

Analysator zur Vor-Ort-Bestimmung von Gasen aus dem Buchholzrelais von Transformatoren

Ute Sasum¹, Ulrich Guth²

¹Forschungszentrum Sensorik Greifswald e.V., Brandteichstraße 19, 17489 Greifswald / D

²TU Dresden, FB Chemie und Lebensmittelchemie, 01062 Dresden / D
sasum@fsg-ev.de

Zusammenfassung

Im Beitrag wird ein neues Vor-Ort-Messgerät zur komplexen Analyse von Buchholzgasen vorgestellt. Die Geräteentwicklung basiert auf der Auswertung der gaschromatographischen Messungen von über 160 Buchholzgasen und dem Vergleich des Gasmusters mit der Fehlerbefundung des Transformators. Mit dem Gerät können Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Ethin und ein Kohlenwasserstoff-Summenparameter CH₄+ gemessen werden. Dadurch ist es möglich zu unterscheiden, ob Buchholzereignisse durch Fehler oder Luftabscheidungen hervorgerufen wurden. Die Fehlerursache kann eingegrenzt werden. Die erforderlichen NDIR-Sensoren wurden selbst entwickelt und gebaut, ein WLD für die Aufgabe optimiert.

Keywords: Transformatorgas, Buchholzgas, Gassensorik, Vor-Ort-Messung

Einleitung

Seit dem Beginn des Ausbaus der Elektrizitätswirtschaft wurde die Forderung nach weitestgehender Betriebsicherheit der elektrischen Anlagen gestellt. Große Transformatoren gehören dabei zu den sehr kostenintensiven Bauteilen. Um Schäden zu vermeiden, muss der Transformator jederzeit vor unzulässigen Betriebszuständen geschützt werden. Der Zusammenhang zwischen Transformatorfehlern und Gasbildung im Öl war bereits in den 1920er Jahren bekannt. Die Erfindung und Einführung des Buchholzschutzes gewährleistet seitdem in hohem Maße die Betriebssicherheit von ölgefüllten, luftatmenden Transformatoren. Das Buchholzrelais (Gassammelrelais) wird in die Rohrleitung zwischen Transformator-kessel und Ausdehnungsgefäß eingebaut. Durch Schwimmerschaltungen wird der Ölfüllstand im Relais, durch eine Stauklappe werden Druckwellen erfasst und gegebenenfalls eine Warnung signalisiert oder der Buchholzschutz ausgelöst. Eine Buchholzwarnung bzw. Buchholzrelaisauslösung ist immer ein sehr ernstes Ereignis. Zur Identifikation der Fehler wird in [1] empfohlen, nach einem Buchholzalarm das Gas aus dem Relais sowie das Öl im Relais sowie oben und unten im Hauptkessel so schnell wie möglich zu

entnehmen und zu analysieren. Nur in den seltenen Fällen, in denen sich das Laboratorium in unmittelbarer Nähe befindet, stehen die Prüfergebnisse dem Verantwortlichen schnell zu Verfügung. Das Ergebnis einer Vor-Ort-Messung des Buchholzgasen unmittelbar nach der Probenahme kann jedoch ohne weitere Verzögerungen in die Entscheidungsfindung über das weitere Vorgehen bezüglich des Transformators einbezogen werden.

Durch die Messung mit dem Analysator zur Vor-Ort-Bestimmung von Buchholzgasen soll unterschieden werden können, ob das Ereignis tatsächlich durch einen Fehler im Transformator oder auf Grund von Luftansammlungen eingetreten ist. Im Fehlerfall soll die Ursache des Fehlers eingeschränkt und seine Schwere abgeschätzt werden können.

