

Interpretation der Gas-in-Öl-Analysen von Leistungstransformatoren durch Einsatz von Fuzzy Logik mit dem Ziel einer präzisen IT-gestützten Zustandserfassung

M. Fischer, J. Aragón Patil, S. Tenbohlen,

Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Pfaffenwaldring 47, 70569

Stuttgart, E-Mail: markus.fischer@ieh.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden Interpretationsverfahren für die Gas-in-Öl-Analyse (DGA) zur Zustandsüberwachung von Leistungstransformatoren vorgestellt. Ausführlich wird die Weiterentwicklung dieser Interpretationsmethoden durch die CIGRE Task Force 15.01.01 dargestellt. Durch eine neue auf Fuzzy Logik basierte Interpretationsmethode (FLI) kann die CIGRE-Interpretationsmethode weiter verbessert werden. Im Beitrag werden zunächst die Grundlagen der Fuzzy Logik besprochen, bevor im nächsten Schritt die anwendungsbezogene Fuzzy Logik der FLI vorgestellt wird. Schließlich rundet eine Fallstudie den Beitrag ab, bei der die FLI anhand konkreter Gas-in-Öl-Analysen ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen muss.

1 Einleitung

Leistungstransformatoren sind versorgungskritische und zugleich kostspielige Komponenten des elektrischen Energieversorgungsnetzes. Ihnen muss deshalb größte Bedeutung beigemessen werden. Viele Leistungstransformatoren nähern sich inzwischen dem Ende ihrer kalkulierten Lebensdauer, so dass die Überwachungs- und Diagnosemethoden zur Zustandseinschätzung an Bedeutung gewinnen und weiterhin großes Potential für Forschung bieten. Eine rechtzeitige Fehlerdiagnose ist von entscheidender Bedeutung, um teure Ausfälle im Energieversorgungssystem zu vermeiden und den sicheren und stabilen Betrieb des Leistungstransformators zu gewährleisten.

Leistungstransformatoren sind zum Zwecke der Isolation und der Wärmeabfuhr mit Öl gefüllt. Im Allgemeinen ist das Transformatoröl auch unter Normalbedingungen einem langsamen Alterungsprozess unterworfen. Aber durch thermische oder elektrische Beanspruchung kann sich der Alterungsprozess verschärfen und Isolationsschäden hervorrufen. Dieser Prozess wird von der Entwicklung diverser Spaltgase begleitet, die den Leistungstransformator zur Explosion bringen und Kollateralschäden verursachen können [1].

Einige der im Transformatoröl gelösten Gase können als CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_8 , C_3H_6 , H_2 , O_2 und N_2 identifiziert werden. Der Oxidationsprozess, dem das Transformatoröl ausgesetzt ist, basiert auf der Reaktionen freier Radikale. Freie Radikale sind stark reagierende Kohlenwasserstoffmoleküle, die sich mit Sauerstoff zu Peroxiden verbinden [2].

1.1 Die Gas-in-Öl-Analyse (DGA)

Eine der meistgenutzten und -akzeptierten Hilfsmittel, um eine Fehlerentwicklung frühzeitig zu erkennen, ist die DGA. Bei der DGA wird eine Probe des Transformatoröls genommen und die in der Probe gelösten Gase extrahiert. Anschließend wird unter Einsatz eines Gaschromatographen Art und Konzentration der gelösten Gase bestimmt. Schließlich versucht man die Konzentrationen der gelösten Gase mit dem Zustand des Transformators in Beziehung zu bringen, um dadurch möglicherweise eine Fehlerprognose abgeben zu können. Durch praktische Erfahrung und Expertenwissen wurden bestimmte Gasmuster einzelnen Fehlern zugeordnet. Die Menge Gas, die vom Öl gelöst wird, hängt von der Energie, dem Ort und dem Erscheinungsbild jedes Fehlers ab [3].

Durch den Einsatz von DGA-basierten online-Monitoringsystemen ist die Voraussetzung geschaffen, durch kontinuierliche Überwachung die Entwicklung eines Transformatorfehlers rechtzeitig zu erkennen. Das Risiko der Zerstörung eines Leistungstransformators wird dadurch gemindert und gleichzeitig die Voraussetzungen für eine effektive Überwachungsstrategie geschaffen [4].

