



Quelle: EnergieNetz Mitte

Diagnostik von Transformatoren offener Bauart

Zuverlässige Diagnosen durch Korrektur der Gasverluste

von Olaf Bräsel, Eckhard Bräsel, Jens Pieper und Frank-Uwe Goldenbaum

Diagnostik von Transformatoren offener Bauart

Zuverlässige Diagnosen durch Korrektur der Gasverluste

Bei der Interpretation von DGA-Ergebnissen mit Fehlergasquotienten nach DIN EN 60599 sind Fehler durch H_2 - und CO -Verluste bei offenen Transformatoren möglich. Dies kann zu falschen Diagnoseaussagen führen. Mit einer mobilen Messanordnung (GER-Messung) können mögliche Gasverluste erfasst und entsprechend bei der Bewertung berücksichtigt werden. Die Autoren stellen dafür eine Messanordnung vor und zeigen an zwei Praxisbeispielen, welchen Einfluss bedeutende Gasverluste haben können.

Nach DIN EN 60599 [1] können bedeutende Diffusionsverluste der Fehlergase an Transformatoren der offenen Bauart alle Diagnosekriterien beeinflussen. Gesichert ist, dass in Abhängigkeit von der sich um eine Größenordnung unterscheidenden Offenheit (konstruktions- und betriebsweiseabhängig) deutliche Verluste nur bei den geringlöslichen Fehlergasen H_2 und CO auftreten [2].

Dies hat zur Folge, dass Konzentrationen und Bildungsraten dieser Gase niedriger angegeben werden. Ein Fehlerverdacht beschränkt sich dann auf die besserlöslichen Begleitgase. Problematisch sind dagegen Quotienten zur Bestimmung der Fehlerart, die aus dem Fehlergasmuster

gebildet werden. Bei deutlichen H_2 - und CO -Verlusten kann eine Korrektur durch Bestimmung der Gasemissionsrate (GER) eine zuverlässige Diagnose ermöglichen [3]. Das sichert die Nutzung der vorhandenen Quotientenkriterien für geschlossene Transformatoren.

Welches Risiko für Fehldiagnosen mit der Analyse der im Öl gelösten Gase (DGA) ohne Korrektur der H_2 - und CO -Verluste besteht, bleibt in der Diagnosepraxis unbekannt. Zur Aufklärung ist es erforderlich, den in der Norm verwendeten Begriff »bedeutende Diffusionsverluste« zu präzisieren. Erst dann wird es möglich, die Verluste zu bewerten und mögliche Veränderungen der Diagno-

seaussage darzustellen. Das wird mit GER-Messungen an zwei Praxisbeispielen dargestellt.

Präzisierte Darstellung bedeutender H_2 - und CO -Verluste

Verluste der Fehlergase H_2 und CO beeinflussen die mit diesen Gasen gebildeten Quotienten. Da diese Gase nur im Nenner vorkommen, bedeutet dies, dass aufgrund der Verluste die Quotienten durchweg steigen. Diese Quotienten werden zur Diagnoseaussage mit kleiner/größer Bezugswert verwendet. Steigen die Quotienten stark an, kann dies zu einer Veränderung der Diagnoseaussage führen. Erst dann wird ein deutlicher H_2 - oder CO -Verlust zu einem bedeutenden.

Tafel 1 zeigt in einem Diagnosespiegel den Einfluss bedeutender Gasverluste nach DIN EN 60599. Die betreffenden Fehlergasquotienten sind mit Bezugswert dargestellt. Angefügt sind die normkonformen Diagnoseaussagen der beiden zu vergleichenden Messverfahren.

Bedeutende H₂-Verluste verhindern, dass mit der DGA elektrische Fehler als solche im Aktivteil erkannt werden können. Diese werden stattdessen als thermische Fehler beziehungsweise Leck Laststufenschaltergefäß (LS-Leck) falsch diagnostiziert. Nur thermische Fehler ohne auffällige H₂-Konzentration (<50 ppm) lassen sich als solche zuverlässig diagnostizieren. Bedeutende CO-Verluste bewirken, dass der Abbau der Festisolation nicht erkannt wird. Ob die DGA eine veränderte Diagnoseaussage (> Bezugswert) liefert, ist von der tatsächlichen Offenheit abhängig und kann nur durch Vergleich mit den GER-Messungen geklärt werden.

