

Life-Management

Wartungsfreiheit und Alterungsstopp durch Hermetikabschluss bei Leistungstransformatoren

Ageing and life-management of power transformers

Neben der Öltemperatur sind Feuchte- und Sauerstoffgehalt wichtige Katalysatoren für die Alterung des Öl-Papier-Isolationssystems von Leistungstransformatoren. Durch Online-Trocknung kann bei laufendem Betrieb die Feuchtigkeit reduziert und dadurch die Nutzungsdauer verlängert werden. Um die Sättigung des Öls mit Sauerstoff zu unterbinden und außerdem weitestgehende Wartungsfreiheit zu erreichen, hat die Alstom Schorch Transformatoren GmbH den hermetisch geschlossenen Leistungstransformator entwickelt.

SUMMARY

Beside oil temperature water and oxygen are important catalysts for the ageing of the oil paper insulation of power transformers. By means of on-line drying the moisture content can be reduced during operation of the transformer continuously and thus leads to an extension of the time of usage. To prevent saturation of oil with oxygen and to achieve a maintenance-free transformer, now a hermetic sealed power transformer was developed by Alstom Schorch Transformatoren GmbH.

Die Nutzungsdauer von Leistungstransformatoren wird allgemein durch die Lebensdauer des Öl-Papier-Isolationssystems beschrieben, da bei Verlust der mechanischen Stabilität des Isolierpapiers das Risiko eines dielektrischen Versagens und damit eines vollständigen Ausfalls besteht. Die Betrachtung der Altersstruktur der Transformatorpopulation der deutschen Energieversorgungsunternehmen zeigt, dass sich ein großer Anteil dem Ende der ursprünglich projektierten Lebensdauer nähert. Daher ist die Kenntnis des Alterungszustandes und der Einflussfaktoren der Alterung von besonderer Bedeutung für das Asset Management. Neben dem seit *Montsinger* bekannten Einflussfaktor Temperatur werden in den letzten Jahren verstärkt Feuchtigkeit und Sauerstoffgehalt als wichtige Katalysatoren für den Alterungsprozess untersucht und diskutiert [1;2;3]. Aus der Bedeutung dieser Faktoren lassen sich auch die diagnostischen Anstrengungen erklären, den Feuchtigkeitsgehalt in der Wicklungsisolierung zu bestimmen. Mit den seit einigen Jahren verfügbaren Online-Monitoringsystemen kann der Feuchtigkeitsgehalt kontinuierlich und effizient bestimmt werden. Bei der Diagnose einer hohen Ölfeuchte kann die Trocknung zum einen zur kurzfristigen Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebs eine sinnvolle Maßnahme sein, um die durch die Feuchtigkeit verminderte Durchschlagfestigkeit des Öls wieder zu erhöhen. Zum anderen kann durch Trocknung die Nutzungsdauer des Transformators verlängert werden. Der im Öl gelöste Sauerstoff führt ebenfalls zu einer deutlichen Steigerung der Alterungsgeschwindigkeit. Um den Kontakt des

Isolieröls mit Sauerstoff zu unterbinden, wurde nun zum ersten Mal das Konzept des Hermetiktransformators auf große Leistungstransformatoren angewendet. Dadurch kann neben dem Vorteil der weitestgehenden Wartungsfreiheit auch die Alterung verringert oder bei unveränderter Alterung durch Zulassen höherer Betriebstemperaturen die Belastung erhöht werden.