Luftbestandteile

Jeder luftatmende Transformator besitzt ein Ausdehnungsgefäß. Dieses ist so dimensioniert, daß bei ordnungsgemäßer Ölbefüllung des Transformators die durch Temperaturschwankungen hervorgerufenen Änderungen des Ölolumens aufgenommen werden können. Der Gasraum des Ausdehners steht über eine Trocknungsvorlage in Kontakt mit der Umgebungsluft. Steigt das Ölolumen

im Ausdehner, wird das im Gasraum des Ausdehners befindliche Gas in die Umgebung ausgeblasen. Sinkt das Ölvolumen, strömt Umgebungsluft in den Gasraum des Ausdehners ein. Der Transformator atmet. An jeder Phasengrenze zwischen Flüssigkeit und Gas finden Austauschreaktionen statt. Die Luftbestandteile lösen sich im Öl bis sich die jeweilige Gleichgewichtskonzentration eingestellt hat.

Die Geschwindigkeit der Reaktion wird von der Bauart und Betriebsweise des Transformators bestimmt.

In Tab. 1 sind die aus den Luftkonzentrationen berechneten Gleichgewichtskonzentrationen im Öl dargestellt. Zur Berechnung wurden jeweils Mittelwerte der Ostwaldkoeffizienten k benutzt, die für verschiedenen Transformator-Mineralöle bestimmt wurden [1], mit Ausnahme der Koeffizienten für C_3H_8 und C_3H_6 , die aus [3] ermittelt wurden und des Ar-Koeffizienten (eigene, unveröffentlichte Ergebnisse für Shell Diala D). In Gas-in-Öl-Analysen luftgesättigter Transformatoröle findet man meist ca. 32.000 ppm Sauerstoff und ca. 66.000 ppm Stickstoff.

Tab. 1: Gaskonzentrationen und Ostwaldkoeffizienten in Transformatoren

| Gas | k bei 25°C | Gaskonzentration / ppm (v/v) | |
|-------------------------------|------------|------------------------------|-------------------|
| | | in der Luft [2] | gelöst im Öl (GG) |
| Ar | 0,15 | 9300 | 1395 |
| H ₂ | 0,055 | 0,5 | <1 |
| O ₂ | 0,172 | 209500 | 36034 |
| N ₂ | 0,091 | 780800 | 71052 |
| CO | 0,132 | 0,2 | <1 |
| CO ₂ | 1,09 | 400 | 436 |
| CH ₄ | 0,429 | 1,8 | <1 |
| C ₂ H ₆ | 2,82 | <0,1 | <1 |
| C ₂ H ₄ | 1,84 | <0,1 | <1 |
| C ₂ H ₂ | 1,24 | <0,1 | <1 |
| C ₃ H ₈ | 8,65 | <0,1 | <1 |
| C ₃ H ₆ | 7,66 | <0,1 | <1 |

Fehlertgase

Sowohl durch die natürliche Alterung von Isolierstoffen als auch fehlerhaften Betrieb können sich Fehlertgase im Transformator bilden und Sauerstoff verbraucht werden. Die Fehlertgase entstehen im Transformator nicht willkürlich und einzeln. Die gebildete Gasmenge und deren Zusammensetzung

hängen von der Art und Intensität des Fehlers ab.

Entladungen mit niedriger Energie (z.B. Teilentladung, Funkenentladung, Korona-Entladung) bewirken hauptsächlich die Bildung von Wasserstoff und in geringerem Maße Methan- und Ethanbildung. Entladungen hoher Energie (Lichtbogen, Durchschlag, Kurzschluss) führen zur Bildung von Wasserstoff und Ethen sowie geringeren Anteilen Methan und Ethen. Thermische Belastungen verursachen im Bereich zwischen 300°C und 700°C die Entstehung von Ethen und Propen, Wasserstoff und Methan. Dagegen bildet sich bei Temperaturen oberhalb von 700°C hauptsächlich Ethen und Propen, auch Wasserstoff. Ist die Temperatur des Heißpunktes größer 1000°C entsteht auch Ethen. Unter Streugasen, das zunehmend seit dem Jahr 2000 beobachtet wird, versteht man die unerwartete Bildung von Gasen in Ölen, die auf moderate Temperaturen (<200°C) erhitzt wurden. Wasserstoff, Methan und Ethan könnten dadurch in allen ölgefüllten elektrischen Geräten gebildet werden. Die Zelluloseoxidation verursacht die Bildung von größeren Mengen Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid. Gase können in einigen Fällen auch durch Rostvorgänge oder andere chemische Reaktionen, an denen Stahl, unbeschichtete Oberflächen oder Schutzanstriche beteiligt sind, entstehen [1].

