

Gashaushalt bei Transformatoren der offenen Bauart

# Neue Erkenntnisse

New Knowledge about the Gas Household of Open Type Transformers

Mit qualitätsgesicherten Rücksättigungsmessungen des Luftstickstoffs nach Ölentgasungen lässt sich die Transformator-Offenheitszahl (TON) ermitteln, die über eine Größenordnung hinweg offene Transformatoren unterscheidbar werden lässt. Mit der TON können die Sauerstoffverbrauchsrate als individuelle Kennung der Oxidation des Isolationsystems sowie die Gasemissionsraten für Wasserstoff und Kohlenmonoxid zur Bewertung der Aktualität und Art des Fehlers bestimmt werden.

## SUMMARY

The transformer openness number (TON) can be determined using quality based re-saturation measurements of air nitrogen after oil degassing. This offers the chance to distinguish the gas household of open type transformers beyond more than factor 10. The TON allows the oxygen consumption rate to be determined as an individual measure of the oxidation of the insulating system. It also enables the gas emission rates of H<sub>2</sub> and CO to be used for the determination of the presence and type of a fault.

In Transformatoren der offenen Bauart besitzt das Isolieröl über das Ausdehnungsgefäß direkten Kontakt zur atmosphärischen Luft. In Europa ist das die dominierende Bauart. Der Gasaustausch an der Öloberfläche im Ausdehnungsgefäß sowie die Konvektion zwischen Kessel- und Ausdehneröl führen zum Lufteintrag in den Aktivteil. *Bild 1a* veranschaulicht diesen Lufteintrag in das entgaste Öl eines offenen Transformators anhand von Stickstoff und Sauerstoff. Nach ausreichender Zeit wird der Sättigungszustand erreicht, der auch in DIN EN 60567 [1] benutzt wird, um Laborstandards für die Gas-in-Öl-Analyse ( $c_{N_2} = 64\,000$  ppm,  $c_{O_2} = 31\,000$  ppm) herzustellen. Wird der Sättigungswert für Sauerstoff im Transformator nicht erreicht – wie hier im Beispiel – so wird von einer Absenkung gesprochen, die durch einen gleichzeitigen Sauerstoffverbrauch begründet ist. Bei der Bewertung von Transformatorgasen nach DIN EN 60599 [2] wird eine relative Sauerstoffabsenkung von  $O_2/N_2 < 0,3$  pauschal auf Oxidationsreaktionen zurückgeführt. Eine Handlungsvorgabe wird daraus nicht abgeleitet.

In *Bild 1a* ist auch der Eintrag ausgewählter Fehlergase in das Öl zu sehen. Die Überwachung der im Aktivteil entstehenden Fehlergase geschieht im Unterschied zu den Luftkomponenten in sehr niedrigen Konzentrationsbereichen. Bei entsprechender Bildungsrate und guter Öllöslichkeit steigen sie wie im Falle von Kohlendioxid stetig an. Analoges würde auch auf die Kohlenwasserstoffe zutreffen. Dagegen werden die gering öllöslichen Fehlergase Wasserstoff und Kohlenmonoxid durch den für den Lufteintrag verantwortlichen Mechanismus entgegengesetzt aus den Aktivteil ausgetragen. Im Unterschied zum

Kohlendioxid erreichen die beiden gering öllöslichen Gase dadurch stationäre Niveaus. Darauf aufbauende Bewertungen einer nur geschlossenen Transformatoren gewidmeten Norm, vor allem die, dass keine Fehlergasemission vorliegt, sind dann unzutreffend. Eine Anmerkung in Pkt. 6.1 der Norm räumt allerdings Einflüsse der offenen Bauart ein, die dann alle Kriterien beeinflussen.

Eine exakte Lösung auf Basis der Messung der Ölströmung zwischen Kessel und Ausdehner sowie des Einsatzes von Kalibriergasen, um zeitnah den Gashaushalt eines einzelnen Transformators zu korrigieren [3], ist wenig praxistauglich. Vielmehr muss die Vergleichbarkeit der Transformatoren über Näherungslösungen zur Bilanzgleichung des Gashaushalts [4] im Vordergrund stehen. Beobachtungen zum Gasaustauschverhalten von entgasten offenen Transformatoren mit der Atmosphäre sind schon diskutiert worden [5]. Das zugrunde liegende Onlinegasmonitoring ist gut geeignet, die Quantifizierung der offenen Bauart zu ermöglichen, um das Verhalten von Sauerstoff und Fehlergasen darstellen zu können.

