

# **Erste Erfahrungen mit der Online-Überwachung des Gashaushaltes von Öltransformatoren**

Bräsel, E.; GATRON GmbH, Greifswald

## **1. Einleitung**

Für die Zustandsüberwachung von Öltransformatoren gibt es zur Analyse der Transformatorgase bisher keine Alternative. Erst wenn während des Betriebes Befunde erhalten werden, kommen technische Diagnoseverfahren, überwiegend im abgeschalteten Zustand, zum Einsatz, um Ausmaß und Lokalisierung des Fehlers festzustellen.

Diese herausragende Rolle der Transformatorgase ist durch Laboranalysen geprägt worden, die die weltweit verbreitete Überwachungsmethode darstellen [1]. In Normen sind die Probenahme und Analytik (z. B. DIN EN 60567) sowie die Bewertung (z. B. DIN EN 60599) für die Routineüberwachung geregelt. Diese Normen gelten für alle gerätetechnischen und methodischen Neuentwicklungen (Labor, in situ, online) als Bezug.

Obwohl Ringversuche mit Gas-in-Öl-Standards eine ausreichende Genauigkeit für Laboranalysen ausweisen [1], bleibt der Einfluß der Probenahme bisher verborgen.

In den letzten Jahren ist Online-Gerätetechnik entwickelt worden, die auf die Ergebnisse von Laboranalysen kalibriert wird und eine Real-Time Überwachung ermöglicht. An gesunden Transformatoren kommen Fehlerfrühwarngeräte auf Basis des im Öl gelösten Wasserstoffs und an auffällig gewordenen Transformatoren Vollanalysengeräte für im Öl gelöste Fehlergase zum Einsatz.

Die GATRON GmbH hat auf dem Micafil-Symposium 2002 das Real-State Gas-Monitoring vorgestellt, das erstmalig auf Basis des Originalfehlergases Transformatordiagnosen ermöglichen soll. Die meßtechnische Realisierung erfolgt durch den Trafo-Gasmonitor TGM, der von Laboranalysen unabhängig kalibrierbar ist.

Die nunmehr zweijährigen Erfahrungen mit der Online-Überwachung des Gashaushaltes werden vorgestellt und damit die Leistungsbereiche des Real-State Gas-Monitoring deutlich gemacht.

Daraus werden Schlußfolgerungen gezogen, die über die Zusammenhänge des Gashaushaltes zu einer ganzheitlichen Überwachung führen.

## 2. Betriebserfahrungen mit dem Real-State Gas-Monitoring

Mit der Monitoring-Variante des Trafo-Gasmonitor TGM-M begann im November des Jahres 2001 die Praxiserprobung, die schrittweise auf 6 Großtransformatoren ausgedehnt werden konnte. Die TGM-M-Erprobung ist erfolgreich abgeschlossen [2] und hat zu einem leistungsfähigen und zuverlässigen Serienprodukt geführt. Weiterentwicklungen dieses Produktes werden mit der Diagnostik-Variante TGM-D und einer mobilen Variante TGM<sub>mobil</sub> gegenwärtig durchgeführt.

Die während der Praxiserprobung des TGM-M gesammelten Erfahrungen, die zwangsläufig immer auch den Vergleich zu Laboranalysen umfassen, werden geordnet nach den Leistungsbereichen des Real-State Gas-Monitorings dargestellt: Zustandsdiagnose, Gasalarmaufklärung, Gasalarmprognose und Alterungszustand Festisololation.

### 2.1 Zustandsdiagnose

Ein dreißig Jahre alter 500 MVA-Maschinentransformator zeigte bei der turnusmäßigen Ölgasanalyse im Frühjahr 2002 erstmals gestiegene Gehalte der Fehlergase Wasserstoff, Methan und Ethen. Der im September angeschlossene TGM-M erfaßt seitdem alle notwendigen Daten zum Gashaushalt. Bild 1 zeigt den Jahresverlauf der Kesselöltemperatur und des Gleichgewichtsgasdrucks. Die Mittellastfahrweise führt zu den ausgeprägten Temperaturschwankungen. Der Anstieg um ca. 10 °K im Frühjahr wurde nicht kompensiert. Interessant ist der Vergleich mit zur Kontrolle angeführten Laborwerten, die aus Vollanalysen errechnet worden sind. Die Streuungen der Laborwerte sind groß gegenüber dem Verlauf der TGM-M-Werte, letztere sollten typisch sein für den stabilen Betrieb.