2 Die Interpretation der DGA

Die DGA selbst liefert keine Informationen über den Zustand eines Leistungstransformators, sie muss erst geeignet interpretiert werden. Folglich haben viele Experten Informationen und Erfahrungen gesammelt, um Diagnosemethoden zu entwickeln, die die Inter-

pretation der Gaskonzentrationen im Hinblick auf Typ und Intensität eines Transformatorfehlers ermöglichen. Einige der am häufigsten verwendeten Interpretationsschemata stützen sich auf Schlüsselgasquotienten und Schlüsselgasen.

Alle Interpretationsschemata gemeinsam ist das Ziel, den Fehlertyp von der DGA abzuleiten. Als populärste Schemata sind zu nennen: die IEC 60599, die IEEE-Methode, Rogers Ratios, Doernenberg, Duval, Gas-Nomogramm-Methode und die Schlüsselgasanalyse [5]. Dennoch kann, ausgehend von einer gemeinsamen DGA, die Anwendung verschiedener Interpretationsschemata zu unterschiedlichen Fehleraussagen und Schlussfolgerungen führen. Folglich besteht ein zunehmendes Interesse daran, alle Faktoren zu erfassen, die die DGA-Interpretation beeinflussen können, wie z. B. der Transformator Typ, die Designeigenschaften des Transformators, die klimatischen Bedingungen am Standort sowie der Lastfaktor.

Infolgedessen fand sich 1999 die CIGRE Task Force 15.01.01 (CIGRE) zusammen, um sich über die Interpretationsschemata zu beraten und ins Besondere deren Abweichungen in der Fehlerdiagnose zu diskutieren. Die erarbeiteten Verbesserungen bei der Interpretation der DGA mündeten in einem neuen Interpretationsschema [5].

2.1 Das Interpretationsschema der CIGRE Task Force 15.01.01 (CI) für die DGA-Interpretation

Dieses Interpretationsschema bestehen aus zwei Teilen. Der erste Teil basiert auf die Verwendung von Schlüsselgasquotienten in Verbindung mit Schwellwerten. Der zweite Teil basiert dagegen auf der Verwendung von Schlüsselgasen, aber ebenfalls in Verbindung mit Schwellwerten. Diese Schwellwerte grenzen für Leistungstransformatoren den Bereich des fehlerfreien zu dem Bereich des fehlerhaften Betriebszustandes ab.

2.1.1 Schlüsselgasquotienten

In Tabelle 1 ist für jeden Fehlertyp der indikative Gasquotient, d.h. der Schlüsselgasquotient, angegeben. Der 1. Schlüsselgasquotient ist aussagekräftig für eine elektrische Entladung; der 2. Schlüsselgasquotient für eine Teilentladung; der 3. Schlüsselgasquotient für eine Überhitzung; der 4. Schlüsselgasquotient für die Zellulosedegradation, verursacht durch thermische oder elektrische Überbelastung, und der 5. und letzte Schlüsselgasquotient ist aussagekräftig für eine Gaskontamination durch ein undichtes Stufenschaltergefäß.

Nr.	1	2	3	4	5
Schlüsselgasquotient	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	$\frac{H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{CO_2}{CO}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$
Schwellwert	> 1	> 10	> 1	> 10* < 3 **	≥ 2
Fehler	Entladung	Teilentladung	Überhitzung	Zellulosedegradation	Stufenschalter

Tabelle 1: Schlüsselgasquotienten je Fehlertyp

* Degradation der Zellulose durch therm. Überbeanspruchung

** Degradation der Zellulose durch elektr. Überbeanspruchung

2.1.2 Schlüsselgase

Unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren, wie den klimatischen Bedingungen, dem Lastfaktor und des Öltyps (der Öltyp kann die Konzentration von H_2 , CH_4 und anderen Gasen beeinflussen), wurden die Schwellwerte neu festgelegt.

Tabelle 2 gibt die Schwellwerte je Schlüsselgas bzw. Schlüsselgassumme für den Betrieb von Generatoren und Transformatoren wieder.

