

Alterungsprozess offener Transformatoren bremsen

Überwachungsgestützte Nachhermetisierung von Transformatoren der offenen Bauart

Bisherige Erfahrungen legen nahe, Transformatoren mit Sauerstoffsverbrauchsdaten von mehr als 1 000 ppm O₂/Woche (Nachhermetisierungskriterium) mit einer Nachhermetisierung auf unter 500 ppm O₂/Woche (Nachhermetisierungsziel) zur Substanzerhaltung einzustellen. Geschieht die Nachhermetisierung durch die Reduzierung des Sauerstoffgehalts im Gasraum des Ausdehners, genügt eine Anlagenanpassung an die Atmungsleitung. So kann ein schonender Nachhermetisierungseffekt erreicht und dieser im Rahmen der turnusmäßigen Überwachung kontrolliert werden.

Experience gained so far may be used to adjust transformers with oxygen consumption rates > 1,000 ppm O₂/week (post-installation hermetic sealing criterion) with the help of post-installation hermetic sealing to < 500ppm O₂/week (post-installation hermetic sealing aim) for substance conservation. If the post-installation hermetic sealing is achieved by the reduction of the oxygen content in the gas room of the conservator, is it sufficient to connect the equipment to the breathing pipe. In this way, a careful post-installation hermetic sealing effect is achieved and can be checked at regular monitoring intervals.

Neben dem Wasser zählt auch Sauerstoff zu den Alterungsbeschleunigern für thermisch-elektrisch belastete Öl-Zellulose-Isolierungen. Experimentelle Untersuchungen belegen, dass die Zellulose unter gestressten Bedingungen in luftgesättigtem Öl mehrfach schneller altert als im Vergleich zu sauerstofffreiem Öl [1]. Im Transformatorbau wird diese Alterungsbeschleunigung durch Sauerstoff schon lange berücksichtigt, indem verschiedene hermetische Konstruktionen wie Stickstoffpolster, Dehnradialer und Hydrokompensator den Zutritt von Luftsauerstoff in das Isolieröl unterbinden sollen.

Ein alternativer Weg zur effektiven Unterbindung der Alterungsbeschleunigung durch Sauerstoff lässt sich aus den Erfahrungen mit der DIN EN 60599 [2] zur Bewertung des O₂/N₂-Verhältnisses in offenen Transformatoren darstellen. O₂/N₂-Quotienten < 0,3 werden in der Norm als wahrscheinliches Anzeichen einer Öloxidation betrachtet. Der Sauerstoff wird schneller im Aktivteil verbraucht als er aus der Atmosphäre nachgeliefert wird. Orientierend können diese Werte mit der Alterungsbeschleunigung durch Sauerstoff gleichgesetzt werden. *Bild 1* veranschaulicht die auffällige Sauerstoffabnahme (O₂/N₂ < 0,3 im Sommer 2010) eines Betriebstransformators, ohne dass im Betriebsregime Änderungen stattfinden bzw. eine Fehlerdiagnose vorlag. Der Sauerstoffverbrauch korreliert mit der Umsetzung von organischem Isoliermaterial. In der Betriebspraxis kann dieser Zeitpunkt Monate, Jahre oder Jahrzehnte nach der Erstinbetriebnahme auftreten, abhängig vom thermisch-hydrolytischen Abbau. Theoretisch reicht es aus, erst ab diesem Zeitpunkt den Transformator zu hermetisieren. Die

überwachungsgestützte Nachhermetisierung von bis zu diesem Zeitpunkt offen betriebenen Transformatoren ist somit ein alternativer Weg zur Hermetisierung von Anfang an. In der Praxis zeigt sich, dass die in der Norm genannte auffällige Abnahme des O₂/N₂-Verhältnisses unter 0,3 nur ein Verdachtskriterium darstellt und keine Entscheidungen zur Nachhermetisierung begründen kann. Nur einzelne Praxisfälle der Nachhermetisierung sind bekannt, bei denen Hydrokompensatoren mit einem Ausdehnerwechsel bzw. innovative Lösungen [3;4] nachgerüstet worden sind. Allgemein werden solche Nachhermetisierungen wegen ihres radikalen Sauerstoffausschlusses skeptisch für die Nachrüstung von langjährig offen betriebenen Transformatoren gesehen. Auch werden die aufwendigen Veränderungen im Ölsystem gescheut.