Grundlagen der Papieralterung**Alterung von Isolierpapier**

Die Zellulose, aus der das Isolierpapier hergestellt wird, ist ein Polymer, dessen wiederkehrende Struktureinheiten, die Glucoseringe, über Sauerstoffbrücken verbunden sind (*Bild 1a*). Die Anzahl der zusammenhängenden Glucoseringe bezeichnet man als den Polymerisationsgrad (*DP-Grad*) des Papiers. Nicht gealtertes Papier hat üblicherweise eine Kettenlänge von rd. 1200. Schon bei Temperaturen über 105 °C spalten sich Glucoseverbindungen auf und öffnen dadurch die Glucoseringe (thermische Depolymerisation). Produkte dieser Reaktion sind: freie Glucose (HO, O, OH), Wasser (H₂O), Kohlenstoff (CO, CO₂). Sauerstoff spaltet bereits bei normalen Betriebstemperaturen die Glucoseringe weiter auf (oxidative Depolymerisation, *Bild 1b*). Bei der Oxidation werden Säuren, Ketone, Phenole und andere sauerstoffhaltige Moleküle gebildet. Untersuchungen zeigen, dass bei Vorhandensein von Sauerstoff die Alterungsrate verdreifacht wird [1]. Ein besonders zersetzendes Oxidationsprodukt ist Wasser. Dieses spaltet wiederum die Sauerstoffbrücken zwischen den einzelnen Glucoseringen auf und beschleunigt dadurch den Alterungsprozess weiter (hydrolitische Depolymerisation, *Bild 1c*). Wasser ist also sowohl Ursache als auch Resultat der Papierzersetzung. Sauerstoff und ein Wasseranteil von 2 % in der Papierisolierung können die Alterungsrate um einen Faktor von 20 steigern [2]. Unterhalb eines *DP-Grades* von 250 hat das Papier seine Flexibilität und Reißfestigkeit verloren und daher das Ende seiner Lebensdauer erreicht. Bei einer Kurzschlussstrombeanspruchung der Wicklung würde das Papier reißen und dielektrisches Versagen eintreten. Somit sind sowohl Sauerstoff als auch Feuchtigkeitsgehalt wichti-

