

Störungsaufklärung

Leistungsfähigkeit der gasanalytischen Transformatorendiagnostik

Capabilities of gas-analytical transformer diagnostics to clear up failures

Anhand eines ausgewählten Störsereignisses wird gezeigt, wie aus einem Originalfehlergas deutlich unterschiedliche Buchholz-Gase durch unterschiedlichen Ölkontakt entstehen können. Die volle Diagnoseeignung, die auch den Einsatz der Gaschromatographie rechtfertigt, ist nur bei einer technischen Sicherstellung des Buchholz-Gases unmittelbar mit der Signalisation gegeben. Nur dann kann mit der Anwendung eines Korrekturverfahrens die Fehlerart bestimmt werden bzw. die Beteiligung von Festisolation festgestellt werden. Andernfalls lässt sich nur noch eine Fehlerfeststellung durchführen. Dazu kann ein Schnelldiagnoseverfahren auf Basis einer Wasserstoffmessung vor Ort benutzt werden.

SUMMARY

A selected failure is used to show how clearly different Buchholz gases can develop from original fault gas as a result of different contact with transformer oil. The full diagnostic suitability, which also justifies the use of gas chromatography, is only available if the Buchholz gas is technically secured immediately after signalization. Only then can a corrective procedure be applied to determine the type of fault and to find out whether the fixed insulation is affected. Otherwise, the fault can only be detected. This can be done using a quick diagnosis procedure on the basis of a hydrogen-concentration measurement.

Mit dem modernen Online-Monitoring der im Öl gelösten Fehlergase lassen sich schleichende Fehlerentwicklungen feststellen und begleiten. Aber weiterhin werden durch Luftabscheidungen (Undichtigkeiten von Pumpen, Luftdruckabfall) Warnungen und durch spontane Fehler Auslösungen des Buchholz-Relais auftreten. Gasalarms des Buchholz-Relais stellen Störungen des Transformatorbetriebes dar. Eine zuverlässige und schnelle Aufklärung bestimmt wesentlich die Verfügbarkeit eines Transformators. Die Analyse des Buchholz-Gases muss bei Gasalarmen folgende Aussagen liefern:

- Fehlerfeststellung
- Bestimmung der Fehlerart
- Beteiligung von Festisolation.

In der Praxis werden bei Gasalarmen Laboranalysen nach IEC 60567/60599 durchgeführt. In früheren Arbeiten [1 bis 4] wird aufgezeigt, welche Reserven in diesen Normen stecken und welche gasanalytischen Hilfsmittel dafür entwickelt wurden.

Im Folgenden kann anhand eines konkreten Störfalls erstmals die geschlossene Anwendung aller Hilfsmittel dargestellt werden. Dabei wird darauf verzichtet, die Vorzüge eines Buchholz-Gas-Samplers BGS gegenüber einer Gasmaus mit Sperrflüssigkeit sowie eines Buchholz-Gastesters BGT 3 gegenüber einem Gaschromatographen im Labor herauszustellen. Vielmehr geht es um die Hilfsmittel, die die Bestimmung der Fehlerart ermöglichen:

- Buchholz-Relais Erweiterung BRE 1a
- Buchholz-Gaskorrektur BGK.

Die technische Sicherstellung des Buchholz-Gases mit der BRE 1a soll den Gasaustausch während der Standzeit im Buchholz-Relais unterbinden. Damit wird verhindert, dass

- gut öllösliche Gase in Lösung gehen und so die Zahl der Fehlergasquotienten abnimmt, was die Bestimmung der Fehlerart einschränkt,

- gegenüber dem Kesselöl Sauerstoff angereicherte Luft in das Buchholz-Gas gelangt und so das Korrekturmaß verfälscht.

Die begünstigenden Umstände des Störfalls, die die technische Sicherstellung des Buchholz-Gases ausreichend simulieren, waren:

- ein zweites Buchholz-Relais in einem Bypass ohne Konvektion hat dasselbe Originalfehlergas aufgenommen
- der Sauerstoffgehalt des Kesselöls lag nahe dem Luftsättigungsbe- reich.

