

## Verschiedene Trockenmethoden für Leistungstransformatoren im Felde

---

P. Köstinger

### 1. Einleitung

„Gesunde“ Leistungstransformatoren sind ein Schlüsselement für eine zuverlässige und sichere Stromversorgung.

Ausfälle können grosse Versorgungsgebiete betreffen und führen unter Umständen zu enormen finanziellen Verlusten. Dazu kommt der Umstand, dass die Transformatoren, die ein beträchtliches Kapital darstellen, immer länger in Betrieb bleiben. Das führt zu der Situation, dass auf der einen Seite die Transformatoren immer älter werden und auf der anderen Seite die Belastung wegen dem wachsenden Verbrauch laufend steigt. Transformatoren leben aber nicht ewig.

Die „Lebensdauer“ des Gesamtsystems „Transformator“ wird hauptsächlich durch den Zustand der Hauptisolation bestimmt. Die Lebenserwartung ist vor allem abhängig von der Betriebstemperatur, dem Sauerstoffgehalt, der Ölqualität und dem Feuchtegehalt. Wobei Wassergehalt und Temperatur die 2 Hauptfaktoren sind.

**Aber:** Nicht nur die Alterung wird durch die Feuchtigkeit beeinflusst. Zu viel Wasser in der Isolation kann ebenso ganz direkt zu einem fatalen Transformatorschaden führen. Vor allem bei kalten Transformatoren, wenn sich im Isolieröl freies Wasser bildet oder bei überlasteten Transformatoren durch Blasenbildung an Hot spots. [1]

Wasser sammelt sich im Laufe der Jahre in der festen Isolation (Papier, Holz und Pressboard) an. Die zwei „Hauptquellen“ des Wassers sind der Luftaustausch mit der Umwelt bei Temperaturschwankungen und die Alterung der festen Isolation (Depolimerisation). Bei offenen Expansionsgefässen kann die Feuchtigkeitzunahme in der Isolation bis zu 0,2 % pro Jahr betragen. [2] Für eine optimale „Lebenserwartung“ und einen zuverlässigen Betrieb sollte das Feuchtigkeitsniveau deshalb ständig so tief wie möglich gehalten werden.

Die Wassermenge in einem Leistungstransformator kann mehrere hundert Liter betragen (bei einem 400 MVA Transformator mit 15`000 kg Isolation und einem mittleren Feuchtegehalt von 3 % sind das immerhin 450 lt). Das Wasser befindet sich zu über 99% in der festen Isolation. Die Wassermenge im Öl ist im Verhältnis verschwindend klein (beim gleichen 400 MVA Transformator mit 60`000 lt Öl und 10 ppm H<sub>2</sub>O im Öl bei 30°C finden sich nur 0,6 Liter Wasser im Öl).

Dieser Umstand erschwert das Entziehen grosser Wassermengen durch reine Öltrocknung. Andererseits wird eine Vakuumtrocknung durch die Ölimprägnierung der Isolation behindert. Die Trockengeschwindigkeit bei gleichen Bedingungen mit ölimprägniertem Material ist ca. 20 - 30 Mal langsamer [3] als beim nicht-imprägnierten Pressboard. Es gilt also, den Umständen entsprechend eine möglichst effiziente Trockenmethode zu finden.

## 2. Feuchteverteilung und Messung

Vor jeder Trocknung steht die Frage, wie viel Wasser sich in einem Transformator befindet. Diese an sich simple Fragestellung ist nicht immer ganz einfach zu beantworten. Es finden sich verschiedenste Methoden zur Messung des Feuchtegehaltes auf dem Markt. Je nach Messmethode können am selben Transformator ganz unterschiedliche Werte gemessen werden. Ein Hauptgrund dafür ist eine ungleichmässige Feuchteverteilung im Transformator.

Aufgrund unzähliger Messungen und der praktischen Erfahrung lässt sich die Gesamtheit der Isolation in drei generelle Bereiche aufteilen:[2]

- „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 Wasserreservoirs 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 dünnen 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 Feuchtigkeit ins Öl am schnellsten.