## Quantifizierung der offenen Bauart

Der für das Onlinegasmonitoring eingesetzte Transformator-Gasmonitor TGM der Gatron GmbH ist ein kontinuierlich arbeitender Headspace-Analysator mit hoher Genauigkeit (N<sub>2</sub>IS based – Qualitätskriterium [6]). Auf Basis von TGM-Messungen liegen achtjährige Erfahrungen zum Gashaushalt von Transformatoren der offenen Bauart vor, die besagen, dass das Inertgas Stickstoff anhand seines Sättigungsverhaltens zur Quantifizierung der offenen Bauart nutzbar ist.

Für eine Quantifizierung der offenen Bauart ist der Zeitverlauf von der Entgasung bis zur Sättigung mit Luftstickstoff von grundlegender Bedeutung. *Bild 1* veranschaulicht die TGM-Betriebsdiagramme für eine Rücksättigungsmessung, die dort aufgenommen werden kann, wo Neuinbetriebnahmen mit dem entgasten Zustand stattfinden bzw. wo Entgasungen zur Ölbehandlung stattgefunden haben. Im Beispiel ist eine Rücksättigung zu sehen, die rd. ein Jahr gedauert hat. Ohne prägenden Einfluss bleiben die Leistungs-

änderungen und die durch den Sommer-Winter-Wechsel geprägten Öltemperaturänderungen. Die N<sub>2</sub>-Verläufe von bisher 29 Transformatoren offener Bauart sind mit Rücksättigungsmessungen ausgewertet worden. Dabei wurden deutliche Unterschiede in der Zeitdauer der Rücksättigung bzw. in der Anstiegsrate im Anfangszeitraum festgestellt. In Bild 2 sind für die beiden Extreme die Unterschiede anhand der N<sub>2</sub>-Rücksättigungslinien abgebildet. Die Verläufe sind von den konstruktiven Merkmalen des Transformators, den Aufstellungsbedingungen sowie seiner Grundfahrweise beeinflusst. Übereinstimmende Wiederholungsmessungen nach Jahren bzw. die gute Vergleichbarkeit alters-, typ- und betriebsgleicher Transformatoren weisen eine gute Eignung der N<sub>2</sub>-Rücksättigungsmessung zur Quantifizierung der Offenheit auf. Die Normierung der N<sub>2</sub>-Rücksättigung auf den am wenigsten offen ermittelten Transformator führt zur Transformator-Offenheitszahl (TON), die eine dimensionslose Maßzahl für die Quantifizierung der offenen Bauart darstellt. Sie ist individuell und ermöglicht die Beschreibung sowohl des Transports der atmosphärischen Gase in den Kessel als auch den der Fehlertgasen in den Ausdehner. Für die untersuchten Transformatoren liegen die TON zwischen 1 (wenig offen) und 11,8 (sehr offen). Im Vergleich dazu haben TGM-Messungen für Transformatoren mit dichtem Air Bag für TON ≈ 0,01 ergeben. Der große Unterschied zwischen geschlossenen und offenen Transformatoren fordert heraus, nach den Kriterien der DIN EN 60599 den Einfluss auf die Bewertung zu prüfen. Mit der TON ist es erstmals möglich, aus stationären Gaskonzentrationsniveaus Gasverbrauchs- bzw. Gasemissionsraten (GER) zu bestimmen.

### Bestimmung der Sauerstoffverbrauchsrate (OCR)

In Bild 2 sind auch die aus den beiden Stickstoffverläufen berechneten theoretischen Sauerstoffverläufe zu sehen. Real werden abgesenkte Sauerstoffkonzentrationen festgestellt. Die in der Norm angegebene Sauerstoffabsenkung von O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> < 0,3 entspricht < 20 000 ppm O<sub>2</sub> bei Stickstoffsättigung. Aus der Differenz zwischen berechneter und gemessener

