

Online-Diagnostik und -Monitoring

Universelles Fehlergasdreieck für die Transformatorendiagnostik

Universal Fault Triangle in Transformer Diagnostics

Es wird ein neues, leistungsfähiges Hilfsmittel, das universelle Fehlergasdreieck (FGT) mit den Koordinaten Wasserstoff, Ethin und Monitoringsumme der Kohlenwasserstoffe für die Transformatorendiagnostik vorgestellt. Anhand von ausgewählten Praxisfällen wird die Übereinstimmung der Diagnoseaussagen bei Anwendung des FGT basierend auf der Visualisierung der DIN EN 60599 mit den aus den Basis-Gasquotienten dieser Norm bestimmten Fehlerarten gezeigt.

SUMMARY

A new efficient tool, the universal fault gas triangle (FGT) with the co-ordinates hydrogen, ethyne and sum of the hydrocarbons for the transformer diagnostics, is presented. On the basis of selected application cases the conformity of the diagnostic results will be shown by the application of the FGT, based on the visualisation of the IEC 60599, with the determined types of fault based on the basic gas quotient.



Dr. rer. nat. **Eckhard Bräsel**, Geschäftsführer, Gatron GmbH,
Dr. rer. nat. **Ute Sasum**, wissenschaftliche Leiterin, Forschungszentrum Sensorik Greifswald e. V., Greifswald.

Die Analyse gelöster und freier Gase ist eines der am meisten benutzten diagnostischen Hilfsmittel zur Erkennung und Bewertung von Fehlern in elektrischen Geräten. Jedoch ist die Interpretation der Ergebnisse oft kompliziert. Die DIN EN 60599 dient als Leitfaden zur Erleichterung dieser Interpretation für elektrische Geräte, die mit Mineralöl gefüllt sind und Papier auf Zellulosebasis oder Pressspan als feste Isolation benutzen [1].

Die Gase, die an einer Fehlerstelle im Transformator gebildet werden (Originalfehlergas), sind keiner direkten Analyse zugänglich. Sie lösen sich entweder im Öl auf oder erreichen als freie Gase das Buchholzrelais. Auf dem Weg von der Fehlerstelle bis zum Buchholzrelais verändert sich die Konzentration der freien Gase durch Austauschvorgänge mit den im Öl gelösten Gasen in unterschiedlichem Maß.

Seit der Einführung der routinemäßigen Gas-in-Öl-Analysen in den 1970er Jahren wurden durch den Vergleich der Analyseergebnisse mit den durch die visuelle Inspektion festgestellten Fehlern für die sechs Fehlerarten (Teilentladungen PD, Entladungen niedriger Energie D1, Entladungen hoher Energie D2, thermischer Fehler $t < 300\text{ °C}$ T1, thermischer Fehler $300\text{ °C} < t < 700\text{ °C}$ T2, thermischer Fehler $t > 700\text{ °C}$ T3) charakteristische Fehlergasmuster ermittelt.

Sowohl die DIN EN 60599 als auch die Diagnosehilfsmittel bekannter Autoren [2;3;4] nutzen Quotienten bestimmter Fehlergase zur Interpretation der Ergebnisse. Diese Quotientenschemata weichen hinsichtlich der Wertebereiche teilweise voneinander ab. Das ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Untersuchungen auf unter-

schiedlichen individuellen Transformatorennetzwerken basieren.

In DIN EN 60599 ist eine auf drei Basis-Gasquotienten (C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6) beruhende DGA-Interpretationstabelle dargestellt. Dieses Interpretationsschema sollte nur genutzt werden, wenn es sich um einen aktiven Fehler handelt (Gasbildungsrate größer als der typische Wert) und die Konzentration mindestens eines Gases über der typischen Konzentration liegt. Im Anhang A der DIN EN 60599 wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die »typischen Werte« der Gas-konzentrationen von verschiedenen Faktoren z. B. dem Alter, der Art und dem Hersteller des Geräts, den Betriebs- und Lastgepflogenheiten und dem Klima abhängen. Nur wenn keine spezifischen Werte für das eigene Transformatorenkollektiv zur Verfügung stehen, sollten die in der Norm genannten typischen Werte verwendet werden.