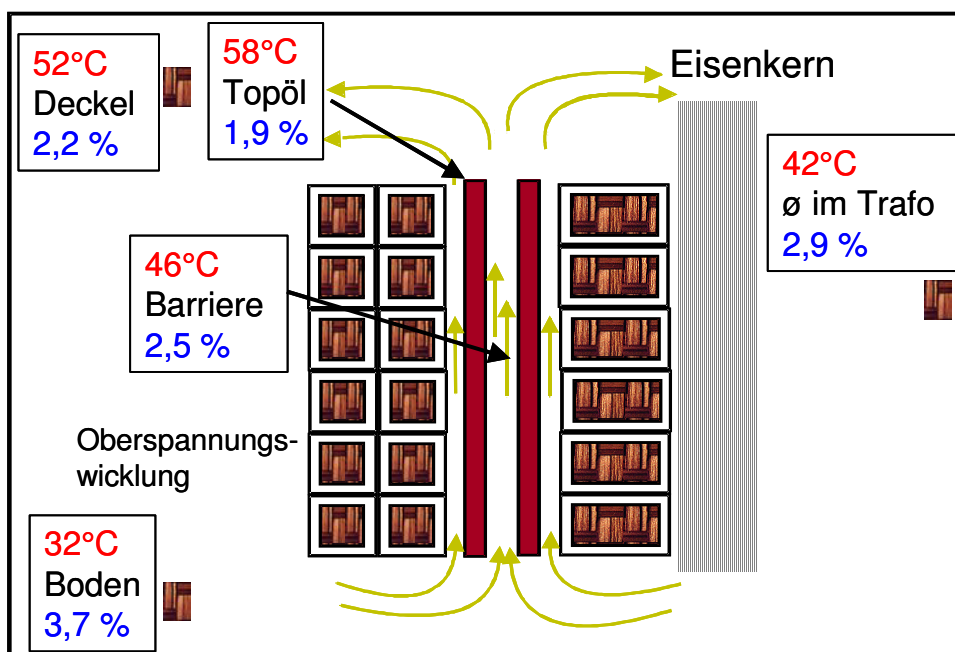


Diagramm 1: Temperatur und Feuchteverteilung an einem 110 MVA Generatortransformator mit OFWF Kühlung und 15 ppm H<sub>2</sub>O im Öl (Feuchte nach Oommen)

Die ungleichmässige Feuchteverteilung muss bei einer Feuchtemessung und einer anschliessenden Trocknung mitberücksichtigt werden. Im Diagramm 1 ist die Temperatur und die Feuchteverteilung in einem Transformator dargestellt. Gezeichnet ist ein Schnitt durch die Unter- und Oberspannungswicklung mit der Barrierenisolation. Die Temperaturmesswerte beziehen sich auf die Öltemperaturen. Die berechneten Feuchtigkeitswerte wurden durch verschiedene Messungen bestätigt.