GER-Messwagen

Die GER-Messung der Fehlergase H₂ und CO arbeitet mit einer zeitweiligen Diffusionssperre an der Atmungsleitung des Transformatorbessels. Die Anregung für diesen Messaufbau stammt aus den Erfahrungen mit installierten und überwachten Atmungspuffer-Box-(G3B)-Anlagen [4], die nun auch mobil in Leichtbauweise zur Verfügung stehen. Dazu wird das Puffervolumen einer Einzelbox mit einem Puffersack so vergrößert, dass damit effektiv das gesamte Atmungsvolumen des Transformators gespeichert werden kann.

Bild 1 zeigt die schematische Darstellung des Messwagens mit den Bausteinen Atmungspuffer-Box G3B (rechts), Puffersack (Mitte) und Online-Gasmonitor TGM (links). In **Bild 2** ist der fahrbereite Trailer zu sehen, der sich am Einsatzort am Transformator aufstellen lässt. Die G3B wird an die Atmungsleitung angeschlossen und der Puffersack mit Stickstoff gefüllt. Der TGM erhält zwei Anschlüsse: an der Ölprobenabnahmestelle des Transformators und im Gasraum des Ausdehners. Beide werden als Zirkulationsleitung ausgeführt. Der Messwagen ist für Transformatoren bis mindestens 50 t Öl ausgelegt, die Einsatzdauer beträgt ein bis drei Monate.

Mit dem installierten Messwagen hat der Transformator einen quasi drucklosen, geschlossenen Gasraum ohne Atmungsverlust. Fehlergasemissionen bewirken einen Anstieg bei den alternierenden TGM-Messungen im Kesselöl und im erweiterten Gasraum, die die Basis für die GER-Bestimmung sind. Der TGM ist auf das Fehlergasdreieck (FGT) zur gra-

Gasverluste		
Fehlergasquotient	bisherige Diagnose mit DGA (bedeutende H ₂ - bzw. CO-Verluste)	veränderte Diagnose mit GER-Messung (korrigierte H ₂ - bzw. CO-Verluste)
CH ₄ /H ₂	>1 thermischer Fehler: - T1 - T2 o. T3 (H ₂ > 50 ppm) - T3 mit C ₂ H ₂	<1 Teilentladung - T2 o. T3 mit Teilentladung - T3 mit elektrischem Fehler
C ₂ H ₂ /H ₂	>2 bis 3 Leck Laststufenschaltergefäß	<2 bis 3 elektrische Entladung
CO ₂ /CO	>3 ohne Fehlerbeteiligung von Festisolation	<3 mit Fehlerbeteiligung von Festisolation

Tafel 1. Einfluss bedeutender Gasverluste bei offenen Transformatoren nach DIN EN 60599

