

Verbesserung der Zustandsbeurteilung von Messwandlern mittels DGA

Projekt-Nummer: 11.014

Förderstelle:

Österreichs E-Wirtschaft
Brahmsplatz 3, A-1040 Wien

In Zusammenarbeit mit...

VUM Verfahren Umwelt Management GmbH

Standort: Obersielach 24
A-9100 Völkermarkt

KNG-Kärnten Netz GmbH

Standort: Kirchengasse 104
A-9020 Klagenfurt am Wörthersee

Verbesserung der Zustandsbeurteilung von Messwandlern mittels DGA

Projekt-Nummer: 11.014

Projektteam:

VUM Verfahren Umwelt Management GmbH (Joachim Theuermann)

- Versuchsbegleitung, Analytik, Zwischenberichte

Kärnten-Netz GmbH (DI Hermann Filipot)

- Aufstellung, Überwachung der Testobjekte im Trockenofen und in Freiluft
- Temperaturlaufzeichnungen

Fachlicher Beirat:

- DI Dr. Erich Binder (vormals VERBUND Hydro Power GmbH)
- Ing. Norbert Runda (VERBUND Hydro Power GmbH) ehemaliger Vorsitzender „AK Messwandler und Isolieröle“ (Österreichs Energie)
- DI Hermann Filipot (KNG Kärnten Netz GmbH) Vorsitzender „AK Messwandler und Isolieröle“ (Österreichs Energie)

Partner:

PIFFNER Messwandler AG, Lindenplatz 17, CH-5042 Hirschthal

- Fertigung und Beistellung der Testobjekte

Autoren Abschlussbericht:

- Joachim Theuermann (VUM Verfahren Umwelt Management GmbH)
- DI Dr. Erich Binder (vormals VERBUND Hydro Power GmbH)

VUM Verfahren Umwelt Management GmbH

Chemisch-physikalisches Prüflabor

Obersielach 24, A-9100 Völkermarkt

T: +43 (0)50320 32512

M: +43 (0)664 8285244

E: joachim.theuermann@vum.co.at

www.vum.co.at

Joachim Theuermann

22.06.2020

*„Wenn alle Experten sich einig sind,
ist Vorsicht geboten.“*

(Bertrand Russell)

Viele Vordenker der vergangenen Jahrzehnte haben zur Beurteilung von isolierölgefüllten elektrischen Geräten mittels Gas-in-Öl-Analyse (DGA) wertvolle und anerkannte Leitfäden und Anleitungen entwickelt.

Die Interpretation der Ergebnisse von Gas-in-Öl-Analysen beruht auf charakteristischen Gasmustern, die bestimmten Fehlerarten zugeordnet werden können. Relevante Veränderungen der am Fehlerort generierten Gasmuster durch unterschiedlich geartete Einflüsse können weitreichende Folgen für die Interpretation nach sich ziehen. Die vorliegende Arbeit zeigt neue und unseres Wissens nach bisher noch nicht veröffentlichten Erkenntnissen zu solchen Veränderungen von Gasmustern infolge von Sorptions- und Permeationsvorgängen auf.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis	Seite
Kurzfassung	VII
Abstract	IX
1. Einleitung	1
1.1. Struktur des Forschungsberichts	1
1.2. Veranlassung des Forschungsprojekts	1
1.3. Ziele des Forschungsprojektes	5
1.4. Projektchronologie	6
2. Vorversuche im Labormaßstab	9
2.1. Übersicht	9
2.2. Beschreibung der unterschiedlichen Probenvarianten und Versuchsbedingungen	10
2.3. Ergebnisse der Vorversuche	11
2.4. Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse	15
3. Hauptversuch	19
3.1. Versuchsbeschreibung	19
3.2. Beschreibung der Probanden	19
3.2.1. Ausführungsvarianten	19
3.2.2. Massen, Oberflächen und Volumen der Probanden	20
3.2.3. Beprobungspositionen für gelöste Gase und Ölfeuchtigkeit	21
3.3. Eingangsuntersuchungen der Ölfüllungen der Probanden	24
3.4. Präparierung der Probanden mit Spaltgasen	25
3.4.1. Herstellung der Dosierlösung	25
3.4.2. Konzentration Prüfgas – Konzentration im Dosieröl	25
3.4.3. Konzentrationen der Dosierlösung und Dosiervolumen	26
3.4.4. Vorgangsweise bei der Dosierung	27
3.4.5. Anfangskonzentrationen der im Öl gelösten Gase nach Dosierung	29
3.5. Projektablauf	30
3.5.1. Übersicht über die Projektphasen und Aufstellungsbedingungen	30
3.5.2. Außerplanmäßige Projektphase A, Maßnahmen zur Homogenisierung der Ölmischung	31
3.5.3. Details zu den außerplanmäßigen Projektphase B und C	36

3.6.	Ergebnisse der Temperaturmessungen	38
3.7.	Zeitverläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen, Interpretationen der Ergebnisse	38
3.7.1.	Chronologie der Wasserstoffkonzentrationen (c H ₂)	39
3.7.2.	Chronologie der Kohlenmonoxidkonzentrationen (c CO)	42
3.7.3.	Chronologie der Kohlendioxidkonzentrationen (c CO ₂)	43
3.7.4.	Chronologie der Methankonzentrationen (c CH ₄)	44
3.7.5.	Chronologie der Ethinkonzentrationen (c C ₂ H ₂)	45
3.7.6.	Chronologie der Ethenkonzentrationen (c C ₂ H ₄)	46
3.7.7.	Chronologie der Ethankonzentrationen (c C ₂ H ₆)	47
3.7.8.	Chronologie der Ölfeuchte (mg H ₂ O / kg Öl)	48
4.	Wandler mit realem Fehler (WmRF) – Vergleiche mit Proband 2	54
4.1.	Beschreibung des Wandlers und seiner Vorgeschichte	54
4.2.	Zeitlicher Verlauf der Gaskonzentrationen	54
4.3.	Vergleiche von Untersuchungsdaten für WmRF und Proband 2	55
4.3.1.	Vergleich der Wasserstoffkonzentrationen (c H ₂) für WmRF und Proband 2	56
4.3.2.	Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentration (c CO) für WmRF und Proband 2	57
4.3.3.	Vergleich der Kohlendioxidkonzentration (c CO ₂) für WmRF und Proband 2	57
4.3.4.	Vergleich der Methankonzentration (c CH ₄) für WmRF und Proband 2	58
4.3.5.	Vergleich der Ethinkonzentration (c C ₂ H ₂) für WmRF und Proband 2	59
4.3.6.	Vergleich der Ethenkonzentration (c C ₂ H ₄) für WmRF und Proband 2	60
4.3.7.	Vergleich der Ethankonzentration (c C ₂ H ₆) für WmRF und Proband 2	61
4.4.	Erkenntnisse aus dem Vergleich von WmRF und Proband 2	63
5.	Interpretationsschema zur DGA - neue Erkenntnisse	66
5.1.	Grundlagen und Übersicht über bisherige Erfahrungen	66
5.2.	Identifizierung von Fehlern mittels Gasquotienten nach EN 60599	67
5.2.1.	Erläuterungen zum Interpretationsschema nach EN 60599	67
5.2.2.	Interpretation von Fehlern, die Gase im freien Öl generieren - neu erkannte Einflussfaktoren	69
5.2.3.	Interpretation von Fehlern, die Gase unter Öl-Papierisolierungen generieren - neu erkannte Einflussfaktoren	72
5.3.	Identifizierung von Fehlern mittels Interpretationsschemata nach Duval	77
5.3.1.	Erläuterungen zu den Interpretationsschemata nach Duval	77
5.3.2.	Interpretation von Fehlern, die Gase im freien Öl generieren - neu erkannte Einflussfaktoren	79
5.3.3.	Interpretation von Fehlern, die Gase unter Öl-Papierisolierungen generieren - neu erkannte Einflussfaktoren	82
5.3.4.	Anwendung der Erkenntnisse auf die Beurteilung eines kurzzeitig aktiven Fehlers in einem Transformator	83

5.4.	Zusammenfassung der neuen Erkenntnisse	84
6.	Vergleich der definierten und erreichten Projektziele	86
6.1.	Verbesserte Zustandsbeurteilung auf Basis der DGA - Überprüfung der Treffsicherheit der Interpretationsschemata	86
6.2.	Kriterien für einen optimalen Beprobungszeitpunkt	87
6.3.	Erkenntnisse zur Gas- und Wasserdampfdurchlässigkeit von Verbundisolatoren	88
7.	Zusammenfassung und Ausblick	89
8.	Anhang	93
8.1.	Beprobung, Analytik und Berechnung (HS-DGA)	93
8.2.	Erläuterungen zur Diffusion von Gasen in Luft und in Flüssigkeiten	95
8.3.	Natürliche Konvektion in ölgefüllten Messwandlern	96
8.4.	Erläuterungen zu den Begriffen Sorption, Adsorption und Absorption	98
8.5.	Erläuterungen zum Begriff Permeation	99
8.6.	Gas- und Wasserdampfdurchlässigkeit von Verbund-Hohlisolatoren	101
8.7.	Zusammenstellung der Eigenschaften einiger Spalt- und Umgebungsgase	104
8.8.	Projektantrag	106
9.	Verzeichnisse	110
9.1.	Abbildungsverzeichnis	110
9.2.	Tabellenverzeichnis	113
9.3.	Literaturverzeichnis	114

Kurzfassung

Schlüsselwörter: Messwandler, Leistungstransformatoren, Öl-Papierisolierung, Gas-in-Öl-Analyse, Zeitreihen von Gaskonzentrationen, Interpretationsschemata, Sorptionseffekte, Beeinträchtigungen von Gasmuster

Hochspannungs-Messwandler sind wichtige Betriebsmittel von Kraftwerken und Energieverteilnetzen. Ihre Instandhaltung beschränkt sich gewöhnlich auf regelmäßige Sichtkontrollen durch das Betriebspersonal. Bei den österreichischen Elektrizitätsversorgungsunternehmen gab es jedoch vor mehr als 30 Jahren vermehrt Schäden von öl-papier-isolierten Messwandlern. Einige dabei aufgetretene Explosionen von Porzellanisolatoren veranlassten die Betreiber die „Gas-in-Öl-Analyse“ (Dissolved Gas Analysis - DGA) zu ihrer Zustandsüberwachung einzuführen. In Kombination mit der Headspace-Technik, für die nur wenig Ölvolume benötigt wird, ist die DGA heute die wichtigste Methode zur Zustandsbeurteilung solcher Messwandler geworden. Sie ermöglicht nämlich die Erkennung unterschiedlicher Fehlerarten, da diese an den charakteristischen Verteilungsmustern der im Öl gelösten Gase identifizierbar sind.

Die von Fehlern generierten Gasmuster können aber von anderen, nicht fehlerspezifischen Gasquellen maßgeblich verändert werden. Dazu zählen das sogenannte Stray Gassing, chemisch-katalytische Einflüsse sowie Wechselwirkungen von Materialien, die in Messwandlern eingesetzt werden. Solche Effekte können zu erheblicher Unsicherheit in der Bewertung und Diagnose und folglich auch zu fehlerhafter Zustandsbeurteilung der in Betrieb stehenden Wandler führen. Eine weitere Ursache für störende Gasentwicklungen wurde in den Jahren 2010-2014 von VUM Verfahren Umwelt Management GmbH (vormals VERBUND Umwelttechnik GmbH) untersucht und erkannt.

Unlängst zeigten Zeitreihen der DGA-Werte von Ölproben aus einigen Messwandlern auffällige und zunächst unerklärbare Konzentrationsreduktionen bestimmter Gase. Bereits aus ersten Laboruntersuchungen war erkennbar, dass sich die Verteilungsmuster der Gas-in-Öl-Konzentrationen maßgeblich verändern, wenn den Ölproben Papier zugesetzt wird. Da solche Effekte die Treffsicherheit der Interpretationsschemata von DGA-Werten beeinträchtigen können, wurde ein Forschungsprojekt zur Erweiterung der Versuche auf reale Objekte beantragt. Im Fokus der dafür vorgesehenen Untersuchungen stand der mittelfristige Konzentrationsverlauf charakteristischer Zersetzungsgase, welche dem Isolieröl von sechs Messwandler-Modellen zugesetzt wurden. Um die möglichen Ursachen für die veränderten Gasmuster einzugrenzen, wurden die Probanden sowohl mit Porzellan- als auch mit Verbundisolatoren ausgeführt. In zwei Probanden wurden dabei Spannungswandler-Aktivteile eingebaut, die anderen waren nur ölgefüllt. Mit zusätzlich eingebauten Temperatursensoren sollte außerdem die Temperaturverteilung in den Probanden unter dem Einfluss unterschiedlicher Aufstellungsbedingungen erfasst werden.

Primärziel des Forschungsprojekts war es, die Ursachen der Konzentrationsabnahmen spezifischer Gase festzustellen. Da solche Einflüsse bisher bei der Interpretation von DGA-Werten nicht berücksichtigt wurden, sollte auch analysiert werden, inwieweit die Treffsicherheit von Diagnosen beeinträchtigt wird. Ebenso war beabsichtigt, den jahreszeitlich optimalen Zeitraum für Routine-Ölprobenahmen herauszufinden. Ein weiteres Untersuchungsziel war es auch, quantitative Informationen zur Wasserdampf- und Gasdichtheit von Verbund-Hohlisolatoren zu erlangen.

Die gesetzten Ziele wurden erreicht und durch neue, noch unveröffentlichte Erkenntnisse ergänzt. Die Untersuchungsergebnisse führten nämlich zur unerwarteten Schlussfolgerung, dass nicht nur Wasser und Kohlendioxid bevorzugt von Isolierpapier sorbiert werden, sondern auch die Schlüsselgase

Wasserstoff und Ethin. Dadurch verschieben sich die Konzentrationsverhältnisse der im Öl gelösten Gase. Veränderungen der Gasmuster können sich in den verschiedenen Interpretationsschemata unter Umständen bedeutsam auswirken, wie das folgende Beispiel zeigt. Ein Messwandler wurde kurz nach Erkennung hoher DGA-Werte umgehend außer Betrieb genommen. Interessehalber wurde nach einigen Monaten Stillstand eine weitere Ölprobe gezogen. Obwohl vom Fehler unterdessen kein Gas generiert worden war, hatte sich das ursprüngliche Gasmuster infolge von Sorptionseffekte stark verändert. Dementsprechend hätten die beiden DGA zu unterschiedlichen Fehlerdiagnosen geführt. Solche Erkenntnisse sind – außer für Messwandler – besonders auch für Transformatoren von großer Bedeutung. Das konnte anhand einer Zeitreihe der Gas-in-Öl-Konzentrationen, die nach einem kurzzeitigen Fehler mit einem Online-Gerät erfasst wurden, veranschaulicht werden.

Weitere Erkenntnisse wurden durch zusätzliche Untersuchungen an einem fehlerbehafteten Messwandler erlangt. Offenbar sind bei Fehlern, die Spaltgase in bzw. unter dicken Lagen von Öl-Papierisolierungen generieren, noch weitere Auswirkungen auf Gas-in-Öl-Analysen zu beachten. Es stellte sich nämlich heraus, dass die Konzentrationen einzelner Spaltgase im freien Öl noch Monate nach der Außerbetriebnahme dieses defekten Gerätes zunahmen, während sie bei anderen Gasen bereits einen rückläufigen Trend zeigten. Anscheinend permeieren Spaltgase unterschiedlich schnell durch solche Öl-Papierbarrieren. Kurz- und mittelfristige Veränderung von Gasmustern infolge eines selektiven Barriereneffekts können sich gravierend auf die Interpretation der DGA auswirken. Da jedoch mit dem Forschungsprojekt Neuland betreten wurde, wären zur Vertiefung der bisher gewonnenen Erkenntnisse weitere praktische und wissenschaftliche Bearbeitungen der Thematik erforderlich.

Für Messwandler in Freiluftanlagen liegt der optimale Zeitpunkt für Ölprobenahmen in der wärmeren Jahreshälfte. Die niedrigere Viskosität des Öls sowie häufige und große Änderungen der Tagestemperaturen bewirken eine relativ gute Verteilung der Gase im freien Öl. Bei Messwandler, die bei weitgehend konstanten Umgebungstemperaturen in Innenräumen betrieben werden, kann es lange dauern, bis die Spaltgase der Fehlerstelle an der Probenahmestelle ankommen. Daher sind Wiederholungsmessungen nach einigen Monaten empfehlenswert, sobald erste Zunahmen von Zersetzungsgasen festgestellt werden.

Die potenzielle Wasserdampfdurchlässigkeit von Verbund-Hohlisolatoren stellt kein Problem dar, da die zu erwartende Wassermenge weitgehend von der Papierisolierung sorbiert wird und die Ölfeuchte daher niedrig bleibt. Während der Langzeitbeobachtung konnten auch keine relevanten Emissionen der gelösten Gase festgestellt werden, so dass die Interpretation der DGA-Ergebnisse nur unerheblich beeinflusst wird.

Abstract

Key words: Instrument transformers, power transformers, oil-paper insulation, gas-in-oil analysis, time series of gas concentrations, interpretation schemes, effects of sorption, interference of gas pattern

High-voltage instrument transformers are essential equipments of power plants and power distribution networks. Their maintenance is usually limited to regular visual inspection by the operating staff. However, more than 30 years ago, Austrian electricity companies experienced increased damage to oil-paper-insulated instrument transformers. Due to a couple of explosions of porcelain insulators, that occurred during operation, caused the utilities to introduce the "Dissolved Gas Analysis" (DGA) for their condition monitoring. In combination with the headspace-technique, for which only a small volume of oil is required, the DGA has become the most important method for assessing the condition of such instrument transformers. This is because it allows the detection of different types of faults, as these can be identified by characteristic distribution patterns of the gases dissolved in the oil.

However, the gas patterns generated by faults can be significantly modified by other gas sources that are not fault specific. These include so-called stray gassing, chemical-catalytic influences and interactions of materials used in instrument transformers. Such effects can lead to considerable diagnostic uncertainty and consequently to incorrect assessments of their condition. A further cause of interfering gas developments has been investigated and identified by VUM Verfahren Umwelt Management GmbH (formerly VERBUND Umwelttechnik GmbH) in the years 2010-2014.

Recently, time series of the DGA values of oil samples from some instrument transformers showed conspicuous and initially inexplicable reductions in concentration of specific gases. It was already apparent from initial laboratory tests that the distribution patterns of gas-in-oil concentrations change significantly when paper is added to oil samples. Since such effects can affect the accuracy of the interpretation schemes of DGA values, a research project was applied for to extend the experiments to real objects. The focus of the investigations planned for this purpose was the medium-term concentration course of characteristic decomposition gases, which were added to the insulating oil of six instrument transformer models. In order to narrow down the possible causes for the altered gas patterns, the test objects were carried out with both porcelain and composite insulators. Two of the test objects were equipped with active components of a voltage transformer, the others were only filled with oil. Additional temperature sensors were installed to measure the temperature distribution within the test objects under the influence of different installation conditions.

The primary objective of the research project was to determine the causes of the decrease in concentration of specific gases. Since such influences have not been considered in the interpretation of DGA values so far, it should also be analysed to what extent the accuracy of diagnoses is affected. It was also intended to find out the optimal seasonal period for routine oil sampling. Another scope of work was to obtain quantitative information on the water vapour and gas tightness of composite hollow insulators.

The determined goals have been achieved, and were also supplemented by new and unpublished knowledge. The results of the investigation led to the unexpected conclusion that not only water and carbon dioxide, but also the key gases hydrogen and ethine are preferably adsorbed by insulating paper. As a result, the concentration ratios of the gases dissolved in the oil are shifted. Changes in gas patterns can have a significant impact on the various interpretation schemes, as the following example shows. One instrument transformer was immediately taken out of service shortly after high DGA values were detected. For the sake of interest, another oil sample was taken after several months of standstill

Although no gas had been generated by the fault in the meantime, the original gas pattern had changed significantly due to sorption effects. Accordingly, the two DGA would have led to different fault diagnoses. Apart from instrument transformers, such findings are of particular importance for power transformers. This could be demonstrated by the time series of the gas-in-oil concentrations, which were recorded with an online device after a temporary fault.

Further findings were obtained by means of additional investigations of a faulty instrument transformer. Obviously, further effects on gas-in-oil analyses have to be considered in case of faults, which generate decomposition gases in or under thick layers of oil-paper insulation. It turned out that the concentrations of individual decomposition gases in the bulk oil still increased months after the shutdown of this defective unit, while for other gases it already showed a declining trend. Apparently, decomposition gases permeate through such oil-paper barriers at different rates. Short- and medium-term changes of gas patterns due to a selective barrier effect can have a serious impact on the interpretation of the DGA. However, since the research project broke new ground, further practical and scientific work on the topic would be necessary to deepen the knowledge gained so far.

For instrument transformers in outdoor installations, the optimum time for oil sampling is during the warmer half of the year. The lower viscosity of the oil as well as frequent and large changes in daily temperatures result in a relatively good distribution of the gases in the free oil. In the case of instrument transformers, which are operated at nearly constant indoor temperatures, it may take a long time until the decomposition gases of the fault location arrive at the sampling point. Repeat measurements are therefore recommended after a few months, as soon as the first increases in decomposition gases are detected.

The potential water vapour permeability of composite hollow insulators does not pose a problem, as the expected amount of water is largely absorbed by the paper insulation and therefore the humidity of oil remains low. During the long-term observation of this research project, no relevant emissions of the dissolved gases could be determined either, so that the interpretation of the DGA results will be only insignificantly influenced.

1. Einleitung

1.1. Struktur des Forschungsberichts

Im 1. Kapitel werden Veranlassung, Ziele und chronologischer Ablauf des Forschungsprojekts beschrieben. Das 2. Kapitel befasst sich mit den Vorversuchen an Labormustern, den Untersuchungsergebnissen einschließlich der Bewertung und Interpretation. Im Kapitel 3 werden die Hauptversuche beschrieben, die an sechs 1:1 Modellen von 110 kV Spannungswandlern durchgeführt wurden. Die zahlreichen Messergebnisse und die Folgerungen der daraus abgeleiteten Erkenntnisse werden ausführlich diskutiert. Die Ergebnisse von parallel vorgenommenen Langzeituntersuchungen der Gas-in-Öl-Konzentrationen eines fehlerbehafteten 110 kV Stromwandlers werden im Kapitel 4 erörtert. Im Kapitel 5 werden die Auswirkungen der festgestellten zeitlichen Änderungen im Gashaushalt der Messwandler und ihre Auswirkungen auf die Treffsicherheit der DGA zur Identifikation von Fehlern behandelt. Mit der Gegenüberstellung der gesetzten und der erreichten Projektziele wird der Erfahrungsgewinn im Kapitel 6 dargestellt. Kapitel 7 enthält die Zusammenfassung und einen Ausblick auf zu empfehlende Folgeuntersuchungen. Ein umfangreicher Anhang mit Details zur Headspace-DGA-Messtechnik, dem Projektantrag sowie Erläuterungen zu Permeations-, Diffusions- und Sorptionsprozessen rundet den Forschungsbericht ab.

1.2. Veranlassung des Forschungsprojekts

Für die Unternehmen der österreichischen Elektrizitätswirtschaft ist die DGA (Dissolved Gas Analysis bzw. Gas-in-Öl-Analyse) gemäß EN 60567: 2012 [1], neben der visuellen Kontrolle, die wichtigste Inspektionsmethode zur Zustandsbeurteilung öl-papierisolierter Hochspannungs-Messwandler¹. Die korrekte Interpretation der DGA kann jedoch erschwert werden, wenn das durch einen Fehler erzeugte, charakteristische Gasgemisch durch nicht fehlerspezifische Gasentwicklungen überlagert oder durch Permeations-, Diffusions- oder Sorptionsprozesse² in seiner Zusammensetzung verändert wird. Zu- und Abnahmen der Gaskonzentrationen sowie Änderungen der Gasmuster sind nicht immer unmittelbar mit der Aktivität eines Fehlers verbunden, sondern können von folgenden Faktoren bestimmt werden:

- Art, Intensität und Frequenz des Fehlers
(Art der erzeugten Spaltgase, einmalig, intermittierend oder permanent)
- Örtlichkeit des Fehlers
(im freien Öl oder unter Isolierpapierlagen, Entfernung zur Probenahmestelle)
- Homogenität der Gasverteilung im Öl
(Schwache Konvektionsströmung bei Messwandlern)
- Bevorzugte Sorption einzelner Spaltgase durch das Isolierpapier
- Temperaturbedingte Sorptions- oder Desorptionsvorgänge
(tägliche und saisonale Temperaturgänge)
- Unterschiedliche Permeation einzelner Gase durch das Wandlergehäuse
- Chemische Prozesse
(z.B. H₂-Produktion durch Wasser an Aluminiumoberflächen)
- Stray Gassing³ [2] (unerwartete Gasbildung bei moderaten Temperaturen)

¹ Bei allen Versuchen kam naphthenisches Isolieröl auf Mineralölbasis (Nynas Nytro 4000X) zur Anwendung.

² Diese Begriffe werden in den Anhängen im Kapitel 8 erläutert.

³ Fehler ohne Folgeschaden, bei dem Methan, Ethan, Kohlenmonoxid und auch Wasserstoff als Folge von Öloxidation gebildet wird

Einige dieser Einflüsse sind durch Normen [2], [3] und durch international veröffentlichte Untersuchungsergebnisse [4] aber auch durch ein Forschungsprojekt von VUM⁴ [5] bekannt. Eingehende Untersuchungen wurden auch schon zur Wasserdampfdurchlässigkeit luftgefüllter Komposit-Isolatoren (Verbundisolator: glasfaserverstärktes Epoxid-Rohr mit Silikongummi-Beschirmung) durchgeführt [6], [7], [8]. Zur Gasdurchlässigkeit ölgefüllter Verbund-Hohlisolatoren und einigen weiteren der aufgezählten Punkte gibt es jedoch keine gleichwertigen Veröffentlichungen. Vor der Abwicklung dieses Forschungsprojekts war jedenfalls kaum bekannt, dass Papier neben Wasser und Kohlendioxid selektiv erhebliche Mengen weiterer Spaltgase (H_2 , C_2H_2) aus dem Öl sorbieren⁵ kann. Die weitreichenden Folgen dieses Effekts bei der Interpretation von Fehlern mit Hilfe von Gas-in-Öl-Analysen werden in diesem Bericht noch ausführlich diskutiert. Daher wurde das gegenständliche Forschungsprojekt beantragt, um einige dieser Informationslücken durch Versuchsserien im Labormaßstab und Untersuchungen an realen Geräten schließen zu können.

Die praktische Bedeutung solcher Untersuchungen kann am Beispiel von drei Stück 110 kV-Messwandlern (Baujahr 2008) gezeigt werden, die in den Jahren 2009 bis 2010 ohne elektrische Beanspruchung unter gleichmäßigen Umgebungsbedingungen in einem Innenraum aufgestellt waren. Die anfänglich hohen H_2 -Konzentrationen von bis zu 800 $\mu\text{l/l}$ sank innerhalb weniger Monate wieder auf Normalwerte von $< 50 \mu\text{l/l}$ ab. Diese Wandler waren mit Verbundisolatoren ausgestattet. Da die Wasserstoffkonzentrationen bei Parallelfällen mit Porzellanisolatoren über einen längeren Zeitraum deutlich langsamer abfielen, wurde damals vermutet, dass die Permeationseigenschaften unterschiedlich ausgeführter Hohlkörperisolatoren eine Rolle spielen könnten. Ein derart rapider Abbau der Wasserstoffkonzentration steht einer erfolgreichen Anwendung der DGA entgegen und erfordert eine rasche Klärung der Ursachen.

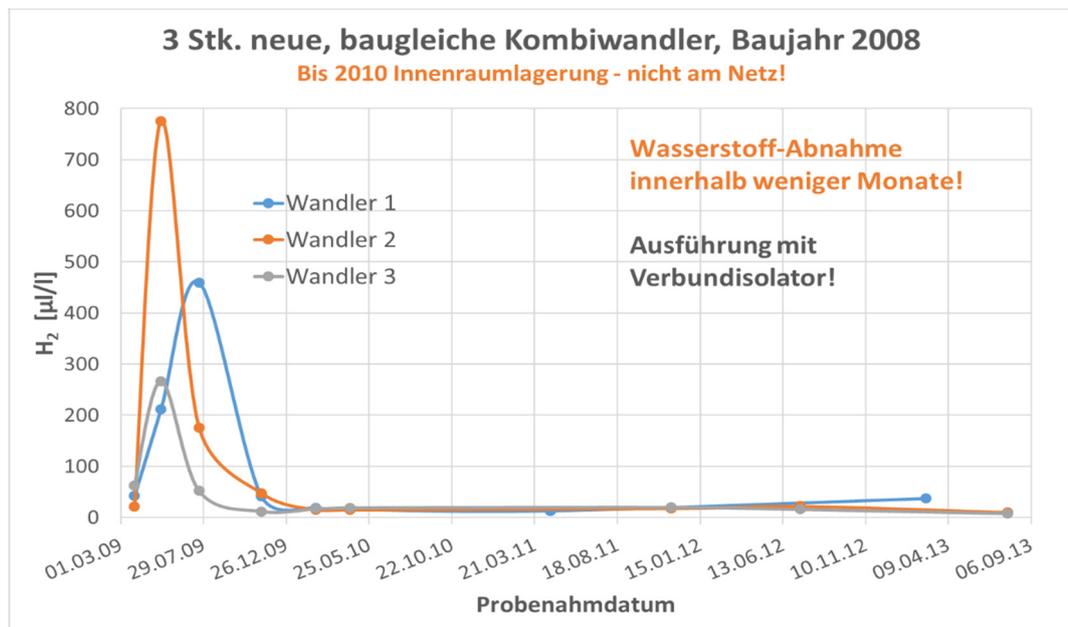


Abbildung 1: Wasserstoffverlauf (H_2) von 3 neuen Kombiwandlern

⁴ VUM: VUM Verfahren Umwelt Management GmbH

⁵ Der Oberbegriff „sorbieren“ wird in diesem Bericht immer dann verwendet, wenn nicht eindeutig zwischen ab- und adsorbieren unterschieden werden kann

In einem weiteren Fallbeispiel sind die Wasserstoff- und Methan-Konzentrationen von drei baugleichen Messwandlern im zeitlichen Verlauf gegenübergestellt (Tabelle 1). Einerseits wird ersichtlich, dass die überhöhte Wasserstoffkonzentration des Wandlers im Leitungsstrang L1 kontinuierlich abfällt, währenddessen die Methankonzentration steigt. Anhand der in EN 60599 [2] festgeschriebenen Grenzwerte (Überschreitungen orange markiert) und Auswerte- bzw. Interpretationsmethoden würde sich für diesen Wandler eindeutig das Fehlerbild „Teilentladungen“ ergeben ($CH_4/H_2 < 0,2$ für Messwandler). Die Kombiwandler der beiden anderen Leitungsstränge zeigen vergleichbare Methanentwicklungen, teils über den Grenzwert von 30 $\mu\text{l/l}$, jedoch ohne gleichzeitigen H_2 -Anstieg.

Tabelle 1: Zeitreihen der Wasserstoff- (H_2) und Methankonzentrationen (CH_4) von 3 Kombiwandlern (BJ 2003), Konzentrationswerte in $\mu\text{l/l}$

110 kV Kombiwandler, Baujahr 2003						
Probendatum	Leitungsstrang L1		Leitungsstrang L2		Leitungsstrang L3	
	H_2	CH_4	H_2	CH_4	H_2	CH_4
09.09.2004	1119	14	38	11	23	12
06.09.2005	1250	17	67	14	17	14
24.07.2006	1123	19	86	17	60	17
15.09.2008	893	25	43	23	25	23
22.11.2010	673	34	33	31	18	31
05.04.2012	625	39	34	36	21	32
14.04.2014	418	38	14	37	11	37
01.03.2016	343	42	17	48	16	39

Trotz der Grenzwertüberschreitungen und dem für Teilentladungen typischen Quotienten ($CH_4/H_2 < 0,2$) ist man aber bereits 2012 zu folgender Beurteilung gekommen:

„Erhöhte Wasserstoff-Konzentrationen des Kombiwandlers „Leitungsstrang L1“ aufgrund chemischer Reaktionen. Keine Teilentladungen. Erhöhter Methangehalt aller 3 Messwandler bedingt durch Ausgasung von im Messwandler eingesetzten Materialien. Kein thermischer Fehler, da das typische Begleitgas Ethan unauffällig war“.

Mit den Erkenntnissen aus früheren Forschungsprojekten wäre der starke Anstieg der H_2 -Konzentration auf eine chemische Reaktion von Wasser mit Oberflächen aus Aluminium oder verzinktem Stahl zurückzuführen. Der stetige Rückgang der H_2 -Konzentration wäre nach heutiger Kenntnis auf die Sorption durch das Isolierpapier zurückzuführen. Alle drei Messwandler waren jedenfalls noch bis 2019 störungsfrei in Betrieb, wodurch die seinerzeitige Zustandsbewertung bestätigt wurde.

Das dritte Fallspiel zeigt die Gasverläufe von zwei Kombiwandlern (Tabelle 2, Tabelle 3). Hier werden Anstiege bei den für Mineralöle charakteristischen Gasen für „Stray Gassing“ (CO , CH_4 , C_2H_6) bei Probenahmen in den wärmeren Jahreszeiten deutlich sichtbar. Ein thermischer Fehler konnte mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, da sich dieser normalerweise an einem über die Jahre steigenden Trend erkennen lässt. In diesen Fällen wurde aber bei der Probennahme in den kühleren Jahreszeiten ein Rückgang dieser Gase verzeichnet (Tabelle 3).

Tabelle 2: Zeitreihen der Methan- (CH₄) und Ethankonzentration (C₂H₆) eines Messwandlers (BJ 1975)

110 kV Kombiwandler, Baujahr 1975							
Probendatum	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
08.04.2002	0	21	719	5	0	0	0
24.05.2006	0	75	368	11	0	1	5
17.09.2009	30	53	482	9	0	2	5
15.04.2014	15	108	317	28	0	3	39
05.04.2017	40	319	693	56	0	6	84
13.09.2017	14	102	412	20	0	3	21
30.08.2018	17	147	457	21	0	2	13

Tabelle 3: Methan- (CH₄) und Ethanverlauf (C₂H₆) eines Messwandlers (BJ 1981)

110 kV Kombiwandler, Baujahr 1981							
Probendatum	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
29.08.2002	11	174	1790	30	0	3	35
24.11.2006	0	97	1396	5	0	1	2
02.09.2009	20	93	1869	6	0	3	2
20.07.2010	19	110	1808	39	0	4	56
04.08.2010	7	82	1713	24	0	3	31
01.03.2011	38	117	1857	17	0	4	9
22.04.2014	18	85	1839	18	0	2	16

Letztlich wurde 2014 für die Gasentwicklung der beiden Messwandler ein relativ unbedenkliches „Stray Gassing“⁶ als Ursache konstatiert und ein Niedertemperaturfehler ausgeschlossen. Die Ursache der Konzentrationsschwankungen war zum damaligen Zeitpunkt unklar, ist aber aus heutiger Sicht auf temperaturabhängige Sorptions-/Desorptionsvorgänge einzelner Gase zurückzuführen. Beide Wandler sind nach wie vor störungsfrei in Betrieb.

Beim vierten Fallbeispiel geht es um 24 Messwandler für ein Kraftwerksprojekt. Diese Messwandler (Baujahr 2011) stammten aus einer Produktionscharge, und sollten gemäß der Ausschreibung mit einem vollinhibierten und hochoxidationsstabilen Mineralöl (Nynas Nytro 4000X) gefüllt sein, welches auch auf dem Typenschild so vermerkt war. Drei Messwandler dieses Kollektivs zeigten im Jahr 2014 bereits leichte Anstiege der thermischen Zersetzungsgase, welche auf einen Niedertemperaturfehler hindeuteten. Daraufhin wurden alle 24 Geräte auf deren Aromaten- und Inhibitorgehalte untersucht, die sehr unterschiedlich ausfielen. Die nachstehende Abbildung 2 zeigt eindeutig, dass diese 24 Geräte unterschiedliche Mischungen aus einem uninhibierten Standardöl und einem vollinhibierten Highgrade-Öl enthalten. Mit großer Wahrscheinlichkeit wurden bei der Umstellung der Öl-Befüllanlage auf die geforderte Ölsorte noch Reste des beim Hersteller eingesetzten Standardöles mit verfüllt. Jene 3 Geräte mit den höchsten Anstiegen an thermischen Spaltgasen wurden scheinbar mit nahezu 100% an uninhibierten Standardöl befüllt.

⁶ Einige Öle können Gase wie Wasserstoff, Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffoxide bei niedrigen Temperaturen (< 120°C) entwickeln, ohne dass ein thermischer oder elektrischer Fehler im Transformator vorliegt, manchmal sogar ohne Belastung (EN 60296:2012)

Die Konzentrationen an C_2H_6 lagen 2017 bereits nahe an den in der EN 60599 angegebenen maximal zulässigen Werten, ab dem Handlungsbedarf besteht. Aufgrund des Wissens um die teilweise verminderte Ölqualität und der damit verbundenen Möglichkeit von „Stray Gassing“ wurden diese Wandler weiter in Betrieb gehalten. Die nächste Prüfung mittels DGA ist für das Jahr 2020 vorgesehen.

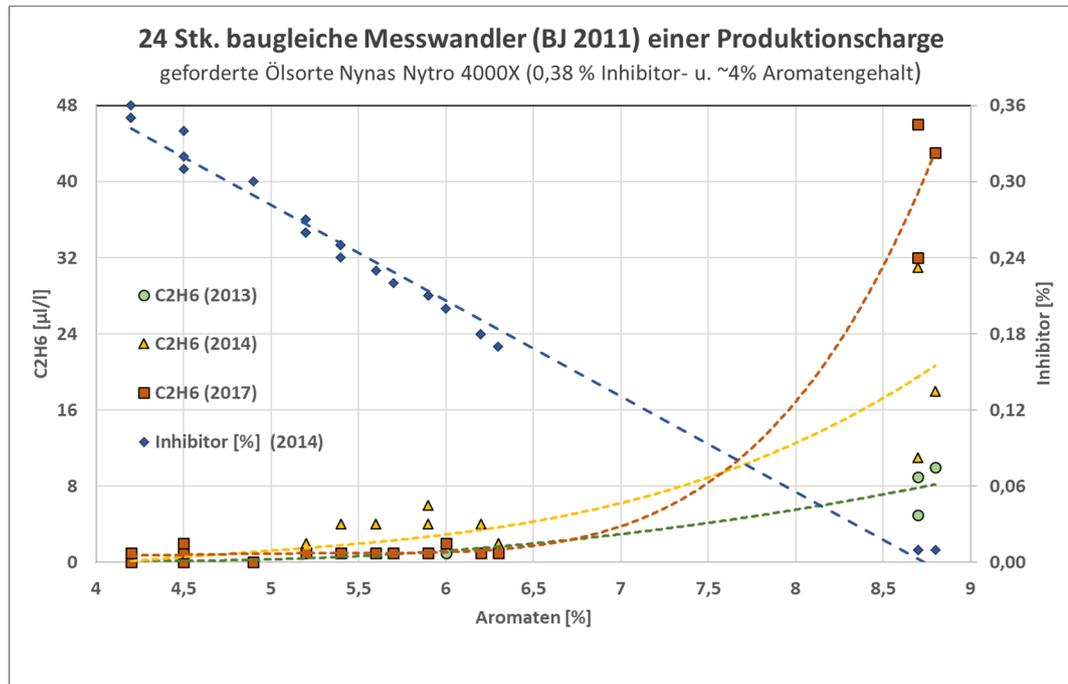


Abbildung 2: 24 Messwandler einer Produktionscharge – 3 Stück davon mit nicht inhibierter Ölfüllung zeigen Stray Gassing

1.3. Ziele des Forschungsprojektes

Mit dem gegenständlichen, von Österreichs Energie geförderten Forschungsprojekt wurde lt. Projektantrag die Erreichung folgender Ziele angestrebt:

- Verbesserte Beurteilung des Istzustandes der Wandler im Betrieb auf Basis der Gas-in-Öl-Analyse (DGA)
- Aussage über die Treffsicherheit der für Transformatoren entwickelten Quotienten-Beurteilung in der Anwendung bei Messwandlern
- Information über einen optimalen Zeitpunkt für die Abnahme von Ölproben (Jahreszeit) bzw. für die Beurteilung bei der Abnahme zu einem gegebenen Zeitpunkt (Sommer/Winter)
- Zusätzliche Erkenntnisse für den Einsatz von Verbundisolatoren (Wasser- und Gasdurchlässigkeit)

Das Permeationsverhalten von Wasserdampf durch den Hohlisolator und das Dichtungssystem in den Wandler-Aktivteil ist von grundsätzlichem Interesse, da eine relevante Verfeuchtung des Isolieröles und des Öl-Papier-Dielektrikums die Isolationsfestigkeit des Wandlers reduziert. Spezielles Interesse besteht dabei jedoch an Untersuchungen von Hochspannungswandler mit Verbundisolatoren, für die bisher weniger Betriebserfahrungen

gen vorliegen als für solche mit Porzellanisolatoren. Durch ein deutsches Forschungsvorhaben [7] gibt es aber zumindest für Verbundisolatoren mit Trockenluftfüllung einige Untersuchungsergebnisse, die zum Teil auch auf ölgefüllte Geräte übertragbar sind.

Die gesetzten Ziele wurden insgesamt nicht nur erreicht, sondern übertroffen, da durch die Untersuchungen bisher unbekannte oder jedenfalls nicht veröffentlichte Effekte festgestellt wurden, die in die Bewertung von Gas-in-Öl-Analysen einbezogen werden sollten.

