

Online-Feuchtigkeitsüberwachung der festen Isolierstoffe in Leistungstransformatoren

Dipl. Ing. Michael Rösner, AREVA Schorch Transformatoren GmbH, Mönchengladbach, Deutschland
Dr. Ing. Stefan Tenbohlen, AREVA Schorch Transformatoren GmbH, Mönchengladbach, Deutschland

Kurzfassung

Erhöhte Feuchtigkeit in festen Isolierstoffen führt insbesondere in elektrisch hoch beanspruchten Teilen zu erheblichen Nachteilen für den Betrieb der Transformatoren. Die Anwesenheit von Feuchtigkeit führt zu einer Abnahme der mechanischen und elektrischen Festigkeit der Isolierstoffe, aber auch zu einer beschleunigten Alterung und Teilentladungsintensität. Mit einer kontinuierlichen Überwachung der Feuchtigkeit der Isolierstoffe werden durch das rechtzeitige Einleiten von Gegenmaßnahmen Gefährdungen des Aktivteils vermieden und wegen der verlangsamten Alterung die Lebensdauer des Transformators verlängert.

Der Beitrag erläutert eine Methode zur Feuchtigkeitsüberwachung der Isolation, die auf den Erfahrungen aus dem Feldeinsatz von Transformatoren-Monitoringsystemen beruht. Ausgehend von der relativen Feuchtigkeit des Transformatoröls und der Löslichkeitskurve für Wasser in Öl wird zunächst der absolute Feuchtegehalt des Öls bestimmt. Abhängig von der Temperatur stellt sich ein Gleichgewichtszustand der Papier- und Ölfeuchte ein. Die Kenntnis der Zeitkonstanten, mit der dieser Gleichgewichtszustand in den hoch beanspruchten Isolierstoffteilen erreicht wird, ermöglicht die online Feuchteüberwachung des Aktivteils des Transformators. Anhand von im Feld erfassten Messdaten wird der Algorithmus zur Überwachung der Papierfeuchte erläutert.

Neben der Feuchtigkeit ist Sauerstoff als weiterer Katalysator für die Alterung der Aktivteilisolation zu nennen. Um den Kontakt des Öls mit Sauerstoff und Feuchtigkeit zu unterbinden, wurde das Konzept des hermetisch abgeschlossenen Transformators auf große Leistungstransformatoren angewendet. Im Beitrag werden dieses Konzept erläutert und anhand von online erfassten Monitoringdaten die Vorteile dargestellt.

1 Online Feuchteüberwachung in Leistungstransformatoren

1.1 Auswirkung von Wasser und Sauerstoff auf die Isolierstoffe

Die Lebensdauer von Leistungstransformatoren mit Öl-Papier Isolation ist die Lebensdauer der Zellulose im Papier und in den Presspan Teilen. Erfahrungsgemäß ist die Alterung des Isolierpapiers entscheidend, da sie schneller erfolgt. Das Maß für den Alterungszustand der zellulosehaltigen Teile der Isolation ist der Polymerisationsgrad (DP-Grad) der Zellulose. Der DP-Grad ist die mittlere Anzahl der zusammenhängenden Glucose-Ringe in der Zellulose. Im ungealterten Zustand hat die Zellulose einen DP-Grad von ~1200. Bei abnehmendem Polymerisationsgrad nimmt auch die mechanische Festigkeit der Isolierstoffe ab und damit deren Fähigkeit, den bei Kurzschlüssen entstehenden Belastungen zu widerstehen.

Verantwortlich für die im Transformator auftretende Depolymerisation ist neben der Öltemperatur der Feuchte- und Sauerstoffgehalt im Isolierstoffsystem. Die thermische Depolymerisation tritt schon bei Temperaturen über 105 °C auf. Reaktionsprodukte der thermischen Depolymerisation sind Glucose, Wasser, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Sauerstoff spaltet bereits bei normalen Betriebstemperaturen die Glucoseringe weiter auf.

Bei der oxidativen Depolymerisation entstehen neben den aufgespaltenen Glucose-Ringen und Wasser auch Säuren und Ketone.