Schlüsselgas, Schlüsselgassumme	Schwellwert [ppm]	Fehlertyp
C_2H_2	> 20	Entladung
H_2	> 100	Teilentladung
$\sum_{x=1,2,3} C_x H_y$	> 1000	Überhitzung
$\sum_{x=1,2} C_x H_y$	> 500	
$\sum_{x=1,2} CO_x$	> 10000	Zellulosedegradation

Tabelle 2: Schwellwerte je Schlüsselgas bzw. Schlüsselgassumme legen die Grenze zwischen fehlerfreiem und fehlerhaftem Betriebszustand fest.

2.1.3 Die Anwendung des CI

Zuerst werden die Schlüsselgasquotienten aus den Gaskonzentrationen der DGA gebildet. Liegen alle Schlüsselgasquotienten unterhalb der Schwellwerte von Tabelle 1, ist das Ergebnis R1, andernfalls R2.

Liegen die Werte aller Schlüsselgase unterhalb der Schwellwerte von Tabelle 2, dann ist das Ergebnis K1, sonst K2.

Schließlich lassen sich aus der Kombination dieser Ergebnissen vier verschiedene Regeln ableiten, die Aufschluss über mögliche Betriebszustände und darüber hinaus notwendige Handlungsanweisungen für eine Instandhaltung geben:

K1 und R1 → Gesunder Transformator; es gibt keinen Handlungsbedarf.

K2 und R2 → Fehlerhafter Transformator; eine Analyse ist erforderlich.

K1 und R2 → Entstehender Fehler; eine Analyse ist erforderlich.

K2 und R1 → Multipler Fehler, weitergehende Untersuchungen sind erforderlich.

3 Diagnosemethode basierend auf Fuzzy Logik

Wie bereits besprochen, geht das CI [5] aus einer Analyse etablierter Diagnosemethoden hervor. Trotz der erarbeiteten Verbesserungen blieben jedoch typische modellbedingte Schwächen erhalten:

- Das CI gibt Fehlerprognosen anhand von Schwellwerten, also unter Anwendung von klassischen Mengen. Dadurch suggeriert das CI eine Treffsicherheit, die insbesondere in der Nähe der Schwellwerte nicht gegeben ist.
- Das CI ist nicht regelbasiert. Neugewonnenes verbal formuliertes Expertenwissen lässt sich nicht ohne entsprechenden Aufwand in das CTF einpflegen.
- Das CI beschreibt zwei Methoden, mit denen unabhängig von einander mit Hilfe jeweils eines Typs einer Schlüsselgröße Fehler detektiert werden können. Aber: Zwei unabhängige Ansätze können nicht leisten, was ein integrierter Ansatz zu leisten vermag.

Im Folgenden wird eine integrierte, auf regelbasierter Fuzzy Logik gestützte Diagnosemethode vorgestellt, die obige Nachteile vermeidet.

3.1 Grundlagen der regelbasierten Fuzzy Logik

Es gibt verschiedene Klassen von Fuzzy Logik, die jedoch alle auf der Theorie unscharfer Mengen basieren. Unscharfe Mengen unterscheiden sich insofern von klassischen Mengen, als dass sie neben den beiden klassischen Zugehörigkeitswerten $\{0,1\}$ ausdrücklich auch die so genannten Pseudozugehörigkeitswerte $]0,1[$ berücksichtigen.

Die spezielle Klasse der regelbasierten Fuzzy Logik nach Mamdani verwendet darüber hinaus Produktionsregeln, um unscharfe Mengen auf andere unscharfe Mengen abzubilden [6].

Die Problemstellung für eine Interpretation der DGA mit Hilfe der Fuzzy Logik ist nun allgemein wie folgt: Die DGA liefert die Konzentration verschiedener Gase im Isolieröl (Messgrößen). Auf Grundlage dieser Gaskonzentrationen möchte man unter Anwendung der Fuzzy Logik auf Fehler (Zustandsgrößen) des Leistungstransformators schließen.