1.4. Projektchronologie

Die unter Abschnitt 1.2 bereits beschriebenen Beispiele mit auffälligen Gas-Konzentrationsverläufen gaben einen ersten Anstoß, nach den dafür verantwortlichen Einflussgrößen zu suchen. Eine erste Gelegenheit dazu ergab sich im Sommer 2015 durch einen Hochspannungs-Stromwandler, der wegen stark erhöhter Konzentrationen an Ethin und Wasserstoff, rechtzeitig vor Schadenseintritt, außer Betrieb genommen werden konnte. Um allfällige Temperatur- und Langzeiteinflüsse auf den Gashaushalt dieses Wandlers zu ermitteln, wurde dieser unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (Temperaturen) ausgesetzt und der Verlauf der Gaskonzentrationen mittels Gas-in-Öl-Analyse (DGA) periodisch untersucht. Schon in den ersten Wochen waren deutliche und in mancher Hinsicht überraschende Veränderungen des ursprünglichen Gasmusters zu beobachten.

Um ein Forschungsprojekt zur Klärung dieser unerwarteten Konzentrationsänderungen begründen zu können, wurden Vorversuche gestartet. Dabei wurde im Labor-Maßstab versucht die Einflüsse von zwei unterschiedlichen Öl-Papierverhältnissen bei zusätzlicher Variation der Papierfeuchte unter verschiedenen Lagerungstemperaturen auf die Gaskonzentrationen im Öl nachzubilden. Die Vorgangsweise dazu ist unter Kapitel 2 beschrieben. Die Bestätigung, dass es maßgebliche und bisher unberücksichtigte Einflüsse auf bestimmte Anteile des im Öl gelösten Gasgemisches gibt, führte zu einem Projektantrag, der schließlich am 14.09.2015 von Österreichs Energie auch genehmigt wurde.

Um die definierten Projektziele zu erreichen, wurden 6 Probanden in der Größe und Bauform üblicher 110 kV Messwandler in unterschiedlichen Ausführungen von einem namhaften Hersteller gefertigt. Variiert wurde die Ausführung der Isolatoren (Porzellan-, Verbundisolatoren) sowie des Fußteiles. Zwei dieser Probanden enthielten einen Spannungswandler-Aktivteil, die anderen nur die Ölfüllung. Dadurch war es möglich, allfällige Einflüsse einiger im Messwandlerbau verwendeten Materialien und der konstruktiven Ausführung auf zeitliche Änderungen der im Isolieröl gelösten Spaltgasanteile zu untersuchen. Die Probanden wurden nach Zugabe von Spaltgasen in das freie Ölvolumen über einen längeren Zeitraum bei unterschiedlichen Aufstellungsbedingungen auf Veränderungen der Gaskonzentrationen und Wassergehalte im Isolieröl analytisch begleitet. Details zu diesem Hauptversuch, wo auch die Prozedur zur Einbringung der Gase eingehend beschrieben wird, sind im Projektantrag unter Abschnitt 8.8 und Kapitel 3 näher beschrieben.

Ursprünglicher Projektzeitplan

Bei Antragstellung für dieses Forschungsprojekt wurde der Versuchszeitraum mit rund 18 Monaten abgeschätzt. Der Start dazu hätte bereits im Oktober 2015 erfolgen sollen, es gab jedoch deutliche Verzögerungen bei der Fertigung der Probanden. Der Abschluss mit der Erstellung des Endberichtes war nach damaliger Einschätzung für April 2017 geplant.

Tabelle 4: Projektzeitplan laut Antrag

Projektphase	Ziele	Dauer in Monaten
Phase 1	Erfassung des Istzustandes; Bestimmung der gelösten Gase mittels DGA und des Wassergehaltes an den beigestellten Probanden bei Raumtemperatur	0,5
Phase 2	Dosierung der Probanden mit an Spaltgasen angereichertem Isolieröl	0,5
Phase 3	Ermittlung der Gasverteilung bei 30 °C im Trockenofen	3
Phase 4	Ermittlung der Gasverteilung bei 40 °C im Trockenofen	3
Phase 5	Ermittlung der Gasverteilung im Sommer (Freiluftaufstellung)	2
Phase 6	Ermittlung der Feuchtigkeitsaufnahme bei 40 °C im Trockenofen	3
Phase 7	Ermittlung der Gasverteilung im Winter (Freiluftaufstellung)	3
Phase 8	Endbericht	3
Gesamtdauer		18

Tatsächlicher Projektablauf

Der tatsächliche Projektstart hat sich durch die verspätete Lieferung der Probanden um rund ein Jahr auf den **Oktober 2016** verschoben. Weitere Verzögerungen ergaben sich auf Grund technischer Probleme. So mussten einige Probanden an diversen Verschraubungen mit 2-Komponenten-Kleber nachgedichtet und die Dichtheit über einige Wochen beobachtet werden.

Um die zeitlichen Konzentrationsverläufe in den Probanden beobachten zu können, wurden diesen mit an Spaltgasen angereichertes Isolieröl zugesetzt. Die für die Untersuchungen erforderliche, gleichmäßige Verteilung der Dosierlösung in den Probanden nahm deutlich mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich angenommen. Dieser Vorgang musste schließlich durch eine wechselnde Temperierung im Trockenofen beschleunigt werden, um durch forcierte Konvektionsströmung sowie Dilatationsbewegungen eine homogene Verteilung der gelösten Gase zwischen den Probenahmestellen „Oben“ und „Unten“ im Öl des Wandler⁷ als auch in seinem Dehnelement in vertretbarer Zeit zu erreichen.

Schließlich kam es im Frühjahr 2018 zu einem ungeplanten, rund 3-monatigem Krankenstand des federführenden Projektteam-Mitarbeiters bei VUM. Im Herbst 2018 musste der Fokus der Mitglieder des Arbeitskreises Messwandler und Isolieröle (Österreichs Energie)

⁷ Die Probanden haben neben dem eigentlichen Wandlerteil (Fußteil, Hohlisolator mit Flanschen, Aktivteil, Ölfüllung) noch ein über ein dünnes Rohr verbundenes Dehnelement. Für diese Teile des Wandlers wird in der Folge der Terminus „Wandler“ verwendet. Die Ölvolumina im Wandler und in seinem Dehnelement haben – bei geringen Temperaturschwankungen – oft wochenlang unterschiedliche Gaskonzentrationen.

und VUM als ausführendes Analysenlabor auf bekanntgewordene Messwandler-Probleme gelegt werden. Durch ein intensives Untersuchungsprogramm sowie die nachfolgenden statistischen Auswertungen für einige Typen von Hochspannungsmesswandler eines Herstellers waren dann Personalkapazitäten gebunden.

Aus den zwischenzeitlich gewonnen Erkenntnissen und den sich daraus ergebenden Fragen erwies es sich letztlich als sinnvoll, weitere ungeplante Phasen (B und C) mit unterschiedlichen Aufstellungsbedingungen (Freiluft, Raumtemperatur) einzuschieben. Diese Phasen waren zeitlich deutlich gestreckt um einer homogenen Gasverteilung in den Probanden ausreichend Zeit zu verschaffen. Die Projektphasen 1 bis 7, und auch jene außer Plan, wurden laufend durch Untersuchungen mittels Gas-in-Öl-Analyse (DGA) sowie Wassergehaltsmessungen nach der Karl-Fischer-Methode begleitet.

Somit wurde aus der ursprünglich geplante Beobachtungszeitraum von 15 Monaten auf 32 Monate mehr als verdoppelt. Insgesamt ergibt sich aus den obengenannten Gründen, welche zum Teil nicht vorhersehbar bzw. beeinflussbar waren, eine Verzugszeit von etwa 3 Jahren die jedoch – wie sich letztlich herausstellte und mit diesem Bericht dokumentiert wird - den Projekterkenntnissen maßgeblich zu Gute kam.

Tabelle 5: Tatsächlicher Projektablauf

Projektphase	Datum	Arbeitsschritte	Dauer in Monaten
Phase 1 und 2	24.10.16 - 19.02.17	Alle Probanden - Eingangsuntersuchungen bei Raumtemperatur (DGA, H ₂ O); Dosierung mit gasangereichertem Isolieröl; Beobachtung der Gas-Verteilung;	3,9
Phase A außer Plan	20.02. - 27.03.17	Leckagen - Ölverlust; Abdichtmaßnahmen; Nachdosierung von entgastem Isolieröl; Wechselnde Temperierung (40 °C /Raumtemp.) zur schnelleren Homogenisierung;	1,2
Phase 3	28.03. - 12.06.17	Aufstellung aller Probanden bei 30 °C im Trockenofen;	2,5
Phase 4	13.06. - 31.07.17	Aufstellung aller Probanden bei 40 °C im Trockenofen;	1,6
Phase 5	01.08. - 27.11.17	Freiluftaufstellung aller Probanden (Sommer bis Herbst); Leckage Proband 5 behoben (Verbindungsleitung zu Dehnelement);	3,9
Phase 6	28.11.17 - 04.02.18	Langzeitaufstellung aller Probanden bei 40 °C und mehrwöchiger Luftbefeuchtung im Trockenofen;	2,3
Phase 7	05.02. - 31.03.18	Freiluftaufstellung aller Probanden (Winter);	1,8
Phase B außer Plan	01.04. - 05.09.18	Freiluftaufstellung aller Probanden (Frühjahr/Sommer); Beobachtung eventueller Rückverteilung der Gase	5,2
Phase C außer Plan	06.09. - 24.06.19	Freiluftaufstellung der Probanden 2, 4, 5 u. 6 (Herbst/Winter/Frühjahr); Aufstellung der Probanden 1 und 3 in der Werkstatt bei Raumtemperatur; Beobachtung eventueller Rückverteilung der Gase;	9,7
Phase 8		Endbericht	11,9
Gesamtdauer			44

2. Vorversuche im Labormaßstab

2.1. Übersicht

Intention der Vorversuche war es, auf möglichst einfache Weise herauszufinden, ob und in welchem Ausmaß die für Fehler charakteristischen Spaltgasmuster durch Sorption spezifischer Gase durch das Isolierpapier verändert werden. Dazu wurden im Labormaßstab Ölproben mit Papierzusätzen (Abbildung 3) hergestellt. Das eingesetzte Isolierpapier wurde in Headspacefläschen schonend mehrere Tage vorgetrocknet. Anschließend wurden die Fläschchen verschlossen und mittels Argon-Spülung von Luftgasen befreit. Das Papier wurde danach durch Zugabe von Wasser auf unterschiedliche Feuchtigkeitswerte eingestellt. Vor der Zugabe des Mineralöls wurde dieses mit einer Prüfgasmischung, bestehend aus den für Fehlerfälle charakteristischen Spaltgasen, angereichert. Die Massenverhältnisse von Öl zu Papier in den Proben wurden variiert, um den quantitativen Einfluss unterschiedlicher Papiermassen auf allfällige Sorptionsprozesse festzustellen (Abbildung 3). Dieses Foto zeigt auch die später noch diskutierte Änderung des Gasraumvolumens durch die Papierbeigabe. Die relativen Änderungen der Spaltgaskonzentrationen in den Headspaceproben mit Papierzusätzen wurden aus dem Vergleich mit Referenzproben ohne Papier ermittelt.



Abbildung 3: Headspace-Proben mit 0 % (Referenzprobe), 11,6 % und 23,1 % Papierzusatz

2.2. Beschreibung der unterschiedlichen Probenvarianten und Versuchsbedingungen

Tabelle 6: Chronologische Vorgangsweise der Probenvorbereitung

Tag	Chronologie der Probenvorbereitung im Headspacefläschchen
1	Papier im HS-Fläschchen - Vakuumtrocknung bei 75 °C
2	Steigerung auf 85 °C (kurzzeitig Vakuum gebrochen) ⁸
3	Steigerung auf 95 °C (kurzzeitig Vakuum gebrochen)
4	HS-Fläschchen entnommen, sofort verschlossen und abgekühlt
	HS-Fläschchen 5 Minuten mit Argon gespült, danach Druckausgleich
	Zugabe von Wasser durch das Septum ins Papier
5	3 Tage Gleichgewichtseinstellung H ₂ O/Papier
	Zugabe des mit mit Spaltgasen angereicherten Isolieröles

Tabelle 6 beschreibt die chronologische Vorgangsweise der Probenherstellung.

Um den Temperatureinfluss auf den Gasaustausch zwischen dem Öl und dem Papier, d.h. auf die Sorptions- bzw. Desorptionsprozesse zu eruieren, wurden hinsichtlich Papieranteil und Papierfeuchtigkeit unterschiedliche Probenkollektive unter verschiedenen Temperaturbedingungen gelagert.

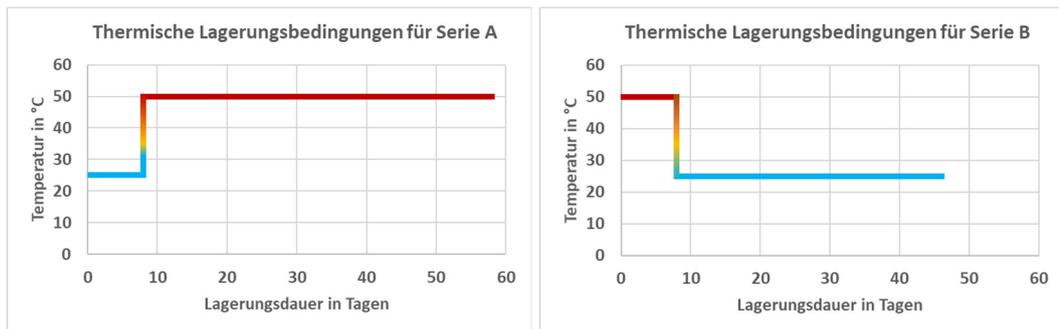


Abbildung 4: Thermische Lagerungsbedingungen für Serie A und B

Beim Temperaturverlauf der Serie A ist anzunehmen, dass einzelne Spaltgase während der ersten 8 Lagerungstage bei Raumtemperatur vom Papier sorbiert werden und dass sich dieser Prozess nach der anschließenden Langzeitlagerung bei 50 °C Temperatur verlangsamt oder sogar umkehrt (Desorption). Beim Temperaturverlauf der Serie B ist anzunehmen, dass eine allfällige Sorption während der ersten 8 Tage bei erhöhter Temperatur (50 °C) nur verlangsamt auftritt oder überhaupt unterbunden wird. Allenfalls im Papier bereits gespeicherte Gase, wie z.B. durch die Trocknung generiertes CO, könnten jedoch bei der auf 50 °C erhöhten Temperatur bereits desorbieren. Die Referenzproben enthielten kein Papier und ihre Gaskonzentrationen dienten als Bezugswerte für die Berechnung der relativen Veränderungen der Gaskonzentrationen.

⁸ Das kurzzeitige Brechen des Vakuums erlaubt erfahrungsgemäß ein besseres und schonenderes Trocknen. Nach dem Brechen des Vakuums und kurzer Einwirkung der erwärmten Umgebungsluft auf das Papier wird diese mit den Gasen und der Feuchtigkeit des Papiers wieder abgepumpt.

Tabelle 7: Probenserien mit Papieranteil, Papierfeuchte, Lagerungsbedingungen bis zur Messung

Papieranteil im Öl [%] w/w	Papierfeuchte errechnet [%] w/w	Serie A		Serie B	
		1. Lagerzeit/temp. [d/°C]	2. Lagerzeit/temp. [d/°C]	1. Lagerzeit/temp. [d/°C]	2. Lagerzeit/temp. [d/°C]
0,0	-	8 / 25	+50 / 50	8 / 50	+38 / 25
11,6	<0,1	8 / 25	+50 / 50	8 / 50	+38 / 25
11,6	0,5	8 / 25	+50 / 50	8 / 50	+38 / 25
11,6	1,0	8 / 25	+50 / 50	8 / 50	+38 / 25
23,1	<0,1	8 / 25	+50 / 50	8 / 50	+38 / 25
23,1	0,5	8 / 25	+50 / 50	8 / 50	+38 / 25
23,1	1,0	8 / 25	+50 / 50	8 / 50	+38 / 25

Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Papieranteile im Öl, die variierten Papierfeuchtigkeiten sowie Lagerungszeiten und -temperaturen der 3 Probenserien. Alle Proben und Referenzproben wurden in 2-3-facher Ausführung hergestellt.

Tabelle 8: Lagerungsbedingungen und Zeiten bis zur 1. und 2. Messung (DGA)

Serie A:
Lagerung für 8 Tage bei ~25 °C, danach 1. Messung (DGA)
Dieselben Proben für weitere 50 Tage bei 50 °C gelagert, danach 2. Messung (DGA)
Serie B:
Lagerung für 8 Tage bei ~50 °C, danach 1. Messung (DGA)
Dieselben Proben für weitere 38 Tage bei ~25 °C gelagert, danach 2. Messung (DGA)

Tabelle 8 zeigt nochmals die Lagerungszeiten und -temperaturen der 3 Probenserien bis zur 1. und 2. Messung (DGA).

2.3. Ergebnisse der Vorversuche

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die relative Veränderung der Gaskonzentrationen der Probenserien A (Temperatursteigerung von 25 auf 50 °C) und B (Temperaturabsenkung von 50 auf 25 °C) gegenüber den jeweiligen Referenzproben. Die Referenzproben enthielten nur das mit Spaltgasen angereicherte Isolieröl, ohne Papier- und Wasserzusatz. Eine Diskussion der Untersuchungsergebnisse an Hand der Diagramme sowie die Zusammenfassung der daraus gewonnenen Erkenntnisse sind am Ende dieses Kapitels zusammengestellt.

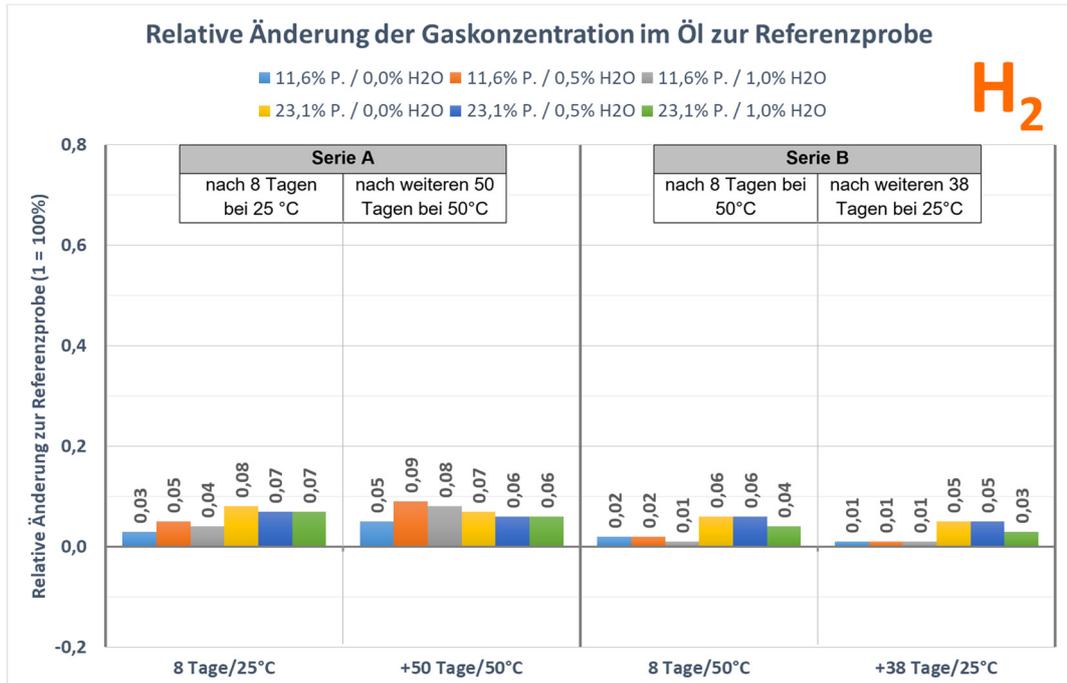


Abbildung 5: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der H₂-Konzentration im Öl

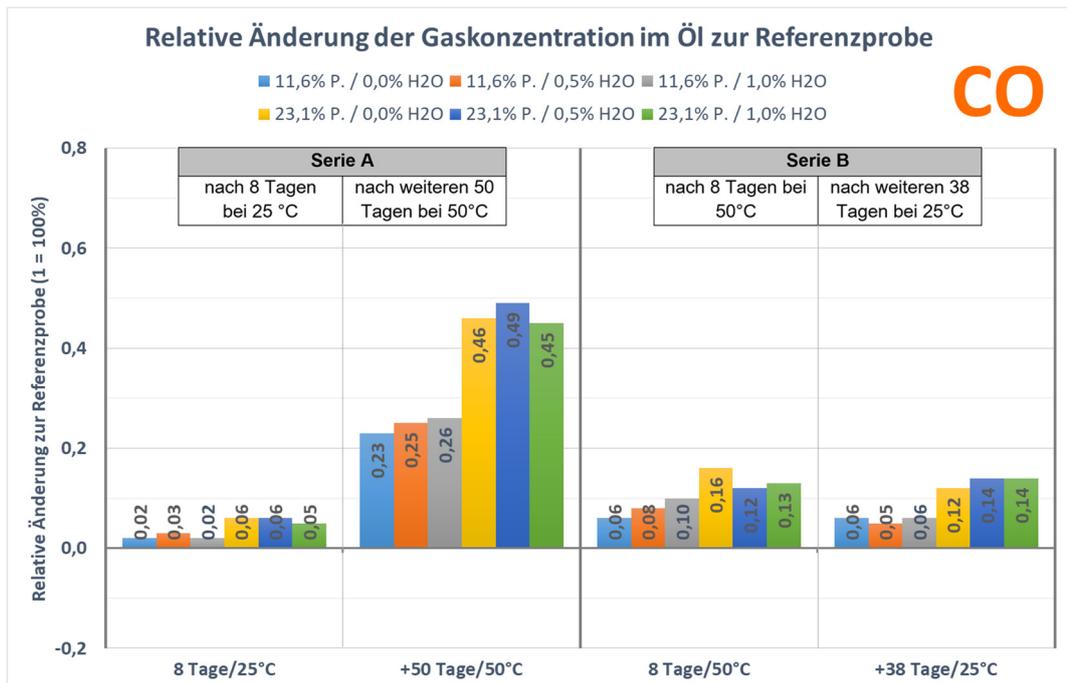


Abbildung 6: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der CO-Konzentration im Öl

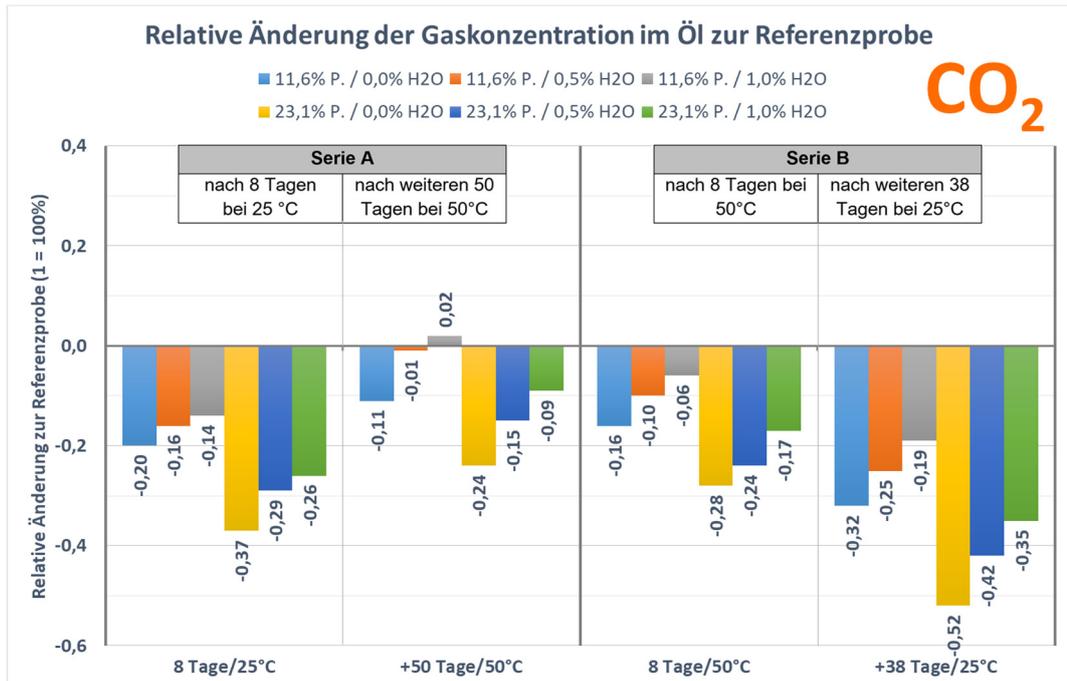


Abbildung 7: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der CO₂-Konzentration im Öl

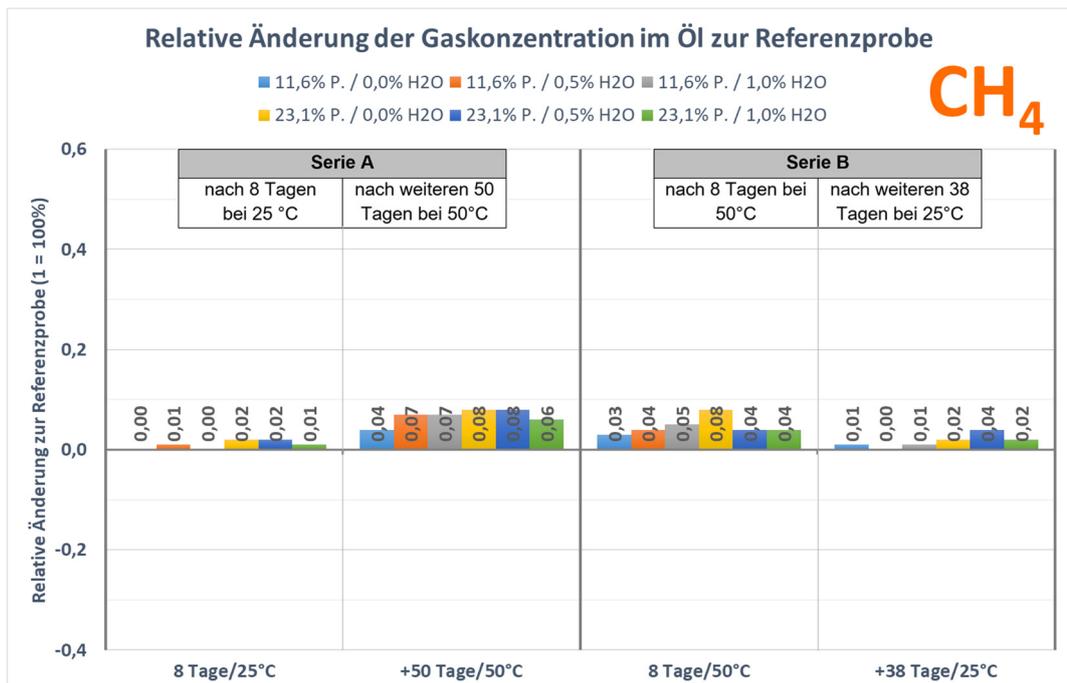


Abbildung 8: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der CH₄-Konzentration im Öl

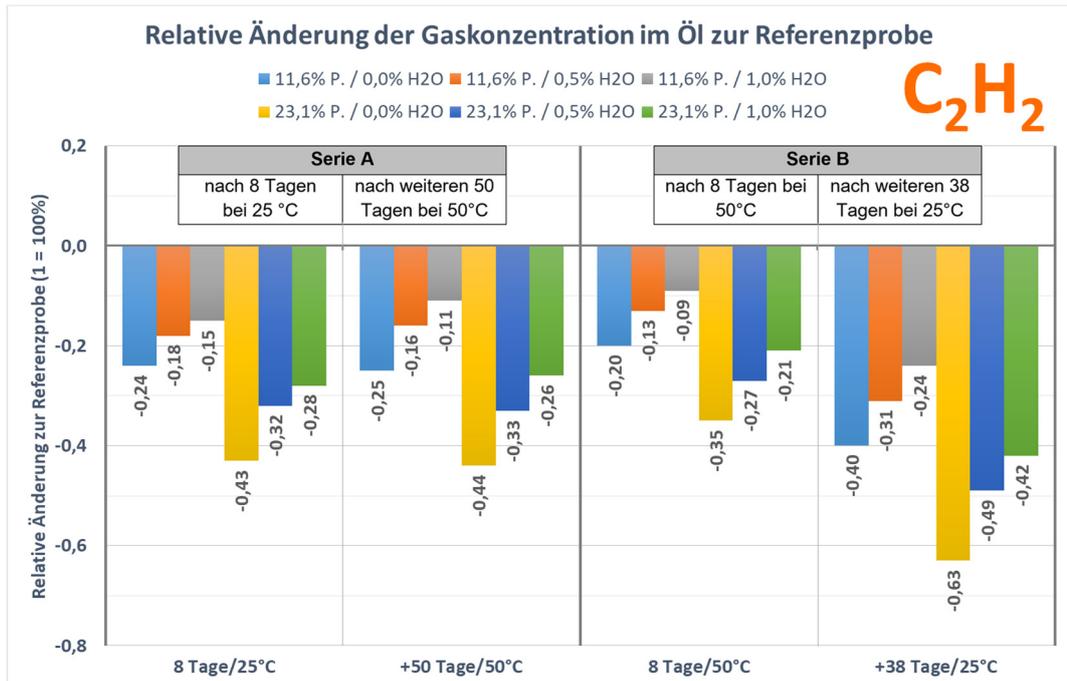


Abbildung 9: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der C₂H₂-Konzentration im Öl

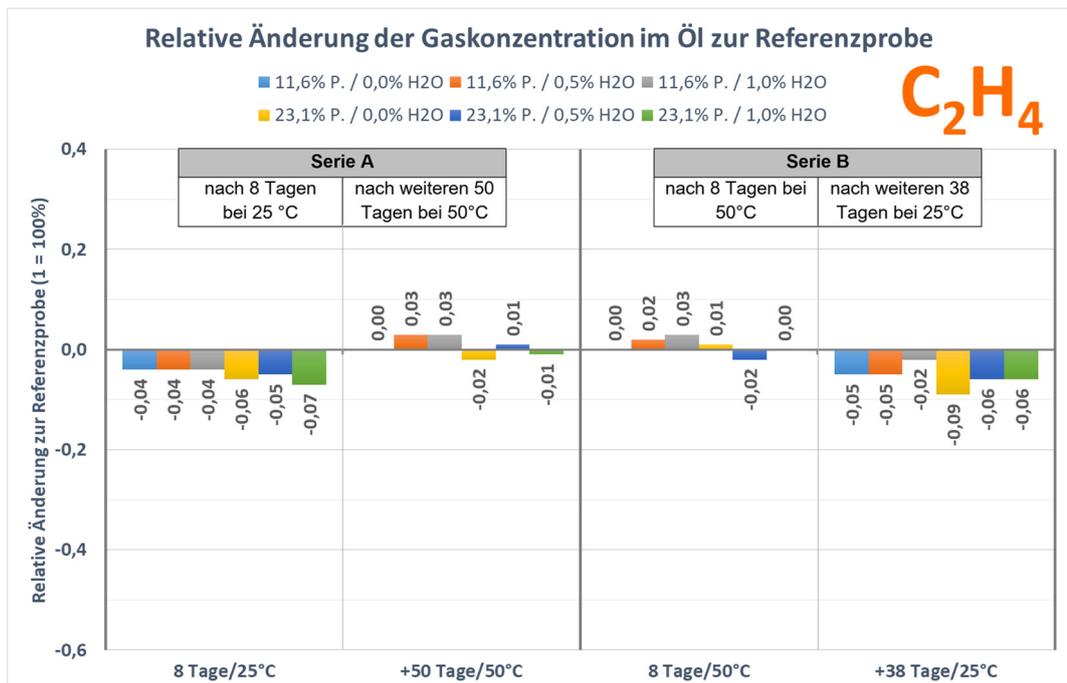


Abbildung 10: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der C₂H₄-Konzentration im Öl

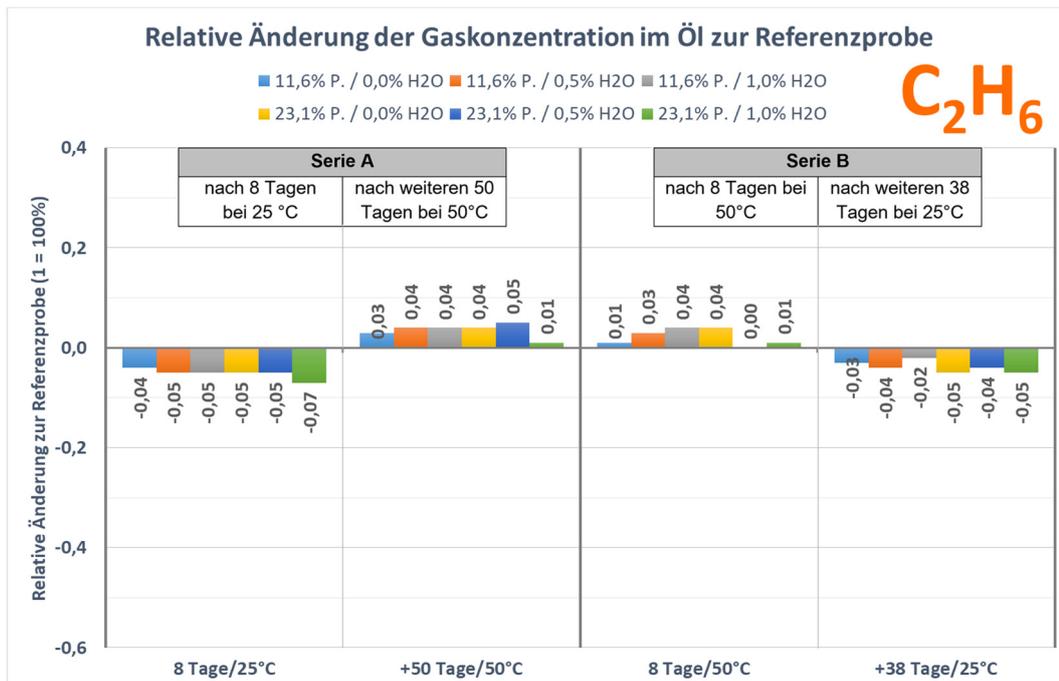


Abbildung 11: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der C₂H₆-Konzentration im Öl

2.4. Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse

Die gesammelten Erkenntnisse aus den Vorversuchen im Labormaßstab können aus nachstehenden Gründen nur eingeschränkt auf die Verhältnisse in realen Messwandlern umgelegt werden:

- Im Gegensatz zu „normalen“ gaschromatographischen Analysen von Isolierölen mittels Headspacemethode wurden diese bei den Vorversuchen an den kompletten Probenansätzen, d.h. mit Papierzusätzen im Öl der Headspacefläschchen ausgeführt. Bei unverändertem Ölvolumen wird das Gasvolumen in den Headspacefläschchen durch den Papierzusatz gegenüber den Referenzproben (nur Öl) etwas verringert (siehe Abbildung 3) und damit auch der Quotient V_G/V_L in der Berechnungsformel (siehe Abschnitt 8.1). Da die geringe Änderung des Gasvolumens nicht genau ermittelt werden konnte, wurde die Berechnung in erster Näherung mit dem gleichen Quotienten von Gas- zu Ölvolumen wie bei den Referenzproben vorgenommen. Dadurch sind – speziell bei den Proben mit schlecht öllöslichen Gasen (H₂, CO und CH₄) – etwas zu hoch berechnete Werte für die Gaskonzentrationen im Öl zu erwarten.
- Bei den Laborproben befindet sich – wiederum bei den schlecht öllöslichen Gasen – ein großer Anteil der Spaltgase im Gasraum über dem Öl. Dadurch ist die Konzentration dieser Gase im Öl viel niedriger als bei einem Gefäß ohne Gaspolster, wie z.B. bei einem Wandler mit Dehnelement. Beispielsweise verbleiben bei der Headspaceanordnung in einer H₂-angereicherten Ölprobe nur etwa 2 % des gesamten Wasserstoffvolumens im Öl, die restlichen 98 % diffundieren in den Gasraum. Kommt nun als dritte Phase ein Papierzusatz ins Öl, so kann die bereits stark reduzierte H₂-Konzentration im Öl nur noch marginal abnehmen. Selbst wenn das Papier die Hälfte des im Öl vorhandenen Wasserstoffs sorbiert, würde

sich dadurch der H₂-Gehalt im Gasraum nur um etwa einen Prozentpunkt vermindern. In einer Anordnung ohne Gasvolumen würde das Papier - unter der Annahme einer vergleichbaren Sorption - hingegen etwa 50 % des Wasserstoffs aus dem Öl sorbieren. Eine Headspaceanalyse dieses Öls würde diese Reduktion der H₂-Konzentration korrekt wiedergeben. Wie sich somit – jedoch erst nach Abschluss der Voruntersuchungen herausstellte – liefert die angewendete Headspaceanordnung mit den drei Phasen zur Untersuchung von Sorptionseffekten für Gase mit geringer Öllöslichkeit keine brauchbaren Ergebnisse. Bei besser öllöslichen Gasen (CO₂, C₂H₂, C₂H₄ und C₂H₆) sind ihre Gasvolumina viel gleichmäßiger auf das Öl- und Gasvolumen aufgeteilt. Bei relevanter Gassorption durch das Papier wird dann auch die Gaskonzentration im Headspaceraum maßgeblich reduziert und somit gaschromatographisch erfassbar. Dennoch werden Gasadsorptionen in einem 3-Phasensystem (Gas + Öl + Papier) stets schwächer ausfallen als in Gefäßen ohne Gaspolster. Die ermittelten Sorptionsraten für verschiedene Gase sind daher nicht direkt auf die Verhältnisse der Öl-Papierisolationen realer Messwandler mit Dehnelementen übertragbar.

- Die Probenansätze wurden im Laufe der Ofenlagerung zweimalig gaschromatographisch untersucht. Durch die Gasentnahme zur ersten Analyse nach 8-tägiger Lagerung nimmt die Konzentration invers zur Öllöslichkeit des betreffenden Gases ab. Diese Veränderungen werden zwar durch den Vergleich mit den Referenzproben weitgehend kompensiert, kleinere Abweichungen ergeben sich jedoch durch die oben beschriebenen Einflüsse der Papierzugaben.
- Das eingesetzte Isolierpapier war lose gewickelt, wodurch dem Gasaustausch mit dem Öl eine relativ große, freie Papieroberfläche direkt zugänglich war. Bei einem realen Messwandler besteht die Hauptisolierung aus vielen dicht gepackten Isolierpapierlagen, die dem Massetransport der Gase erheblich hemmen. Es dauert daher erheblich länger, bis das Gleichgewicht der Gaskonzentrationen zwischen dem freien Öl und den Papierlagen sowie dem zwischen diesem eingeschlossenen Öl erreicht wird.
- In öl-papierisolierten Hochspannungs-Messwandlern dauert die Homogenisierung der Gaskonzentration im Öl zufolge der langen Diffusionswege viel länger als bei den Laborproben, die zur Homogenisierung geschüttelt wurden.
- Die sehr anders gearteten Dichtungssysteme der Headspaceanordnungen des Vorversuches und von Hochspannungs-Messwandlern lassen unterschiedliche Permeationsraten für die einzelnen Gase erwarten.
- In Hochspannungs-Messwandlern befinden sich mit Aluminium, Eisen, Epoxidharz usw. noch weitere Materialien, die sich bei Langzeituntersuchungen eventuell auf Gasproduktions- und Permeationsprozesse auswirken.

Bei der Beurteilung der Messergebnisse sind zufolge der aufgezählten Gründe und weiterer, hier nicht angeführter Effekte, keine quantitativ korrekten Ergebnisse zu erwarten. Ziel der Vorversuche war es jedoch ohnehin nur, orientierende Erkenntnisse zur Sorption von Gasen in Öl-Papierisolationen zu erlangen, um die Erfolgsaussichten der Hauptversuche auszuloten. Das ist – wie in der Folge gezeigt wird – weitgehend gelungen.

Wasserstoff H₂ (Abbildung 5)

Die – verglichen mit den Referenzproben – ermittelten relativen Anstiege der Wasserstoffkonzentrationen von bis zu 8% sind auf die Veränderung des Phasenverhältnisses (V_G/V_L) durch die Papierzugabe zurückzuführen und daher als nicht real zu bewerten. Im Gegensatz zu den Hauptversuchen war auch keine Sorption des Wasserstoffs durch das Papier festzustellen. Wie beschrieben, liefert die angewendete Headspaceanordnung mit Papierzusatz wegen der äußerst geringen Öllöslichkeit von Wasserstoff kein brauchbares Untersuchungsergebnis. Ein nachträglich durchgeführter, orientierender Versuch mit einem Öl-Papier-Probenansatz ohne zusätzliches Gasvolumen ergab dann auch tatsächlich vergleichbare Sorptionswerte wie für Ethin und bestätigte somit auch die Ergebnisse der Hauptversuche.

Kohlenmonoxid CO (Abbildung 6)

Verglichen mit der Referenzprobe zeigte die Serie A nach Kurzzeitlagerung bei 25 °C zunächst eine schwache, nach der 50-tägigen Langzeitlagerung bei 50°C jedoch eine deutliche Zunahme an Kohlenmonoxid, proportional zur eingesetzten Papiermenge. Der zusätzliche Eintrag von Kohlenmonoxid in das Isolieröl durch das eingesetzte Isolierpapier war hier deutlich zu erkennen, der Einfluss der Papierfeuchtigkeit war hingegen sehr gering.