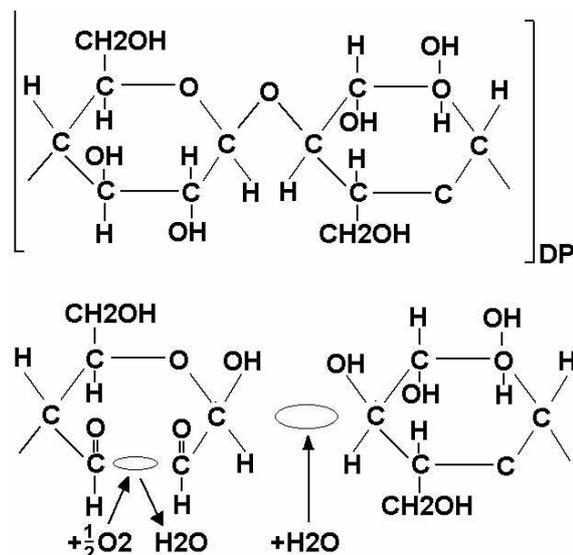


Bild 1 Darstellung der Depolymerisation im Zellulose Makromolekül

Diese Stoffe können sich an den Ölmolekülen anlagern und die Eigenschaften des Isolieröls negativ beeinflussen, da es polar wird und somit Wasser anlagern kann. Bei der hydrolytischen Depolymerisation spaltet Wasser die Sauerstoffbrückenbindungen zwischen den einzelnen Glucose-Molekülen auf. Wasser ist also Ursache (hydrolytische Depolymerisation) und Resultat (oxidative Depolymerisation) der Papierzerersetzung und deshalb von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung des Zustandes des Transformators.

1.2 Bestimmung der Ölfeuchte

Die Bestimmung der Ölfeuchte kann konventionell nach der Methode der Karl-Fischer Titration erfolgen. Die Nachteile dieses Verfahrens liegen zum einen darin, dass keine kontinuierliche Überwachung möglich ist. Zum anderen ist die Entnahme und der Transport der Proben sehr empfindlich und erfahrungsgemäß kommt es durch Verunreinigungen und Wasseraufnahme immer wieder zu Verfälschungen der Messergebnisse. Als weitere Einflußgröße ist der Säuregehalt des Öles zu nennen, der das Analyseergebnis der Karl-Fischer Titration verfälscht [6].

Abhilfe verspricht die Messung der Ölfeuchte mit einem Ölfeuchtesensor. Der im Monitoringsystem MS 2000 verwendete HMP228 Ölfeuchtesensor der Fa. Vaisala kann sowohl am Kessel als auch in einer Ölleitung angebaut werden. Die Messzelle besteht aus einem kapazitiven Dünnschicht-Polymersensor. Der Dünnschicht absorbiert Wasser aus dem Öl und verändert dadurch die Kapazität. Der Wassergehalt des Dünnschicht steht in einer festen Beziehung zur relativen Feuchte des Öls. Durch Messung der Kapazität ist die relative Feuchtigkeit des Öles bekannt. Die gleichzeitige Messung der Öltemperatur im Sensorkopf ermöglicht die Berechnung des absoluten Wassergehalts mit Hilfe der Löslichkeitskurve.

Die Verwendung eines Ölfeuchtesensors in Verbindung mit einem Online-Monitoringsystem anstelle der Ölanalyse liefert Ölfeuchte-Messdaten zu jeder Zeit. Falsches Handling kann die Messung nicht negativ beeinflussen, da der Ölraum für die Messung nicht geöffnet werden muß. Außerdem kann durch die Korrelation mit anderen Messgrößen bzw. Ereignissen die Ursache eines zu hohen Ölfeuchtegehalts erkannt und für Abhilfe gesorgt werden.

1.2 Bestimmung der Papierfeuchte

Die thermische Zersetzungsrates ist abhängig vom Wassergehalt des Isolierpapiers. Deshalb ist die Kenntnis der Papierfeuchte notwendig für die Bestimmung der aktuellen Alterungsrate. Die Bestimmung der Papierfeuchte kann offline mit verschiedenen Verfahren wie RVM (recovery voltage measurement), PDC (polarisation and depolarisation current) und FDS (frequency domain spectroscopy) bestimmt werden. Online kann die Papierfeuchte mit Hilfe einer Ölfeuchtesonde und

einem Monitoringsystem unter Berücksichtigung der Diffusionszeitkonstanten berechnet werden.