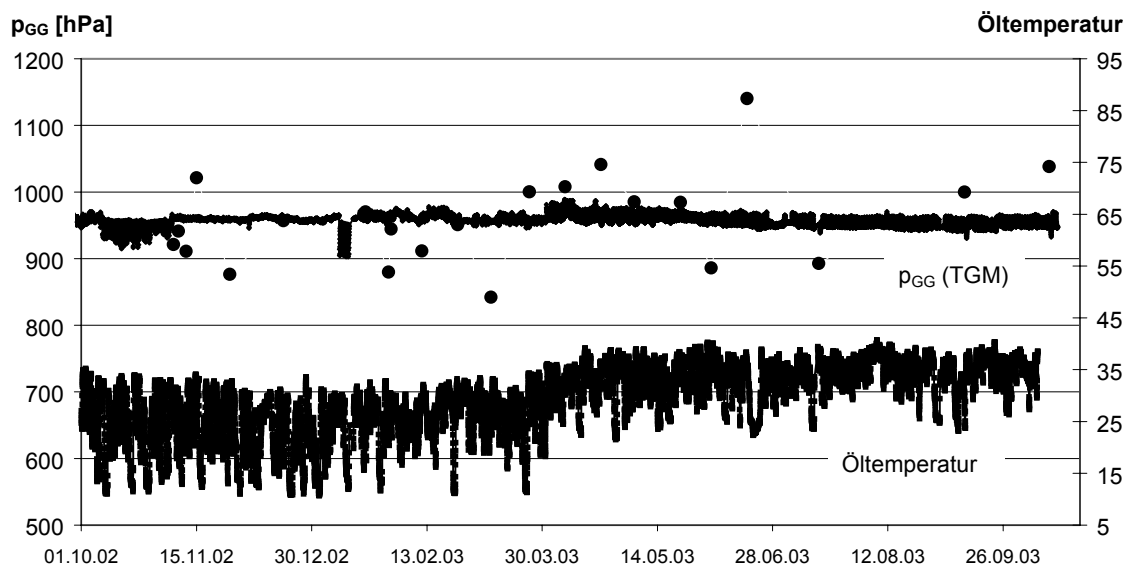


Bild 1 Jahresverlauf des Gesamtgasgehaltes (als Gleichgewichtsgasdruck  $p_{GG}$ ) und der Temperatur im Kesselöl des Maschinentransformators T1  
 •  $p_{GG}$  (Labor)

Bild 2 zeigt, daß im November 2002 innerhalb einer Woche der Wasserstoffgehalt von 60 auf 130 ppm angestiegen ist. Während der Anstiegszeit belegten Laboranalysen (Bild 3), daß auch die genannten Kohlenwasserstoffe anstiegen. Als Fehlerart ist deshalb eine thermische Belastung oberhalb des Siedepunktes des Öles ohne Beteiligung von Festisolation diagnostiziert worden. Bild 2 stellt ebenfalls die anschließende Abnahme des Wasserstoffs bis zum Ausgangswert dar. Die weiteren Laboranalysen (Bild 3) zeigen, daß Methan deutlich weniger abgenommen hat, Ethen näherungsweise konstant geblieben ist.

Damit wurde ein kurzzeitig wirkender thermischer Fehler dokumentiert, der geeignet ist, den Einfluß von Konvektion/Atmung auf die Fehlergasgehalte, der schon in der Literatur diskutiert wurde [3], löslichkeitsabhängig nachzuweisen. In Übereinstimmung mit Modellrechnungen [4] gehen wenig öllösliche Fehlergase (z. B.  $H_2$ , teilweise  $CH_4$ ) über den Ausdehner verloren, das „Gedächtnis“ bilden die gut löslichen Fehlergase (z. B.  $C_2H_4$ ). Insbesondere elektrische und Fehler der Festisolation sind durch Laboranalysen problematisch zu überwachen, da sich  $H_2$  und CO bei zeitweiligen Fehlern schon wieder dem Ausgangswert genähert haben können bzw. bei anhaltenden Fehlern unterrepräsentiert sind (stationäre Niveaus). Veränderte Beurteilungskriterien müssen die-

sen Einfluß künftig berücksichtigen. Der Nachweis von Fehlergasen im Gasraum des Ausdehners wurde schon früher erbracht [5].

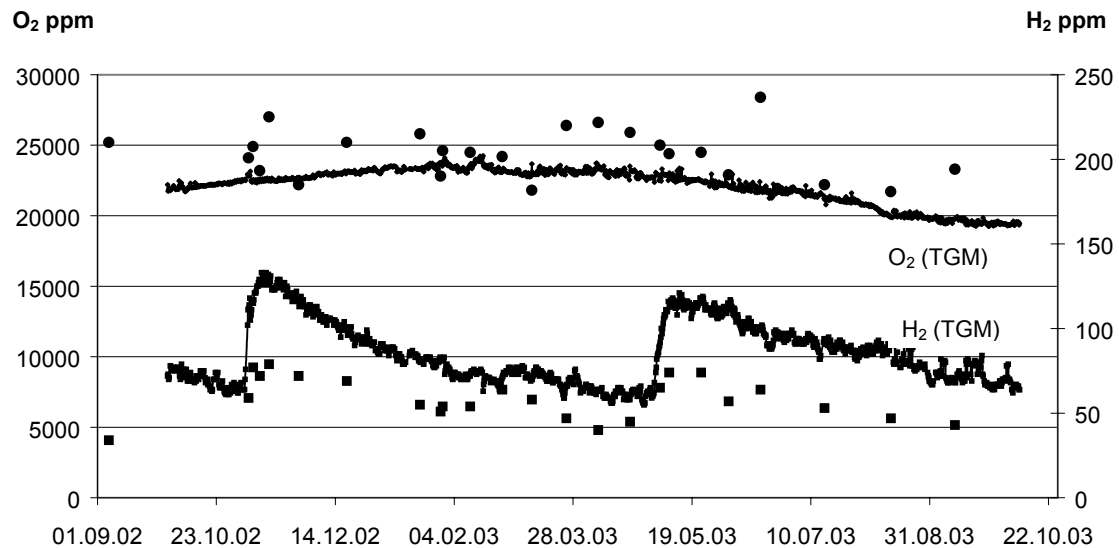


Bild 2 Jahresverlauf von gelöstem Wasserstoff und Sauerstoff im Kesselöl des Maschinentransformators T1

- O<sub>2</sub> (Labor)
- H<sub>2</sub> (Labor)