Bei Serie B konnte bereits nach der Kurzzeitlagerung bei 50 °C ein deutlicher Anstieg der CO-Konzentration im Öl festgestellt werden, die bei der anschließenden Langzeitlagerung bei 25 °C (Abkühlung) geringfügig abnimmt. Das beobachtete Verhalten dieses Spaltgases könnte darauf zurückzuführen sein, dass im Papier - ggf. durch den Trocknungsprozess - bereits Kohlenmonoxid sorbiert war, das dann während der Lagerungsdauer ins Öl diffundierte. Da die Löslichkeit von Kohlenmonoxid in Öl ebenfalls niedrig ist (siehe Abschnitt 8.7), sind die Sorptionseigenschaften von Papier für dieses Gas aus den Voruntersuchungen nicht ableitbar. Auch diese Vermutung wurde durch den zuvor erwähnten, nachträglichen Kurzversuch bestätigt, bei dem, zumindest bei Raumtemperatur, ebenso eine ausgeprägte Sorption von CO festzustellen war.

Kohlendioxid CO₂ (Abbildung 7)

Kohlendioxid wurde in deutlichem Ausmaß durch das eingesetzte Papier sorbiert, wobei sich die Sorptionsrate fast proportional mit steigendem Papieranteil erhöhte. Mit zunehmender Papierfeuchtigkeit reduziert sich die Sorptionsrate von Kohlendioxid. Ursache könnte sein, dass potenzielle Adsorptionsstellen an der inneren Oberfläche des Papiers dann bereits durch Wassermoleküle besetzt sind.

Aus dem Vergleich der Kurzzeitlagerung bei 25 °C (Serie A) und 50 °C (Serie B) wird außerdem ersichtlich, dass die Sorptionsrate (erwartungsgemäß) mit steigender Temperatur vermindert wird. Bei der Langzeitlagerung bei 50 °C über 50 Tage (Serie A) war bei der Probe mit 11,6 % Papieranteil und 1,0 % Papierfeuchte sogar eine geringfügige Zunahme der Kohlendioxidkonzentration im Öl im Vergleich zur Referenzprobe feststellbar. Temperaturabhängige Sorptions- bzw. Desorptionsvorgänge von Kohlendioxid sind aus der Fachliteratur [4] bekannt. Über den durch die Vorversuche aufgezeigten Einfluss der Papierfeuchte ergab die Literatursuche jedoch keine entsprechenden Hinweise.

Methan CH₄ (Abbildung 8)

Die Erhöhungen der Methankonzentrationen während der Kurzzeitlagerungen liegen bei beiden Versuchsserien im Bereich der eingangs erläuterten Messtoleranzen durch die Vo-

lumsänderung. Die ermittelten Methankonzentrationen zeigten keine bewertbare Abhängigkeit vom Papieranteil bzw. von der Papierfeuchtigkeit. Einen geringfügigen, direkten Einfluss konnte man durch die Lagerungstemperatur erkennen, wobei aber auch dieser auf versuchsbedingte Messunsicherheiten zurückzuführen sein könnte.

Ethin C₂H₂ (Abbildung 9)

Die massive Sorptionsrate des Ethins von bis zu 60% durch das Isolierpapier war wohl die größte Überraschung dieser Vorversuche, da ein derartiges Verhalten aus der Literatur unbekannt war. Die Verteilungsmuster, abhängig vom Papieranteil und der Papierfeuchtigkeit, ähneln jenem von Kohlendioxid. Steigender Papieranteil führte zu steigender Sorptionsrate wobei sich diese mit steigender Papierfeuchtigkeit hingegen deutlich reduzierte. Im Unterschied zum Kohlendioxid wurde die Sorption von Ethin nach der Temperatursteigerung auf 50 °C nicht bzw. nur in sehr geringem Maße reduziert. Möglicherweise ist das auf unterschiedliche Sorptionsisothermen dieser Gase zurückzuführen oder aber auf die bereits aufgezeigten immanenten Messfehler dieser Versuchsanordnung.

Ethen C₂H₄ (Abbildung 10)

Eine geringe Sorptionsrate von Ethen, die mit steigendem Papieranteil etwas zunahm, konnte bei der 8-tägigen Lagerung bei 25 °C beobachtet werden. Bei Temperaturen von 50 °C waren hingegen leichte Zunahmen der Gaskonzentrationen in Relation zur Referenzprobe festzustellen. Diese sind jedoch nicht auf eine tatsächliche Gasproduktion zurückzuführen, sondern auf die in der Berechnungsformel nicht korrigierten Zunahmen der Volumina durch das Papier und teilweise auch auf Desorptionsprozesse. Ein Einfluss durch die Papierfeuchtigkeit war nicht erkennbar. Die auf die Referenzproben bezogenen Veränderungen der Ethenkonzentration lagen unter +/- 10 Prozent, so dass diese Messergebnisse wegen der eingangs erwähnten, nicht berücksichtigbaren Einflussfaktoren nur mit Vorbehalt als valide einzustufen sind.

Ethan C₂H₆ (Abbildung 11)

Das Verhalten von Ethan ist vergleichbar mit jenem von Ethen so dass die gleichen Schlussfolgerungen zu ziehen sind.

Das Resümee der Vorversuche war, dass CO₂ und C₂H₂ im besonderen Maß und C₂H₄ und C₂H₆ in geringerem Umfang von Papier sorbiert werden. Eine maßgebliche Sorption von H₂ wurde zufolge der Ergebnisse der Vorversuche (Abbildung 5) zunächst irrtümlich ausgeschlossen, da die am Anfang dieses Abschnitts erläuterten Einflüsse auf die Messergebnisse noch nicht ausreichend beachtet wurden. Überdies wird bis dato auch in den Fachnormen nicht darauf hingewiesen, dass z.B. bei stickstoffgepolsterten Geräten, je nach Größe des Phasenverhältnisses Gas zu Öl, eine H₂-Analyse des Öls entsprechend niedrigere Konzentrationswerte liefern würde als bei Geräten ohne Gaspolster.

Durch höhere Feuchtegehalte wird das Gas-Sorptionsvermögen von Papier vermindert, wie das zumindest für CO₂ und C₂H₂ eindeutig festzustellen war. Das Sorptionsvermögen wird auch bei höherer Temperatur vermindert, quantitative Angaben sind aber wegen der Einflüsse durch die angewendete Versuchsanordnung bei den Vorversuchen nicht möglich. Bei Gasgemischen wären konkurrierende Sorptionsprozesse ebenso denkbar wie die Verdrängung von anderen Gasmolekülen, welche bereits vom Papier sorbiert wurden. Um erweiterte Kenntnisse darüber zu erlangen wären weiterführende Untersuchungen erforderlich und aus Sicht der Autoren bestimmt auch lohnend.

3. Hauptversuch

3.1. Versuchsbeschreibung

Die Erkenntnisse der Vorversuche, welche im Labormaßstab erfolgten, wurden im Hauptversuch an Versuchsobjekten (Probanden⁹) in der Bauweise von realen Messwandlern überprüft und erweitert. Eine wesentliche Erkenntnis war dabei, dass Isolierpapier nicht nur Wasser- und Kohlendioxidmoleküle, sondern auch Moleküle anderer Gase sorbiert. Diesem erkannten sowie dem potenziellen Einflussfaktor „Art des Isolators“ auf den Gashaushalt im freien Öl wurde durch unterschiedliche Ausführung der Probanden Rechnung getragen. Daher wurden die Probanden jeweils mit Porzellan- bzw. Verbundisolatoren¹⁰ sowie mit und ohne Aktivteil ausgeführt. Zwei zusätzliche Probanden wurden ohne Fußstöpsel gefertigt und mittels Blindflanschen abgeschlossen, um auch allfällige Einflüsse dieses Aluguss-Konstruktionsteils zu erfassen. Insgesamt wurden sechs Probanden in unterschiedlichen Ausführungen nach unseren Vorgaben durch einen namhaften schweizerischen Messwandler-Hersteller gefertigt. (Ausführungsvarianten siehe Tabelle 9).

Um die Gaskonzentrationen im Isolieröl auf einen praxisnahen Messbereich anzuheben, wurden die sechs Probanden mit einem an Spaltgasen angereichertem Isolieröl versetzt. Diese Art der Spaltgaszugabe simuliert einen internen Fehler, der nahe oder direkt im Isolieröl-Bereich liegt, d.h. jedenfalls außerhalb der Papierisolierung.

Durch gezielte Veränderung der Umgebungsbedingungen während der Aufstellung (im Freien und im Ofen bei unterschiedlichen Temperaturen) wurde versucht, mögliche Einflüsse auf die Spaltgaskonzentrationen und den Wassergehalt im Isolieröl festzustellen.

3.2. Beschreibung der Probanden

3.2.1. Ausführungsvarianten

Die Tabelle 9 gibt eine Übersicht über die wesentlichen baulichen Unterschiede der 6 Probanden. Als Hohlisolatoren kamen Porzellan- und Verbundisolatoren zum Einsatz.

Tabelle 9: Gehäuse-Ausführung der 6 Probanden

Probandenbezeichnung	Fabrikationsnummer	Isolator	Aktivteil	Topf (Fußteil)
1	2015.6284. 01/1	Porzellan	✓	✓
2	2015.6284. 02/1	Verbund	✓	✓
3	2015.6284. 03/1	Porzellan	✗	✓
4	2015.6284. 04/1	Verbund	✗	✓
5	2015.6284. 05/1	Porzellan	✗	✗ ¹¹
6	2015.6284. 06/1	Verbund	✗	✗ ¹¹

⁹ Im Bericht wird der Terminus „Proband“ verwendet

¹⁰ Ein Verbundisolator besteht aus dem Isolierrohr mit Glasfasern als Verstärkungsmaterial und Epoxidharz als Matrix (GFK), mit Beschirmung aus Silikonkautschuk (SiR: Silicon Rubber) und den beiden Flanschen.

¹¹ Blindflansch

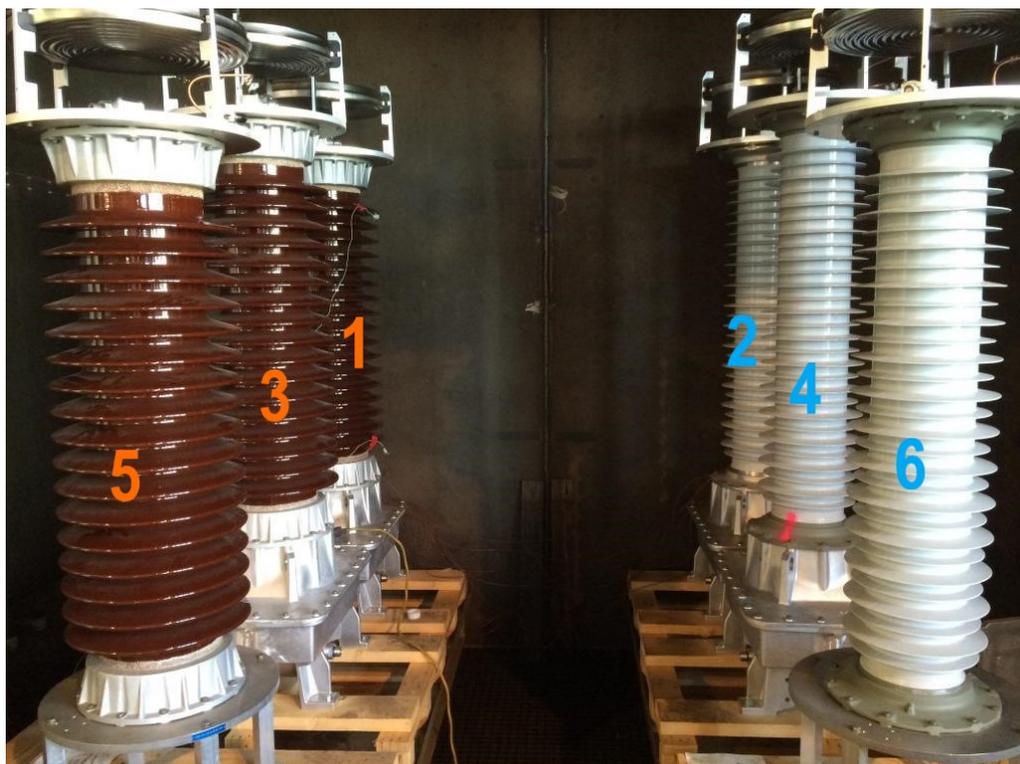


Abbildung 12: Probanden mit Porzellan- und Hohlkomposit-Isolatoren (Verbund-Isolatoren)

3.2.2. Massen, Oberflächen und Volumen der Probanden

In der Tabelle 10 sind die in den Probanden eingesetzten Massen an Kupfer, Isolierpapier und Mineralöl zusammengefasst. Als Mineralöl wurde ein hochoxidationsbeständiges und vollinhibiertes Mineralöl der Sorte Nynas Nytro 4000X (Dichte von 0,865 g/cm³) verwendet. Die im Dehnelement verfüllte Ölmasse von 11,9 kg (Herstellerangabe) ist in der Gesamtölmasse bereits enthalten.

Tabelle 10: Massen, Oberflächen, Volumen im Probanden-Innern

Probandenbezeichnung	Primärwicklung Kupfer [kg]	Primärwicklung Papier [kg]	Öl Gesamt [kg]	Isolator Volumen [dm ³]	Isolator Innenoberfläche [dm ²]
1	13,52	11,5	91,9	53,02	93,42
2	13,52	11,5	81,9	40,52	81,86
3	x	x	113,9	53,02	93,42
4	x	x	103,9	40,52	81,86
5	x	x	55,9	53,02	93,42
6	x	x	45,9	40,52	81,86

Aus den eingesetzten Massen an Isolieröl und Papier (Aktivteile in Proband 1 und 2) ergeben sich gemäß Tabelle 11 nachstehende Massenverhältnisse.

Tabelle 11: Massen und Massenverhältnisse von Öl und Papier

Probanden- bezeichnung	Eingesetzte Massen [kg]			Massenverhältnisse [m/m]		
	Öl Wandler	Öl Dehn- element	Papier	$\frac{\text{Öl}_{\text{Wandler}}}{\text{Öl}_{\text{Dehnelement}}}$	$\frac{\text{Öl}_{\text{Wandler}}}{\text{Papier}}$	$\frac{\text{Öl}_{\text{Gesamt}}}{\text{Papier}}$
1	80	11,9	11,5	6,7	7,0	8,0
2	70	11,9	11,5	5,9	6,1	7,1
3	102	11,9	x	8,6	x	x
4	92	11,9	x	7,7	x	x
5	44	11,9	x	3,7	x	x
6	34	11,9	x	2,9	x	x

3.2.3. Beprobungspositionen für gelöste Gase und Ölfeuchtigkeit

Zur Untersuchung der im Öl gelösten Gase und des Wassergehalts (H₂O) wurden zur Öl-Probenahme je Probanden drei Entnahmemöglichkeiten vorgesehen (siehe Abbildung 13 bis Abbildung 17). Zwei Entnahmestellen, in der Ausführung einer Septum-Entnahme, befinden sich unten am Fußteil (Proband 1 bis 4) oder am unteren Blindflansch (Proband 5 und 6) sowie oben im Flansch direkt über dem Isolator. Als dritte Entnahmestelle zur Beprobung der Dehnelement wurde ein Dreiwegehahn in die Verbindungsleitung zum Dehnelement eingebaut (Abbildung 14).

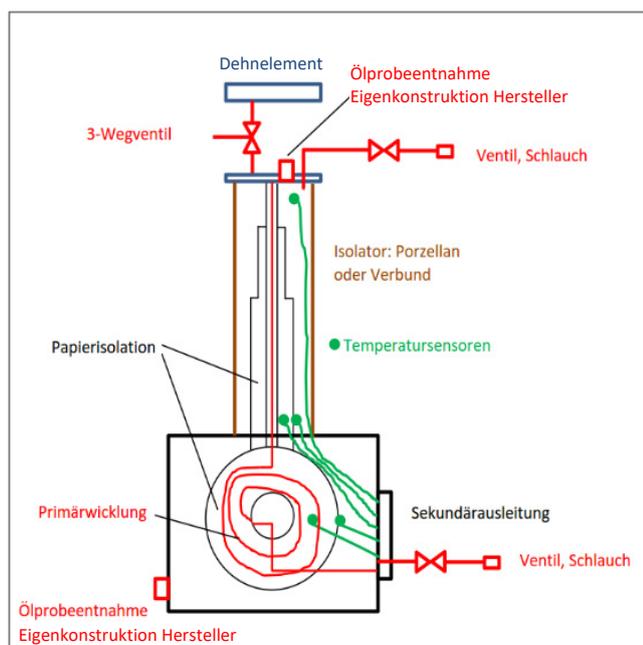


Abbildung 13: Skizze von Proband 1, 2 mit Aktivteil eines realen Wandlers



Abbildung 14: Proband 3: Dehnelement mit Dreiwegventil in der Verbindungsleitung zum Wandlerteil

Abbildung 14 zeigt eine Detailansicht des Probanden 3 mit dem oberen Blindflansch, dem Dehnelement sowie der Verbindungsleitung mit dem Dreiwegventil. Hinter dem Dreiwegventil ist die mit Septum und Rückschlagkugel ausgeführte Ölproben-Entnahmevorrichtung „Oben“ (Ansicht: seitlich hinten) erkennbar. Die Vorderansicht dieser Vorrichtung in Abbildung 15 zeigt die Einstichöffnung für die Hohlneedle von Entnahmespritzen.

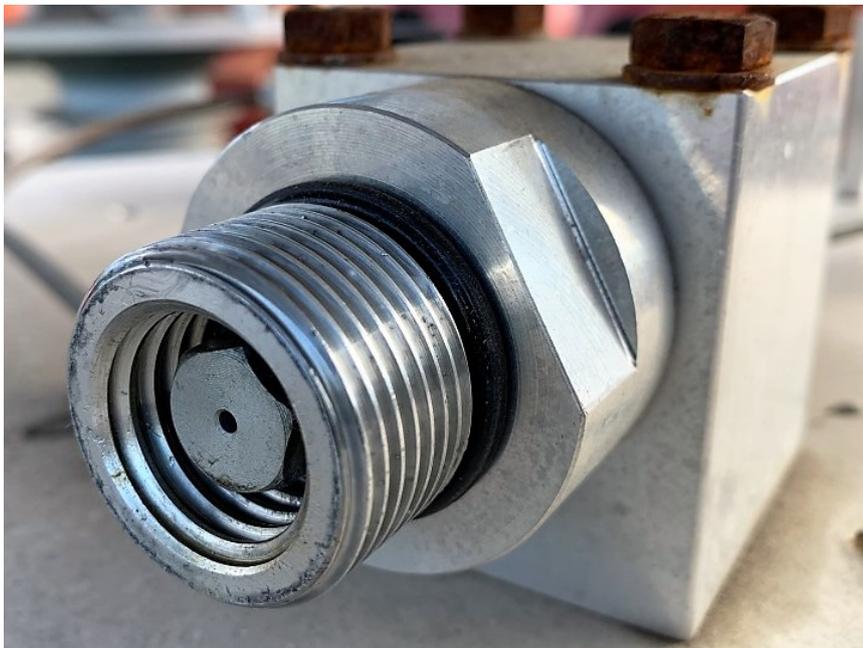


Abbildung 15: Proband 3: Öl-Probenabnahme „Oben“, Überwurfmutter abgeschraubt

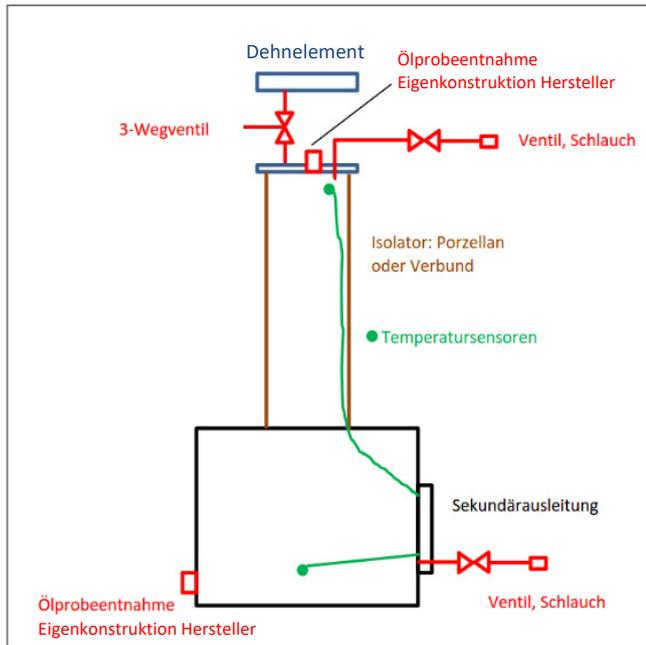


Abbildung 16: Skizze der ohne Aktivteil ausgeführten Probanden 3, 4

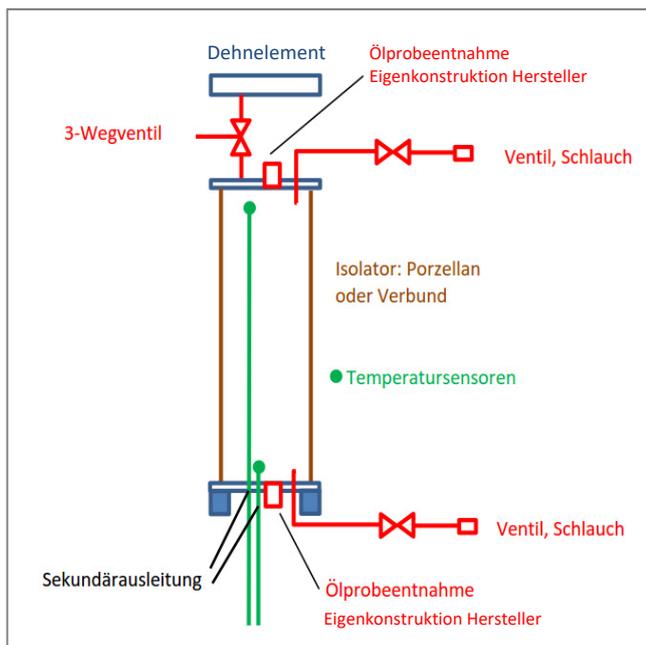


Abbildung 17: Skizze der ohne Aktivteil/Fußteil ausgeführten Probanden 5, 6

In der Folge wird für den Isolator ohne Dehnelement, jedoch mit Fußteil bzw. Blindflansch nur mehr der Terminus „Wandler“ verwendet, um beispielsweise zwischen der Ölfüllung des Wandlers (ohne Dehnelement) bzw. jener des Dehnelements sprachlich vereinfacht unterscheiden zu können.

3.3. Eingangsuntersuchungen der Öfüllungen der Probanden

Um die Veränderung der Spaltgaskonzentrationen im Isolieröl nach der Dosierung der Probanden in einer Zeitreihe verfolgen zu können, war zu Beginn eine Erhebung ihrer Ausgangszustände mit Hilfe der DGA erforderlich.

Alle Proben wurden den 6 Probanden an den dafür vorgesehenen Entnahmeverrichtungen bei Raumtemperatur mittels Spritze in doppelter Ausführung ohne Luftzutritt entnommen und der DGA zugeführt (Headspace-Technik). Die Abfüllung dieser Ölproben erfolgte direkt am Aufstellungsort der Probanden in frisch mit Argon vorgespülte Headspacefläschchen. Die dargestellten Ergebnisse in Tabelle 12 sind Mittelwerte aus 2 Messtagen (10. und 24.11.2016) zu je 2 Proben der Probenahmestelle „Unten“. „0-Werte“ in der Tabelle 12 sind gleichbedeutend mit der Unterschreitung der jeweiligen Bestimmungsgrenze.

Die Messung des Wassergehaltes wurde direkt am Aufstellungsort mittels der Methode nach „Karl Fischer“¹² ausgeführt und als Mittelwert aus 2 Messtagen zu je 3 Einzelmessungen angeführt.

Tabelle 12: Ausgangswerte der Probanden (DGA, H₂O)

Proband	1	2	3	4	5	6
Wasserstoff H ₂ [µl/l]	3,1	21,6	1,4	0,8	3,5	3,1
Methan CH ₄ [µl/l]	0,9	4,1	1,0	1,2	1,0	1,0
Ethin C ₂ H ₂ [µl/l]	0	3,8	0	0	0	0
Ethen C ₂ H ₄ [µl/l]	0	1,6	0	0	0	0
Ethan C ₂ H ₆ [µl/l]	0	0	0	0	0	0
Kohlenmonoxid CO [µl/l]	7,9	16,5	1,7	3,6	3,9	5,4
Kohlendioxid CO ₂ [µl/l]	25,3	36,8	23,0	37,5	55,5	56,3
Sauerstoff O ₂ [µl/l]	2780	3310	2150	2760	8200	4140
Stickstoff N ₂ [µl/l]	6630	8250	4900	6780	26860	9160
Wasser H ₂ O [mg/kg]	2,2	3,0	4,1	3,7	4,0	6,4

Die leicht erhöhten Wasserstoff-, Ethin-, Ethen-, und Kohlenmonoxid-Konzentrationen des Probanden 2 bestanden bereits im Anlieferungszustand. Die Ursachen dafür dürften beim Hersteller der Probanden liegen, konnten aber mit diesem nicht aufgeklärt werden. Durch die anschließende Anreicherung des Isolieröls auf erheblich höhere Konzentrationen sind die leicht erhöhten Anfangswerte jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Proband 5 zeigte bereits im Anlieferungszustand deutlich höhere O₂- und N₂-Konzentrationen als die restlichen Probanden. Eine unzureichende Ölentgasung bzw. Evakuierung des Probanden vor Öl-Befüllung im Herstellerwerk könnten mögliche Ursachen sein.

¹² Die Messung wird nach EN 60814 durchgeführt und ist laut dieser geeignet für H₂O-Konzentrationen über 2 mg/kg. Aufgrund der niedrigen Messbereiche bei unseren Probanden wurde die Einwaage entsprechend erhöht, um gesicherte Werte zu erhalten.

3.4. Präparierung der Probanden mit Spaltgasen

3.4.1. Herstellung der Dosierlösung

Um die Spaltgaskonzentrationen in den Probanden auf ein messtechnisch geeignetes Niveau zu bringen, mussten diese Gase zunächst in Form einer Prüfgasmischung in einer kleineren Isolierölmenge gelöst werden, um diese anschließend in die Probanden einzubringen und mit ihren Ölfüllungen zu vermischen. Dazu wurden für jeden Probanden rund 5 Liter eines neuen, ungebrauchten Isolieröles (Nynas Nytro 4000X) zuerst über eine Glasfritte¹³ mittels Vakuums entgast und schließlich mit der Prüfgasmischung durchspült. Durch die feine Verteilung der eingeleiteten Gasbläschen mittels Teflon-Fritte und unter zusätzlichem Rühren konnte nach etwa 30 Minuten eine ausreichende Sättigung mit Spaltgasen erreicht werden. Die nahezu vollen 5 Liter-Flaschen wurde nach Entfernen der Teflon-Fritte sofort dicht verschlossen.

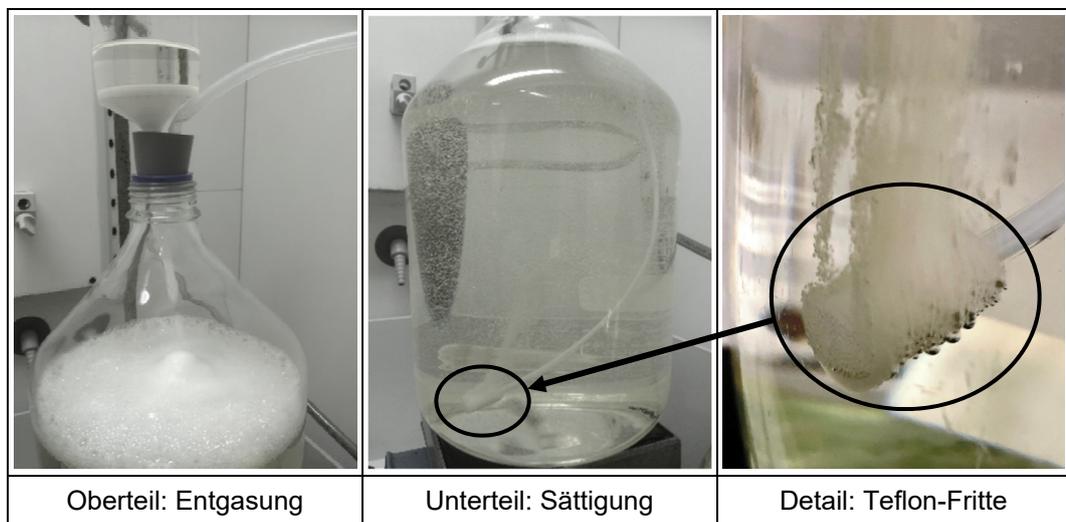


Abbildung 18: Isolieröl-Entgasung (Glasfritte/Vakuum) und anschließende Sättigung mit Spaltgasen

3.4.2. Konzentration Prüfgas – Konzentration im Dosieröl

Um die erwünschten Konzentrationen der einzelnen Spaltgase in der Dosierlösung zu erreichen, wurde die erforderliche Zusammensetzung der Prüfgasmischung mit Hilfe der Formel 1 berechnet. Aus den gewünschten Spaltgas-Konzentrationen im Probanden und dem geplanten Dosiervolumen ergibt sich mit Hilfe der Ostwald-Löslichkeits-Koeffizienten (k bei 25 °C) für Isolieröle auf Mineralölbasis und mit Hilfe der nachstehenden Formel gemäß EN 60599 [2] eine Prüfgasmischung mit den Konzentrationen laut Tabelle 13.

Formel 1: Berechnung der Spaltgaskonzentrationen für Prüfgasmischung nach EN 60599

$$k = \frac{\text{Gaskonzentration in der flüssigen Phase}}{\text{Gaskonzentration in der Gasphase}}$$

¹³ Fritten sind Filterplatten bzw. -kerzen, welche z.B. durch Zusammenbacken von Glaspulver/-perlen unterhalb des Schmelzpunktes (Sintern) und möglicherweise Abschreckung in Wasser hergestellt werden können.

Tabelle 13: Nach Formel 1 berechnete Spaltgaskonzentrationen für das Prüfgas

Spaltgas	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
k Ostwald-Löslichkeits-Koeffizient bei 25 °C gemäß EN 60599	0,056	0,132	1,09	0,429	1,24	1,84	2,82
Konzentration im Mineralöl der Dosierlösung berechnet [µl/l]	39574	26426	76409	5135	6312	6366	7039
Prüfgaskonzentration [µl/l]	706684	200200	70100	11970	5090	3460	2496

3.4.3. Konzentrationen der Dosierlösung und Dosiervolumen

Die Überprüfung der frisch hergestellten Dosierlösungen mittels DGA ergab nachstehende Konzentrationen an Spaltgasen (Angaben in µl/l). Jede genannte Konzentration ist ein Mittelwert aus 6 DGA-Ergebnissen.

Tabelle 14: Konzentrationen der angereicherten Dosierlösungen

Konzentrationen der Dosierlösungen [µl/l]								
Proband	Herstellung	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
1, 2	21.12.2016	35421	23948	56793	4523	4457	3951	4090
3, 4	19.12.2016	34806	25907	71086	5467	5652	5043	5041
5, 6	02.12.2016	30070	21865	57466	4475	4720	4310	4676
Mittelwert		33430	23910	61780	4820	4940	4430	4600

Für eine messtechnisch praktikable Gaskonzentration in den Probanden wurde eine Dosierung mit rund 3 Volumsprozent, bezogen auf die Gesamtölmenge der Probanden, rechnerisch ermittelt (1,5 l – 3,5 l, je nach Probanden). Die Dosierungen mit insgesamt rund 3 Volumsprozent erfolgten separat in die jeweiligen Wandler als auch sein Dehnelement. Damit sollte verhindert werden, dass die Gaskonzentrationen im Öl des Wandlers später durch Vermischung mit spaltgasfreiem Öl aus dem Dehnelement reduziert wird und damit andere Effekte vorgetäuscht werden.

Tabelle 15: Konzentration im Öl der Probanden, berechnet für 3% Volumsdosierung

Rechnerisch zu erwartende Konzentrationen [µl/l] in den Probanden								
Proband	Dosierdatum	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
1	21.12.2016	1070	723	1715	137	135	119	124
2	21.12.2016	1070	723	1715	137	135	119	124
3	19.12.2016	1044	777	2133	164	170	151	151
4	19.12.2016	1048	780	2140	165	170	152	152
5	02.12.2016	890	647	1701	132	140	128	138
6	02.12.2016	857	623	1638	128	135	123	133
Mittelwert		996	713	1841	144	147	132	137

3.4.4. Vorgangsweise bei der Dosierung

Die im Labor frisch vorbereiteten Dosierlösungen wurden vor Ort nochmals mit der hochkonzentrierten Prüfgasmischung durchspült. Um noch freie Gasbläschen durch die Übersättigung frei aufsteigen zu lassen, die eingestellte Gassättigung stabil zu halten und den Luftzutritt zum Dosieröl zu unterbinden, wurde die Teflon-Fritte aus dem Öl in den darüber liegenden Gasraum gezogen und in diesem bis zur Beendigung der Dosierung ein geringer Fluss an Prüfgas aufrechterhalten.

Mit einer einfachen Apparatur wurde das Dosieröl in den individuell berechneten Mengen den Dehnelementen (über 3-Wege-Hahn) und den Probanden (über Ventil „Oben“) zugeführt. Die Dreiwegehähne dieser Apparatur ermöglichten zuvor die Freispülung der Totvolumina, um nicht Umgebungsluft in die Probanden zu spülen. Bei der Dosierung in das Dehnelement über den Dreiwegehahn wurde mit diesem gleichzeitig die Verbindungsleitung zum Messwandler abgesperrt, um das Dosieröl ausschließlich in das Dehnelement einzubringen. Die Kontrolle der dosierten Volumina erfolgte sowohl über das Volumen der Dosierspritze als auch gravimetrisch aus der gleichzeitig (über Ventil unten bzw. Dreiwegehahn bei Dehnelement) abgeführten reinen Ölmenge. Zur Gegenkontrolle von zugeführter und gleichzeitig abgeführter Ölmenge wurde die typische Dichte von $0,865 \text{ g/cm}^3$ (Nynas Nytro 4000X) herangezogen.

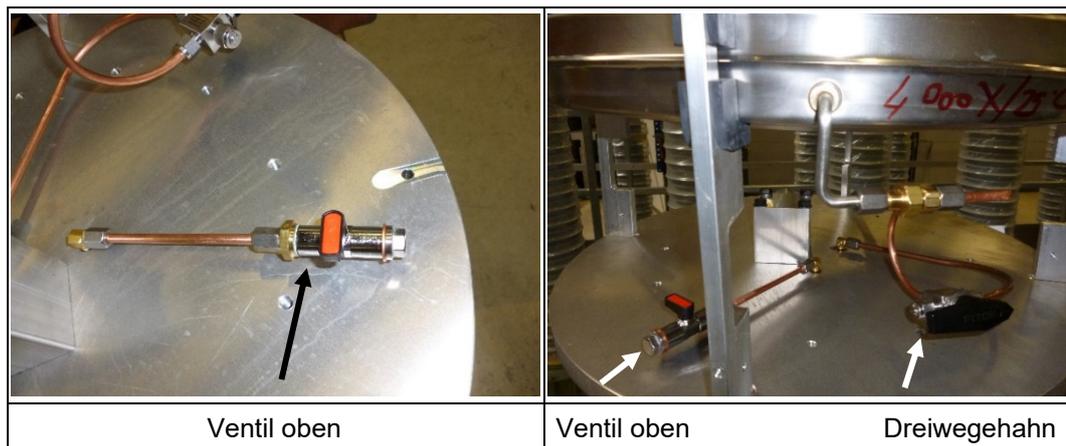


Abbildung 19: Dosierpositionen für Wandler und Dehnelement

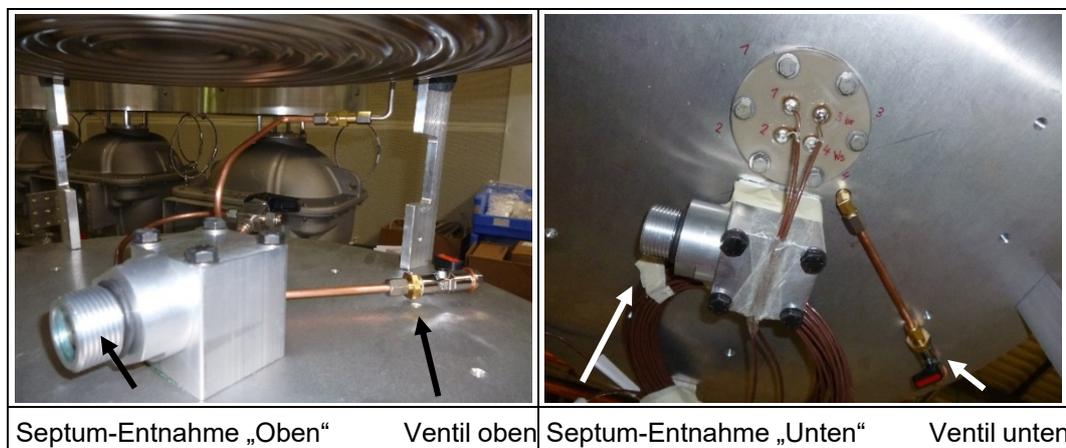


Abbildung 20: Septum-Entnahme „Oben“ und „Unten“ (für DGA)

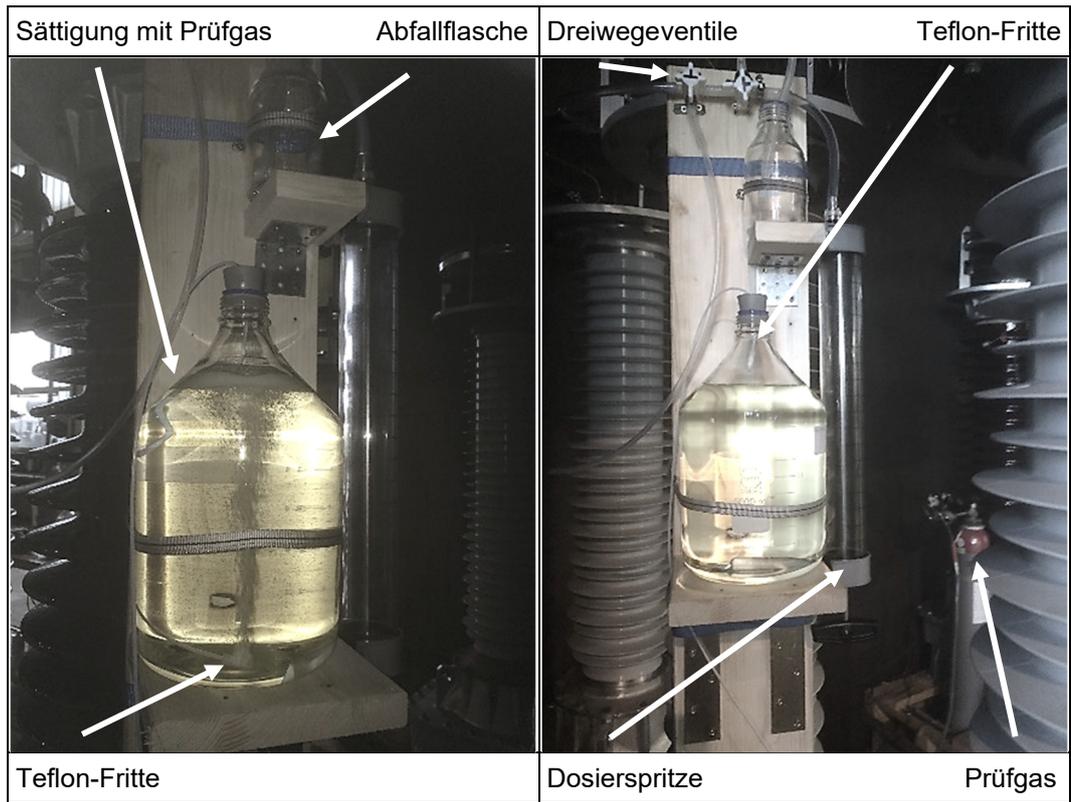


Abbildung 21: Dosierapparatur während Sättigung (links) und kurz vor Dosierung (rechts)

3.4.5. Anfangskonzentrationen der im Öl gelösten Gase nach Dosierung

Tabelle 16: Tatsächliche Anfangskonzentration im Öl der Probanden, 3-5 Wochen nach Dosierung

Erreichte Anfangskonzentrationen absolut [µl/l]								
Proband	Dosierdatum	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
1	21.12.2016	1349	772	1163	123	86	86	83
2	21.12.2016	1354	882	1966	177	152	177	190
3	19.12.2016	1091	663	1858	133	141	127	128
4	19.12.2016	1090	674	1873	135	140	125	123
5	02.12.2016	949	629	1632	123	125	118	126
6	02.12.2016	837	586	1683	118	127	125	139
Mittelwert		1112	701	1696	135	129	126	131

Tabelle 17: Quotienten: Absolute / errechnete Konzentrationen im Öl der Probanden, 3-5 Wochen nach Dosierung

Erreichte Anfangskonzentrationen relativ zu Bezugswerten in Tabelle 15 [%]								
Proband	Dosierdatum	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
1	21.12.2016	126	107	68	90	63	73	67
2	21.12.2016	127	122	115	129	113	149	153
3	19.12.2016	105	85	87	81	83	84	85
4	19.12.2016	104	86	88	82	82	82	81
5	02.12.2016	107	97	96	93	90	92	91
6	02.12.2016	98	94	103	92	94	102	105
Mittelwert		111	99	93	95	88	97	97

Die in Tabelle 16 dargestellten Gaskonzentrationen im Öl der Probanden sind Mittelwerte aus 2 Beprobungstagen (09. und 25.01.2017) zu je 2 Proben von jeder der 2 Entnahmestellen „Oben“ und „Unten“. Die erreichten Gas-in-Öl-Konzentrationen lagen größtenteils sehr gut im erwarteten Bereich. Über alle Gase und Probanden konnten im Durchschnitt 97% der vorausgerechneten Gaskonzentrationen im Öl erreicht werden (Tabelle 17).