Die im Transformator entstandenen Gase lösen sich zunächst im Öl. Bei starker Gasentwicklung bilden sich Gasblasen, die im Transformatoressel aufsteigen und das Buchholzrelais erreichen können.

Gasaustausch beim Blasenauftieg

Während des Blasenauftiegs finden zwischen den in der Blase vorhandenen freien Gasen und den im umgebenden Transformatoröl gelösten Gasen Austauschreaktionen statt. Da die Löslichkeit der einzelnen Gase in der Isolierflüssigkeit verschieden ist, werden die Gase während des Blasenauftiegs zum Buchholzrelais in unterschiedlich starkem Maße in der Flüssigkeit gelöst bzw. treten im Öl gelöste Gase in die Blase über. Der Ostwaldkoeffizient k gibt das Verhältnis zwischen der Konzentration des im Öl gelösten Gases und der Konzentration des Gases in der Gasphase im Gleichgewichtszustand an (Tab. 1). Haben Gasblasen das Buchholzrelais erreicht, so hat dieses Gas eine andere Zusammensetzung als das am Fehlerort gebildete. Die typischen Fehlertgasmuster sind unschärfer geworden. Je länger der Weg durch das Öl und je langsamer der Blasenauftieg

zum Buchholzrelais war, desto größer ist die Verfälschung.

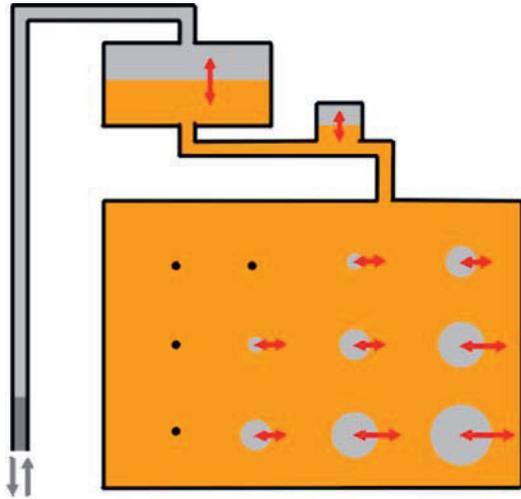


Abb. 1: Phasengrenzen zwischen Transformatoröl (mit gelöstem Gas) und freiem Gas

Zusammensetzung von Buchholzgasen

Es gibt nur relativ wenige Arbeiten, in denen Ergebnisse von Buchholzgasanalysen veröffentlicht wurden. Schliesing wertete 210 Gasproben von Buchholzmeldungen aus, die von 92 Transformatoren stammten [4]. Träger analysierte über 70 Gasproben, die nach Buchholzrelaisanregung entnommen wurden und verglich Analysenergebnisse, Schadensdiagnose und Schadensarten nach vorliegenden Befundergebnissen [5]. Bräsel, Brunner und Hartmann untersuchten Verfahren zur Fehlerfeststellung und Bestimmung der Fehlerart aus Buchholzgasanalysen. Dazu wurden 139 erfasste Störfälle aus dem Zeitraum von 1975 bis 1997 bewertet. Eine Zusammenstellung der Analysenergebnisse wurde nicht veröffentlicht [6]. Die vollständigen Prüfberichte dieser 139 Proben und weitere 27 Buchholzgasanalysen eines akkreditierten

Laboratoriums aus dem Zeitraum von 2008 bis 2017 standen zur Verfügung.

In Tab. 2 ist unter Einbeziehung der Angaben von Schliesing die prozentuale Verteilung der Gaskonzentrationen im Buchholzgas zusammengefasst.

