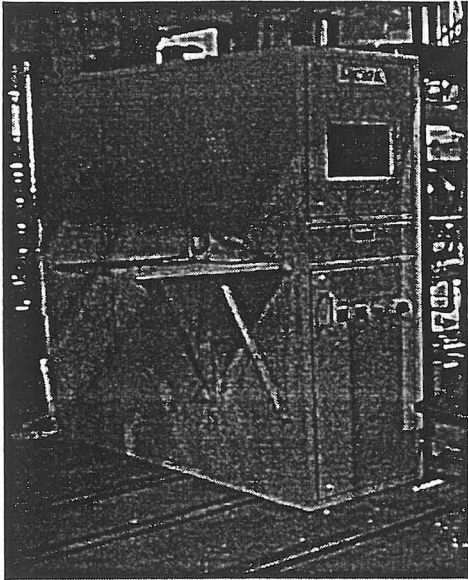
Lediglich die jeweils verschiedenen Chargen-Parameter wie Leistung, Spannung, rel. Ohmscher Kurzschlusswiderstand, Stromfaktor usw. werden durch den Bediener eingegeben.

Das System ist mit verschiedenen Zugriffsebenen versehen. Benutzern mit höherer Zugriffsberechtigung offenbart die Steuerung die Möglichkeit, sämtliche Prozess- und Anlagenparameter zu verändern. Aus Sicherheitsgründen sind alle Parameter mit Eingabebereichen abgesichert.

Spezielle Bedeutung im Informationszeitalter kommt dem MMI (Man Machine Interface / Benutzeroberfläche) zu. Im Vordergrund stehen Bedienungskomfort und Sicherheit. Allgemein gebräuchliche Computerbedienung mit Maus und Tastatur auf einer graphischen Oberfläche wird angewendet, damit sich jeder Benutzer leicht in der Anlagensteuerung zurechtfindet. Alle Funktionen der Anlage können von dieser Oberfläche aus durchgeführt werden.

Sämtliche Komponenten sind in einer Prozessvisualisierung in ihrem aktuellen Zustand dargestellt. Fehlerhafte Zustände und Funktionen werden sofort angezeigt und können weitergemeldet werden. Ein Alarmlogging führt Buch über die verschiedensten Fehlermeldungen.

Der ganze LFH-Vorgang wird durch den Computer gesteuert und überwacht. Die relevanten Prozessdaten werden laufend aufgezeichnet, um den Anforderungen eines QM-Systemes gerecht zu werden.



Mit modernen Technologien (z.B. Fiberoptik) werden die Systeme so störungsunempfindlich und wartungsfrei wie möglich ausgeführt. Sollten trotzdem einmal Probleme auftreten, können über ein Modem Fern-Fehlerdiagnosen durchgeführt werden.

Die LFH-Trocknung weist folgende Hauptmerkmale auf:

- kürzeste Trocknungszeiten
- Erwärmen der Isolation von innen
- individuelle Temperaturerfassung in der Ober- und Unterspannungswicklung (Micafil Patent)
- kleine Restfeuchte in der Isolation
- Beginn des Wasserentzugs bei verhältnismässig tiefen Temperaturen (durch optimierte Prozessführung)
- Minimaler Energiebedarf
- Geringer Platzbedarf
- Kleiner Wartungsaufwand

4. Erfahrungen aus dem Einsatz von LFH-Anlagen in Produktionsbetrieben und im Felde

4.1 Einsatz von LFH-Anlagen in Produktionsbetrieben

Durch den Einsatz der LFH-Technologie in Produktionsbetrieben konnten die Trocknungszeiten gegenüber einer klassischen Trocknungsanlage (Umluft/Vakuum) auf 25 – 35% der ursprünglichen Trocknungszeiten reduziert werden. Diese massiven Reduktionen sind möglich, weil die Erwärmung der Isolation von innen erfolgt und der Wasserentzug bereits bei verhältnismässig tiefen Temperaturen beginnt.

