# Trocknen von Leistungstransformatoren im Felde

**P.Köstinger**

## 1. Einleitung

Es ist seit langem bekannt, dass der Transformatorenpark in Europa stark altert. Viele Transformatoren sind schon 40 und mehr Jahre in Betrieb und werden aus Kostengründen so lange wie möglich in Betrieb gehalten. Zur Werterhaltung der Transformatoren und zu deren „Lebenserwartungsverlängerung" ist es unumgänglich, der Isolation in regelmässigen Abständen die Feuchte zu entziehen . Die Herkunft des Wassers kann ganz unterschiedlich sein, doch die Auswirkung auf die Alterung der Isolation ist immer die gleiche. Die regelmässige Trocknung der Transformatoren ist eine der Möglichkeiten, den Wassergehalt im Isolationsmaterial tief zu halten. Im folgenden Bericht werden die verschiedenen Gesichtspunkte der Isolationsalterung sowie die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Trocknungsmethoden im Felde behandelt.

## 2. Alterung (Depolimerisation) der Isolation

Die Güte von Isolationspapier hängt vom sogenannten Polimerisationsgrad ab (Anzahl Glukoseringe und Ketten).
Die Depolimerisation ist im Prinzip eine Alterung der Cellulose, dabei werden die Glukoseringe unter Entstehung von:

- Wasser
- Gasen (CO, CO2)
- Aldehyd Gruppen (Alkaline)
- Carboxyl-Gruppen (Organische Säuren)

aufgebrochen.
Die Alterungsgeschwindigkeit des Isolationsmaterials ist abhängig von verschiedenen Parametern:

- Temperatur
- Wassergehalt
- Sauerstoffgehalt
- Anzahl und Art von Temperaturzyklen
- Materialeigenschaften

Bekannt ist, dass eine Temperaturerhöhung von ca. 8°C eine Verdoppelung der relativen Depolimerisationsgeschwindigkeit bewirkt [1] (bei einem bestimmten Temperaturniveau). Doch auch der Wassergehalt in der Isolation hat einen entscheidenden Einfluss auf die Alterungsgeschwindigkeit. So hat die Erhöhung der Feuchte im Transformator um 1% ca. die gleiche Auswirkung auf die Alterungsgeschwindigkeit wie eine Erhöhung der Temperatur um 8°C [2]. Oder in anderen Worten: Ein trockener Transformator kann bei gleicher Alterung

entsprechend höher belastet werden. Oder bei gleicher Belastung eine höhere Lebenserwartung haben.

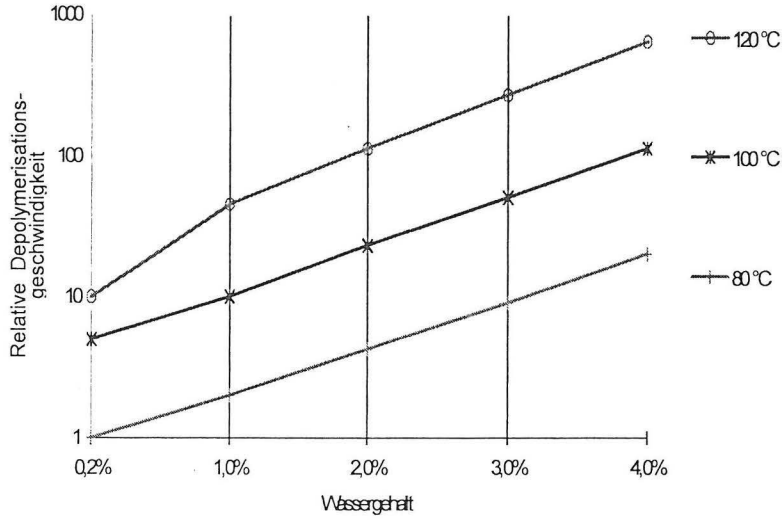



Diagramm 1: Vergleich der relativen Depolimerisationsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichem Wassergehalt bei nicht ölimprägniertem Pressboard