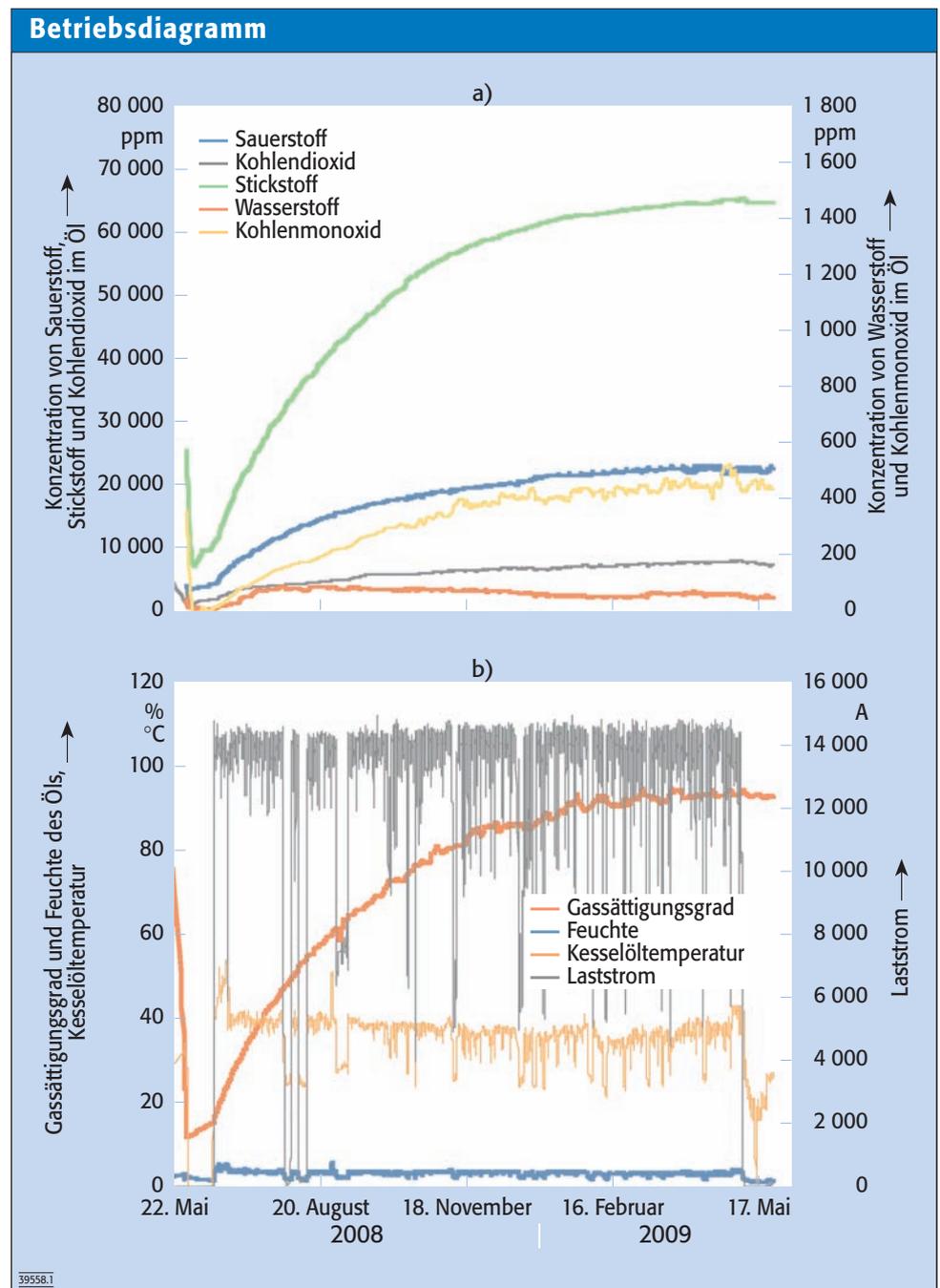


Bild 1. TGM-Betriebsdiagramme für eine Rücksättigung nach Entgasung

sener Sauerstoffkonzentration lässt sich unter Einbeziehung der TON die OCR bestimmen. Bild 3 enthält die berechneten OCR-Werte (ppm O<sub>2</sub>/Woche) als Funktion von TON und c<sub>O<sub>2</sub></sub>, die für die untersuchten Transformatoren zwischen 3 ppm O<sub>2</sub>/Woche (Neuinbetriebnahme) und 2 856 ppm O<sub>2</sub>/Woche (gestresster Industrietransformator) liegen. Die Transformatoren mit den beiden höchsten TON-Werten (8,2 bzw. 11,8) besitzen einen Flächenausdehner (bahnprofilgängig).