## 2.1 Verschiedene Messmethoden im Überblick:

### Feuchtigkeit im Öl:

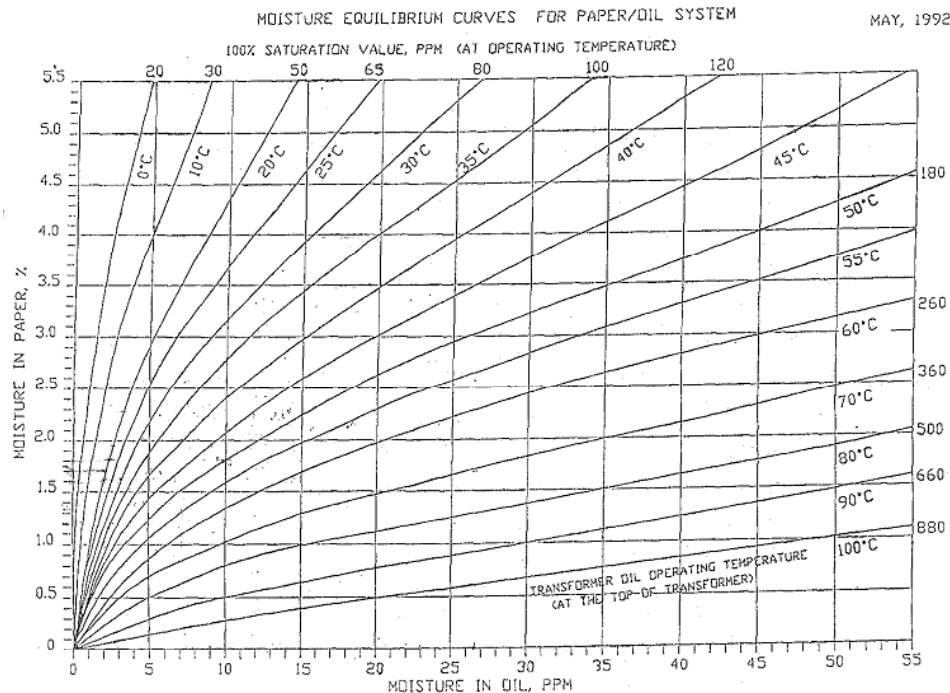
Zur Bestimmung der Isolationsfeuchtigkeit wird eine Ölprobe entnommen und im Labor oder vor Ort analysiert (allenfalls Online-Messung). Aus der Feuchtigkeit im Öl lässt sich über die Gleichgewichtskurven von verschiedenen Autoren [4] die durchschnittliche Feuchtigkeit in der Isolation bestimmen. Ein kritischer Faktor ist das „Feuchtigkeits-Gleichgewicht“ zwischen dem Papier und dem Isolieröl. Ändert sich die Temperatur (Last) am Transformator, verändert sich auch dieses Gleichgewicht. Ein weiterer Stolperstein können tiefe Temperaturen sein. Bei oberen Öltemperaturen unter 40°C [5] wird der

Unsicherheitsfaktor wegen den Messungenauigkeiten sehr gross. Ein dritter Faktor ist der Zustand des Öles. Gealtertes Öl mit einer hohen Säurezahl hat bei gleicher Temperatur das



höhere Wasseraufnahmevermögen als neues Öl. [6] Dies führt bei gleicher Isolationsfeuchte zu höheren Messwerten als bei nicht-gealtertem oder regeneriertem Öl.

Dies ist die meist verwendete Methode für eine grobe Feuchtigkeitsbestimmung bei Transformatoren in Betrieb.



**Diagramm 2: Feuchtegleichgewichtskurve nach Oommen inkl. Sättigungswerte für Öl**

## Direkte Messung einer Papierprobe:

Dazu wird dem Transformator eine Papierprobe zur Feuchtebestimmung entnommen. Der Feuchtwert kann dann in einem Labor mit relativ hoher Genauigkeit bestimmt werden. Da meist an nur einer Stelle eine Probe entnommen werden kann, ist eine Aussage über die Gesamtfuchte schwierig.

## Dielektrische Messung:

Mit entsprechenden Messgeräten wird der Ladebeziehungsweise Entladestrom des Kondensators, gebildet durch die Wicklungen und der Isolation, gemessen. Die Messung basiert entweder auf einem Zeitbereich (PDC, 0-5000 s) oder einem Frequenzbereich (FDS, 1000-0.001 Hz). Aus den Messresultaten, der Kenntnis des Wicklungsaufbaus sowie der Temperatur, lässt sich ein mittlerer Feuchtwert der Hauptisolation (dünne, kalte Strukturen) zwischen den



Wicklungen bestimmen. Da diese Teile im Betrieb meist wärmer sind als die weiter entfernten Bereiche, zeigt sich bei einer Messung kurz nach Abschaltung ein tieferer Wert als bei einer Ölanalyse. Diese Methode eignet sich sehr gut zur Feuchtebestimmung von kalten Transformatoren, die längere Zeit ausser Betrieb waren.