Problematisch ist die Diagnose dann, wenn die Kombinationen der drei Basis-Gasquotienten keinem charakteristischen Fehler entsprechen. Es kann sich in diesen Fällen um eine Mischung von Fehlern handeln oder um einen neuen Fehler, der einen alten oder die normale Alterung überlagert. Dann sollte ein vereinfachtes Interpretationsschema verwendet werden, um anhand der ersten beiden oben genannten Quotienten zwischen Teilentladung, Entladung und thermischem Fehler unterscheiden zu können. Es können aber auch die im Anhang B der DIN EN 60599 enthaltenen graphischen Darstellungen der Basis-Gasquotienten benutzt werden, um festzustellen, welcher charakteristische Fehler der DGA-Interpretationstabelle dem Fall am nächsten ist.

Eine andere Methode zur Ermittlung der Fehlerart stellte *M. Duval* erstmals 1974 vor [5;6]. Das Duval-Dreieck basiert auf den relativen Verhältnissen der drei Gase Methan, Ethen und Ethin. Diese Gase wurden ausgewählt, weil sie mit den steigenden Energiedichten, die zur entsprechenden Gasbildung im Transformator nötig sind, korrespondieren. *M. Duval* verzichtet bewusst auf die Einbeziehung der Wasserstoffkonzentration in dieses Diagnoseverfahren.

Die relativen Anteile von Methan, Ethen und Ethin sind auf jeweils einem Schenkel des Dreiecks als Koordinaten von 0 bis 100 % aufge-

tragen. Innerhalb des Dreiecks sind die sechs Zonen der oben genannten Fehlerklassen eingezeichnet sowie ein weiterer Bereich, der Mischungen aus elektrischen und thermischen Fehlern im Transformator zugeordnet wird. Ein Vorteil des Duval-Dreiecks ist es, dass sehr einfach visuell verfolgt werden kann, ob sich ein Fehler z. B. von einem relativ harmlosen thermischen Fehler zu einem potenziell gefährlicheren elektrischen Fehler entwickelt [7].

Diagnostik mit dem universellen Fehlergasdreieck

Es wurde ein neues, leistungsfähiges Hilfsmittel, das universelle Fehlergasdreieck, für die Transformatorrendiagnostik entwickelt. Das universelle Fehlergasdreieck ist gleichseitig und wird durch die Dreieckskoordinaten Wasserstoff, Ethin und die »Monitoringsumme der Kohlenwasserstoffe« (CH_4+) jeweils von 0 bis 100 % gebildet. CH_4+ ist eine gewichtete Summe der im Öl gelösten Kohlenwasserstoffe Methan, Ethan, Ethen, Propan und Propen. Die Wichtung ergibt sich aus den Empfindlichkeiten eines geeigneten Sensors für diese Gase und deren Löslichkeiten im Öl. Unter Einbeziehung der Wichtungsfaktoren kann die Monitoringsumme der Kohlenwasserstoffe auch aus Vollanalysen (vollzählige Einzelgasbestimmung) bestimmt werden, wobei sich die mit bzw. ohne Einbeziehung von Propan und Propen berechneten Werte nur geringfügig unterscheiden. Umgekehrt ist es aber nicht möglich, aus der gemessenen Monitoringsumme die Einzelgaskonzentrationen zu bestimmen. Wenn die bekannten Zusammenhänge der Gasbildung im Transformatorbetrieb in die Betrachtungen einbezogen werden, ist es auch nicht nötig, die Konzentrationen der Kohlenwasserstoffe, die einen Beitrag zur Monitoringsumme leisten, einzeln zu ermitteln.