Nach Einschätzung der Verfasser beginnt mit c<sub>O<sub>2</sub></sub> < 28 000 ppm der Verdacht erhöhter Oxidationsreaktionen (OCR > 500 – 1 000 ppm O<sub>2</sub>/Woche). Die genaue Bestimmung mit einer bekannten TON ist dann zu empfehlen. Es ist die 20 000 ppm O<sub>2</sub>-Linie eingetragen,

unterhalb der lt. Norm verstärkte Oxidationsreaktionen des Isolationsystems ablaufen sollen. Der Vergleich mit den eingetragenen OCR-Zahlen der untersuchten Transformatoren verdeutlicht, dass nach der Norm nur rd. 50 % der Transformatoren mit erhöhtem Sauerstoffverbrauch von über 500 ppm O<sub>2</sub>/Woche erfasst werden. Vor allem bleibt dadurch die Situation der offeneren Transformatoren unberücksichtigt. Die individuelle OCR-Kennung ermöglicht nicht nur die vollständige Erfassung von erhöhten Oxidationsreaktionen sondern auch deren Differenzierung. Erhöhte Oxidationsreaktionen sollten Anlass geben, eine Nachhermetisierungsmaßnahme zur Substanzerhaltung zu prüfen. Die Wirksamkeit einer solchen

