

## Notwendige Präzisierungen der Normen IEC 60567/60599 für eine qualitätsgesicherte Transformatorendiagnostik

---

Das Zusammenwirken beider Normen soll die Aufgabe erfüllen, die Fehlergasbildung zeitnah zu erfassen und zu bewerten. Dazu werden sowohl genaue DGA-Ergebnisse, ergänzt mit der Korrektur zur offenen Bauart von Transformatoren, als auch im Falle von Buchholzgasen deren Analyse nach an die Alarmsignalisation gekoppelter Entnahme zur Korrektur auf die Originalzusammensetzung benötigt. Die notwendigen Verfahren für beide Korrekturen sind erst mit dem Einsatz von Online-Gasmonitoren möglich geworden und begründen sich auf die atmosphärischen Gase, die selbst mit dem Sauerstoffverbrauch zur Diagnostik beitragen können. Auf dieser neuen Basis wird eine zuverlässige Fehler- und Alterungsdiagnostik möglich.

In beide Normen sind die zahlreichen Entwicklungen und Untersuchungen der letzten Jahre, insbesondere auch die mit Beteiligung von Online-Gasmonitoren, nicht einbezogen oder nur unvollständig eingearbeitet worden. Die Qualitätssicherung der Transformatorendiagnostik erfordert deshalb die folgenden Präzisierungen:

### 1. Analysengenauigkeit für Diagnostik

In IEC 60599 wird für das Einzelgas eine Genauigkeit von  $\pm 5\%$  (mittlerer Konzentrationsbereich) erwartet, was für Einzelgasquotienten zur Beurteilung eine Genauigkeit von  $\leq \pm 10\%$  ergibt. Höhere Zahlenwerte würden bei der Beurteilung Unsicherheiten im Bereich des Grenzwertes bedeuten und ab einer bestimmten Höhe das Kriterium in Frage stellen. Nach CIGRE TF 15 [1] soll die Genauigkeit einer DGA als Durchschnittswert aller 9 Einzelgase mit 15 % für die Diagnostik ausreichend sein. Als Literaturquelle wird IEC 60567 angegeben. Diese enthält explizit solche Angaben nicht. Stattdessen sind in Tab. 6 alle bekannten Extraktionsmethoden mit ihrer Durchschnittsgenauigkeit aufgeführt, woraus sich ca. 15 % rechnerisch ermitteln lassen.

Diese Durchschnittsgenauigkeiten beziehen sich aber nur auf die DGA mit Extraktion und Gasanalyse, ohne Probenahme. Der Probenahmeeinfluß wird deutlich, wenn man in CIGRE TF 15 die Tab. 12 (Vergleichsanalysen externer Standards) und Tab.19 (Vergleichsanalysen realer Betriebsölproben) vergleicht. Die Durchschnittswerte steigen an und die Streuungen der Einzelgasgenauigkeiten werden bei geringlöslichen Gasen erheblich größer.

Damit kann die erwartete Genauigkeit für Einzelgase von  $\pm 5\%$  (IEC 60599) stattdessen einige hundert Prozent nach realer Analyse (IEC 60567) betragen.

Präzisierung bedeutet, erwartungsgerecht die bekannten DGA-Verfahren inkl. Probenahme zu differenzieren bzw. neue zu entwickeln. Die erreichbaren analytischen Grenzen bestimmen dann die Genauigkeit der Einzelgase in der DGA, die für die Bewertung gelten muß. Im Bereich der Grenzwerte der Kriterien muss die Genauigkeit berücksichtigt werden.

### 2. Hermetische Probenahmen

In CIGRE TF 15 wird der erhebliche Probenahmeeinfluß auf die Messgenauigkeit als Nichteinhaltung von hermetischen Bedingungen bei hauptsächlichem Einsatz von Spritzen erklärt. Die geringlöslichen Gase  $H_2$ ,  $O_2$  und  $N_2$  werden daher für die Auswertung nicht berücksichtigt. Für die Fehlerdiagnostik wird empfohlen, auf  $H_2$  zu verzichten und das Duval-Dreieck zu benutzen.

CIGRE TF 15 ist eine bisher einmalige Erhebung von realen DGA-Daten, die benutzt wurden, um die Genauigkeit von Online-Gasmonitoren zu bestimmen.

Die erarbeitete Prozedur ist in den Entwurf der IEC 60567 (Febr. 2010) als Anhang E erstmals aufgenommen worden. Erfahrungen und Bewertungskriterien werden hier nicht mitgeteilt.