Um ein Analyseergebnis im Fehlergasdreieck anzuzeigen, müssen zuerst die Summe S der Konzentrationen in ppm

$(S = C_{\text{H}_2} + C_{\text{C}_2\text{H}_2} + C_{\text{CH}_4+})$ gebildet und anschließend die relativen Anteile berechnet werden mit

$$\text{H}_2/\% = 100 \cdot C_{\text{H}_2}/S;$$

$$\text{C}_2\text{H}_2/\% = 100 \cdot C_{\text{C}_2\text{H}_2}/S;$$

$$\text{CH}_4+\% = 100 \cdot C_{\text{CH}_4+}/S.$$

Werden diese Werte in das Dreieck eingetragen, ergibt sich genau ein Punkt.

Fehlergasdreieck

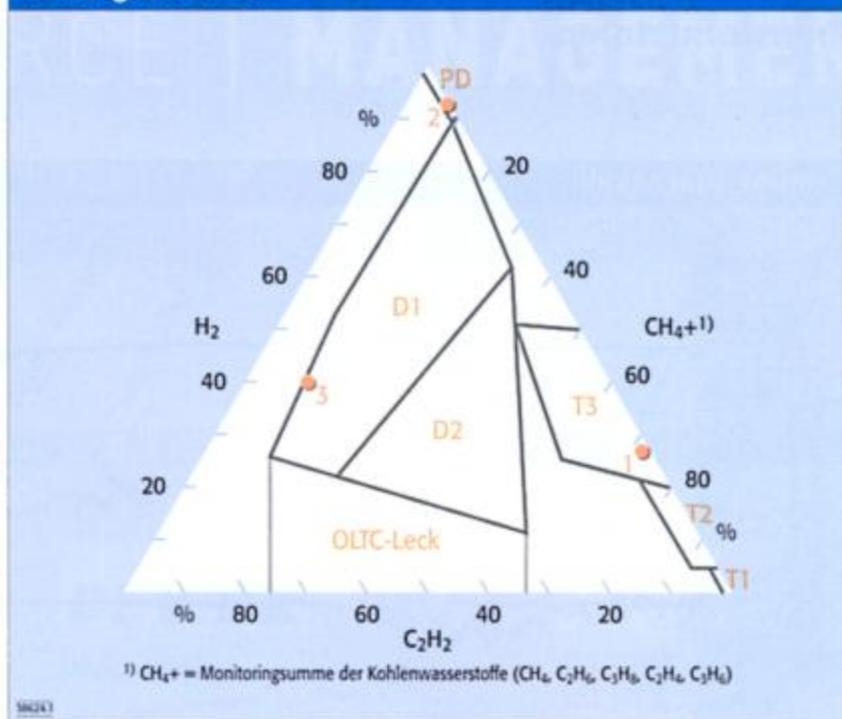


Bild 1. Fehlergasdreieck für die Diagnostik nach DIN EN 60599
 • Diagnosepunkte für Betriebsfälle

Die Einbeziehung der oben genannten sieben Fehlergase in das Dreieck ermöglicht seine universelle Anwendung mit allen bekannten Quotientenschemata, durch die Flächen in ihrer Lage im Dreieck festgelegt werden. In Bild 1 ist das universelle Fehlergasdreieck für die Diagnostik nach DIN EN 60599 dargestellt. Zusätzlich zu den sechs Fehlerarten können Undichtigkeiten im Lastschaltergefäß festgestellt werden (OLTC-Leck). Die nicht bezeichneten Flächen spiegeln Konzentrationsverhältnisse wider, die keinem charakteristischen Fehler entsprechen. Liegen die Diagnosepunkte in diesen Bereichen, ist es wahrscheinlich, dass Fehlerüberlagerungen oder Analysenfehler aufgetreten sind. Auch für Diagnosen mit dem Fehlergasdreieck gelten die in der Norm genannten Anwendungsbedingungen: aktiver Fehler, Konzentration mindestens eines Gases über der typischen Konzentration. Die letzte Bedingung soll bzgl. der Monitoringsumme erfüllt sein, wenn CH_4+ größer als 200 ppm ist.