Depolymerisation

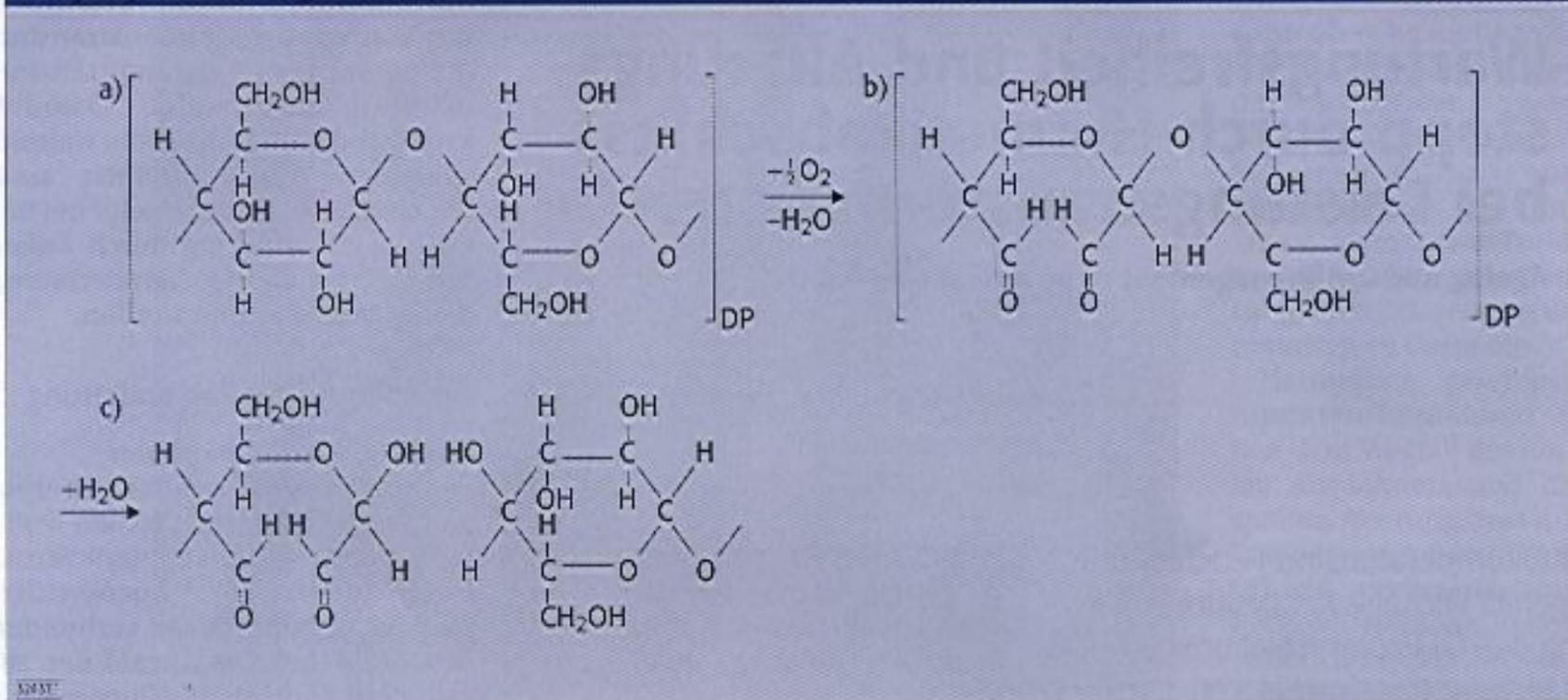


Bild 1. Strukturformel und Depolymerisation der Zellulose

- a) Strukturformel der Zellulose
- b) oxidative Depolymerisation
- c) hydrolytische Depolymerisation

ge Einflussgrößen für die Nutzungsdauer des Transformators.

Bestimmung der Papierfeuchte

Der gesamte Wasserhaushalt des Transformators ist verteilt zwischen der Festisolation und dem Öl. Betriebstemperaturabhängig stellt sich durch die Diffusionsgeschwindigkeit von Wasser in verschiedene Medien ein Gleichgewicht gemäß Bild 2 ein [3]. Ändert sich die Temperatur, so diffundiert bei steigender Temperatur das Wasser aus der Festisolation in das Öl. Gleichzeitig sinkt der Wassergehalt der Festisolation. Bei sinkender Temperatur ist dieser Vorgang umgekehrt. Physikalisch bedingt befindet sich viel mehr Wasser in der Papierisolation als im Öl, somit ändert sich bei Diffusion des Wassers der Feuchtegehalt im Papier nur wenig. In jedem Fall jedoch sinkt die Durchschlagfestigkeit des Öls bei steigendem Wassergehalt. Neben der Zustandsdiagnose wird die Papierfeuchte auch zur exakten Berechnung der Alterungsrate und der Notbetriebszeit durch ein Monitoringsystem benötigt [4].

Die Papierfeuchte kann durch verschiedene Verfahren bestimmt werden. Bei den Offline-Verfahren, wie RVM (Recovery Voltage Measurement), PDC (Polarisation and Depolarisation Current) und FDS (Frequency Domain Spectroscopy),

wird die Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften vom Feuchtigkeitsgehalt genutzt. Online kann die Papierfeuchte über die Messung der Ölfeuchte mit einer Feuchtesonde und Berechnung durch ein Monitoringsystem bestimmt werden. Dabei ist das Kennlinienfeld für den Gleichgewichtszustand formelmäßig hinterlegt. Die für dieses Verfahren notwendige Voraussetzung des Gleichgewichtszustandes kann zum einen durch intelligente Steuerung der Kühlanlage erreicht werden [4]. Zum anderen können durch Einbeziehung der Adsorptionszeitkonstante in das Berechnungsverfahren der Papierfeuchte

Big hinterlegt. Die für dieses Verfahren notwendige Voraussetzung des Gleichgewichtszustandes kann zum einen durch intelligente Steuerung der Kühlanlage erreicht werden [4]. Zum anderen können durch Einbeziehung der Adsorptionszeitkonstante in das Berechnungsverfahren der Papierfeuchte