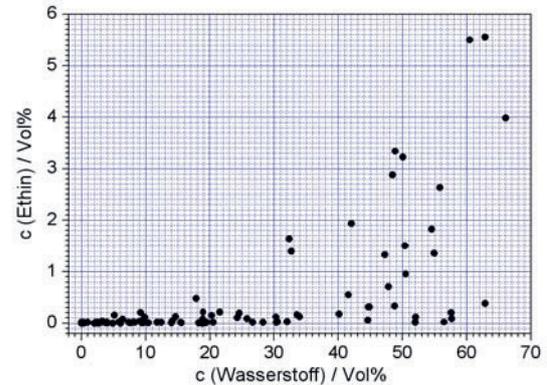


Abb. 2: Buchholzgaszusammensetzung: Wasserstoff und Ethin

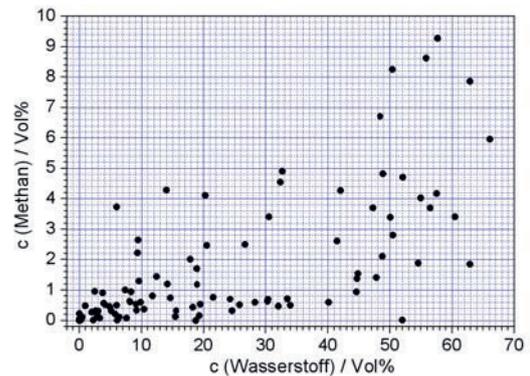


Abb. 3: Buchholzgaszusammensetzung: Wasserstoff und Methan

Wie aus Tab. 2 hervorgeht, sind die Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffdioxid nur in Ausnahmefällen in Konzentrationen >10 Vol% im Buchholzgas enthalten. Dagegen

Tab. 2: Prozentuale Verteilung der Gaskonzentrationen von 376 Buchholzgasproben

| c / Vol% | H ₂ | O ₂ | N ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| bis 0,1 | 38 | 0 | 0 | 29 | 24 | 58 | 96 | 71 | 82 |
| >0,1 bis 1,0 | 7 | 1 | 0 | 47 | 56 | 22 | 4 | 14 | 10 |
| >1,0 bis 3,0 | 8 | 6 | 0 | 11 | 17 | 9 | 0 | 11 | 4 |
| >3,0 bis 10,0 | 17 | 18 | 1 | 6 | 2 | 10 | 0 | 3 | 3 |
| >10,0 bis 30,0 | 13 | 75 | 8 | 5 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| >30,0 bis 50,0 | 10 | 0 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| >50,0 | 7 | 0 | 83 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

enthielten 30 % aller Buchholzgasen mehr als 10 Vol% Wasserstoff. Ethinkonzentrationen >0,1 Vol% waren nur in Proben nachweisbar, in denen die Wasserstoffkonzentration bereits >4 Vol% betrug. War die Ethinkonzentration größer als 1 Vol%, wurden im Gas jeweils mehr als 30 Vol% Wasserstoff gemessen (Abb. 2).

Abb. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Wasserstoff und Methan in den ausgewerteten Buchholzgasanalysen. Betrachtet man sowohl die durch verschiedene Fehler gebildeten Schlüsselgase als auch die Löslichkeit dieser Gase im Öl, zeigt sich, dass es kaum möglich ist, eine Unterscheidung zwischen Entladungen niedriger Energie und thermischen Fehlern allein auf Basis der Buchholzgaszusammensetzung zu treffen. Einerseits werden die schlecht löslichen Gase Wasserstoff und Methan bei beiden Fehlern gebildet und andererseits erreichen die Schlüsselgase für thermische Fehler Ethen und Ethan auf Grund ihrer guten Löslichkeit im Öl nicht immer das Buchholzrelais. Wenn eine Unterscheidung zwischen diesen Fehlern aber nicht zuverlässig möglich ist, ist es auch nicht notwendig, die Methan-, Ethan- und Ethenkonzentration einzeln zu messen. Ein Kohlenwasserstoff-Summenparameter (CH_4+) ist dann ausreichend.