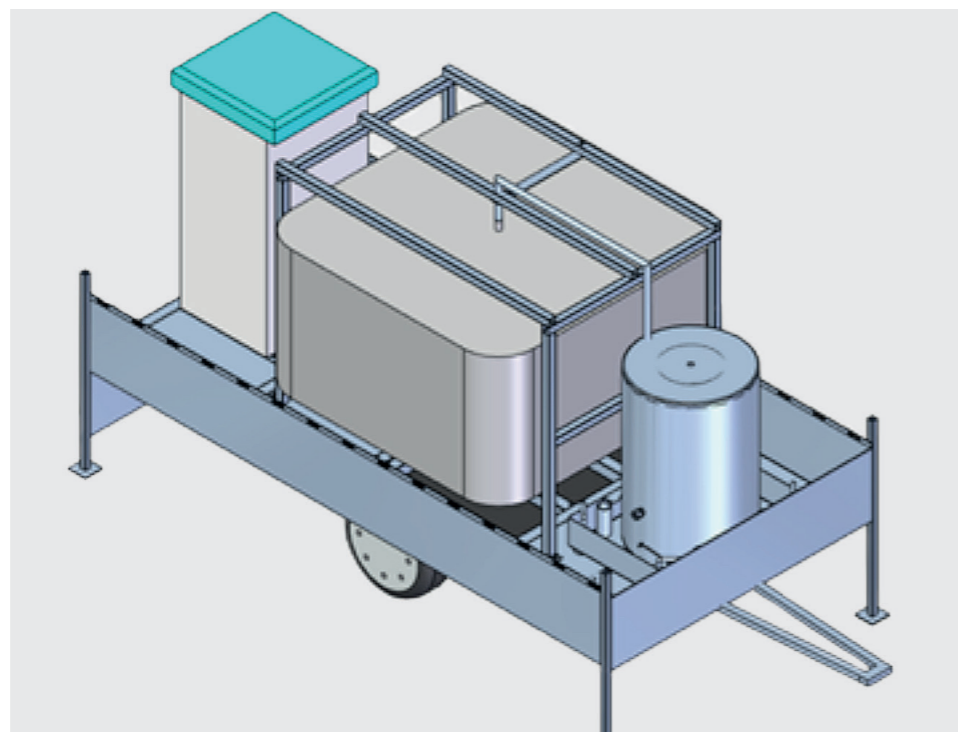


Bild 1. Schematische Darstellung des Messwagens



Bild 2. Fahrbereiter Trailer des Messwagens

zuverlässige Diagnose eines thermischen Fehlers >700 °C.

Die Konzentrationsverläufe sind für beide Transformatoren in **Bild 3** (Öl) und **Bild 4** (Gasraum) dargestellt.

Transformator T102

Am Transformator T102 soll gezeigt werden, welche Besonderheiten ein gasseitiger Fehlergaseintrag aus dem Laststufenschaltergefäß hat. Die Diagnose laut **Tafel 2** lautet: nicht mehr vorhandenes LS-Leck (öl- beziehungsweise gasseitig). Das steht im Widerspruch zum gasseitig offenen Ausdehner mit Betrieb des Lastschalters.

Der Messwageneinsatz zeigt im Kesselöl im Vergleich zu **Tafel 2** einen deutlichen H₂-Anstieg. Ein CO-Anstieg kann nicht festgestellt werden, was bedeutet, dass die Festisolation unbeteiligt ist. Bei den weiteren Fehlergasen einschließlich C₂H₂ lassen sich keine Konzentrationsänderungen erkennen.

Die Konzentrationsverläufe im mit dem Kesselöl verbundenen Gasraum zeigen einen noch deutlicheren H₂-Anstieg als im Öl. Das ist durch die rund zehnfache H₂-Konzentration gegenüber den anderen Fehlergasen im Gasraum bedingt. Mit Unterbinden des Atmungsverlustes bildet sich gerade hier der starke H₂-Anstieg heraus. Dieser wird durch die geringe Rücklöslichkeit ins Kesselöl unterstützt. Hier besteht eine Möglichkeit, den gasseitigen Eintrag vom ölseitigen zu unterscheiden. **Tafel 3** zeigt eine Gegenüberstellung nach dem Gleichgewichtskriterium. Bei den beteiligten Fehlergasen sind

c _i in ppm	T102		T101		
	Kessel	Lastschalter	Kessel		
	15.09.2014	11.02.2016	11.02.2016	10.11.2014	03.05.2016
H ₂	105	114	33 648	<10	16
O ₂	27 403	29 652	2 368	30 066	30 073
N ₂	62 604	60 676	11 330	65 115	63 668
CO	71	47	299	52	50
CO ₂	1 391	1 236	805	1 287	1 383
CH ₄	23	20	3 712	55	135
C ₂ H ₆	89	78	993	44	92
C ₂ H ₄	341	323	11 276	210	515
C ₂ H ₂	515	462	61 902	4	6
C ₃ H ₈	7	6	96	22	42
C ₃ H ₆	47	37	1 917	290	572
Lösungsdruck in mbar	947	938	945	992	976

Tafel 2. Ergebnisse der turnusmäßigen DGA-Messung an den ausgewählten Transformatoren

phischen Darstellung der Fehlerart [5] ausgerichtet und arbeitet deshalb mit der Monitoringsumme CH₄+ (ohne C₂H₂) anstelle der Einzelkohlenwasserstoffe.

Ausschlaggebend waren zuverlässige Aussagen zu den Ursachen beider Fehlergasmuster:

Zwei Beispiele der Praxiserprobung

Die Praxiserprobung fand an zwei vergleichbaren Netztransformatoren statt (40 MVA, 20 t Ölfüllung, offenes Ausdehnungsgefäß). **Tafel 2** zeigt die turnusmäßigen DGA-Ergebnisse der beiden auffälligen Transformatoren.

