

MODELLANSATZ ZUR WEITERENTWICKLUNG DER ZUSTANDBEWERTUNG VON TRANSFORMATOREN MIT HILFE DER KONTINUIERLICHEN GAS-IN-ÖL-ANALYSE

Christof RIEDMANN¹, Uwe SCHICHLER², Wolfgang HÄUSLER³, Wolfgang NEUHOLD⁴

Einleitung

Bei der Zustandsbewertung von Transformatoren zählt die Gas-in-Öl-Analyse zu dem am weitesten verbreiteten und akzeptierten Verfahren. Zur elektrischen Isolierung sowie zur Kühlung der Transformatoren wird vorwiegend Mineralöl eingesetzt. Durch elektrische und thermische Überbeanspruchungen im Isoliersystem des Transformators kann es zu einer Aufspaltung der Kohlenstoff-Kohlenstoff- bzw. Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen kommen. Nach dieser Aufspaltung rekombinieren die daraus entstandenen Spaltprodukte unter anderem zu den sogenannten Schlüsselgasen, welche in gelöster oder ungelöster Form vorliegen können [1].

Mit Hilfe der Gas-in-Öl-Analyse wird die Konzentration der einzelnen Schlüsselgase im Mineralöl bestimmt. Anhand der relativen Verhältnisse der Gaskonzentrationen ist es möglich, auf die Art des Defekts im Inneren des Transformators rückzuschließen. Mit Hilfe der absoluten Gaskonzentrationen kann die Kritikalität eines Defekts bestimmt werden [1].

Entgasung an der Phasengrenzfläche – Problemstellung

Die meisten Bewertungsmethoden gehen von der Kenntnis der tatsächlichen Gaskonzentrationen oder Gasänderungsraten aus. Aufgrund der Diffusion der Schlüsselgase in die Gasphase im Ausdehnungsgefäß, beziehungsweise über die Trocknungsvorlage auch in die Umgebungsluft, kann es hierbei aber zu einer signifikanten Verfälschung der gemessenen Gaskonzentrationen kommen. Somit ist die Berücksichtigung der Diffusion bei der Auswertung der Gas-in-Öl-Analyse von zentraler Bedeutung [2].

Unter der Diffusion wird der Stofftransport infolge der stochastischen thermischen Bewegung der Moleküle verstanden. In dem hier betrachteten Fall bewegen sich die gelösten Gasmoleküle von deren Entstehungsort (Defektstelle) weg und streben eine Gleichverteilung der Gaskonzentration im Gesamtsystem an. Teil des Gesamtsystems ist bei frei-atmenden Transformatoren jedoch auch die Gasphase im Ausgleichsgefäß bzw. die Umgebungsluft. Die Umgebungsluft weist hierbei sehr geringe Konzentrationen an Schlüsselgasen auf. Das bedeutet, dass es nach einer kurzzeitigen Gasbildung zu einer Entgasung des Mineralöls bis unter die Nachweisgrenze kommt und dass sich bei einer kontinuierlichen Gasbildung ein Gleichgewicht zwischen Gasverlusten und Gasbildung einstellt. Die Diffusionsströme und somit die Entgasung des Mineralöls sind sehr stark von der Löslichkeit der unterschiedlichen Gase und der Temperatur der beteiligten Medien abhängig [2, 3].

Dies bedeutet für die Gas-in-Öl-Analyse folglich, dass es zu einer Verfälschung der Interpretationsgrundlage kommen kann. Weiter führt dies dazu, dass geringere Gaskonzentrationen bzw. Gasänderungsraten gemessen werden als tatsächlich aufgrund der Kritikalität des Defekts vorliegen sollten und somit der Zustand des Transformators falsch bewertet wird, insofern diese Verfälschung nicht berücksichtigt wird. Darüber hinaus können sich die relativen Verhältnisse der Gaskonzentrationen untereinander verschieben, da verschiedene Gase mit unterschiedlichen

¹ Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, +43 (0) 316 873 7411, christof.riedmann@tugraz.at, <http://www.hspt.tugraz.at>

² Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, +43 (0) 316 873 7400, uwe.schichler@tugraz.at, <http://www.hspt.tugraz.at>

³ Industrie Automation Graz, Autaler Strasse 55, 8074 Raaba, +43 (0) 316 405 105 12, wolfgang.haeusler@iag.co.at, <https://www.iag.co.at>

⁴ Industrie Automation Graz, Autaler Strasse 55, 8074 Raaba, +43 (0) 316 405 105 13, wolfgang.neuhold@iag.co.at, <https://www.iag.co.at>

Geschwindigkeiten diffundieren. Folglich kann ein vorliegender Defekt einer falschen Defektart zugewiesen werden, was Auswirkung auf die zu setzenden Handlungen hat.