Die Ölprobenahme für die DGA selbst ist in die IEC 60475 ausgegliedert. Dort wird auf besondere Anforderungen hingewiesen, um mit Spritze, Ampulle oder Flasche die Fehlereinflüsse auf die geringlöslichen Gase  $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  und  $N_2$  zu minimieren. Über die Quellen der selben Norm, die auf die Bedeutung hermetischer Probenahmebedingungen hinweist, kann gleichzeitig der Beweis der nicht zuverlässigen Einhaltung in der bisher praktizierten Form erbracht werden. Bisher gab es bei den Betreibern nur Anhaltspunkte dafür bei Laborvergleichen, insbesondere an Transformatoren mit stark entgasten Ölen.

Die geringlöslichen Gase  $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  und  $N_2$  haben innerhalb der Gase die weitaus größere Bedeutung für den Betrieb von Transformatoren. Die Diagnoserolle des Wasserstoffs kann durch das Duval-Dreieck nicht ersetzt werden, da Teilentladungen unempfindlicher und nicht getrennt von thermischen Fehlern niedriger Energie feststellbar sind.

**Präzisierung bedeutet**, anstatt auf die geringlöslichen Gase bei der Diagnostik verzichten zu müssen, für die bisherigen Probenahmetechniken sowie für notwendige Neuentwicklungen ein Prüfkriterium zur Sicherung der hermetischen Bedingungen einzuführen. Nur so kann die vollständige Vergleichbarkeit von Laborwerten mit Gasmonitorwerten sichergestellt werden. Neuentwicklungen können auf Basis probenahmeintegrierter Extraktionstechniken erfolgen und für das Prüfkriterium ist der gemessene Lösungsdruck ohne Alternative [2].

### 3. Richtigkeit von Analyseergebnissen

Betreiber von Transformatoren veranlassen bei auffälligen DGA-Entwicklungen in der Regel Vergleichsanalysen, bevor oft kostenintensive Entscheidungen zu treffen sind. Bei deutlichen Abweichungen kann die IEC 60567 keine Lösung für die Klärung der Richtigkeit anbieten. Dagegen kann es bei Übereinstimmungen ein Trugschluss sein, ohne Nebenbedingungen die Richtigkeit anzunehmen. In Erwartung eines starken Anstiegs der Zahl von Vergleichen durch die Routinelaborkontrollen von Online-Gasmonitoren ist die CIGRE TF 15 initiiert worden. Die in ihr erarbeitete Prozedur sollte auch die Frage nach der Richtigkeit von Analysewerten klären. Bedingt durch die Probleme mit der hermetischen Probenahme muss diese Frage noch offen bleiben. Da die Basisgröße in der CIGRE TF 15 die Genauigkeit ist, sind in der Prozedur externe Standards notwendig, ob im Labor oder wie künftig eingeräumt, online. Und es bleibt der Wunsch in der letzten Schlussfolgerung des Reports, Standards im Originalbetriebsöl des konkreten Transformators benutzen zu wollen.

**Präzisierung bedeutet** hier, in IEC 60567 die Definition der Vergleichbarkeit zielgerichtet weiterzuführen. Das betrifft einerseits die Forderung nach maximal unterschiedlichen technischen Merkmalen der zu vergleichenden Verfahren sowie andererseits die Umstellung von Durchschnittswert auf Werte für die Einzelgase. Als Ergebnis wird die Definition für die Richtigkeit erhalten [3].

### 4. Quantifizierung der Offenheit und deren Anwendungen

Für die Bewertung von DGA-Ergebnissen werden in IEC 60599 Transformatoren der offenen Bauart willkürlich als offen für atmosphärische Gase und geschlossen für Fehlergase betrachtet. Es wird aber eingeräumt, dass Transformatoren auch für Fehlergase offen sein können, was durch eine Gasraumanalyse des Ausdehners herausgefunden werden kann. Zielführender ist dagegen eine dynamische Betrachtung, die den Gastransport zwischen Kessel und Ausdehner sowie den Gasaustausch im Ausdehner berücksichtigt. Eine Quantifizierung dieser Prozesse ist möglich auf Basis des Inertgases Stickstoff, indem die Rücksättigung von Luftstickstoff in das entgaste Öl des Transformators hinein zeitabhängig durch DGA bestimmt wird. Als Relativwert der Offenheit wurde die Transformator-Offenheitszahl (TON) eingeführt [4].