1.4 Zusammenhang Papierfeuchte-Ölfeuchte

Die gesamte Wassermenge im Transformator verteilt sich auf Öl und Festisolation. Während Zellulose aufgrund der darin enthaltenen OH-Gruppen polar ist und somit Wasser gut binden kann, sind die im Transformatoröl vorkommenden Moleküle unpolar und haben somit nur ein äußerst geringes Wasserbindungsvermögen.

Die Verteilung des vorhandenen Wassers auf Papier und Öl hängt von der Temperatur ab. Bei steigender Temperatur erhöht sich die Löslichkeit von Wasser in Öl. Deshalb diffundiert bei steigender Temperatur Wasser aus der Isolation ins Öl. Die Aufnahmefähigkeit von Wasser in Papier ist für jede Temperatur erheblich größer als die in Öl.

Daraus ergibt sich, dass die Wassermenge im Papier immer sehr viel größer ist als die im Öl. Daraus folgt, daß die prozentualen Schwankungen der Papierfeuchte sehr gering ausfallen.

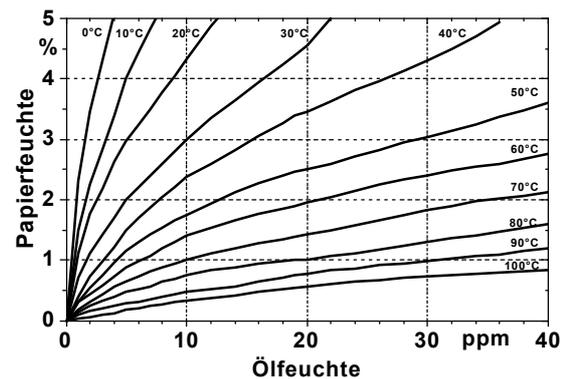


Bild 2 Gleichgewichtszustand zwischen Papier- und Ölfeuchte nach [3 Fig. 5]

Bild 2 zeigt den Zusammenhang von Ölfeuchte und Papierfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur. Dargestellt ist der Gleichgewichtszustand.

Abhängig von der Dicke der Isolation, der Temperatur

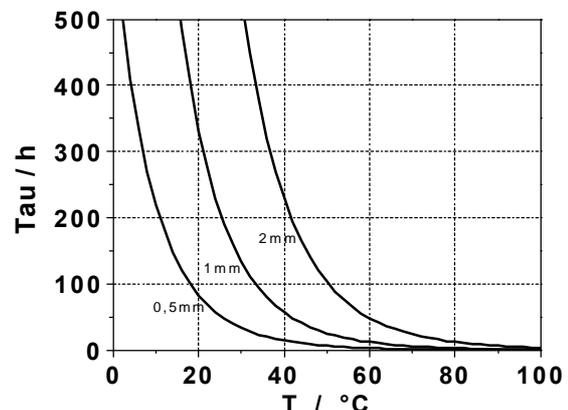


Bild 3 Wasser Diffusionszeitkonstanten für Öl-Papierisolation nach [3]