- Umspannwerk A, Transformator T102: gasseitig offenes Ausdehnungsgefäß (Kessel/Lastschalter), seit Jahren stagnierende Fehlergase (mit C₂H₂), zum Vergleich DGA vom Lastschalteröl
- Umspannwerk B, Transformator T101: stetige Fehlergasentwicklung der Kohlenwasserstoffe (ohne C₂H₂),

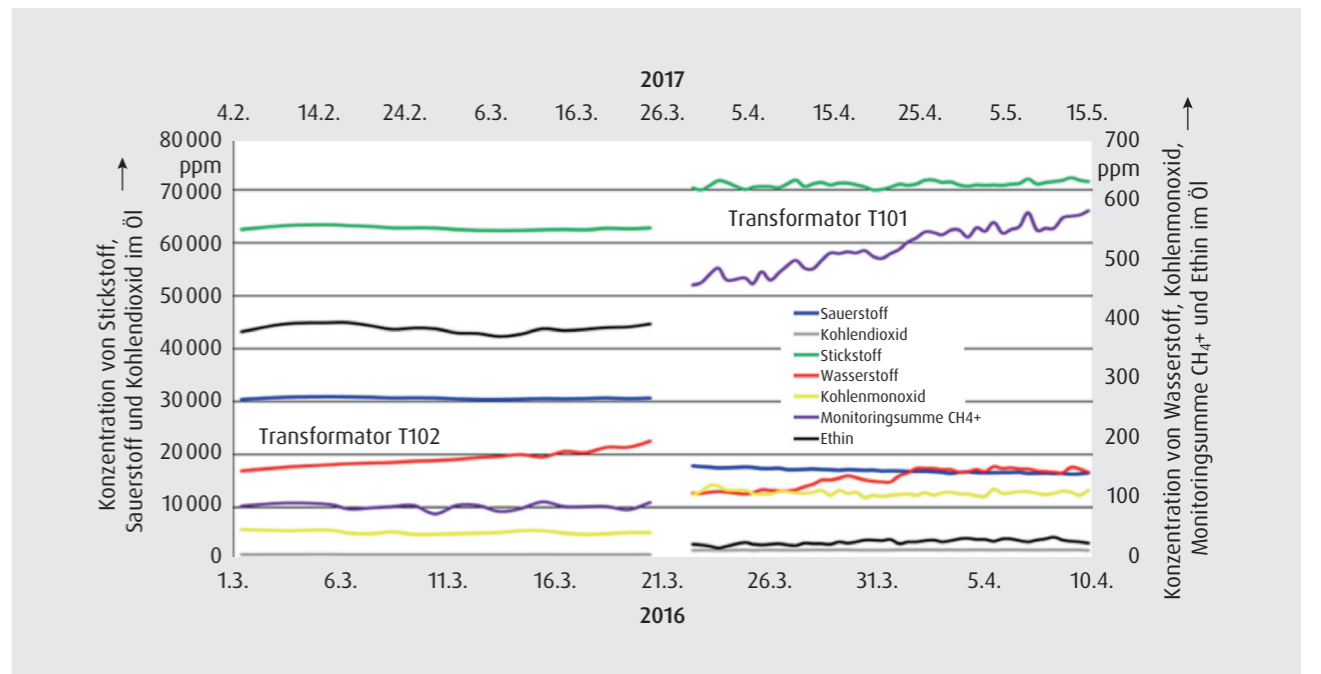


Bild 3. TGM-Gasmonitoring im Kesselöl

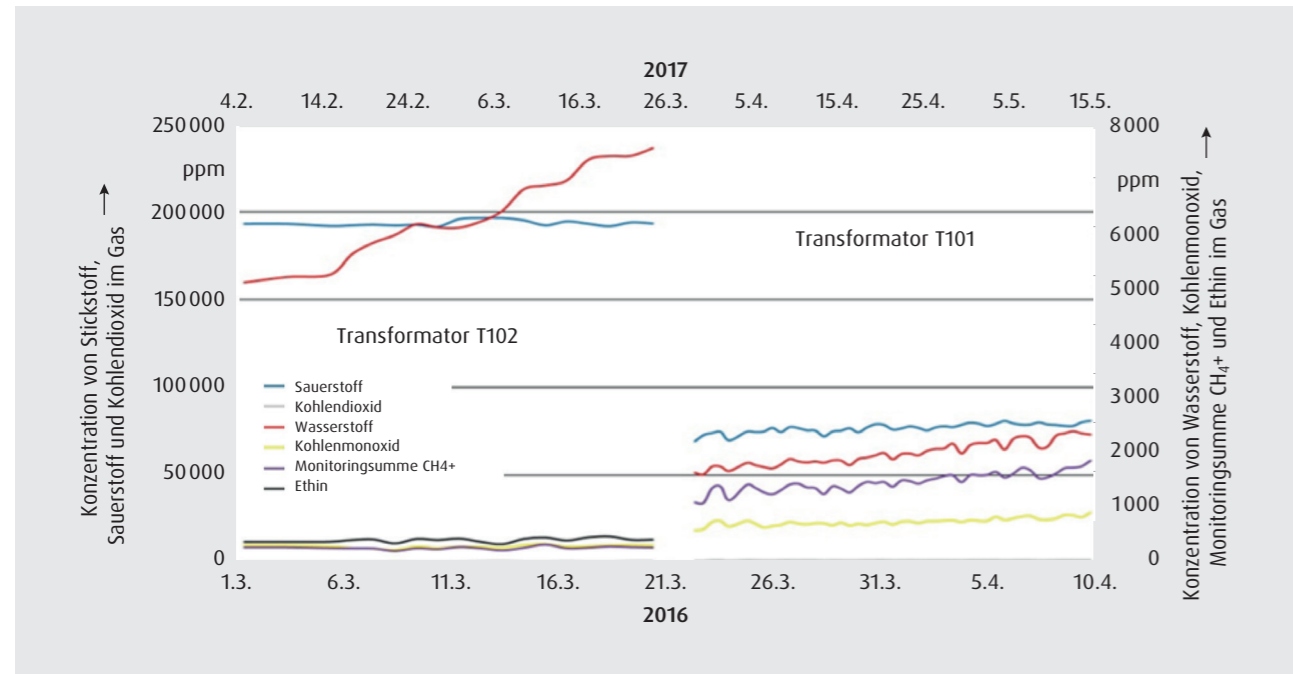


Bild 4. TGM-Gasmonitoring im Gasraum

die berechneten Ölkonzentrationen beim Transformator T102 höher als die gemessenen Werte. Die Unterschiede liegen bis auf H₂ im Bereich der Messfehler.

Zum Vergleich sind auch die Konzentrationen für Transformator T101 dargestellt. Hier sind die berechneten Ölkonzentrationen niedriger als die gemessenen. Die Unterschiede liegen hier aber für alle Fehlgase im Bereich der Messfehler.

Der deutlich höhere berechnete H₂-Wert am Transformator T102 bedeutet, dass der H₂-Eintrag ins Öl vom Gasraum ausgeht. Damit zeigt sich, wie geeignet das