Die Betreiber beginnen verstärkt, zusatzkostenfreie Entgasungszustände des Öles (Neuölfüllungen, Ölbehandlungen) zu nutzen, um die TON für die Lebenslaufakte zu sichern. Die TON

hat grundlegende Bedeutung, die Gase  $O_2$ ,  $H_2$  und  $CO$  in die Diagnostik einzubeziehen sowie für die Kontrolle von Hermetikvarianten.

#### 4.1 Sauerstoffverbrauchsrate (OCR)

In IEC 60599 wird der Quotient  $O_2/N_2 < 0,3$  als ausreichender Anhaltspunkt für verstärkte Oxidationsreaktionen aufgeführt, ohne dass Maßnahmen genannt werden. Umfangreiche Untersuchungen zeigen, dass dies nur ein unvollständiges Verdachtskriterium sein kann. Erst die Einbeziehung der TON komplettiert das Verdachtskriterium und ermöglicht, die Sauerstoffverbrauchsrate [4] zu bestimmen. Damit ist eine individuelle Charakterisierung der Alterungsbeschleunigung durch Sauerstoff gefunden.

Präzisierung bedeutet, die Quantifizierung der Rolle des Sauerstoffs ergänzend zur Fehlerdiagnostik als Alterungsdiagnostik einzuführen. Mit der Alterungsdiagnostik bietet sich an, durch Nachhermetisierung eine Substanzerhaltung zu erreichen [5].

#### 4.2 Fehlergasbildungsrate (GER)

In IEC 60599 werden die Fehlergasbildungsraten herangezogen, um die Aktualität eines Fehlers darzustellen. Dazu werden zwei zeitnahe DGA benutzt, um über die Differenzbildung die Rate darzustellen. Erfahrungen belegen, dass die Fehlergase  $H_2$  und  $CO$  oft stagnierende Verläufe zeigen, nachdem sie nach Inbetriebnahmen lange Zeit stetig angestiegen sind. Kombiniert man das mit Erfahrungen zur Abnahme von  $H_2$ -Konzentrationen im Öl nach der Beseitigung von Teilentladungen, bleibt nur die Schlussfolgerung, dass Transformatoren mindestens für geringlösliche Gase auch offen sein müssen. Umfangreiche Untersuchungen zeigen, dass stagnierende Konzentrationen von  $H_2$  und  $CO$  im Öl benutzt werden können, um in Abhängigkeit von der TON ihre GER zu bestimmen [4].

Damit wird gesichert, dass die Fehlergasbildungsraten für alle Gase in die Diagnostik einbezogen werden können. Wegen der Aktualität der Fehlergasbildungsraten bei optimalen Zeitabständen ist es zuverlässiger für Diagnosen, diese in die Quotientenbildung einzubeziehen.

Präzisierung bedeutet, über TON auch die Fehlergasbildungsraten für  $H_2$  und  $CO$  in die Diagnostik einzubeziehen.

### 5. Buchholzgase: Fehlerfeststellung und –diagnostik

Die Durchführung von Buchholzgasanalysen steht immer unter Zeitdruck. Deshalb wünscht sich der Betreiber ein Schnelldiagnoseverfahren, was ohne das vollständige Gleichgewichtskriterium der IEC 60599, welches den Vergleich mit einer zeitgleichen DGA erfordert, auskommt. Eine diesbezügliche Entnahme- und Prüftechnik wird seit Jahren erfolgreich eingesetzt [6]. Ein besonderer Vorteil ist dann gegeben, wenn diese Prüfung in den Online-Gasmonitor integriert ist [3].

Das Gleichgewichtskriterium gestattet mit der Beschreibung in IEC 60599 nicht, das auf Ölkonzentrationen umgerechnete Buchholzgas für die Fehlerdiagnostik zu benutzen. Vielmehr muss der stattgefundene Gasaustausch mit dem Öl korrigiert werden, um das Buchholzgas auf die Zusammensetzung an der Fehlerstelle zurückzuführen. Ein entsprechendes Korrekturverfahren erfordert die sofortige Buchholzgasseparierung vom Öl mit der Alarmsignalisation und basiert auf dem Eintrag der im Kesselöl gelösten Luft in das Buchholzgas [3]. Auch hier ist es ein besonderer Vorteil, wenn die Buchholzgasseparierung eine Funktion des Online-Gasmonitors ist. Eine davon unabhängige Zusatzeinrichtung des Buchholzrelais ist wegen der allgemeinen Bedeutung in der Entwicklung.