Die erreichten Gaskonzentrationen im Öl von Proband 1 lagen deutlich niedriger als bei Proband 2. Dieser Umstand ist damit zu begründen, dass die im Labor hergestellte Dosierlösung durch den Transport (Vibrationen) Verluste erfahren hatte und die Nachsättigung vor Dosierung bei Proband 1 noch unzureichend war. Auf die Versuchsergebnisse hat das jedoch keinen nennenswerten Einfluss, da die Änderungen der Gaskonzentrationen auf ihre Anfangswerte bezogen werden.

3.5. Projektablauf

3.5.1. Übersicht über die Projektphasen und Aufstellungsbedingungen

Tabelle 18 und Abbildung 22 sollen nochmals eine Übersicht über die geplanten und außerplanmäßigen Projektphasen sowie über die Umgebungstemperaturen während der Aufstellung der Probanden geben.

Tabelle 18: Tatsächlicher Projektablauf (Kurzfassung von Tabelle 5)

Projektphase	Arbeitsschritte (Kurzfassung von Tabelle 5)
Phase 1 und 2	Eingangsuntersuchungen bei Raumtemperatur (DGA, H ₂ O); Dosierung mit gasangereichertem Isolieröl; Beobachtung der Gas-Verteilung
Phase A <i>außer Plan</i>	Leckagen - Ölverlust, Abdichtungsmaßnahmen; entgastes Isolieröl nachgefüllt; Wechsel-Temperierung (40 °C/RT) – Homogenisierung
Phase 3	Aufstellung aller Probanden bei 30 °C im Trockenofen
Phase 4	Aufstellung aller Probanden bei 40 °C im Trockenofen
Phase 5	Freiluftaufstellung aller Probanden (Sommer bis Herbst); Leckage Proband 5 behoben (Verbindungsleitung zu Dehnelement)
Phase 6	Langzeitaufstellung aller Probanden bei 40 °C und mehrwöchiger Luftbefeuchtung im Trockenofen
Phase 7	Freiluftaufstellung aller Probanden (Winter)
Phase B <i>außer Plan</i>	Freiluftaufstellung aller Probanden (Frühjahr/Sommer); Beobachtung eventueller Rückverteilung der Gase
Phase C <i>außer Plan</i>	Freiluftaufstellung der Probanden 2, 4, 5 u. 6 (Herbst/Winter/Frühjahr); Aufstellung der Probanden 1 und 3 in der Werkstatt bei Raumtemperatur; Beobachtung eventueller Rückverteilung der Gase

Die ungeplante Projektphase „A“ war erforderlich, um Ölleckagen vor Beginn der Temperierungen zu beheben. An den Probanden 1 und 6 mussten diverse Verschraubungen nachgedichtet und teilweise mit 2-Komponenten-Klebern versiegelt werden. Proband 1 wurde am Ölablass „Unten“ mit 3 Liter entgastem Isolieröl ergänzt, da das Dehnelement durch den vorangegangenen Ölverlust deutlich weniger vorgespannt war.

Alle diese Korrektur-Maßnahmen und deren Erfolgskontrolle nahmen etwa 2 Wochen an zusätzlicher Zeit in Anspruch. Die darauffolgende Wechseltemperierung im Trockenofen mit mehrmaligem Temperaturwechsel zwischen Raumtemperatur und 40 °C (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23) sollte durch die so herbeigeführte Konvektionsströmung im Wandler und durch die Ölströmung zwischen Wandler und Dehnelement (Dilatationsströmung) zu einer schnelleren Homogenisierung der Gaskonzentrationen zwischen Isolieröl und Dosieröl in den Probanden führen.

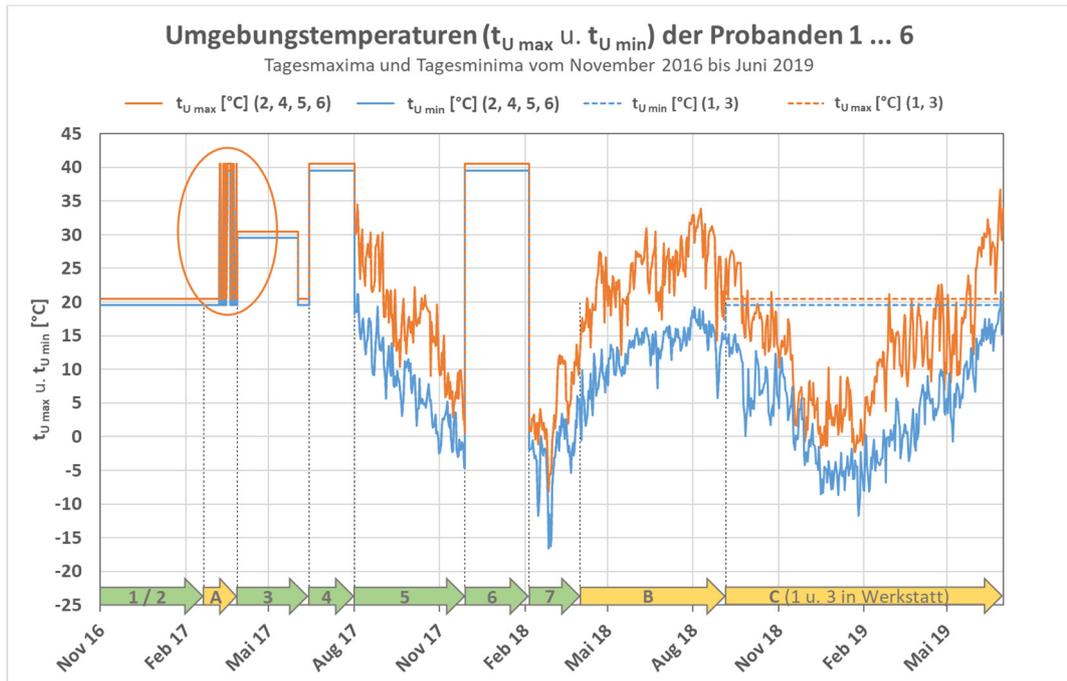


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Projektphasen; Umgebungstemperatur der Probanden

3.5.2. Außerplanmäßige Projektphase A, Maßnahmen zur Homogenisierung der Ölmischung

Wie unter 3.5.1 bereits beschrieben, war die ungeplante Phase A (markierter Bereich in Abbildung 22) für Abdichtungsmaßnahmen sowie zur, bis dahin noch nicht erreichten, Homogenisierung der Ölmischung aus reinem und mit Spaltgasen angereichertem Öl im gesamten Ölvolumen (Wandler und Dehnelement) notwendig.

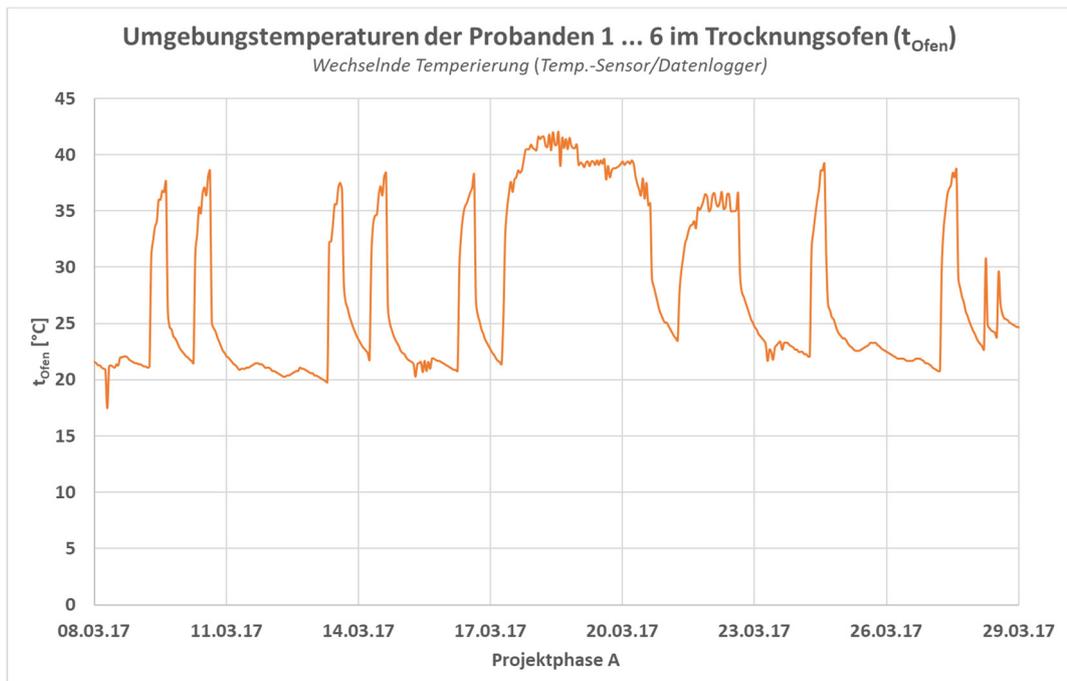


Abbildung 23: Wechselnde Temperierung in Projektphase A zu Beschleunigung der Gasverteilung

Abbildung 23 ist ein gezoomter Ausschnitt des Verlaufs der Ofentemperatur in Projektphase A. Die Temperaturdaten dazu stammen von einem Messfühler, der direkt im Trockenofen positioniert war. Insgesamt wurden 10 Erwärmungs- bzw. Abkühlungsvorgänge mit einer mittleren Temperaturdifferenz von 16 K vorgenommen. Der für die Volumenänderung ($\Delta V/V$) maßgebliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Mineralöl beträgt $6,9 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Nimmt man in erster Näherung für das Öl im Wandler eine analoge Temperaturänderung an, so werden beim Probanden 3 kumuliert rund 95 % des Ölvolumens im Dehnelement¹⁴ mit dem Öl im Wandler vermischt. Beim Probanden 6, d.h. bei jenem mit dem geringsten Ölvolumen im Wandler, wären es theoretisch jedoch nur etwa 30 %.

Tatsächlich werden die Austauschraten aber noch etwas niedriger sein, da das Öl die äußeren Temperaturänderungen infolge der thermischen Zeitkonstanten nicht vollständig nachvollzieht, wie aus dem Abkühlvorgang in Abbildung 24 ersichtlich wird. Durch die im Aktivteil gespeicherte thermische Energie kühlt sich das Öl erheblich langsamer ab als die Umgebungsluft im Ofen. Die Temperatur in der Mitte des Papierwickels reagiert noch stärker verzögert als das Öl und ihre Änderung ist kleiner als in der Umgebungsluft. Durch die nicht unerheblichen Temperaturdifferenzen im Innenraum der Probanden wird in diesen eine Konvektionsströmung (Kreislauf siehe Graphik im Abschnitt 8.3) angeregt, die wesentlich zur Homogenisierung der Gasverteilungen im freien Öl des Wandlers beiträgt.

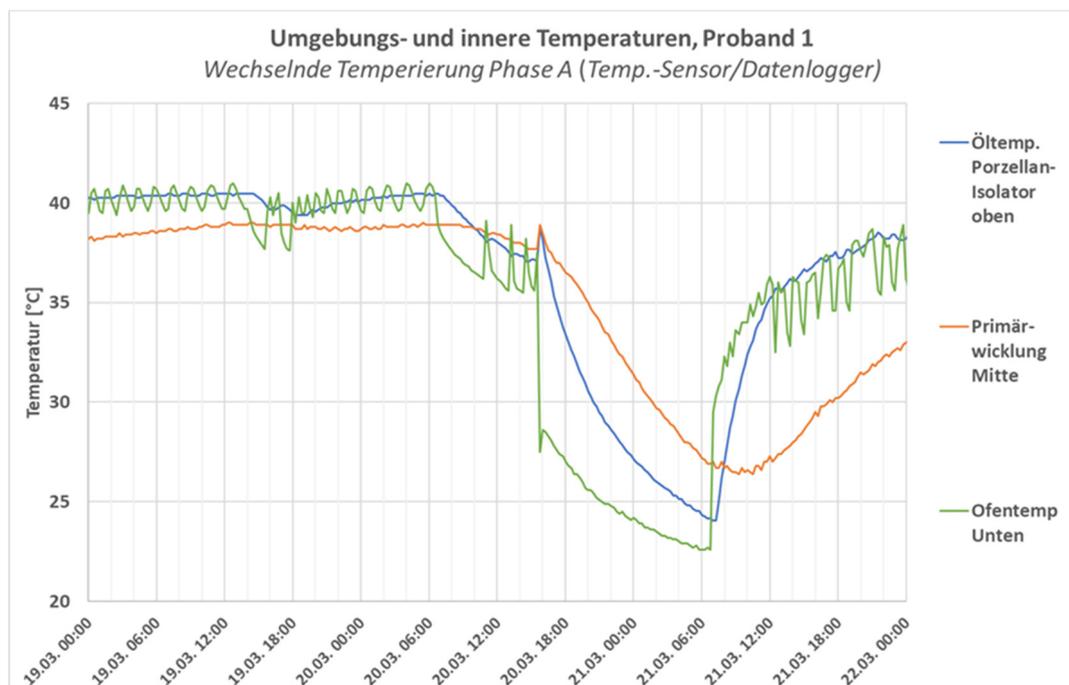


Abbildung 24: Ofen-, Öl- und Wicklungstemperaturverlauf für Proband 1 (Porzellanisolator)

Eine Verlängerung der Homogenisierungsphase war aus organisatorischen Gründen nicht möglich. Offenbar war die relativ geringere Ölaustauschrate zwischen Wandler und Dehnelement auch bei den Probanden ohne Aktivteil nicht nachteilig, wie die gute Angleichung der anfänglich deutlich unterschiedlichen Konzentrationen an den Ölentnahmestellen

¹⁴ Bei anderen konstruktiven Ausführungen sind die Dehnelemente direkt am oberen Isolatorflansch befestigt. Durch ihren großen Innendurchmesser bilden Wandler und Dehnelement dann einen gemeinsamen Ölraum.

„Dehnelement“, „Oben“ und „Unten“¹⁵ am Beispiel der Methankonzentrationen im Probanden 5 in Abbildung 25 veranschaulicht. Alle dargestellten Datenpunkte sind dabei Mittelwerte aus Doppelproben, deren Abweichung voneinander unter 2 % lag. Dabei wurden die Gaskonzentrationen für dieses und alle folgenden Diagramme in normalisierter Form dargestellt. Die Bezugswerte dazu sind der Tabelle 19 zu entnehmen.

Tabelle 19: Bezugswerte für die normalisierte Darstellung der Gaskonzentrationen und Quotienten (Proband 1 - 6)

Bezugswerte [µl/l] für normalisierte Darstellungen (Entnahmestelle „Unten“ 9.1.2017)							
Proband	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
1	1397	803	1224	127	91	91	86
2	1436	947	2145	190	169	194	209
3	1116	665	1865	134	143	128	129
4	1120	682	1894	136	143	127	125
5	944	574	1486	115	119	114	124
6	836	569	1639	115	124	122	136

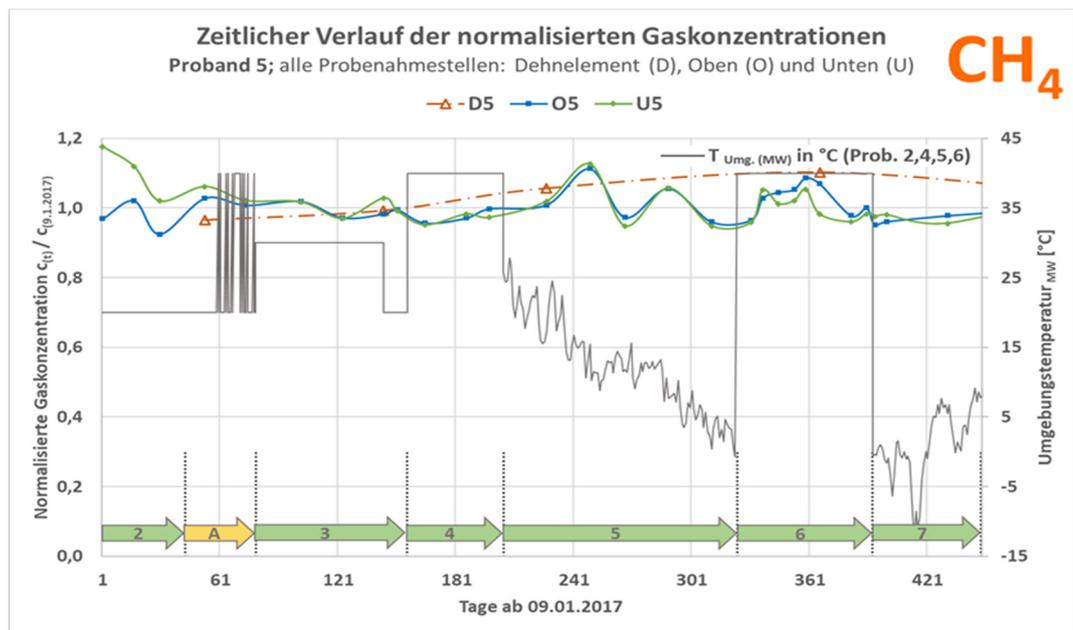


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CH₄-Konzentrationen im Öl von Proband 5 (alle Probenahmestellen)

Ein relativ guter Ausgleich der Konzentrationen durch den Homogenisierungsprozess wurde bei den Probanden mit Aktivteil auch für jene Gase erzielt, die vom Aktivteil nur im geringen Ausmaß sorbiert werden. Wie noch in Abschnitt 3.7 dargelegt wird, sind das die Gase CO, CH₄, C₂H₄ und C₂H₆. Dieser Sachverhalt wird anhand des zeitlichen Verlaufs der Methankonzentrationen für den Probanden 1 (Abbildung 26) veranschaulicht.

¹⁵ Legende: Die Buchstaben „D“, „O“, „U“ stehen für die Probenahmestellen „Dehnelement“, „Oben“, „Unten“. Die nachgestellte Ziffer gibt den Probanden an (Beispiel: U5: Proband 5, Probenahmestelle „Unten“)

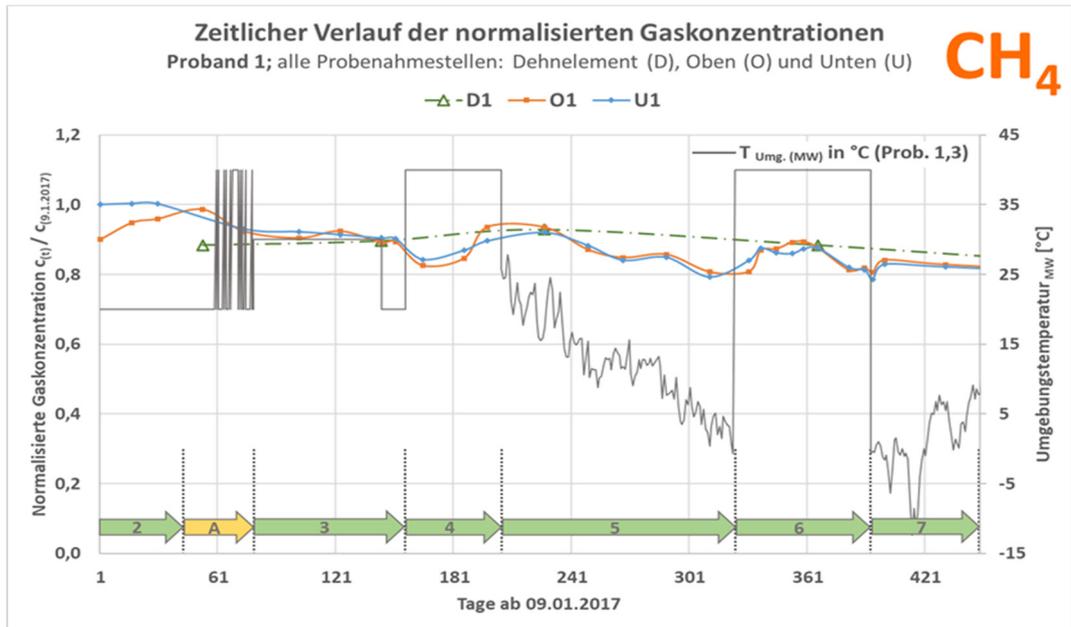


Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CH_4 -Konzentrationen im Öl von Proband 1 (alle Probenahmestellen)

Einige Gase (H_2 , CO_2 , C_2H_2) werden jedoch – wie noch im Abschnitt 3.7 eingehend erläutert wird - vom Isolierpapier im Aktivteil bevorzugt bzw. stärker sorbiert. Folglich reduziert sich zunächst ihre Gas-in-Öl-Konzentrationen in der Nähe der Sorptionsflächen. Je nach Höhe und Häufigkeit der Temperaturänderungen homogenisieren sich dann mit einigem Zeitverzug die Gaskonzentrationen im restlichen Ölvolumen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die entsprechenden Gaskonzentrationen im freien Öl der Probanden dadurch innerhalb weniger Wochen bereits um 10 % sinken können. Dieser Sachverhalt wird am Verlauf der Ethin-Konzentration im Probanden 1 (Abbildung 27) veranschaulicht.

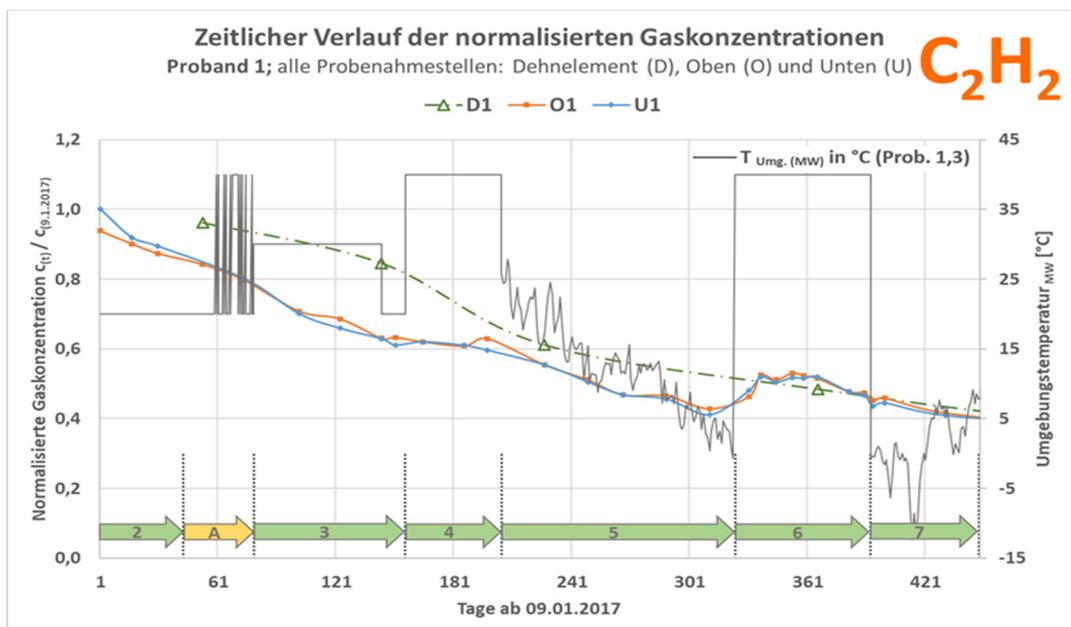


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C_2H_2 -Konzentrationen von Proband 1 (alle Probenahmestellen)

Wandlergehäuse und Dehnelement sind bei dieser konstruktiven Ausführung¹⁶ als zwei separierte Ölbehälter anzusehen, die nur durch ein Rohr mit kleinem Querschnitt miteinander verbunden sind (Abbildung 14). Ohne ausreichende Vermischung der beiden Ölvolumina durch häufige Hin- und Rückströmungen (Dilatation) kann die Gaskonzentration im Dehnelement der zuvor beschriebenen Änderung im Wandler nicht vollständig folgen. Die zeitlich stark verzögerten Änderungen der Gas-in-Öl-Konzentration im Dehnelement (Probenahmestelle D) gegenüber jenen im Wandler (Probenahmestellen O und U) wird durch die Zeitreihen für Ethin (Abbildung 27) gut veranschaulicht.

Nach längeren Perioden ohne wesentliche Temperatur- und Volumenänderungen (z.B. nach Aufstellung bei konstanter Temperatur im Trocknungsöfen) können die Gaskonzentrationen im Wandler und in seinem Dehnelement unterschiedlich sein. Eine anschließende stärkere Durchmischung durch häufigere Temperaturänderungen (Freiluftaufstellung) wird dann einige Zeit lang den Verlauf der Konzentrationsverhältnisse beeinflussen. Höhere Gas-in-Öl-Konzentrationen im Dehnelement führen z.B. zu temporären, von den Volumenverhältnissen der beiden Gefäße bestimmten Konzentrationserhöhung im Wandleröl. Diese Vermischung könnte auch in der Praxis die Interpretation kurz aufeinanderfolgender Gasanalysen erschweren, beispielsweise, wenn dadurch die Gaskonzentration sinkt und somit das Aussetzen eines Fehlers vortäuscht.

Ähnliche Verhältnisse wie für Ethin ergeben sich für Kohlendioxid, so dass auch für dieses Gas die verzögerten Konzentrationsänderungen im Dehnelement in Abbildung 28 gut erkennbar sind.

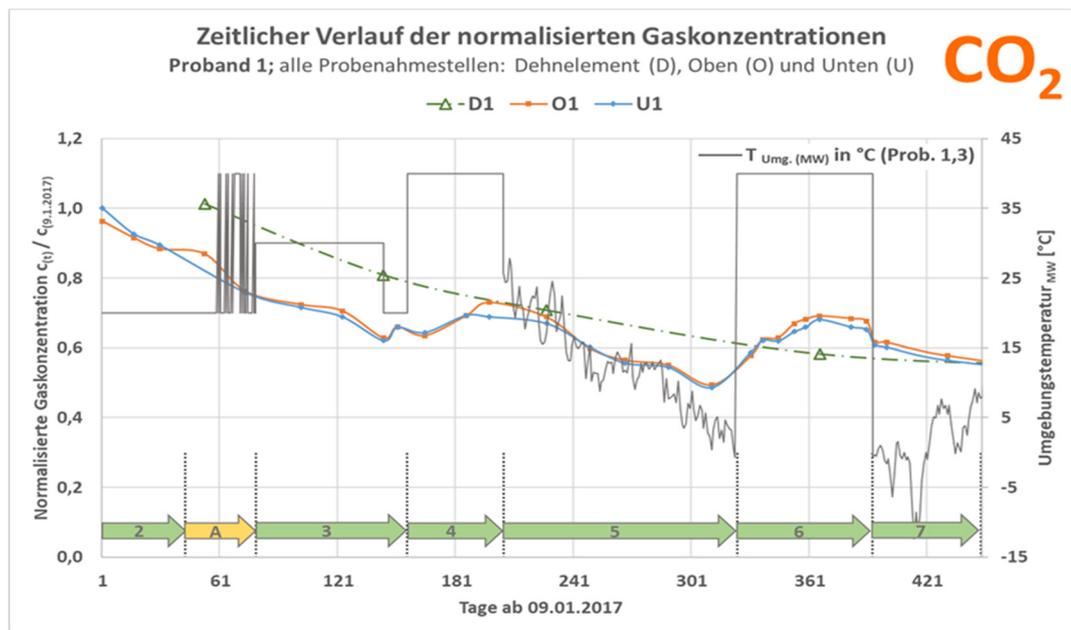


Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO₂-Konzentrationen von Proband 1 (alle Probenahmestellen)

¹⁶ Bei direkt angeflanschten Dehnelementen gibt es nur einen gemeinsamen Ölraum.

Die geringen Eigenverluste von Messwandlern haben vermutlich weniger Einfluss auf die Konvektionsströmung des Öls als äußere Temperaturänderungen bzw. Sonneneinstrahlungen. Wandler, die in Innenräumen mit geringen Temperaturschwankungen aufgestellt sind, haben daher schwache Konvektionsströmungen, so dass die Verteilung lokal erzeugter Gase lange dauert. Je nach Entfernung zwischen Fehlerort und Probenentnahmestelle könnte dadurch ein Zeitverzug zwischen dem Fehlereintritt und seiner grundsätzlichen Detektierbarkeit auftreten.

3.5.3. Details zu den außerplanmäßigen Projektphase B und C

Um zusätzliche Erkenntnisse zu den Einflüssen der täglichen und saisonalen Temperaturänderungen zu gewinnen, wurden die Probanden 1 und 3 in der Endphase des Projekts (Projektphase C) über einen längeren Zeitraum (300 Tage: vom 6. September 2018 bis 24. Juni 2019) bei Raumtemperatur gelagert, während die anderen vier Probanden in diesem Zeitraum im Freien aufgestellt waren.

Die Probanden 2, 4, 5 und 6 standen während der Projektphasen 7, B und C (442 Tage) im Freien wodurch sich ihre Öltemperaturen mit den täglichen und saisonalen Änderungen der Umgebungstemperatur häufig änderte. Abbildung 29 zeigt maximalen Differenzwerte der täglichen Temperaturänderungen. Auf Grund der dadurch verursachten häufigen Volumenänderungen sowie der Konvektionsströmung im Wandler ist von einer guten Durchmischung der Öle auszugehen. Zumindest wäre eine bessere Durchmischung als bei den Probanden 1 und 3 zu erwarten gewesen, die während der gesamten Projektphase C (300 Tage) bei annähernd konstanter Raumtemperatur gelagert wurden (Abbildung 30).

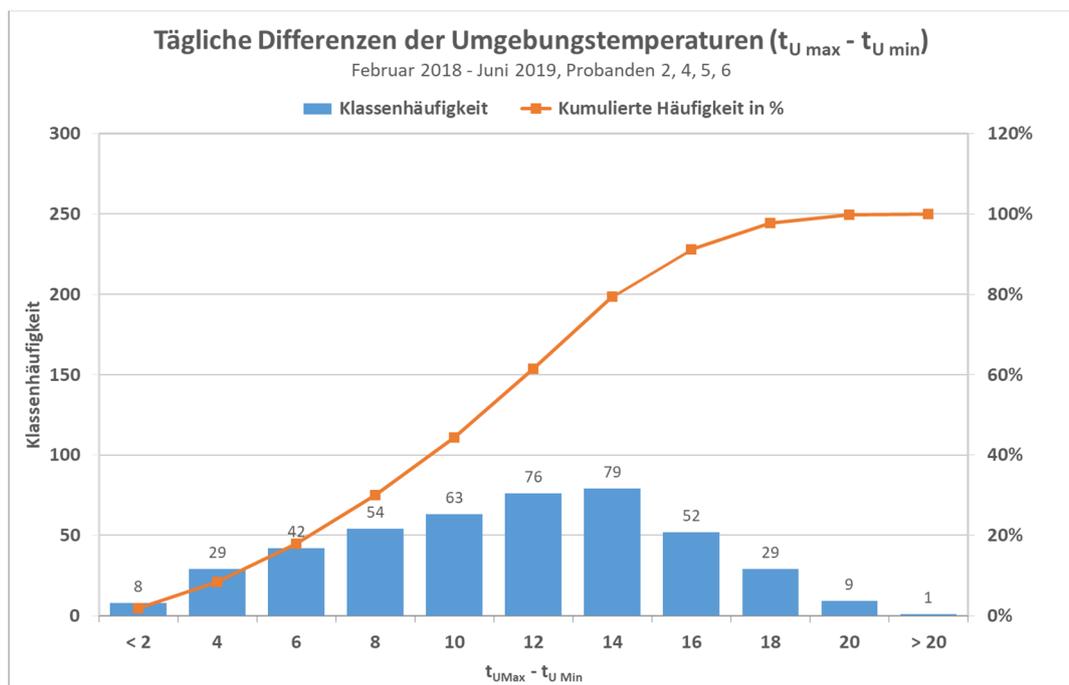


Abbildung 29: Histogramm mit den täglichen Differenzen der Umgebungstemperaturen während der Projektphasen 7 bis einschließlich C für die Probanden 2, 4, 5 und 6

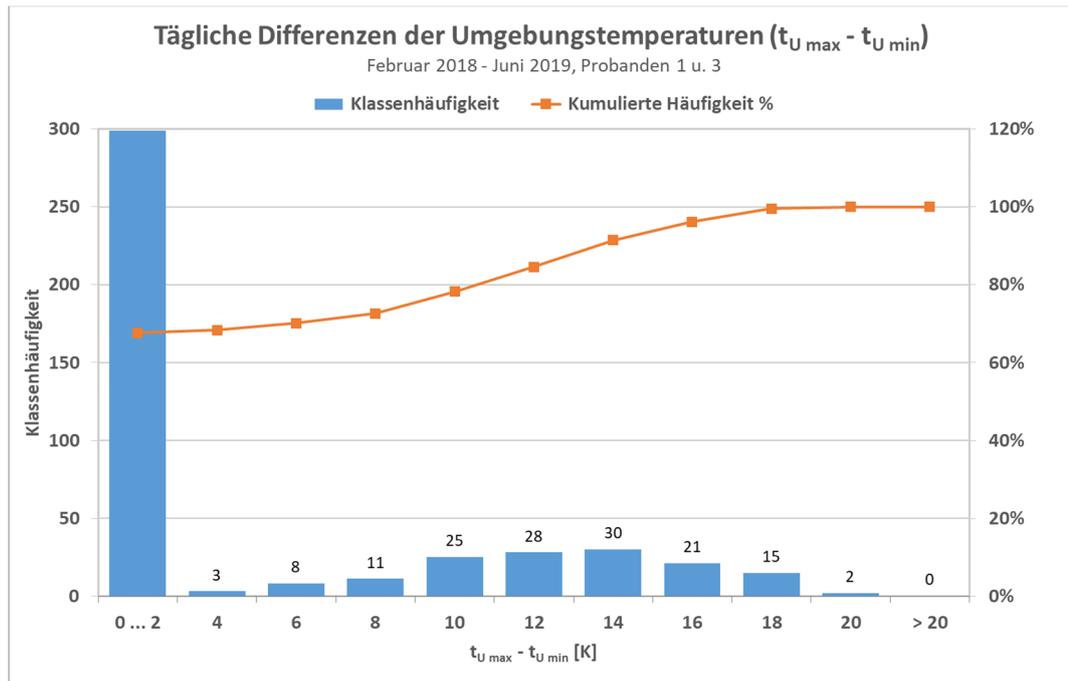


Abbildung 30: Histogramm mit den täglichen Temperaturdifferenzen während der Projektphasen 7 bis einschließlich C für die Probanden 1 und 3

Während der Projektphasen 7 und B waren die beiden Probanden 1 und 3 noch im Freien aufgestellt (143 Tage), wobei sich die Tagestemperaturen in diesem Zeitraum zwischen 2...4 K und 18...20 K änderten. Dadurch ist von einer guten Homogenisierung der Gaskonzentrationen bis zum Beginn der Projektphase „C“ auszugehen. Während der Projektphase „C“, d.h. während der 300-tägigen Aufstellung im Innenraum (im Winter beheizte Werkstätte), änderte sich die Umgebungstemperatur für die Probanden 1 und 3 jedoch nur wenig und wurde daher im Histogramm (Abbildung 30) mit 2 K angenommen.

Die unterschiedlichen Aufstellungsbedingungen der beiden Probandengruppen führten auch zu Abweichungen ihrer Gaskonzentrationen, die allerdings nur unwesentlichen ausfielen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Adsorptionsprozesse der Spaltgase H_2 , C_2H_2 und CO_2 bereits stark verlangsamt waren, so dass während der 300 Beobachtungstage nicht mehr so signifikante Reduktionen der Gaskonzentrationen aufgetreten sind, wie zu Beginn der Untersuchungen. Daher wirken sich unterschiedlich starke Vermischungen zwischen den Ölen in den Dehnelement bzw. Wandlern auch nicht mehr gravierend aus.

Durch die häufige Entnahme von Ölproben vor der Projektphase „C“ waren die Ölstände bereits so weit reduziert, dass nur noch wenige Probenahmen möglich waren. Dadurch ist der zeitliche Verlauf der Gaskonzentrationen nur unvollständig dokumentiert und die Analyseergebnisse sind auch nicht ausreichend gut abgesichert. Daher werden die Ergebnisse für die Projektphase „C“ in diesem Forschungsbericht nicht weiter kommentiert.

3.6. Ergebnisse der Temperaturmessungen

Die Probanden wurden mit mehreren Temperaturfühlern ausgestattet (siehe beispielsweise Skizze in Abbildung 16). Leider fiel die Messeinrichtung während der Freiluftaufstellung der Probanden infolge einer atmosphärischen Überspannung aus, so dass nur wenige verwertbare Daten aufgezeichnet wurden. Anhand der Abbildung 24 wurden bereits die Temperaturverläufe einiger Sensoren während eines Abkühlvorgangs kurz erläutert. An Hand der Abbildung 31 kann noch gezeigt werden, dass die Erwärmungszeitkonstanten beim Probanden mit dem Verbundisolator etwas kürzer sind. Ursache dafür dürfte sein, dass der Porzellanisolator eine größere Masse sowie ein höheres Ölvolumen besitzt und damit mehr Wärmeenergie gespeichert hat.

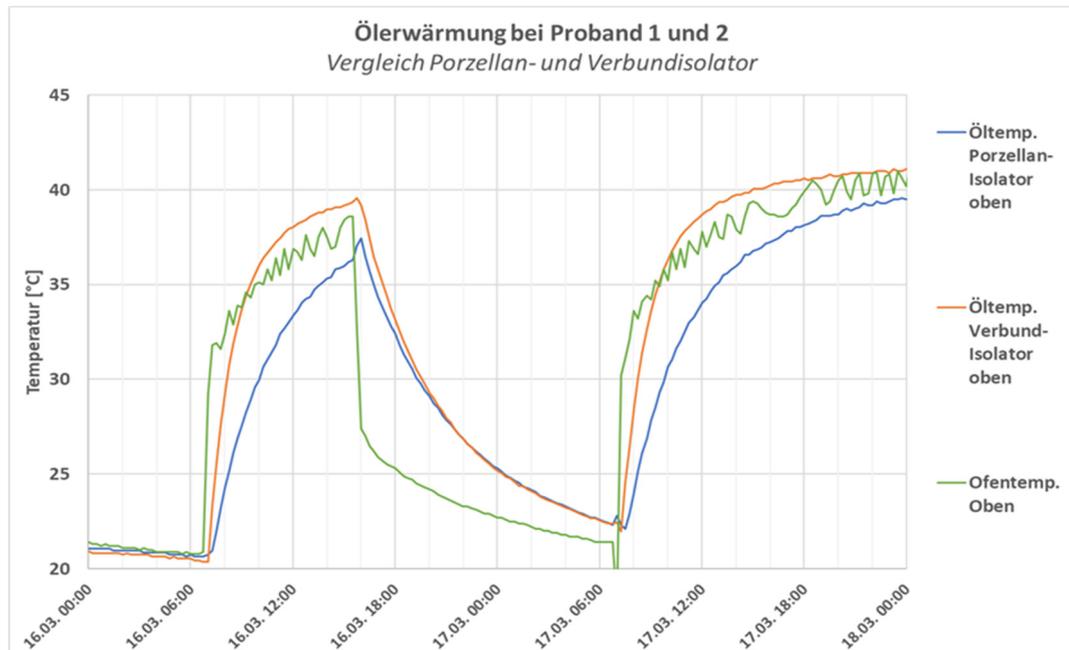


Abbildung 31: Ofen- und Öltemperaturen (Temperaturfühler im Kopfbereich) für die Probanden 1 und 2 (Vergleich Porzellan- und Verbundisolator)

3.7. Zeitverläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen, Interpretationen der Ergebnisse

Für die Untersuchungen an den sechs Probanden wurden die Spaltgase dem freien Öl im Wandler und in seinem Dehnelement zugesetzt (Abschnitt 3.4). Die Gaskonzentrationen im freien Öl bzw. an den Probeentnahmen können sich durch folgende Einflüsse ändern:

- Diffusion der Gase in das zwischen den Lagen und in den Poren des Isolierpapiers gebundene Öl. Das Volumen des gebundenen Öls beträgt jedoch weniger als 10 % des freien Öls. Selbst bei vollständiger Diffusion wird die Konzentrationsreduktion im freien Öl weniger als 10 % betragen
- Sorption (Adsorption und Absorption, siehe 8.4) der Gase durch das Isolierpapier und andere Materialien (u.a. Epoxidharz)
- Permeation der Gase durch das Gehäuse der Probanden bzw. Messwandler (siehe Abschnitt 8.5 und Abschnitt 8.6)
- Gasproduktion durch natürliche Alterung, Stray Gassing etc.
Diese Auswirkungen sind in Anbetracht der mäßig erhöhten Temperaturen und für das angewendete hochoxidationsbeständige Isolieröl (vollinhibiert) jedoch nicht zu erwarten.

Die Zeitachse zur chronologischen Darstellung der Gas-in-Öl-Konzentrationen wurde der besseren Anschaulichkeit wegen nicht mehr im Datumsformat, sondern in Tagen ab dem 09.01.2017 skaliert. Die zeitlichen Verläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen werden normalisiert dargestellt, um diese im gleichen Maßstab für alle Probanden im jeweiligen Diagramm für das betreffende Gas eintragen zu können. Bezugswerte für die Normalisierung sind die am 9.1.2017 ermittelten Konzentrationswerte (siehe Tabelle 19). Nach der Homogenisierung waren die DGA-Werte der Ölproben „Oben“ und „Unten“ nicht mehr sehr unterschiedlich, so dass für die folgenden Darstellungen nur noch die Mittelwerte von jeweils zwei Proben aus der Entnahmestelle „Unten“ herangezogen werden.