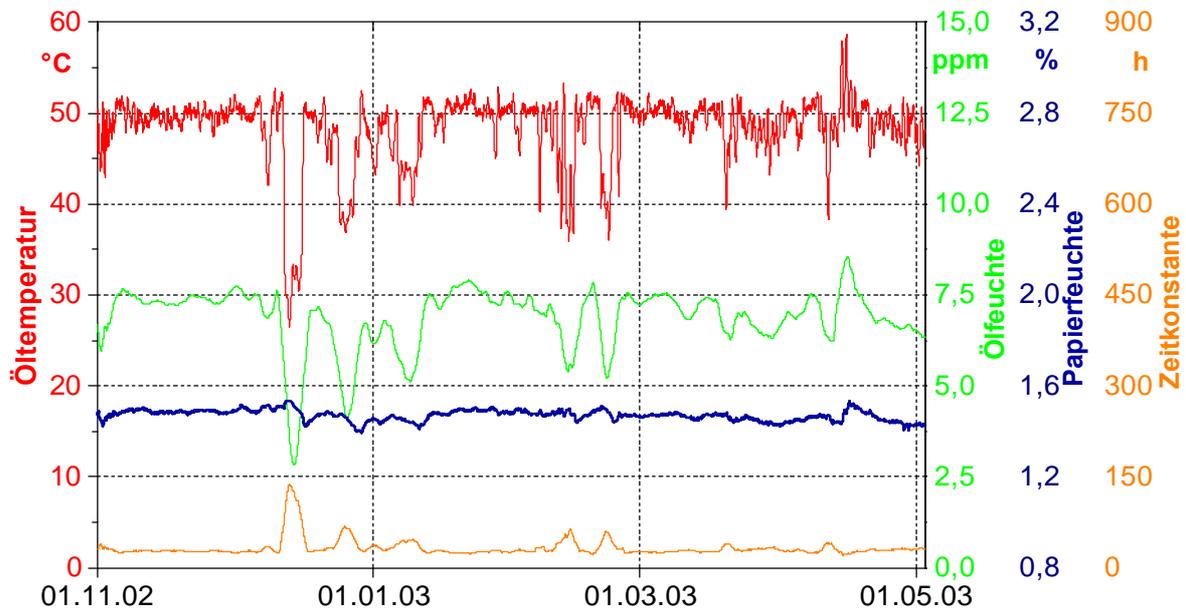


Bild 4 Bestimmung der Papierfeuchte durch Online-Messung an einem 600 MVA Netzkupplungstransformator

und der relativen Papierfeuchte wird dieser Gleichgewichtszustand mit einer Zeitkonstanten von einigen Stunden bis einigen Wochen erreicht.

Bild 3 zeigt, dass eine Online-Papierfeuchtebestimmung insbesondere auch bei niedrigen Temperaturen und bei schnellen Lastwechseln mit Berücksichtigung der Diffusionszeitkonstanten erfolgen muß. Die Formel zur Bestimmung der Diffusionszeitkonstanten findet man in [3, S.15]

Zur Online-Papierfeuchtebestimmung ist es notwendig, den Zusammenhang aus **Bild 2** formelmäßig zu erfassen.

Die Kurvenschar aus **Bild 2** lässt sich mit guter Genauigkeit nach folgender Formel beschreiben:

$$x_{\text{papier}} = a \cdot e^{(b \cdot \vartheta_{\text{öl}})} \cdot x_{\text{öl}}^{(c \cdot \vartheta_{\text{öl}} + d)}$$

x_{papier}	:	rel. Papierfeuchte [%]
$\vartheta_{\text{öl}}$:	Öltemperatur [°C]
$x_{\text{öl}}$:	Ölfeuchte [PPM]
a, b, c, d	:	Konstanten

Gleichung 1 Modellierung des Gleichgewichtszustands von Papier- und Ölfeuchte

In **Bild 4** ist die nach diesem Verfahren berechnete Papierfeuchte eines 30 Jahre alten 600 MVA-Netzkupplungstransformators zu sehen. Die dargestellte Öltemperatur hat aufgrund von Lastwechseln mehrere charakteristische Einbrüche von bis zu 20 K. Bei den Temperatureinbrüchen verschiebt sich das Feuchtgleichgewicht zu einem höheren Anteil von Feuchtigkeit im Papier und zu einem geringeren Anteil von Feuchtigkeit im Öl. Die Ölfeuchte ändert sich in dem betrachteten Zeitraum in einem Bereich von 3 ppm bis 8 ppm. Die Papierfeuchte liegt im Niveau

1,5 %. Einzelne Ausschläge der Papierfeuchte sind bei Lasteinbrüchen zu sehen, und steigen z.B. bei einem vier-tägigen Einbruch der Öltemperatur bis auf 1,85 % an. Die im Diagramm ebenfalls dargestellte Diffusionszeitkonstante wird bei der Berechnung der Ölfeuchte im Monitoringsystem verwendet. Der Transformator wurde aufgrund einer konventionellen Ölanalyse¹ nach der Karl-Fischer Methode mit einem Online-Öltrocknungssystem ausgerüstet. Dieses System extrahiert kontinuierlich Feuchtigkeit aus dem Öl. In dem in **Bild 4** dargestellten Zeitraum wurden auf diese Weise ca. 6 l Wasser extrahiert. Diese geringe Abscheiderate lässt auf eine Papierfeuchtigkeit im Bereich von 1,5 % schließen. Die vom Monitoringsystem MS 2000 ermittelte Papierfeuchte deckt sich mit diesem Wert. Der Grund für das falsche Ergebnis der Karl-Fischer Titration ist der hohe Säuregehalt des Öls (0,17 mg KOH/g). Dazu wird in [6] gezeigt, dass die Aussagekraft der Karl-Fischer Titration erheblich vom Säuregehalt des (gealterten) Öls reduziert wird. Das Verfahren der Online-Feuchtebestimmung erscheint somit aussagekräftiger und dem konventionellen Verfahren der Karl-Fischer Titration überlegen. Mit diesem Wissen wäre es (noch) nicht erforderlich gewesen, den Transformator mit einer Online-Trocknungsanlage auszurüsten