Auf der Grundlage neuer Erkenntnisse zum Gashaushalt offener Transformatoren [5] in Verbindung mit ersten Erfahrungen beim Einsatz der innovativen Atmungsbox G3B [6] wird eine überwachungsgestützte Nachhermetisierung mit ihren vielfältigen Vorteilen vorgestellt. Die optimale Unterbindung der Alterungsbeschleunigung durch Sauerstoff bewirkt eine Lebensdauererweiterung des Isolationsystems.

Sauerstoffverbrauchsrate als Maß der Alterungsbeschleunigung durch Sauerstoff

In *Bild 1* ist zu erkennen, dass die Stickstoffkonzentration über den gesamten Überwachungszeitraum der Sättigungskonzentration in Luft (rd. 66 000 ppm) entspricht. Für Sauerstoff wird die Sättigungskonzentration (rd. 30 000 ppm) nur im Februar 2009 erreicht. Die danach beobachteten geringeren Sauerstoffkonzentrationen können nur durch einen höheren Sauerstoffverbrauch im Aktivteil im Verhältnis zur Nachlieferung aus der Luft im Gasraum des Ausdehners verursacht worden sein. Die Sauerstoffnachlieferung lässt sich durch die Transformator-Offenheitszahl (TON) darstellen, die eine dimensionslose Maßzahl für den Transport der atmosphärischen Gase zwischen Ausdehner und Kessel ist. Die TON, in die Konstruktion, Aufstellung und Betriebsführung des Transformators eingehen, wird