## **Einsetzen eines Prüfblockes:**

Verschiedene Prüfstücke mit einer bestimmten Feuchtigkeit werden dazu in den Transformator gelegt bzw. gehängt. Meist verwendet man sowohl feuchte als auch sehr trockene Prüflinge. Nach einer angemessenen Verweilzeit im warmen Transformatoröl (mehrere Monate), gleicht sich die Feuchtigkeit dem Feuchtwert der restlichen Isolation im selben Bereich an. Danach werden die Prüflinge wieder entfernt und im Labor gemessen. Die Feuchtigkeit in den Blöcken kann gut bestimmt werden. Die Messresultate repräsentieren jedoch wiederum nur einen kleinen Teil der Isolation, da nur die Isolationsteile mit dem selben Temperaturbereich die gleiche Feuchte wie die Probestücke haben. Meist werden die Probestücke im oberen warmen Bereich angebracht, sodass der gemessene Feuchtwert kleiner ist als der durchschnittliche Wert.

**Die wichtigste Messgrösse bei allen Methoden ist die Messung der durchschnittlichen Temperatur im Transformator. Sämtliche Messungen des Feuchtegehaltes sind wertlos ohne diese Information.**

## **3. Verschiedene „Vor Ort -Trockenmethoden“**

Die verschiedenen Trockenmethoden lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen:

1. Trocknung der Isolation durch Trocknung des Öles (Gleichgewichtsfeuchte, isothermische Diffusion), wobei der Transformator in Betrieb bleibt  
Dazu gehören unter anderem:
  - Molekularsieb
  - Online-Ölaufbereitungsanlagen in verschiedenen Grössen mit oder ohne aktiver Vakuumpumpe
  - Zellulosefilter
  - Kältefallen
2. Trocknung durch Wärme und Vakuum (thermische Diffusion + konvektive Diffusion) bei ausgeschaltetem Transformator  
Dazu zählen beispielsweise:
  - Ölzirkulations- und Vakuum-Pulsationstrocknung
  - Ölspraytrocknung
  - Niederfrequenzrocknung (LFH) mit Ölzirkulation
  - Niederfrequenzrocknung mit Ölspray

## 3.1 Beschreibung der verschiedenen Methoden:

### Molekularsieb:



Eine relativ geringe Menge Öl (100-200 lt/h) wird laufend im Bypassverfahren durch das Molekularsieb gepumpt. Das Molekularsieb hat die Eigenschaft, gelöstes Wasser aus dem Transformatorenöl zu binden und so das Öl zu trocknen. Eine typische Trockenkapazität ist ca. 9 lt/Jahr. Sind die Patronen gesättigt, müssen diese in einer speziellen Anlage wieder aufbereitet werden. Die Trockenanlage kommt mit nur wenigen Elementen aus.

### Online-Ölaufbereitungsanlage mit kleiner Durchflussmenge:

Eine kleine Menge Öl (100-400 lt/h) wird laufend im Bypassverfahren in einer Vakuumkammer entgast und entwässert. Das getrocknete, gefilterte und entgaste Öl wird danach wieder in den

Transformator geleitet. Je nach System ist eine Vakuumpumpe installiert (Druck ca. 5 mbar) oder das Vakuum wird mittels hydraulischer Pumpe erzeugt (Druck 100-200 mbar). Die Anlage bleibt über mehrere Jahre (ganze Lebenszeit) am Transformator installiert. Gasanalysen sind an solchen Transformatoren nicht mit den herkömmlichen Erfahrungswerten vergleichbar. Die Trockenergebnisse sind stark temperaturabhängig.