## 3. Herkunft von Wasser im Transformator

Die Hauptquellen von Feuchtigkeit bei Transformatoren sind:
- Feuchte, die von aussen in den Transformator eindringt
- Feuchte aus Zersetzungsprozessen von Isolationsmaterial und Öl

### Feuchte von aussen

Feuchte von aussen kann auf verschiedenen Wegen in den Transformator gelangen:
- Schlechte Dichtungen
- Luftaustausch durch offene Ausgleichsgefässe
- Reparatur am Transformator

Untersuchungen von Sokolov, Griffin und Vanin [3] haben gezeigt, dass in einem offenen System die durchschnittliche Feuchte um ca. 0.2 % pro Jahr ansteigen kann. Bei geschlossenen Systemen liegt der Wert bei ca. 0.03 – 0.06 % pro Jahr.

### Feuchte durch Zersetzungsprozesse

Die Depolimerisation der Zellulose und die Alterung des Öles setzen ebenfalls Wasser frei. Bei 90°C Betriebstemperatur kann der Wassergehalt im Öl alleine durch die Alterung innerhalb von 2 Jahren auf ca. 50 ppm ansteigen. Der Feuchteanteil, der durch die Zersetzung der Zellulose entsteht, ist je nach Untersuchung unterschiedlich. Die Werte variieren von 0.4 % bis 2 % bei einer DP-Reduktion auf 400 (Lampe und Spicar, Shroff und Stannet )

## 4. Verteilung der Feuchte im Transformator

Rein theoretisch müsste sich im Transformator nach einer gewissen Zeit eine gleichmässige Feuchteverteilung einstellen. Das Öl dient dabei als Transportmittel zwischen den verschiedenen Feuchtezonen. Dieser Effekt ist aber nur bis zu einer minimalen Temperatur von 20°C feststellbar (minimale Temperatur, bei der sich das thermodynamische Gleichgewicht einstellt).

Die Praxis zeigt, dass sich die Gesamtheit der Isolation in drei Gruppen aufteilen lässt:

- „Dicke Strukturen" sind meist weit entfernt vom eigentlichen Leiter und deshalb eher kalt. Sie werden durch das Öl aufgewärmt. Die Diffusion von Wasser in und aus den Blöcken ist durch die Dicke und die tiefen Temperaturen sehr langsam (Diffusionskoeffizient von mehreren Jahren). Diese Blöcke gelten als die eigentlichen Wasserreservoire im Transformator.
- „Dünne, kalte Strukturen" sind beispielsweise Barrieren und Kappen, die durch das Öl aufgewärmt werden. Durch die geringeren Dicken und höheren Temperaturen ist hier das Diffusionspotential wesentlich höher als in den „dicken Strukturen". Diese Teile gelten als Hauptverursacher der hohen Wasserwerte im Öl während den Temperaturzyklen.
- „Dünne, warme Strukturen" sind diejenigen, die sehr nahe am elektrischen Leiter liegen. Hier ist die Diffusion von Feuchte ins Öl am schnellsten.

Durch die unterschiedlichen Temperaturen und Materialeigenschaften hat sich gezeigt, dass die Verteilung der Feuchte im Transformator sehr unterschiedlich sein kann. Dieser Umstand muss bei einer Trocknung mitberücksichtigt werden. Die Relation zwischen Feuchte im Öl versus Feuchte in der Isolation wurde von verschiedenen Stellen untersucht, wobei je nach Autor namhafte Unterschiede auftraten. [4]

Beispiel: Bei einem Wassergehalt von 30 ppm im Öl können sich durch die unterschiedlichen Temperaturen von 60°C – 98°C Feuchtewerte von ca. 2.4% – 0.7% einstellen. [3]