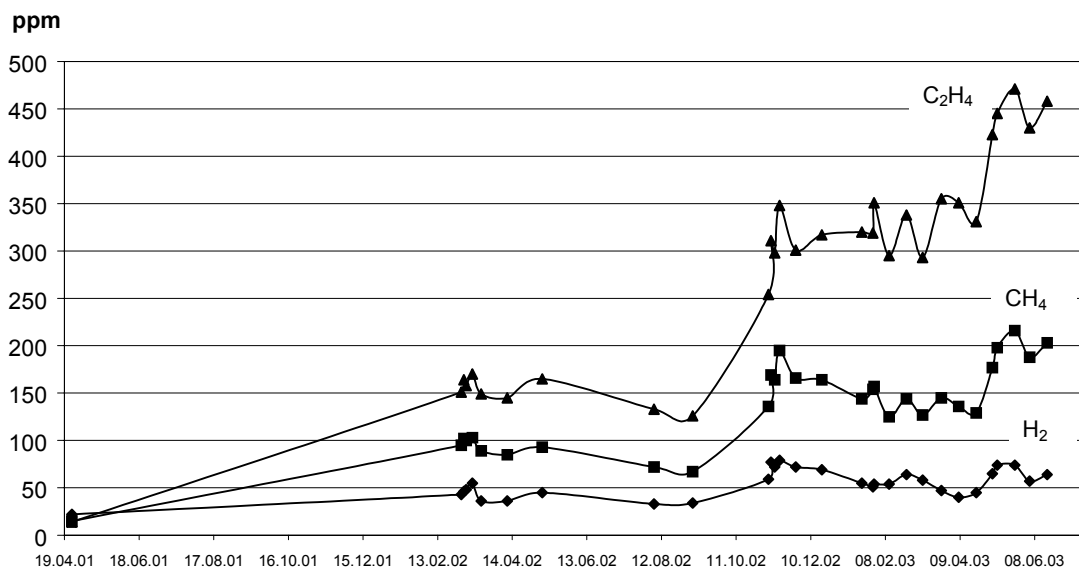


Bild 3 Überwachung des Maschinentransformators T1 (ausgewählte Gase der Laboranalysen)

Ein weiterer Wasserstoffanstieg (mit Anstieg der Kohlenwasserstoffe) stellte sich im Mai 2003 ein. (Bild 2, 3).

Mit dem TGM-M wird weiter nach den Ursachen der thermischen Anomalie gesucht.

Bild 2 zeigt ebenfalls den Jahresverlauf für Sauerstoff, der mit der thermischen Anomalie direkt nichts zu tun hat. Auffallend ist, daß der Sauerstoffgehalt im Winterhalbjahr steigt und im Sommerhalbjahr fällt. Wie Bild 1 belegt, kann das auf den Anstieg der Kesselöltemperatur im Sommerhalbjahr zurück zu führen sein, wodurch Oxydationsreaktionen gefördert werden könnten. Dagegen deutet der schnellere Abfall des Wasserstoffgehaltes im Winter- gegenüber dem Sommerhalbjahr eher auf einen Konvektion/Atmung-Einfluß hin. Eventuell überlagern sich auch beide Einflüsse. Interessant bleibt, daß aus dem Sauerstoffverlauf auf Veränderungen im Verlauf der wenig öllöslichen Fehlergase geschlossen werden kann.

Bild 2 zeigt auch einen Vergleich der TGM-M-Verläufe mit den Laboranalysen. Alle Laboranalysenwerte für Wasserstoff liegen teilweise sehr deutlich unterhalb der TGM-Linie. Die beiden Anstiegsphasen werden deutlich abgeschwächt angezeigt. Dagegen liegen die Laboranalysenwerte für Sauerstoff deutlich oberhalb der TGM-Linie.

In Tabelle 1 ist eine Messung der im Öl gelösten Gase, ermittelt sowohl aus einer Ölprobe als auch aus dem Gleichgewichtsgas des TGM-M, dem TGM-M gegenüber gestellt.

	DGA [ppm]	GG-Gas [ppm]	TGM-M [ppm]
H <sub>2</sub>	47	62	63
O <sub>2</sub>	23500	20118	19500
N <sub>2</sub>	73900	68724	67364
CO	585	652	616
CO <sub>2</sub>	4940	6732	6323
CH <sub>4</sub>	134	136	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	102	110	
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	364	350	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	1	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	65	86	
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	773	761	

Tabelle 1 Vergleichsmessung vom 14.10.03  
an dem Maschinentransformator T1

Die Ergebnisse der Gleichgewichtsgasprobe (GG-Gas) stimmen gut mit den TGM-M-Werten überein. Dagegen weichen die wenig öllöslichen Fehlergase der Ölprobe (DGA) deutlich ab. Die gut öllöslichen Kohlenwasserstoffe zeigen dagegen keine Unterschiede. Bei der Ölprobe ist der deutliche Eintrag von atmosphärischer Luft festzustellen.

Da Gleichgewichtsgas- und Ölprobe im Labor gaschromatographisch identisch behandelt worden sind, ist der Unterschied bei den gering öllöslichen Gasen durch Probenahme und Gasextraktion zu erklären.

## 2.2. Gasalarmaufklärung

An einem dreißig Jahre alten 200 MVA-Netztransformator traten häufig Gasalarme auf, die Luftabscheidungen darstellten. Zur Aufklärung dieser Anomalie wurde der TGM-M installiert. Die im Öl gelösten Gase zeigten keine Auffälligkeiten. Der Gassättigungsgrad betrug ca. 96 %. Dagegen waren folgende Daten interessant [2]:

- Es gab mehrere Tage mit Gasraten unter dem Signalwert (ca. 250 cm<sup>3</sup>) des Buchholz-Relais
- An einigen Tagen wurden bis zehn Gasalarme registriert, die automatisch durch den TGM-M in 100ml-Schritten entlüftet wurden. Die summierten Gasmengen der Entlüftungen betrugen bis zu 3 l.
- An einem Tag erbrachte ein Gasalarm allein eine Gasmenge von ca. 4,5 l bei mehrstündiger Entlüftung.