Messung von Transformatorgasen nach DIN EN 60567

In der DIN EN 60567 ist der Einsatz eines gaschromatographischen Systems für die Analyse freier und gelöster Transformatorgase im Laboratorium vorgeschrieben [7]. Üblicherweise werden Geräte mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) und Flammenionisationsdetektor (FID) sowie Methanizer eingesetzt. Die mit solchen Gaschromatographen erreichbaren Nachweisgrenzen sind klein, die Genauigkeit sehr gut und die Wiederholbarkeit der Gasanalyse hoch. Beim Einsatz von Online- oder Vor-Ort-Analysatoren mit Gaschromatographen wird häufig vorausgesetzt, dass die bei Laboruntersuchungen erreichbaren Verfahrenskenngrößen auch für den Online-/Vor-Ort-Betrieb zutreffen. Dabei wird übersehen, dass in einem akkreditierten Prüflaboratorium erhebliche Anstrengungen zur Qualitätssicherung unternommen werden müssen. Die wichtigste Maßnahme ist es, gut geschultes, erfahrenes Fachpersonal einzusetzen, das die notwendigen Arbeiten regelmäßig ausführt. In Laboratorien stehen üblicherweise mehrere Prüfgase zur Verfügung, Prüfgaszusammensetzungen und Gerätesysteme unterliegen

regelmäßigen Kontrollen, je nach Gaszusammensetzung können die GC-Programme und Auswerterroutinen [8] qualifiziert angepasst werden etc.. Auch herrschen im Laboratorium relativ konstante Umgebungsbedingungen. Das GC-Trägergas (meist Argon), Wasserstoff für den FID und den Methanizer sowie synthetische Luft für den FID stehen in Druckgasflaschen / Ringleitungen zur Verfügung. Auch zur Vor-Ort-Messung müssen zumindest Trägergas und Wasserstoff bereitgestellt werden. Da das Mitführen von Druckgasflaschen wenig praktikabel ist, sind in mobilen Gaschromatographen meist kleine Druckgefäße für diese Gase eingebaut, die nachgefüllt werden müssen. Druckgasflaschen mit Armaturen müssen unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen dafür vorgehalten werden. Gaschromatographen mit Zubehör sind relativ teure Geräte. Auch deshalb sind sie für den Einsatz in einem Vor-Ort-Messgerät, das nicht ständig, sondern nur im Ereignisfall genutzt wird, weniger geeignet und vor allem nicht erforderlich.

Analysator zur Vor-Ort-Messung von Buchholzgasen

Die Leistungsfähigkeit eines Sensors oder Messsystems kann durch eine Reihe von Kenngrößen beschrieben werden. Dazu gehören die Empfindlichkeit, Nachweisgrenze, der Messbereich, die Selektivität, Auflösung, Ansprechzeit, Hysterese, Stabilität und Lebensdauer. Unter der Empfindlichkeit versteht man die Änderung des Messwerts pro Konzentrationseinheit des Analyten. Im allgemeinen gibt es zu jedem Analyten eine gewisse Anzahl von Substanzen, die eine Analytkonzentration vortäuschen, eine sog. Querempfindlichkeit verursachen [9]. Entsprechend bezeichnet man in der Gasmesstechnik die Änderung des Messwerts pro Konzentrationseinheit jedes anderen als des zu messenden Gases als Querempfindlichkeit des Sensors oder Messsystems für dieses Gas. Die Genauigkeit jeder Gasmessung wird daher auch von den Konzentrationen der im Messgas enthaltenen Gase und der Querempfindlichkeit des Messsystems für diese Gase beeinflusst. Für jeden Einsatzzweck ist die zu erwartende Genauigkeit deshalb unter Berücksichtigung aller potentiell im Prozessgas vorhandenen Gase abzuschätzen.

Das neue Gerätesystem sollte die in Tab. 3 zusammengefassten Kennwerte erfüllen.

