

- **Fehlergasverluste frei-atmender Leistungstransformatoren**

Dipl.-Ing. Andreas Müller

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. E. Gockenbach

Leibniz Universität Hannover

Tag der mündlichen Prüfung:

16.12.2016

Die Gas-in-Öl-Analyse ist ein etabliertes Verfahren zur Diagnose ölgefüllter, elektrischer Betriebsmittel. Natürliche Alterung sowie thermische und elektrische Fehler erzeugen Gase, die sich im umgebenden Isolieröl lösen. Eine Analyse dieser Gase ermöglicht die Bestimmung der Fehlerursache. Vor allem bei Leistungstransformatoren kommt diese Methode zum Einsatz, die als Laboranalyse und als Online-Monitoring angewendet werden kann. Prinzipiell kann zwischen zwei unterschiedlichen, für die Gas-in-Öl-Analyse relevanten, Transformator-Designs unterschieden werden: geschlossene Leistungstransformatoren (z. B. Hermetik-Transformatoren oder Transformatoren mit Gummisack im Ausdehnungsgefäß) und frei-atmende Leistungstransformatoren, bei denen der Gasraum im Ausdehnungsgefäß über eine Trocknungsvorlage mit der Umgebungsluft in Kontakt steht. Dadurch ist im Ausdehnungsgefäß ein Austausch zwischen den in Öl gelösten Gasen und Luftgasen möglich. Für eine plausible Diagnose der gelösten Gase frei-atmender Leistungstransformatoren muss daher die gesamte Gasbilanz berücksichtigt werden, also sowohl die Gasgeneration einer Fehlerstelle als auch ein möglicher Gasverlust über das Ausdehnungsgefäß. Dies wird in den aktuell eingesetzten Interpretationsverfahren jedoch nicht berücksichtigt, da bei deren empirischer Entwicklung keine Differenzierung zwischen beiden Bauarten stattgefunden hat.

Für eine Differenzierung nach Transformatorenbauarten sprechen jedoch verschiedene Gründe. Nach einer Ölentgasung kommt es bei frei-atmenden Leistungstransformatoren zu einem Wiederanstieg der Stickstoff- und Sauerstoffkonzentration im Öl bis hin zur Sättigung. Auf demselben Weg, auf dem Gase aus der Umgebungsluft über das Ausdehnungsgefäß ins Öl gelangen, verlassen gelöste Fehlergase den Leistungstransformator. Bei frei-atmenden Leistungstransformatoren sind Verluste daher durchaus plausibel. Ein Anstieg der Fehlergase kann, ausgelöst durch eine aktive Fehlerstelle, durch Gasverluste verschleiert werden. Wenn im Gleichgewichtszustand dieselbe Gasmenge generiert wird, die ebenfalls durch das Ausdehnungsgefäß verloren geht, stellt sich trotz aktivem Fehler eine konstante Gaskonzentration ein. Somit könnte ein akuter Fehler fälschlicherweise nicht diagnostiziert werden. Werden Gasverluste frei-atmender Leistungstransformatoren jedoch berücksichtigt, könnte die reale Gasgeneration berechnet und die tatsächliche Gefährlichkeit der Fehlerstelle besser eingeschätzt werden.

In dieser Arbeit werden zwei Schwerpunkte behandelt: die Analyse des dynamischen Verhaltens der im Öl gelösten Gase und die Betrachtung des gesamten Gashaushalts eines Transformators. Der Gashaushalt berücksichtigt den Zugewinn gelöster Gase durch aktive Fehlerstellen, deren Verteilung im Öl und den Verlust gelöster Gase über frei-atmende Ausdehnungsgefäße. Zur Bestimmung des Gashaushaltes werden mehrere Effekte berücksichtigt. Zunächst müssen die Sättigungseffekte des Öls, die Löslichkeiten einzelner Gase und von Gasmischungen im Öl betrachtet werden. Im zweiten Schritt müssen die Mechanismen berücksichtigt werden, welche den Austausch des Öls zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß ermöglichen. Schließlich müssen die Gasverluste durch Diffusion im Ausdehnungsgefäß bestimmt werden.

Der Austausch des Öls zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß wird durch verschiedene Mechanismen ermöglicht: Diffusion, Konvektion und den dominierenden gerichteten Ölfluss. Der Ölfluss entsteht durch Temperaturänderungen des Öls, die eine Volumenänderung bewirken. Bei Erwärmung werden große Mengen Öl mit gelösten Gasen aus dem Kessel in das Ausdehnungsgefäß bzw. bei Abkühlung vom Ausdehnungsgefäß zurück in den Kessel befördert. Die Gasverluste im Ausdehnungsgefäß entstehen durch Diffusion. Die Grundlagen und Zusammenhänge der Diffusion werden in dieser Arbeit anhand von Literaturquellen und Laborexperimenten hergeleitet. Deren Abhängigkeit von der Gasart, der Diffusionsfläche und der