Bei der Verteiltransformatorfertigung können heute Taktzeiten für die Transformator-trocknung bis zum fertig mit Öl gefüllten Transformator von 5 bis 8 Stunden realisiert werden. Eine Heizung und Luftumwälzung im Autoklav ist nicht mehr erforderlich. Die Aktivteile sind während der Trocknung bereits im Gehäuse eingebaut und können sofort nach der Trocknung unter Vakuum mit Öl gefüllt werden.

Durch korrekte Prozessführung werden Korrosion am Aktivteil sowie „Hotspots“ verhindert.

4.2 Einsatz von LFH-Anlagen im Felde

Die Trocknung von Transformatoren im Felde mit paralleler Ölaufbereitung ist seit Jahren bekannt und erfolgt im allgemeinen durch Erwärmung der Transformatoren via Ölumwälzung oder durch „Ölspray“ - Erwärmung und zum Teil mit paralleler oder mit nachfolgender Ölaufbereitung.

Bei diesem Verfahren sind infolge der Temperaturabsenkung in der Isolation während der Vakuumphase lange Trocknungszeiten erforderlich, um eine wesentliche Reduzierung des Wassergehaltes in der Isolation zu erzielen.

Wird die LFH-Technologie mit der Ölaufbereitung des Transformators kombiniert, können die Trocknungszeit wesentlich verkürzt und die Trocknungsergebnisse entscheidend verbessert werden.

Der Problematik, dass durch zuviel Wasserentzug die Schrumpfung zu gross wird (lose Wicklungen), kann zur Zeit nur durch einen begrenzten Wasserentzug begegnet werden. Falls die Möglichkeit für eine Nachspannung im Felde besteht, entfällt diese Einschränkung.

Viele im Felde durchgeführte Trocknungen zeigen, dass die LFH-Trocknung mit paralleler Ölaufbereitung für die Betreiber von Leistungstransformatoren aus folgenden Gründen eine attraktive Alternative zu anderen Verfahren darstellt:

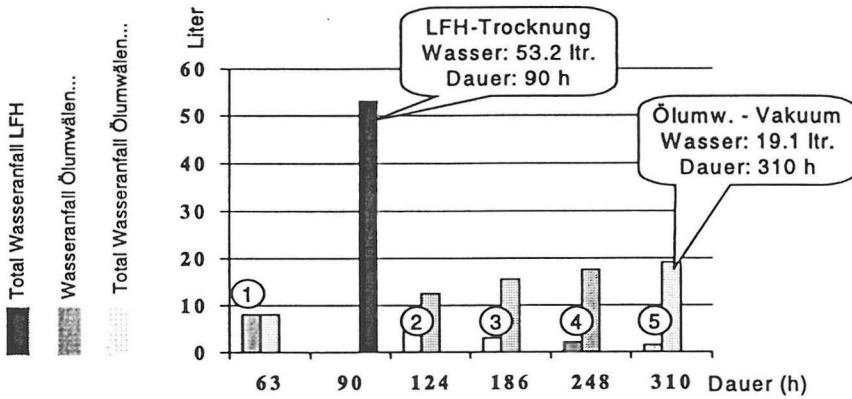
- kein Transformator-Transport, wenig Risiko
- kurze Transformator-Ausfallzeit
- effizientes und schonendes Aufheizen der Isolation von innen
- kontrollierbarer und schneller Wasserentzug
- wesentliche Verbesserung der elektrischen Werte
(siehe Untersuchungen von: artec Energie- und Umwelttechnik AG)
- kurze Trocknungszeiten
- weniger Energiebedarf
- verlängerte Lebensdauer der Transformatoren, da auf tiefere Werte getrocknet werden kann

Bis heute sind uns folgende Transformatorentrocknungen im Felde bekannt:

100 – 390 MVA Transformatoren	5 Trocknungen
50 bis 100 MVA Transformatoren	3 Trocknungen
20 bis 50 MVA Transformatoren	4 Trocknungen

Trocknungsversuche im Felde:

Bei der Trocknung eines 390 MVA / 420 kV Leistungstransformators im Felde wurden Messungen vorgenommen, um die Trocknungseffizienz der LFH-Technologie im Felde gegenüber einer traditionellen Trocknung mittels Ölumwälzung / Vakuumtrocknung zu untersuchen.