Aus mathematischer Sicht stellt sich das Problem so dar, dass mit Hilfe von Expertenwissen der Zusammenhang zwischen Mess- und Zustandsgrößen in

Form einer Funktion beschrieben werden muss. Dieser Lösungsweg ist schwierig, weil notwendiges Expertenwissen nicht unmittelbar in mathematischer Form vorliegt.

Häufiger liegt Expertenwissen dagegen als Erfahrungswissen in verbal-kausaler Form vor. Der einfachere Weg besteht nun darin, das mathematische Problem in ein verbales Problem zu transformieren und den Zusammenhang zwischen Mess- und Zustandsgrößen anschließend über verbal-kausales Erfahrungswissen zu beschreiben. Das verbale Problem ist dann gelöst. Eine Rücktransformation des gelösten verbalen Problems führt dann auf das gesuchte gelöste mathematische Problem. Der gesamte Transformationsprozess vollzieht sich in drei Schritten.

3.1.1 Die Transformationsschritte [7]

Im ersten Schritt, als Fuzzifizierung bezeichnet (Bild 1-2), wird das mathematische Problem in ein linguistisches Problem transformiert. Hierzu werden die Mess- und Zustandsgrößen (Bild 1-1) mit Hilfe von Zugehörigkeitsfunktionen vom Typ $\mu: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$ linguistischen Mess- bzw. Zustandsvariablen zugeordnet (Bild 1-3).

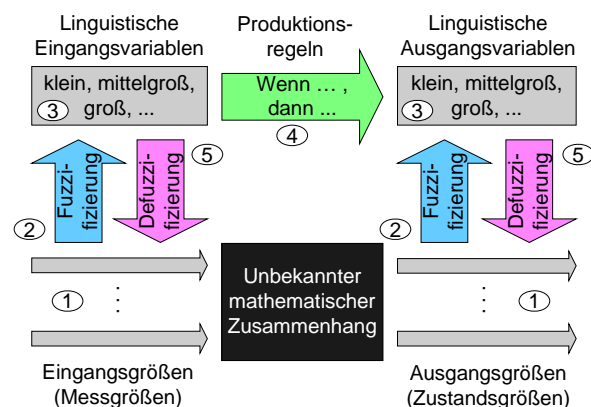


Bild 1: Die Transformation, wie sie durch Fuzzy Logik realisiert wird, in ihre wesentlichen Schritte zerlegt.

Im zweiten Schritt, der Inferenz, bildet eine Regelbasis [6], bestehend aus Produktionsregeln (Bild 1-4) die linguistischen Mess- auf die linguistischen Zustandsvariablen ab. Dadurch wird das linguistische Problem gelöst. Die Produktionsregeln ergeben sich unmittelbar aus dem verfügbaren verbal-kausalen Erfahrungswissen. UND/ODER-Verknüpfungen in der Regelprämissen und die Regelkonklusion können durch verschiedene Operatoren realisiert werden. Eine zusätzliche Gewichtung der Regeln kann die Bedeutung und Zuverlässigkeit des Erfahrungswissens in der Regelbasis abbilden.

Im dritten Schritt, der Defuzzifizierung (Bild 1-5), wird schließlich das gelöste linguistische Problem in ein gelöstes mathematisches Problem überführt, d.h.

einer unscharfen Menge wird wieder ein Zahlenwert zugeordnet. Dazu sind vorab einzelne linguistische Variablen zusammenzuführen. In Abhängigkeit der gewünschten Genauigkeit und vom akzeptierten Aufwand kommen dafür unterschiedliche Verfahren zum Einsatz.

3.2 Die Diagnosemethode basierend auf Fuzzy Logik (FLI) als Weiterentwicklung des CI

Einer der Schwächen des CI ist, wie bereits eingangs erwähnt, die Beschreibung zweier unabhängiger Detektionsmethoden, wobei eine auf den Schlüsselgasen basiert und die andere auf den Schlüsselgasquotienten.