Sauerstoffabsenkung

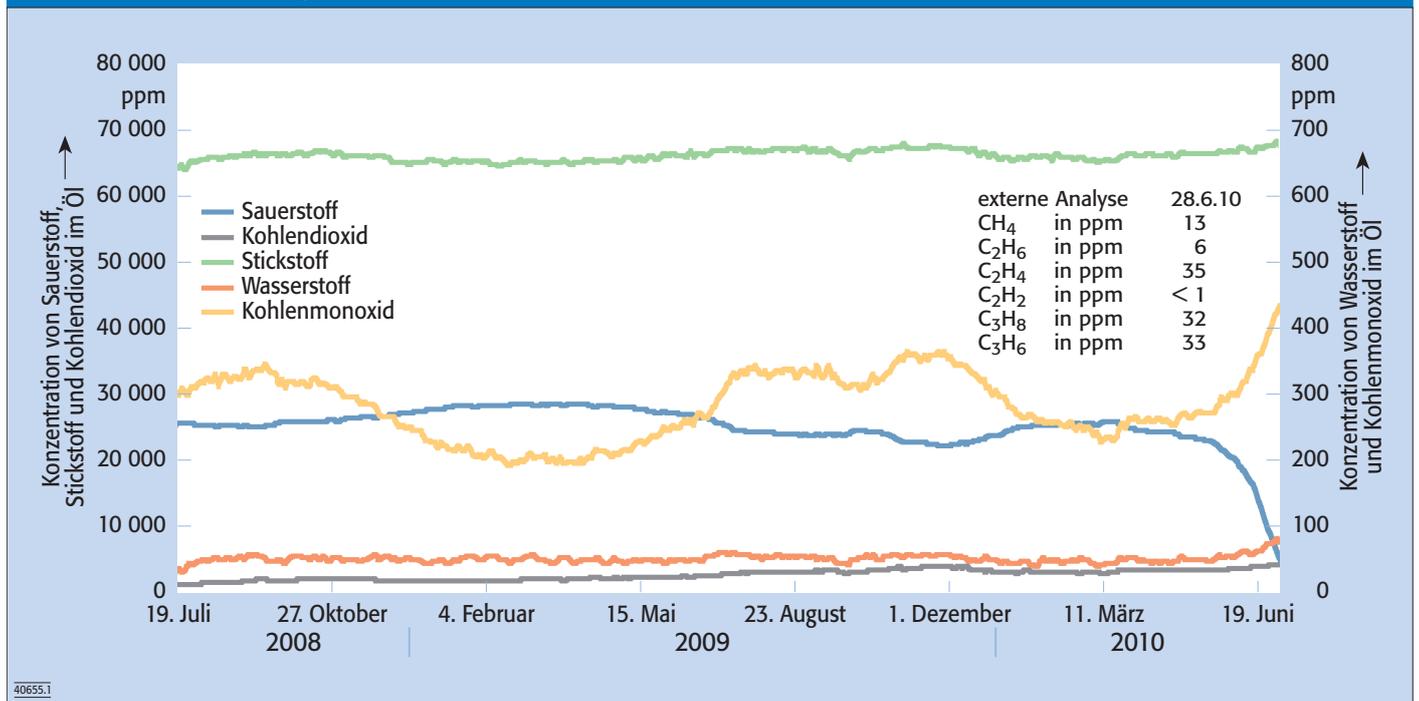


Bild 1. Auffällige Sauerstoffabsenkung eines Betriebstransformators

einmalig durch Rücksättigungsmessungen des Stickstoffs nach Öl-entgasungen bestimmt. Für offene Transformatoren wurden bisher TON-Werte von 1 (Rücksättigungszeit rd. drei Jahre) und 12 (Rücksättigungszeit rd. sechs Monate) ermittelt. Aus der TON des Transformators und der aktuellen Sauerstoffkonzentration im Öl kann die Sauerstoffverbrauchsrate (OCR) bestimmt werden. Der OCR-Wert ist ein individuelles Maß für die Geschwindigkeit der Alterung des Isolationssystems durch Sauerstoff, die nach bisherigen Erkenntnissen selbst als nicht von der Sauerstoffkonzentration abhängig angenommen wird. In dem veröffentlichten OCR-Diagramm von 29 Betriebs- transformatoren [5] liegen die OCR-Werte zwischen 3 (Neutransformator) und 3 000 ppm O₂/Woche (gestresster Industrietransformator). Für die Nachhermetisierungspraxis ist es notwendig, ein plausibles Diagnosekriterium zur Unterscheidung zwischen tolerierbarer und auffälliger Alterungsbeschleunigung durch Sauerstoff einzuführen, um danach die Reihenfolge von Maßnahmen ausrichten zu können.

Da es bisher keinen ausreichenden Wissensstand über ein OCR-Minimum für eine tolerierbare Alterungsbeschleunigung gibt, sollten sich die einzuleitenden Maßnahmen darauf konzentrieren, auffällige OCR-Werte für den Leistungsbetrieb auszuschließen. Die bisherigen Überwachungserfahrungen lassen

sich auf zwei OCR-Werte übertragen (Bild 2):

OCR = 1 000 ppm O₂/Woche (Nachhermetisierungskriterium)

- 1 000 ppm O₂/Woche sind im gesamten TON-Bereich optimal überwachbar,
- im Bereich > 1 000 ppm O₂/Woche bringt die Nachhermetisierung den größten Substanzerhaltungseffekt,
- Anwendungserfahrungen zeigen, dass OCR > 1 000 ppm O₂/Woche die Nachhermetisierung im optimalen Zeitraum (sechs bis zwölf Monate) erreichen lassen.

OCR = 500 ppm O₂/Woche (Nachhermetisierungsziel)

- der Bereich < 500 ppm O₂/Woche, kann als ausreichend langlebige Bedingung angestrebt werden; Voraussetzung ist aber, dass die bisherige Alterung der Festisolation noch nicht sehr fortgeschritten ist (2-FAL < 3 ppm).

Dichte Hydrokompensatoren erreichen TON von rd. 0,01, was einem OCR-Wert von 100 ppm O₂/Woche entspricht (Referenzwert).

Ausgerichtet auf das Nachhermetisierungskriterium gelten folgende bauartabhängigen Sauerstoffkonzentrationen für normale Höhenlagen als auffällig:

- < 28 000 ppm (TON > 6, Flachausdehner),
- < 25 000 ppm (TON < 6, zylindrischer Ausdehner).

Wird das Verdachtskriterium erfüllt, ist die Kenntnis der Transformator-

Offenheitszahl notwendig, um die konkrete Sauerstoffverbrauchsrate zu bestimmen. Es empfiehlt sich, den TON-Wert im Rahmen von Entgasungen bei Neuinbetriebnahmen bzw. Ölbehandlungsmaßnahmen aufzunehmen und in der Lebenslaufakte zu führen. Die Rücksättigungsmessungen müssen online bzw. manuell qualitätsgesichert (N₂IS based) durchgeführt werden [7]. Konnte die TON nicht experimentell ermittelt werden, kann sie anhand bestimmter Transformatormerkmale abgeschätzt werden. Künftig wird durch die zunehmende Zahl von Rücksättigungsmessungen eine Statistik TON/Transformatormerkmale für diese Abschätzung an Bedeutung gewinnen.