## 5. Entscheidende Parameter für eine gute sowie schonende Trocknung

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

- die Trocknungsqualität (Restfeuchte) beeinflusst
- die Trocknungsgeschwindigkeit (Feuchteentzug) bestimmt
- im Zusammenhang mit dem Feuchtegehalt wesentlich die Depolimerisation während der Trocknung beeinflusst

Die Trocknungstemperatur ist in Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften sowie des Wassergehaltes und des Polimerisationsgrades des Papiers in Grenzen zu halten. Wird die Trocknung bei höheren Temperaturen und bei höherem Wassergehalt durchgeführt, so findet eine verstärkte Depolimerisation statt. Wie schon früher gezeigt, hängt die Depolimerisationsgeschwindigkeit von Faktoren wie Feuchtegehalt, Temperatur und Sauerstoff ab.
Während des Trocknungsprozesses verändern sich laufend diese Parameter. Dementsprechend ist auch die maximal zulässige Trocknungstemperatur den entsprechenden Prozessphasen anzupassen.

Trocknungszeit:
Der Feuchtetransport von inneren Isolationsschichten an die Oberfläche hängt hauptsächlich vom Wasserdampfpartialdruck im Inneren ab. Dieser ist direkt von der Temperatur sowie vom Wassergehalt abhängig. Je tiefer die Temperatur, desto geringer ist die für die Diffusion wichtige Druckdifferenz, was die Trocknungszeit sowie den erreichbaren Trocknungsgrad negativ beeinflusst.

Ausgehend von den obigen Randbedingungen kann unter Einhaltung folgender Punkte die Trocknungszeit reduziert werden:
- die Isolationstemperatur ist während des ganzen Prozesses so gleichmässig und so nah als möglich an der max. zulässigen Temperatur
- Temperatursteigerung in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes
- die Druckdifferenz zwischen dem Inneren der Isolation und der Oberfläche ist so gross als möglich, d.h. die Isolation dem Vakuum aussetzen

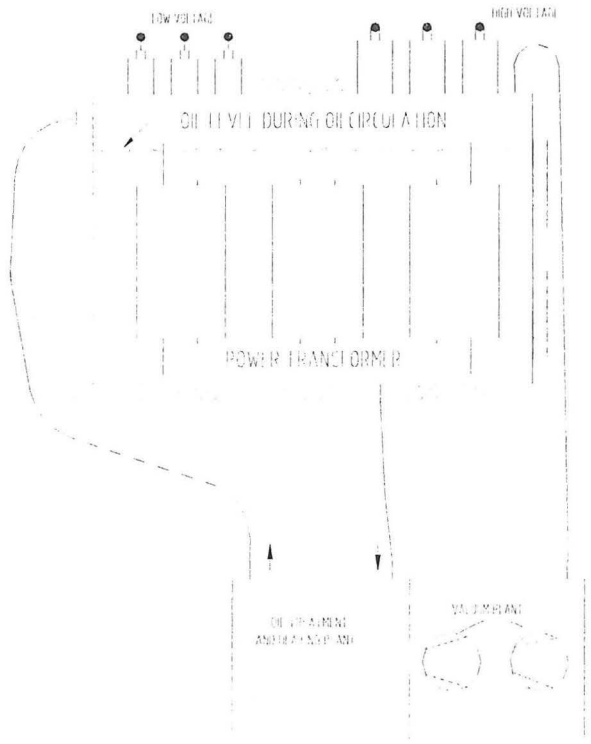
Es gilt also für eine schonende Trocknung das Optimum zwischen der Trocknungszeit und der Trocknungstemperatur zu finden.

## 6. Vor- und Nachteile der verschiedenen Trocknungsarten

Im folgenden sollen verschieden Methoden zur Trocknung im Felde vorgestellt werden.

1. Aufheizung des Transformators durch aufbereitetes Öl

Öl wird über eine Ölaufbereitungsanlage zirkuliert, in der Wasser und Luft entzogen wird. Das aufbereitete Öl nimmt dann im Transformator die Feuchte von der Isolation auf. Dabei kann der ölgefüllte Transformator unter Atmosphärendruck oder Vakuum stehen.