Das universelle Fehlergasdreieck eignet sich nicht nur zur Diagnose mit den im Öl gelösten Gasen. Es kann auch für die Diagnose mit Buchholzgasen genutzt werden. Dazu muss zunächst ein Korrekturverfahren zur Bestimmung der Originalgaszusammensetzung an der Fehlerstelle angewendet werden [8].

Die neue Qualität des universellen Fehlergasdreiecks liegt darin,

dass der Vorteil der sehr einfachen Visualisierung durch die Dreiecksform nicht mehr durch die Einbeziehung von nur drei Gasen in die Diagnostik eingeschränkt wird. Mit diesem neuen Hilfsmittel können sowohl Laboranalysen als auch Online-Messungen ausgewertet werden. Im Unterschied zu den Laboranalysen, bei denen die Einzelgase normenkonform gaschromatographisch bestimmt werden müssen, eröffnen sich für die Online-Überwachung andere Möglichkeiten. Online-Analysatoren, die alle relevanten Kohlenwasserstoffe einzeln bestimmen können, sind teure und empfindliche Geräte. Es lassen sich Kosten einsparen, wenn stattdessen die Kohlenwasserstoffmessung nur durch einen Ethinsensor und einen Sensor zur Messung der Monitoringsumme der Kohlenwasserstoffe stattfindet.

Bereits im Jahr 1990 begann die Cigre Task Force 15.01.01 damit, die verschiedenen nationalen und firmeninternen DGA-Interpretationsschemata, die neben dem internationalen Standard DIN EN 60599 genutzt wurden, vergleichend zu sichten. Dabei zeigte sich eine große Vielfalt von Größen und Kennzahlen für die individuellen Gaskonzentrationen. Die Anwendung derartig unterschiedlicher Interpretationsschemata auf die selben DGA-Ergebnisse führt konsequenterweise zu unterschiedlichen Interpretationen und Schlussfolgerungen [9]. Fragen der Höhe der ty-