H₂-Gleichgewichtskriterium ist, um gasseitige Lecks im Ausdehner zu erkennen. Die Aussage »aktives gasseitiges Leck« korrigiert die Diagnose nach der DGA, die den stationären Zustand betrifft, der sich bei Gleichheit von gasseitigem Eintrag und Atmungsverlust herausbildet sowie im Kesselöl C₂H₂/H₂ > 2 – 3 erzeugt.

Wie wichtig eine vorangestellte Prüfung des Gleichgewichtskriteriums ist, um zuverlässig ein gasseitiges Leck zu erkennen, zeigen die Konzentrationsverläufe für Transformator T102. Im Unterschied zum ölseitigen LS-Leck täuscht bei der GER-Messung ein gasseitiges Leck eine elektrische Entladung im Aktivteil vor, die von der DGA unerkannt bleibt.

Schließt dagegen die Prüfung des Gleichgewichtskriteriums einen gasseitigen Fehlgaseintrag aus, kann die GER-Bestimmung zuverlässig die Zuordnung »ölseitiges LS-Leck« beziehungsweise »elektrische Entladung« mit dem FGT treffen. Erst an dieser Stelle ist das in der Norm enthaltene Leckkriterium C₂H₂/H₂ > 2 – 3 zuverlässig anwendbar.