Prinzipschema einer Trocknung mit aufbereitetem Öl

2. Ölzirkulation und Aufheizung mit alternierendem Vakuum (Pulsationstrocknung)

Zusätzlich zur Ölzirkulation wird in mehreren Zyklen das Öl abgelassen und Vakuum appliziert.

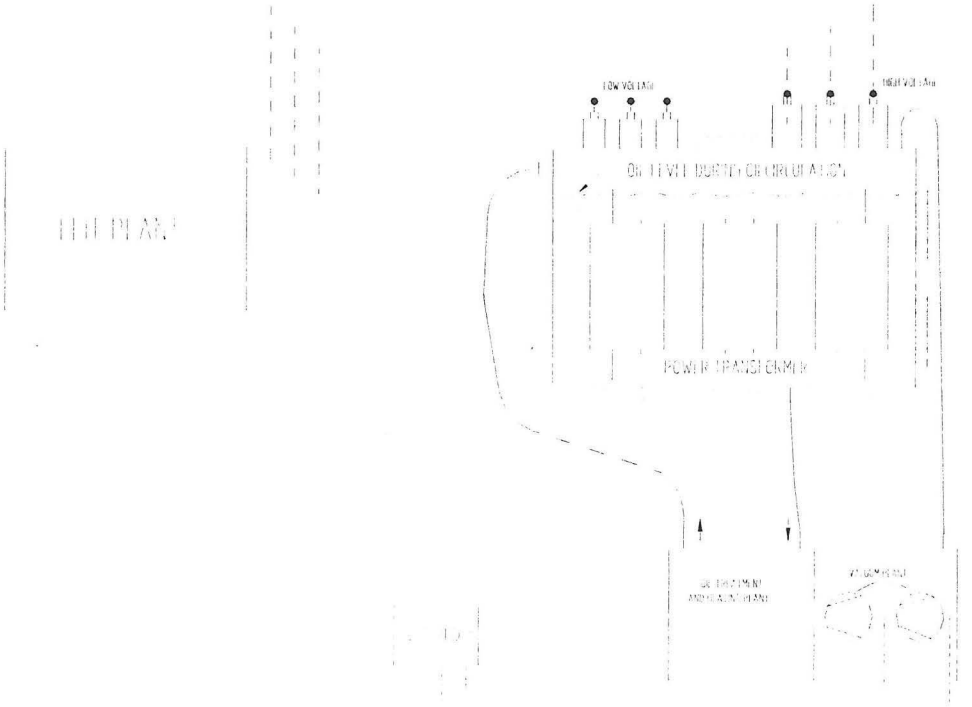
3. Ölspray

Der Transformator steht unter Vakuum und heisses Öl wird über den Aktivteil gesprüht. Das Öl erwärmt den Aktivteil wie auch die Isolation auf die erforderliche Trocknungstemperatur. Am Ende wird das Öl entleert und Vakuum auf das erforderliche Niveau gebracht.

4. LFH (Niederfrequenzstromheizung) in Kombination mit Ölzirkulation

Der Prozess ist in mehrere Phasen aufgeteilt:
1. Ölzirkulation und LFH –Heizen
2. Öl entleeren, Vakuum applizieren und weiter im Pulsationsverfahren mit LFH-Heizen
3. Schlussvakuum

Bis heute konnten in Deutschland über 20 Trocknungen mit dieser Technik durchgeführt werden. Langzeituntersuchungen der Firma Artec zeigten dabei einen deutlich reduzierten Feuchtegehalt über die nächsten Jahre, verglichen mit einer konventionellen Trocknung mit Ölzirkulation.