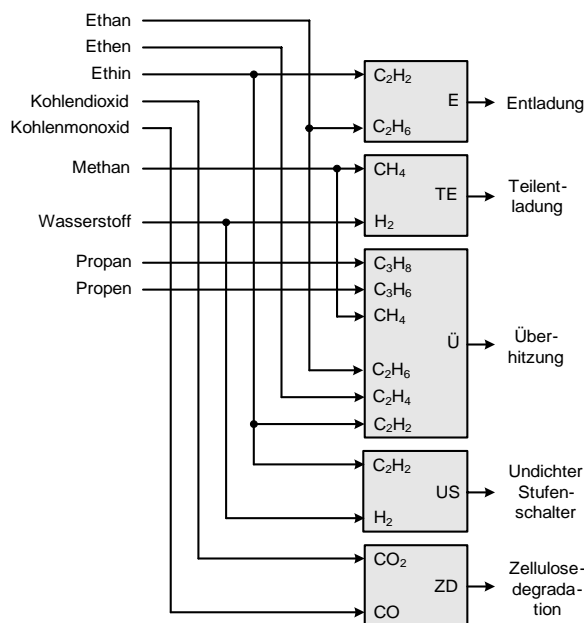


Bild 2: Berücksichtigte Messgrößen je Fehlergröße

Im Gegensatz dazu werden in der FLI beide Methoden zusammengeführt und für jede Fehlergröße – mit Ausnahme der Fehlergröße „Undichter Stufenschalter“ – die Schlüsselgrößen beiderlei Typs berücksichtigt. Dadurch wird ein Fehler in der FLI mit zwei unabhängigen Fehlermustern erfasst und die Diagnosezuverlässigkeit gesteigert.

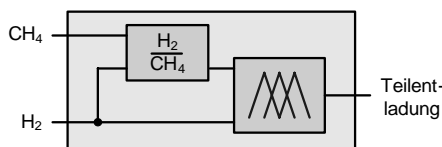


Bild 3: Relevante Schlüsselgase und Schlüsselgasquotienten für die Teilentladungsdetektion

Ausgehend von der DGA stehen zunächst aber nur Messgrößen und damit nur Schlüsselgase zur Fehlerdetektion zur Verfügung (Bild 2). Die Schlüsselgasquotienten werden aus den Messgrößen gewonnen.

Bild 3 zeigt dies exemplarisch anhand der relevanten Schlüsselgrößen für die Teilentladungsdetektion.

Nachfolgend wird die spezifische Fuzzy Logik, wie sie in der FLI angewandt wird, beschrieben. Hierzu sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich die Darstellung der Fuzzy Logik auf den Bereich der Teilentladungsdetektion beschränkt. Auf eine umfassende Darstellung der Detektion aller Fehlertypen wird verzichtet, um den Rahmen nicht zu sprengen. Die Vorgehensweise ist jedoch analog.

3.2.1 Fuzzifizierung

Im CI teilen Schwellwerte die Definitionsbereiche der Schlüsselgrößen beiderlei Typs auf. Das ist gleichbedeutend mit dem Einsatz von Rechteckzugehörigkeitsfunktionen. Das CI arbeitet also implizit mit binärer Logik.

In der FLI treten anstelle eines Schwellwerts s zwei sigmoide Zugehörigkeitsfunktion entsprechend der Gleichungstypen (1), (2) und (3) so, dass gilt: $\mu_{S,k}(x = s) = \mu_{S,l}(x = s) = 0,5$.

$$\mu_{S,1}(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}, a \in \mathfrak{R}_+, c \in \mathfrak{R} \quad (1)$$

$$\mu_{S,2}(x) = -\frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}, a \in \mathfrak{R}_+, c \in \mathfrak{R} \quad (2)$$

$$\mu_{S,3}(x) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(x-c_1)}} - \frac{1}{1 + e^{-a_2(x-c_2)}}, a_i \in \mathfrak{R}_+, c_j \in \mathfrak{R} \quad (3)$$

Diese Nebenbedingung ist notwendig, da dadurch die Zugehörigkeitsfunktionen den Schwellwert jeweils zu 50% den benachbarten linguistischen Variablen zuzuordnen.

Die sigmoide Zugehörigkeitsfunktion selbst sowie deren erste Ableitung ist stetig. Die Stetigkeit der Zugehörigkeitsfunktion selbst ist eine notwendige Voraussetzung für unscharfe Mengen, die Stetigkeit der ersten Ableitung garantiert darüber hinaus „glatte“ Zugehörigkeitsfunktionen.