Gleichgewicht Öl-Papierfeuchte

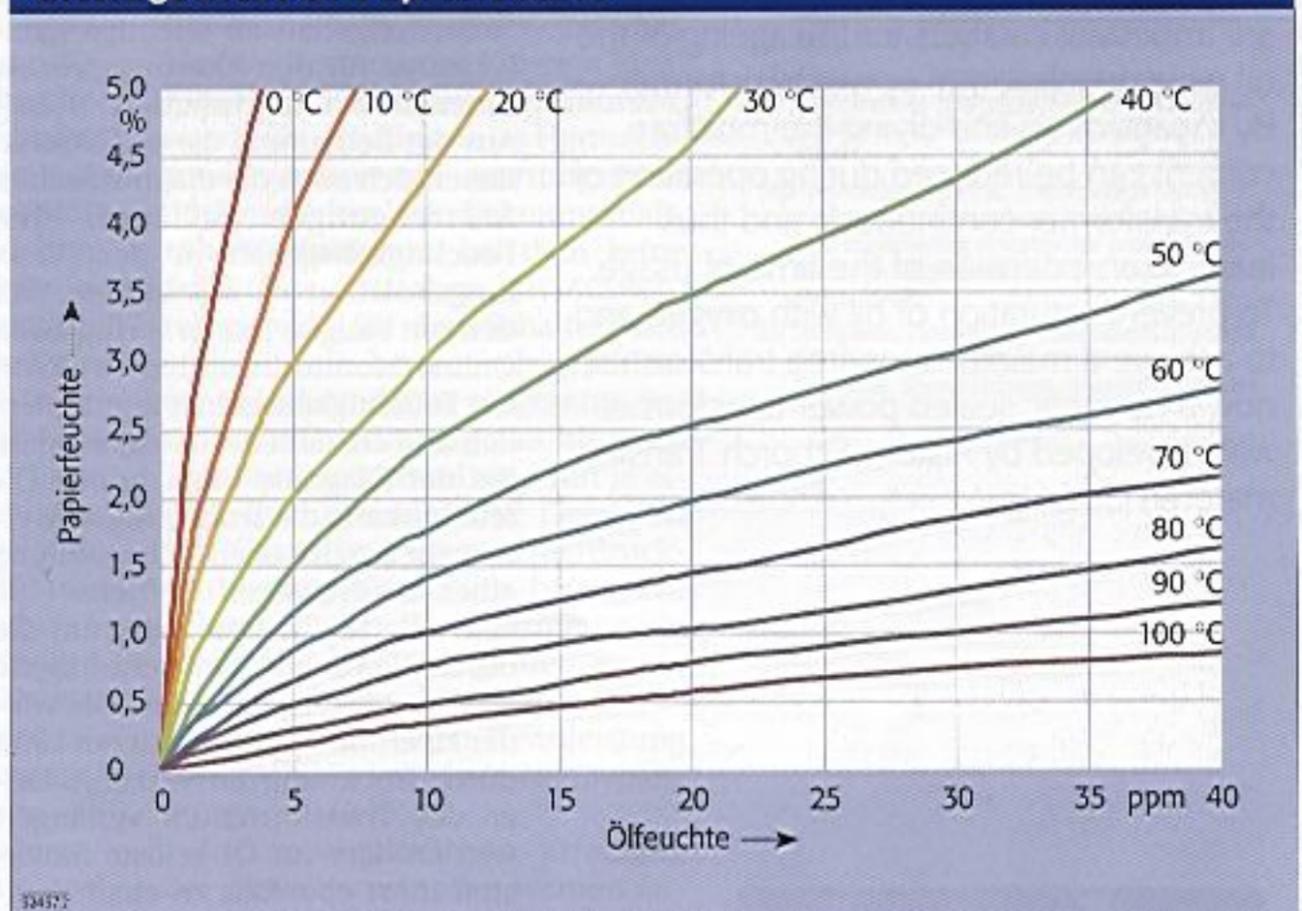


Bild 2. Gleichgewichtszustand zwischen Papier- und Ölfeuchte nach [3]