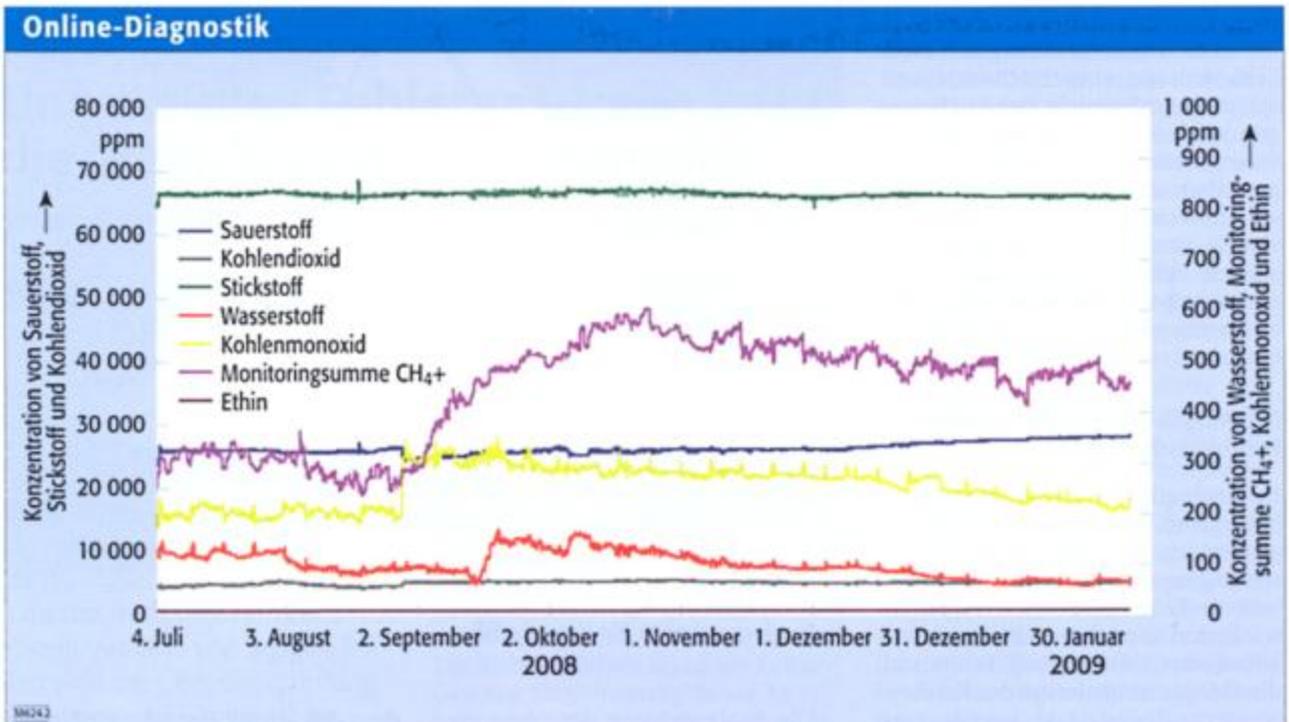


Bild 2. Betriebsdiagramm für die Online-Diagnostik (TGM-D)

Ergebnisse der externen Laboranalyse am 09.07.2008: 96 ppm H_2 , 126 ppm CH_4 , 71 ppm C_2H_6 , 448 ppm C_2H_4 , 8 ppm C_2H_2 , 50 ppm C_3H_8 , 449 ppm C_3H_6 , 321 ppm CH_4+ (berechnet)

pischen Gaskonzentrationen, Fehlerklassifikationen und DGA-Interpretationen werden auch weiterhin international diskutiert [10].

Die Nutzung des universellen Fehlergasdreiecks kann dazu beitragen, verfeinerte Diagnosekriterien zu erhalten, indem künftig neue Statistiken unter Einbeziehung des heutigen Wissensstands, z. B. zu Abschlussystemen, Analytik und Fehleridentifizierung, geführt werden. Es wäre auch wünschenswert, archivierte Daten von auffälligen Transformatoren entsprechend erneut zu bewerten und dazu die jahrelangen Statistiken von Laboranalysen zu nutzen. Das ist jedoch mit nicht unerheblichen Kosten verbunden.

Anwendung auf ausgewählte Betriebsfälle

Die ausgewählten Betriebsfälle wurden online mit dem Transformatorgasmonitor (TGM) oder manuell durch Laboranalysen nach Probenahme mit dem Extraktionsgas-Sampler (EGS-Methode) überwacht. Beide Gatron-Produkte sind qualitäts gesichert (NIS-Kriterium [11]).

In der Praxis werden im Wesentlichen drei verschiedene Diagnosevarianten genutzt:

- Online-Diagnostik,
- Online-Monitoring in Verbindung mit Labordiagnostik und
- auf zeitlich verkürzten Probenahmezyklen beruhende Labordiagnostik.

Es wird im Folgenden für jede Variante ein Beispiel dargestellt.

Auffälliger Anlagentransformator (60 MVA, 110/21 kV)

Der Transformator war bei der routinemäßigen Laborüberwachung durch erhöhte Ethen- und Propenkonzentrationen aufgefallen. Deshalb wurde am 04.07.2008 ein »TGM-D mobil« installiert. Mit diesem Gerät lassen sich sowohl Ethin als auch die Monitoringsumme der Kohlenwasserstoffe direkt messen. Im Bild 2 ist das Monitoringdiagramm für die Online-Diagnostik zu sehen. Es wurden alle Gase online erfasst, die für eine Bewertung nach DIN EN 60599 benötigt werden.

Das Öl ist luftgesättigt mit einem geringen Sauerstoffdefizit. Die Höhe der Kohlenoxidkonzentrationen und deren Verhältnis weisen auf keinen übermäßigen Abbau der Festisolation hin. Die Monitoringsumme der Kohlenwasserstoffe CH_4+ ist zunächst leicht erhöht, aber relativ konstant. Sie beginnt