Präzisierung bedeutet, folgende Änderungen in IEC 60599 aufzunehmen:

- Beschreibung des Schnelldiagnoseverfahrens;
- die an die Alarmsignalisation gekoppelte Probenahme des Buchholzgases als Voraussetzung für die Diagnoseignung darzustellen.
- Grundzüge des Korrekturverfahrens auf die Originalzusammensetzung zu beschreiben.

## 6. Fehler- und Alterungsdiagnostik

Nach IEC 60599 erfolgt die Fehlerdiagnostik über Quotienten- (tabellarisch bzw. graphisch) bzw. Dreieckskoordinaten-Darstellungen von Fehlergaskonzentrationen unter Beachtung der Fehlergasbildungsrate. Es wird auch beschrieben, Konzentrationsdifferenzen zwischen zwei Analysen für die Quotientenbildung zu benutzen. Damit wird die Aktualität direkt einbezogen. In der Praxis ist das Duval-Dreieck sehr bekannt, weil eine schnelle visuelle Erfassung ermöglicht wird. Beschränkend ist, dass ohne Wasserstoff keine Differenzierung der Fehlerarten Teilentladung/thermischer Fehler geringer Energie möglich ist, was aber gerade im Frühfehlerstadium wichtig ist. Auch lassen sich keine undichten Lastschaltergefäße diagnostizieren.

Die Benutzung von Fehlergaskonzentrationen zur Quotientenbildung darf nicht dazu verleiten, Einzelanalysen zusammenhanglos zur Vorgeschichte eines Transformators zu bewerten. Da aber ohnehin die Fehlergasbildungsraten berechnet und beachtet werden sollen, ist ihre grundsätzliche Benutzung zur Quotientenbildung der bessere Weg. Da auch die Dreieckskoordinaten eine Relativdarstellung sind, ist dieser Weg unkompliziert einführbar. Zur Leistungssteigerung der Dreieckskoordinaten-Darstellung ist ein universelles Fehlergasdreieck [7] entwickelt worden, welches die vollständigen Diagnosegase ( $H_2$ , Kohlenwasserstoffe bis  $C_3$ ) enthält. In dieses Dreieck sind alle bisherigen Diagnosesysteme (z.B. nach IEC 60599) übertragbar. Jederzeit können neue Statistiken, nach dem Fortschritt ausgerichtet, begonnen werden. Für die Alterungsdiagnostik stehen die schon veröffentlichten Kriterien [4] zur Verfügung.

Präzisierung bedeutet, in IEC 60599 nur noch Fehlergasbildungsraten als Basis der Diagnostik zuzulassen und das universelle Fehlergasdreieck in die Hilfsmittel aufzunehmen. Die Alterungsdiagnostik ist anstelle des Hinweises auf verstärkte Oxidationsreaktionen darzustellen.

Dr. Eckhard Bräsel  
Geschäftsführer

### Literatur:

- [1] WG D1.01 (TF 15)  
Report on Gas Monitors for Oil-Filled Electrical Equipment  
CIGRE-Report 409; Febr. 2010
- [2] Bräsel, E.; Sasum, U.; Aragon-Patil, J.; Tenbohlen, S,  
Improved Monitoring of Dissolved Transformer Gases on the Basis of a Natural  
Internal Standard (NIS); CIGRE-23, Brugge 2007
- [3] Bräsel E.; Sasum, U.  
Online Transformer Gas Diagnostics on the Basis of IEC 60567/60599  
Paper for Euro Techcon, Warrington 2009
- [4] Bräsel, E.; Bräsel, O.; Sasum, U.  
Neue Erkenntnisse zum Gashaushalt bei Transformatoren der offenen Bauart  
EW 109 (2010), H.14-15, S. 56-9
- [5] Bräsel, E.; Bräsel, O.; Sasum, U.  
Überwachungsgestützte Nachhermetisierung von Transformatoren der offenen Bauart  
EW 110 (2011), H.14, S. 32-6
- [6] Bräsel, E.; Bloeck, H.  
Leistungsfähigkeit der gasanalytischen Transformatorendiagnostik  
EW 101 (2002), H. 23, S.48-54
- [7] Bräsel, E.; Sasum, U.  
Universelles Fehlergasdreieck für die Transformatorendiagnostik  
EW 108 (2009), H. 17-18, S. 70-5