3.7.1. Chronologie der Wasserstoffkonzentrationen (c H₂)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 32) werden die normalisierten Wasserstoffkonzentrationen aller Probanden einander gegenübergestellt. Die Unterschiede und die vermuteten Ursachen der unterschiedlichen Verläufe werden in der Folge erläutert.

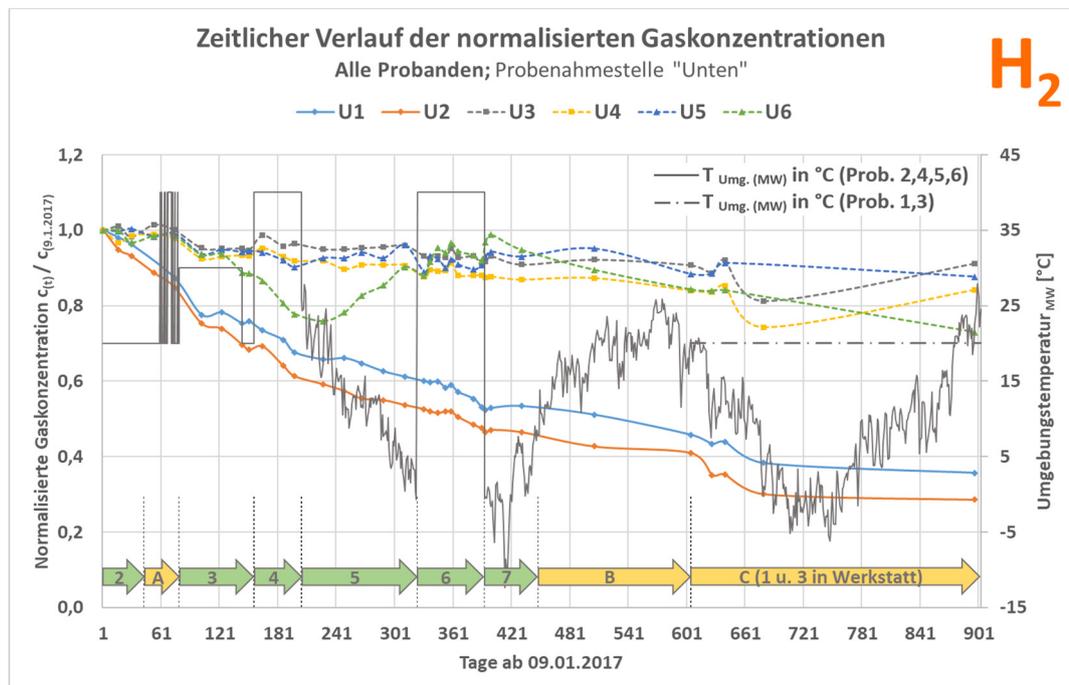


Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der normalisierten H₂-Konzentrationen aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Einfluss des Aktivteils auf die zeitlichen Verläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen

Die Abbildung 32 verdeutlicht, dass bei den Probanden 1 und 2 (mit Aktivteil) ein viel höherer Abfall der H₂-Konzentrationen im Öl auftritt als bei den Probanden ohne Aktivteil. Daraus ist zu schließen, dass der Großteil des Wasserstoffs nicht – wie vor Projektbeginn vermutet - durch das Wandlergehäuse entweicht (permeiert), sondern vom Aktivteil (d.h. vom Isolierpapier) sorbiert wird. Die Gleichgewichtseinstellung bedarf dabei einiger Zeit. Aufgrund des mit der Zeit kleiner werdenden Konzentrationsgefälles zwischen dem freien Öl und der Öl-Papierisolierung wird auch die Sorptionsrate geringer. Der Konzentrationsabfall erfolgt daher nicht linear, sondern annähernd exponentiell, da das Gas erst durch die äußeren Öl-Papierlagen in die inneren Öl-Papierlagen der Isolierung diffundieren muss.

Durch die Sorptionsvorgänge sinken die H₂-Konzentrationen im Öl der Probanden 1 und 2 innerhalb der 900 Beobachtungstage auf 30 - 40 Prozent der Anfangskonzentration ab. Da das Volumen der Öl-Papierisolierung wesentlich kleiner ist als das freie Ölvolumen, muss im Papiervolumen eine viel höhere Gaskonzentration als im freien Öl erreicht werden. Der Wasserstoff kann daher nur an der großen inneren Oberfläche¹⁷ des Papiers adsorbiert werden. Diese Erkenntnis ist umso bemerkenswerter, weil - nach Kenntnis der Autoren dieses Forschungsberichts - in der Fachliteratur bisher noch nicht über eine Sorption von Wasserstoff durch Isolierpapier berichtet wurde. Ein gravierender „H₂-Schwund“ kann die Interpretation von Gas-in-Öl-Untersuchungen beeinflussen und letztlich zu Fehlinterpretationen führen, wie u.a. im Abschnitt 5.3.3 gezeigt wird.

Die höhere (normierte) Sorptionsrate des Probanden 2 gegenüber Proband 1 ist zum Teil auf das um 11 % geringere Ölvolumen sowie eventuell auf eine etwas höhere H₂-Permeation durch den Verbundisolator in die Umgebungsluft zurückzuführen. Die Gründe, weshalb bei den Vorversuchen gegensätzlich zu den Hauptversuchen keine Sorption von H₂ festgestellt werden konnte, wurden bereits im Abschnitt 2.3 ausführlich erläutert.

Permeation durch das Wandlergehäuse (siehe Abschnitt 8.5)

Schwächere, aber noch deutlich erkennbare Abnahmen der H₂-Konzentrationen wurden auch bei den Probanden ohne Aktivteil festgestellt. Als mögliche Ursachen kommen die Permeation des Wasserstoffs durch das Wandlergehäuse sowie die Adsorption des Gases durch die aus Hartpapier bestehenden Trägerrohre (Abbildung 33) für die Thermoelemente in Frage.



Abbildung 33: Deckel-Blindflansch mit Hartpapier-Trägerrohr für Thermoelement

¹⁷ Poröse Materialien wie Papierfaserstoffe enthalten zahlreiche Poren verschiedener Größe. Die innere (spezifische) Oberfläche umfasst die Gesamtheit aller Oberflächen dieser Poren. Häufig wird die massenspezifische Oberfläche in m²/g angegeben.

Ethin wurde bei den Probanden mit Aktivteil im ähnlichen Ausmaß wie Wasserstoff vom Papier adsorbiert (siehe Kapitel 3.7.5, Abbildung 37). Bei den Probanden ohne Aktivteil tritt hingegen kein so deutlicher Abfall der C_2H_2 -Konzentration im Öl auf wie beim Wasserstoff. Dieser Sachverhalt lässt darauf schließen, dass die Trägerrohre zur H_2 -Sorption kaum beitragen dürften und der Wasserstoff daher in geringem Umfang (einige Prozentpunkte/Jahr) auch über das Wandlergehäuse (Dichtelemente, Isolator, Durchführungsplatten etc.) in die Umgebung entweichen (permeieren) kann.

Zusätzlich wird aus den Zeitreihen noch ersichtlich, dass die H_2 -Konzentration bei den Probanden mit Verbundisolatoren etwas stärker abfällt als bei jenen mit Porzellanisolatoren. Es ist daher mit Vorbehalt zu folgern, dass der Wasserstoff zum Teil auch durch die Verbundisolatoren permeiert¹⁸. Da die Probanden etwas unterschiedlich ausgeführt sind, ist diese Aussage mit Unsicherheiten behaftet. Die Probanden mit Porzellanisolatoren enthalten beispielsweise mehr Öl und daher - bei gleicher Gaskonzentration - auch mehr Wasserstoff. Auch die Dichtungssysteme sind nicht direkt vergleichbar und ihre Permeationsraten weisen außerdem erfahrungsgemäß Streuungen auf [6]. Somit kann die Frage nach der Wasserstoffdurchlässigkeit von Verbund-Hohlisolatoren für ölgefüllte Hochspannungsmesswandler auf Basis unserer Untersuchungsergebnisse nicht mit Bestimmtheit beantwortet werden.

Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsvorgänge

Im Gegensatz zu den Untersuchungsergebnissen für CO_2 und C_2H_2 kann aus den Analysewerten kein eindeutiger Einfluss der Temperatur auf die H_2 -Sorption des Aktivteils abgeleitet werden. Vielleicht liegt das daran, dass Wasserstoff wegen seiner kleinen Molekülgröße schneller in tiefere Papierlagen diffundiert als die vorgenannten anderen Gase, und dass er daher an der Grenzschicht zum Öl nicht in gleich hoher Konzentration für Desorptionsprozesse zur Verfügung steht.

Besonderheiten

Beim Probanden 6 weicht der Verlauf der H_2 -Konzentration – speziell während der Projektphasen „4“ und „5“ sowie während der Projektphase „C“ – sehr deutlich von jenen der anderen Probanden ohne Aktivteil ab. Weshalb seine H_2 -Konzentration während der Projektphasen „4“ und „5“ zunächst abfällt und anschließend wieder ansteigt, konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht geklärt werden, zumal die anderen Spaltgase in diesem Probanden diese Besonderheit nicht zeigen.

¹⁸ Polymere sind generell wasserdampf- und gasdurchlässig (siehe Abschnitt 8.6). Die Höhe der Durchlässigkeit ist vom Polymer selbst sowie der Art des Gases abhängig.

3.7.2. Chronologie der Kohlenmonoxidkonzentrationen (c CO)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 34) werden die normalisierten CO-Konzentrationen aller Probanden einander gegenübergestellt. Die Unterschiede und die vermuteten Ursachen der unterschiedlichen Verläufe werden in der Folge erläutert.

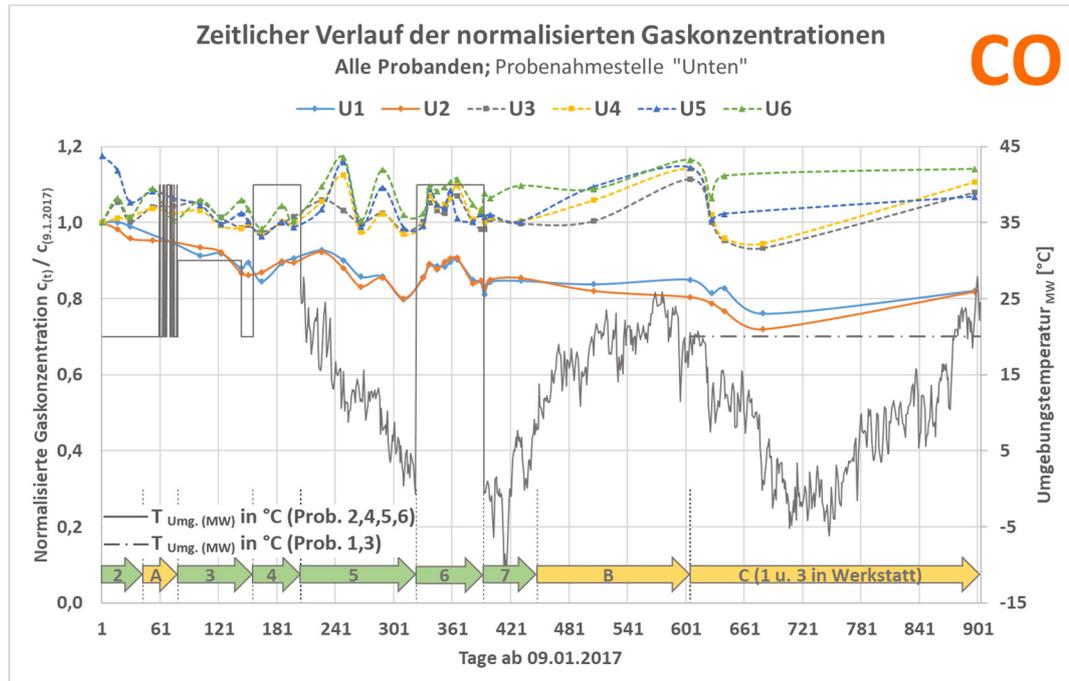


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Einfluss des Aktivteils auf die zeitlichen Verläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen:

Bei den Probanden 1 und 2 (mit Aktivteil) nimmt die CO-Konzentration im Öl im Laufe der 900 Beobachtungstage um rund 20 % gegenüber der Anfangskonzentration ab. Die gebundene Ölmenge im Papier bzw. zwischen den Papierlagen macht weniger als 10 % der gesamten Ölmenge aus und kommt als alleinige Ursache dieser Reduktion nicht in Frage. Da die Probanden ohne Aktivteil sogar eine leichte Zunahme der CO-Konzentrationen zeigen, ist auch für dieses Gas anzunehmen, dass es – wenngleich im wesentlich geringeren Ausmaß als Wasserstoff – vom Isolierpapier sorbiert wird. Die Sorption von Kohlenmonoxid durch Papier wurde schon vor längerer Zeit experimentell nachgewiesen, wie in [4] zur Bestätigung dieser Annahme beschrieben wird.

Permeation durch das Wandlergehäuse

Die CO-Konzentrationen der Probanden ohne Aktivteil zeigen einen leichten Anstieg über die Projektperiode auf. Die Analysen weisen jedoch auch Streuungen von $\pm 10\%$ auf, deren Ursache nicht eindeutig zuordenbar sind. Es ist daher unsicher, ob tatsächlich Erhöhungen der CO-Konzentrationen, z.B. durch natürliche Alterung des Öls aufgetreten sind. Da jedenfalls keine Abnahmen der Konzentrationen bei den Probanden ohne Aktivteil festzustellen sind, können signifikante Permeationen durch das Wandlergehäuse weitgehend ausgeschlossen werden.

Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsvorgänge

Eindeutige Zusammenhänge der Gaskonzentrationen mit der Umgebungstemperatur sind nicht erkennbar.

3.7.3. Chronologie der Kohlendioxidkonzentrationen (c CO₂)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 35) werden die normalisierten CO₂-Konzentrationen aller Probanden einander gegenübergestellt. Die Unterschiede und die vermuteten Ursachen der unterschiedlichen Verläufe werden in der Folge erläutert.

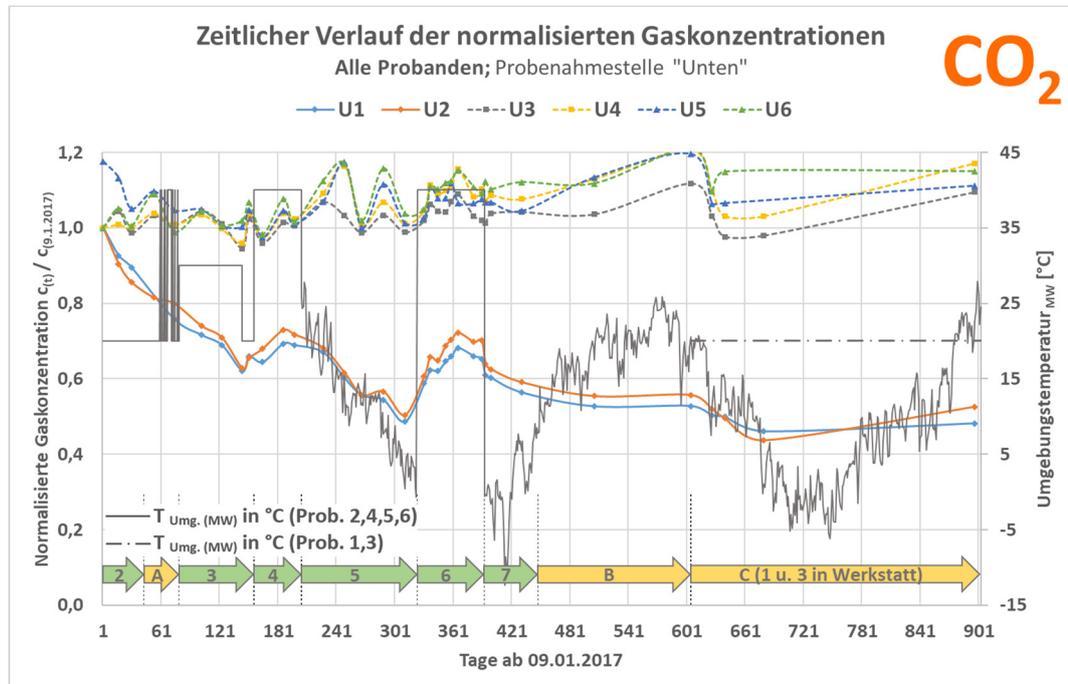


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO₂-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Einfluss des Aktivteils auf die zeitlichen Verläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen
Bei den Probanden 1 und 2 (mit Aktivteil) nimmt die CO₂-Konzentration im Öl im Laufe der 900 Beobachtungstage um rund 50 % gegenüber der Anfangskonzentration ab. Wie bereits für Kohlenmonoxid erläutert, sind aus obigem Diagramm auch beim Kohlendioxid für die Probanden ohne Aktivteil geringfügige Zunahmen der CO₂-Konzentrationen erkennbar. Da auch bei den Vorversuchen erhebliche Abnahmen der CO₂-Konzentrationen festgestellt wurden, ist auch für dieses Gas anzunehmen, dass es – fast im gleichen Ausmaß wie Wasserstoff – vom Isolierpapier sorbiert wird.

Permeation durch das Wandlergehäuse

Die CO₂-Konzentrationen der Probanden ohne Aktivteil zeigen einen leichten Anstieg über die Projektperiode auf. Die Analysen weisen jedoch auch Streuungen von einigen Prozentpunkten auf, deren Ursache nicht eindeutig zuordenbar sind. Ein Eintrag aus der Umgebungsluft ist auszuschließen, da die CO₂-Konzentration im Öl wesentlich höher ist. Es ist daher unsicher, ob tatsächlich Erhöhungen der CO₂-Konzentrationen aufgetreten sind. Da jedenfalls keine Abnahmen der Konzentrationen bei den Probanden ohne Aktivteil festzustellen sind, sind signifikante Permeationen von CO₂ durch das Wandlergehäuse, zumindest bei nicht sehr hohen Konzentrationswerten, eher auszuschließen.

Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsvorgänge

Längerfristige Anhebungen der Umgebungstemperatur (Aufstellung im Trocknungsöfen) führten bei den Probanden mit Aktivteil vorübergehend zu signifikanten Erhöhungen der

Gaskonzentrationen im Öl (Desorption von CO₂ aus dem Papier). Wird die Temperatur anschließend wieder abgesenkt, so setzt sich der Sorptionsprozess fort. Daraus folgt, dass es temperaturabhängige Gleichgewichtszustände (Sorptionsisothermen) für die CO₂-Konzentration im Öl bzw. im Papier gibt. Das Phänomen der temperaturabhängigen CO₂-Schwankungen ist bereits seit längerer Zeit aus der Literatur [4] bekannt und wurde auch bei den Vorversuchen sowie bei Onlineüberwachungen einiger Transformatoren in Form saisonaler bzw. täglicher Schwankungen der CO₂-Konzentrationen beobachtet. Bei den Probanden ohne Aktivteil ist hingegen kein eindeutiger Zusammenhang der Gaskonzentrationen mit der Temperatur erkennbar.

3.7.4. Chronologie der Methankonzentrationen (c CH₄)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 36) werden die normalisierten CH₄-Konzentrationen aller Probanden einander gegenübergestellt. Die Unterschiede und die vermuteten Ursachen der unterschiedlichen Verläufe werden in der Folge erläutert.

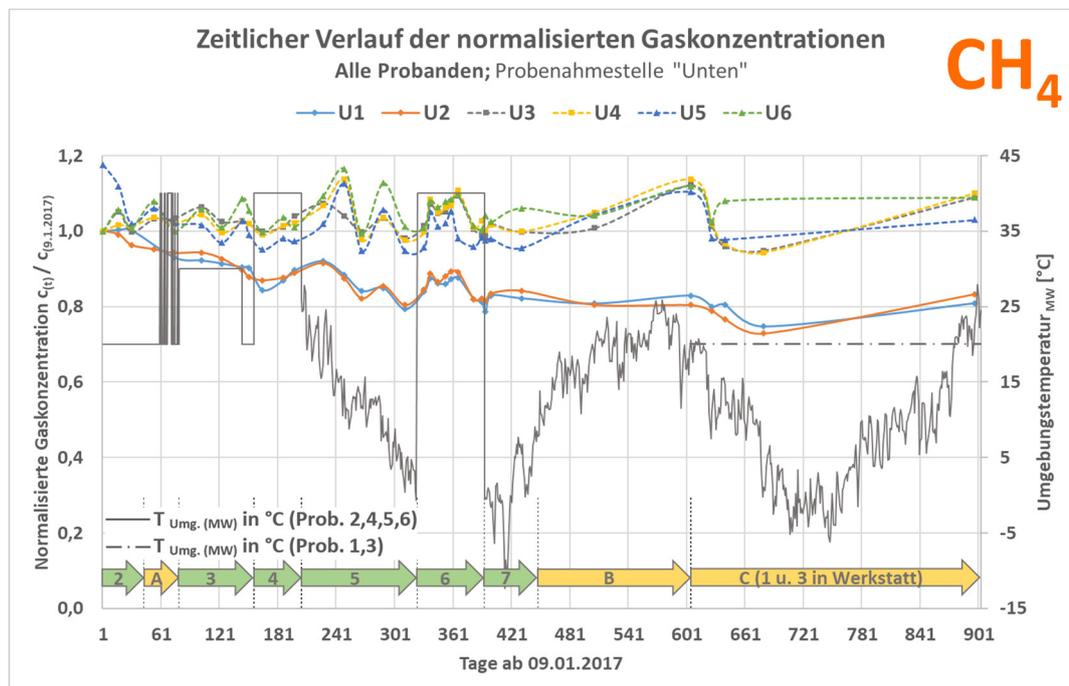


Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CH₄-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Einfluss des Aktivteils auf die zeitlichen Verläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen
 Bei den Probanden 1 und 2 (mit Aktivteil) nehmen die CH₄-Konzentrationen im Öl im Laufe der 900 Beobachtungstage um rund 20 %, also in ähnlicher Höhe wie beim Kohlenmonoxid, gegenüber der Anfangskonzentration ab. Es sind daher vergleichbare Schlussfolgerungen wie für Kohlenmonoxid zu ziehen. Im Unterschied zu CO wurde – nach Kenntnis der Verfasser dieses Forschungsberichts – in der Fachliteratur jedoch bisher noch nicht über eine Sorption von Methan durch Papier berichtet.

Permeation durch das Wandlergehäuse

Es gelten die Aussagen, die bereits für Kohlenmonoxid getroffen wurden.

Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsvorgänge

Aussagen analog zu Kohlenmonoxid.

3.7.5. Chronologie der Ethinkonzentrationen (c C₂H₂)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 37) werden die normalisierten C₂H₂-Konzentrationen aller Probanden einander gegenübergestellt. Die Unterschiede und die vermuteten Ursachen der unterschiedlichen Verläufe werden in der Folge erläutert.

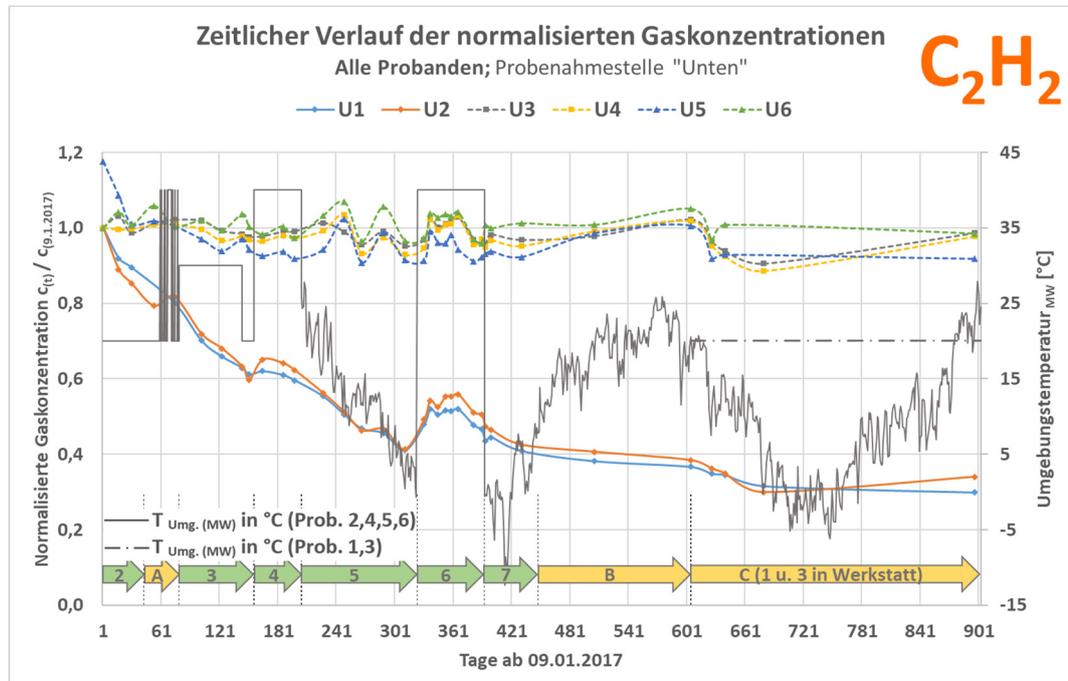


Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C₂H₂-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Einfluss des Aktivteils auf die zeitlichen Verläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen

Eine maßgebliche Sorption von Ethin durch Zusatz von Isolierpapier zum Öl wurde bereits bei den Vorversuchen festgestellt. Aus dem obigen Diagramm werden für die Probanden mit Aktivteil wie bei H₂ und CO₂ erhebliche Reduktionen der C₂H₂-Konzentrationen im Öl im Laufe der Projektdauer ersichtlich. Innerhalb der Beobachtungsdauer von 900 Tagen reduzierte sich die C₂H₂-Konzentration um etwa 70 %, während sich diese bei den Probanden ohne Aktivteil kaum änderte. Daraus und aus den Vorversuchen ist wiederum zu schließen, dass Ethin durch den Aktivteil, d.h. vom Isolierpapier, sorbiert wurde. Soweit bekannt, wurde in der Fachliteratur ebenso wie für Wasserstoff noch nicht über eine Sorption von Ethin durch Papier berichtet. Das ist umso bemerkenswerter, da Ethin ein wichtiges Schlüsselgas bei der Bewertung von Gas-in-Öl-Analysen (DGA) darstellt, und solche Veränderungen bei Anwendung der verschiedenen Interpretationsmethoden zu falschen Zuordnungen der Fehlerart führen können, wie im Kapitel 5 dieses Forschungsberichts noch gezeigt wird.

Permeation durch das Wandlergehäuse

Die Ethin-Konzentrationen der Probanden ohne Aktivteil (Probanden 3-6) blieben während der gesamten Projektdauer beinahe konstant, wenn man von den relativ kleinen Streuungen von $\pm 5 \%$ absieht. Somit sind signifikante Permeationen dieses Gases durch das Wandlergehäuse auszuschließen.

Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsvorgänge

Ähnlich wie beim CO₂ führten längerfristige Anstiege der Umgebungstemperatur bei den Probanden mit Aktivteil zu vorübergehenden Erhöhungen der Gaskonzentrationen (z.B. während der Projektphase 6). Daraus ist zu schließen, dass das ein Teil des zuvor aufgenommenen Ethins bei zunehmender Temperatur zunächst wieder aus dem Papier desorbiert. Bei länger andauernder gleichmäßiger Temperatur überwiegt dann offenbar wieder die Sorption, möglicherweise dadurch, dass die Konzentration an den äußeren Papierlagen (Grenzschichten zum Öl) durch allmähliche Diffusion des Ethins in tiefere Lagen der Öl-Papierisolierung abnimmt.

3.7.6. Chronologie der Ethenkonzentrationen (c C₂H₄)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 38) werden die normalisierten C₂H₄-Konzentrationen aller Probanden einander gegenübergestellt. Die Unterschiede und die vermuteten Ursachen der unterschiedlichen Verläufe werden in der Folge erläutert.

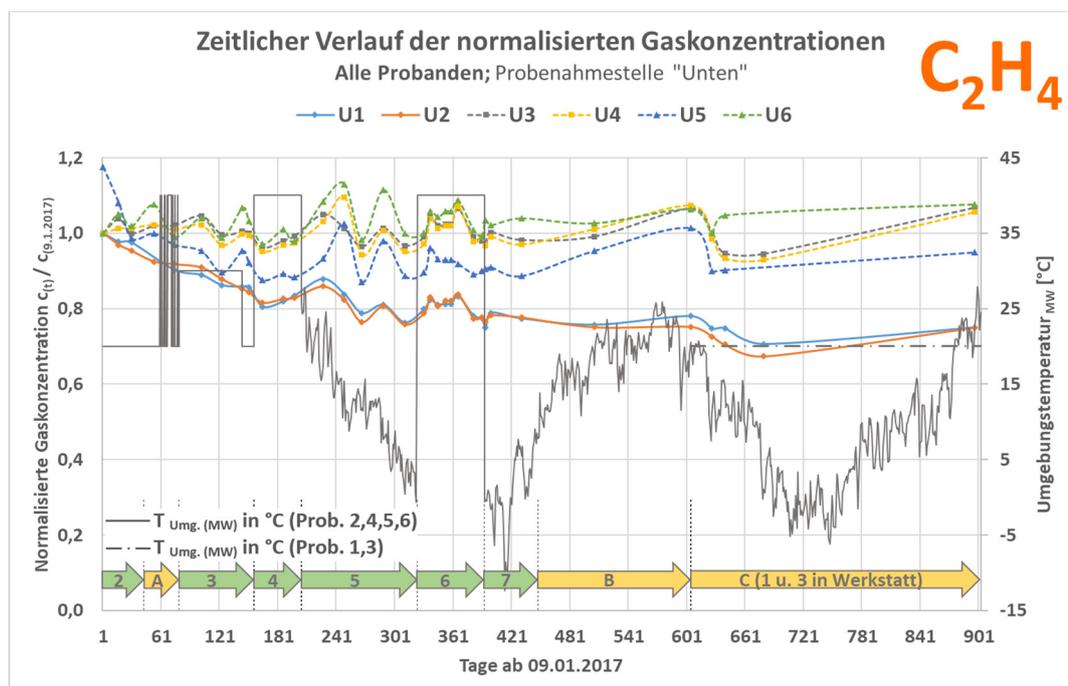


Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C₂H₄-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Einfluss des Aktivteils auf die zeitlichen Verläufe der Gas-in-Öl-Konzentrationen

Bei den Probanden 1 und 2 (mit Aktivteil) nimmt die C₂H₄-Konzentration im Öl im Laufe der 900 Beobachtungstage um rund 25 % gegenüber der Anfangskonzentration ab. Es sind daher vergleichbare Schlussfolgerungen wie für das Kohlenmonoxid und das Methan zu ziehen.

Permeation durch das Wandlergehäuse

Es gelten die Aussagen, die bereits für Kohlenmonoxid und Methan getroffen wurden.

Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsvorgänge

Aussagen analog zu Kohlenmonoxid und Methan.

3.7.7. Chronologie der Ethankonzentrationen (c C₂H₆)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 39) werden die normalisierten C₂H₆-Konzentrationen aller Probanden einander gegenübergestellt. Die Unterschiede und die vermuteten Ursachen der unterschiedlichen Verläufe werden in der Folge erläutert.

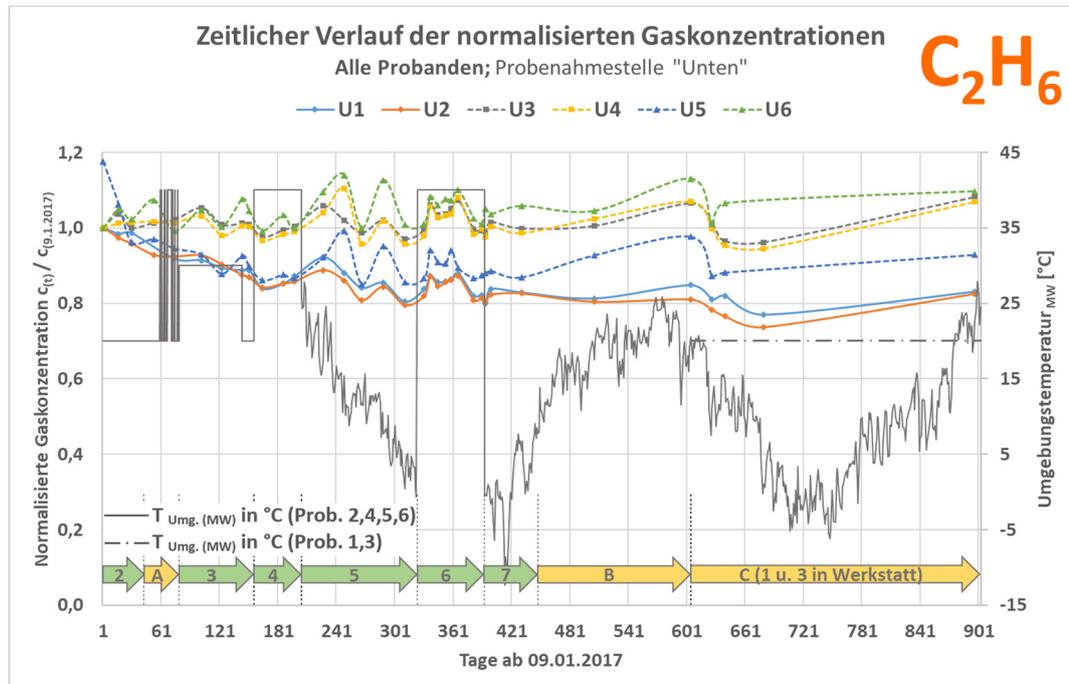


Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C₂H₆-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Die Zeitverläufe für die Konzentrationswerte von Ethan sind mit jenen von Methan vergleichbar. Daher gelten auch die bereits für dieses Gas getroffenen Beurteilungen. Ein abweichendes Verhalten ist beim Probanden 5 zu erkennen, möglicherweise jedoch nur deshalb, weil das Ethan anfänglich noch nicht ausreichend homogen verteilt war und mit einem zu hohen Anfangswert als Basis gerechnet wurde.

3.7.8. Chronologie der Ölfeuchte (mg H₂O / kg Öl)

Erhöhte Feuchtegehalte in Öl-Papierisolierungen erhöhen das Risiko für die Entwicklung von Teilentladungen und Durchschlägen und gefährden daher die Betriebssicherheit solchermaßen isolierter Geräte. Vor einigen Jahrzehnten ereigneten sich bei Hochspannungswandlern ohne Luftabschlussystemen infolge erheblicher Feuchteaufnahmen aus der Umgebungsluft einige Isolationsdurchschläge, die infolge von Explosionen der Porzellanisolatoren und Ölbränden zur Gefährdung von Personen und benachbarten Anlagenteilen führten. Nach Einführung der mittels Stickstoffpolster, Faltenbalg oder Dehnelement gegen Umwelteinflüsse abgeschlossenen Messwandler wurde das Problem „Verfeuchtung des Isoliersystems“ als gelöst erachtet. Infolge von Herstellungsmängeln sind aber auch an Geräten mit diesem neuen Design mehrere innere Überschläge mit teilweise beträchtlichen Folgeschäden aufgetreten. Daher wurde die Entwicklung der ersten Verbundisolatoren, d.h. von explosionsicheren Geräteisolatoren aus einem GFK-Rohr mit darauf aufgebrachteter wetterfester Beschirmung aus Silikonelastomer, mit großem Interesse verfolgt.

Mit Einführung der Verbund-Hohlisolatoren ist das Thema „Wasserdampfdichtigkeit“ – zunächst für luft- und gasgefüllte Geräteisolatoren – erneut ins Interesse der Betreiber gerückt. Die dazu eingesetzten organischen Materialien sind nämlich grundsätzlich wasserdampfdurchlässig. Außerdem fehlte es an ausreichender Langzeiterfahrung über die Menge der über Verbund-Hohlisolatoren zusätzlich in die Gasfüllung eingetragenen Feuchtigkeit (Erläuterungen dazu siehe Anhang 8.6). Grundsätzlich ist die potenziell höhere Wasserdampfdurchlässigkeit von Verbundisolatoren, jedoch auch bei öl-papierisolierten Hochspannungswandlern, einer näheren Betrachtung wert. Die für das Forschungsprojekt angefertigten sechs Probanden mit verschiedenen Gehäuseausführungen boten die Gelegenheit, allfällige Unterschiede im zeitlichen Verlauf ihrer Wasserkonzentrationen im Öl während der Projektdauer zu erfassen (siehe Abbildung 40) und zu analysieren.

Die Feuchtemessungen erfolgte vor Ort mittels Karl-Fischer-Methode nach EN 60814 und ist laut dieser für H₂O-Konzentrationen über 2 mg/kg geeignet. Aufgrund der niedrigen Messbereiche bei unseren Probanden wurde die Einwaage entsprechend erhöht, um gesicherte Werte zu erhalten. Jedes Ergebnis der H₂O-Messungen ist ein Mittel aus 3-5 Einzelmessungen. Die höchsten Abweichungen vom Mittelwert lagen bei +/- 0,2 - 0,3 mg/kg.

Die sechs Probanden waren im Laufe der Projektdauer unter unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen im Freien, im Innenraum sowie im Trockenofen aufgestellt (Tabelle 18). Während der Projektphase 6 wurde die Luftfeuchtigkeit im Trockenofen rund 2 Wochen auf relative Luftfeuchten über 50 % erhöht und die Temperatur auf 40 °C gehalten, um verschärfte Umgebungsbedingungen zu simulieren.

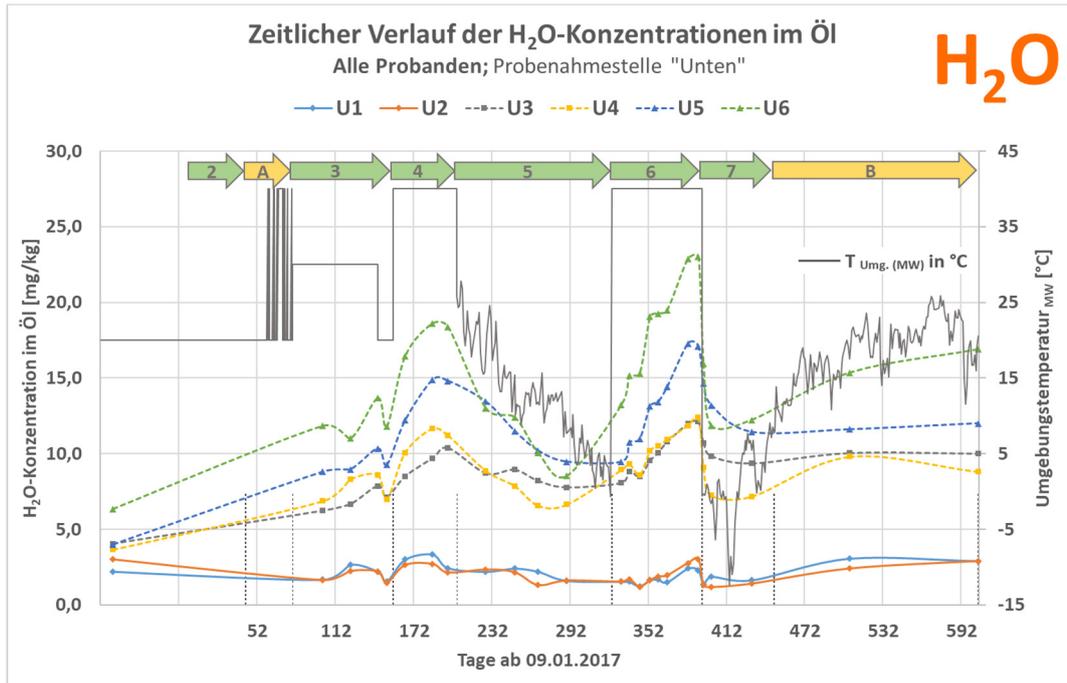


Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der H₂O-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“)

Auf den ersten Blick zeigen die Zeitreihen der Ölfeuchten für die sechs Probanden in Abbildung 40 auch tatsächlich gravierende Unterschiede. Unter Berücksichtigung ihrer individuellen Ölmassen relativieren sich diese jedoch wieder, so dass sich beispielsweise die absoluten Wasserzunahmen der Öle nach der 600-tägigen Beobachtungsdauer für die Probanden 3, 4, 5, und 6 nur wenig unterscheiden (Tabelle 20). Bei den Probanden mit eingebauten Aktivteilen werden allfällige Feuchtigkeitseinträge von der Umgebung in das freie Ölvolumen größtenteils von der hygroskopischen Papierisolierung sorbiert. Die Differenz der Ölfeuchten zwischen Anfang und Ende der Beobachtungsdauer lässt daher bei den Probanden 1 und 2 keine Rückschlüsse auf die gesamte Wasserzunahme dieser Probanden während der Projektdauer zu.

Tabelle 20: Veränderung der anfänglichen Ölfeuchten bis zum Projektende

Proband	X_{Anfang}	X_{Ende}	ΔX	$m_{\text{öl}}$	Δm_{Wasser}
	mg H ₂ O/kg Öl	mg H ₂ O/kg Öl	mg H ₂ O/kg Öl	kg	mg
1	2,2	2,9	0,7	91,9	-
2	3,0	2,9	-0,1	81,9	-
3	4,1	10,0	5,9	113,9	672
4	3,7	8,8	5,1	103,9	530
5	4,0	12,0	8,0	55,9	447
6	6,4	16,9	10,5	45,9	482

In den Probanden 3, 4, 5 und 6 sind zwar keine Aktivteile, aber immerhin noch zwei kleine Hartpapierrohre mit einem Gesamtgewicht von 80 g als Träger für die Temperaturfühler eingebaut (siehe Abbildung 33). Obwohl diese Masse verglichen mit den Massen der Ölfüllungen sehr gering ist, könnte das Hartpapier bei einer Feuchtezunahme von beispielsweise 0,5 Prozentpunkten bereits rund 400 mg Wasser sorbieren. Da die tatsächliche Feuchtezunahme der Hartpapierrohre jedoch nicht bekannt ist, kann aus den ermittelten Zunahmen der Ölfeuchte nach Tabelle 20 auch nicht mehr auf die aus der Umgebung insgesamt in den Wandler permeierte Wassermenge geschlossen werden.

