

Wartungsarmut und reduzierte Alterung von Leistungstransformatoren durch Hermetikabschluß

Frank Hofmann

Areva Energietechnik GmbH
Bereich Schorch Transformatoren
Rheinstr. 73
41065 Mönchengladbach

Frank.Hofmann@areva-td.com

Stefan Tenbohlen

Universität Stuttgart
Institut für Energieübertragung und Hochspannungs-
technik
Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart

Stefan.Tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

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 des Transformators besteht. Neben dem seit Montsinger bekannten Einflußfaktor Temperatur sind basierend auf Untersuchungen der letzten Jahren verstärkt Feuchtigkeit und Sauerstoffgehalt als wichtige Katalysatoren für den Alterungsprozess erkannt worden. Um eine möglichst hohe Nutzungsdauer eines Leistungstransformators zu gewährleisten, ist somit das grundlegende Ziel, diese Alterungskatalysatoren zu vermindern oder deren Entstehung a priori zu verhindern.

Das Isolieröl sättigt sich durch den Kontakt mit der Umgebungsluft im Ausdehner des Transformators mit Sauerstoff. Trotz Trockenvorlage nimmt das Öl Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Um diese Prozesse zu unterbinden und dadurch Depolymerisationsprozesse mit zusätzlicher Wasserbildung zu vermindern, kann der Transformator hermetisch gegen die äußere Umgebung abgeschottet werden. Dieses seit langem für Verteiltransformatoren angewandte Konzept wurde nun von AREVA auch auf Leistungstransformatoren übertragen. Als weiterer Vorteil dieser Technik ist die weitestgehende Wartungsfreiheit dieses Transformatorenkonzeptes zu nennen.

In diesem Beitrag werden die technischen Voraussetzungen für die Anwendung des Hermetikkonzeptes für Leistungstransformatoren mit Regelwicklung vorgestellt. Die Darstellung der anhand von Gas-in-Öl Analysen und Online-Monitoringsystemen gesammelten Betriebserfahrungen zeigt die Vorteile des Hermetikkonzeptes hinsichtlich Alterung und Wartungsaufwand.

1. Auswirkung von Wasser und Sauerstoff auf das Isolationssystem

Die Lebensdauer von Leistungstransformatoren mit Öl-Papier Isolation ist durch die Lebensdauer der Zellulose im Papier und in den Presspan-Teilen bestimmt. Erfahrungsgemäß ist die Alterung des Isolierpapiers entscheidend, da sie schneller erfolgt als die Alterung des Öls.

Das Maß für den Alterungszustand der zellulosehaltigen Teile der Isolation ist der Depolymerisationsgrad (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 Depolymerisationsgrad nimmt die mechanische Festigkeit der Isolierstoffe ab und damit deren Fähigkeit, den mechanischen Belastungen z.B. bei Kurzschlüssen zu widerstehen. [1] Dies kann zu einem dielektri-

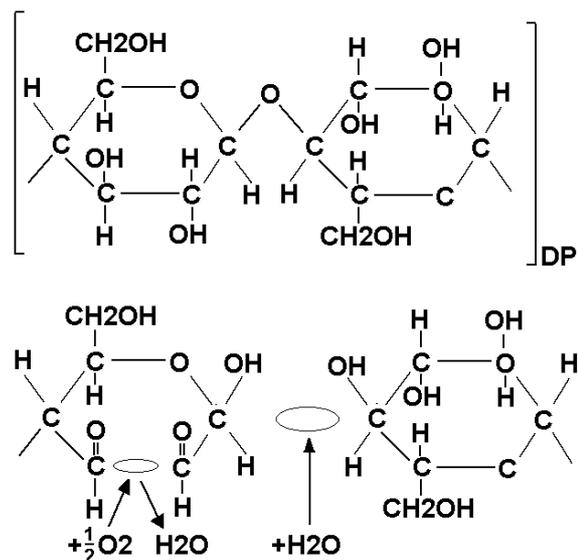


Bild 1 Darstellung der Depolymerisation im Zellulose-Makromolekül [2]

schen Versagen der Isolation und damit zu einem Ausfall des Transformators führen.

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.

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 **hydrolitischen Depolymerisation** spaltet Wasser die Sauerstoffbrückenbindungen zwischen den einzelnen Glucose-Molekülen auf. Wasser ist also Ursache (hydrolitische Depolymerisation) und Resultat (oxidative Depolymerisation) der Papierzersetzung und deshalb von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung des Zustandes der Transformatorisolation.

