

Die Betriebsüberwachung von Transformatoren und Messwandlern: Untersuchungen des Isolieröls als unentbehrliches Hilfsmittel

H.-J. Knab

ABB Unifer AG, 5401 Baden

Die Verwendung von Mineralöl als Kühlmittel und Dielektrikum in Transformatoren veränderte deren Betriebsüberwachung deshalb so nachhaltig, weil es nun möglich wurde, in dieselben hineinzuschauen. Da in den meisten Fällen auftretende Fehler im Innern der Geräte verborgen sind, wurden immer bessere Techniken entwickelt, um die mit anderen Mitteln praktisch nicht erkennbaren Schwachstellen rechtzeitig aufzudecken.

Während die klassischen, dielektrisch-chemischen Prüfungen, wie z.B. Durchschlagsfestigkeit, Verlustfaktor, Neutralisationszahl, Wassergehalt, u.a. eine Aussage über die Qualität des Isolieröls liefern, ermöglichen die gas- und flüssigchromatographischen Untersuchungen eine Beurteilung des elektrischen - wie auch des Isolationszustandes.

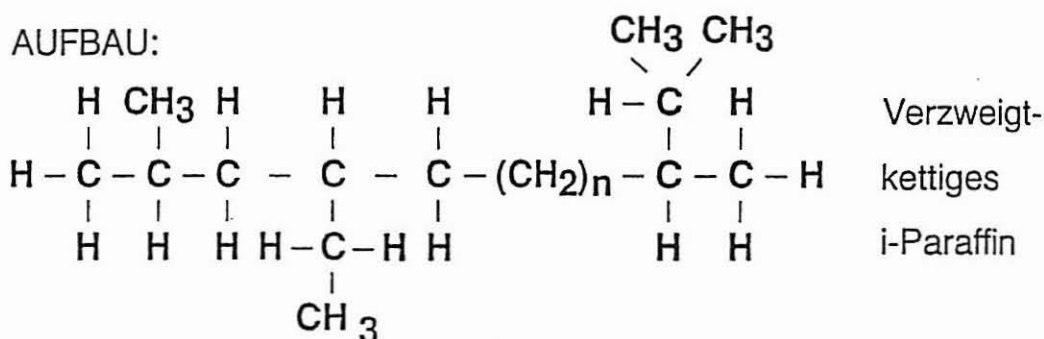
Die Zersetzungsgasanalyse des Isolieröls

Seit längerem bewährt und in der Praxis vielfach erprobt ist die Zersetzungsgasanalyse des Isolieröls, weithin auch als „Gas-in-Öl-Analyse“ bekannt, mit welcher, bei regelmässiger Durchführung, elektrische Schwachstellen wie

- heisse Stellen
- schlechte Kontakte
- Funkenentladungen
- schlechte Imprägnierung infolge Lufteinschlüssen in der Feststoffisolation

rechtzeitig erkannt und dann in einem geeigneten Moment beseitigt werden können. Bei Vorhandensein eines solchen Fehlers wird das Isolieröl, bestehend aus langkettigen Kohlenwasserstoffmolekülen, zersetzt, wobei gasförmige Verbindungen gebildet werden (Bild 1), die zunächst im Öl gelöst bleiben. Acetylen z.B. ist die typische Verbindung, welche bei stromstarken Entladungen hoher Energiedichte gebildet wird. Gemeint sind damit Funkenentladungen, schlechte Kontakte bis hin zum elektrischen Durchschlag. Die gesättigten Kohlenwasserstoffe Methan und Äthan lassen eine thermische Ölzerersetzung erkennen, wobei mit steigender Temperatur immer grössere Mengen an Äthylen gebildet werden. Hauptsächlich Wasserstoff schliesslich wird bei schlechter Imprägnierung der Feststoffisolation, z.B. Lufteinschlüssen, gebildet.

Die im Öl gelösten Gase werden nach fachgerechter Probenahme (unter Luftabschluss!) im Labor extrahiert und anschliessend chromatographisch analysiert und quantifiziert. Nachfolgende vier Grundfehlerarten können dabei gemäss E. Dörnenburg [1], einem Protagonisten der „Zersetzungsgasanalytik“, zugeordnet werden:



ZERSETZUNGSPRODUKTE:

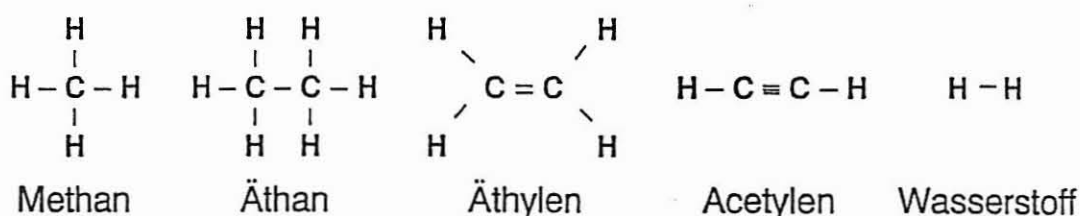


Bild 1: Aufbau und Zersetzungsprodukte des Isolieröls

Grund-Fehlerarten, typische Gase und Beispiele für die Ursache des Fehlers

Typ	Fehlerart	typische Gase	Ursache
1	stromschwache Teilentladungen niedriger Energiedichte	Hauptsächlich H ₂ ; wenig gesättigte, keine ungesättigten Kohlenwasserstoffe	schlechte Imprägnierung der Festisolation, Lufteinschlüsse
2	stromschwache Entladungen mit z.T. hoher Energiedichte	wie Typ 1 jedoch mit Acetylen + Äthylen	schlechte Kontakte, Entladungen zwischen unterschiedlichen Potentialen
3	thermische Zersetzung bei Temp. < ca. 800°C	gesättigte Kohlenwasserstoffe, mit steigender Temperatur wachsende Mengen Äthylen	Überlastung; hohe Übergangswiderstände, Eisenbrand
4	stromstarke Entladungen hoher Energiedichte	wie 3 mit steigenden Mengen Acetylen und Äthylen und mehr Wasserstoff	Funkenentladungen, Durchschlag

Dieses System wurde in internationaler Zusammenarbeit weiterentwickelt und zusammen mit den Richtlinien für die fach- und sachgerechte Probenahme und -aufbereitung in den IEC-Richtlinien No. 567 und No. 599 niedergelegt. Eines der Hauptprobleme bei der Interpretation

der Analysenresultate sind die sog. „Normalgasgehalte“, also die Gaskonzentrationen, die in einem einwandfreien Gerät enthalten sind. Dörnenburg wies bereits darauf hin, dass auch fehlerfrei arbeitende Transformatoren Gase entwickeln, deren Gehalte einem Gleichgewichtswert zwischen Gasbildung und Abgabe nach aussen zustreben. Wie sich bei Diskussionen in internationalen Gremien der CIGRE oder IEC zeigte, ist die Festlegung von allgemein gültigen Standardwerten für normal arbeitende Transformatoren oder Wandler nicht möglich, da die aus eigenen Erfahrungen entwickelten Vorstellungen der einzelnen Ländervertreter in diesen Gremien nicht selten um Grössenordnungen voneinander abweichen. Der Autor selbst verlässt sich seit vielen Jahren erfolgreich auf die nachstehend wiedergegebenen Empfehlungen (Tabelle 1):

Tabelle 1: Obere Grenzwerte der Konzentrationen von Zersetzungsgasen in fehlerfreien Transformatoren in Abhängigkeit von der Betriebszeit [1]:

Betriebszeit	Konzentrationen in ppm (V/V)	
	3 Jahre	> 7 Jahre
Wasserstoff H ₂	200	250
Methan CH ₄	100	200
Äthan C ₂ H ₆	100	200
Äthylen C ₂ H ₄	150	300
Acetylen C ₂ H ₂	15	35
Kohlenmonoxid CO	500	1000
Kohlendioxid CO ₂	6000	11000

Diese Werte sind jedoch nur für offene Leistungstransformatoren mit gasdicht vom Transformatorentank abgetrenntem Stufenschaltersystem anwendbar. Andere Konstruktionen verlangen individuelle Betrachtung, was eine zuverlässige Diagnosestellung nicht gerade vereinfacht. Und auch in der neuen, z.Zt. in Bearbeitung befindlichen revidierten Fassung des IEC-Dokumentes 599 wird es keine sog. „allgemein gültigen Grenzwerte“ geben, sondern nur informative Werte verschiedener Quellen. Als ein Novum werden in diesem revidierten IEC-599-Dokument sog. „normale Gasbildungsrate“ in cm³ pro Tag enthalten sein, die in vielen Jahren bei ABB international in Erfahrung gebracht worden sind (Tabelle 2).

Tabelle 2: Normale Gasproduktion in Leistungstransformatoren in cm³/Tag

Wasserstoff H ₂	< 5
Methan CH ₄	< 2
Äthan C ₂ H ₆	< 2
Äthylen C ₂ H ₄	< 2
Acetylen C ₂ H ₂	< 0,5
Kohlenmonoxid CO	< 50
Kohlendioxid CO ₂	< 200

Dieser Vorgehensweise liegt die Tatsache zugrunde, dass ein gleicher elektrischer Fehler beispielsweise in einem zehnmal grösseren Transformator einen zehnfach kleinen Anstieg der letztendlich messbaren Gaskonzentrationen verursacht. Zudem erlaubt die absolute Gasproduktion im Falle eines Fehlers eine wesentlich detailliertere Beurteilung dessen Intensität.