Die summierten Gasmengen der Entlüftungen zeigen, daß während der 100 ml-Schritte weitere Gasansammlungen im Buchholz-Relais erfolgten. Wahrscheinlich sind die Gasmengen noch größer, da oberhalb des Signalwertes das Gas in den Ausdehner gelangt und sich damit der Erfassung entzieht.

Bei herkömmlichen Buchholzwarnungen gehen diese Informationen ganz verloren, weil während der Zeit zwischen Signalisation und Probenahme/Entlüftung, die mehrere Stunden betragen kann, keine Gaserfassung möglich ist.

Die bei jeder Signalisation des Buchholz-Relais ausgeführten TGM-Analysen zeigten keine Fehlergasgehalte.

Aber die Kohlendioxidgehalte des Buchholzgases (0,450 V-%) lagen deutlich meßbar über den Gleichgewichtswerten des Öles (0,337 V-%). Durch diese direkten Differenzmessungen im TGM-M sowie die Anwendung des Gasaus-

tauschmodells ließ sich beweisen, daß die Ursache der Luftansammlungen eine Übersättigung im Transformator war.

Für den Fall, daß eine TGM-M-Analyse ein Fehlergas ergibt, wird im TGM-M gesichertes Buchholzgas für eine externe Vollanalyse zur Bestimmung der Fehlerart aufbewahrt.

Die Bedeutung der Sicherstellung des Buchholzgases konnte bei der Störungsaufklärung an einem anderen 200 MVA-Netztransformator nachgewiesen werden [6]. Wegen fehlender elektrischer Befunde und der Spontanität war es der einzige Weg, alle Informationen aus dem Fehlergasanteil des Buchholzgases zum Zeitpunkt der Signalisation zu erhalten. Ein eher seltener Fall hat das ermöglicht: von derselben Fehlerstelle sind die Gasblasen sowohl in das Buchholz-Relais des Kessels als auch in das der 10 kV-Durchführungen gelangt. Nach 6 Stunden erfolgte die Probenahme und Analyse. Im ersten Buchholzgas war nur noch Wasserstoff mit wenig Methan nachweisbar, dagegen im anderen das volle Muster der Fehlerart inklusive Kohlenmonoxid. Mit dem angewendeten Korrekturverfahren auf Basis des  $O_2/N_2$ -Verhältnisses des Öles konnte die zutreffende Diagnose, elektrischer Durchschlag mit Beteiligung von Festisolation, zur Fehlerstelle führen: zerstörte Hartpapierplatte zwischen 10 kV-Durchführungskasten und Kessel.

Die Voraussetzung für das gesicherte Buchholzgas war, daß das Buchholz-Relais der 10 kV-Durchführungen durch eine lange und dünne Leitung mit dem Kasten verbunden ist. Deshalb waren hier natürliche Bedingungen vorhanden, wie sie im TGM-M für das Buchholzgas konstruktiv gegeben sind: kein konvektiver Gasaustausch.

### 2.3. Gasalarmprognose

An einem 333 MVA-Netztransformator ist der TGM-M angeschlossen, um anomale Ethin-Gehalte aufzuklären. Dazu ist begonnen worden, den Gashaushalt darzustellen. Bild 4 zeigt den für luftatmende Transformatoren typischen Gesamtgasgehalt (als Gleichgewichtsgasdruck  $p_{GG}$ ). Im Unterschied zum äußeren Luftdruck ist dieser näherungsweise konstant. Der Verlauf des Gassättigungsgrades, als Quotient beider Drücke, liegt auf dem Niveau 98 % und erreicht an den Berührungspunkten beider Verläufe die Sättigung. Damit ist potentiell die Gefahr einer Luftabscheidung durch Übersättigung bei extrem niedrigen Luft-

drücken aufgezeigt. Nur diesbezügliche Statistiken können zu einem empirischen Kriterium führen, welches diese Situation vorhersagt.