Die Ziffern 1 bis 5 bedeuten die Vakuumphasen bei dem konventionellen Trocknungsverfahren. Das Resultat war wie folgt:

LFH – Trocknung:	Trocknungsdauer	90 h
	Wasserentzug	53.2 Liter
Ölumwälzen – Vakuum pulsationen:	Trocknungsdauer	310 h
	Wasserentzug	19.1 Liter

Mit diesen Messungen konnte die Wirksamkeit der LFH – Technologie auf eindruckliche Art nachgewiesen werden.

5. Trends und Potentiale für Produktionssteigerung

5.1 Trocknung von Transformatoren im Produktionsbetrieb im unteren Leistungsbereich mittels LFH

Bereits heute zeichnet sich ein Trend ab, Leistungstransformatoren im unteren Leistungsbereich mittels LFH zu trocknen. Gründe dafür sind:

- Die Trocknungszeiten werden gegenüber einer klassischen Trocknung (Umluft - Vakuumtrocknung) auf ca. 1/3 reduziert.
- Die Trocknungsqualität wird tendenziell verbessert, da auch die inneren Isolationsschichten auf die gewünschte Trocknungstemperatur aufgeheizt werden.
- Die Trocknung kann im Autoklav oder im Transformatorgehäuse erfolgen.
- Als Folge der kürzeren Trocknungszeit wird die ~~Papier~~-Papier-Depolymerisation reduziert.
- Die für die Trocknung erforderliche Energie ist kleiner.
- Durch die LFH-DTMH Technologie (Nachheizung der Oberspannungswicklung) sowie Pulsationen während dem Aufheizen können „Hotspots“ vermieden werden.

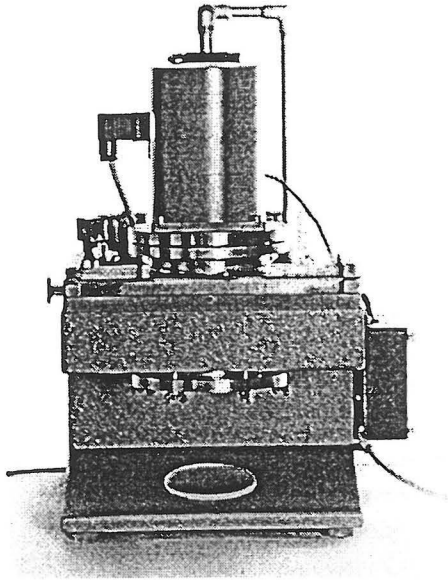
Die Micafil LFH-Trocknungsanlagen sind bereits heute so konzipiert, dass auch Leistungstransformatoren aufgeheizt werden können. Eine genaue Temperaturüberwachung der Transformator US- und OS-Wicklungen ist dabei unerlässlich. Gegenüber Autoklaven für die Trocknung von Verteiltransformatoren, müssen die Autoklaven für die Trocknung von Leistungstransformatoren zusätzlich mit einem Luftumwälz- und Heizsystem ausgerüstet sein. Bestehende Autoklaven von klassischen Trocknungsanlagen (Umluft – Vakuumtrocknung) können mit wenig Aufwand für die Trocknung mit LFH nachgerüstet werden.

5.2 Potentiale für Produktivitätssteigerung mittels LFH - Trocknung

Bei Anwendung der LFH-Technologie kann die Trocknungskapazität gegenüber traditionellen Methoden um das 3 bis 4 – fache gesteigert werden. Der Prozess läuft automatisch ohne dauernde Überwachung durch Bedienungspersonal ab und die Prozessdaten werden automatisch aufgezeichnet (Trending, Qualitätskontrolle).