Darstellung des Nachhermetisierungseffekts

Die Transformator-Offenheitszahl wird durch die Ölkonvektion zwischen Kessel und Ausdehner sowie den Gasaustausch im Ausdehner bestimmt. Sie kann durch Ein- und Umbauten in den bzw. am Transformator verkleinert werden. Aus Bild 2 wird ersichtlich, dass bei jeweils gleichem Sauerstoffverbrauch (Beispielkurven für OCR von 100, 500 und 1 000 ppm/Woche) durch die Verringerung der Transformator-Offenheit (TON abnehmend) die Sauerstoffkonzentration im Öl bis zur vollständigen Sauerstofffreiheit abnimmt.¹⁾ In diesem Zustand entspricht der Sauerstoffverbrauch

genau der Sauerstoffnachlieferung. Erst dann führt die weitere Verkleinerung der Transformator-Offenheit zum Nachhermetisierungseffekt, zur Verringerung der Menge des ins Öl nachgelieferten Sauerstoffs und damit zur Abnahme des Sauerstoffverbrauchs.

Für Transformatoren der offenen Bauart ist nach *Bild 2* das Nachhermetisierungsziel (< 500 ppm O₂/Woche) erreicht, wenn die Restsauerstoffkonzentration < 2 000 ppm und gleichzeitig die TON < 0,5 beträgt. Dass allein die Restsauerstoffkonzentration < 2 000 ppm keine ausreichende Bedingung ist, verdeutlicht *Bild 1*, wo dieser Wert an einem Transformator der offenen Bauart erreicht wird.

Deshalb sollte der Gashaushalt nach dem technischen Eingriff ins Ölsystem überwacht werden. Die Kontrolle der anhaltenden Wirksamkeit der Nachhermetisierungsmaßnahmen kann nur durch wiederholte Rücksättigungsmessungen zur TON-Bestimmung geschehen, für die das Öl periodisch entgast werden muss. Die in *Bild 2* dargestellten Kurven gelten für luftatmende Transformatoren, bei denen die Sauerstoffkonzentration im Gasraum des Ausdehners der der Luft (rd. 21 %) entspricht.

Ein neuer Weg würde sich eröffnen, wenn der technische Eingriff in den Gasraum stattfindet und den Sauerstoffgehalt senkt. Dann würde die Nachlieferung von Sauerstoff bei gegebener TON des Transformators nur durch den Sauerstoffgehalt des Gasraums bestimmt werden. In *Bild 3* ist der Verlauf ausgewählter Sauerstoffverbrauchsraten wie in *Bild 2* abhängig vom Sauerstoffgehalt (p_{O_2}) im Gasraum für einen Transformator mittlerer Offenheit (TON = 6) zu sehen. Der Sauerstoffgehalt im Gasraum muss stationär aufrechterhalten werden, um entsprechende Sauerstoffkonzentrationen im Öl zu erhalten. Der Nachhermetisierungseffekt kann erst eintreten, wenn im Transformator mit bekannter TON der atmosphärische Sauerstoffgehalt soweit gesenkt ist, bis die Sauerstoffkonzentration im Öl aufgebraucht ist. Ab diesem Zeitpunkt führt die fortgesetzte Absenkung des Sauerstoffgehalts im Gasraum zur Abnahme des OCR-Werts, womit der Nachhermetisierungseffekt beginnt. In *Bild 3* entspricht dieser Fall auf der OCR-Kurve 1 000 ppm O₂/Woche einem