Größe	Ling-Variable	Funktionstyp	Parametrierung
H ₂	Klein	$\mu_{S,2}(a, c; x)$	$(a, c) = (-0.08, 100)$
	Groß	$\mu_{S,1}(a, c; x)$	$(a, c) = (0.08, 100)$
H ₂ /CH ₄	Klein	$\mu_{S,2}(a, c; x)$	$(a, c) = (-0.8, 10)$
	Groß	$\mu_{S,1}(a, c; x)$	$(a, c) = (0.8, 10)$
Teilentladung	Klein	$\mu_{S,3}(a_1, a_2, c_1, c_2; x)$	$(a_1, a_2, c_1, c_2) = (0.1, -50, 0.1, 50)$
	Groß	$\mu_{S,3}(a_1, a_2, c_1, c_2; x)$	$(a_1, a_2, c_1, c_2) = (0.1, 50, 0.1, 50)$

Tabelle 3: Zugehörigkeitsfunktionen und deren Parametrierung für die Teilentladungsdetektion

Für die Teilentladung werden in der FLI Zugehörigkeitsfunktionen mit der Parametrierung entsprechend Tabelle 3 eingesetzt.

3.2.2 Inferenz

In der FLI verknüpfen Produktionsregeln Schlüsselgase bzw. Schlüsselgasquotienten mit den Zustandsgrößen. Jede Produktionsregel bekommt eine „Stimme“; auch sich widersprechende Produktionsregeln werden berücksichtigt. Die Regelgewichtung ist ein Instrument, um den Einfluss dieser Produktionsregeln zu steuern. Am Beispiel der Teilentladung sind die Produktionsregeln unterschiedlich stark gewichtet (Tabelle 4). Das Kriterium für die Gewichtung einer Produktionsregel ist der Typ der Schlüsselgröße, auf den sich die Produktionsregel bezieht. Allen Produktionsregeln, die sich auf Schlüsselgasquotienten beziehen, wird durch eine stärkere Regelgewichtung eine größere Aussagekraft beigemessen.

Produktionsregel	Regelgewicht
Wenn (H_2 ist <i>groß</i>), dann (Teilentladung ist <i>groß</i>)	0,5
Wenn (H_2 ist <i>klein</i>), dann (Teilentladung ist <i>klein</i>)	0,5
Wenn ($\frac{H_2}{CH_4}$ ist <i>groß</i>), dann (Teilentladung ist <i>groß</i>)	1,0
Wenn ($\frac{H_2}{CH_4}$ ist <i>klein</i>), dann (Teilentladung ist <i>klein</i>)	1,0

Tabelle 4: Die Produktionsregeln und deren jeweilige Gewichtung für die Teilentladungsdetektion

Die Implikation beschreibt den Vorgang, bei dem eine Produktionsregel den in der Regelprämisse ermittelten Zugehörigkeitsgrad derjenigen Zugehörigkeitsfunktion zuordnet, auf deren linguistische Variable sich die Produktionsregel in der Regelkonklusion bezieht. In der FLI erfolgt die Zuordnung nach Gleichung (4).

$$\mu_{\text{Skal}}(x_{\text{TE}}) = \mu_{\text{Präm}}(x_E = \text{const}) \cdot \mu_{\text{Konkl}}(x_{\text{TE}}) \quad (4)$$

Der Vorteil dieser Zuordnung besteht in der Ähnlichkeit der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\text{Skal}}(x_{\text{TE}})$ zu der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\text{Konkl}}(x_{\text{TE}})$.

3.2.3 Defuzzifizierung

In der Aggregation werden alle skalierten Zugehörigkeitsfunktionen geeignet zusammengefasst. In der FLI ist die Aggregation durch eine Addition der skalierten Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_{\text{Skal},i}(x_{\text{TE}})$ entsprechend Gleichung (5) gelöst.

$$\mu_{\text{Agg}}(x_{\text{TE}}) = \sum_i \mu_{\text{Skal},i}(x_{\text{TE}}) \quad (5)$$

Dadurch kann bei der Rücktransformation der linguistischen Variablen auf die Zustandsgrößen jede skalierte Zugehörigkeitsfunktion ihren vollen Einfluss geltend machen.