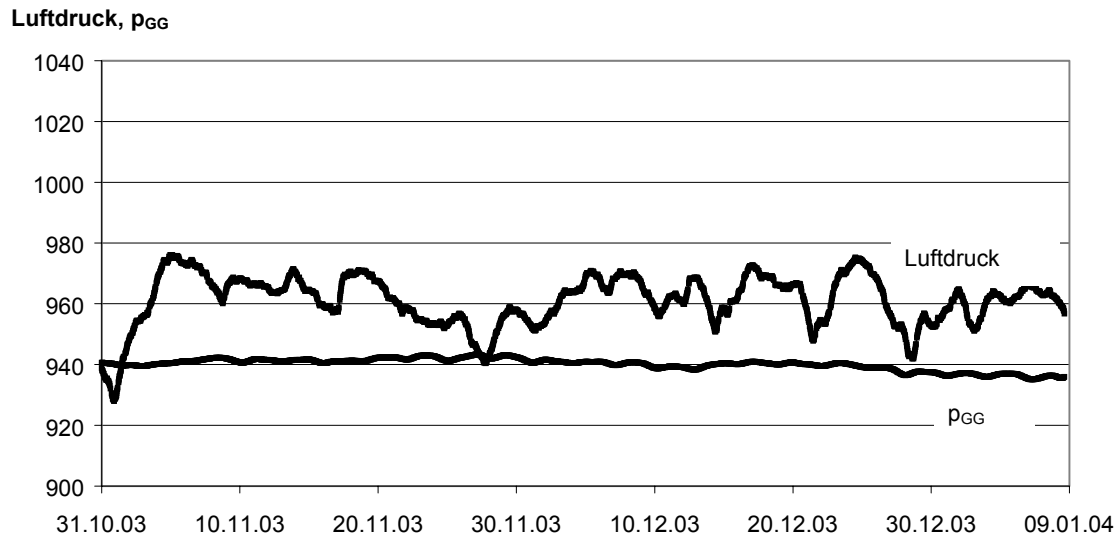


Bild 4 Zeitverlauf vom Gesamtgasgehalt (als Gleichgewichtsgasdruck  $p_{GG}$ ) und äußerem Luftdruck an dem Netztransformator T2

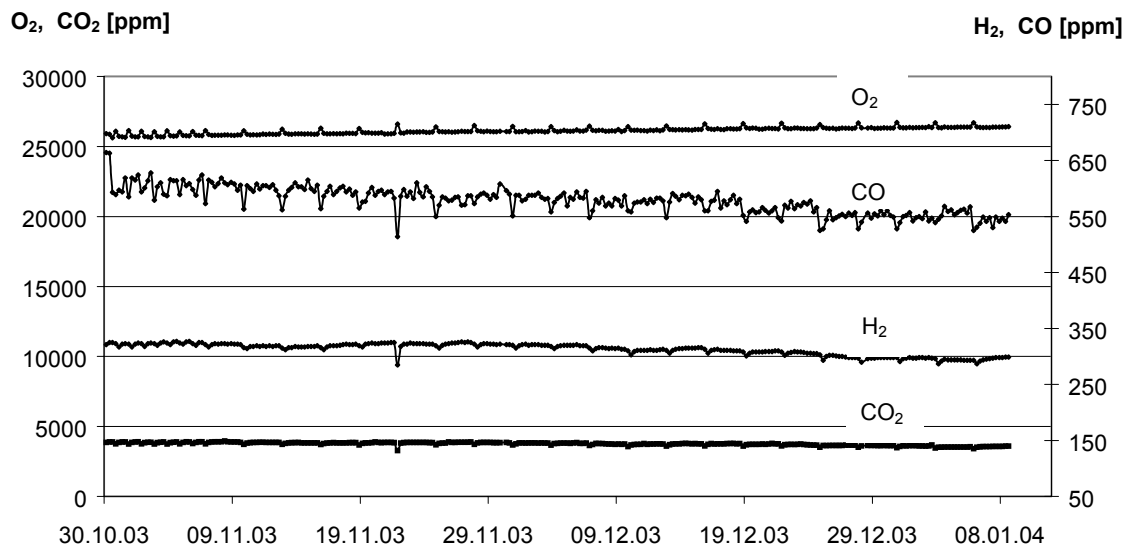


Bild 5 Zeitverlauf der gelösten Gase an dem Netztransformator T2

Bild 5 zeigt für den genannten Transformator die Konzentrationsverläufe der Gase. Der Wasserstoffgehalt liegt bei 300 ppm mit fallender Tendenz. Die Kohlenoxide sind im Normalbereich, auch hier das Kohlenmonoxid mit fallender



Tendenz. Der Sauerstoffgehalt steigt dagegen an. Daraus leitet sich mit den Kenntnissen zur Konvektion/Atmung im Winterhalbjahr [4] ab, daß es einen aktuellen Fehler mit Wasserstoffemission gibt.

Da die Online-Überwachung von Anfang an fehlt, ist keine vollständige Fehlercharakterisierung möglich, sondern eine, die sich auf den thermischen Fehleranteil konzentriert. Dazu ist eine Differenzmessung der Kohlenwasserstoffe des Gleichgewichtsgases erforderlich.

Da bei vorliegender Fehlergasemission die Wahrscheinlichkeit eines Gasalarms mit dem Gassättigungsgrad  $> 95\%$  exponentiell ansteigt [7], ist vom thermischen Befund abzuleiten, ob eine Online-Entgasung zur Verlängerung der Fehlerbeobachtungszeit in Frage kommt. Die Begleitung ist mit dem TGM-M gewährleistet.

Datum	$p_{GG}$ [hPa]	Bemerkungen
27.03.00	288,3	
25.04.00	346,6	
18.05.00	314,8	
13.06.00	324,0	
10.07.00	428,3	
05.09.00	396,7	
19.12.00	856,4	
26.06.01	732,4	
19.03.03	262,9	nach Ölentgasung
13.05.03	425,2	
16. - 21.12.03	72,4	TGM-M Kontrollmessung

Tabelle 2 Laboranalysen des Gesamtgasgehaltes (als Gleichgewichtsgasdruck  $p_{GG}$  berechnet) bei Membranabschluß an dem Maschinentransformator T3

Bei Transformatoren mit Luftabschluß steht dagegen die Frage der Gasalarmprognose wegen des niedrigen Gleichgewichtsgasdruckes nicht. Der Gleichgewichtsgasdruck ist aber gut geeignet, die Dichtheit des Abschlusses zu kontrollieren.