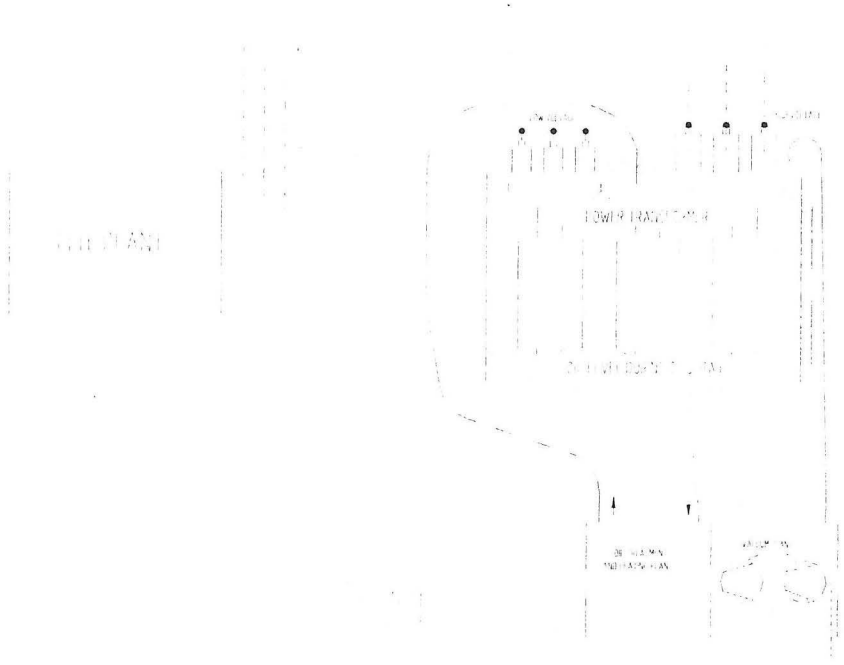

Prinzipschema einer Trocknung mit LFH und Ölzirkulation

| Technik | Vorteile | Nachteil |
|---|---|---|
| 1. Ölzirkulation | - geringe Anschaffungskosten<br>- einfachste Technik<br>- geringer operativer Aufwand | - lange Trocknungszeiten und dementsprechend lange Transformatorenausfall-zeiten<br>- keine wesentliche Verbesserung der Trocknungsqualität<br>- deshalb kurze Intervalle nötig |
| 2. Ölzirkulation und Vakuum | - einfache Technik<br>- wesentliche Verbesserung der Trocknung gegenüber reiner Ölzirkulation<br>- tiefe Anschaffungskosten | - Lange Trocknungszeiten<br>- Begrenzte Trocknungsqualität infolge Temperaturabfall in der Vakuumphase<br>- Mehrere Zyklen nötig |
| 3. Ölspray | - konstante Wärmezufuhr unter Vakuum während der Sprayphase, d.h. kontinuierlicher Wasserentzug bereits bei relativ tiefen Temperaturen<br>- Bessere Trocknungsresultate als Nr. 2 | - Erwärmung von innenliegenden Isolationsteilen schwierig<br>- Sprühdüsen müssen so installiert werden, dass möglichst der gesamte Aktivteil besprüht wird |
| 4. LFH und Ölzirkulation | - Temperatur wird im inneren der Spule erzeugt<br>- Kurze Trocknungszeiten<br>- Exakte Temperatursteuerung der Unter- und Oberspannungsseite möglich (DTMH Patent der Micafil)<br>- Schonende Erwärmung des Öles<br>- Sehr gute Trocknungsresultate für Wicklungsnahe Isolation | - Hohe Anschaffungskosten<br>- Wicklungsferne Isolationsteile können nach dem Ölentleeren schlecht nachgeheizt werden und erreichen demzufolge ähnliche Trocknungswerte wie unter Prozess Nr. 2<br>- Bedienpersonal muss Kenntnis von Transformatorenaufbau und Funktion besitzen |