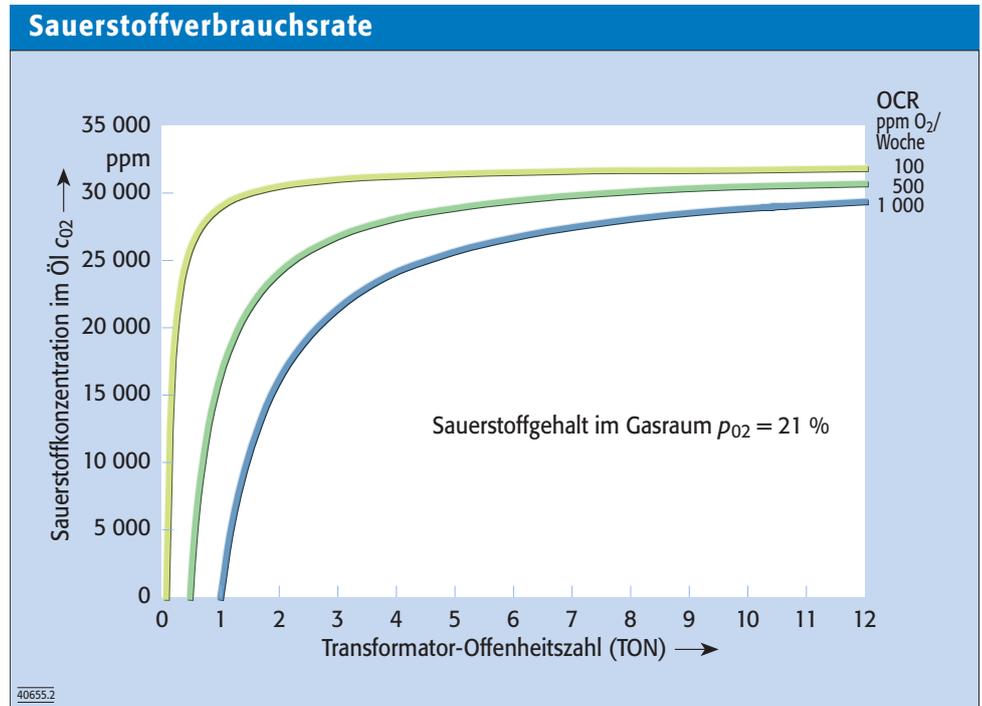


Bild 2. Verlauf ausgewählter Sauerstoffverbrauchsraten (OCR) von Transformatoren abhängig von der Offenheit [5]

Sauerstoffgehalt im Gasraum von 3,5 %. Das Nachhermetisierungsziel < 500 ppm O₂/Woche wird bei einem Sauerstoffgehalt unter 1,8 % erreicht. Soll der extreme Nachhermetisierungseffekt eines dichten Hydrokompensators von 100 ppm O₂/Woche erreicht werden, muss der Sauerstoffgehalt auf rd. 0,5 % gesenkt werden. In *Tafel 1* sind die notwendigen Sauerstoffgehalte für das Nachhermetisierungsziel abhängig von der Offenheit aufgeführt. Die Sauerstoffgehalte müssen um so tiefer gesenkt werden, je offener der betreffende Transformator ist.

Für Transformatoren der offenen Bauart ist das Nachhermetisierungsziel (< 500 ppm O₂/Woche) über den Gasraum erreicht, wenn die Sauerstoffkonzentration im Öl < 2 000 ppm beträgt und gleichzeitig die Sauerstoffgehalte im Gasraum den Werten nach *Tafel 1* entsprechen. Gegenüber der bisherigen Nachhermetisierung durch einen technischen Eingriff in das Ölsystem (TON-Absenkung lt. *Bild 2*) hat die neue Nachhermetisierung durch den technischen Eingriff in den Gasraum des Ausdehners (p_{O_2} -Absenkung lt. *Bild 3*) folgende Vorteile:

- keine Umbauten am Transformator, sondern einfache Ankopplung der Anlage an die Atmungsleitung,
- die Geschwindigkeit der Sauerstoffabsenkung sowie das Nachhermetisierungsniveau können schonend gestaltet werden und
- der Nachhermetisierungseffekt kann im Rahmen der qualitätsgesicherten Überwachung bewertet werden (O₂ und N₂).

Aus dem eingetretenen Nachhermetisierungseffekt kann die TON auch nachträglich für die Lebenslaufakte bestimmt werden.

Nachhermetisierung mit der Atmungspufferbox G3B

Die Umsetzung der theoretischen Annahme, dass die Sauerstoffgehalte im Gasraum des Ausdehners sta-

Tafel 1	
TON	p_{O_2} [%]
1	10,6
2	5,3
3	3,6
4	2,7
6	1,8
12	0,9

Tafel 1. Zur Erreichung des Nachhermetisierungsziels (500 ppm O₂/Woche) notwendige Sauerstoffgehalte im Gasraum (p_{O_2}) abhängig von der Offenheit TON

1) vollständige Sauerstofffreiheit wird in Anlehnung an Angaben für Transformatoren mit Stickstoffpolster bei einer Restsauerstoffkonzentrationen < 2 000 ppm angenommen.