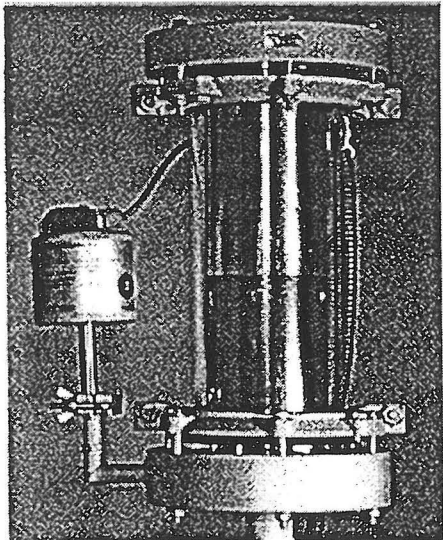
Bei geeigneter Konstruktion von Verteiltransformatoren entfällt das Nachspannen des Aktivteils, so dass die Transformatoren unmittelbar nach der Trocknung mit Öl gefüllt werden können. Dadurch werden einige Arbeitsgänge eliminiert und es werden Taktzeiten für die Trocknung bis zum fertig mit Öl gefüllten Transformator von 6 bis 8 Stunden erreicht.

6. Messgerät für die Überwachung des Wasserentzuges am Trocknungsende



Die genaue Feststellung des spezifischen Wasserentzuges während der Trocknung ist für die Bestimmung des Trocknungsendes ein wesentliches Kriterium. Micafil entwickelte speziell für diese Messung das VZ403 Wasserdanfallmessgerät. Die Messungen erfolgen in bestimmten Intervallen und die Wasseranfallrate ($gr_{H_2O} / (h * t_{isol})$) wird laufend berechnet und registriert.

7. Messgerät für die Überwachung der Ölqualität während dem Ölfüllen von getrockneten Transformatoren



Die dauernde Überwachung und Registrierung des Begasungsdruckes des Isolationsöles während der ganzen Transformatorfüllzeit stellt eine einwandfreie Ölabfüllung sicher.

Das Gerät VZ212 liefert dauernd einwandfrei reproduzierbare Messwerte im Durchlaufverfahren. Je nach Geräteausführung erfolgt die Auswertung der Messwerte manuell oder vollautomatisch durch einen Rechner. Die Gefahr von Messfehlern durch eine unsachgemäße Ölprobenentnahme entfällt.

8. Zusammenfassung

Die moderne LFH- Anlage wird den heutigen Anforderungen an Benutzerfreundlichkeit, kurzen Prozesszeiten bei einwandfreier Trocknungsqualität, genauer Prozessführung (z.B. Micafil DTMH-Temperaturmess- und Nachheizsystem), Prozessdokumentation und Energiehaushalt gerecht. Die Trocknungszeiten werden gegenüber traditionellen Trocknungsverfahren um 65% bis 75% reduziert.

In der Produktion sind Trocknungen von 30 - 100 MVA Leistungstransformatoren absehbar. Für Verteiltransformatoren sind Taktzeiten für die Trocknung inklusive Ölfüllung von 5 bis 8 Stunden bereits Realität.

Für die Transformatortrocknung im Felde, stellt die LFH – Technologie eine attraktive Alternative zu den traditionellen Verfahren dar. Um eine unzulässige Schrumpfung des Transformators zu verhindern, muss der Wasserentzug zum richtigen Zeitpunkt abgebrochen werden.

Die Entwicklung von Geräten für die Messung des Wassereinfalles (Micafil-VZ403) während des Trocknungsvorganges und die kontinuierliche Überwachung der Ölqualität (Micafil-VZ212) während dem Ölfüllen von Transformatoren, erlauben wesentliche Verbesserungsmöglichkeiten für die Qualitätssicherung (Quality Management).

Literaturhinweise:

- 1) W. Lampe
Beitrag zur Berechnung der notwendigen Trocknungszeit von Grosstransformatoren
- 2) Bouvier
Nouveaux critères pour caractériser la dégradation thermique d'une isolation à base de papier
- 3) P. Gmeiner, Micafil AG
Combi LFH-Trocknung im Felde
- 4) artec Energie- und Umwelttechnik AG
Erfahrung mit LFH-Trocknungen im Felde
- 5) H.P. Moser, H. Weidmann AG, Rapperswil
Transformer board