Tab. 3: Gerätekenwerte des Analysators

| Gas | Messbereich (25°C, 1013 hPa) | Genauigkeit (nach 30 min Einlaufzeit) (25°C, 1013 hPa) |
|-------------------------------|--|--|
| H ₂ | > 0,3 Vol% bis 5,0 Vol% > 5,0 Vol% bis >95,0 Vol% | ±10 % rel. ±0,1 Vol% (bezogen auf Gas mit 12 Vol% O ₂ , Rest N ₂) ±10 % rel. (bezogen auf Gas mit 0 - 21 Vol% O ₂ , Rest N ₂) |
| CO | > 0,05 Vol% bis 25,0 Vol% | ±10 % rel. ±0,05 Vol% (bezogen auf Gas mit 0 - 21 Vol% O ₂ , Rest N ₂) |
| CO ₂ | > 0,05 Vol% bis 10,0 Vol% | ±10 % rel. ±0,05 Vol% (bezogen auf Gas mit 0 - 21 Vol% O ₂ , Rest N ₂) |
| CH ₄ + (*) | > 0,05 Vol% bis 10,0 Vol% | ±10 % rel. ±0,05 Vol% (bezogen auf Gas mit 0 - 21 Vol% O ₂ , Rest N ₂) |
| C ₂ H ₂ | > 0,05 Vol% bis 10,0 Vol% | ±10 % rel. ±0,05 Vol% (bezogen auf Gas mit 0 - 21 Vol% O ₂ , Rest N ₂) |

* CH₄+: Summenparameter, alle gasförmigen Kohlenwasserstoffe ohne C₂H₂, kalibriert als Methan

Zur Wasserstoffmessung wurde ein speziell optimierter Wärmeleitfähigkeitsdetektor der Henze/Hauck PMA GmbH Dessau eingesetzt. Da es sich beim WLD-Messwert um einen Summenparameter aus allen im Messgas vorhandenen Gasen handelt, wurden die Querempfindlichkeiten aller Gase untersucht. Das Sauerstoff / Stickstoff-Verhältnis in Transformatorgasen kann durch im Öl stattfindende, Sauerstoff verbrauchende Reaktionen von dem entsprechenden Verhältnis in Luft abweichen. In etwa 60% der ausgewerteten Buchholzgasproben mit einer Wasserstoffkonzentration <0,3 Vol% war das der Fall. Der Einfluss von Schwankungen der Sauerstoffkonzentration auf die Genauigkeit der Wasserstoffmessung kann bei Wasserstoffkonzentrationen >5 Vol% vernachlässigt werden. Um den Messfehler im Bereich zwischen >0,3 Vol% und 5 Vol% H₂ zu minimieren, wird für diese Messungen eine Sauerstoffkonzentration im Gas von 12 Vol% angenommen. Der resultierende max. Fehler beträgt ±0,10 Vol% H₂. Die Kohlenstoffdioxid- und Wasserdampfkonzentrationen müssen gemessen und ihr Einfluss auf des WLD-Signal verrechnet werden. Der Einfluss der Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen kann verrechnet werden. Vernachlässigt werden darf der Einfluss des potentiell vorhandenen Argons. Da auf dem Markt keine geeigneten Sensoren zur Messung von CO, CO₂, CH₄+ und C₂H₂ vorhanden waren, mussten diese Sensoren selbst entwickelt und gebaut werden. Dabei wurde auf die umfangreichen Erfahrungen aus früheren Entwicklungen, teilweise gemeinsam mit der Ritschel Sensor GmbH Bornheim und der Gatron GmbH Greifswald, zurückgegriffen. Durch die Auswahl des IR-Filters gelang es einen Sensor herzustellen, mit dem die

Kohlenwasserstoffe als Summensignal im Fehlerfall zuverlässig nachgewiesen werden können. In Tab. 4 ist der Einfluss der einzelnen Kohlenwasserstoffe auf das Sensorsignal, das als Methankonzentration kalibriert wurde, dargestellt.