Einerseits kann gezeigt werden, wie zuverlässig das Korrekturverfahren zur Fehlerartbestimmung ist, aber andererseits wird deutlich, wieviel unnötiger Analysenaufwand heute noch ohne dessen Anwendung geleistet wird.

Ablauf eines ausgewählten Störsereignisses

Ein Luft atmender 200-MVA-Netztransformator zeigte in seinen bis-

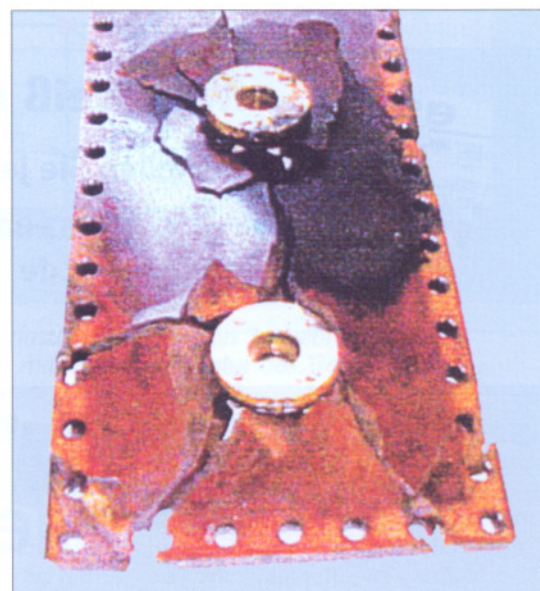


Bild 1. Beschädigte Hartpapierplatte; 10-kV-Durchführungskasten

Tafel 1

Entnahme	Turnus	Analysen nach der Störung				
Entnahmestelle	Kessel	10-kV-Kasten	Kessel	10-kV-Kasten	Kessel	Kessel
Medium	Öl	Öl	Öl	Buchholz-Gas	Buchholz-Gas	Buchholz-Gas
Verweilzeit im Transformator bis zur Probenentnahme		6 h	6 h	6 h	6 h	60 h
Gaskonzentration	ppm	ppm	ppm	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%
Wasserstoff	11	257	229	51,4	25,8	8,41
Sauerstoff	25 950	27 400	27 600	10,7	16,5	18,440
Stickstoff	75 946	70 900	71 400	26,9	55,5	71,858
Kohlenmonoxid	891	354	362	2,88	1,25	0,71
Kohlendioxid	5 803	5 760	5 740	0,53	0,59	0,487
Methan	6	113	103	4,29	0,27	0,048
Ethan	3	12	11	0,04	<0,001	<0,001
Ethen	33	171	164	1,13	0,01	0,013
Ethin	1	262	249	2,21	0,02	0,030
Propan	3	<1	<1	<0,001	<0,001	0,004
Propen	18	81	73	0,021	0,001	<0,001
Gasgehalt %	11,0	10,7	10,8			
Gassättigungsgrad (berechnet) %	107,5	103	103			

Tafel 1. Analysen von Öl- und Buchholz-Gasproben zur Störungsaufklärung

her 15 Betriebsjahren keine Auffälligkeiten. *Tafel 1* zeigt die Ölgaswerte der letzten turnusmäßigen Untersuchung.

Acht Monate danach explodierte ein an dem Transformator angeschlossenes 10-kV-Kabel wegen eines dreipoligen Kurzschlusses mit Erdberührung in einer Muffe. Hierbei speiste der Transformator auf die Fehlerstelle.

Der Transformator wurde vom Differenzialschutz nach rd. 100 ms abgeschaltet. Der Buchholz-Schutz regte nicht an, und im Buchholz-Relais wurde keine Gasansammlung festgestellt. Beschädigungen wurden am Transformator bei einer augenscheinlichen Kontrolle und nach Durchführung einer Isolationswiderstandsmessung mit 5 kV Gleichspannung nicht festgestellt. Nach Abtrennung des defekten 10-kV-Kabels und der einpoligen Erdung der 10-kV-Wicklung wurde der Transformator wieder ans Netz geschaltet.

Vier Wochen später havarierte der Transformator. Seine Auslösung erfolgte durch den Differenzial- und Buchholz-Schutz nach 101 ms. Nachfolgend wurden Gasansammlungen in den beiden Buchholz-Relais vom 10-kV-Durchführungskasten und vom Trafokessel gemeldet.