Um praktische Erfahrungen zu sammeln, ist ein TGM-M an einem 840 MVA-Maschinentransformator installiert worden. Tabelle 2 zeigt den Vergleich zwischen bisher durchgeführten Laboranalysen und einer einwöchigen TGM-

Messung. Obwohl der Effekt einer Ölentgasung durch die Laboranalyse deutlich nachgewiesen wird, ist die Richtigkeit der Laboranalyse aber anzuzweifeln. Als Ursache sind wieder Probenahme und Vakuumextraktion im Labor zu nennen.

Reale Werte von nur 7 % Gassättigungsgrad, die aus dem gemessenen Gleichgewichtsgasdruck resultieren, stellen eine Herausforderung für die Routineüberwachung derartiger Abschlußsysteme dar.

Wie berechtigt die Überwachung eines Luftabschlusses ist, veranschaulicht das Beispiel eines 625 MVA-Maschinentransformators, wo anhand der Laboranalysen die Undichtigkeit der Ausdehnermembran vermutet wurde. Bild 6 zeigt seit der TGM-M-Installation den Verlauf des Gesamtgasgehaltes (als Gleichgewichtsgasdruck  $p_{GG}$ ), der steigend ist und schon einen Gassättigungsgrad von über 90 % erreicht hat. Parallel dazu steigt der Sauerstoffgehalt, was typisch ist für Lufteinträge, bevor die Sättigung erreicht ist.

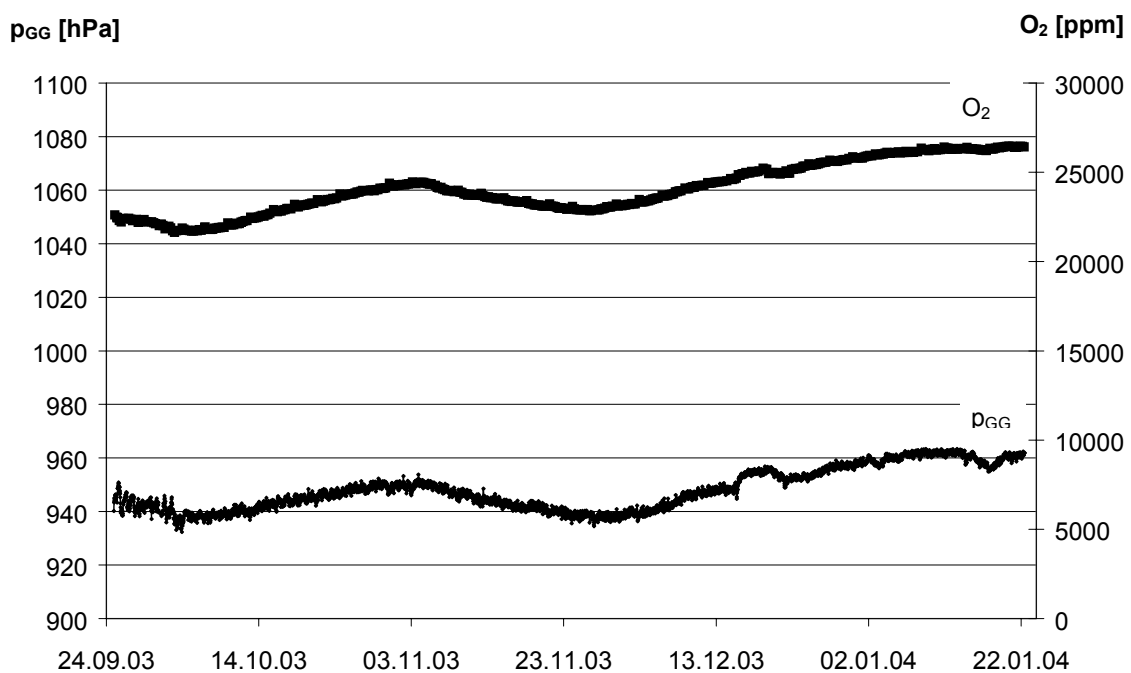


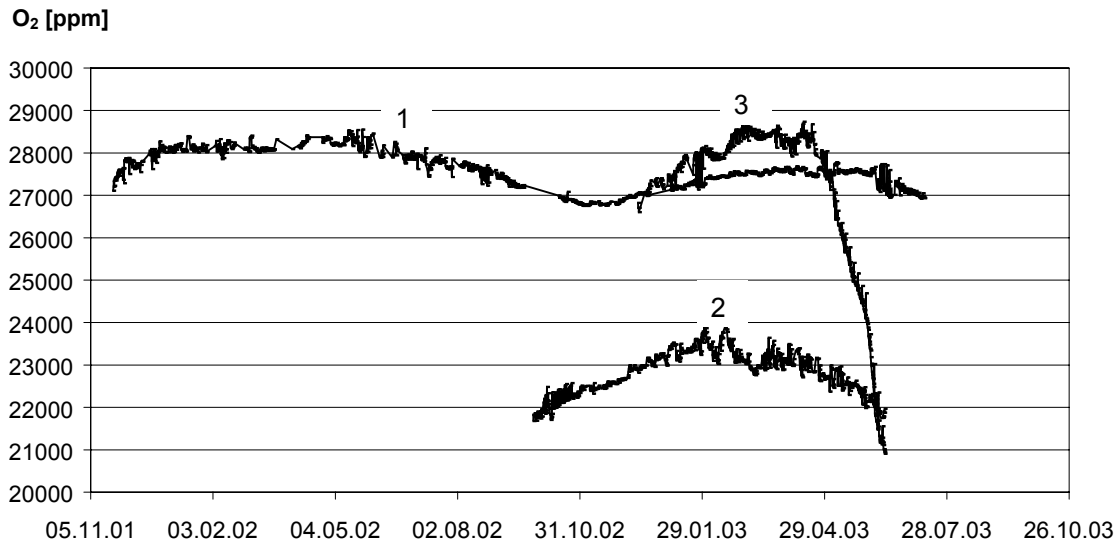
Bild 6 Zeitverlauf vom Gesamtgasgehalt (als Gleichgewichtsgasdruck  $p_{GG}$ ) und Sauerstoffgehalt an dem Maschinentransformator T6