Tab. 4: Einfluss häufig vorkommender Gase auf die Anzeige des CH₄-Sensors

| Gas | Ist-Konz. / Vol% | Anzeige als CH ₄ + / Vol% |
|--------|---------------------|---|
| Methan | 0,10 | 0,10 |
| Ethan | 0,10 | 0,16 |
| Ethan | 2,00 | 6,00 |
| Ethen | 0,10 | 0,04 |
| Propan | 0,10 | 0,09 |
| Propen | 0,10 | 0,09 |

Wie aus Tab. 2 zu entnehmen ist, wurde in keiner der untersuchten Buchholzgasproben eine Ethankonzentration >1 Vol% festgestellt. Es besteht deshalb keine größere Gefahr einer Messbereichsüberschreitung des Sensors allein auf Grund des Ethananteils im Buchholzgas.

Der Einfluss von Ethan ist auch beim Ethinsensor zu beachten. 10 Vol% Ethan entsprechen einer Anzeige von 0,6 Vol% Ethin. Die Querempfindlichkeit von ca. 1 Vol% Ethan auf die angezeigte Ethinkonzentration kann im Rahmen der Messgenauigkeiten vernachlässigt werden. Die Wasserdampfquerempfindlichkeit des Ethinsensors ist gering. Weil die Wasserdampfkonzentration im Gas deutlich größer als die Ethinkonzentration sein und stark schwanken kann, wird die Wasserdampfquerempfindlichkeit ebenfalls verrechnet.

Ein sehr wichtiges technisches Kriterium eines Messgeräts ist seine Langzeitstabilität. Unter

"Langzeit" versteht man in der Transformatorgasanalyse einen Zeitraum der möglichst die Lebensdauer eines Transformators, mindestens aber mehrere Jahre umfasst. Für ein neues Gerät kann die zu erwartende Langzeitstabilität nur abgeschätzt werden. In eigenen Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Sensormodulen aus Online-Monitoren zur Transformatorgasanalyse der Gatron GmbH Greifswald konnten keine Empfindlichkeits-

änderungen sowohl der Wärmeleitfähigkeitsdetektoren als auch der NDIR-Sensoren im Zeitraum von bis zu elf Betriebsjahren nachgewiesen werden. Die festgestellten Abweichungen lagen im Bereich der Analysegenauigkeiten [10]. Auf Grund der eingesetzten Bauteile werden für den vorgestellten Vor-Ort-Analysator ähnlich große Langzeitstabilitäten erwartet.



Abb.4: Analysator zur Vor-Ort-Bestimmung von Buchholzgasen BGT 4.2

Literaturnachweis

- [1] DIN EN 60599 2016-10, In Betrieb befindliche, mit Mineralöl befüllte elektrische Geräte – Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase (IEC 60599:2015)
- [2] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18340>, (30.09.2015)
- [3] E. Bräsel, Beiträge zur gasanalytischen Diagnostik von Öltransformatoren mit Luftabschlussystem, Dissertation, Greifswald 1981
- [4] H. Schliesing, Ein neues Verfahren zur schnellen Analyse von Buchholzgasen aus Transformatoren, Elektrizitätswirtschaft, 77 (1978), H. 19, S. 676-678
- [5] R. Tröger, Chromatographische Buchholz-Relaisgasanalyse - ein Beitrag zur Zustandseinschätzung von ölgefüllten Transformatoren, Energietechnik 40 (1990) H. 7, S. 260-263
- [6] E. Bräsel, E. Brunner, E. Hartmann, Neue Hilfsmittel zur Diagnoseeignung von Gasen aus dem Buchholz-Relais, Elektrizitätswirtschaft 98 (1999), H. 25, S. 16-24
- [7] DIN EN 60567:2011 Ölfüllte elektrische Betriebsmittel.-Probennahme von Gasen und Analyse freier und gelöster Gase – Anleitung
- [8] T. Widmer, U. Sasum, Ethinsensor für die Transformatorgasanalyse, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, ETG-Fachtagung, Fulda 15.-16.11.2012, VDE Verlag Berlin Offenbach ISBN 978-8-8007-3465-8
- [9] Gründler, P. Chemische Sensoren, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2004
- [10] U. Sasum, U. Guth, Wasserstoffmessung in Prozessgasen, 12. Dresdner Sensor Symposium 2015, Dresden, 07.-09.12.2015, DOI 10.5162/12dss2015/P3.2, ISBN 978-3-9813484-9-1