Gasproben und Ölproben konnten 6 h nach der Havarie entnom-

men werden. Äußerlich waren am Transformator keine Beschädigungen und keine Ölundichtigkeiten erkennbar. Auch eine elektrische Überprüfung ließ am Transformator keine Unregelmäßigkeiten erkennen.

Gasanalytische Bewertung der Störung

In *Tafel 1* sind die Ergebnisse der untersuchten Öl- und Buchholz-Gasproben zusammengefasst. Anhand der Kesselölproben wird der Fehlergasanstieg (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6) nach der turnusmäßigen Untersuchung sichtbar. Auffällig ist die gute Übereinstimmung aller Gasgehalte zwischen dem Öl des Kessels und des 10-kV-Durchführungskastens. Die Anwendung des Quotientenkriteriums ergibt keine eindeutige Aussage zur Fehlerart (Zeile DGA in *Tafel 2*).

Dagegen unterscheiden sich die freien Gase in beiden Buchholz-Relais deutlich. Nach 6 h Standzeit hat das Buchholz-Gas des 10-kV-Kastens noch deutliche Gehalte an den Fehlergasen, die auch im Öl zu finden sind. Zusätzlich tritt aber Kohlenmonoxid auf. Nach der Buchholz-Gaskorrektur auf die Originalzusammensetzung an der Fehlerstelle und der Anwendung des Quotientenkriteriums ergibt sich die

eindeutige Aussage zur Fehlerart (Zeile BG-Korrektur in *Tafel 2*): elektrischer Fehler mit Beteiligung von Festisolation und thermischer Begleitung.

Nach 6 h Standzeit enthält das Buchholz-Gas des Kessels nur noch zwei Fehlergase (H_2 , CH_4), nach 60 h nur noch H_2 . Der Einsatz des Buchholz-Gastesters BGT 3 unmittelbar am Transformator hätte auch hier noch die Aussage »Fehlergas« erbracht, der Grenzwert liegt rd. bei 0,8 Vol.-% Wasserstoff.

Die Anwendung des Korrekturverfahrens verändert den H_2/CH_4 -Quotienten von 95,6 im Buchholz-Gas auf 14,3 im Originalfehlergas. Letzterer Wert liegt etwas oberhalb des aus dem Buchholz-Gas des 10-kV-Durchführungskastens korrigierten Quotienten von 9,8. Die Abweichung ist damit zu erklären, dass die Korrekturbedingung, ein konstantes O_2/N_2 -Verhältnis im Kesselöl, im Buchholz-Relais wegen der Nähe zum Ausdehner nicht eingehalten worden ist. Hier muss das Verhältnis durch eine Sauerstoffanreicherung tatsächlich etwas höher angenommen werden.

Ihre gleiche Herkunft beweist die Anwendung des Korrekturverfahrens getrennt auf beide Buchholz-Gase. Das ist technisch nur möglich, wenn die Hartpapiertrennwand zwischen 10-kV-Durchfüh-

Tafel 2

1 Allgemeines				
Kundenkennung	Bemerkungen	Datum/BG/PN	Öl-Temperatur (°C)	Ölsorte
Kd-Nr.	Transformator 10-kV-Durchführungskasten		25,0	Nytro 10x
E-Mail				
Name				
2 Analysendaten				
i	DGA V_i (ppm)	BGA p_i (Vol.-%)	Spontanität $p_i/(10^{-4} V_i/k_i)$	Berechne
CH ₄	113	4,29	165,6	Anzeige Reset </

1) elektrischer Fehler mit Festisolation und thermischer Begleitung

Tafel 2. Anwendung des Korrekturverfahrens für Buchholz-Gase zur Störungsdiagnose