Beispiel – Berechnungsergebnis

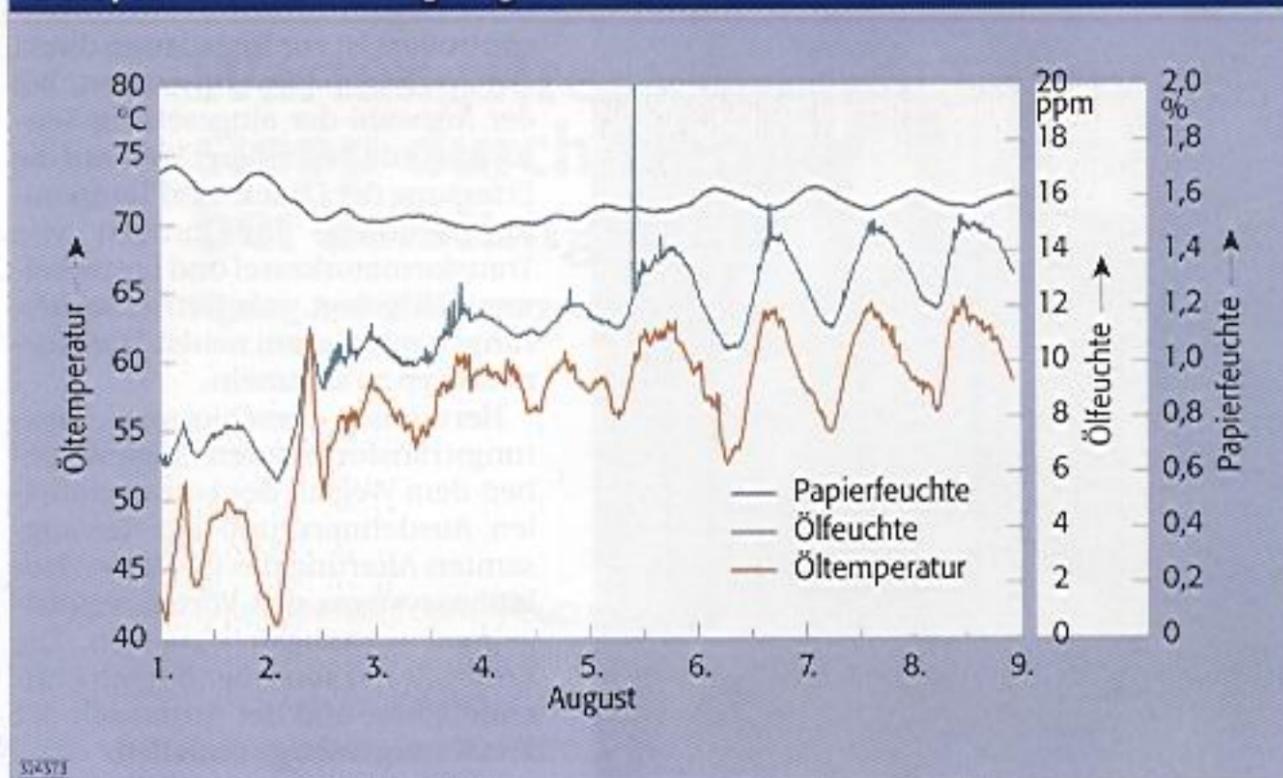


Bild 3. Bestimmung der Papierfeuchte durch Online-Messung an einem 600-MVA-Netzkupplungstransformator

Abweichungen vom Gleichgewichtszustand kompensiert werden [3]. In Bild 3 sind Öltemperatur, Ölfeuchte zusammen mit der mit diesem Verfahren berechneten Papierfeuchte eines 600-MVA-Netzkupplungstransformators (Baujahr 1973) dargestellt. Deutlich ist die verringerte Ölfeuchte bei niedriger Öltemperatur zu erkennen.