tionär einstellbar sind, ist für den Praxiseinsatz zu aufwendig. Vielmehr bietet sich die Lösung an, den Gasraum zur Atmosphäre druckausgleichend zu verschließen. So wird erreicht, dass die Sauerstoffabnahme im Öl infolge der Alterung im Aktivteil durch Konvektion und Gasaustausch auch eine Sauerstoffreduzierung im Gasraum des Ausdehners bewirkt. Diese wirkt dann wieder auf das Öl zurück. Ähnlich wie in der in *Bild 3* dargestellten Kurve für OCR = 1 000 ppm O₂/Woche findet dann die weitere Sauerstoffabnahme bis zur Restkonzentration im Öl < 2 000 ppm statt. Der stationäre Endwert stellt sich unterhalb des Nachhermetisierungswerts lt. *Tafel 1* ein.

Eine technische Lösung ist die Atmungspufferbox G3B [6]. Sie besteht aus einem doppelwandigen Zylinder, wobei der äußere Zylinder mit der Atmungsleitung des Ausdehners und der bodenlose innere Zylinder mit dem Feuchteabsorber verbunden sind (*Bild 4*, blau). Die Box ist teilgefüllt mit Öl als Arbeitsmedium für Druckänderungen und als Diffusionssperre. Die G3B ist nicht absperrbar und hat zwei natürliche Endlagen der Ölspiegeldifferenzen, die die Kesselöltemperaturdifferenz kompensieren sollen. Diese Merkmale bewirken eine Trennung zwischen Innenluft im Gasraum des Ausdehners primärseitig zur atmosphärischen Luft auf der Sekundärseite der G3B. Der Druckabfall durch Sauerstoffverbrauch oder Abkühlung des Kesselöls kann die Absenkung des Ölspiegels des Innenzylinders bis in die untere Endlage zur Folge haben, so dass ein Druckausgleich mit trockener Atmosphärenluft eintritt. Infolge wird der verbrauchte Sauerstoff schrittweise durch Luft mit rd. 78 % Stickstoff ersetzt. Bei einer ausreichend großen OCR kann so schonend über viele Monate die Nachhermetisierung erreicht werden (natürliche Nachhermetisierung). Vorteilhafte Gestaltungen ergeben sich, wenn anstelle des Druckausgleichs mit trockener Atmosphärenluft dieser durch die Kombination mit einer N₂-Druckgasflasche (*Bild 4*, grün) vorgenommen wird (N₂-gestützte Nachhermetisierung).

Das G3B-System wird nach dem Ölvolumen und der Arbeitstemperaturdifferenz spezifiziert. Für ein größeres Ölvolumen wird es mit einer N₂-Druckgasflasche kombiniert