Modellvorstellung – Lösungsansatz

Um eine korrekte Zustandsbewertung durchführen zu können, ist es wesentlich, die tatsächlichen Gaskonzentrationen bzw. Gasänderungsraten zu ermitteln. Das heißt, dass die gemessenen Gaskonzentrationen um die Entgasung an der Phasengrenzfläche bereinigt werden müssen oder die Bewertungsverfahren anzupassen sind. Dies ist nur möglich, wenn die Gasverluste an der Phasengrenzfläche quantifiziert werden können. Ziel des gegenwertigen Forschungsprojekts DGA4PE am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement ist es, ein geeignetes Modell zu entwickeln.

Bei der Grenzschichttheorie wird zwischen dem Einschicht-Modell und dem Zweischicht-Modell sowie zwischen dem Stagnant-Film-Modell und dem Surface-Renewal-Modell unterschieden. Beim Einschichtmodell wird angenommen, dass es nur einen Übergangsbereich zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase gibt wohingegen bei dem Zweischichtmodell sowohl ein Übergang im Bereich der Gasphase als auch ein Übergang im Bereich der Flüssigphase angenommen wird. Die Grenzflächen können hierbei als Widerstand des Massenstroms betrachtet werden. In den meisten Fällen ist der Widerstand in der einen Grenzschicht deutlich größer als in der anderen und folglich ist die Betrachtung einer Grenzschicht meist ausreichend. Bei schwer löslichen Gasen dominiert der Widerstand der Flüssigkeitsgrenzschicht und bei leicht löslichen Gasen der Widerstand der Gasgrenzschicht [3, 4].

Der Massenstrom über die Phasengrenzfläche ist im Wesentlichen vom Konzentrationsgradienten zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase, der Phasengrenzfläche an sich und den Diffusionskoeffizienten abhängig und kann mit den Fick'schen Gesetzen beschrieben werden. Ein weiteres Problem bei der Ermittlung der zeitabhängigen Konzentrationsgradienten ist, dass die Konzentrationen einmal in Form der Konzentration an in Öl gelösten Gasen und einmal in Form eines Partialdrucks in der Gasphase vorliegen. Den Zusammenhang zwischen den beiden Größen liefert das Gesetz nach Henry. Jedoch sei hier angemerkt, dass eine starke Temperaturabhängigkeit der gegebenen Koeffizienten vorliegt und diese nach aktuellem Stand der Wissenschaft nur experimentell bestimmt werden können. Ebenso wie die Henry-Konstanten weisen auch die Diffusionskoeffizienten sowohl eine starke Abhängigkeit von der Temperatur als auch von dem Gas selbst auf. Hierbei ist jedoch nach aktuellem Wissenstand eine Bestimmung mit Hilfe von mathematischen Verfahren sowie anhand der Stoffeigenschaften der beteiligten Materialien und Molekülen möglich [2, 4].

Die Beschaffenheit der Grenzschicht ist für die Modellbildung von großer Bedeutung. Abhängig von dem verwendeten Fluid ergibt sich die Grenzschicht nach der Grenzschichttheorie als zu bestimmende Konstante, welche oftmals als Grenzschichtdicke bezeichnet wird. Der Einfluss der Ausdehnung der Grenzschichtoberfläche kann einfach ermittelt werden, da im Ausdehnungsgefäß keine turbulenten Verhältnisse auftreten. Somit ergibt sich die Grenzschichtdicke als zu definierende Konstante.

Referenzen

- [1] N. A. Bakar, A. Abu-Siada, S. Islam: „A Review of Dissolved Gas Analysis Measurement and Interpretation Techniques“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 30, No. 3, 2014
- [2] C. Riedmann, U. Schichler: „Online DGA – State of the Art and Influencing Parameters“, 5th Int. Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance, Bukarest, Rumänien, Report 59, 2019
- [3] E. L. Cussler: „Diffusion – Mass Transfer in Fluid Systems“, 3. Auflage, Cambridge University Press, 2009
- [4] A. Müller: „Fehlgasverluste frei-atmender Leistungstransformatoren“, Dissertation, Universität Stuttgart, sierke Verlag, 2017