Angenommen, dass während der 600-tägigen Beobachtung $\frac{2}{3}$ der aus der Umgebungsluft eingetragenen Feuchtigkeit im Öl verbleiben und $\frac{1}{3}$ vom Hartpapier sorbiert werden, könnte die insgesamt eingetragene Wassermasse mit maximal 1.000 mg angenommen werden ($\frac{3}{2} \times 672$ mg). Diese Annahme stimmt einigermaßen mit dem Ergebnis eines deutschen Forschungsprojekts der „Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen - AGI“ [7] überein. In diesem wurde der Wassereintrag in luftgefüllten Verbund-Hohlisolatoren über die Gewichtszunahme eines, in das Isolatorvolumen eingebrachten, Trockenmittels experimentell untersucht. Die periodischen Wägungen erfolgte mit einer eingebauten Messzelle mit Dehnmessstreifen. Dabei wurden aus den Messergebnissen für Verbund-Hohlisolatoren mit ähnlichen Abmessungen wie im gegenständlichen Forschungsprojekt auf eine maximale Wasserdampfpermeation von rund 13 g in 25 Jahren (bei 40 °C und 50% R.F) hochgerechnet (worst case). Wenn man diese Daten auf die Beobachtungsdauer von 600 Tagen im gegenständlichen Forschungsprojekt umrechnet, so würde sich eine Wasserdampfpermeation von 0,85 g für die Probanden ergeben.

Aus Tabelle 20 wird auch ersichtlich, dass an den Probanden mit Verbundisolatoren keine höhere Feuchteaufnahme festgestellt wurde als bei Porzellanisolatoren. Experimentelle Untersuchungen an Verbund-Hohlisolatoren [6] haben außerdem gezeigt, dass die Permeationsraten beträchtliche Streuungen aufweisen, so dass eine so geringe Anzahl von Probanden wie im gegenständlichen Forschungsprojekt keine gesicherten Aussagen zulässt. Wenn die Aktivteile von Hochspannungswandlern ordnungsgemäß auf niedrige Restfeuchten getrocknet wurden, sind Wassereinträge, wie sie von der AGI in [7] angegeben werden, aber ohnehin unerheblich. So würde ein H₂O-Eintrag von beispielsweise 25 g in 25 Jahren den Feuchtegehalt einer Papiermasse von rund 10 kg, wie sie für einem 110 kV-Wandler anzunehmen ist, lediglich um 0,25 Prozentpunkte erhöhen. Bei gut vorge-trockneten Geräten mit Restfeuchten < 0,5 % wäre die Papierfeuchte dann immer noch kleiner als (ungefährliche) 1 % (siehe Abbildung 41). Somit ist anzunehmen, dass die Wasserdampfpermeation von Verbundisolatoren kein zusätzliches Risiko für die Betriebssicherheit von Hochspannungswandlern darstellt und nur im Falle erheblicher Beschädigungen des Wandlergehäuse zu beachten wäre. Wasser entsteht jedoch auch durch die Öl- und Papieralterung, so dass bei älteren Hochspannungswandlern gelegentliche Untersuchungen der Ölfeuchtigkeit zu empfehlen sind.

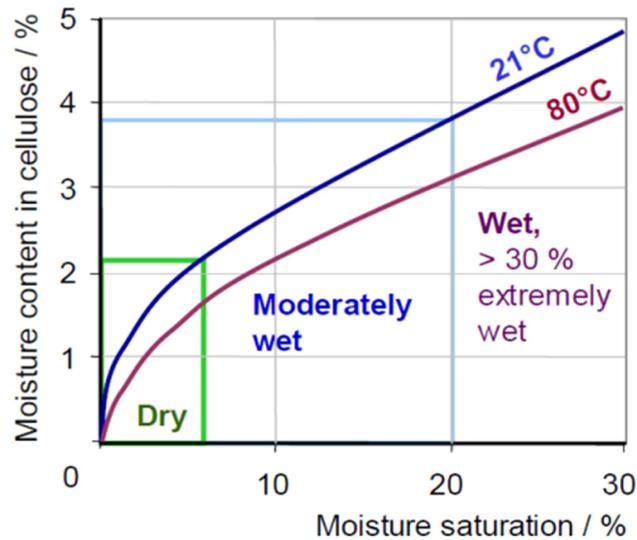


Abbildung 41: Gleichgewichtsdiagramm auf Basis der Wassersättigung im Öl mit Grenzen nach IEC 60422 (aus [9])

Bei den Probanden ohne Aktivteile (Probanden 3 - 6) wird in Abbildung 40 auch der signifikante Temperatureinfluss auf den Feuchtegehalt im Öl ersichtlich. Temperaturerhöhungen haben merkliche Erhöhungen der Ölfeuchtigkeiten zur Folge, die jedoch nach anschließender Temperaturabsenkung nahezu wieder auf die Ausgangswerte zurückgehen. Aus diesem Verhalten folgt, dass es sich dabei nicht um Feuchteintrag durch Wasserdampfpermeation handelt, sondern um interne Sorptions- und Desorptionsprozesse. Mit zunehmender Temperatur wird dabei das, an den Oberflächen des Adsorbens (Papier, Epoxidharz etc.) festgehaltene Adsorbat, d.h. in diesem Fall Wassermoleküle, wieder freigelassen (desorbiert). Durch den dämpfenden Einfluss der Papierisolierung sind diese Vorgänge in stark abgeschwächter Form auch bei den Probanden 1 und 2 in Abbildung 40 erkennbar.

Der Proband 5 hat mit dem Porzellanisolator, den beiden Hartpapierrohren und der kleinen, bodenseitigen Durchführungsplatte von allen Probanden die wenigsten bzw. kleinsten Flächen, an denen Permeation bzw. Adsorption und Desorption auftreten können. Weitere Permeationswege werden im Abschnitt 8.6 diskutiert. Während der 2. Aufheizphase mit hohen Luftfeuchten (bis zu 55 %) im Trocknungsofen (Projektphase 6) steigt seine Ölfeuchte binnen 10 Wochen um etwa 8 mg/kg Öl bzw. insgesamt um etwa 350 mg H₂O an (Abbildung 42). Wegen der weitgehend konstanten Temperatur erfolgt in dieser Periode kein nennenswerter Austausch des Öls im Wandler mit dem Öl im Dehnelement, so dass die Feuchte nur im Wandleröl ansteigt. Das wird in Abbildung 42 (Messpunkt in Projektphase 6) am großen Unterschied der Ölfeuchten im Wandler und dem Öl im Dehnelement veranschaulicht. An den Probenahmestellen „Oben bzw. „Unten“ sind die gemessenen Wassermengen hingegen praktisch ident. Wie aus der Messung während der Projektphase B erkennbar ist, gleichen sich die Ölfeuchten im Wandler und Dehnelement nach längerfristigen Perioden mit häufigen Temperaturzyklen wieder einander an. Außerdem sinkt die Ölfeuchte innerhalb weniger Wochen nach dem Erwärmungslauf mit hoher Luftfeuchtigkeit beinahe wieder auf den Wert vor dieser Belastung ab. Die Erhöhung der Ölfeuchte ist somit kaum nachhaltig und ist daher auf Desorptionsprozesse des Wassers u.a. von den Hartpapierrohren und der Durchführungsplatte zurückzuführen.

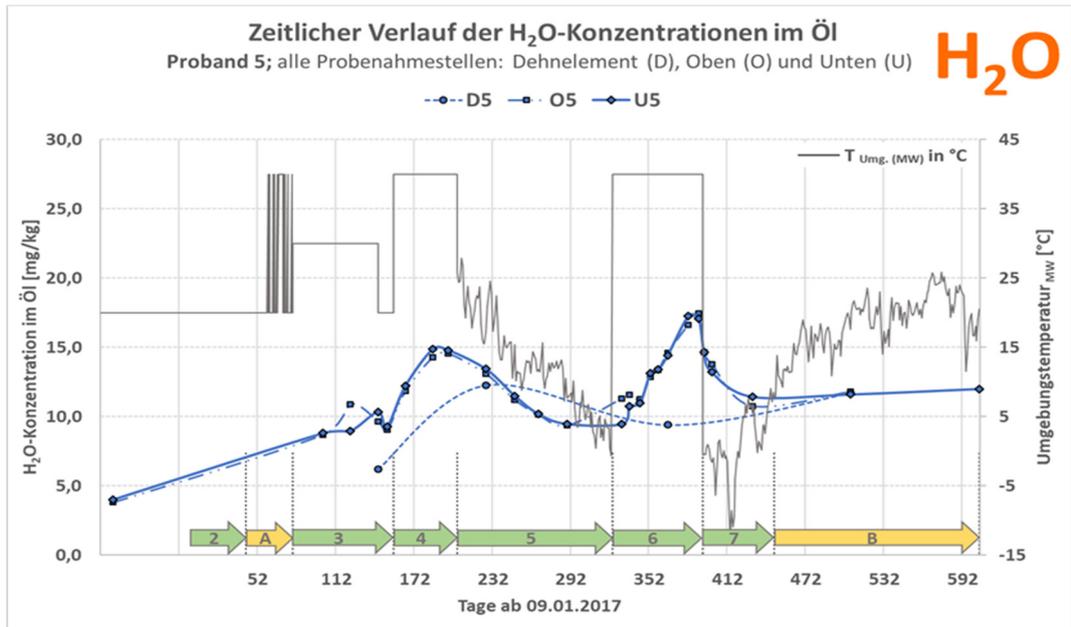


Abbildung 42: Zeitlicher Verlauf der H_2O -Konzentrationen im Öl von Proband 5 (alle Probenahmestellen)

Der Proband 3 hat im Vergleich zu Proband 5 ein zusätzliches Fußteil (Aluminiumkessel) mit einer etwas größeren Durchführungsplatte aus Gießharz und der etwa 2,3-fachen Ölmenge im Wandler. Der Anstieg der relativen Ölfeuchte während der Projektphase 6 ist etwa halb so groß wie beim Probanden 5 (Abbildung 43), was etwa dem Verhältnis der Ölmassen entspricht. Die temporären Zunahmen der gesamten Wassermasse im Öl dieser Probanden sind somit annähernd gleich groß. Daher ist anzunehmen, dass die innere, poröse Oberfläche des gegossenen Aluminium-Fußteiles als temporäre Quelle bzw. Senke für den Wasseraustausch mit dem Öl nur eine untergeordnete Rolle spielt.

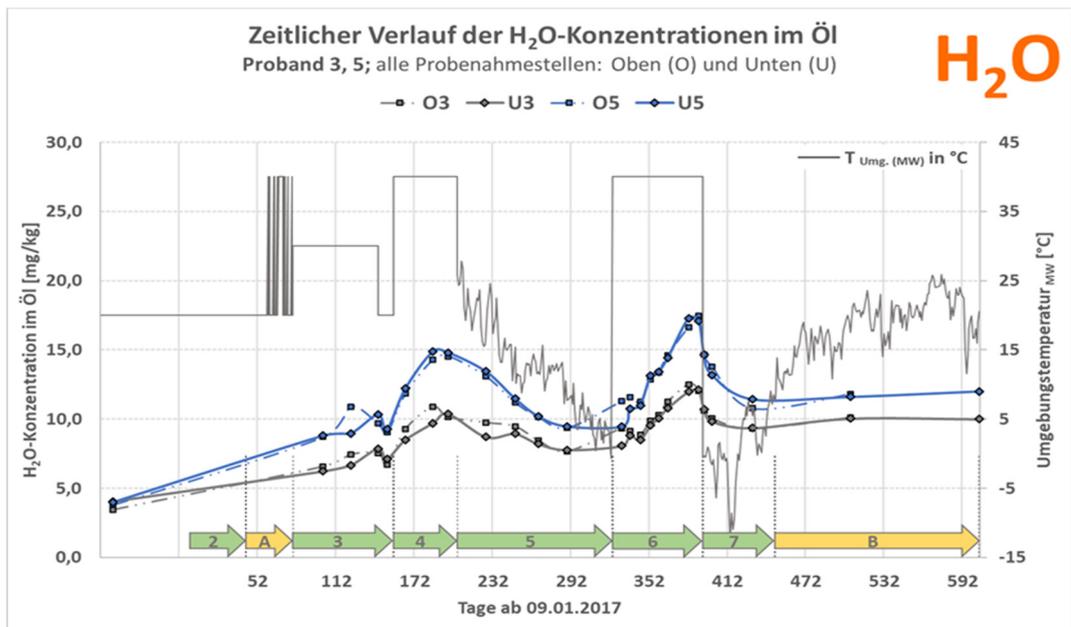


Abbildung 43: Zeitlicher Verlauf der H_2O -Konzentrationen im Öl der Probanden 3 und 5 (Probenahmestellen „Oben“ u. „Unten“)

Der Unterschied zwischen den Probanden 5 und 6 besteht darin, dass Proband 6 mit einem Verbundisolator ausgeführt ist, der im Gegensatz zu Porzellan an seiner Oberfläche Wasser adsorbieren kann. Durch die schlankere Bauform ist er mit etwa 25 % weniger Öl¹⁹ gefüllt (Tabelle 11) und hat durch das GFK-Rohr insgesamt eine bedeutend größere Fläche für Permeations-, Adsorptions- und Desorptionsprozesse. Der Anstieg der Ölfeuchte (+16 mg/kg Öl) wie auch der gesamten Wasserzunahme im Wandleröl (+530 mg) in der Projektphase 6 (Abbildung 44) ist eindeutig höher als bei Proband 5 (Abbildung 42). Auch der Abfall der Ölfeuchte nach Ende des Erwärmungslaufs und Abkühlung des Probanden 6 um etwa 40 K verläuft viel steiler als bei Proband 5. Diese Verhältnisse sind teilweise auf die kürzeren Abkühlzeiten der Probanden mit Verbundisolatoren zurückzuführen. Wahrscheinlich sind jedoch vorwiegend Adsorptions- und Desorptionsvorgänge an der großen Innenfläche des Isolators maßgeblicher dafür, da Epoxidharz bis zu einigen Gewichtsprozenten Wasser lösen kann. Zusätzlich ist zum Unterschied zu Probanden 5 auch erkennbar, dass die Ölfeuchte bei der Probenahmestelle „Oben“ etwas höher ist als jene „Unten“ und dass sich diese Verhältnisse bei der Abkühlung umkehren. Dieser Effekt ist vielleicht darauf zurückzuführen, dass das erwärmte Öl beim Aufsteigen durch die Desorptionsvorgänge am Isolatorrohr etwas befeuchtet wird und dass sich dieser Prozess beim Abkühlen bzw. Absinken des Öls wieder umkehrt.

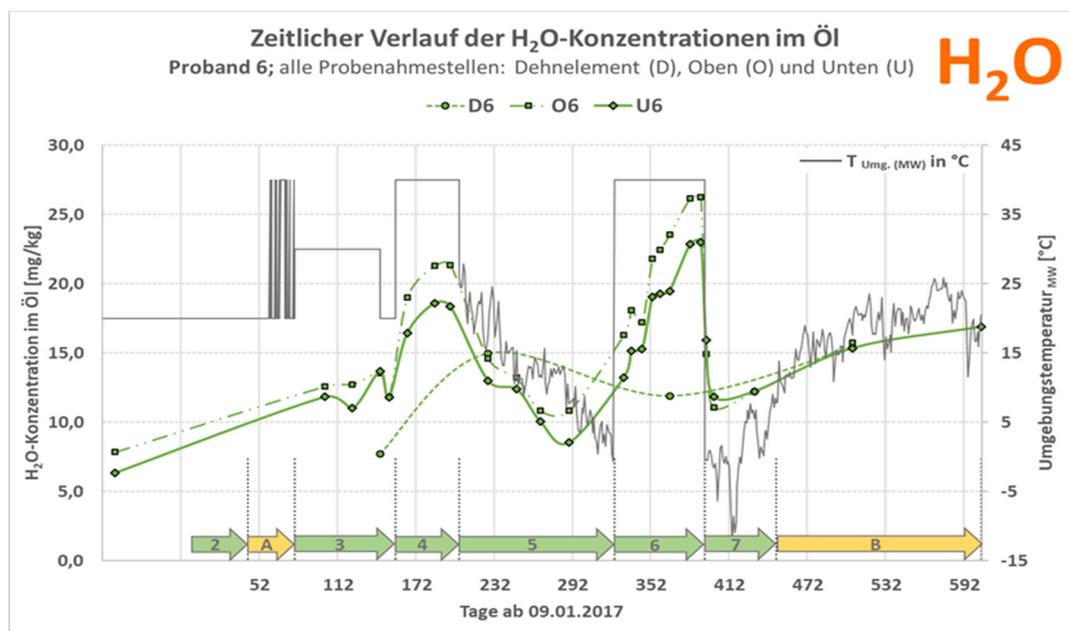


Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf der H₂O-Konzentrationen im Öl von Proband 6 (alle Probenahmestellen)

¹⁹ Bezogen auf das Ölvolumen im Wandler, d.h. ohne Berücksichtigung des Ölvolumens im Dehnelement.

4. Wandler mit realem Fehler (WmRF) – Vergleiche mit Proband 2

Bereits vor Beginn des Forschungsprojekts stand ein 123 kV-Stromwandler (WmRF)²⁰, der wegen starker Gasentwicklung nach wenigen Betriebsjahren außer Betrieb genommen wurde, für umfangreiche Zeitreihen der Spaltgaskonzentrationen zur Verfügung.

4.1. Beschreibung des Wandlers und seiner Vorgeschichte

Der 123 kV-Stromwandler (Baujahr 2007) mit Verbundisolator und vollinhibiertem Nynas Nytro 4000X als Isolieröl wurde erst nach 2011 in Betrieb genommen. Bereits die erste routinemäßige Gas-in-Öl-Analyse am 30. Juli 2015 ergab stark überhöhte Wasserstoff-, Ethin- und Ethenwerte sowie eine mäßig erhöhte Methankonzentration. Ethan war nur leicht erhöht und lag unter den maximal zulässigen Werten für geschlossene Messwandler lt. EN 60599: 2016, Tabelle A.7. Die Konzentrationen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid lagen im Bereich der vor der Inbetriebnahme festgestellten Werte und erreichten ebenfalls nicht die Werte der o.a. Tabelle A.7. Da Ethin nur bei Lichtbogen- und Funkenentladungen bzw. bei sehr hohen Temperaturen vom Öl abgespalten wird, wurde der Wandler sicherheitshalber umgehend außer Betrieb genommen.

4.2. Zeitlicher Verlauf der Gaskonzentrationen

Um den Einfluss von Umgebungstemperaturänderungen auf die Gaskonzentrationen im Isolieröl langfristig verfolgen zu können, wurde der Wandler nach der Außerbetriebnahme im Sommer 2015 über mehr als 1000 Tage abwechselnd bei konstanten Temperaturen im Trockenofen sowie bei täglich bzw. saisonal wechselnden Temperaturen im Freien aufgestellt. Dabei sorgten insgesamt 81 Gas-in-Öl-Analysen für eine engmaschige Aufzeichnung der Spaltgaskonzentrationen. Davon wurden drei Ölproben aus dem Dehnelement gezogen, um diese mit dem Öl aus der Probenahmestelle im Wandler-Fußteil vergleichen zu können. Die Abbildung 45 zeigt die Entwicklung der Gaskonzentrationen im Isolieröl (Entnahmestelle „Unten“) in normalisierter Darstellung mit den Bezugswerten vom 30.07.2015.

Die Bezugswerte für die normalisierten Darstellungen aller Diagramme in diesem Kapitel sind der Tabelle 21 zu entnehmen.

Tabelle 21: Bezugswerte für die normalisierte Darstellung der Gaskonzentrationen und Quotienten für den Stromwandler (WmRF)

		Bezugswerte [µl/l] für normalisierte Diagramme (Entnahmestelle „Unten“)						
Bezugsdatum	Proband	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
30.07.2015	WmRF	2208	59	379	108	769	90	11

²⁰ Für diesen Wandler mit einem realen Fehler wird im Weiteren die Abkürzung „WmRF“ verwendet.

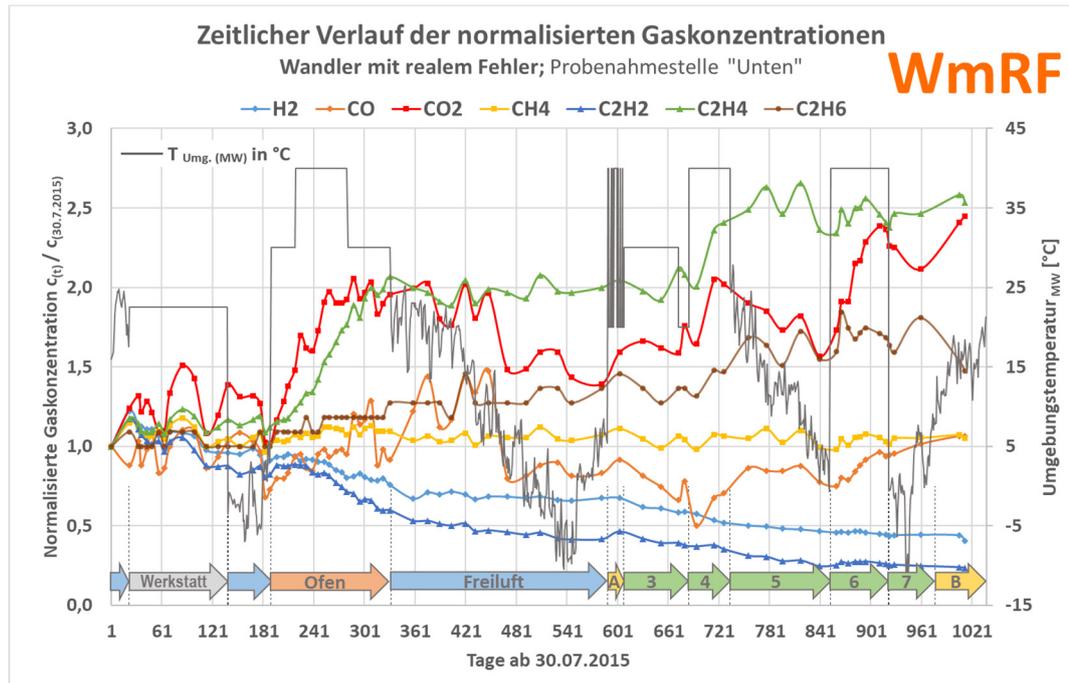


Abbildung 45: Zeitlicher Verlauf der normalisierten Konzentrationen aller Gase für einen Wandler mit realem Fehler (WmRF)

4.3. Vergleiche von Untersuchungsdaten für WmRF und Proband 2

Durch den Vergleich der Zeitreihen der Gas-in-Öl-Konzentrationen für den WmRF und den Probanden 2 ist grundsätzlich überprüfbar, inwieweit die Erkenntnisse aus Untersuchungen an Fehlernachbildungen für alltägliche Diagnosen nutzbar sind. Dadurch, dass der Fehler und somit die Gasproduktion beim WmRF – wie sich bei der Zerlegung herausstellte – unter einem dicken Papierwickel situiert war, ergab sich ein zusätzlicher Mehrwert. Damit liegen nämlich zwei unterschiedliche Fehlersituationen für die Datenvergleiche vor. Bei den Probanden wurden die, für die Fehlerart „D1“ charakteristischen, Spaltgase direkt in das freie Ölvolumen eingebracht und gut verteilt, so dass Konzentrationsänderungen weitgehend auf Sorptionseffekte des Aktivteils und auf allfällige Permeationen durch ihr Wandlergehäuse rückführbar sind. Beim WmRF sind die Verhältnisse etwas komplizierter, da die am Fehlerort erzeugten Gase erst durch eine dicke Öl-Papierisolierung diffundieren bzw. permeieren müssen, um - lokal begrenzt - ins freie Öl zu gelangen. Dabei spielen Permeations- bzw. Diffusionskoeffizienten eine Rolle und ebenso die Dauer, bis eine akzeptable Durchmischung der Gase im Öl erreicht wird.

Für den Vergleich der Untersuchungsergebnisse wurde der Proband 2 ausgewählt, da er so wie der WmRF mit einem Verbund-Hohlisolator ausgeführt ist. Anzumerken ist noch, dass beim WmRF, einem 123 kV Kopfstromwandler, der Großteil der Papiermasse im Kopfbereich situiert ist, beim Probanden 2, einem 123 kV Spannungswandler, hingegen im Fußteil. Die Einflüsse dieser „selektiven Gassenken“ waren allerdings nicht überprüfbar, da der WmRF im Kopfbereich keine Ölentnahmestelle hatte.

Die Fehlerstelle des Stromwandlers befand sich bei der Verschraubung des Durchführungsrohrs mit der Kernschale. Darüber liegt eine starke Öl-Isolierpapierisolierung, die für das Foto in Abbildung 46 aber bereits entfernt wurde. Fehlerursache war eine schlechte

Kontaktierung des Durchführungsrohres mit der Kernschale, die Funkenentladungen im Bereich der Verschraubung verursachte. Dabei dürften lokal begrenzt hohe Temperaturen²¹ aufgetreten sein, wie die Ablagerungen von Kohlenstoffpartikeln am Gewinde und am Schneidring zeigen (Abbildung 46). Der bereits entfernte Papierwickel über der Fehlerstelle war jedoch nicht pyrolytisch zersetzt, womit starke Übererwärmungen (> 300 °C) an der Fehlerstelle auszuschließen sind. Zuzufolge dieses visuellen Befundes handelt es sich um die Fehlerart „D1“ (Entladungen mit niedriger Energie).



Abbildung 46: Starke Überhitzung im Bereich der Verschraubung des Durchführungsrohres mit der Kernschale des Stromwandlers. Über dieser Schadensstelle befindet sich im Originalzustand ein dicker Isolierpapierwickel.

Der Vergleich der Konzentrationsverläufe zeigt für einige Gase gute Übereinstimmung zwischen dem WmRF und dem Probanden 2, für andere Gase hingegen ein konträres Verhalten. Nachstehend werden die Übereinstimmungen bzw. Unterschiede für die individuellen Gase beschrieben sowie die möglichen Ursachen der Diskrepanzen diskutiert.

4.3.1. Vergleich der Wasserstoffkonzentrationen (c_{H_2}) für WmRF und Proband 2

Die H_2 -Konzentration ist beim WmRF während der Aufstellung über rund 1000 Tage auf etwa 40 % ihres Ausgangswertes gesunken. Dieses Verhalten zeigt relativ gute Übereinstimmung mit den Analysewerten von Proband 2, wenngleich dessen H_2 -Konzentration noch etwas stärker abgefallen ist (Abbildung 47). Für die beiden Zeitreihen wurden auch exponentielle Näherungskurven berechnet. Aus diesen ist zu schließen, dass die H_2 -Konzentration etwa 5 Jahre nach Eintritt eines Fehlers, der anschließend nicht mehr aktiv ist, auf 20-25 % des Ausgangswertes absinken könnte.

²¹ Lt. EN 60599 entstehen Kohlenstoffteilchen bei Temperaturen von 500 - 800°C. Ethin erfordert Temperaturen von mindestens 800° - 1200°C, entsteht in geringen Mengen auch bei Temperaturen < 800°C

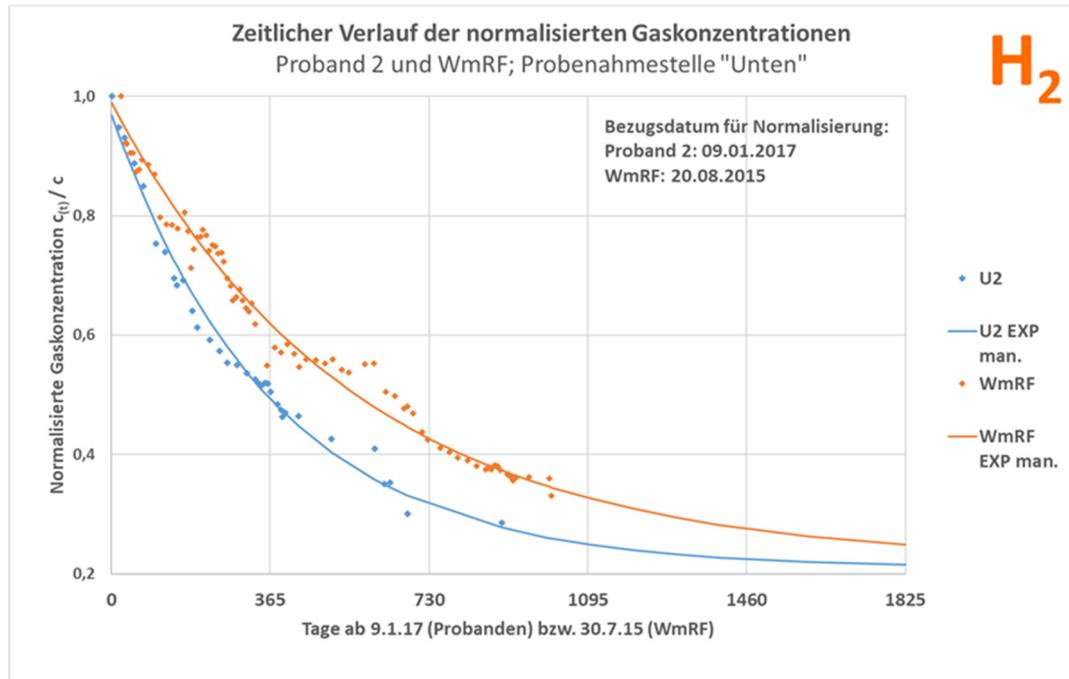


Abbildung 47: Zeitreihen der H₂-Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2

4.3.2. Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentration (c CO) für WmRF und Proband 2

Die CO-Konzentration weist beim WmRF während des Beobachtungszeitraums beträchtliche Schwankungen von $\pm 50\%$ auf, deren Ursache nicht geklärt werden konnte. Die CO-Konzentration war allerdings vor dem Fehlereintritt auf einem niedrigen Niveau, d.h. teilweise nahe an der Bestimmungsgrenze und wurde durch den Fehler auch kaum erhöht. Ein Vergleich mit den CO-Konzentrationen des Probanden 2 ist daher nicht zielführend.

4.3.3. Vergleich der Kohlendioxidkonzentration (c CO₂) für WmRF und Proband 2

Beim Probanden 2 wurde ein kontinuierlich abfallender Trend der CO₂-Konzentration im Öl festgestellt, der zwischenzeitlich bei länger andauernden Temperaturerhöhungen durch Desorptionsvorgänge unterbrochen bzw. vorübergehend umgekehrt wurde (siehe Abschnitt 3.7.3, Abbildung 35). Konträr dazu steigt die CO₂-Konzentration im Öl des WmRF im Mittel laufend an. Länger andauernde Hitzeperioden führen jedoch zu deutlichen Zunahmen der CO₂-Konzentration, wogegen die CO₂-Werte in Kälteperioden abnehmen (Abbildung 48).

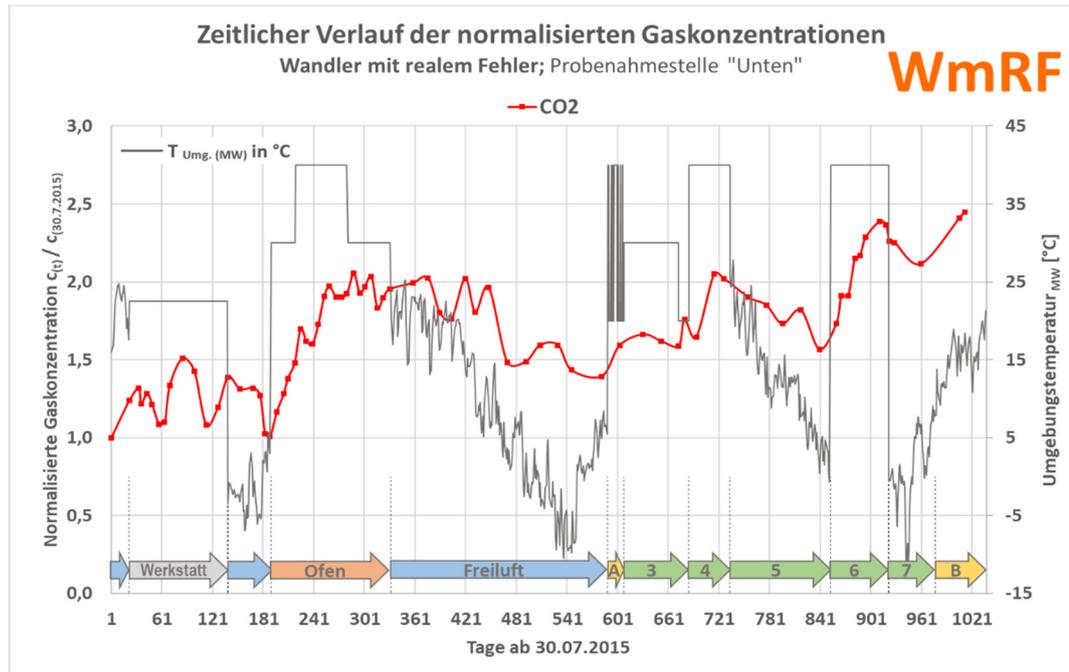


Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO₂-Konzentrationen für einen Stromwandler mit realem Fehler (WmRF)

Der intermittierende Anstieg lässt vermuten, dass das an der Fehlerstelle gebildete CO₂ zunächst in der umgebenden Öl-Papierisolierung angereichert wird und von dort – verzögert durch die Barrierewirkung der Öl-Papierlagen – ins freie Öl diffundiert. In diesem wird dann erst allmählich eine homogene Verteilung durch Diffusion und Konvektionsströmungen erreicht. Die auffälligen Konzentrationszunahmen im Öl bei Temperaturerhöhungen sind vielleicht damit erklärbar, dass Desorptions- und Diffusionsvorgänge mit zunehmender Temperatur beschleunigt werden. Die solchermaßen erhöhte CO₂-Konzentration im Öl wird durch Sorption der Papiermasse außerhalb des unmittelbaren Fehlerbereichs teilweise wieder abgebaut.

Die CO₂-Konzentration im Öl verringert sich vor allem bei sinkenden Temperaturen, wie z.B. während der Phase der Freiluftaufstellung oder während der Projektphase 7 ersichtlich wird (Abbildung 48). Ein ähnliches temperaturabhängiges Sorptions-/Desorptionsverhalten ist zwischen Papier und dem im Öl gelösten Wasser bekannt. Dieser Umverteilungsprozess des CO₂ von der Fehlerstelle in das freie Öl und in die Papiermasse außerhalb der Fehlerstelle war beim WmRF auch nach 1000 Beobachtungstagen offenbar noch nicht abgeschlossen, obwohl seit Beobachtungsbeginn kein Gas mehr produziert wurde. Dadurch wird evident, wie langsam Diffusions- und Umverteilungsprozesse in dicken Öl-Papierisolierungen ablaufen. Augenscheinlich sind dadurch Konzentrationserhöhungen einzelner Spaltgasen im Öl auch dann noch möglich, wenn die Gasproduktion, wie im vorliegenden Fall, schon lange zuvor durch die Außerbetriebnahme beendet war. Somit muss eine steigende Gaskonzentration im Öl nicht zwingend an einen aktiven Fehler gebunden sein.

4.3.4. Vergleich der Methankonzentration (c CH₄) für WmRF und Proband 2

Die CH₄-Konzentration blieb beim WmRF – mit geringfügigen Streuungen – während der gesamten Aufstellungsdauer konstant (Abbildung 45), wogegen beim Probanden 2 eine Reduktion um 20 % festzustellen war (Abbildung 36). Es ist anzunehmen, dass dieses Spaltgas beim WmRF nur an der gefundenen Fehlerstelle gebildet und zunächst in der

umgebenden Öl-Papierisolierung angereichert wurde, bevor es in das Öl diffundiert ist. Im Gegensatz zu CO₂ ist jedoch über die gesamte Beobachtungsperiode kein Anstieg der CH₄-Konzentration im Öl zu erkennen. Die genaue Ursache dafür ist nicht bekannt. Möglicherweise permeiert²² Methan jedoch erheblich langsamer durch die Öl-Papiersichten als Kohlendioxid, so dass bei der Umverteilung des CH₄ von der Fehlerstelle in die restliche Papiermasse während der gesamten Beobachtungsdauer keine Konzentrationserhöhungen im Öl auftraten.

4.3.5. Vergleich der Ethinkonzentration (c C₂H₂) für WmRF und Proband 2

Zum direkten Vergleich werden in der Abbildung 49 die Zeitreihen der C₂H₂-Konzentrationen im Öl des WmRF und des Probanden 2 in einem gemeinsamen Diagramm wiedergegeben. Im Mittel zeigen beide Zeitreihen einen sehr ähnlichen, stark fallenden Verlauf. Die Abweichungen der Messpunkte von den jeweiligen Näherungskurven (zeitweilige Konzentrationszunahmen) sind durch zeitweilige Temperaturerhebungen (C₂H₂-Desorption) bedingt. Die beiden Zeitreihen wurden jedoch zeitversetzt aufgenommen (siehe Anfangszeitpunkte im Diagramm), so dass die (nicht dargestellten) Temperaturprofile unterschiedlich sind. Daher treten auch die temperaturbedingten Abweichungen in den beiden Kurven nicht zeitsynchron auf. Am Ende des Beobachtungszeitraums, d.h. nach rund 3 Jahren lag die C₂H₂-Konzentration im Öl des WmRF nur noch bei rund 25 % des Anfangswertes und zeigt somit gute Übereinstimmung mit den Analysewerten von Proband 2. Im Öl wird sich somit – auch bei aktivem Fehler - der Ethinanteil am gesamten Gasgehalt ständig verringern und der Schwerpunkt zu jenen Gasen verlagern, die nur schwach vom Papier sorbiert werden.

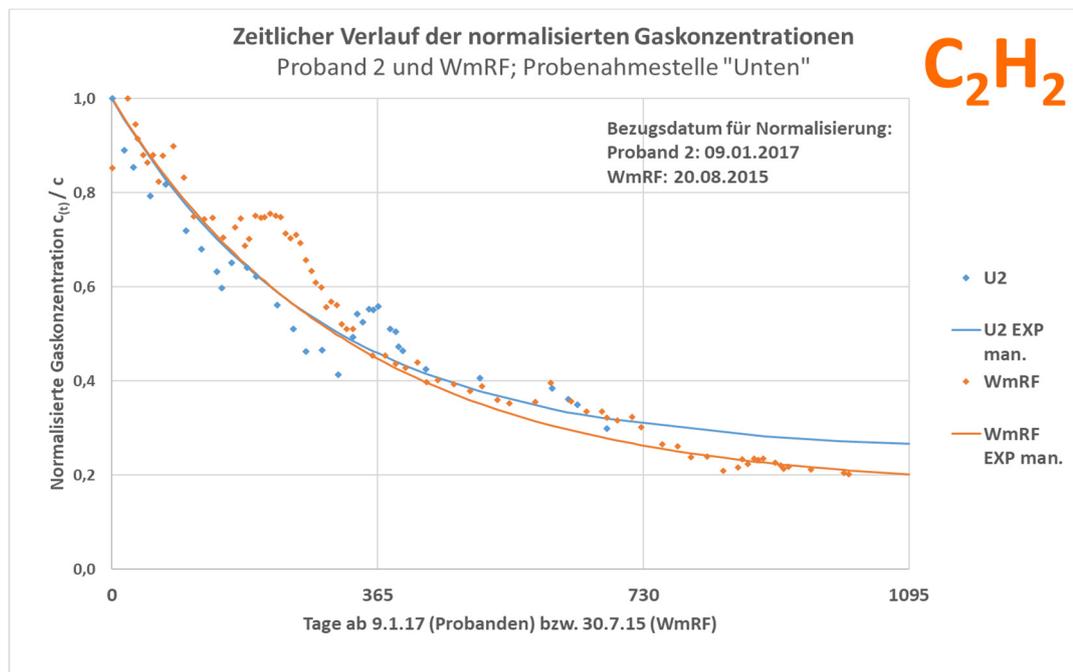


Abbildung 49: Zeitreihen der C₂H₂-Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2

²² Der Permeationskoeffizient P ist von der Löslichkeit und vom Diffusionskoeffizienten abhängig ($P = S \times D$). In einigen Polymeren sind die Permeationskoeffizienten von Kohlendioxid (CO₂) wegen seiner guten Löslichkeit (S) erheblich höher als von Methan (CH₄). Eventuell ist das auch bei Cellulose der Fall.

4.3.6. Vergleich der Ethenkonzentration ($c_{C_2H_4}$) für WmRF und Proband 2

Beim Probanden 2, bei dem das Ethen anfänglich nur im freien Öl vorhanden ist, wurde für die C_2H_4 -Konzentration im Öl ein schwach abfallender Trend infolge der Sorption durch das Isolierpapier festgestellt (etwa 25 % Abnahme nach 900 Tagen). Ausgeprägte Desorptionsvorgänge bei Temperaturerhöhungen, wie beim Kohlendioxid bzw. beim Ethen, waren beim Ethen aber nicht erkennbar (Abbildung 38).

Beim WmRF steigt hingegen die C_2H_4 -Konzentration im Öl, speziell während der Erwärmungsläufe mit $40\text{ }^\circ\text{C}$, jeweils sprunghaft an und erreicht nach 1000 Beobachtungstagen den 2,5-fachen Ausgangswert (Abbildung 50). Im Gegensatz zur CO_2 -Konzentration (Abbildung 48) war auch während längerfristiger Temperaturrückgänge kein Absinken der C_2H_4 -Konzentration festzustellen. Ursache dieses Unterschieds könnte eine geringere Sorptionsneigung des Papiers für Ethen sein. Zuzufolge der Fehlerart ist auch für dieses Gas anzunehmen, dass es nur an der Fehlerstelle innerhalb der Papierisolierung entstanden ist und – vielleicht erst nach Erhöhung der thermischen Energie ($40\text{ }^\circ\text{C}$) – mit höherer Masseströmung durch das Papier in das Öl diffundiert ist. Auch für dieses Gas ist nicht auszuschließen, dass der Umverteilungsprozess am Ende der Beobachtungsperiode noch nicht vollständig abgeschlossen war.