Konzepte zur Verlängerung der Nutzungsdauer

Online-Trocknung

Für die Online-Trocknung stehen derzeit zwei aktive im Bypass arbeitende Verfahren zur Verfügung. Zum einen kann die Feuchtigkeit durch ein Adsorptionsverfahren mit integrierter Aufbereitung des Zellu-

loseabsorbers separiert werden. Zum anderen kann durch ein Unterdruckverfahren, das auch bei der notwendigen langfristigen Anwendung die Ölchemie nicht beeinträchtigt, der Feuchtigkeitsgehalt reduziert werden. Gleichzeitig werden eventuelle Schmutzpartikel, die die Durchschlagspannung des Öls vermindern können, in einem nachgeschalteten Tiefenfilter aufgefangen. Bei beiden Verfahren wird das Wasser in einem Behälter gesammelt und definitiv aus dem System herausgeführt (aktives Verfahren). So können Wassergehalte von wenigen ppm erreicht werden [5]. Vorteil des zweiten Verfahrens ist die im Verfahren enthaltene Teilentgasung des Öls auf rd. ein Drittel des gesättigten Zustands; dadurch wird eine weitere Homogenisierung

erreicht und die Alterung reduziert. Gegenüber anderen Trocknungsmethoden unter Hochvakuum kann dieses Verfahren bei laufendem Betrieb des Transformators vorgenommen werden.

In Tafel 1 sind die Ergebnisse eines solchen Trocknungsverfahrens an einem 22-MVA-Industrietransformator anhand dreier Gas-in-Öl-Analysen dargestellt. Probe A wurde vor Beginn der Trocknung entnommen und zeigt die typischen Werte eines stark alternden Isolationssystems. Die über die Ölfeuchte nach Bild 2 berechnete Papierfeuchte zeigt einen Wert von rd. 5 %. Durch den Betrieb der Online-Trocknungsanlage wurden im Zeitraum vom 17. Januar 2000 bis 24. Januar 2001 rd. 15 l Wasser separiert, was am Ende des Trocknungsvorganges einer Papierfeuchte von rd. 2,5 % entspricht (Probe B). Durch geeignete Temperaturführung kann die Zielfeuchtigkeit (in diesem Fall 2,5 %) entsprechend der Vorgesichte des Transformators angesteuert werden, wodurch ein Über-trocknen, verbunden mit einer unzulässigen Reduktion der Kurzschlussfestigkeit, des Transformators vermieden wird. Nach Abschaltung der Trocknung und rd. einem halben Jahr bei mindestens 80 % Vollast zeigt die letzte Ölprobe die typischen Werte eines gesättigten offenen Systems. Gegenüber Probe A ist der gesättigte O₂-Wert relativ hoch, weil kein Sauerstoff mehr bei Depolymerisationsprozessen verbraucht wird. Die Durchschlagspannung ist von 25 kV/2,5 mm auf 80 kV/2,5 mm gestiegen. Aus isolationstechnischer Sicht kann der Transformator jetzt als gesund betrachtet werden. Zur Erhaltung des nun erreichten Zustandes ist eine gezielte Überwachung der Ölfeuchte mit einem Online-Monitoringsystem empfehlenswert, um so den weiteren Alterungsprozess optimal zu kontrollieren.

Hermetiktransformator

Das Isolieröl sättigt sich durch den Kontakt mit der Umgebungsluft im Ausdehner des Transformators mit Sauerstoff. Trotz Trockenvorlage nimmt das Öl zusätzlich Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Um diese Prozesse zu unterbinden und dadurch Depolymerisationsprozesse mit der zusätzlichen Wasserbildung zu vermindern, kann der Transformator hermetisch gegen

Tafel 1

		Probe A 16. Juni 1999	Probe B 24. Januar 2001	Probe C 2. August 2001
Gesamtgas	ppm	72 498	24 193	81 572
Stickstoff N ₂	ppm	66 493	17 036	66 434
Sauerstoff O ₂	ppm	1 298	6 698	9 495
Durchschlagspannung	kV/2,5 mm	25	81	81
Ölfeuchte	ppm	36,7	13	15
Papierfeuchte	%	5	2,7	2,9

Tafel 1. Verlauf der Ölanalysen eines 22-MVA-Industrie-Transformators bei einer Online-Trocknung