am 02.09.2008 deutlich zu steigen. Am 14.09.2008 beginnt für rd. eine Woche eine Zunahme der Wasserstoffkonzentration. Am 20.09.2008 wurden mit dem TGM-D folgende Fehlergaskonzentrationen gemessen: CH_4+ 500 ppm, H_2 180 ppm, C_2H_2 10 ppm (Werte gerundet). Die Übertragung in das universelle Fehlergasdreieck ergibt den Diagnosepunkt 1 im Bild 1 und bedeutet die Fehlerart T3. Die am 09.07.2008 nach der Installation durchgeführte externe Laboranalyse (EGS-Methode) stimmt gut mit den Online-Werten überein. Die Auswertung nach dem DGA-Interpretationschema der DIN EN 60599 bzw. nach dem Duval-Dreieck ergeben die gleiche Fehlerart T3.

Gegenüber der Laborüberwachung liefert die Online-Messung noch weitere Informationen: Im Zeitraum vom 02. bis 14.09.2008 fand die Fehleranbahnung ohne Wasserstoffbildung statt, das bedeutet mit geringerer Energiedichte (T1 bzw T2). Ab 22.09.2008 ist der Fehler nicht mehr aktiv. Die Wasserstoffkonzentration nimmt wegen der offenen Bauart bis zur Ausgangskonzentration ab. Als Fehlerursache wird ein defekter Wenderkontakt vermutet. Wäre die Bestimmung der Fehlerart nicht an die Ak-

Transformatoren

tualität des Fehlers geknüpft, würden fälschlicherweise die Fehlerarten T2 bzw. T1 ermittelt.

Auffälliger Netztransformator (333 MVA, 400/220 kV)

Bei der routinemäßigen Laborüberwachung wurden hohe Wasserstoffkonzentrationen festgestellt. Die Bestimmung der Fehlerart nach den Quotientenkriterien der DIN EN 60599 ergab Teilentladung PD. Nach dem Duval-Dreieck ist in diesem Fall keine Unterscheidung zwischen PD und T1 möglich. Der Betreiber hat sich entschlossen, befristet ein System zum einfachen Online-Monitoring zu installieren. Es werden die Wasserstoff-, Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen gemessen. Das Monitoringdiagramm ist im Bild 3 dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich das Öl noch in der Rücksättigung mit der Luft befindet. Ein Sauerstoffdefizit ist nicht erkennbar und die Kohlendioxidkonzentration unauffällig. Die Wasserstoffkonzentration steigt stetig, was auf einen aktuellen Fehler hinweist. Der Vergleich der Online-Messungen mit einer Laboranalyse vom 22.01.2009 ergibt eine gute Übereinstimmung. Aus den Ergebnissen der Laboranalyse wurde die Monitoringsumme der Kohlenwasserstoffe berechnet. Sie beträgt 103 ppm. Zusammen

Tafel 1

Probe vom	15.02.08	07.08.08	11.09.08	08.01.09	21.04.09	14.05.09
Öltemperatur °C	5	30	25	20	36	32
Entnahme	unten	unten	unten	unten	unten	unten
Gase ppm:						
Wasserstoff	39	124	102	179	285	298
Sauerstoff	31 052	31 151	26 717	26 815	30 100	28 699
Stickstoff	69 295	68 652	65 982	64 749	65 309	68 175
Kohlenmonoxid	65	178	169	132	126	132
Kohlendioxid	1 694	2 457	2 362	2 214	2 550	2 451
Methan	5	15	15	34	45	48
Ethan	< 1	3	< 1	7	10	11
Ethen	4	15	15	32	49	52
Ethin	45	174	164	225	298	302
Propan	< 1	< 1	< 1	9	< 1	< 1
Propen	< 1	3	< 1	3	< 1	4
Gesamtgasgehalt %	9,43	10,52	9,79	9,67	10,11	10,41
Lösungsdruck mbar	929	1 047	985	972	1 003	1 044

Tafel 1. DGA-Zeitfolge für die Labordiagnostik nach N_2IS -basierter EGS-Methode

mit der Wasserstoffkonzentration von 1 450 ppm und der Ethinkonzentration von < 1 ppm ergibt die Übertragung in das universelle Fehlergasdreieck den Diagnosepunkt 2 im Bild 1, der der Fehlerart PD entspricht. Über den Verlauf der Wasserstoffkonzentration im Online-Monitoring kann die Aktualität bzw. Änderung der Fehlerart verfolgt werden.