Sauerstoffverbrauchsrate

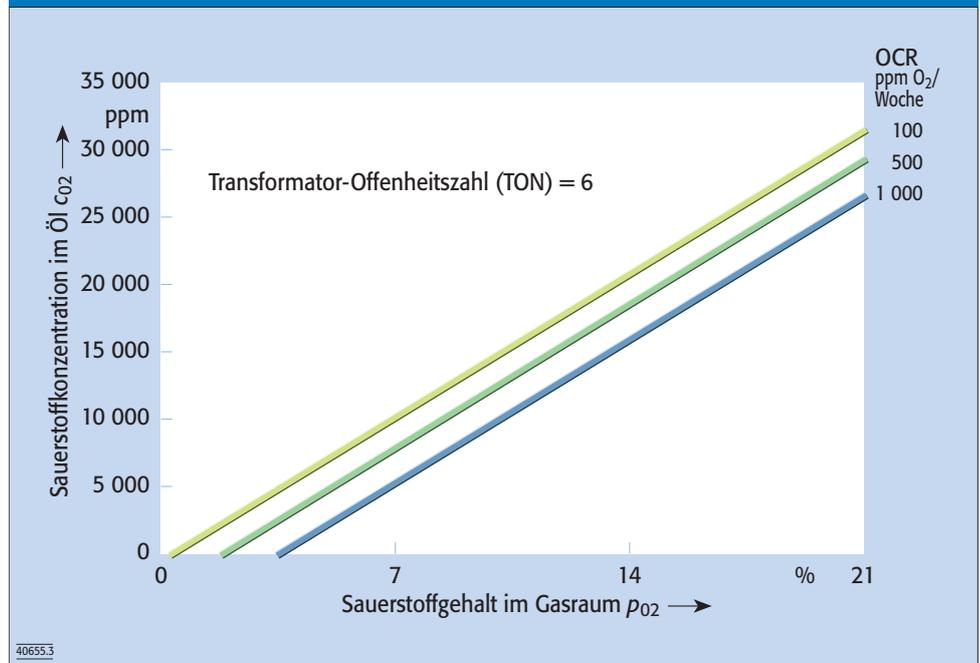


Bild 3. Verlauf ausgewählter Sauerstoffverbrauchsraten (OCR) abhängig vom Sauerstoffgehalt im Gasraum eines Transformators mittlerer Offenheit

(*Bild 4*, grün). Damit können die Grenzen der durch die Boxen auf natürliche Weise herbeigeführten Nachhermetisierung erweitert werden. Der Nachhermetisierungseffekt kann durch eine N₂-Spülung des Ausdehners während der Installation beschleunigt hergestellt werden.

Da die Atmungspufferbox G3B wartungsfrei, langlebig und kostengünstig ist, kann diese bei Neubautransformatoren in das Investitionsprojekt einbezogen werden. Der Nachhermetisierungseffekt stellt sich dann mit zunehmender Alterung (OCR-Anstieg) wie in allen anderen Fällen automatisch ein. Eine eventuell notwendige Stickstoffdosierung kann dann einfach nachgerüstet werden. G3B-Anlagen lassen sich einfach zu anderen Transformatoren umsetzen.

LITERATUR

- [1] Shroff, D. H.; Stannet, A. W.: A review of paper aging in power Transformers. IEE Proceedings, Volume 132, Nr. 6; Nov. 1985, S. 312 – 319.
- [2] DIN EN 60599 (VDE 0370-7): In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräteleitfäden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase.
- [3] ARS-Altman: Product range. Trafoseal, 2009.
- [4] Hoppadietz, F; Hoppadietz, K: Einrichtung zur Aufrechterhaltung der elektrischen Festigkeit von Isolierflüssigkeiten in elektrischen Hochspannungseinrichtungen und -geräten. Offenlegungsschrift DE 10 2005 054812 A1.
- [5] Bräsel, E.; Bräsel, O.; Sasum, U.: Neue Erkenntnisse zum Gashaushalt bei Transformatoren der offenen Bauart. ew Jg. 109 (2010), H. 14-15, S. 56 – 59.
- [6] Gatron GmbH: Verfahren zur Reduzierung der Luftzuführung aus der Atmosphäre in

Prinzipielle Anordnung

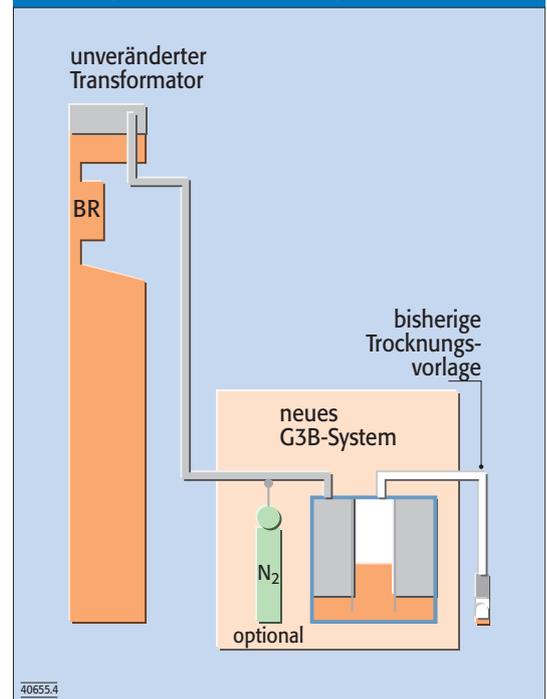


Bild 4. Prinzipielle Anordnung einer G3B-Anlage

das Ausdehnungsgefäß von mit Isolierflüssigkeit gefüllten Hochspannungsanlagen und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. EP 211 08 22.

- [7] Bräsel, E.; Sasum, U.; Aragon Patil, J.; Tenbohlen, S.: Improved Monitoring of Dissolved Transformer Gases on the Basis of a Natural Internal Standard (NIS). Cigré-Symposium, Bruegge, 2007.

(40655)

mail@gatron.de

www.gatron.de