### Online-Ölaufbereitungsanlage mit grosser Durchflussmenge:

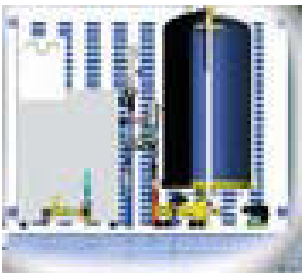


Ein relativ grosse Ölmenge (3000-9000 lt/h) wird, wie oben beschrieben, laufend in einer Vakuumkammer entgast und entwässert. Im Gegensatz zu den Anlagen mit kleiner Durchflussmenge werden diese Anlagen nur temporär installiert (mehrere Monate). Die automatische Überwachung stellt sicher, dass keine Lecks entstehen und dass der Transformator nicht evakuiert wird. Eine regelmässige Überwachung ist trotzdem empfehlenswert. Die Gasanalyse wird hier nur temporär beeinflusst.



## **Zellulosefilter:**

Ein Bypassstrom des Transformatoröles wird durch einen Zellulosefilter geleitet. Der Filter hat eine begrenzte Wasseraufnahmefähigkeit und muss regelmässig gewechselt werden.



## **Kältefalle:**

Ein Teilstrom des Isolieröles wird in einer Kältefalle so weit abgekühlt, dass das vorher gelöste Wasser auskondensiert oder in einem Filter aufgefangen werden kann. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass die Gasanalyse nicht beeinflusst wird. Geringe Trockenkapazität und hoher Energieaufwand.

## **Ölzirkulation und Vakuum-Pulsationstrocknung:**

Mittels Ölaufbereitungsanlage wird der Transformator auf ca. 60-80 °C erwärmt. Danach wird das Öl in einen separaten Tank entleert und der Transformator evakuiert. Dabei verdampft das Wasser in der Isolation und wird durch die Vakuumpumpen abgepumpt. Durch das Verdampfen des Wassers kühlt sich die Isolation wieder ab, sodass der Aufwärmzyklus je nach Isolationsgewicht mehrmals wiederholt werden muss.



## **Ölspraytrocknung:**

Der Transformator wird entleert und evakuiert. Heisses Transformatorenöl wird über den Aktivteil gesprüht. Das Öl erwärmt den Aktivteil wie auch die Isolation auf die erforderliche Trockentemperatur. Am Ende wird das Öl komplett entleert und das Vakuum auf das erforderliche Niveau gebracht. Aufwändigere Vorbereitungsmaßnahmen sind allenfalls nötig. Die Trocknung geschieht unter Ausschluss von Sauerstoff, was einen positiven Einfluss auf die Alterung hat.

## **Niederfrequenztrocknung (LFH) mit Ölzirkulation:**

Der mit Öl gefüllte Transformator wird mittels Ölaufbereitungsanlage und der Niederfrequenzstromheizung aufgewärmt. Ist der erste gewünschte Sollwert erreicht, wird das Öl entleert und der Transformator evakuiert. Die weiteren Temperaturerhöhungen geschehen nur noch mittels Stromheizung und unter dauerndem Vakuum.



## **Niederfrequenztrocknung mit Ölspray:**

Im Gegensatz zur Kombination LFH und Ölzirkulation wird bei dieser Methode das Öl bereits am Anfang entleert. Der Aktivteil wird dann unter Vakuum mit der Kombination von Ölspray und Niederfrequenzstromheizung erwärmt. Vor dem letzten Temperaturschritt wird der Ölsprayprozess gestoppt und der Transformator wird nur mittels LFH erwärmt.

## **4. Vergleich der verschiedenen Methoden**

Die Trockenkapazität und die somit benötigte Trockenzeit ist je nach Trockenmethode sehr unterschiedlich. Bei sämtlichen Trocknungsverfahren spielt die Temperatur aber eine entscheidende Rolle.