Temperatur werden für einzelne Gase untersucht. Die theoretischen Überlegungen des Ölflusses werden in einem Laborexperiment verifiziert. Die Messergebnisse bestätigen die theoretische Beschreibung der Verluste gelöster Gase. Der Versuchsaufbau zeigt, dass Verluste und Rücksättigungen von Gasen nur dann auftreten können, wenn Öl zwischen Kessel und frei-atmenden Ausdehnungsgefäß zirkuliert.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden verwendet, um die Fehlergasverluste eines frei-atmenden Leistungstransformators zu modellieren. Zwei unterschiedliche Modelle werden gegenübergestellt. Im ersten Ansatz werden die Gasverluste zunächst gemessen und daraus ein Trend des Gasungsverhaltens errechnet. Im zweiten Ansatz wird ein mathematisches Modell aufgestellt. Das Modell ermöglicht es, die auftretenden Verluste zu simulieren und die tatsächliche Gasungsrate einer Fehlerstelle zu errechnen. Das verifizierte Modell ermöglicht die Abschätzung des Einflusses verschiedener Parameter auf die Gasverluste: Da sowohl die Oberflächengröße als auch die Temperatur im Ausdehnungsgefäß nur geringen Einfluss auf den Konzentrationsverlauf haben, darf vereinfachend die Umgebungstemperatur verwendet werden. Der Ölfluss zwischen Kessel und Ausdehnungsgefäß hat einen großen Einfluss auf den Konzentrationsverlauf. Ein Training des mathematischen Modells kann helfen, den Einfluss des Ölflusses besser zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Verläufe von Gas-in-Öl-Analysen frei-atmender Transformatoren und Transformatoren ohne Kontakt zur Umgebungsluft nur dann korrekt miteinander verglichen werden können, wenn die Gasverluste der frei-atmenden Transformatoren berücksichtigt werden.

- **Fault Gas Losses of free-breathing Power Transformers**

**Dipl.-Ing. Andreas Müller**

The dissolved gas analysis represents a well-established technique for the diagnosis of oil-filled electrical equipment. Natural aging, thermal and electrical failures generate gases which dissolve in the surrounding oil. An analysis of these gases provides a determination of the failure. In particular, power transformers benefit from this technique which can be performed as both laboratory analysis and online monitoring. Two different types of transformer designs relevant for dissolved gas analysis can be distinguished: sealed power transformers (e.g. hermetic transformers or transformers with a membrane installed in the conservator tank) and free-breathing power transformers which provide an exchange of gases through the conservator tank into ambient air. Free-breathing conservator tanks for power transformers are common in several European and other countries. Therefore, a feasible gas-based diagnosis for free-breathing power transformers requires the consideration of both gas generation

and gas losses through the conservator tank. Unfortunately, the differences in transformer designs are not taken into account in classic interpretation methods.

In this thesis free-breathing power transformers are considered. The conservator tank provides the only way for a gas exchange between ambient air and fault gases. For example, after oil degassing the rise of nitrogen and oxygen concentrations can be observed until saturation level is reached. Simultaneously, the same mechanism causes a loss of dissolved fault gases. Therefore, an actual rising fault gas level originated by an active fault can be concealed by fault gas losses: if the quantity of generated gas equals the quantity which is lost through the conservator tank, a constant gas concentration will be observed. The constant gas concentration could be misinterpreted as an inactivity of the fault. A correct interpretation could be provided if the actual gas generation can be calculated using known gas losses.

The presented work focuses on two key aspects: the analysis of the dynamic behaviour of dissolved gases and the calculation of the entire gas balance of a power transformer. The gas balance includes the gain of dissolved gases due to an active fault, their distribution in the oil and the loss through free-breathing conservator tanks. Several effects influence the gas balance: saturation effects, the oil-solubility of single gases and gas mixtures, equilibrium characteristics, the exchange between oil in the main and conservator tank and finally diffusion driven gas losses through the conservator tank.

The exchange of oil between the main and conservator tank is driven by different effects. Diffusion in the oil is superimposed by a convection effect or an oil flow, respectively. The effect of the oil flow predominates at power transformers. It results from a temperature change which causes the entire oil to change volume. Therefore, noticeable quantities of oil containing dissolved gases are exchanged between main and conservator tank. A free-breathing conservator tank allows the diffusion of gases between oil and ambient air. The fundamentals and context of diffusion of fault gases from oil into the ambient air are derived from literature sources and laboratory experiments. Diffusion depends on the individual gas type, the size of the surface area between air and oil and the temperature. Well-soluble gases volatilise slower from the oil than gases with lower solubility; hydrogen volatilises the fastest. The presented considerations are verified using a laboratorial setup which emulates the oil flow using a dedicated main and conservator tank. As the practical results show, a loss of dissolved gases can only occur if the oil is circulating through the conservator tank. The same applies for the solution of air gases from the ambient. The experiment confirms the previous theoretical description of the working thesis and the observations taken on power transformers in operation in terms of gas exchange.

The findings result in a simulation which considers the fault gas losses and the saturation of oil with atmospheric gases. Two different approaches are used. In the first method the losses are measured and a trend of the gassing behaviour is interpolated. The second method establishes a mathematical model, which allows the simulation of occurring gas losses and the calculation of a faults' actual gassing rate.

Both models presented allow the evaluation of various parameters affecting the losses of dissolved gases from the main tank oil. As the simulation shows, a change of the surface area or the temperature in the conservator tank of the transformer only has little effects on the concentration trend. Therefore, an estimation of the temperature in the conservator tank using the ambient temperature is acceptable. The main influencing factor on the concentration trend is given by the oil flow between main and conservator tank. Because of this, it is recommended to train the mathematical model.

In conclusion, the consideration of gas losses in free-breathing power transformers enables a correct calculation of actual fault gassing rates. Hence the correct use of interpretation methods as well as the general comparison between free-breathing and sealed power transformers can be achieved.