Die Rücktransformation erfolgt in der FLI durch die Schwerpunktgleichung nach Gleichung (6). Die

Schwerpunktgleichung ist aufwendig, berücksichtigt aber den Verlauf der aggregierten Funktion wie keine zweite und beschreibt in diesem Sinne die exakteste Rücktransformation.

$$TE = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x_{\text{TE}} \cdot \mu_{\text{Agg}}(x_{\text{TE}}) dx_{\text{TE}}}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\text{Agg}}(x_{\text{TE}}) dx_{\text{TE}}} [\%] \quad (6)$$

Die Teilentladung in Prozent, TE [%], ist als Schätzwert für die tatsächliche Teilentladungswahrscheinlichkeit anzusehen.

4 Praktische Anwendung der FLI

Die in unserem Hause entwickelte Software TRAFADETO – TRAnsformer FAULT DEtection TOol implementiert die FLI. Nachfolgend soll anhand von DGAs untersucht werden, ob TRAFADETO und damit die FLI die Fehlerursachen, die im Vorfeld bekannt sind, bestätigen kann. Tabelle 5 listet hierfür vier DGAs inklusive der jeweils bekannten Fehlerursachen: Teilentladung (TE), Zellulosedegradation (ZD), Überhitzung (Ü) und Entladung (E).

	1. Fall [8]	2. Fall [9]	3. Fall [9]	4. Fall [9]
CO [ppm]	658	210	140	110
CO ₂ [ppm]	6130	520	1320	430
H ₂ [ppm]	300	360	930	4890
CH ₄ [ppm]	1740	260	3630	290
C ₂ H ₆ [ppm]	1190	40	1570	30
C ₂ H ₄ [ppm]	3500	440	10940	0
C ₂ H ₂ [ppm]	0	380	230	0
C ₃ H ₈ [ppm]	239	6	410	10
C ₃ H ₆ [ppm]	300	130	5860	0
Bekannte Fehlerursache	Ü, TE, ZD	E, ZD	Ü	TE

Tabelle 5: Vier Gas-in-Öl-Analysen mit bekannten Fehlerursachen

Fehler in Leistungstransformatoren sind geselligere Phänomene, als herkömmliche Diagnosemethoden glauben machen; d.h. Fehler verschiedenen Typs treten oft gemeinsam auf. Beispielsweise hat eine (Teil-)Entladung über die Festisolation hinweg die Degradation derselben zur Folge. Entladungen, um ein anderes Beispiel zu nennen, können durch die ihnen innewohnende Energie zu einer lokalen Überhitzung führen.

In der FLI wird dem Phänomen multipler Fehler so begegnet, dass für jeden Fehlertyp ein Schätzwert für dessen Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt wird. In Tabelle 6 sind die Schätzwerte der FLI je Fehlertyp für jede DGA (entsprechend Tabelle 5) wiedergege-

ben: Entladung (E), Teilentladung (TE), Überhitzung (Ü), Undichter Stufenschalter (US) und Zellulosedegradation (ZD).

		1. Fall	2. Fall	3. Fall	4. Fall
Geschätzte Fehlerwahrscheinlichkeit [%]	E	0,1	99,9	40,1	0,1
	TE	33,4	48,8	33,4	100,0
	Ü	99,9	92,3	99,9	36,8
	US	0,1	0,5	0,2	0,1
	ZD	51,4	35,4	16,0	9,9

Tabelle 6: Die Schätzwerte für die Fehlerwahrscheinlichkeiten in Prozent für jede DGA

1. Fall

Die 1. Ölprobe stammt von einem 385 MVA Maschinentransformator. Der Transformator zeigte nach 10 Jahren Betriebszeit (Baujahr 1975) das Fehlertrippel „Heißpunkt mit Teilentladung unter Zellulosebeteiligung“. Das Fehlertrippel wird von TRAFADETO durch den Fehlervektor (E, TE, Ü, US, ZA) = (0,1, 33,4, 99,9, 0,1, 51,4) bestätigt, wobei die Überhitzung als der wahrscheinlichste Fehler erkannt wird.