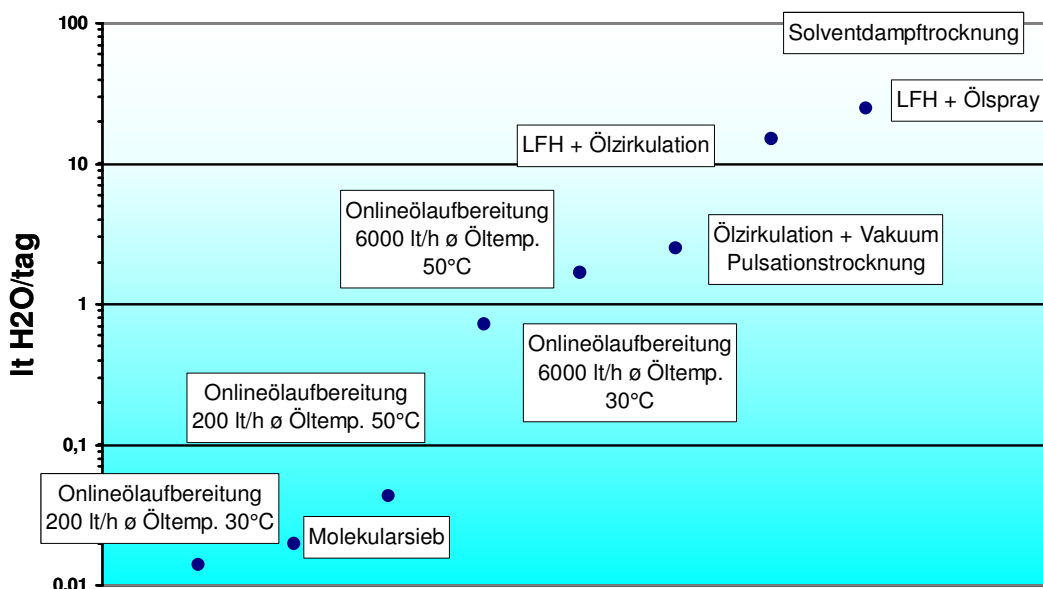


Diagramm 4: Trocknungskapazität bei einer Trocknung von 3% auf 1,5 % durchschnittliche Feuchte im Papier

Je höher die Temperatur, desto schneller und besser die Trocknung. Bei den Methoden, die mit der Gleichgewichtsfeuchte im Öl operieren (Öltrocknung), ist die Transformatortemperatur und dementsprechend die Trockengüte nur bedingt beeinflussbar. Je nach Kühlmethode und Regelung ist es möglich, eine höhere Transformatortemperatur zu erzwingen, doch meistens ist dies nicht einfach zu bewerkstelligen. Andererseits sollte aus Alterungsgründen die Temperatur so tief wie möglich gehalten werden. Eine um 20° C höhere Durchschnittstemperatur während drei Jahren hat in etwa den gleichen Alterungseffekt wie 1 % zusätzliche Feuchte während neun Jahren. Ein grosser Teil des positiven Einflusses auf die Lebenserwartung durch die Trocknung kann so wieder verloren gehen.

Bei Systemen mit aktiver Temperatursteuerung (Temperatur und Vakuumtrocknung) kann die Temperatur in bestimmten Grenzen aktiv gesteuert werden. Dadurch lässt sich die Trocknung optimieren und die benötigte Zeit kann massiv verkürzt werden. Im Diagramm 4 sind die Trockenkapazitäten der verschiedenen Systeme in lt/tag dargestellt. Als Basis wurde dabei die Trocknung eines Leistungstransformators mit mindestens 2000 kg Isolation von 3% auf 1,5 % durchschnittliche Feuchte angenommen. Im Vergleich dazu eine Trocknung in einer Solventdampftrocknungsanlage. Wobei dieser Wert auf die durchschnittliche Trockengeschwindigkeit bei einer Trocknung von 4% auf 0,5 % bezogen ist.

Im Diagramm 5 ist die entsprechend zu erwartende Trockenzeit in Jahren bei einem 400 MVA Transformator mit 14 to Isolation dargestellt. Entsprechend kleinere Isolationsmengen können mit den meisten Systemen auch entsprechend schneller getrocknet werden. Die Isolationsdicke hat dabei nur bei den Vakuumtrocknungsverfahren einen entscheidenden Einfluss, da bei den meisten Öltrocknungsverfahren die Trocknung so langsam abläuft, dass die Feuchteverteilung innerhalb des Isolationsmaterials gleich bleibt. Das hat den Vorteil, dass der Transformator gleichmässig getrocknet wird.