Trotz der geringen absoluten Wassermenge ist eine leicht sinkende Tendenz der Papierfeuchte erkennbar.

¹ Diese Messung ergab eine Ölfeuchte von 19 ppm bei 50°C (entspr. 2,5% Papierfeuchte)

2. Vermeidung von Feuchtigkeit im Leistungstransformator

2.1 Stand der Technik

Im Betrieb von Transformatoren besteht wegen der wechselnden Betriebstemperaturen die Notwendigkeit, dem Öl ein zusätzliches Volumen zur Verfügung zu stellen, damit Raum für die thermische Ausdehnung des Öls besteht. Dieser Raum wird in Leistungstransformatoren üblicherweise von einem Ölausdehnungsgefäß zur Verfügung gestellt.

Eine Methode, den Kontakt des Öls mit Feuchtigkeit und mit Sauerstoff zu vermeiden, ist die Verwendung eines Hydrokompensators im Ölausdehnungsgefäß. Die Verwendung eines Hydrokompensators zum hermetischen Abschluß des Öls ist eine technische Lösung, die Aufgabe des hermetischen Abschlusses erfüllt, jedoch ergeben sich in der Praxis technische Schwierigkeiten. So sind neben den höheren Kosten dieser Maßnahme, das Problem der langjährigen Zuverlässigkeit der Membrane, die Schwierigkeiten bei der Ermittlung des Ölstandes und das umständliche Handling bei Ölarbeiten zu nennen.

Die andere Methode ist die Verwendung von Trocknungsvorlagen in der Luftleitung zum Ausdehnungsgefäß. Trocknungsvorlagen begrenzen lediglich die Wasseraufnahme, da die Effektivität der Trocknung vom Wartungszustand der Trocknungsvorlage und der Strömungsgeschwindigkeit der einströmenden Luft abhängt. Die Trocknungsvorlage verhindert nicht den Kontakt des Öls mit Sauerstoff.

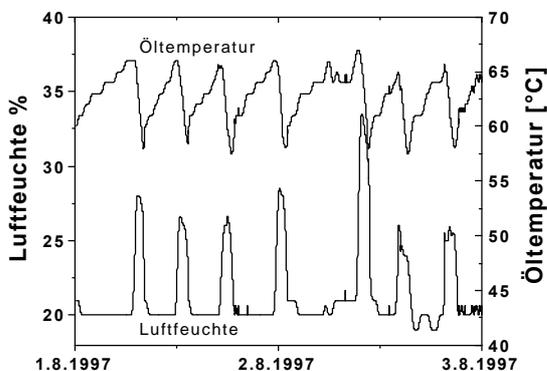


Bild 5 Luftfeuchtemessung in der Luftleitung zwischen Trockenvorlage und Ausdehnungsgefäß

Bild 5 verdeutlicht die möglichen Nachteile der Verwendung einer Trocknungsvorlage anhand eines Beispiels an einem niedrig belasteten 150 MVA-Netzkupplungstransformator.