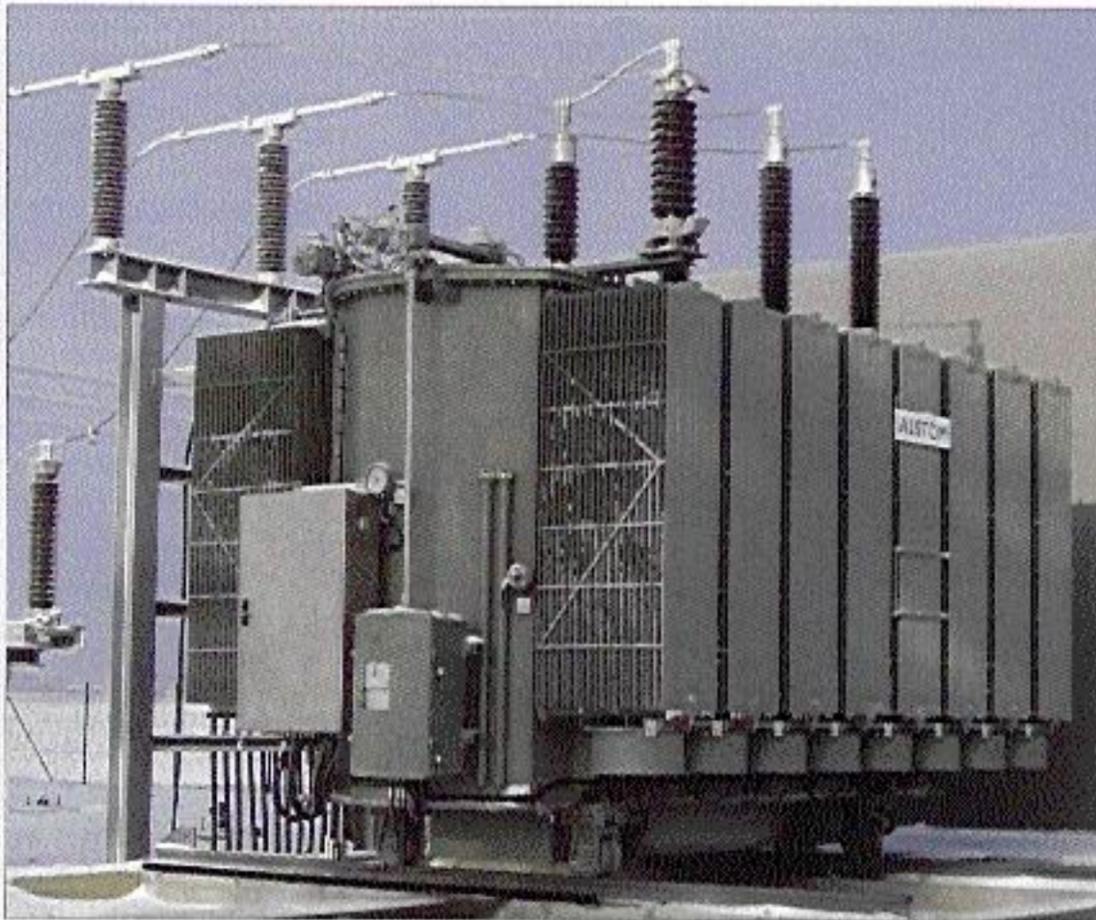


Bild 4. Hermetisch geschlossener Windparktransformator 80 MVA/110 kV

die äußere Umgebung abgeschottet werden. Im Bereich der Verteilungstransformatoren wird dieses Verfahren seit langem erfolgreich eingesetzt. Das sich aufgrund von Temperaturschwankungen ändernde Ölvolument wird dabei vom Transformator-Kessel aufgenommen. Dazu ist der Kessel als Wellwandkessel ausgeführt.