2. Fall

Ein zweiter Leistungstransformator ist Gegenstand der 2. Ölprobe. Der Transformator zeigt das Fehlerpaar „Entladung unter Beteiligung der Festisolation“. Auch das Fehlerpaar wird von TRAFADETO durch den Fehlervektor (E, TE, Ü, US, ZA) = (99,9, 48,4, 92,3, 0,5, 45,4) bestätigt. Daneben werden aber noch weitere Fehlertypen für wahrscheinlich erachtet. So könnte bei dieser Fehlergaszusammensetzung auch eine Überhitzung oder Teilentladung vorliegen.

3. Fall

Von einem dritten Leistungstransformator, über den im Vorfeld bekannt war, dass Teile seiner Metalloberfläche einer Überhitzung ausgesetzt waren, wurde die 3. Ölprobe entnommen. TRAFADETO kann die Überhitzung durch den Fehlervektor (E, TE, Ü, US, ZA) = (40,1, 33,4, 99,9, 0,2, 16,0) bestätigen. Darüber hinaus deutet das Gasmuster auch auf mögliche Entladungen oder Teilentladungen mit Beteiligung der Festisolation hin.

4. Fall

Die 4. Analyse rührt von einem weiteren Leistungstransformator, der Teilentladungen hatte. Der Fehlervektor (E, TE, Ü, US, ZA) = (0,1, 100,0, 36,8, 0,1, 9,9) zeigt, dass TRAFADETO auch in diesem Fall den Fehler bestätigen kann. Der Fehler „Überhitzung“ könnte außerdem involviert sein.

5 Zusammenfassung

Zahlreiche Diagnosemethoden sind in Gebrauch. Angewendet auf dieselbe DGA, liefern sie mitunter unterschiedliche Fehlerprognosen.

Mit der Ausarbeitung des CI sind der CIGRE Verbesserungen gelungen, die insbesondere die Wahl geeigneter Schlüsselgrößen und Schwellwerte betreffen; eine strukturelle Schwäche bleibt jedoch auch im CI erhalten: Die Modellierung mit binärer Logik.

Die FLI setzt auf dem CI auf. Durch Anwendung der Fuzzy Logik und eine Integration der beiden Methoden des CI, können weitere grundlegende Verbesserungen erzielt werden.

Die FLI, implementiert in der Software TRAFADETO, kann anhand konkreter DGAs ihre Leistungsfähigkeit demonstrieren: Alle im Vorfeld bekannte Fehler können bestätigt werden. Darüber hinaus ist die FLI in der Lage, weitere vorab unbekannte Fehler zu ermitteln. Eine weitere Differenzierung und Steigerung der Interpretationszuverlässigkeit könnte erreicht werden, wenn zusätzliche Interpretationsverfahren in die Analysesoftware auf Basis der Fuzzy Logik implementiert werden.

6 Literatur

- [1] How, W. Y., Khalid, M. and S.A.F. Syed Zain: Transformer Fault Diagnosis Using Fuzzy Logic Interpretations. Conf. Proceeding of Instrument Asia, 1999
- [2] Sanghi, R.: Chemistry behind the life of a transformer, Resonance, 2003.
- [3] Dukarm, J. J.: Transformer oil diagnosis using fuzzy logic and neural networks. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol.1, Canada, 1993, pp. 329-332
- [4] Leibfried, T.: Online monitors keep transformers in service. Computer applications in power IEEE, Vol.11, Issue 3, July 1998, pp. 36-42
- [5] Möllmann, A. and Pahlavanpour, B. (TF 15.01.01): New guideline for interpretation of dissolved gas analysis in oil filled transformers. Electra No. 186, Oct. 1999, pp. 31-51.
- [6] Kempf, R.: Rekurrente Fuzzy-Systeme, Düsseldorf, 2004
- [7] Traeger, D. H.: Einführung in die Fuzzy-Logik 2. Aufl. Stuttgart, 1994
- [8] Datenbank der Fa. Siemens
- [9] Kachler, A. J.: Requirements for Power Transformer Operations and Maintenance, VDE/ETG-Fachtagung DIAGNOSTICS, Kassel