2. Vermeidung von Feuchtigkeit und Sauerstoff

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. Der Hydrokompensator ist eine technische Lösung, die die Aufgabe des hermetischen Abschlusses prinzipiell erfüllt. Es ergeben sich jedoch 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.

Eine 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 2 verdeutlicht die möglichen Nachteile der Verwendung einer Trocknungsvorlage anhand eines Bei-

spiels an einem niedrig belasteten 150 MVA-Netzkupplungstransformator mit der Kühlungsart OFAF. Der Transformator ist mit einer Wärmerückgewinnungsanlage ausgerüstet. Die hiermit gewonnene Energie aus der Abwärme des Transformators soll zur Beheizung der Gebäude in der Schaltanlage genutzt werden.

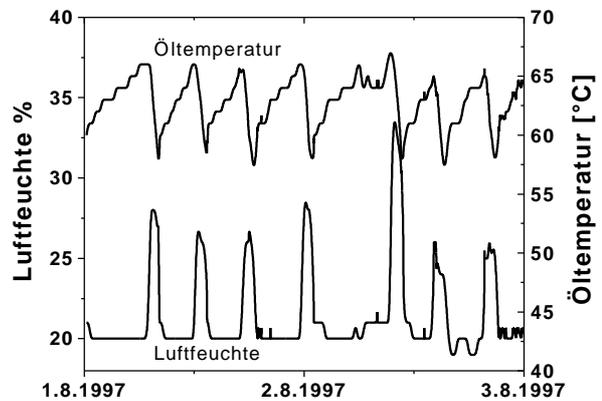


Bild 2: Luftfeuchte in der Luftleitung zwischen Trockenvorlage und Ausdehnungsgefäß

Die Auswirkung des Betriebs der Wärmerückgewinnungsanlage auf die Öltemperatur und die Kühlerleistung zeigt **Bild 2**. Die Öltemperatur ist während des Betriebs weitgehend unabhängig von der Umgebungstemperatur und wird durch den Betrieb der Lüfter in einem Bereich von 58°C bis 66°C gehalten, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Wärmerückgewinnung zu gewährleisten [4]. Der Anstieg der Temperatur beim Betrieb ohne Lüfter geschieht langsamer, als das Absinken nach Einschalten der Lüfter. Die Luftfeuchte im Ausdehner liegt auf einem normalen Niveau von ca. 20 % relative Feuchte, jedoch sind Peaks bis zu 35 % 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 der Kühlanlage, da bei dem Erreichen der Schaltschwelle alle Lüfter gleichzeitig eingeschaltet werden. Dadurch kühlt sich das Öl so schnell ab, dass durch die unzureichende Trocknungsvorlage große Feuchtigkeitsmengen in den Ausdehner gelangen und dort vom Öl absorbiert werden können. Bei der erheblich langsameren Erwärmung strömt die Luft langsam aus dem Ausdehnungsgefäß. Charakteristisch für den hier dargestellten ungünstigen Fall ist, dass durch die verhältnismäßig langsame Rückströmung die Trockenvorlage zuerst von oben verbraucht wird.

Eine intelligente Lüftersteuerung, die z. B. in dem Online-Monitoringsystem MS 2000 implementiert ist, kann, angepaßt an die jeweilige Betriebssituation des Transformators, solche Probleme verhindern und die Feuchtigkeitsaufnahme reduzieren.

3. Hermetischer Abschluß von Leistungstransformatoren

Eine erfolgreiche Methode zur Reduzierung der Feuchtigkeitsaufnahme ist der vollkommene hermetische Abschluß des Transformators.

Dieses Verfahren wird seit langem bei Verteilungstransformatoren eingesetzt. Das notwendige Dehnvolumen wird hierbei durch eigens gestaltete Wellwände des Kessels aufgenommen. Das Prinzip hat die AREVA Energietechnik GmbH, Bereich Schorch Transformatoren, nun erfolgreich auf Leistungstransformatoren übertragen. Die Veränderung des Ölvolumens wird hier in eigens entwickelten und patentierten Dehnradiatoren aufgenommen. Durch ein spezielles Schweißverfahren sind die Dehnradiatoren in der Lage, das notwendige Ölvolumen aufzunehmen. Die Dauerfestigkeit dieser Konstruktion wurde durch Langzeitversuche nachgewiesen.