Für Messtransformatoren (Wandler) gelten wegen der gegenüber Transformatoren unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Verhältnis Öl:Papier, geringere Kupferverluste etc.) andere Werte. Aus den von der Arbeitsgruppe CIGRE WG15-01 TF01 gesammelten Daten aus Wandlern in aller Welt haben sich für „gesunde“ Apparate mit einer statistischen Sicherheit von 90% folgende Erfahrungswerte herauskristallisiert (Tabelle 3):

Tabelle 3: Typische „Normalgasgehalte“ in Wandlern
(90%-Vertrauensbereiche) nach Cigre WG15-01 TF01

	$ppm = \mu L/L$
Wasserstoff H_2	300 (Wandler mit Metallabschluss) 20 (Wandler mit Gummiabschluss)
Methan CH_4	30
Äthan C_2H_6	25
Äthylen C_2H_4	4
Acetylen C_2H_2	2
Kohlenmonoxid CO	330
Kohlendioxid CO_2	900

Die für die verschiedenen Abschlussysteme unterschiedlichen Wasserstoffgehalte resultieren daraus, dass das sehr kleine Wasserstoffmolekül durch die Gummimembran diffundieren und somit leicht entweichen kann, was bei metallischen Abschlüssen normalerweise nicht möglich ist. Dies verdeutlicht einmal mehr, wie wichtig die Berücksichtigung solcher konstruktiver Details für die Beurteilung der erhaltenen Analysenresultate ist.

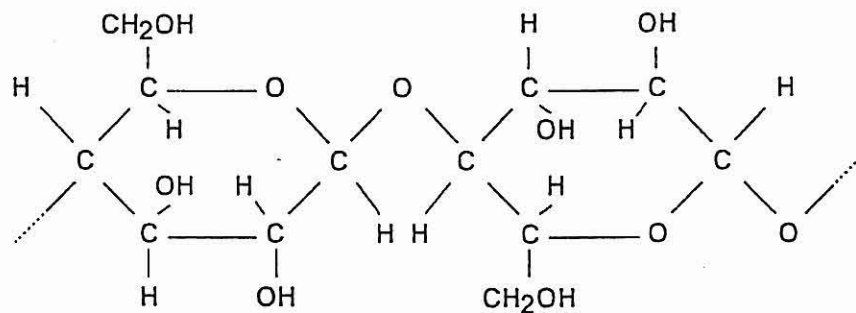
Weitere derartiger Betrachtungen wie auch Empfehlungen für besondere Transformatorentypen, Durchführungen und ölgefüllte Kabel sind in der überarbeiteten Fassung des bereits erwähnten IEC-Dokumentes 599, an dem der Autor mitarbeitet, vorgesehen.

Die flüssigchromatographische Untersuchung des Isolieröls (HPLC)

In den Tabellen 1 bis 3 sind stets auch die Gehalte an Kohlenmonoxid und Kohlendioxid enthalten, obwohl diese Gase für die Feststellung der Fehlerart (Teilentladungen, heisse Stellen etc.) nicht gebraucht werden. Da für die Bildung so grosser Mengen Kohlenoxiden durch eine Öloxydation im Transformator der Sauerstoff fehlt, liegt es nahe, aus den Konzentrationen dieser beiden Gase Rückschlüsse auf eine Zersetzung der festen, aus Cellulose bestehenden Isolation zu ziehen. Versuche in dieser Richtung sind auch mit wechselndem Erfolg unternommen worden, klare Aussagen wurden jedoch dabei nie erzielt. Wollte man also eine Auskunft über den Zustand der Feststoffisolation gewinnen, mussten andere Indikatoren herangezogen werden.

Auf der Suche nach solchen, den Zustand der Feststoffisolation beschreibenden Substanzen stiess man dabei auf Furan und dessen Derivate (Bild 2), denn diese Verbindungen können durch eine reine Oxidation des Öles praktisch nicht gebildet werden. Langjährige Studien der Cigre WG15-01 zusammen mit dem TC10 der IEC führten zum IEC-Standard 1198, welcher die analytischen Aspekte dieses Problemkreises regelt. Zum technischen Ablauf einer derartigen Analyse sei hier nur soviel erwähnt, dass eine kleine Ölmenge (ca. 2 - 10 g) ausreicht, um die darin gelösten Furane (= Papierabbauprodukte) zu extrahieren und mittels der HPLC¹-Messtechnik nachzuweisen[2].