Dargestellt ist die mit einem Monitoringsystem gemessene Öltemperatur und Luftfeuchte. Bei der Öltemperatur sind Temperaturschwankungen von 5 K erkennbar. Die Öltemperatur liegt auf einem sehr niedrigen Niveau von ca. 35 °C. Der Anstieg der Temperatur geschieht langsamer, als das Absinken. In dem dargestellten Fall war die Einstellung der Schalttemperatu-

ren der Lüfter ungünstig. Die Luftfeuchte liegt auf einem niedrigen Niveau von ca. 2 % relative Feuchte, jedoch sind Peaks bis zu 30 % relative Feuchte erkennbar. Diese Peaks treten bei jedem Abkühlvorgang auf. Der Grund für dieses Verhalten ist die gegenüber den auftretenden Verlusten viel zu große Kühlleistung, da bei dem Erreichen der Schaltschwelle alle Lüfter gleichzeitig eingeschaltet wurden. Dadurch kühlt sich das Öl so schnell ab, dass durch die Trocknungsvorlage eine relativ große Feuchtigkeitsmenge in die Luftleitung gelangen kann. Bei der erheblich langsameren Erwärmung strömt die Luft langsam aus dem Ausdehnungsgefäß. Charakteristisch für den hier dargestellten besonders ungünstigen Fall ist, dass durch die verhältnismäßig langsame Rückströmung die Trocknungsvorlage zuerst von oben verbraucht wird. Interessanterweise wurde dieser Zusammenhang erst durch den Einsatz eines Monitoringsystems entdeckt (siehe [5]).

Die intelligente Lüftersteuerung des Monitoringsystems MS 2000 kann, angepasst an die jeweilige Betriebssituation des Transformators, solche Probleme verhindern und die Feuchtigkeitsaufnahme begrenzen.

2.2 Hermetikabschluss von Leistungstransformatoren

Eine weitere Methode des hermetischen Abschlusses besteht darin, den Kessel ohne Luftpolster und ohne Ausdehnungsgefäß zu verschliessen. Dieses Verfahren wurde bisher lediglich bei Verteilungstransformatoren angewandt und durch Dehnfähigkeit der Wellwände realisiert. Dieses Konzept wurde bei der AREVA Schorch Transformatoren GmbH in abgewandelter Form für Mittelleistungstransformatoren wieder aufgegriffen. Kessel und Radiatoren müssen die Wärmeausdehnung des Öls als dehnbare Gebilde aufnehmen und sind für den betriebsmäßigen Überdruck bei maximaler Öltemperatur ausgelegt. Die volle Umsetzung des Hermetik-Konzeptes bedeutet auch, dass der Lastschalter ebenfalls kein Ausgleichsgefäß besitzt. Für den Lastschalter ist ein eigener Dehnradiator reserviert, der die Wärmeausdehnung des Lastschalteröls aufnehmen kann. Der eingesetzte Lastschalter ist ein Vakuumschalter, der keine Schaltgase mehr erzeugt.

Für die Umsetzung des Hermetik-Konzeptes wurde ein spezieller Dehnradiator entwickelt und patentiert. Die Fähigkeit sich in ausreichender Weise auszudehnen wurde durch ein spezielles Schweißverfahren erreicht. Die Dauerfestigkeit dieser Schweißkonstruktion wurde in Langzeitversuchen nachgewiesen.

Der Transformator und Lastschalter sind mit je einem Überdruckventil ausgerüstet, um im Fehlerfall den Transformator zu schützen.

Hermetiktransformatoren bieten neben dem Wegfall der Ausdehnungsgefäße den Vorteil weitgehend wartungsfrei zu sein, da zum einen die Kontrolle der sonst benötigten Luftentfeuchter und der Austausch des Trocknungsmittels entfällt. Zum anderen ist auch der verwendete Vakuumschalter wartungsfrei. Der hermetische Abschluß und die damit verhinderte Sauerstoff

und Wasseraufnahme des Aktivteils führen zu einer verlangsamten Alterung des Öl-Papier Isolationssystems.

2.3 Betriebserfahrungen mit dem Hermetiktransformator

Das hier vorgestellte neue Konzept wurde erstmalig an einem Leistungstransformator mit 80 MVA Nennleistung und 110 kV Nennspannung erprobt. Zur kontinuierlichen Erfassung des Betriebszustandes werden sowohl Hermetiktransformator als auch Stufenschalter kontinuierlich mit einem Monitoringsystem überwacht. Im Einzelnen werden Umgebungstemperatur, die Öltemperatur im Kessel und im Lastschalter, die Drücke im Kessel und im Lastschalter, sowie der Betriebsstrom aufgezeichnet. Bei dem Stufenschalter werden Stufenstellung und Motorantriebsleistung überwacht. Sowohl durch das einzigartige Konzept des Hermetiktransformators, welches mittlerweile mehrfach erfolgreich erprobt wurde, als auch durch den Einsatz des Monitoringsystems MS 2000 reduziert sich der Wartungsaufwand des Transformators für den Betreiber auf ein Minimum. Der zulässige Bereich des Kesseldrucks ist größer als der zulässige Druckbereich des Lastschalters. Dies wird dadurch gewährleistet, dass dem Lastschalter ein verhältnismäßig größerer Anteil an Dehnvolumen zur Verfügung steht als im Kesselbereich.