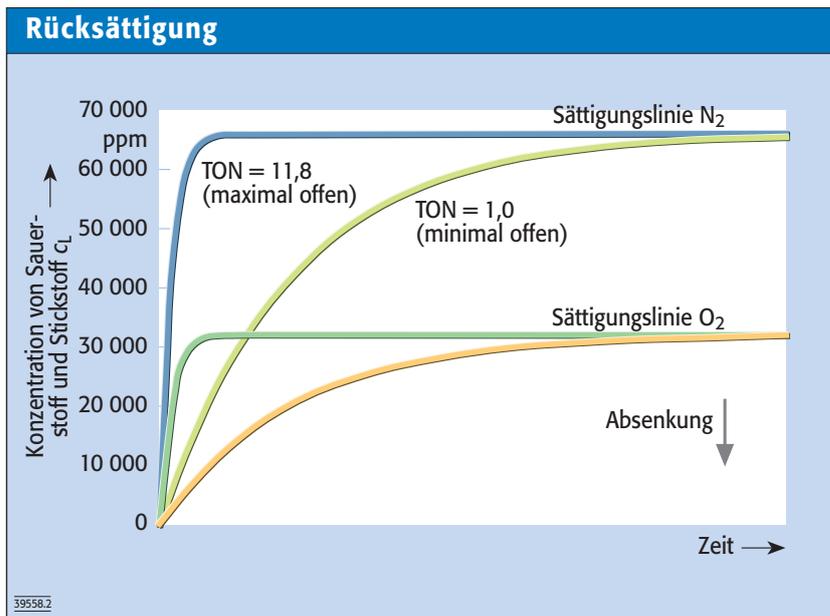


Bild 2. Rücksättigung in Transformatoren der offenen Bauart

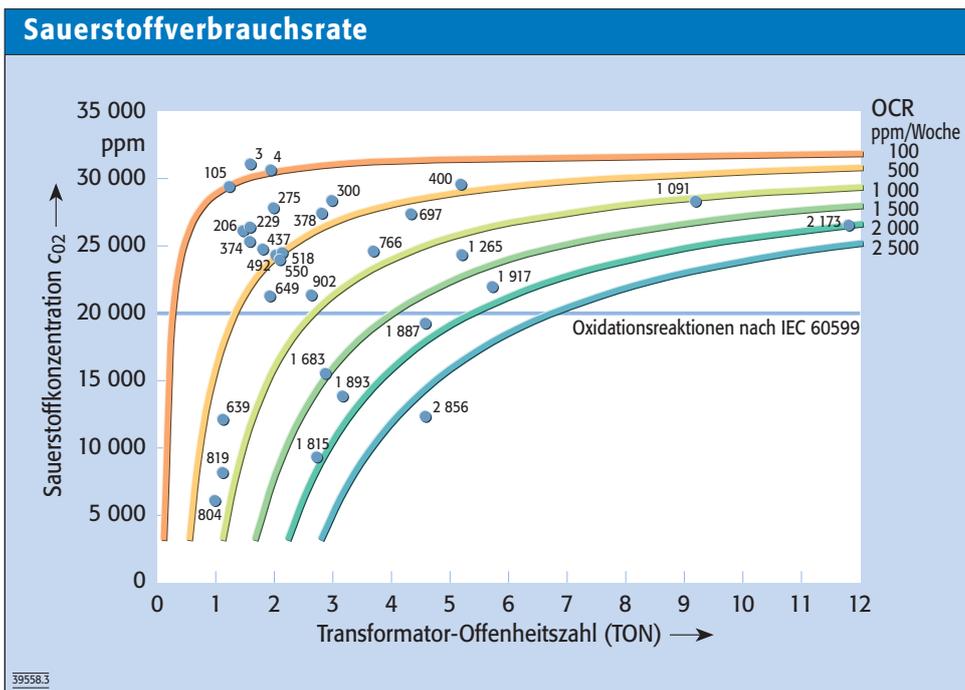


Bild 3. Sauerstoffverbrauchsrate (OCR) von Transformatoren der offenen Bauart

Maßnahme wird sichtbar, wenn eine OCR-Linie abwärts verfolgt wird. Der gegebene OCR-Wert eines Transformators bewirkt mit abnehmender TON ein Absinken von  $c_{O_2}$ . Da wo die OCR-Linie die TON-Achse schneiden wird, ist  $c_{O_2} = 0$ . Nur wenn dieser TON-Wert durch die Nachhermetisierung unterboten werden kann, tritt eine Abnahme des OCR-Werts ein. Deshalb ist die Abwesenheit von Sauerstoff

nicht ausreichend als Kriterium der Hermetisierung, sondern der unterbundene Zutritt muss zusätzlich kontrollierbar sein.

In Bild 4 wird ein Praxisbeispiel für eine Nachhermetisierung vorgestellt. Vor dem Abschluss einer Rücksättigung wird in die Verbindungsleitung Kessel/Ausdehner eine Diffusionssperre eingebracht. Die Wirksamkeit wird durch den stagnierenden  $N_2$ -Verlauf (Zutritts-

kontrolle) angezeigt. Dagegen verschwindet der  $O_2$ -Gehalt mit linearer Geschwindigkeit. Die Übereinstimmung des berechneten mit dem gemessenen OCR-Wert ist gut. Es wird auch sichtbar, dass während der Nachhermetisierung die Fehlergase  $H_2$  und  $CO$  steigen. Nach Wiederöffnen der Diffusionssperre kommt es zu den erwarteten Verläufen.

### Bestimmung der GER gering öllöslicher Gase

Auf Basis der TON kann der funktionale Zusammenhang zwischen Fehlergaskonzentration  $c_{FG}$  und GER hergestellt werden. Anhand auffälliger  $c_{FG}$ -Werte und mit durch Nachhermetisierung bestimmten GER-Werten sind die Kurven für Wasserstoff und Kohlenmonoxid orientierend entstanden (Bild 5). Es wird ersichtlich, dass beispielsweise eine gemessene Wasserstoffkonzentration von 500 ppm abhängig von der Offenheit des Transformators GER-Werten von 5 bis 100 ppm/Woche entsprechen kann. Vor allem bei mehr offenen Transformatoren können anhand der Wasserstoffkonzentration die Intensität einer Teilentladung einschließlich Gasalarmrisiko sowie die Fehlerart durch Quotientenbildung mit gutlöslichen Fehlergasen falsch bewertet werden. Die Bestimmung der GER-Werte verbessert die Diagnoseaussage. Damit kann die Aktualität und das Ausmaß in folgenden Fehlersituationen dargestellt werden: Teilentladung, Unterscheidung zwischen elektrischer Entladung im Aktivteil und Einfluss eines Lastschalterlecks sowie die Beteiligung der Festisolation. Mit  $c_{H_2} > 40$  ppm ( $c_{CO} > 400$  ppm) beginnt nach Einschätzung der Verfasser der Fehlerverdacht ( $GER > 5$  ppm  $H_2$ /Woche bzw.  $> 20$  ppm  $CO$ /Woche). Die genaue Bestimmung mit bekannter TON ist dann zu empfehlen. Die angegebenen GER-Werte entsprechen gut den Vorgaben der Norm. Praxisbeispiele für die Quotienten von gut öllöslichen mit gering öllöslichen Fehlergasen ( $C_2H_2/H_2$ ,  $CO_2/CO$ ) zeigen mit GER-Werten zutreffende Diagnosen. Konzentrationsquotienten können dagegen bis Faktor 10 zu hoch sein. Analoges muss für jedes Diagnoseschema, an dem Wasserstoff beteiligt ist, beachtet werden.