Gleichgewichtsprüfung			
C _{FG} in ppm	Gas	Öl	Öl (ber. aus Gas)
T102			
H ₂	8000	200	400
CO	400	50	40
CO ₂	2000	2500	2400
CH ₄ ⁺	400	80	120
C ₂ H ₂	500	400	450
T101			
H ₂	2400	150	120
CO	1000	120	100
CO ₂	2000	2500	2400
CH ₄ ⁺	2000	600	600
C ₂ H ₂	<50	10	<5

Tafel 3. Gleichgewichtsprüfung beim Messwageneinsatz

stimmung zuverlässig die Zuordnung »ölseitiges LS-Leck« beziehungsweise »elektrische Entladung« mit dem FGT treffen. Erst an dieser Stelle ist das in der Norm enthaltene Leckkriterium C₂H₂/H₂ > 2 – 3 zuverlässig anwendbar.

Transformator 101

Am Transformator T101 soll der Messwageneinsatz den H₂-Verlust aufzeigen und demonstrieren, welchen Einfluss dieser auf die Bestimmung der Fehlerart hat. Transformator T101 zeigt im Vergleich zu **Tafel 2** einen deutlichen H₂-Anstieg

im Öl. Ein CO-Anstieg ist nicht festzustellen. Die Monitoringsumme CH₄⁺ (ohne C₂H₂) steigt stetig an. Im Gasraum steigt außer CH₄⁺ auch H₂. **Bild 5** zeigt für zwei ölbezogene Summenkonzentrationen der Fehlgase und mit den daraus berechneten GER-Werten [3] das Diagnoseergebnis: thermischer Fehler >700 °C (T3), was der Aussage der DGA mit H₂-Verlusten entspricht. Die Übereinstimmung der Diagnose ist darin begründet, dass der Quotient CH₄/H₂ bei rein thermischen Fehlern schon >1 beträgt. Dies wird durch H₂-Verluste noch unterstrichen.

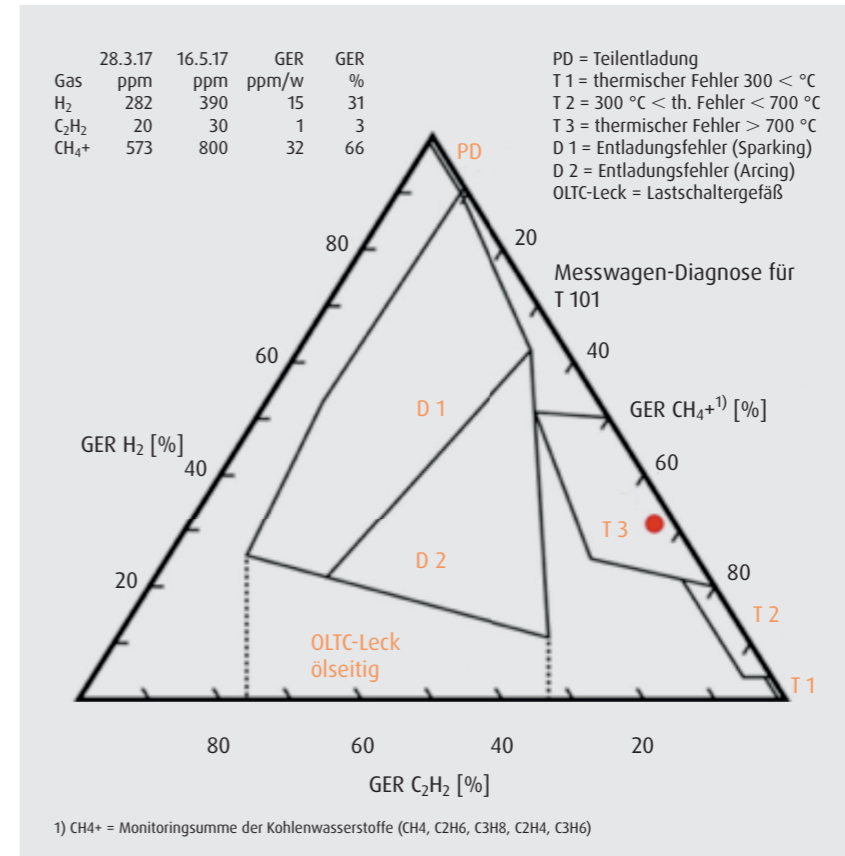


Bild 5. Messwagen-Diagnose für Transformator T101

Zusammenfassung

Die beiden Beispiele an offenen Transformatoren lassen folgende Aussagen zu:

- Der GER-Messwagen kann schnell und mit wenig Aufwand am sich in Betrieb befindenden Transformator installiert werden.
- Die GER-Messungen zeigen H₂-Anstiege im Öl und Gasraum für die vorher stagnierenden DGA-Konzentrationen, was deutliche H₂-Verluste sichtbar macht.
- Die Folge sind Anstiege der Quotienten:
 - C₂H₂/H₂ bei Transformator T102: von 0,025 (GER-Messung) auf 5 (DGA), flacher Ausdehner
 - CH₄/H₂ bei Transformator T101: von 1,5 (GER-Messung) auf 13 (DGA), zylindrischer Ausdehner
- Am Transformator T102 tritt eine Veränderung der Diagnoseaussage ein: von vorgetäuschter »elektrischer Entladung« (laut GER-Messung) zu

»LS-Leck« (laut DGA). Bei C₂H₂-Auffälligkeit ist die Prüfung des H₂-Gleichgewichts vor der GER-Bestimmung erforderlich.

Schlussfolgerungen

Beide Beispiele zeigen, dass deutliche H₂-Verluste auftreten – CO-Verluste sind bei Beteiligung der Festisolation zu erwarten. In einem Fall ist es ein bedeutender H₂-Verlust mit großem Anstieg des Gasquotienten, was eine Veränderung der Diagnoseaussage bedeutet.

Veränderungen der Diagnoseaussage durch bedeutende H₂-Verluste bewirken, dass keine elektrischen Fehler als solche diagnostiziert werden können. Das wirft die Frage nach der Häufigkeit bedeutender H₂-Verluste auf, die abhängig von der tatsächlichen Offenheit eines Transformators sind. Dabei spielen vor allem Transformatoren mit Flachausdehner eine Rolle. Eine Antwort kann nur die Praxiserfahrung mit den GER-Messungen und deren Gegenüberstellung mit den DGA-Ergebnissen geben. Darin sollten auch bedeutende CO-Verluste einbezogen werden. Weitere Schlussfolgerungen lassen sich erst dann ziehen.

Literatur

- DIN EN 60599 (VDE 0370-7):2008-02: In Betrieb befindliche, mit Mineralöl im prägnierte elektrische Geräte – Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase.
- Bräsel, E.; Bräsel, O.; Sasum, U.: Neue Erkenntnisse zum Gashaushalt von Transformatoren. ew 14-15/2010, S. 56 – 59.
- Bräsel, E.; Bräsel, O.: Präzisierte DGA-Kriterien für die Transformatorendiagnostik. ew 6/2015, S. 64 – 67.
- Bräsel, E.; Bräsel, O.: Einfluss des Abschlussystems von Transformatoren. ew 13/2013, S. 76 – 80.
- Bräsel, E.; Sasum, U.: Universelles Fehlergasdreieck für die Transformatorendiagnostik. ew 17-18/2009, S. 70 – 75.

- >> Dr. rer. nat. **Olaf Bräsel**, Geschäftsführer, Gatron GmbH, Greifswald
- Dr. rer. nat. **Eckhard Bräsel**, Seniorberater, Gatron GmbH, Greifswald
- Dipl.-Ing. **Jens Pieper**, Betriebsingenieur, Energienetz Mitte GmbH, Kassel
- Dipl.-Ing. **Frank-Uwe Goldenbaum**, Betriebsingenieur, Edis Netz GmbH, Demmin
- >> mail@gatron.de
- >> www.gatron.de
www.energienetz-mitte.de
www.e-dis.de

Dr. Klaus Scheil Ingenieurbüro Transformatoren

Kompetent und erfahren

- bei der Beantwortung praktisch aller Fragen zur Prüfung, Zustandsbewertung und zum sicheren Betrieb von Transformatoren aller Bauarten und Drosselspulen
- bei der Realisierung damit im Zusammenhang stehender Aufgaben

Immer konsequent kundenorientiert!

Kontakt:
 Mobil: +49(0)151 28999584
 Tel.: +49(0)345 5505493
 Email: klaus.scheil@ks-sib-trafo.de