AUFBAU:



ZERSETZUNGS-
PRODUKTE:

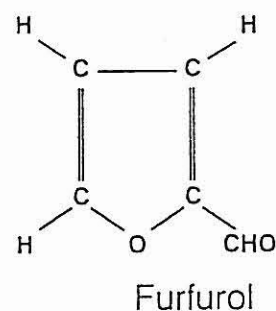
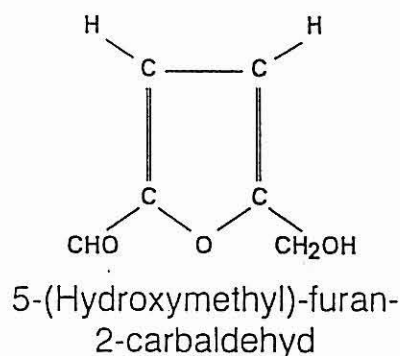


Bild 2: Aufbau und Zersetzungsprodukte von Cellulose

¹ High Performance Liquid Chromatography

Im Isolieröl vorhandene Verbindungen wie Furfurol und 5(Hydroxymethyl)-furan-2-caraldehyd u.ä. stehen in einem direkten Zusammenhang mit der mechanischen und damit indirekt auch der dielektrischen Festigkeit der Celluloseisolation, denn diese Verbindungen werden praktisch ausschliesslich beim Auseinanderbrechen der Celluloseketten gebildet. In langjährigen Versuchen unter der Federführung der Cigre WG15-01 an denen sich ABB Schweiz in enger Zusammenarbeit mit der Firma Weidmann AG, Rapperswil beteiligte, wurden vielversprechende Ergebnisse erzielt. Anhand dieser Laborversuche wurde eine Relation erarbeitet [3], welche die Furangehalte im Isolieröl mit den aktuellen DP-Werten (= Degree of Polymerisation) verknüpft:

$$Y = \frac{M(DP_o - DP)}{DP}$$

wobei Y die Anzahl der zerbrochenen Cellulosemoleküle darstellt, gleichbedeutend mit dem Gehalt an Furfurol multipliziert mit dem Faktor 96 (= Molekulargewicht von Furfurol)

(DP, DP_o: aktueller bzw. ursprünglicher DP-Wert

M: ursprüngliche Anzahl der Cellulosemoleküle

Nähere Details hierzu sind in [3] zu finden)

Die HPLC-Analyse ist derzeit noch keine routinemässig anzuwendende Untersuchungsmethode wie die dielektrisch-chemische oder die gasanalytische Untersuchung des Transformatorenöls. Sie sollte aber angewendet werden, wenn wegen extrem hoher Kohlenoxidgehalte und/oder eines CO₂/CO-Verhältnisses von <3 oder >12 der Verdacht besteht, dass es Heissstellen im Transformator gibt, in denen die Celluloseisolation involviert sein könnte. In einem solchen Fall ist es immer wichtig, die zu ergreifenden Massnahmen zwischen Betreiber und Hersteller des Transformators sowie dem mit der Ueberwachung betrauten analytischen Labor zu besprechen.

Dabei ist zu beachten, dass die vorstehenden Zusammenhänge aus Laborexperimenten resultieren. Es gilt nun, diese Erkenntnisse in die Praxis zu übertragen. Daher richtet sich der Appell an die Betreiber von Transformatoren und Wandlern, diese Arbeit zu unterstützen, denn praktisch kein Laborexperiment vermag einen Alterungsprozess unter realen Bedingungen über Jahrzehnte zu simulieren. Denn letztendlich sind es die Betreiber dieser Geräte, die am meisten davon profitieren, deren Ausfall in einem ungeeigneten Moment zu verhindern.

Literatur:

- [1] E. Dörnenburg, „Betriebsüberwachung durch Untersuchungen des Isolieröls“
O. Hutzl etz-a Bd.98 (1977) H.3, p.211-215

- [2] H.-J. Knab „Die Anwendung der Hochdruckflüssigkeitschromatographie
(HPLC) zur Betriebsüberwachung von Transformatoren“
VGB Kraftwerkstechnik 6/91, 71.Jg(1991) p.594-597

- [3] A. de Pablo, „New guidelines for Furan analysis as well as dissolved
A. Möllmann gas analysis in oil-filled transformers“
CIGRE-Symposium Paris 1996, 15/21/33-19

Zitierte IEC-Publikationen:

- IEC-567 (1992) „Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled
electrical equipment and for the analysis of free and
dissolved gases“

- IEC-599 (1978) „Interpretation of the analysis of gases in transformers and
other oil-filled electrical equipment in service“

- IEC-1198 (1993) „Mineral insulating oils - Methods for the determination of
2-furfural and related compounds“