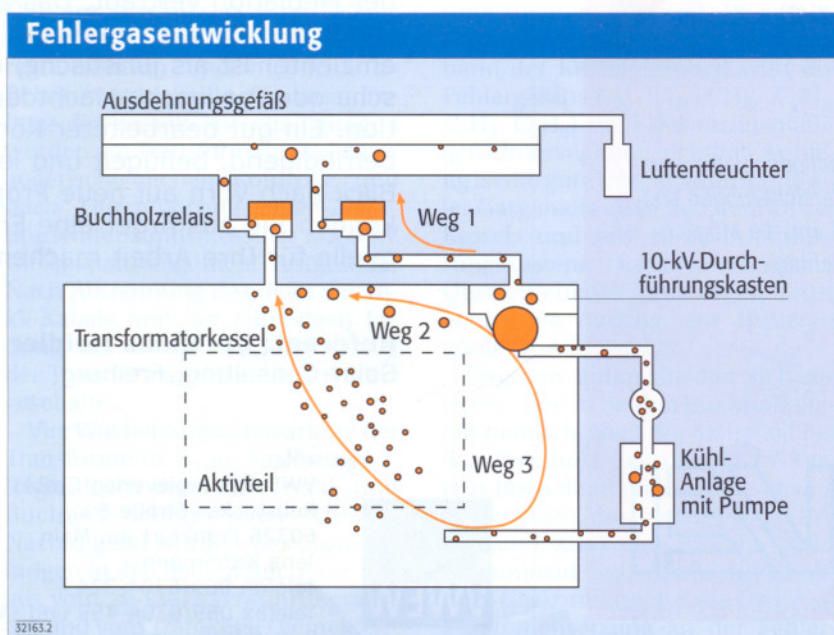


Bild 2. Rekonstruierte Fehlertgasentwicklung im Transformator

rungskasten und Kessel zerstört wurde. Damit lässt sich auch die gute Übereinstimmung der Ölproben erklären. Eine Wiedereinschaltung des Transformators kommt nicht in Betracht.

Befundaufnahme und Schädigungsmechanismus

Die elektrische Eingangsprüfung im Reparaturwerk ergab keinen Hinweis auf einen Fehler. Nach der Ölentleerung und dem Ausbau des Aktivteils aus dem Trafokessel wurde ein Schaden an den 10-kV-Ausleitungen im 10-kV-Durchführungskasten festgestellt. Die Hartpapierplatte zwischen Trafokessel und 10-kV-Durchführungskasten war in Richtung Trafokessel teilweise herausgesprengt. Die aus den Bruchstücken zusammengesetzte Hartpapierplatte ist in Bild 1 zu sehen. Materialabschmelzungen an

den auf Hochspannungspotenzial liegenden und miteinander gebrückten Leiterbolzen und dem auf Erdpotenzial befindlichen Befestigungsflansch der Hartpapierplatte ließen zweifelsfrei erkennen, dass diese Zerstörung von einem Kurzschluss mit nachfolgendem Leistungslichtbogen im 10-kV-Durchführungskasten herrührte.

Ein Kurzschluss in diesem Bereich mit dem vorhandenen und ausreichend bemessenen Isolationsabstand von rd. 10 cm ist nur möglich, wenn die Hartpapierplatte bereits eine Vorschädigung aufwies. Es ist davon auszugehen, dass die dynamische Beanspruchung des Transformators bei der 10-kV-Kabelstörung zu einem Bruch oder Riss in der Hartpapierplatte führte. Nachvollziehbar ist, dass die mechanische Schwachstelle anschließend auch zur elektrischen Schwachstelle wurde.

Während der nachfolgenden 30 Tage bis zur Havarie drangen vorhandene Ölalterungsprodukte, Ölschlamm und Feuchte in den Riss der waagrecht angeordneten Hartpapierplatte ein. Es entstanden Kriechströme geringer Energie, die zur Ausbildung von elektrisch leitfähigen Kriechstromspuren entlang des Risses führten. Begünstigt wurden diese Vorgänge durch den Umstand, dass nach der 10-kV-Kabelstörung das Kabel abgetrennt und der Leiter 3V2 geerdet wurde. Die Spannungsbeanspruchung der kritischen Isolationsstrecke stieg damit von 5,8 auf 10,0 kV. Auch können die Befestigungsbolzen für die Wanddurchführung mit ihrem scharfkantigen Gewinde in der vorgeschädigten Hartpapierplatte der Entstehung von Kriechspuren Vor-schub geleistet haben.