## 7. Kombination von LFH und Ölspray

Alle oben genannten Verfahren weisen grössere und kleinere Vor- und Nachteile auf. Vom Standpunkt der Trocknungsqualität her gesehen fällt auf, dass die qualitativ guten Methoden des Ölsprays und der LFH Trocknung sich ergänzende Vorteile haben. Der Ölspray-Prozess hat den Nachteil, dass innere Teile des Transformators schlecht erwärmt werden. Dafür werden die aussenliegenden Isolationsblöcke sehr gut getrocknet. Genau umgekehrt verhält es sich mit der LFH-Trocknung in Kombination mit Ölzirkulation. Wohl werden in der ersten

Phase (Ölumwälzen und LFH) sämtliche Isolationsteile auf Temperatur gebracht, doch nachdem das Öl entleert ist, ist es nur noch bedingt möglich, die aussenliegenden Isolationsteile auf die entsprechend nächsthöhere Temperaturstufe zu erwärmen. Diese sich ergänzenden Eigenschaften und die gemachten Erfahrungen hat die Micafil bewogen, eine Kombination der Verfahren zu versuchen. Ein Patentschutz für dieses Verfahren wurde unterdessen beantragt.
Im kombinierten Ölspray – LFH-Prozess wird gleich von Beginn her das Öl bis auf einen kleinen Rest entleert und der Transformator evakuiert. Das bringt bereits in der ersten Aufheizphase (Ölsprühen unter Vakuum) den Vorteil der gleichzeitigen Aufheizung der inneren Isolation (LFH) und äusseren Isolationsteile (Ölspray). Durch den fehlenden Sauerstoff und den raschen Feuchteentzug wird die Depolimerisation stark reduziert. Die Wicklungstemperatur wird mit Hilfe der modernen Temperatursteuerung der LFH-Anlage (DTMH Duale Temperaturmessung und Heizprozess) geregelt. So wird sichergestellt, dass Temperaturunterschiede zwischen den unterschiedlichen Bereichen im Transformator möglichst klein sind. Nach einer Temperaturstabilisierungszeit wird das Sprayöl entleert und danach mit LFH-Pulsationsheizen und Vakuum die Temperatur so gesteuert, bis die gewünschten Trocknungsparameter erreicht sind.
Erste Versuche zeigen, dass sich mit dieser Kombination auch grosse Transformatoren im Felde optimal trocknen lassen und ähnliche Feuchtewert, wie sie sonst nur mit einer Solventdampftrocknung möglich sind, erreicht werden sollten ( < 1 %).
Wir sind überzeugt, dass sich dieses Verfahren in Zukunft bei anspruchsvollen Trocknungen im Felde durchsetzen wird.



Prinzipschema einer Trocknung mit LFH und Ölspray

## 8. Erfahrungen

Das tönt ja alles sehr schön, doch wie sieht es nun in der Realität aus? Das haben wir uns auch gefragt und haben deshalb in Zusammenarbeit mit ABB Drammen und ABB Secheron zwei Probetrocknungen mit dieser neuen Technik durchgeführt.

Trocknung 1:

Leistung: 20 MVA
Spannung: 65 kV
Baujahr: 1987

Trocknungsdauer: 60 Stunden
Endfeuchte: < 1% (gemessen mit dem neuen FDS System von ABB)