Auffälliger Netztransformator (20 MVA, 110/20 kV)

Zwei aufeinanderfolgende routinemäßige Laboranalysen zeigten einen deutlichen Anstieg der Wasserstoff- und Ethinkonzentration des Transformators. Wiederholungen der Laboranalysen in einem verkürzten Probennahmezyklus bestätigten die Aktualität des Fehlers (Tafel 1). Aus den Analyseergebnis-

Online-Monitoring

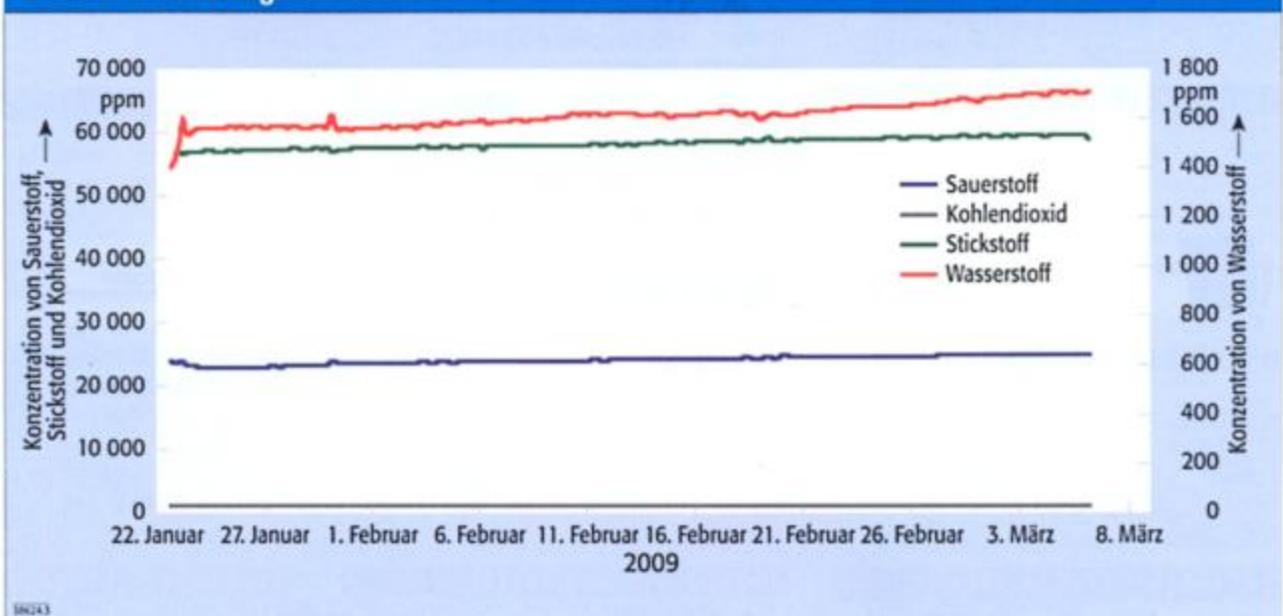


Bild 3. Betriebsdiagramm des einfachen Online-Monitorings (TGM)

Ergebnisse der externen Laboranalyse am 22.01.2009: 1 450 ppm H_2 , 95 ppm CH_4 , 13 ppm C_2H_6 , 1 ppm C_2H_4 , < 1 ppm C_2H_2 , < 1 ppm C_3H_8 , < 1 ppm C_3H_6 , 103 ppm CH_4+ (berechnet)

sen vom 14.05.2009 (berechnete Monitoringsumme 55 ppm, Wasserstoff 298 ppm, Ethin 302 ppm) wurde im universellen Fehlergasdreieck im *Bild 1* der Diagnosepunkt 3 und damit die Fehlerart Entladung niedriger Energie D1 ermittelt. Alle Analysen seit der Auffälligkeit bestätigen die Lage des Diagnosepunkts 3. Auch die Bestimmung nach DIN EN 60599 ergab die Fehlerart D1, ebenso die Anwendung des Duval-Dreiecks.