Ein Hermetiktransformator zeichnet sich neben einer deutlich geringeren Alterung der Isolation durch eine nahezu gänzliche Wartungsfreiheit aus. Eine regelmäßige Kontrolle der Luftentfeuchter entfällt. Diese Wartungsarmut wird auch durch die geeignete Wahl des Stufenschalters erreicht. Bei Verwendung eines Vakuum-Schalters entstehen bei einer Umschaltung keine Lichtbögen im Öl. Dadurch wird die Entstehung von Schaltgasen vermieden. Lediglich die zur Umschaltung benötigten Widerstände werden durch den Laststrom erwärmt. Diese Erwärmung führt zu einer leichten Gasbildung im Öl. Vakuum-Schalter benötigen eine Revision nach ca. 150.000 Schaltspielen.

Zum Schutz des Transformators und des Lastschalters sind beide Ölräume jeweils mit einem Überdruckventil ausgerüstet. Die Ausdehnung des Isolieröls in das Schaltergefäß erfolgt über einen separaten Dehnradiator.

Die Auslegung des Transformators und die Dimensionierung der Dehnradiatoren stellen sicher, daß der Druck im Schaltergefäß immer höher ist als im Kessel. Damit ist eine sichere Funktion des Schalters gewährleistet und eine Beschädigung des Schaltergefäßes ist ausgeschlossen. Dieses wird dadurch erreicht, daß dem Schalter ein verhältnismäßig deutlich größeres Dehnvolumen gegenüber dem Kessel zur Verfügung gestellt wird.

Ein speziell ausgelegtes Schutz- und Überwachungssystem sorgt für einen reibungslosen und sicheren Betrieb des Transformators.

4. Betriebserfahrungen mit hermetisch abgeschlossenen Leistungstransformatoren

Das oben beschriebene Konzept hat sich im Betrieb bestens bewährt. Beispielhaft seien hier die Ergebnisse eines 80 MVA-Transformators genannt (**Bild 3**).

Hierbei handelt es sich um einen Transformator mit folgenden Nenndaten: 110/20 kV, 80 MVA, Regelbereich $\pm 16\%$ in ± 10 Stufen, ONAN/ONAF-Kühlung. Zur kontinuierlichen Erfassung des Betriebszustandes werden sowohl Transformator als auch Stufenschalter kontinuierlich mit einem Monitoringsystem überwacht. Im Einzelnen werden die 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.



Bild 3: 80 MVA, 110 kV-Leistungstransformator in Hermetikbauweise

Der Transformator arbeitet seit der Inbetriebnahme völlig störungsfrei. Zur Überprüfung der erwarteten geringen Sauerstoffaufnahme und der damit reduzierten Alterung wurde nach einer Betriebsdauer von etwa einem Jahr an dem Transformator eine Ölprobe entnommen.

Die Auswertung der Gas-in-Öl Analyse zeigte keinerlei Schadgas im Öl und bestätigte eindeutig das geringe Alterungsverhalten. So lag der Anteil des im Öl gelösten Sauerstoffs signifikant unter dem Wert vergleichbarer Transformatoren. Ebenso lag das Verhältnis von CO zu CO₂ um etwa den Faktor 3 unter dem Wert konventioneller Mittelleistungstransformatoren bei vergleichbarer Betriebsdauer und Auslastung. Der gemessene Wassergehalt des Öles bestätigt, dass der Transformator auch von außen keinerlei Feuchtigkeit aufgenommen hat.

Aus den Daten des Monitoringsystems ist zu erkennen, dass die Forderung nach einem gegenüber dem Kessel erhöhten Druck im Schaltergefäß gegeben ist.

Bild 4 zeigt die Drücke im Lastschaltergefäß und im Kessel. Ferner sind die Öltemperaturen im Kessel und im Schaltergefäß dargestellt. 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. 4 K geringere Öltemperatur im Lastschalter.