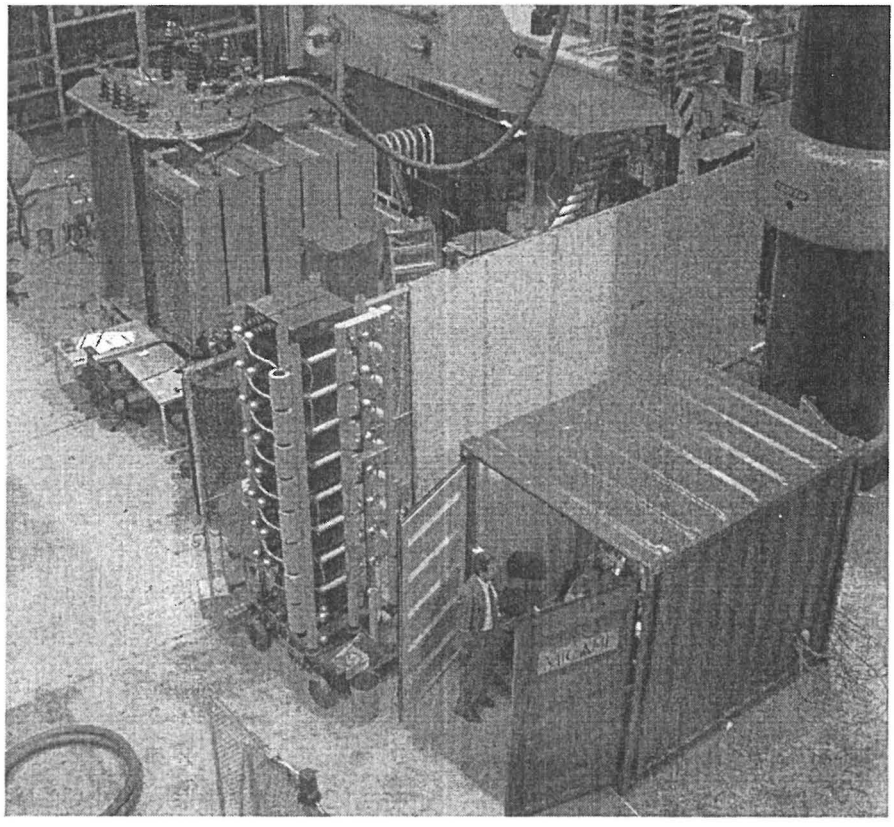
Trocknung 2:

Leistung: 16 MVA
Spannung: 51 kV
Baujahr: 1972

Trocknungsdauer: 55 Stunden
Endfeuchte: < 1% (gemessen mit dem neuen FDS System von ABB)

Die zusätzlich im Transformator verteilten Feuchteprobeblöcke zeigten ebenfalls eine Restfeuchte von <1%. Papierproben von der wicklungsnahen Isolation hatten eine durchschnittliche Feuchte von <0.5 %

Mit diesen 2 Trocknungen konnten unsere Überlegungen eindrücklich bestätigt werden.



Trocknung bei ABB Drammen. Im Vordergrund die neue Mobile LFH Einheit der Micafil

## 9. Zusammenfassung

Für eine langfristige Werterhaltung der Transformatoren ist es entscheidend, den Feuchtegehalt in der gesamten Isolation immer so tief als möglich zu halten. Das reduziert

die Depolimerisationsgeschwindigkeit entscheidend und stellt so sicher, dass der Transformator möglichst lange Zeit seine Funktion erfüllen kann und somit Kosten einspart. Eine optimale Trocknung unter einem mittleren Restfeuchtewert von unter 1% konnte bis anhin nur in Werkstätten mit entsprechenden Trocknungsanlagen erreicht werden. Dies war aber mit einem langen Ausfall des Transformators und meist aufwendigen und kostspieligen Transporten verbunden. Durch die Kombination vorhandener Trocknungstechniken wie LFH – Trocknung und Ölspray mit intelligenter Prozesssteuerung ist es heute möglich, die Transformatoren vor Ort auf sehr tiefe Feuchtegehalte zu trocknen.

Referenzen

1 H.P. Moser/ V. Dahinden
Transformerboard II Eigenschaften und Anwendungen von Transformerboard aus verschiedenen Fasern - Weidmann 1987

2. Bouvier
Nouveaux critères pour caractériser ld degradation thermique d'une isolation à base de papier

3. Sokolov, Griffin, Vanin
Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems

4. Y. Du, M. Zahn, B.C. Lesieutre, A.V. Mamisehv, S.R. Lindgren
Moisture equilibrium in Transformer paper-oil systems