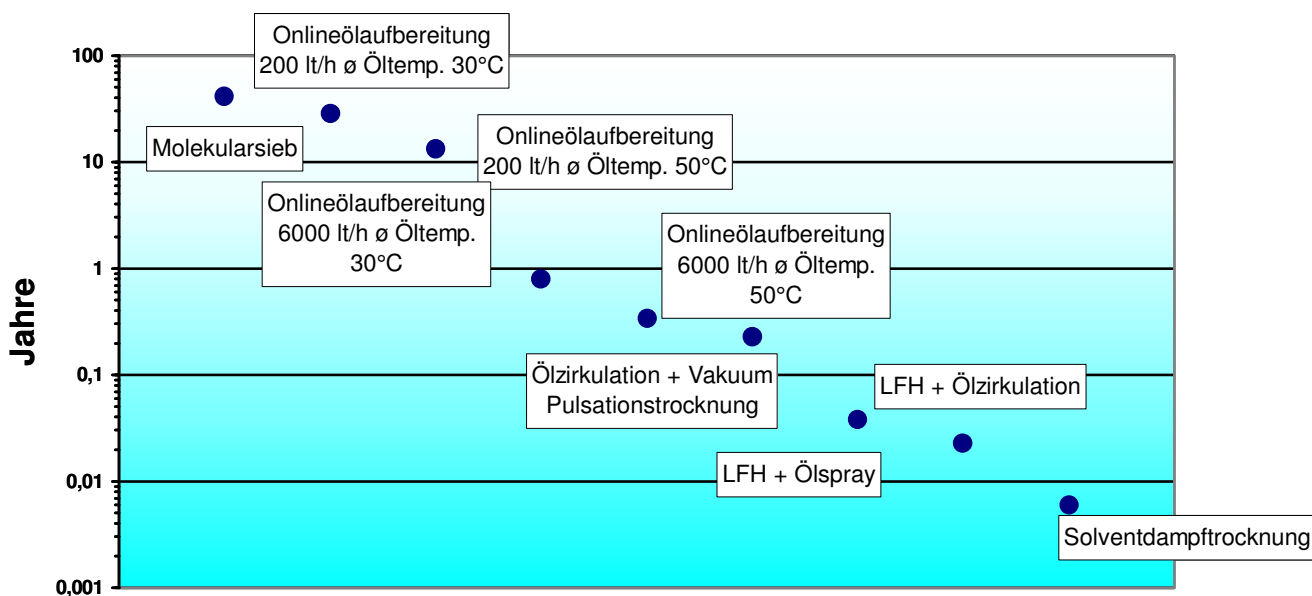


Diagramm 5: Benötigte Zeit um einen 400 MVA Transformator mit 14 to. fester Isolation von 3% auf 1,5 % durchschnittliche Feuchte zu trocknen

Bei den Vakuumverfahren werden die dünneren Isolationsteile entsprechend mehr getrocknet als die dickeren, sodass sich erst nach einer gewissen Zeit das im Diagramm 2 dargestellte Verhältnis zwischen Temperatur und Feuchte wieder einstellt.

Die Belastung auf das Papier ist bei allen Verfahren in etwa gleich. Selbst bei relativ schnellen Trocknungen wie der LFH Methode oder in einer Solventdampftrocknungsanlage konnten auch bei stark gealterten Transformatoren (DP < 400) noch nie Schäden an der Papierisolation festgestellt werden.