Gasanalytische Rekonstruktion des Ablaufes

Der Nahkurzschluss an einer 10-kV-Kabelmuffe hat zu einer mechanischen Vorschädigung der Hartpapierplatte geführt. Bis zum Störungseintritt haben sich Kriechstromspuren ausgebildet, deren Wachstum die Spannungsfestigkeit haben sinken lassen. Während dieser Zeit können Fehlergase (Abbauprodukte von Öl und Hartpapier) in das Öl des 10-kV-Durchführungskastens (rd. 100 l) emittiert worden sein. Die Intensität der Emission konnte nur ge-

ring sein, da die ungelösten Fehlergase sehr schnell und auf direktem Weg das Buchholz-Relais des 10-kV-Durchführungskastens erreicht und zu einer Buchholz-Warnung geführt hätten. Damit konnten sich nur begrenzte Fehlergasgehalte im Kastenöl herausbilden.

Nach 101 ms schaltete der Differenzialschutz den Transformator durch den 220-kV-Schalterfall ab. Der in dieser Zeitspanne wirkende Lichtbogen im 10-kV-Durchführungskasten erzeugte im Kastenöl ein größeres Volumen Fehlergas (Gasblase). Die Folge war eine Druckwelle. Im Transformator löste dies nachfolgende Reaktionen aus:

- Die Hartpapierplatte zwischen 10-kV-Durchführungskasten und Kessel wird zerstört (Bild 1).
- Die durch die Druckwelle entstehende Ölströmung führt in dem Buchholz-Relais des 10-kV-Durchführungskastens (nach 44 ms) und in dem Buchholz-Relais des Kessels (nach 74 ms) zur Betätigung ihrer Stauklappe für die vom Differenzialschutz bereits eingeleitete Auslösung des Transformators.
- Ein Teil des Fehlergases entweicht direkt über eine Rohrleitung und das Buchholz-Relais des 10-kV-Durchführungskastens in das Ausdehnungsgefäß und von dort in die Atmosphäre (Weg 1 in Bild 2). Es folgt eine Buchholz-Warnung nach rd. 1,5 s. Das Buchholz-Gas enthält einen hohen Fehlergasanteil, in dem noch das fehlerartspezifische Gas-muster enthalten ist (Tafel 1). Die Anwendung des Gatron-Korrekturverfahrens (Tafel 2) ergibt: kleine Trennstufenzahl von 1,87, was einen relativ kurzen Gasweg mit Ölkontakt und während der Standzeit im Buchholz-Relais keinen konvektiven Ölkontakt bedeutet;



Bild 3. Buchholz-Gastester BGT 3 mit Buchholz-Gas-Sampler BGS

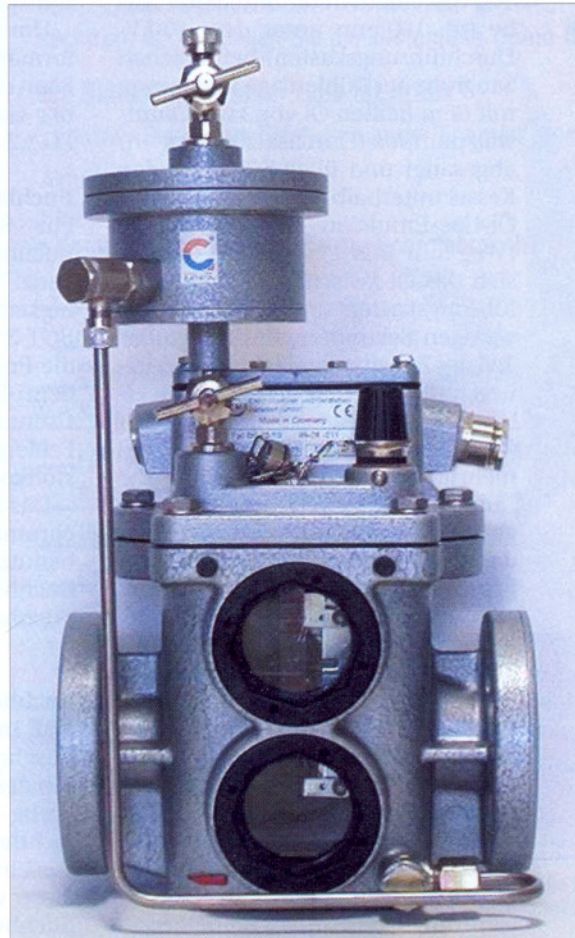


Bild 4. Buchholz-Relais-Erweiterung BRE 1a

Fehlerdiagnose: elektrischer Durchschlag mit Beteiligung von Festisolation.