## Empfehlungen zur praktischen Umsetzung

Bei Berücksichtigung der offenen Bauart von Transformatoren anhand der TON können diese deutlich verbessert diagnostiziert werden. Mit der TON wird anstelle eines Richtwerts für die Sauerstoffkonzentration erstmals mit dem Sauerstoffverbrauch eine individuelle Kennung für die Oxidation des Isolationssystems gefunden, die für Maßnahmen zur Substanzerhaltung benutzt werden kann. Aus den durch die TON beeinflussten Wasserstoff- und Kohlenmonoxidkonzentrationen werden erstmals deren GER bestimmbar, die sowohl die Aktualität eines Fehlers erkennen, als auch die Fehlerart ermitteln lassen.

Die Betreiber von Transformatoren sollten jeden entgasten Ölzustand wie Neuinbetriebnahme oder Ölbehandlung nutzen, um die Rücksättigung zur TON-Bestimmung analytisch zu erfassen. Neben dem TGM-Einsatz zur Onlineüberwachung ist auch die manuelle Überwachung mit Gatrons EGS-Methode möglich. Bei auffälligen offenen Transformatoren sollten die zusätzlichen Kosten einer Entgasung und der Mehraufwand für die Überwachung der Rücksättigung nicht gescheut werden, erhält der Betreiber von Transformatoren dafür doch verbesserte Aussagen zum Zustand, um die richtigen Entscheidungen treffen zu können. In den nächsten Jahren ist zu erwarten, dass Statistiken der unterschiedlichen Merkmale der Transformatorbauart und -betriebsweise sowie der dazugehörigen Rücksättigungsverläufe die Einstufung der Transformatoren nach der TON für Näherungsaussagen zulassen werden.

Für auffällige Transformatoren ohne Rücksättigungsdaten gibt es eine Alternative zur Entgasung, die Nachhermetisierung. Der offene Transformator wird zum geschlossenen, und damit lassen sich die GER von  $H_2$  und CO direkt bestimmen (analog Bild 4). Dieser Weg hat gerade bei alternden Transformatoren den Vorteil, dass die Kosten und die Zeit für eine Entgasung und Rücksättigung schon in die Maßnahme zur Substanzerhaltung investiert werden können. Für statistische Zwecke können nachträglich die Offenheit und der Sauerstoffverbrauch berechnet werden.