## 5. Die Gasanalyse

Das heute wichtigste und meistverwendete Instrument zur Beurteilung des Transformatorzustandes ist die Analyse der gelösten Gase im Öl (zu vergleichen mit einer Blutanalyse beim Menschen). Aus der Zusammensetzung und dem Verhältnis der einzelnen Gase lassen sich Aussagen über Teilentladungen, Verschleisserscheinungen am Lastschalter, schlechte Verbindungen, Hot Spots und vieles mehr ableiten. Die Auswertungen basieren auf der Erfahrung der letzten Jahrzehnte und sind weltweit etabliert. Aus einer Gasanalyse lässt sich nicht nur der aktuelle Zustand erkennen sondern es ist eine Zusammenfassung der Geschehnisse seit der letzten Gasanalyse. Diese Eigenschaft ist sehr wertvoll, denn so werden auch einmalige Ereignisse wie Überlast oder Kurzschlüsse im Öl gespeichert. Wird nun das Öl kontinuierlich entgast, verliert man die Möglichkeit, vergleichbare Gasanalysen zu machen. Dieser Umstand muss bei der Wahl des Trocknungssystems unbedingt mitberücksichtigt werden.

## 6. Zusammenfassung

Für eine langfristige Werterhaltung und zur Sicherstellung der Betriebssicherheit der Leistungstransformatoren ist es entscheidend, den Feuchtegehalt in der gesamten Isolation immer so tief wie möglich zu halten. Das reduziert die Depolymerisationsgeschwindigkeit entscheidend und stellt sicher, dass auch bei extremen Bedingungen keine gefährliche Situation durch Feuchteinfluss entstehen kann.

Neue Untersuchungen in Norwegen zeigen, dass über 20% der Leistungstransformatoren >20 MVA eine durchschnittliche Feuchte von über 2,2 % aufweisen. Dies verstärkt den Bedarf nach entsprechenden Trocknungsmethoden.

Aus Kosten- und Transportgründen werden die Trocknungen immer öfters vor Ort durchgeführt. Dabei stehen verschiedenste Systeme mit unterschiedlichen Konzepten zur Auswahl. Sämtliche Anlagen haben einen positiven Einfluss auf die Feuchtigkeit und somit auf die zu erwartende Lebensdauer, aber keines wird wohl die Anforderung erfüllen, für den ganzen Bereich der Leistungstransformatoren das ideale System zu sein. Je nach Isolationsmenge, Betriebstemperatur, Wichtigkeit, Grösse, Feuchtegehalt, Spannungs-klasse, Alter usw. ist das jeweils passende Konzept zu wählen. Je mehr Isolationsmaterial ein Transformator enthält, je effizienter muss eine Trocknungsmethode sein, damit sie den erwünschten Effekt zeigt. In bezug auf die Papieralterung ist es kaum sinnvoll Methoden die länger als ein Jahr dauern anzuwenden. Gilt es „nur“ den Feuchtwert unterhalb den für den Transformator direkt gefährlichen Werte (freies Wasser, Gasblasen) zu halten, sind auch kleine Systeme an grossen Einheiten denkbar. Ein besonderes Augenmerk sollte aber immer auf die Gasanalyse gelegt werden. Bei für den Betreiber wichtigen Transformatoren sollte man es sich zweimal überlegen, ob man auf dieses sehr aussagekräftige Messwerkzeug verzichten will.

Vor und nach einer Trocknung kommt meist eine Feuchtigkeitsmessung. Auch hier ist zu berücksichtigen, dass mit verschiedenen Methoden am selben Transformator je nach Betriebszustand durchaus unterschiedliche Werte gemessen werden können. Eine kritische Hinterfragung der Trocknungs- und Feuchtemessmethoden lohnt sich auf jeden Fall immer.

## Referenzen

1 T.V. Oommen

Bubble evolution from transformer overload, IEEE Insulation life subcommittee Oct 2000

2. Sokolov, Griffin, Vanin

Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems Cigre WG 12.18

3. W. Lampe

Beitrag zur Berechnung der notwendigen Trocknungszeit von Grosstransformatoren, Archiv für Elektrotechnik, Band 53 (1969) Heft 3

4. Y. Du, M. Zahn, B.C. Lesieutre, A.V. Mamishev, S.R. Lindgren

Moisture equilibrium in Transformer paper-oil systems IEEE Electrical Insulation Magazine 1999

5. T.V Oommen

Moisture equilibrium in Transformer paper-oil systems Doble Conference Paper April 2003

6. IEC Norm 60422

Fluids for Electrotechnical Applications