Bei Leistungstransformatoren ist aufgrund des deutlich größeren sich verändernden Ölolumens eine solche Konstruktion nicht möglich. Ferner muss der Kessel bei diesen Transformatoren vakuumfest ausgelegt werden. Um trotzdem eine Volumenänderung des Isolieröls ohne konventionellen Ausdehner zu ermöglichen, wurde ein Dehnradialator entwickelt und patentiert. Durch ein spezielles Schweißverfahren kann der Radialator neben der Kühlfunktion auch die Aufgabe des Dehngefäßes übernehmen, ohne dabei seine mechanische Festigkeit zu verlieren. Die sich einstellende Aufweitung behindert die für die Kühlung des Transformators benötigte Luftströmung zwischen den Radialatorgliedern nicht. Die Dauerfestigkeit dieser Schweißkonstruktion wurde an Hand von Langzeitversuchen in Anlehnung an die Norm für Verteilungstransformatoren HD 428.1 »Requirements and tests concerning pressurized tanks« nachgewiesen. Die Norm schreibt

vor, dass das sich dehnende Element mindestens 2000 Voll-Lastspiele ohne eine mechanische Beschädigung überstehen muss.

Zur Anpassung der Spannung des Transformators an die Netzverhältnisse wird ein Stufenschalter eingesetzt. Bei konventionellen Stufenschaltern entstehen während der Schalthandlung Gase. Aus diesem Grund wird das Lastschaltergefäß normalerweise mit einem getrennten Ausdehnungsgefäß verbunden. Um das hermetische Konzept idealerweise vollständig auszunutzen, wurde für den Einsatz im Hermetiktransformator ein wartungsfreier Stufenschalter mit Vakuumschaltrohren eingesetzt, bei dem keine Schaltgase entstehen. Als Ausdehnungsgefäß für den Schalter wird ebenfalls ein hermetisch geschlossener Dehnradialator eingesetzt. Sowohl Stufenschaltergefäß als auch Transformator-Kessel sind mit je einem Buchholzrelais zur Detektion von Gasen und einem Überdruckventil ausgerüstet, um bei einem Fehlerfall den Transformator zu schützen. Bild 4 zeigt den ersten hermetisch geschlossenen Transformator mit einer Nennleistung von 80 MVA bei einer Nennspannung von 110 kV.

Zur kontinuierlichen Erfassung des Betriebszustandes werden sowohl Hermetiktransformator als auch Stufenschalter mit dem Moni-

toringsystem MS 1000 überwacht. Diese Einheit auf Basis eines Microcontrollers ist zur Installation direkt am Transformator vorgesehen. Bei der Auswahl der eingesetzten Sensorik wurde besonderer Wert auf die Erfassung der Druck- und Temperaturverhältnisse im Inneren von Transformator-Kessel und Lastschaltergefäß gelegt, um Betriebserfahrungen mit diesem neuen Transformator-Typ zu sammeln.

Hermetisch geschlossene Leistungstransformatoren bieten neben dem Wegfall des konventionellen Ausdehners und der verlangsamten Alterung des Öl-Papier-Isolationssystems den Vorteil weitestgehend wartungsfrei zu sein. Die Kontrolle der sonst benötigten Luftentfeuchter und der Austausch der Trocknungsvorlage entfallen.

Danksagung

Die Verfasser danken den Entwicklungspartnern in den Unternehmen Daemisch Industriedienstleistungen, Regensburg, Menk-Apparatebau GmbH, Bad Marienberg, und Maschinenfabrik Reinhausen, Regensburg, für die konstruktive und erfolgreiche Zusammenarbeit.

SCHRIFTTUM

- [1] Lampe, W. et al.: The oxygen-free transformer reduced ageing by continuous degassing. Cigré, paper 12-05, Paris, 1976.
- [2] Shroff, D. H. et al.: A review of paper aging in power transformers. IEE Proceedings, Vol.132, Pt C, No 6, November 1985.
- [3] Du, Y. et al.: Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.15, No.1, 1999.
- [4] Tenbohlen, St. et al.: Experience-based evaluation of economic benefits of on-line monitoring systems for power transformers. Cigré Session 2002, paper 12-110, Paris, 2002.
- [5] Altmann; Daemisch; Anwenderhandbuch für VS und AD-Systeme. ARS-Altmann Systems. www.altmann-transformer.com.

(32437)