Es sei bereits an dieser Stelle erwähnt, dass auf diese Weise bei Gas-in-Öl-Analysen, die vor und nach einer Sommerperiode an einem Wandler mit inaktivem Fehler vorgenommen wurden, unterschiedliche Gasmuster (Gassing Patterns) festgestellt werden konnten. Die Einflüsse solcher Effekte auf die Interpretation der DGA wird noch ausführlich im Kapitel 5 diskutiert.

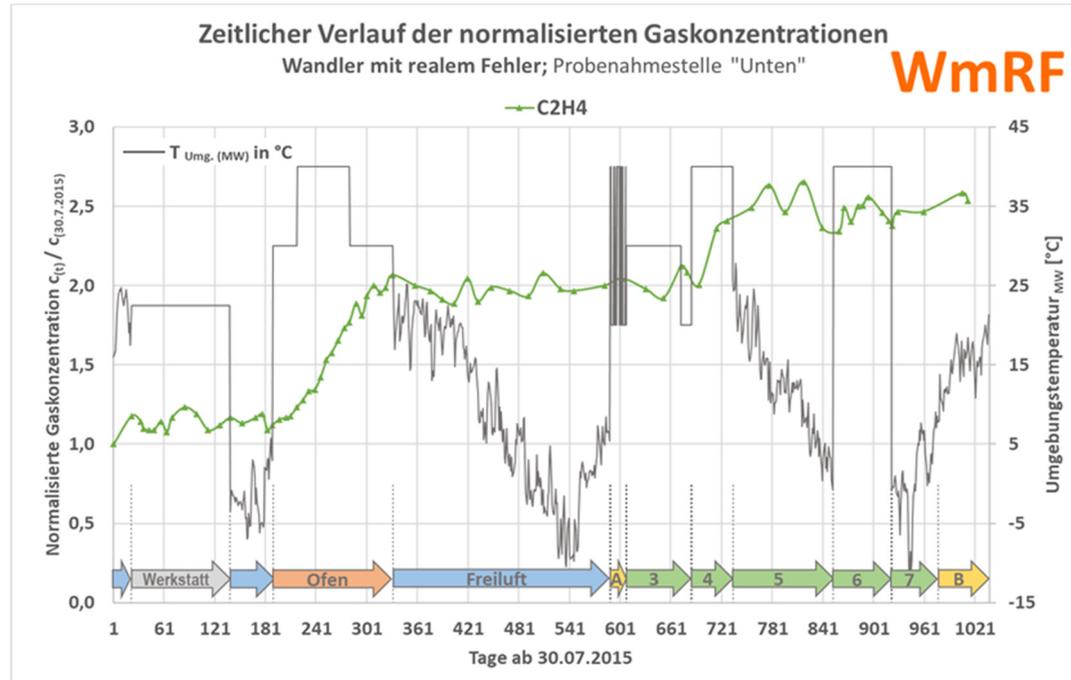


Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C_2H_4 -Konzentrationen für einen Stromwandler mit realem Fehler (WmRF)

Zum direkten Vergleich werden in der Abbildung 51 die Zeitreihen der C_2H_4 -Konzentrationen des WmRF und des Probanden 2 in einem gemeinsamen Diagramm wiedergegeben.

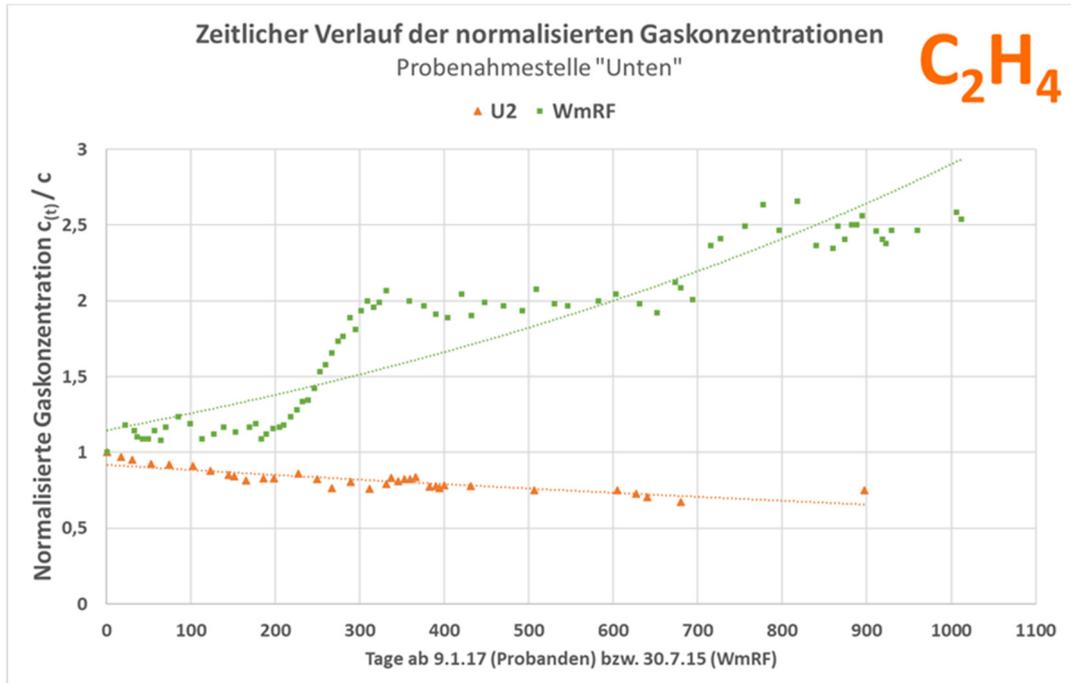


Abbildung 51: Zeitreihen der C₂H₄-Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2

Bei beiden Zeitreihen wird vom ersten Tag an kein Ethen mehr erzeugt. Dennoch steigt die C₂H₄-Konzentration bei WmRF aus den zuvor erläuterten Gründen weiter an, so dass man geneigt wäre, einen aktiven Fehler zu diagnostizieren. Aus den stark divergierenden Zeitreihen wird ersichtlich, wie schwierig die korrekte Beurteilung eines Fehlers – insbesondere aus einer Einzelmessung - ohne nähere Kenntnis seiner Position (im freien Öl bzw. unter Öl-Papierlagen) sein kann.

4.3.7. Vergleich der Ethankonzentration (c C₂H₆) für WmRF und Proband 2

Die Ethankonzentration stieg nach der Außerbetriebnahme von dem mit 11 ppm sehr niedrigen Anfangswert bis zum Ende der Beobachtungsdauer auf etwa 16 ppm an (Abbildung 52). Temperatureinflüsse waren dabei nicht erkennbar.

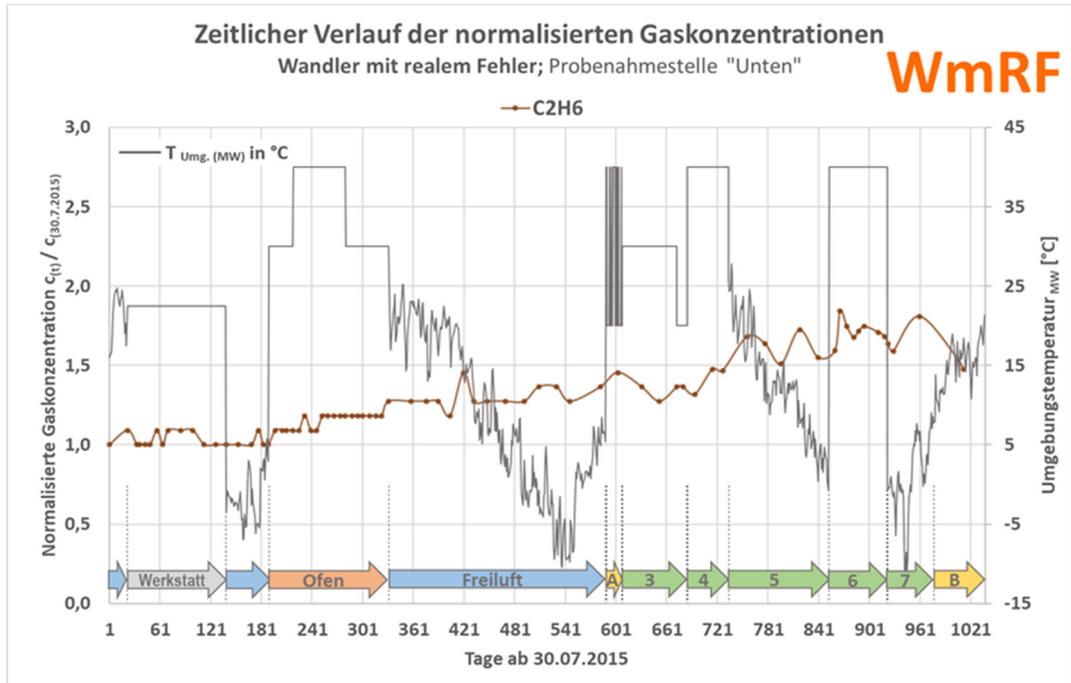


Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C_2H_6 -Konzentrationen für einen Stromwandler mit realem Fehler (WmRF)

Ungeachtet der niedrigen Konzentrationen ist ein Vergleich der Zeitreihen für den Probanden 2 mit dem WmRF interessant (Abbildung 53). Auch für dieses Gas führen die unterschiedlichen Positionen des Fehlers bzw. der Gasproduktion zu divergierenden Zeitverläufen der C_2H_6 -Konzentrationen.

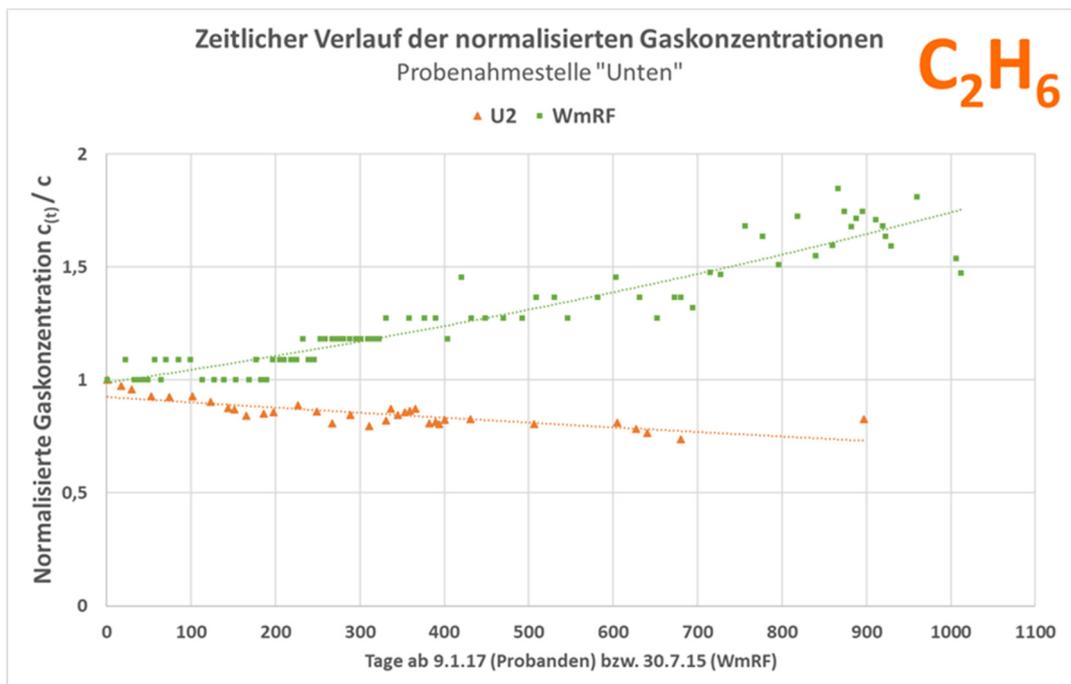


Abbildung 53: Zeitreihen der C_2H_6 -Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2

4.4. Erkenntnisse aus dem Vergleich von WmRF und Proband 2

Aus dem Vergleich der Zeitreihen der Gas-in-Öl-Analysen für zwei unterschiedlich situierte Gasquellen (innerhalb- bzw. außerhalb der Papierisolierung) ergeben sich einige neue Erkenntnisse. Zur Erläuterung werden die etwas unterschiedlichen Verteilungswege der Spaltgase eines gasproduzierenden Fehlers im freien Öl sowie eines Fehlers inner- oder unterhalb der Ölpapierisolierung in Abbildung 54 und in Abbildung 55 herangezogen.

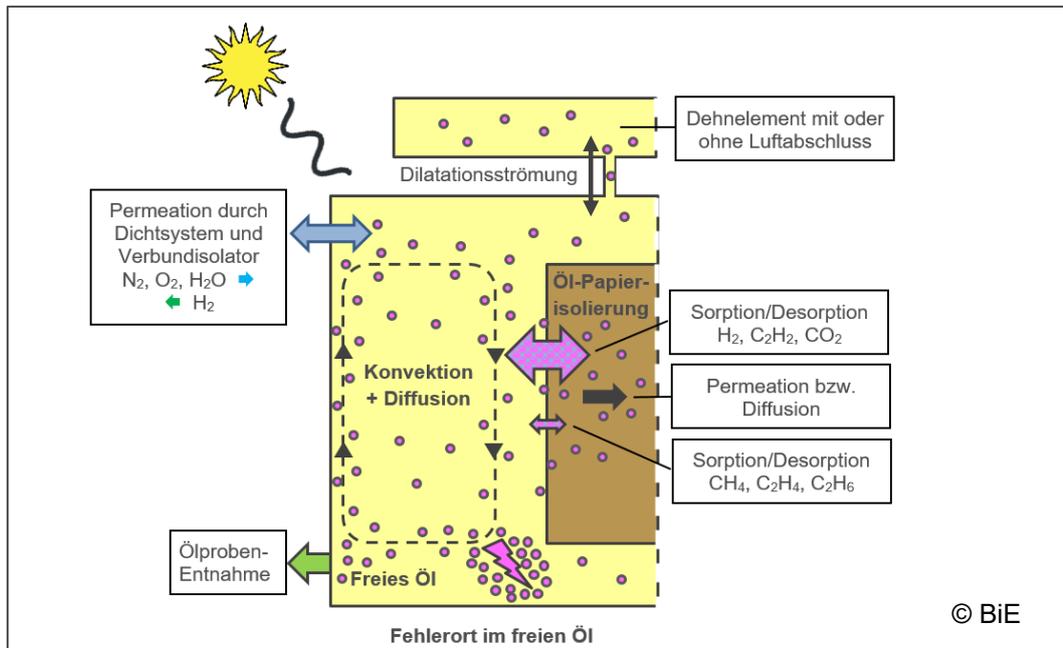


Abbildung 54: Verteilungswege von gelösten Gasen in mineralölgefüllten elektrischen Geräten bei einem Fehler im freien Öl

Manche Fehler, wie beispielsweise Kontaktmängel an Umschaltern von Transformatoren, oder fehlerhafte Kernerndungen bei Spannungswandlern erzeugen die Spaltgase - wie in Abbildung 54 dargestellt - direkt im freien Öl. Sofern die produzierten Gasbläschen nicht zu groß sind und daher während des Aufstiegens im Öl vollständig gelöst werden, erfolgt die weitere Verteilung der Spaltgase im freien Öl durch Diffusion sowie vor allem durch Konvektion. Wegen der geringen Eigenverluste von Messwandlern wird die Konvektion durch die Umgebungstemperatur und auch durch Sonneneinstrahlung maßgeblich bestimmt. Durch die temperaturbedingten Ausdehnungen und Kontraktionen des Isolieröls führen Dilatationsströmungen zum bzw. vom Dehnelement zur Vermischung der beiden getrennten Ölvolumina. Ohne Permeations- und Sorptions- (Papier) und Diffusionseffekte (Dehngefäß ohne Luftabschluss) würde daher nach einiger Zeit eine einigermaßen homogene Verteilung der Spaltgase im Isolieröl erreicht werden. Die Gaszusammensetzung in einer sorgfältig gezogenen Ölprobe wäre dann identisch mit jener an der Fehlerstelle.

Die Gas- und Wasserdampfpermeation durch das Dichtsystem und den Verbundisolator führt einerseits zur Anreicherung des Öls mit Umgebungsgasen und Wassermolekülen und andererseits dazu, dass leicht flüchtige Gase aus dem Öl in die Umgebungsluft entweichen. Aus den Untersuchungen an den Probanden ohne Papierisolierung war allerdings nur für Wasserstoff eine geringe Verminderung der Konzentration im Öl feststellbar. Das Isolierpapier hat hingegen offenbar die Eigenschaft, bestimmte Gase wie Wasserstoff, Kohlendioxid und Ethen sehr stark zu sorbieren. Kohlenmonoxid, Methan, Ethen und Ethan

werden ebenfalls sorbiert, aber eben wesentlich schwächer. Dieser Sorptionsprozess läuft relativ langsam ab, da die Diffusion der Spaltgase durch die Öl-Papiersichten dickerer Isolierungen längere Zeit in Anspruch nimmt. Das Gasmuster im freien Öl bzw. an der Probenahmestelle entspricht dann mit der Zeit immer weniger dem erzeugten Original-Gasgemisch. Dieser Effekt wirkt sich somit stärker aus, wenn die Gase nur durch einen kurzzeitig aktiven Fehler produziert werden und falls eine längere Zeitspanne zwischen dem Fehler-eintritt und der Probenahme liegt.

Tritt ein thermischer Fehler ohne Ausbildung von Funken im freien Öl auf, so dominieren die Anteile von Methan und Ethen. Durch die gewonnenen Erkenntnisse ist anzunehmen, dass sich auch längerfristig an den Proportionen dieser beiden Gase zueinander wenig ändert, da sie im ähnlichen Ausmaß von Papier sorbiert werden. Daher sollte eine korrekte Identifikation des zugrundeliegenden Fehlers problemlos möglich sein. Wenn jedoch Kontaktabbrand zu Funken- oder Lichtbogenentladungen führt, so werden auch Wasserstoff und Ethin produziert. Diese Gase können offenbar im beträchtlichen Umfang von Papier sorbiert werden. Es hängt dann von einigen Parametern ab, wie stark sich die anteilige Gaszusammensetzung im Öl an der Probenahmestelle von dem am Fehlerort produzierten Gasmuster unterscheidet. Bei intermittierender Fehleraktivität mit länger pausierender Gasentwicklung könnte der Unterschied erheblich werden. Solche Einflüsse erschweren selbstverständlich auch den Vergleich mit Erfahrungswerten aus Laboruntersuchungen an Fehlernachbildungen und damit auch eine korrekte Zuordnung der Fehlerart.

Für gasproduzierende Fehler unter der Öl-Papierisolation (Abbildung 55) unterscheidet sich der Gasverteilungsprozess gegenüber der vorangegangenen Beschreibung.

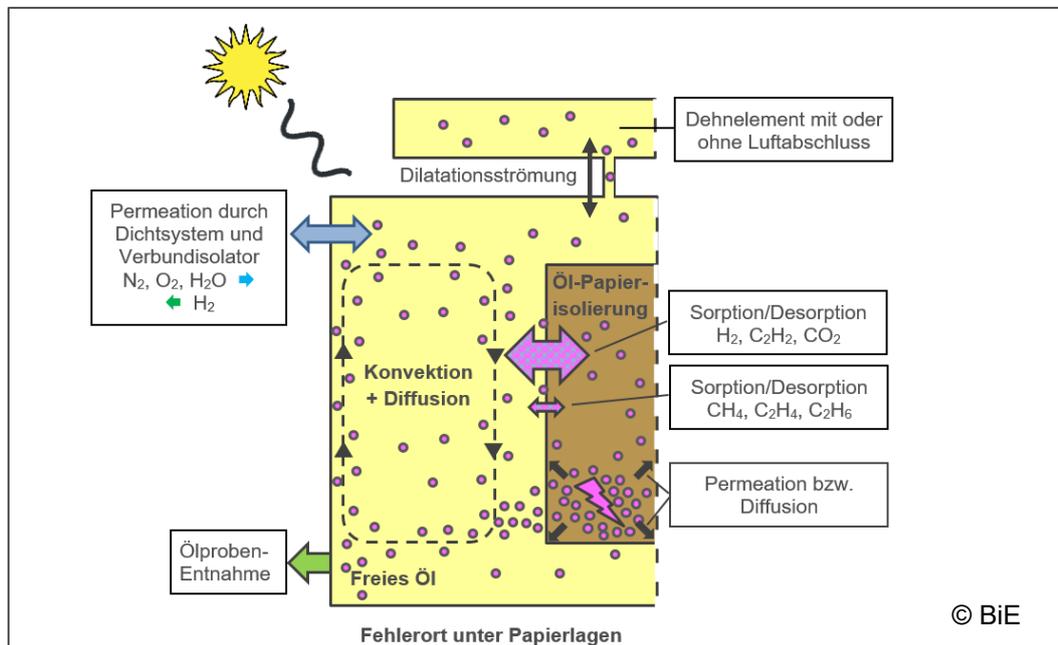


Abbildung 55: Verteilungswege von gelösten Gasen in mineralölgefüllten elektrischen Geräten bei einem Fehler in/unter der Öl-Papierisolation

In diesem Fall müssen die erzeugten Spaltgase erst durch die Öl-Papierisolation permeieren, um ins freie Öl zu gelangen. Aus verschiedenen Veröffentlichungen ist bekannt, dass kleine Moleküle wie beispielsweise Wasserstoff im Allgemeinen schneller durch Polymere

diffundieren als größere. Das durch ein Polymer je Zeiteinheit durchtretende Gasvolumen ist jedoch nicht nur vom Diffusions-, sondern zusätzlich vom Löslichkeitskoeffizienten abhängig. Dieser gibt an, wie gut sich ein Gas in einem Polymer löst. Das Produkt von Löslichkeits- und Diffusionskoeffizienten ergibt dann den, für den Gasdurchtritt maßgeblichen, Permeationskoeffizienten (siehe Abschnitte 8.4 und 8.5). Wegen der guten Löslichkeit von CO₂ in NBR (Nitril Butadien Rubber) ist beispielweise sein Permeationskoeffizient etwa gleich hoch wie von Wasserstoff, der zwar einen größeren Diffusions- aber einen kleineren Lösungskoeffizienten aufweist. Die Permeation von Gasen durch eine Vielzahl von Barrierschichten aus ölprägnierte Papierlagen mit Poren, Kapillaren und angrenzenden Ölfilmen ist wenig erforscht. Erfolgt jedoch die Gaspermeation durch ölprägniertes Papier nach vergleichbaren physikalischen Grundlagen, dann werden die molekulare Stofftransporte verschiedene Spaltgase unterschiedliche verlaufen. Das ölprägnierte Isolierpapier hätte somit gaselektive Barriereigenschaften. Dadurch werden sich die Gasgemische vor und hinter dieser Barriere, d.h. an der Fehlerstelle und im freien Öl, in Abhängigkeit vom Beobachtungszeitpunkt unterscheiden. Sollten beispielsweise Methan und Ethen relevant unterschiedliche Permeationskoeffizienten aufweisen, dann würde eine Heißstelle im freien Öl – je nach Zeitpunkt der Probenahme - zu anderen DGA-Werten führen als ein gleichartiger Fehler, der durch eine Papierisolierung vom freien Öl separierter ist.

Ein Teil der schneller von der Fehlerstelle ins freie Öl gelangten Gasmoleküle wird im Laufe der Zeit wieder von der Papiermasse abseits der Fehlerstelle sorbiert. Das gilt besonders für CO₂, H₂ und C₂H₂, die zufolge der Untersuchungsergebnisse schneller als andere Spaltgase vom Papier sorbiert werden. Wenn der Fehler, wie im vorliegenden Fall des untersuchten WmRF nicht mehr aktiv ist, können die Konzentrationen dieser Gase im Öl schon innerhalb einiger Wochen um 20 % reduziert sein. Abnehmende Tendenzen ihrer Konzentrationen sind aber auch bei intermittierenden Fehleraktivitäten möglich und daher nicht zwingend ein Indiz dafür, dass der Fehler gänzlich verschwunden ist. Sollten nun überdies andere Gase, wie das Ethen erheblich verzögert durch die Öl-Papierlagen ins freie Öl diffundieren, so kann die Kombination all dieser Effekte – je nach Zeitpunkt der Probenahme - die Fehlerzuordnung ändern. Dieser Effekt wird noch anhand gängiger Interpretations-schemata im Abschnitt 5 veranschaulicht.

Sollte die gegenwärtig noch unbekannt Gasaufnahme Kapazität der Papierisolierung nach längerer Fehleraktivität erschöpft sein, so könnten die H₂- und C₂H₂-Konzentrationen ab diesem Zeitpunkt im Verhältnis zu den anderen Spaltgasen wieder stärker ansteigen als zuvor. Bei Sorptionsvorgängen sind auch Verdrängungsprozesse vorstellbar, da die verschiedenen Gas- und Wassermoleküle unterschiedlich stark an die Porenflächen im Papier gebunden sind. Diese Überlegungen zeigen, dass bei der Bewertung von Gasanstiegsraten auch dieser potenzielle Einfluss in Betracht gezogen werden sollte.

Leider gibt es bisher zur Permeation verschiedener Gase durch dicke Öl-Papierbarrieren nur wenig verwertbare Daten. Ebenso ist das temperaturabhängige Sorptionsvermögen von ölprägniertem Papier für die wichtigsten Spaltgase unbekannt, so dass man zurzeit bei der Interpretation der Untersuchungsdaten vielfach auf Vermutungen angewiesen ist. Diesbezügliche Untersuchungen würden daher wertvolle Informationen liefern und solchermaßen nicht nur bei Messwandlern, sondern auch bei anderen Geräten zur Verbesserung der Treffsicherheit der DGA beitragen.

5. Interpretationsschema zur DGA - neue Erkenntnisse

5.1. Grundlagen und Übersicht über bisherige Erfahrungen

In elektrischen Geräten, die mit Isolierflüssigkeiten gefüllt sind, werden durch elektrische und thermische Fehler verschiedene Spalt- bzw. Zersetzungsgase gebildet. Das charakteristische Gasmuster (Gassing Patterns) und das produzierte Gasvolumen werden von der Fehlerart, von der an der Fehlerstelle umgesetzten Energie sowie von den dabei erreichten Temperaturen bestimmt. Fehler, die sich bezüglich dieser Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden, entwickeln daher Gasgemische mit charakteristischen Zusammensetzungen. Bei nicht zu heftiger Produktion lösen sich die generierten Gase vollständig in der Isolierflüssigkeit und die individuellen Konzentrationen können dann durch Gas-in-Öl-Analysen (DGA) bestimmt werden. In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedene Interpretationsschemata entwickelt, um aus den ermittelten Gasmustern die Art der vorhandenen Fehler in ölisolierten elektrischen Geräten abzuleiten. Populäre Schemata sind beispielsweise jene nach IEEE Std. C57.104 2019 [3], Rogers Ratios [10], Dörnenburg [11] sowie die Bewertung nach EN 60599 [2] oder mittels Duval-Dreieck [12]. Allen gängigen Schemata ist dabei gemeinsam, dass sie Kombinationen mehrerer Gase zur Interpretation der zugehörigen Fehlerklasse nutzen.

Auch bei Geräten ohne Fehler entstehen schon im normalen Betrieb geringe Mengen von Spaltgasen. Daher kann die Gas-in-Öl-Analyse erst dann sinnvoll für Diagnosen eingesetzt werden, wenn zumindest eine Gaskonzentration einen in den Leitständen der IEC oder der IEEE bzw. aus eigenen Erfahrungswerten definierten Schwellenwert überschreitet. In diesen Dokumenten wird auch darauf hingewiesen, dass den normalen Gasbildungsraten manchmal nicht fehlerspezifische Gasentwicklungen überlagert sein können. Beispielsweise können größere Mengen von Wasserstoff, auch durch Rosten oder andere chemische Reaktionen entstehen. Dadurch können die Gaskonzentrationen so weit erhöht werden, dass der Schwellenwert für Handlungsbedarf überschritten wird. Ein anschauliches Beispiel dazu wird im Abschnitt 5.2.1 diskutiert.

In der EN 60599 wird mit „Stray Gassing“ [2, 13, 14], eine unerwartete Gasbildung bei moderaten Öltemperaturen, als Fehler ohne Folgeschaden beschrieben. Abhängig von der chemischen Struktur des Öls und als Folge von Öloxidation werden u.a. die Gase H_2 , CH_4 und C_2H_6 gebildet, die sich dann zu jenen Gasvolumina addieren, die durch einen Fehler entstehen. Dieses Phänomen wurde anhand eigener Erfahrungen der VUM bereits im Abschnitt 1.2 diskutiert (siehe Abbildung 2). Bei drei Messwandlern eines bau- und zeitgleich gefertigten größeren Kollektivs wurden dabei erhöhte Methan- und Ethankonzentrationen im Öl festgestellt. Ein Wandler hatte nach nur sechs Betriebsjahren beinahe schon jenen Schwellenwert nach EN 60599 erreicht, ab dem Handlungsbedarf besteht. Mit dem Interpretationsschema nach Duval (Dreieck 1) hätte man die Fehlerart „T1“ (Thermischer Fehler < 300 °C) diagnostiziert. Begleitende Untersuchungen des Inhibitor- und Aromatengehalts ergaben jedoch, dass die erhöhte Gasentwicklung der drei Messwandler auf eine nicht vorgesehene Füllung mit nicht inhibiertem Öl zurückzuführen war und nicht auf einen Niedertemperaturfehler.

Solche diagnostischen Fallstricke sind nicht vollständig, aber weitgehend in den IEC- und IEEE-Leitständen zur DGA beschrieben. Die gegenständlichen Untersuchungen haben nun jedoch erstmals aufgezeigt, dass einzelne Gase, wie Wasserstoff oder Ethin, bevorzugt

vom Isolierpapier sorbiert werden. Dadurch kann die Charakteristik des Gasgemisches signifikant verändert werden und somit die Zuordnung der Fehlerart erschweren. Außerdem könnten maßgebliche Schwellenwerte von Gaskonzentrationen erst verspätet oder gar nicht mehr überschritten werden. Es hängt von mehreren Umständen, beispielsweise von der Zeitspanne zwischen Fehlereintritt und Probenahme ab, wie erheblich sich der Einfluss von Sorptionsprozessen auswirkt. Ebenso kann eine intermittierende Spaltgasbildung, z.B. infolge längerer Stillstandszeiten bei Speicherkraftwerken oder wechselnder Lastverhältnisse, die ursprüngliche Gaszusammensetzung im Öl mit der Zeit verändern.

In die Diskussion der Einflüsse auf die Interpretationsergebnisse wurde auch der 110 kV-Stromwandler mit dem Fehler unter einer dicken Öl-Papierisolierung einbezogen. Dadurch ergab sich die besondere Gelegenheit, die Auswirkungen unterschiedlicher Fehlerorte, d.h. von Fehlern im freien Öl bzw. unter der Papierisolierung auf das charakteristische Gasmuster (Gassing Patterns) im Öl aufzuzeigen. Falls nämlich die Gase von einem Fehler inner- oder unterhalb der Papierisolierung produziert werden, müssen sie erst durch mehr oder weniger dicke Öl-Papierlagen permeieren, um ins freie Öl zu gelangen. Durch individuelle Permeationsraten der verschiedenen Gase wird sich das Gasmuster im freien Öl dann von dem am Fehlerort entstandenen charakteristischen Gasmuster unterscheiden. Die Probleme, die durch Sorptions- und Permeationseffekte bei der Fehlerzuordnung entstehen, werden in den folgenden Abschnitten mit Hilfe der Interpretationsschemata nach EN 60599 und nach Duval dargestellt. Zusätzlich wird am Beispiel eines kurzzeitig aktiven Fehlers in einem Transformator gezeigt, dass die neuen Erkenntnisse teilweise auch für diese Gerätegruppe von Bedeutung sind.

5.2. Identifizierung von Fehlern mittels Gasquotienten nach EN 60599

5.2.1. Erläuterungen zum Interpretationsschema nach EN 60599

Wie bereits erwähnt, ist auch bei Geräten, die keinerlei Anzeichen von Fehlern aufweisen, im normalen Betrieb ein leichter Anstieg von Gaskonzentrationen zu beobachten. Typische Werte von Gaskonzentrationen sind lt. EN 60599 [2] „...*diejenigen akzeptablen Gasmen-gen, die nur von einem beliebig geringen Prozentsatz mit höheren Werten überschritten wird, zum Beispiel von 10 %. Typische Konzentrationswerte werden in einem solchen Fall als die typischen 90 %-Werte bezeichnet.*“ Im Anhang der EN 60599 sind typische 90 %-Gaskonzentrationen für verschiedene Gerätegruppen angegeben. Erst wenn die ermittelten Konzentrationen von zumindest einem Gas über diesen typischen Werten liegen, sollten sie als Hinweis auf einen Fehler betrachtet werden.

In der EN 60599 werden sechs übergeordnete Klassen von visuell feststellbaren Fehlern definiert, die in Tabelle 1 dieses Leitfadens angeführt sind. Jede dieser sechs übergeordneten Fehlerklassen führt nach EN 60599 zu einer charakteristischen Zusammensetzung von Kohlenwasserstoffen im Isolieröl. Eine, auf drei Basis-Gasquotienten (C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6) beruhende, Interpretationstabelle (Tabelle 22) für Gas-in-Öl-Analysen ordnet den ermittelten Werten – allerdings nicht lückenlos - eine dieser Fehlerarten zu.

Tabelle 22: Interpretationstabelle für Gas-in-Öl-Analysen (nach EN 60599)

Fall	Charakteristischer Fehler	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	Teilentladungen	NS	< 0,1 ¹⁾	< 0,2
D1	Entladungen niedriger Energie	> 1	0,1 bis 0,5	> 1
D2	Entladungen hoher Energie	0,6 bis 2,5	0,1 bis 1	> 2
T1	Thermischer Fehler t < 300 °C	NS	> 1, aber NS	< 1
T2	Thermischer Fehler 300 °C < t < 700 °C	< 0,1	> 1	1 bis 4
T3	Thermischer Fehler t > 700 °C	< 0,2	> 1	> 4

1) < 0,2 bei Messwandlern

Neben den Basis-Gasquotienten werden in der EN 60599 auch weitere Gasquotienten erläutert, die zur Zustandsbeurteilung herangezogen werden können. CO₂/CO-Quotienten < 3 können – bei Anwesenheit weiterer Fehlertypen – Anzeichen für eine wahrscheinliche Beteiligung von Papier in einem Fehler sein. Hohe Werte von CO₂ (> 10.000 ppm) und hohe CO₂/CO-Quotienten (> 10) können durch Überhitzungen von Papier, Papieralterung oder Oxidation des Öls entstehen. Weitere Erläuterungen zum CO₂/CO-Quotienten sind der EN 60599 zu entnehmen. Leider wird in diesem Leitfaden aber nicht auf die bereits lang bekannte Tatsache hingewiesen, dass sich der CO₂/CO-Quotient infolge der Sorption und Desorption des Kohlendioxids temperaturabhängig ändert [4] und dadurch die Erkennung von Trends erschwert.

Bei mehreren österreichischen Hochspannungs-Messwandlern wurden während der ersten Betriebsjahre hohe H₂-, teils jedoch nur marginale CH₄-Konzentrationen festgestellt. Im Rahmen eines Forschungsprojekts der Verbund-Umwelttechnik GmbH wurden chemische Reaktionen von Aluminium mit Restfeuchten in den Messwandlern als Ursache der H₂-Generation erkannt [5]. Diese potenzielle Gasquelle wird aber in der EN 60599 ebenfalls nicht aufgezählt. Um aus den DGA-Werten die Fehlerart „PD“ (Teilentladungen) treffsicher diagnostizieren zu können, erschien es in Erweiterung der Interpretationstabelle erforderlich, alle Probanden mit einem CH₄/H₂-Quotienten < 0,02 vorab auszuschließen (Abbildung 56). Gegensätzlich zur EN 60599 erschien es aber angezeigt, auch Messwandler deren CH₄/H₂-Quotient zwischen 0,2 und 0,4, also über den im Leitfaden charakteristischen Wert < 0,2 liegt, ebenfalls der Fehlerart „Teilentladungen“ zuzuzählen (Abbildung 56). Nach heutigem Wissenstand wäre diese Maßnahme durch die ständige Reduktion der H₂-Konzentrationen infolge von Sorptionseffekten begründbar.

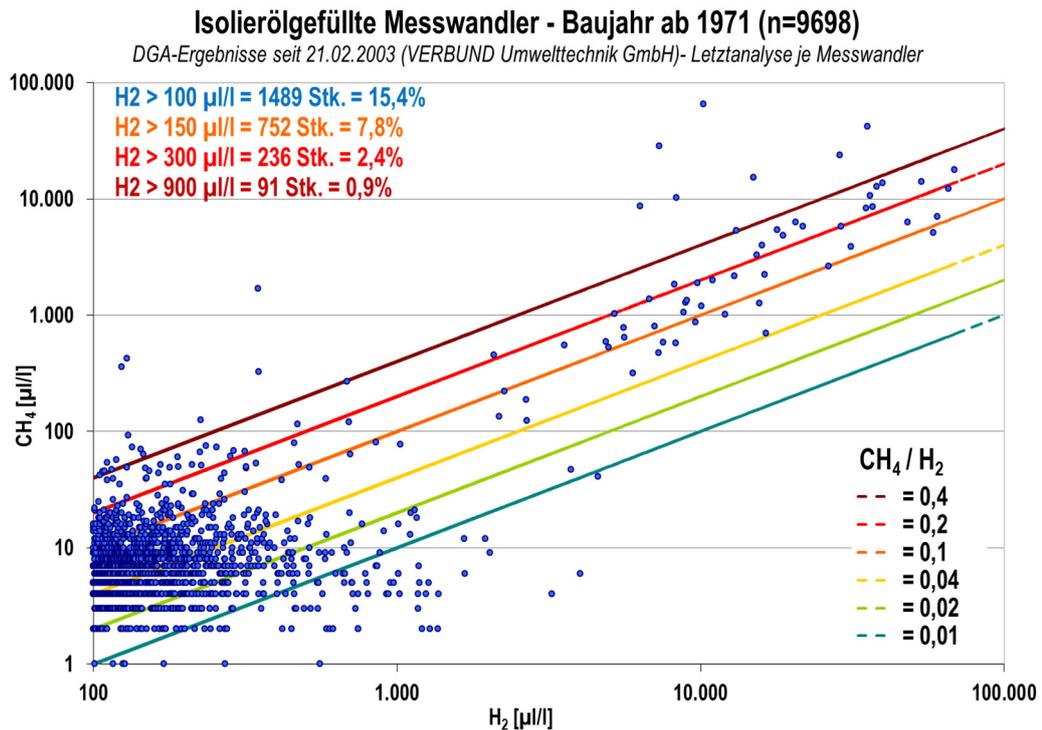


Abbildung 56: CH₄/H₂-Verhältnisse in isolierölgefüllten Messwandlern (Datenstand 2014)²³

5.2.2. Interpretation von Fehlern, die Gase im freien Öl generieren - neu erkannte Einflussfaktoren

Das Isolierpapier der Probanden mit Aktivteil wurde beim Messwandler-Hersteller entsprechend seinen Fertigungsrichtlinien getrocknet, entgast und unter Vakuum mit aufbereitetem Neuöl imprägniert. Das Öl war somit anfänglich weitgehend frei von Wasserstoff, Kohlenwasserstoffgasen und Kohlenoxiden. Anschließend wurde das freie Öl im Wandler und im Dehnelement der Probanden, wie im Absatz 3.4 beschrieben, mit fehlertypischen Spaltgasen versetzt. Diese Prozedur entspricht einem einmalig aufgetretenen Fehler, bei dem Gase direkt im freien Öl, d.h. außerhalb der Papierisolierung produziert werden. Das Gefälle der Gaskonzentrationen verläuft daher vom Öl in Richtung der innersten Papierlagen der Isolierung und ist die treibende Kraft der molekularen Stofftransporte. Die Permeationskoeffizienten von Öl-Papierlagen sind für verschiedene Gase unterschiedlich und somit auch die gasspezifischen Stofftransporte.

Das Diagramm in Abbildung 57 zeigt augenscheinlich, dass die Gase Wasserstoff, Ethin und Kohlendioxid erheblich stärker vom Papier sorbiert werden als die restlichen Spaltgase, die für die Interpretation der Gas-in-Öl-Analyse entsprechend EN 60599 herangezogen werden.