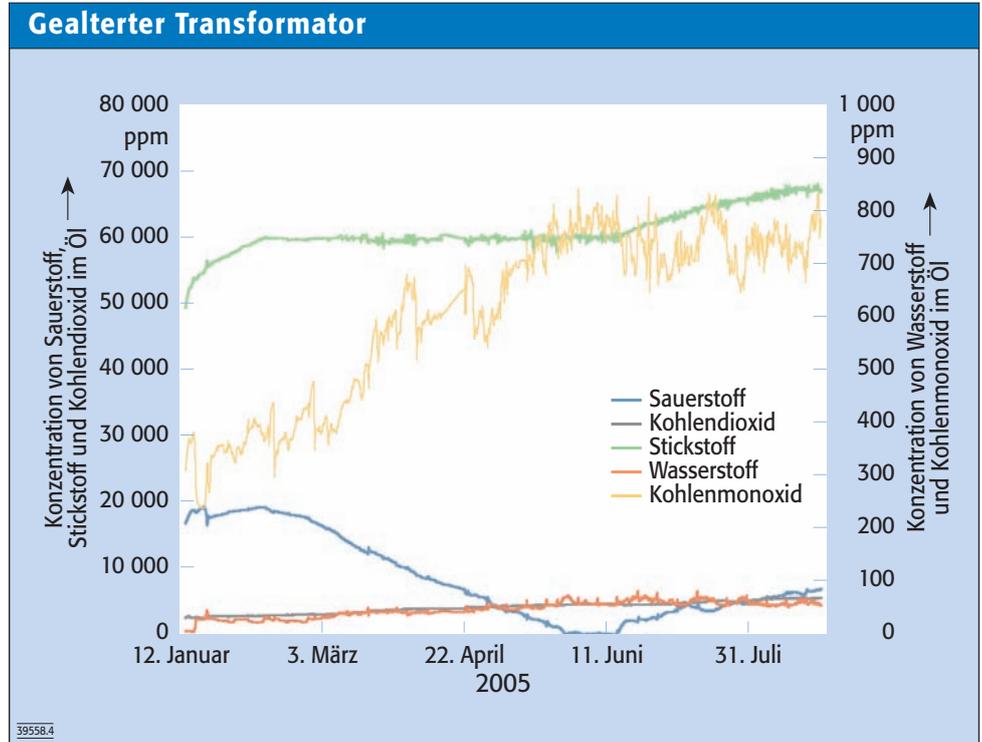


Bild 4. Gemessene Sauerstoffabsenkung an einem gealterten Transformator

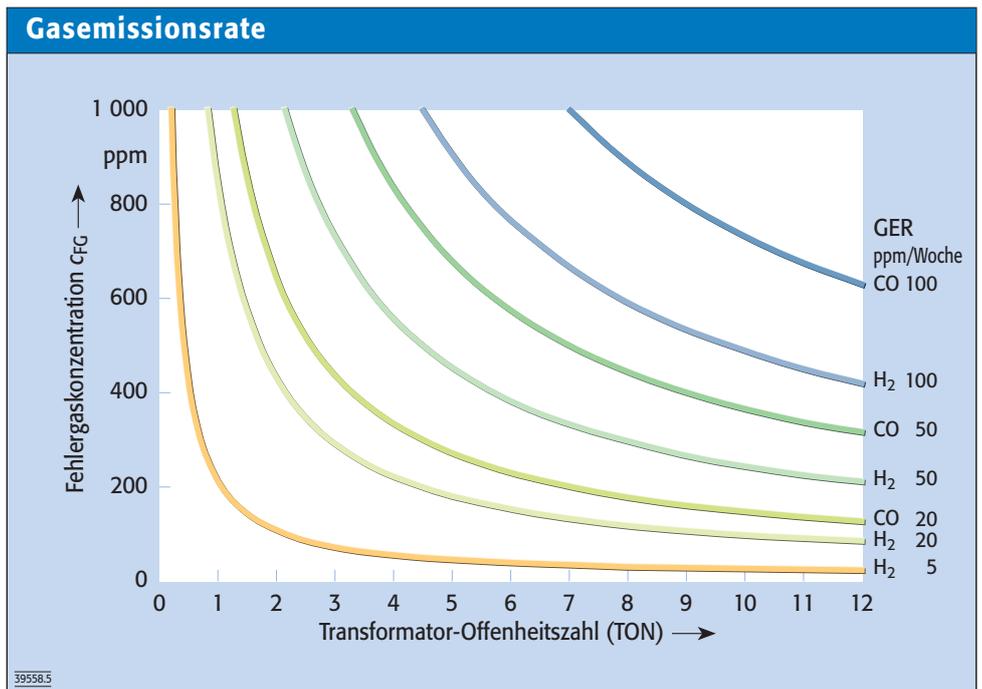


Bild 5. Gasemissionsrate (GER) gering öllöslicher Fehlertgase

## LITERATUR

- [1] DIN EN 60567 (VDE 0370-9): Anleitung für die Probenahme von Gasen und von Öl aus ölfüllten elektrischen Betriebsmitteln und für die Analyse freier und gelöster Gase.
- [2] DIN EN 60599 (VDE 0370-7): In Betrieb befindliche, mit Mineralöl imprägnierte elektrische Geräte – Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase.
- [3] Altmann, J.: Quantitative measurement of production and consumption of gases in power transformers. US-Patent 7,474,186B2, 6. Januar 2009.
- [4] Bräsel, E.: Zur analytischen Überwachung des Gashaushalts von Öltransformatoren. VGB-Tagung »Chemie im Kraftwerk«, Essen, 1998.
- [5] Daemisch, G.: Einsatz von Online-Gasüberwachung in der Praxis, insbesondere im Hinblick auf Substanzbestimmung und Fehlereingrenzung. ETG-Konferenz, 19. – 20. September 2006, Kassel.
- [6] Die Qualitätskontrolle von Gasanalysen im Öl mit dem natürlichen inneren Standard (NIS). Gatron-Flyer, 2005.
- [7] ARS-Altman, Product range: Trafoseal, 2009.

(39558)

mail@gatron.de

www.gatron.de