Praktisch verhindern die besonderen Bedingungen der Gasaufbewahrung im Buchholz-Relais, eine 3,5 m lange Ölleitung (Nennweite 25 mm) zum Kessel, einen Gasaustausch. Damit wird veranschaulicht, wie technische Lösungen zur Gasaufbewahrung praktisch wirken können.

- Teile des Gases wandern unter dem Kesseldeckel zum Buchholz-Relais des Kessels und von dort ebenfalls in das Ausdehnungsgefäß und die Atmosphäre (Weg 2 in *Bild 2*). Die Buchholz-Warnung geschieht nach rd. 3,5 s. Während der Standzeit im Buchholz-Relais tritt eine Änderung der Zusammensetzung des Signalvolumens durch Ölkonvektion in der Rohrleitung (Nennweite 80 mm) auf. Die Analyse des Buchholz-Gases vom Trafokessel (*Tafel 1*) zeigt ein stark reduziertes Fehlergasmuster. Für die Korrektur des Fehlergasmusters steht nur noch ein Quotient zur Verfügung.

- Die Gasblase wird zum größten Teil von einem in unmittelbarer Nähe (rd. 100 mm unter dem 10-kV-Durchführungskasten) befindlichen Saugrohr der Kühlanlage zusammen mit dem heißen Öl von zwei Ölumwälzpumpen (Durchsatz je 80 m³/h) abgesaugt und über Kühler in den Kessel unterhalb der Wicklungen als Öl-Gas-Emulsion zurückgepumpt (Weg 3 in *Bild 2*). Dadurch tauscht sich das Öl zwischen 10-kV-Durchführungskasten und Kessel aus. In wenigen Sekunden wird ein großer Teil der Zersetzungsgasblase zerkleinert und im Öl verteilt, so dass ein effektiver Gasaustausch mit dem Öl stattfinden kann. Dabei kann ein mehrfacher Durchlauf durch die Kühlleitung erfolgen, bevor das ausgetauschte Restgas stark verzögert das Ausdehnungsgefäß erreicht. Als Ergebnis des Gasaustausches findet ein deutlicher Anstieg der fehlerarttypischen Gase im Öl statt, und in dem ursprünglichen ungelösten Fehlergas ist ein deutlicher Luftanteil (*Tafel 1*). Der Anstieg im Öl entspricht etwa der Aufnahme von 50 l Fehlergas. Das tatsächlich an der Fehlerstelle entstandene Fehlergasvolumen wird noch größer gewesen sein. Dieser plötzliche Anstieg ausgewählter Fehlergasgehalte im Öl wäre durch installierte Online-Mess-technik direkt bewiesen worden. Durch diese wäre auch der tatsächliche CO-Verlauf im Öl aufgeklärt wor-

den. So geht die Beteiligung von Festisolation nur aus dem Buchholz-Gas des 10-kV-Durchführungskastens hervor. Der dargelegte Gasweg wird durch deutliche Ablagerungen von Ölruss und -schlamm in den Kühlleitungen und unter den Wicklungen, die ebenfalls von der Fehlerstelle abtransportiert wurden, plausibel.

Zusammenfassende Darstellung der gasanalytischen Hilfsmittel

Abgeleitet aus dem ausgewählten Störungsereignis sind zur vollen Ausgestaltung der Normen IEC 60567/60599 bei Gasalarmen des Buchholz-Relais folgende durch die Gatron GmbH entwickelte Hilfsmittel anwendbar:

Buchholz-Gas-Sampler BGS

Ein Kolbenprober aus Metall mit Rückschlagventil wird über eine Ölfalle auf das Prüfventil des Buchholz-Relais aufgesetzt. Rund 120 cm³ Buchholz-Gas können so hermetisch entnommen, aufbewahrt und transportiert werden.