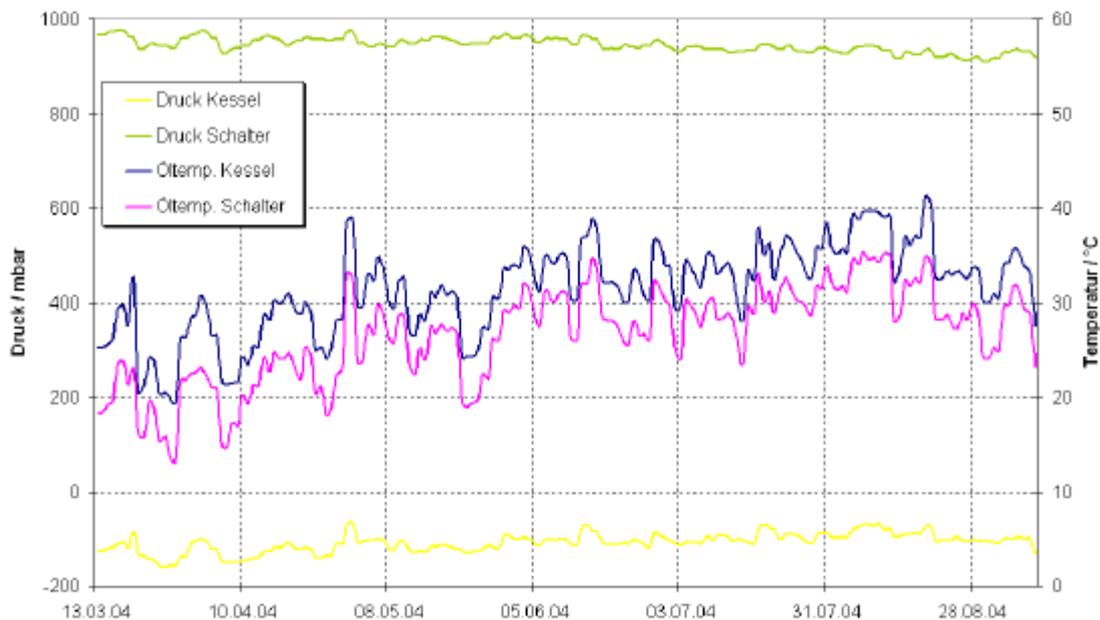


Bild 4: Druck- und Temperaturverlauf im Lastschaltergefäß und im Trafokessel

Sowohl durch das einzigartige Konzept des Hermetiktransformators, welches sich mittlerweile am Markt erfolgreich durchgesetzt hat, als auch durch den Einsatz des Monitoringsystems MS2000 reduziert sich der Wartungsaufwand des Transformators für den Betreiber auf ein Minimum.

Die beste Empfehlung für dieses Konzept ist, dass der Betreiber zwei weitere Transformatoren dieses Typs bestellt hat, die in Kürze in Betrieb gehen werden.

5. Zusammenfassung

Feuchtigkeit und Sauerstoff spielen neben der Öltemperatur eine Schlüsselrolle im Alterungsprozess der Isolation von Leistungstransformatoren. Ziel ist es daher, die Feuchtigkeits- und Sauerstoffaufnahme durch den Kontakt des Isolieröls mit der Umgebungsluft zu reduzieren. Es sind verschiedene technische Lösungen verfügbar. Hierzu zählt neben anderen der hermetische Abschluss des Transformators. Durch die vollständige Abschirmung gegenüber seiner Umgebung nimmt der Hermetiktransformator keinerlei Feuchtigkeit und Sauerstoff von außen auf.

Die hermetisch abgeschlossene Bauweise bietet dem Betreiber eine Wartungsarmut des Transformators und seiner Komponenten. 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.

Der Erfolg dieser Bauart wurde an Hand der Ergebnisse von Gas-in-Öl-Analysen sowie Feuchtemessungen des Öls bestätigt. Die gemessenen Werte lagen

deutlich unter den Werten vergleichbarer Transformatoren ohne hermetischen Abschluss.

Vervollständigt wird das Hermetikkonzept durch den Einsatz des Online-Monitoringsystems MS 2000. Mit Hilfe dieses 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.

Durch den Einsatz eines MS2000 Online-Monitoringsystems kann der Wartungsaufwand z.B. durch eine zustandsorientierte Lüftersteuerung nochmals reduziert werden.

6. 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] Lampe, W. et al.: "The oxygen free transformer reduced ageing by continuous degassing", Cigré, paper 12-05, Paris, 1976
- [4] Sundermann, U., Tenbohlen, S.: "Der intelligente Transformator- Zustandserfassung und Diagnose von Leistungstransformatoren", VDEW Jg. 1997 (1998), H.10, S. 48-56
- [5] Stirl, T. et al.: "Benefit of sensors for online-monitoring systems for power transformers", Konferenzbeitrag MATPOST 03, November 2003