Dieser Zusammenhang ist gut an den aufgezeichneten Daten in **Bild 6** erkennbar. Die Druckamplitude des Lastschalters ist geringer als die des Kessels. Beim Vergleich der Öltemperatur des Kessels mit der Öltemperatur des Lastschalters zeigt sich, eine um ca. 3 K geringere Öltemperatur im Lastschalter.

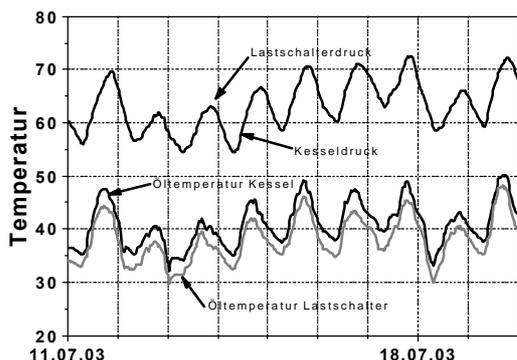


Bild 6 zeitlicher Druckverlauf im Hermetiktransformator

3. Zusammenfassung

Feuchtigkeit und Wasser spielen neben der Öltemperatur eine Schlüsselrolle im Alterungsprozess der Isolation im Transformator. Die Überwachung der Ölfeuchte anhand konventioneller Analysemethoden erfolgt nicht kontinuierlich. Außerdem ist durch die möglichen Messfehler die Wiederholbarkeit der konventionellen Ölanalyse nicht gegeben.

Alternativ bietet sich die Online Ölfeuchteüberwachung mit einem Monitoringsystem an. Mit Hilfe eines Monitoringsystems und der Kenntnis der Diffusionsvorgänge sowie des Aufbaus der Isolation kann aus der Ölfeuchte und der Öltemperatur die Papierfeuchte rechnerisch bestimmt werden. Somit werden Feuchteprobleme im Transformator rechtzeitig erkannt. Deren Behebung verhindert Gefährdungen des Aktivteils und verlängert die Transformatorlebensdauer.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit besteht in der Verwendung eines Hermetiktransformators. Durch die hermetische Abdichtung des Ölraums wird jeglicher Kontakt von Sauerstoff und Feuchtigkeit mit dem Öl vermieden und somit die Alterung stark begrenzt. Nachteile im Betrieb, wie z.B. umständliches Handling und Kontrolle wie beim Hydrokompensator oder schlechte Trocknung durch zu schnelle Atmung des Transformators kommen prinzipbedingt nicht vor. Das Hermetik-Konzept bietet dem Betreiber außerdem weitgehende Wartungsfreiheit des Transformators und seiner Komponenten.

Durch den Einsatz eines MS 2000 Online-Monitoringsystems können Wartungsaufwand nochmals minimiert und die Aussagekraft der Meßergebnisse objektiviert werden.

4. Literatur

- [1] Transformerboard II, H. Weidmann AG, 1987
- [2] Tenbohlen, S. et al.: "Wartungsfreiheit und Altersstopp durch Hermetikabschluss bei Leistungstransformatoren", VWEW Energieverlag GmbH, 2003
- [3] Du, Y et al.: "Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems", IEEE electrical insulation magazine, Vol. 15, No.1, 1999
- [4] Lampe, W. et al.: "The oxygen free transformer reduced ageing by continous degassing", Cigré, paper 12-05, Paris, 1976
- [5] Sundermann, Tenbohlen: "Der intelligente Transformator- Zustandserfassung und Diagnose von Leistungstransformatoren", VDEW Jg. 1997 (1998), H.10, S. 48-56
- [6] J. Altmann, Bukvis: "The oil-moisture diagnostic problem of aged transformers", ARS2000, www.transformer-consulting.com