Um zur Probenahme den Transformator nicht besteigen zu müssen, kann diese auch mit dem BGS aus einer Gasableitvorrichtung, z. B. das ZG 1.2 von EMB GmbH, erfolgen.

Buchholz-Gastester BGT 3

Für Schnelldiagnosen kann der Buchholz-Gas-Tester BGT 3 als tragbares Messgerät mit Wärmeleitfähigkeitszelle eingesetzt werden. Der BGT 3 wird mit Luft kalibriert und die Probenzuführung geschieht mit dem BGS. Der BGT 3 signalisiert Grenzwertüberschreitungen des Fehlergasgehaltes, der als Wasserstoffkonzentration angegeben wird.

Das Restgas im BGS kann für gaschromatographische Laboranalysen benutzt werden. *Bild 3* zeigt den Buchholz-Gastester komplett mit Buchholz-Gas-Sampler im Messkoffler.

Buchholz-Relais-Erweiterung BRE 1a

Gaschromatographische Vollanalysen des Buchholz-Gases zur Bestimmung der Fehlerart sind nur gerechtfertigt, wenn die Probenahme aus einer BRE 1a stattfindet. Durch diese wird gewährleistet, dass das Buchholz-Gas nur mit einem kleinen, ruhenden Ölspiegel kontaktiert. Diese Erweiterung besteht aus einem zylindrischen Metallaufsatz,

der sich auf dem geöffneten Prüfventil des Buchholz-Relais befindet. Im Boden des Aufsatzes befindet sich eine Diffusionssperre. Vom Aufsatz selbst führt eine Rücklaufkapillare ins Unterteil des Buchholz-Relais. *Bild 4* zeigt die auf das Buchholz-Relais montierte BRE 1a.

Eine Kombination der Sicherstellung mit der Ableitung des Buchholz-Gases zum Fuß des Transformators soll mit dem automatischen Gastransporter AGT angeboten werden.

Diagnosesoftware zur Buchholz-Gaskorrektur

Das aus der BRE 1a mit dem BGS entnommene Buchholz-Gas sollte zuerst mit dem BGT 3 vor Ort geprüft werden. Im Falle der Diagnose »Fehlergas« ist die Bestimmung der Fehlerart von Interesse. Dazu muss der BGS zusammen mit einer Ölprobe in ein Labor transportiert werden. Die Ergebnisse der gas-chromatographischen Vollanalyse der Buchholz-Gas- und der Ölprobe werden dazu mit der Öltemperatur bei der Probenahme in ein Rechenprogramm eingegeben. Als Ergebnis wird die Korrektur der Fehlergasquotienten auf die Originalzusammensetzung an der Fehlerstelle sowie die Diagnosebewertung nach dem Cigre-Schema (*Tafel 2*) erhalten.

Alle die beschriebenen gasanalytischen Hilfsmittel sind im Trafo-Gasmonitor TGM enthalten [5], der ganzheitlich gelöste und ungelöste Gase von Großtransformatoren überwachen und bewerten soll.

SCHRIFTTUM

- [1] Bräsel, E.: VGB-Konferenz »Chemie im Kraftwerk 1998«; Essen 1998.
- [2] Bräsel, E.: Entwicklungsanforderungen an die gasanalytische Transformatorendiagnostik. *Elektrizitätswirtschaft* 98 (1999), H. 8, S. 52 – 57.
- [3] Bräsel, E.; Brunner, E.; Hartmann, E.: Neue Hilfsmittel zur Diagnoseeignung von Gasen aus dem Buchholz-Relais. *Elektrizitätswirtschaft* 98 (1999), H. 25, S. 16 – 24.
- [4] Bräsel, E.; Sasum, U.: ETG-Fachtagung »Diagnostik elektrischer Betriebsmittel«, Berlin 26. bis 27.02.2002.
- [5] Bräsel, E.: Micafil Symposium 2002, Stuttgart, 20. bis 21.03.2002.

(32163)

mail@gatron.de

www.gatron.de