#### 2.4. Alterungszustand Festisolation

Die Alterungsfaktoren Temperatur, Wasser- und Sauerstoffgehalt werden mit dem TGM-M kontinuierlich erfaßt. Praktisch im Gebrauch ist bisher nur die Montsinger-Regel, die den Temperatureinfluß auf die Alterung quantifiziert. Ne-

ben den analytischen Problemen der Wasser- und Sauerstoffbestimmung sind auch deren Zusammenhänge zu den Alterungsmechanismen der Festisolation noch nicht ausreichend geklärt.

Zum Wasser in Isolierölen und der Festisolation gibt es sehr umfangreiche Untersuchungen, die analytisch sehr unterschiedlich ausgeführt werden. Vergleichbares fehlt bisher zum Sauerstoff.



**Bild 7** Verlauf des Sauerstoffgehaltes  $O_2$  an verschiedenen Transformatoren

- 1-Maschinentransformator T4 (8 Jahre, 650 MVA, Wasserkühlung, Mittellastfahrweise)
- 2-Maschinentransformator T1 (31 Jahre, 500 MVA, Wasserkühlung, Mittellastfahrweise)
- 3-Netztransformator T5 (31 Jahre, 200 MVA, Luftkühlung, Mittellastfahrweise)

Bild 7 zeigt die Sauerstoffverläufe an 3 verschiedenen Großtransformatoren der offenen Bauweise. Transformator 1 belegt über fast 2 Jahre einen Sommer/Winter-Verlauf mit fallender Tendenz. Der deutlich ältere Transformator 2 zeigt bei vergleichbarer Belastung (Mittellastfahrweise) ähnliches Verhalten bei deutlich geringerem Sauerstoffgehalt. Dagegen verhält sich der Netztransformator 3 noch anders: hoher Wintergehalt an Sauerstoff und ein starker Abfall zum Sommer hin.

Die interessanten Verläufe scheinen gut geeignet zu sein, systematische Untersuchungen anzuregen, deren Ergebnisse eine Alterungsbestimmung der Festisolation ermöglichen könnten.

### 3. Schlußfolgerungen für die Überwachungspraxis

#### 3.1. Zusammenhänge statt Online-Vollanalyse

Die ersten Betriebserfahrungen mit der Online-Überwachung des Gashaushaltes von Transformatoren zeigen Grenzen der auf Laboranalysen ausgerichteten Zustandsdiagnostik an:

- Richtigkeit

Laboranalysen liefern für gering öllösliche Gase ( $H_2$ , CO,  $O_2$ ) fehlerhafte Ergebnisse. Auf die damit kalibrierte Online-Analysentechnik werden die Fehler übertragen.

- Aktualität

Die Unterbrechung eines Fehlers fordert die kontinuierliche Überwachung.

- Originalität

Der Austrag von gering öllöslichen Fehlergasen ( $H_2$ , CO, teilweise  $CH_4$ ) aus dem Kesselöl bzw. die Absorption von Fehlergasen aus dem Buchholzgas erfordern Korrekturen auf das Originalfehlergas.

Selbst das Real-Time Monitoring bleibt noch mit der Richtigkeit und der Originalität konfrontiert.

Diese Grenzen können nur mit der Anwendung der Zusammenhänge des Gashaushaltes überwunden werden, indem auf richtig messende Analysentechnik beruhende Korrekturverfahren eingesetzt werden.

#### Korrektur der gelösten Fehlergase [4]

Mittels einer Online-Wasserstoffmessung wird das Anfangsstadium einer Fehlerentwicklung festgestellt und in diesem durch externe Analysen die Emissionsraten und die Fehlerart bestimmt. Unter der Annahme einer näherungsweise Konstanz der Emissionsraten wird entsprechend der Fehlerart eine Vorgabe für den Wasserstoffverlauf gemacht. Weicht der tatsächliche Verlauf davon progressiv ab, werden Emissionsraten und Fehlerart erneut bestimmt und bewertet.

Durch diese Verfahrensweise kann der Einfluß von Konvektion/Atmung auf die gering öllöslichen Fehlergase korrigiert werden. Für die Feinbewertung des Wasserstoffverlaufs ist es wichtig, den Sommer/Winter-Einfluß durch den Sauerstoffverlauf zu berücksichtigen. Dazu muß Sauerstoff in die Online-Messung einbezogen werden. Wegen der besonderen Bedeutung des Zustands der Fest-

isolation sollte dies auch für die Kohlenoxide geschehen, so daß externe Analysen nur noch für die Kohlenwasserstoffe erforderlich sind.

#### Korrektur der Buchholzgase

Durch die Unterdrückung des Gasaustausches des Buchholzgases mit dem Öl unmittelbar mit der Signalisation des Gasalarms läßt sich über eine externe Vollanalyse sowohl des Buchholzgases als auch der im Öl gelösten Gase das Originalfehlergas darstellen [6]. Voraussetzung ist, daß die gelösten Sauerstoff- und Stickstoffgehalte im Öl fehlerfrei bestimmt werden, da das  $O_2/N_2$ -Verhältnis das Korrekturmaß mitbestimmt.