Schlussfolgerungen

Die ausgewählten Praxisfälle verdeutlichen, dass bei der Nutzung qualitätsgesicherter Analysedaten und dem Nachweis der Aktualität des Fehlers die Diagnoseaussagen bei Anwendung des universellen Fehlergasdreiecks auf Basis der DIN EN 60599 mit den aus den Basis-Gasquotienten dieser Norm bestimmten Fehlerarten vollständig übereinstimmen. Die Anwendung des universellen Fehlergasdreiecks ermöglicht Kosteneinsparungen bei der Online-Diagnostik, ohne dadurch Einschränkungen der Diagnosemöglichkeiten hinnehmen zu müssen. Das ist durch direkte Messungen der Ethinkonzentration und einer Summengröße für die anderen relevanten Kohlenwasserstoffe – statt alle Kohlenwasserstoffe einzeln zu bestimmen – möglich. Technische Ausschreibungen zur Online-Diagnostik sollten deshalb weniger nach der Anzahl der zu bestimmenden Fehlergase als nach der Zuordnung der auftretenden Fehler zu den sechs Fehlerklassen ausgerichtet werden. Die Praxisfälle zeigen aber auch, dass im Unterschied zur ständigen Aufgabe des Monitorings die Diagnostik nur bei gegebener Fehleraktualität eine Bedeutung besitzt. Der Transformatorbetreiber kann aus den dargestellten Diagnosevarianten die für den jeweiligen Fall optimale Auswahl treffen.

LITERATUR

- [1] DIN EN 60599 (VDE 0370-7):2008-02: In Betrieb befindliche, mit Mineralöl impregnierte elektrische Geräte – Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase.
- [2] Müller, R.; Schliesing, H.; Soldner, K.: Die Beurteilung des Betriebszustands von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 76 (1977), H. 11, S. 345 – 349.

- [3] Dörnenburg, E.; Strittmatter, W.: Überwachung von Öltransformatoren durch Gasanalyse. *Brown Boveri Mitt.* 1974 (5), S. 238 – 247.
- [4] Rogers, R. R.: IEEE and IEC codes to internal incipient faults in transformers using gas in oil analysis. 13 (1978), H. 59, S. 349 – 354. *IEEE Trans. Elektr. Insulation* 13 (1978), H. 5, S. 349 – 354.
- [5] Duval, M.: Fault gases formed in oil-filled breathing EHV power transformers – The interpretation of gas analysis data. *IEEE PAS Conf. Paper No C 74*, 1974, S. 476 – 478.
- [6] Duval, M.; Gervais, P.; Belanger, G.: Update on Hydro-Quebec's Experience in the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in HV Transformers. *Cigre Symposium* 1993, Berlin, Paper 110 – 114.
- [7] Duval, M.: Dissolved Gas Analysis and the Duval Triangle. 5th AVO New Zealand International Technical Conference, Oct. 8 – 11th, 2006, Methven/Neuseeland.
- [8] Bräsel, E.; Brunner, E.; Hartmann, E.: Neue Hilfsmittel zur Diagnoseeignung von Gasen aus dem Buchholzrelais. *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 98 (1999), H. 25, S. 16 – 24.
- [9] De Pablo, A.; Möllmann, A.: New Guidelines for Furans Analysis as well as Dissolved Gas Analysis in Oil-filled Transformers. *Cigre-Report* 15/21/33-19, Paris, 1996.
- [10] Duval, M.: New Advances in DGA Interpretation. *Cigre-Report* 15/12-01-11, Paris, 2002.
- [11] Bräsel, E.; Sasum, U.: Online Transformer Gas Diagnostics on the Basis of IEC 60567/60599. *International Conference on Power Transformers Transformer 09*, 89 – 93, 02. – 04.06.2009, Torun/Polen.

(38624)

mail@gatron.de

www.gatron.de