Mit der Hauptaufgabe, durch Korrekturen der gelösten bzw. ungelösten Fehlergase das Originalfehlergas darzustellen, sind Aufwendungen verbunden, die auch für weitere Aufgaben des Real-State Gas-Monitorings genutzt werden können:

#### - Aufklärung Buchholzwarnung

Durch die automatische Analyse des Buchholzgases mit Eintritt der Signalisation kann im Falle einer Luftabscheidung die Abschaltung eingespart werden. Durch die automatische Entlüftung kann die Dynamik der Gasabscheidung vor und während der Signalisation dargestellt werden, was die Ursachenbewertung verbessert.

#### - Gasalarmprognose

Durch die kontinuierliche Messung des Gassättigungsgrades kann in Verbindung mit dem Luftdruck die potentielle Gefahr einer Gasabscheidung ermittelt werden. Bei schleichenden Fehlern werden zusätzlich die Emissionsraten herangezogen, um den Zeitpunkt zu bestimmen, ab dem Fehlergasblasen das Buchholz-Relais erreichen können.

Bei Transformatoren mit Luftabschluß kann mit dem Gleichgewichtsgasdruck dessen Dichtheit überwacht werden.

#### - Alterungszustand Festisolation

Mit der kontinuierlichen Erfassung der Kesselöltemperatur, der Ölfeuchte und des gelösten Sauerstoffgehaltes sind Voraussetzungen gegeben, Verfahren zur Alterungsbestimmung der Festisolation zu entwickeln.

Unter Berücksichtigung der Zusammenhänge des Gashaushaltes lautet das Fazit der Überwachung für auffällig werdende Transformatoren: richtige und

empfindliche Online-Messung von Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Gassättigungsgrad im Öl mit vom Wasserstoffverlauf abgeleiteter externer Kohlenwasserstoffanalytik sowie die analoge Einbeziehung von Buchholzgasen.

### 3.2. HySys-Konzept für Real-State Gas-Monitoring

Das von der GATRON GmbH entwickelte HySys-Konzept für das Real-State Gas-Monitoring [4] zeichnet aus, daß die Bereitstellung von Monitoringdaten dem Diagnosebedarf angepaßt wird:

- im gesunden Zustand des Transformators muß nur der Wasserstoffgehalt überwacht werden,
- im auffälligen Zustand müssen daneben die Konzentrationsänderungen aller gelösten Gase und
- im gestörten Zustand einer Buchholzwarnung außerdem die Gehalte der ungelösten Gase erfaßt werden.

Diese ganzheitliche Überwachung von luftatmenden Transformatoren benötigt keine Ölprobenahme und ist zuverlässig sowie preiswert, weil:

- im gesunden Zustand ein Wasserstoff-Wächter im Gasraum des Ausdehners eingesetzt wird, der selektiv, empfindlich sowie kalibrierbar arbeitet und keinen Ölkontakt hat;
- nach Signalisation des auffälligen Zustandes ohne Abschaltung des Transformators der Wasserstoff-Wächter gegen einen mobilen Trafo-Gasmonitor gewechselt wird, der den Fehlerverlauf unter Berücksichtigung aller Zusammenhänge des Gashaushaltes begleitet und nur bei progressivem Wasserstoffverlauf externe Analysen der Kohlenwasserstoffe anhand von Gleichgewichtsgasproben erforderlich macht, um anhand einer Software Zustandsdiagnosen, Gasalarmprognosen sowie Bewertungen der Festisolation automatisch zu erstellen;
- beide Gerätevarianten automatisch das Buchholzgas analysieren und auf Fehlergas bzw. Luft bewerten sowie gesichertes Buchholzgas für eine externe Vollanalyse zur Bestimmung der Fehlerart bereithalten, sowie der Trafo-Gasmonitor vor und während der Gasalarme die Dynamik der Gasansammlung erfaßt;

- der mobile Trafo-Gasmonitor auch Online-Entgasungen begleiten sowie die Dichtheit von z. B. Luftabschlüssen kontrollieren und auch zeitweilig kleinere Transformatoren effizient diagnostizieren kann.

Bei Investitionsentscheidungen für die Real-Time Überwachung an auffälligen Transformatoren werden die hochgerechneten und dann eingesparten Laboranalysen als Bezug genommen. Bei dem Real-State Gas-Monitoring dagegen sollte dies anhand der Erhöhung der Diagnosesicherheit eine Vorsorgeentscheidung für Großtransformatoren sein. Zusätzlich kann aber auch konkreter Nutzen dargestellt werden, indem die Wahrscheinlichkeit eines durch eine Luftabscheidung ausgelösten Gasalarms mit der Einsparung einer zur Aufklärung nicht mehr notwendigen Abschaltung verknüpft wird.

#### 4. Literatur

- [1] Duval, M.; Electra 198 (2001), S. 20-27
- [2] Bräsel, E.; Stach, M.; Sundermann, H.; EW 102 (2003) 16, S. 52-55
- [3] Altmann, J.; Daemisch, G.; Elektrizitätswirtschaft 101 (2002) H. 5, S. 52-57
- [4] Bräsel, E.; Sasum, U.; ETG-Fachtagung, Köln 8./9.03.04; P 3.16
- [5] Bräsel, E.; Pyl, Th.; Elektrie 38 (1984) H. 8, S. 306-8
- [6] Bräsel, E.; Bloeck, H.; EW 101 (2002) H. 23, S. 48-54
- [7] Bräsel, E.; Pyl, Th.; Elektrie 38 (1984) H. 9, S. 344-7