²³ 5. Fachtagung - VERBUND Umwelttechnik GmbH; TU Graz, Juni 2014; Vortrag: Andere Gasquellen in mit Mineralöl imprägnierten elektrischen Hochspannungsgeräten (Matthias Jenß, J. Theuermann)

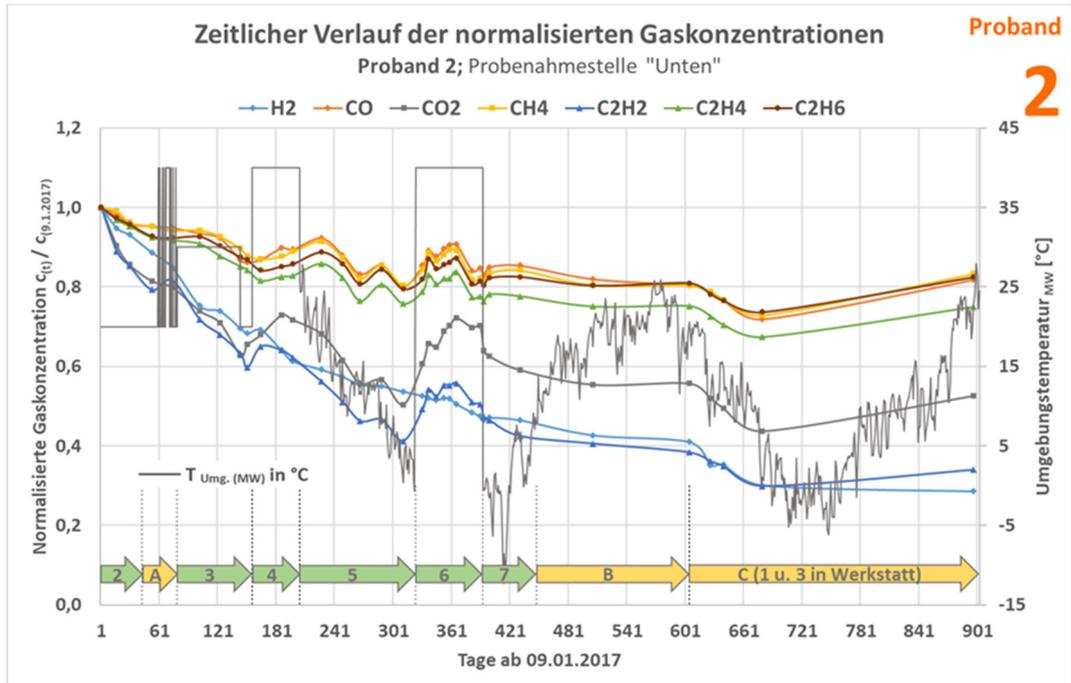


Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf der normalisierten Konzentrationen aller Gase für Proband 2

Im Gegensatz zu Wasserstoff sind für Ethin und Kohlendioxid während länger andauernder Temperaturerhöhungen (z.B. während Projektphase 6 in Abbildung 57) deutliche Wiederanstiege der Konzentrationen im Öl ersichtlich, die sich den generellen Sorptionsprozessen überlagern.

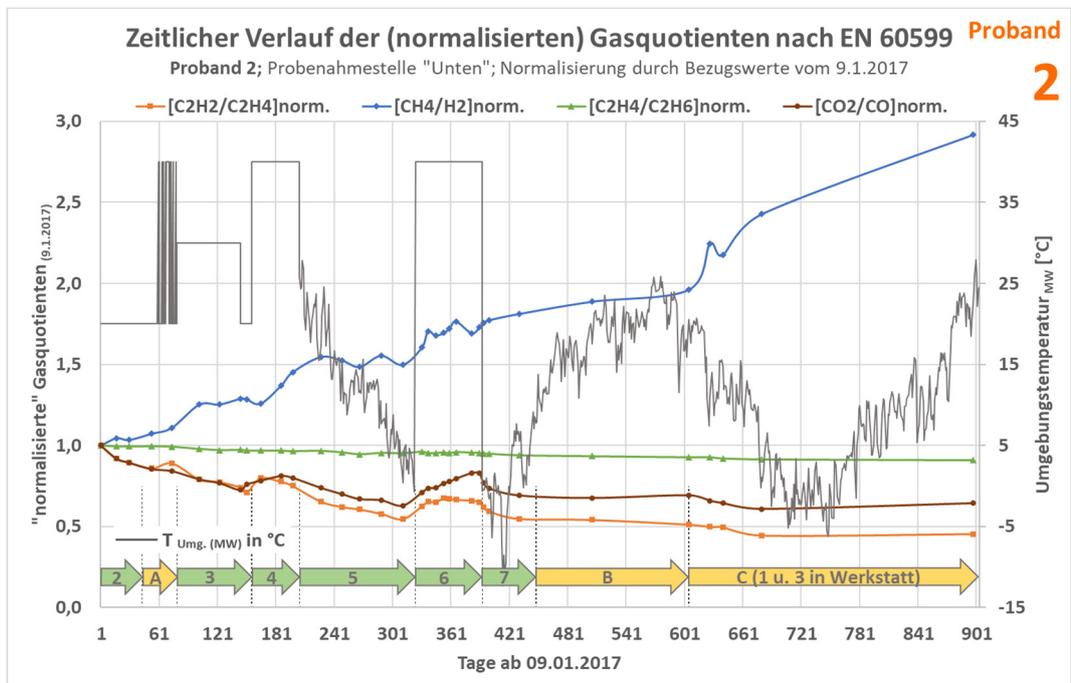


Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf der (normalisierten) Gasquotienten nach EN 60599 für Proband 2

Dieses Verhalten entspricht dem bekannten, temperaturabhängigen Austausch der Feuchte zwischen Öl und Papier. Bei solchen Temperaturerhöhungen wird ein Teil der,

zuvor vom Papier sorbierten, Gase vorübergehend wieder aus dem Papier desorbiert. Die aus den Sorptions-/Desorptionsprozesse resultierenden, teils gravierenden Auswirkungen auf die drei Basis-Gasquotienten und den CO_2/CO -Quotienten werden in Abbildung 58 veranschaulicht.

Der für die Identifikation von Teilentladungen maßgebliche CH_4/H_2 -Quotient hat sich während der 900-tägigen Beobachtungsdauer durch die Reduktion der H_2 -Konzentration im Öl beispielsweise um den Faktor 3 vergrößert. Eine Abnahme um 50 Prozentpunkte war jedoch bereits nach einem halben Jahr feststellbar. Es ist evident, dass derart große Änderungen eine korrekte Erkennung dieser Fehlerart erheblich erschweren können. Da Ethen im größeren Ausmaß vom Papier sorbiert wird als Ethen, vermindert sich auch der zweite Basis-Gasquotient $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ mit zunehmender Beobachtungsdauer. Ebenso ändert sich auch der CO_2/CO -Quotient, der zur Beurteilung einer eventuellen Beteiligung von Papier an Fehlern beitragen kann. Der dritte Basis-Gasquotient $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ wird hingegen bei einem Fehler mit Gasproduktion im freien Öl durch Sorptionsprozesse wenig beeinflusst, da die beiden Gase in ähnlichem Umfang vom Papier sorbiert werden. Im Abschnitt 5.2.3 wird aber gezeigt, dass dieser Quotient bei Fehlern innerhalb der Öl-Papierisolierung noch durch Permeationseffekte erheblich beeinflusst werden kann.

Die Sorptionsprozesse von Gasen und Wasser werden bei Geräten mit größeren Adsorptionsflächen als bei Messwandlern sowie bei stärkerer Konvektion des freien Öls schneller ablaufen. Es ist somit anzunehmen, dass ähnliche Veränderungen der Basis-Gasquotienten bei Leistungstransformatoren, wo diese Verhältnisse gegeben sind, i.a. nach kürzerer Zeitdauer erreicht werden.

Für den Probanden 1 der ebenfalls mit Aktivteil, jedoch anstelle des Verbundisolators mit einem Porzellanisolator ausgeführt ist, ergeben sich sehr ähnliche Verhältnisse. Daher werden die entsprechenden Diagramme in diesem Bericht nicht dargestellt.

Bei den Probanden ohne Aktivteil treten keine relevanten Sorptionseffekte auf. Daher verändern sich die Werte der Gasquotienten $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ und $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ auch langfristig nur unwesentlich, wie Abbildung 59 für den Probanden 4 zeigt. Lediglich der CH_4/H_2 -Quotient steigt geringfügig an. Als Ursache ist anzunehmen, dass geringe Mengen von Wasserstoff durch das Dichtungssystem und den Verbundisolator in die Umgebung permeieren können. Somit zeigt auch dieses Diagramm sehr anschaulich, dass die Veränderungen der Gasquotienten fast ausschließlich auf Sorption der im Öl gelösten Gase durch den Aktivteil zurückzuführen sind. Verbund-Hohlisolatoren haben, jedoch nur minimalen, Einfluss auf den CH_4/H_2 -Quotient.

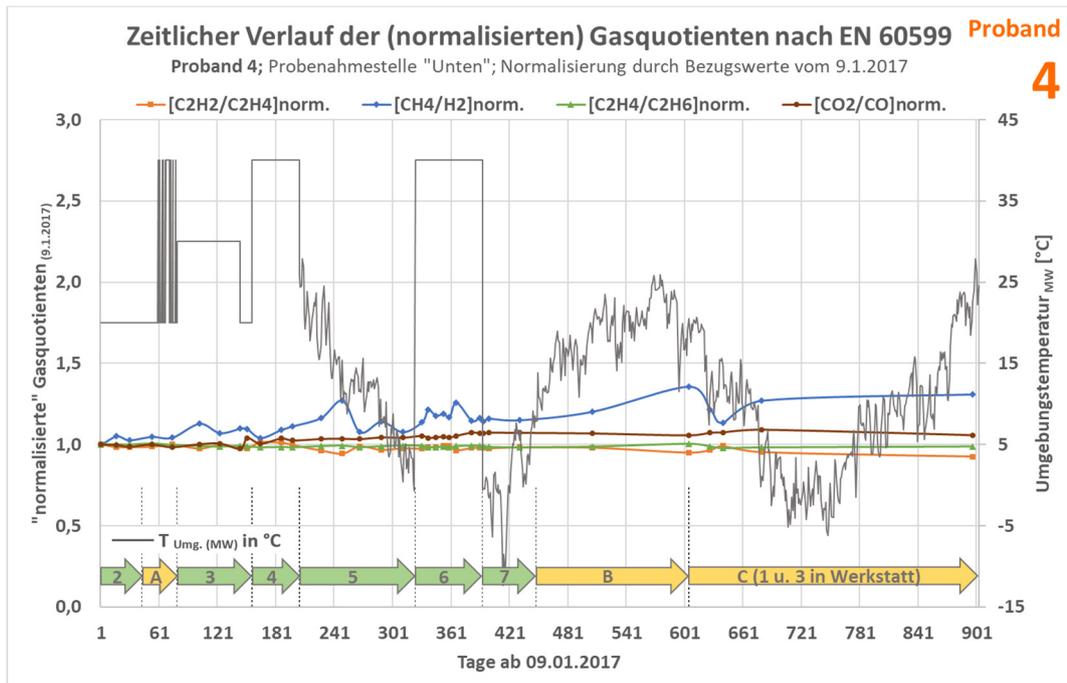


Abbildung 59: Zeitlicher Verlauf der (normalisierten) Gasquotienten nach EN 60599 für Proband 4

5.2.3. Interpretation von Fehlern, die Gase unter Öl-Papierisierungen generieren - neu erkannte Einflussfaktoren

Wenn der Fehler inner- bzw. unterhalb der Papierisolation von Messwandlern auftritt, müssen die Gase erst durch mehrere, gegebenenfalls sogar durch alle Öl-Papierlagen diffundieren, um dann im freien Öl verteilt zu werden. Erst dann können sie mit Hilfe der Gas-in-Öl-Analyse erfasst und beurteilt werden. Dieser Prozess erfordert bei den dicken Öl-Papierisierungen von Hochspannungs-Messwandlern einige Zeit. Theoretisch werden die dafür benötigten Zeitspannen wegen spezifischer Diffusionsgeschwindigkeiten der einzelnen Gase auch unterschiedlich lang sein. Vermutlich werden deshalb einige Gase früher bzw. mit höherem Prozentanteil als am Fehlerort im freien Öl ankommen und in der Folge von der am Fehler unbeteiligten Papiermasse teilweise wieder sorbiert werden.

Diese theoretischen Überlegungen werden durch empirische Untersuchungsergebnisse für den WmRF eindrucksvoll bestätigt, wie aus Abbildung 60 ersichtlich wird. Für dieses Diagramm wurden die Gas-in-Öl-Analysen des WmRF (Hochspannungs-Stromwandlers mit realem Fehler, siehe Kapitel 4) herangezogen, der kurz zuvor außer Betrieb genommen worden war. Dieser Fehler war durch viele Öl-Papierlagen vom freien Öl separiert. Das Diagramm in Abbildung 60 zeigt die drei Basis-Gasquotienten sowie den CO_2/CO -Quotienten in normalisierter Form. Als Bezugswerte wurden die Gaskonzentrationen zum Zeitpunkt der Fehlererkennung herangezogen.

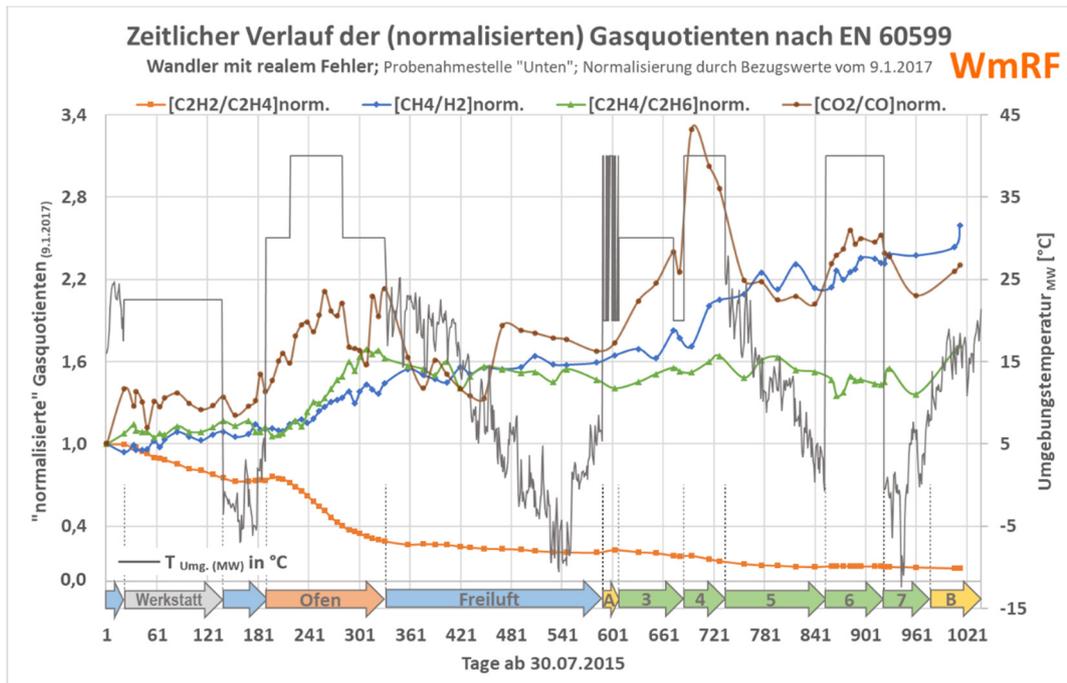


Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der (normalisierten) Gasquotienten nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF)

Der C_2H_2/C_2H_4 -Quotient fällt beim WmRF bedeutend stärker ab als beim Probanden 2 und liegt nach 1000 Beobachtungstagen nur noch bei etwa 10 % des Ausgangswertes (vgl. Abbildung 60 und Abbildung 58). Als Ursachen dieses extremen Abfalls sind einerseits die C_2H_2 -Sorption durch das Papier und andererseits der - noch lange nach Ende der Fehleraktivität - retardiert aufgetretene Anstieg der C_2H_4 -Konzentration im Öl zu nennen. Dieses Phänomen ist möglicherweise auf eine deutlich langsamere Diffusionsgeschwindigkeit des Ethens durch die Öl-Papierlagen zurückzuführen. Diese Annahme müsste allerdings erst durch experimentelle Untersuchungen abgesichert werden.

Der CH_4/H_2 -Quotient steigt während des Beobachtungszeitraums auf den 2,5-fachen Wert an, was ungefähr dem Verlauf bei Probanden 2 entspricht. Diese Zunahme wird wieder durch die starke Reduktion der H_2 -in-Öl-Konzentration bei annähernd konstant bleibender CH_4 -Konzentration verursacht. Im Gegensatz zum Probanden 2, mit dem die Position der Gasquelle im freien Öl simuliert wird, steigt auch der C_2H_4/C_2H_6 -Quotient durch den bereits zuvor beschriebenen, monatelang verzögerten Anstieg der C_2H_4 -Konzentration im Öl an.

Laut Tab. A.7 in EN 60599:2016 betragen die maximal zulässigen Gas-in-Öl-Werte für geschlossene Messwandler, ohne dass eine Aktion am Gerät vorgenommen werden muss, 300 $\mu l/l$ für CO und 900 $\mu l/l$ für CO_2 . Diese Werte wurden anfänglich, d.h. zum Zeitpunkt der Fehlererkennung noch nicht überschritten. Die CO_2 -Konzentrationen im Öl stiegen jedoch während der Beobachtungsdauer beträchtlich an. Da währenddessen in diesem außer Betrieb genommenen Gerät keine nennenswerten Mengen an CO_2 mehr produziert wurden, kommt für den CO_2 -Anstieg nur das im Fehlerbereich der Öl-Papierisolierung gespeicherte CO_2 als Quelle in Frage. Durch das aus dem Papier ins Öl diffundierte CO_2 erreichte dessen CO_2 -Konzentration am Ende der Untersuchungsperiode ein Wert von 928 $\mu l/l$. Dem CO_2 -Anstieg sind beträchtliche, temperaturbedingte Schwankungen überla-

gert (siehe z.B. Projektphase 4 und 5 in Abbildung 60). Bewertet man den CO₂/CO-Quotienten über die gesamte Beobachtungsperiode, so zeigt sich, dass er dadurch für dieses Objekt im Untersuchungszeitraum Werte zwischen 6,5 und 21 angenommen hat (siehe Abbildung 60). Das entspricht einer relativen Änderung der Quotienten im Verhältnis 1:3,2. Mit einem einzelnen CO₂/CO-Quotienten kann daher nicht zweifelsfrei sichergestellt werden, dass dieser nicht nur vermeintlich, sondern auch tatsächlich immer im „normalen Bereich“ $3 < \text{CO}_2/\text{CO} < 10$ liegt. Beispielsweise könnte sich der ermittelte Quotient durch eine mehrwöchige Hitzeperiode bereits um 50 Prozentpunkte erhöhen, ohne dass sich am Zustand des Untersuchungsobjektes etwas geändert hat (siehe Projektperiode 3+4 in Abbildung 60). Die Vorgeschichte der Temperaturbedingungen am Aufstellungsort ist daher ein wichtiger Parameter bei der Trendverfolgung auf Basis der Kohlenstoffoxide [4].

Die maximal zulässigen Gas-in-Öl-Werte für geschlossene Messwandler gemäß Tab. A.7 in EN 60599:2016 wurden von den H₂-, CH₄- C₂H₄- und C₂H₂-Werten zum Zeitpunkt der Fehlererkennung vielfach überschritten, so dass dieser Stromwandler umgehend außer Betrieb genommen wurde. Eine eindeutige Fehlerzuordnung nach der Interpretationstabelle der EN 60599 war jedoch zunächst nicht möglich, da die Kombination der Gasquotienten außerhalb ihrer Bereichsgrenzen lag (Kriterium CH₄/H₂ nicht erfüllt). Sieht man von dieser Abweichung ab, dann könnte die Fehlerart als „D1“ (Entladung mit geringer Energie) interpretiert werden, was zufolge der Post-Mortem-Untersuchung auch zutreffend wäre.

Tabelle 23: Interpretation der Gas-in-Öl-Analyse zur Identifizierung der Fehlerart nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler

	$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$	$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$	$\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$
Kriterium für D1	> 1	0,1 bis 0,5	> 1
Kriterium für D2	0,6 bis 2,5	0,1 bis 1	> 2
DGA bei Fehlererkennung	8,54	0,05	8,18
Kriterium für D1 erfüllt?	☑	☒	☑
Kriterien für D2 erfüllt?	☒	☒	☑
DGA 1000 Tage nach Fehlererkennung	0,79	0,127	14,09
Kriterium für D1 erfüllt?	☒	☑	☑
Kriterien für D2 erfüllt?	☑	☑	☑

Die zuvor beschriebenen Sorptions- und Permeationseffekte führen im Laufe der Beobachtungsdauer am außer Betrieb genommenen Gerät zu starken Veränderungen der Quotienten, so dass der deaktivierte Fehler nach 45 Wochen nicht mehr der Fehlerart „D1“, sondern „D2“ (Entladungen mit hoher Energie) zuzuordnen wäre. Da sich der reale Fehler währenddessen jedoch nicht verändert hat, führte die Veränderung des charakteristischen Gasmusters infolge der Sorptions- und Diffusionsprozesse zu einer falschen Diagnose.

Der zeitliche Verlauf der Gaskomponenten wird in der dreidimensionalen Darstellung entsprechend EN 60599 in Abbildung 61 veranschaulicht. Es ist aus der graphischen Darstellung auch erkennbar, dass die Schnittpunktcoordinate der drei Gasquotienten zuerst in einer Interpretationslücke nahe dem Bereich „D1“ liegt und gegen Ende der Langzeitbeobachtung (06.05.2018) in den Quader für „D2“ (Entladungen mit hoher Energie) fällt. Korrekt wäre allerdings nur die Diagnose „D1“ (Entladungen mit niedriger Energie).

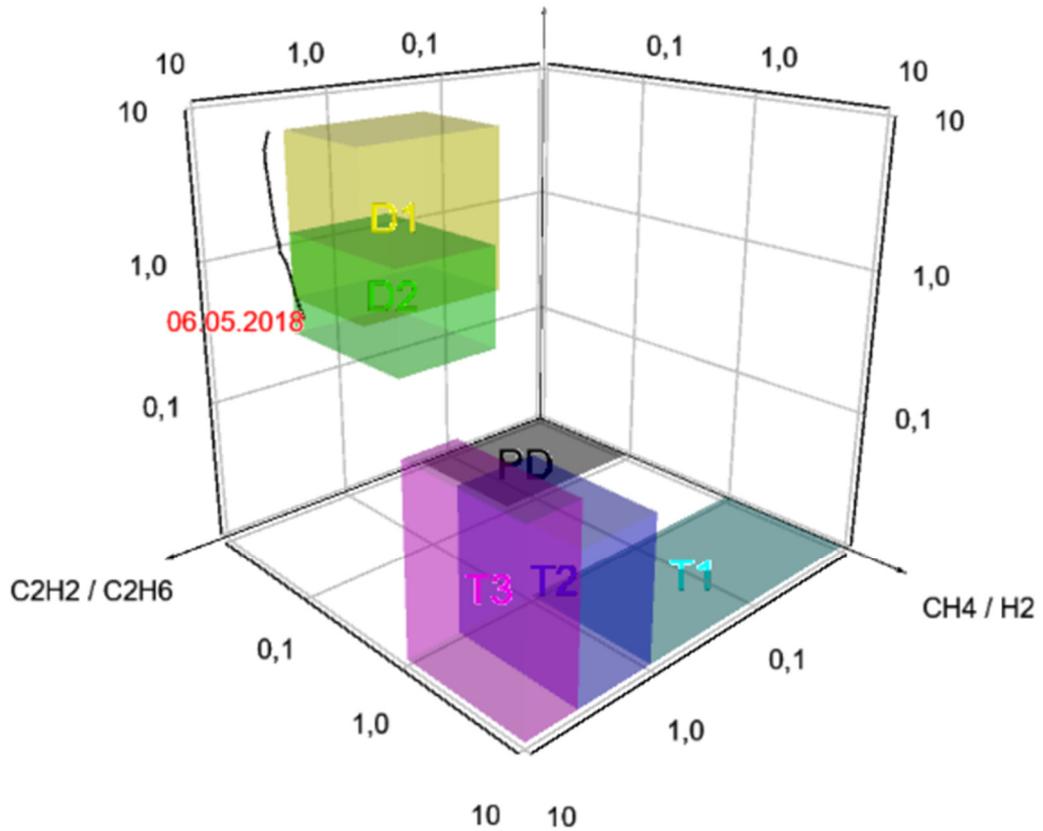


Abbildung 61: Graphische Darstellung 2 für Gasquotienten nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler

In den zweidimensionalen graphischen Darstellungen ist die Verschiebung der Koordinatenschnittpunkte der Gasquotienten durch die Sorptions- und Diffusionsprozesse sogar noch etwas besser erkennbar (Abbildung 62). Da der Fehler jedoch während der gesamten Beobachtungsdauer unverändert geblieben ist, gibt dieses Untersuchungsergebnis den deutlichen Hinweis, dass es durch Sorptions- und Permeationseinflüsse zu Fehlinterpretationen der Fehlerart kommen kann.

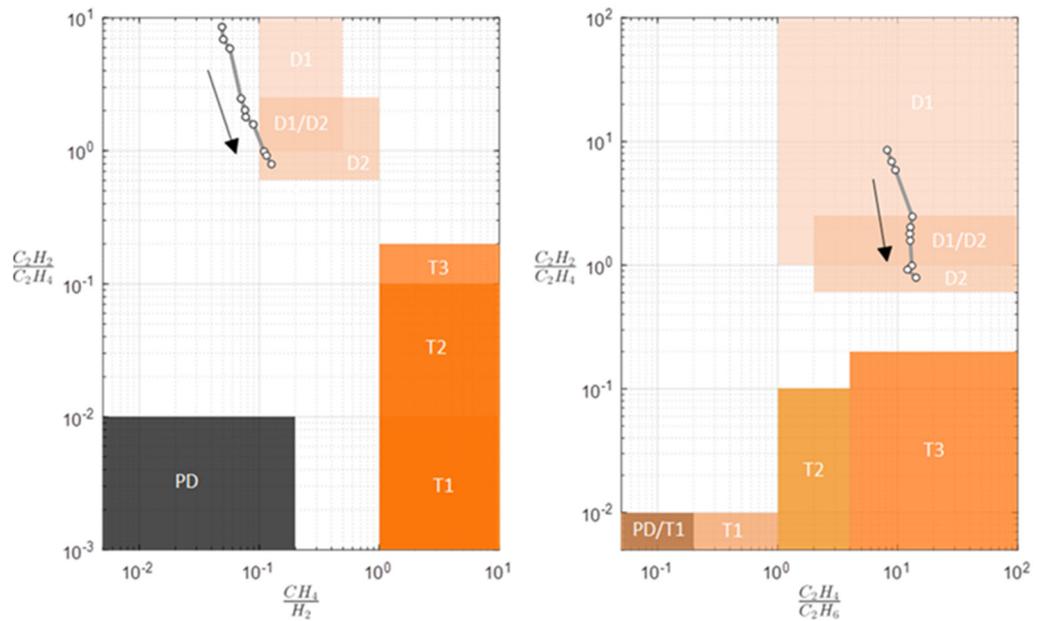


Abbildung 62: Graphische Darstellung 1 für Gasquotienten nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler

Sorptions- und Permeationseffekte nehmen Einfluss auf das charakteristische Gasmuster (Gassing Patterns) im Öl und somit auch auf die Gasquotienten.

Wenn maßgebliche Reduktionen der Gase H_2 bzw. C_2H_2 die Schnittpunktkoordinaten der drei Basis-Gasquotienten in ein anderes Definitionsfeld bzw. in einen anderen Quader verschieben, könnten daraus Fehldiagnosen resultieren!

Daher sollte der mögliche Einfluss dieser Effekte zukünftig bei der Interpretation von DGA-Ergebnissen in Betracht gezogen werden. Eine Kontrolle der zeitlichen Entwicklung der individuellen Gas-in-Öl-Konzentrationen kann dazu hilfreiche Informationen liefern.

5.3. Identifizierung von Fehlern mittels Interpretationsschemata nach Duval

5.3.1. Erläuterungen zu den Interpretationsschemata nach Duval

Das klassische Interpretationsschema nach Duval (Duval-Dreieck 1) beruht auf den Gaskomponenten Methan, Ethin und Ethen. Die jeweiligen prozentuellen Anteile dieser drei Gase an ihrer Summe werden in ein Dreieckskoordinatensystem eingetragen (Abbildung 63) und ergeben einen gemeinsamen Schnittpunkt.

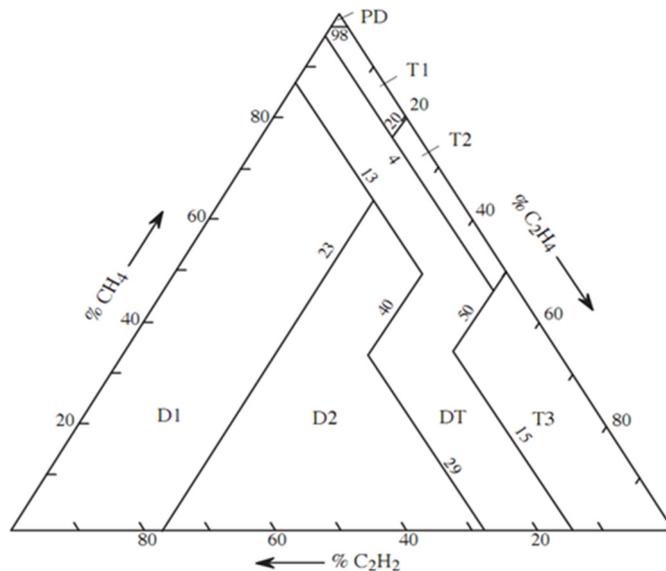


Abbildung 63: Duval Dreieck 1 für Mineralöl

Beim Interpretationsschema mit den drei Basisquotienten nach EN 60599 gibt es Interpretationslücken und Überschneidungen der Fehler D1 und D2. Demgegenüber bietet das Duval-Dreieck den Vorteil, dass alle Konzentrationskombinationen immer innerhalb des Dreiecks liegen und somit auch immer einem Fehler zugeordnet werden (geschlossenes System). Die Zuordnung der Gas-in-Öl-Analysen zu den Fehlern erfolgt über sieben voneinander abgegrenzte Bereiche im Dreieck. Gegenüber der EN 60599 wird die zusätzliche Fehlerart „DT“: (Discharges and Thermal Faults = Entladungen und Thermischer Fehler) definiert. Die seinerzeitige Festlegung der Fehlerflächen im Dreieck erfolgte anhand der Gas-in-Öl-Analysen von rund 200 visuell untersuchten Transformatoren mit Fehlern sowie durch Untersuchungen an 19 Labormodellen [12] und wird in verschiedenen Publikationen als relativ treffsicher bewertet. Unsicherheiten ergeben sich aber bereits durch die Toleranzen der Gas-in-Öl-Analysen, die in einer umfangreichen Untersuchung von CIGRE und IEC für mittlere Gaskonzentrationen ($> 10 \times$ analytische Nachweisgrenze) in einem Round Robin Test mit durchschnittlich $\pm 15 \%$ ermittelt wurde [15]. Die besten der getesteten Laboratorien erreichten in dieser internationalen Untersuchung jedoch eine viel höhere Genauigkeit mit immerhin nur $\pm 3 \%$.

Das klassische Duval-Dreieck 1 wurde 2008 durch das Dreieck 2 für Lastregelschalter, das Dreieck 3 für nichtmineralische Öle sowie durch die Dreiecke 4 und 5 für Fehler mit niedriger Energie ergänzt [16]. Im Gegensatz zu den anderen Dreiecken kommen im Duval-Dreieck 4 dabei die Gase Wasserstoff, Methan und Ethan und im Dreieck 5 die Gase Methan, Ethen und Ethan zur Anwendung.

Im Jahr 2014 wurden als neue bzw. zusätzliche Interpretationsschemata die „Duval Pentagone 1 und 2“ vorgeschlagen, die nunmehr auf den fünf Gasen H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 und C_2H_2 beruhen [17]. Hinsichtlich der Berechnung der Datenpunkte und ihrer Darstellung im Pentagon wird auf die vorgenannte Veröffentlichung verwiesen. Das Pentagon 1²⁴ enthält neben den sechs Basis-Fehlerarten die zusätzliche Fehlerart „S: Stray Gassing“.

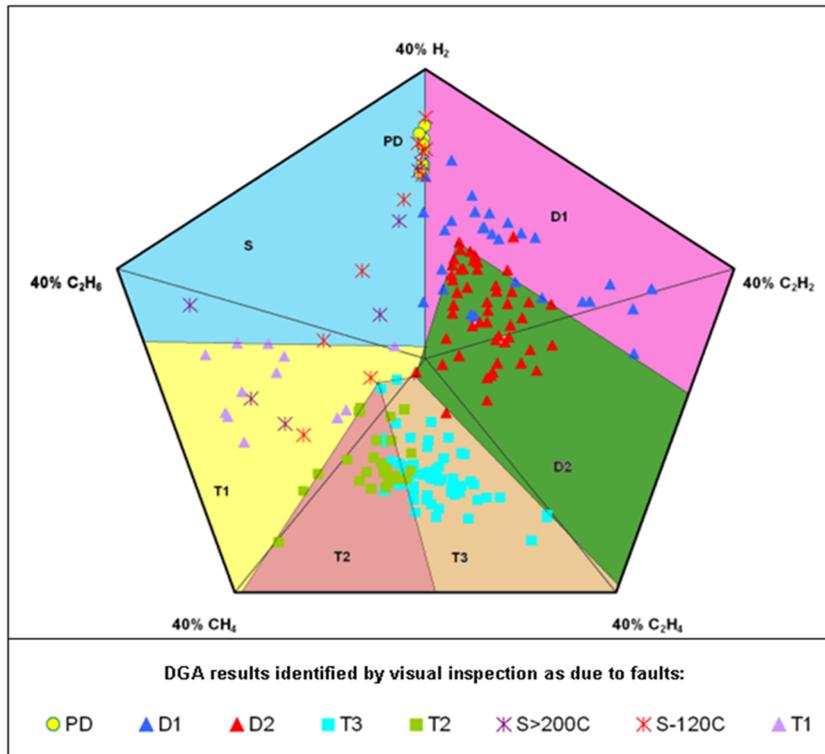


Abbildung 64: Duval Pentagon 1 für Mineralöl [18]

Wenn im Duval Pentagon 1 thermische Fehler festgestellt werden, können mit dem Duval Pentagon 2 (Abbildung 65) zusätzliche Informationen zu diesen Fehlern erlangt werden, wobei in [3] folgende zusätzliche vier Unterarten von thermischen Fehlern definiert sind:

- S Stray Gassing von Mineralöl bei Temperaturen < 200 °C
- O: Überhitzung von Papier oder Mineralöl mit $t < 250$ °C
- C: Mögliche Carbonisierung von Papier
- T3-H: Thermische Fehler, ausschließlich im Öl (ohne Papierbeteiligung)

Darüber hinaus ist noch die Gasbildung infolge chemischer Reaktionen angeführt.

- R Katalytische Reaktionen, z.B. zwischen Wasser und galvanisierten Stahl. [3]
Diese Fehlerart wird im Duval-Dreieck 4 berücksichtigt (ausschließlich H_2)

²⁴ Freier Download:

https://standards.ieee.org/content/dam/ieee-standards/standards/web/download/C57.104-2019_downloads.zip

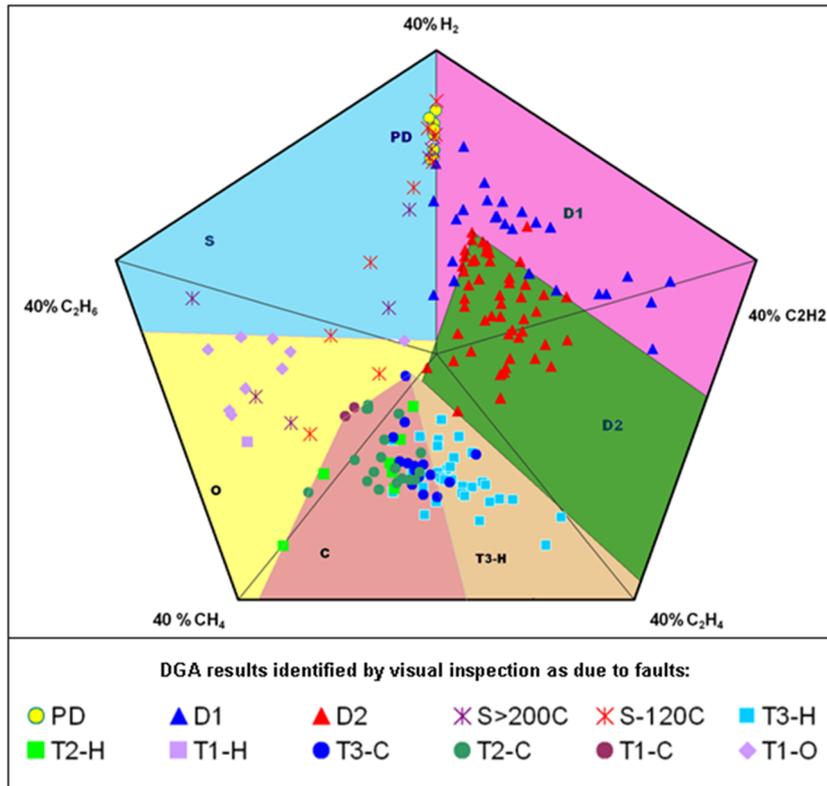


Abbildung 65: Duval Pentagon 2 für Mineralöl [18]

Auf Grund der größeren Erfahrung in der Anwendung wird gegenwärtig noch vorwiegend das Duval-Dreieck 1 zur Interpretation der Gaskonzentrationen herangezogen. Die Entwicklung verfeinerter Interpretationsschemata schreitet jedoch voran und so gibt es inzwischen auch schon Pentagone für alternative, biologisch abbaubare Kühl- und Isolierflüssigkeiten von Transformatoren [18].

Die Einflüsse der Sorptions- und Diffusionsprozesse auf die Interpretationsschemata nach Duval werden nun im Abschnitt 5.3.2 für die Simulation einer Spaltgasproduktion im freien Öl sowie im Abschnitt 5.3.3 für den Fall eines realen Fehlers unter der Papierisolierung diskutiert.

5.3.2. Interpretation von Fehlern, die Gase im freien Öl generieren - neu erkannte Einflussfaktoren

Zur Diskussion der Einflüsse werden wieder die Ergebnisse der Gas-in-Öl-Analyse für die Probanden 2 und 4 herangezogen, deren Öle mit einer Gasmischung versetzt wurden (Abschnitt 3.4). Dazu werden die zeitlichen Verläufe der prozentuellen Anteile der Gase CH₄, C₂H₄ und C₂H₂ an ihrem Summengehalt über die Langzeit-Beobachtungsdauer von 900 Tagen dargestellt. Im Diagramm für den Probanden 4, der ohne Aktivteil sonst jedoch wie ein herkömmlicher Messwandler ausgeführt ist, sind über die gesamte Untersuchungsdauer nur unwesentliche Änderungen der drei Quotienten erkennbar (Abbildung 66). Aus diesem Ergebnis ist zu schließen, dass die drei Gase entweder gleichartigen (keine Änderung der Anteile) oder unmaßgeblichen Sorptions- bzw. Diffusionseinflüssen unterliegen. Somit ist auch evident, dass der Verbund-Hohlisolator und das Dichtungssystem keinen Einfluss auf die Bewertung mittels Duval Dreieck 1 ausüben.

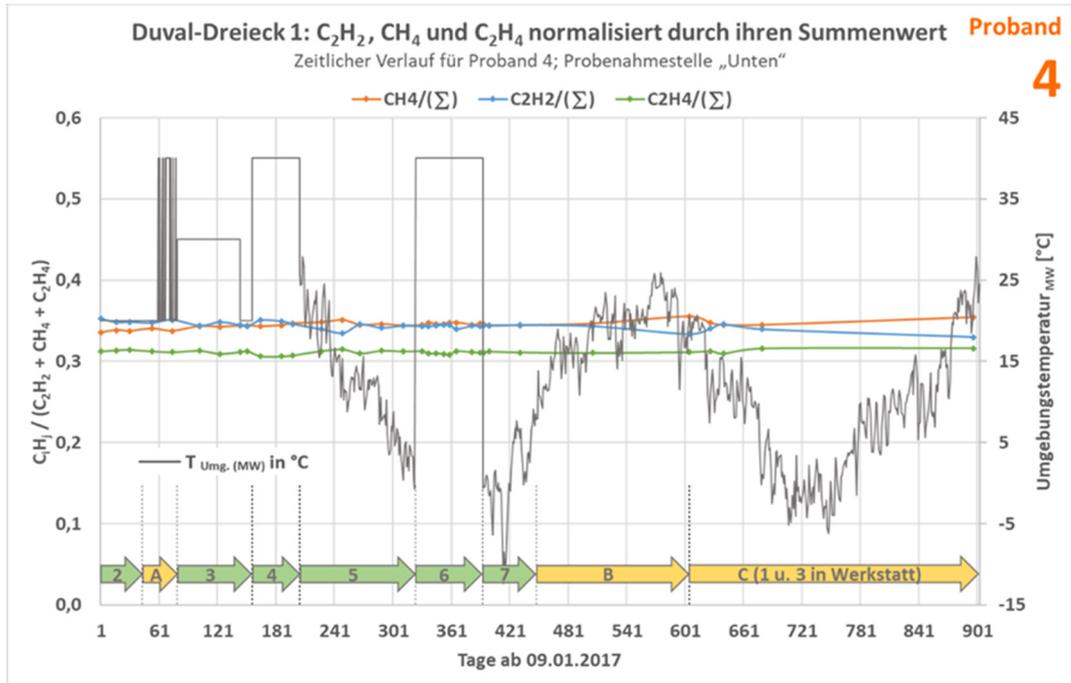


Abbildung 66: Zeitlicher Verlauf der Fehlergasanteile nach Duval-Dreieck 1 für Proband 4

Im Gegensatz dazu ist der Einfluss des Aktivteils auf die zeitabhängige Zusammensetzung der drei Gase erheblich, wie das Diagramm für den Probanden 2 in Abbildung 67 anschaulich zeigt. Durch die – in Relation zu den beiden anderen Gasen – viel stärkere Verlagerung des Ethins in das Papier vermindert sich dessen Anteil im Öl innerhalb von 900 Tagen um mehr als 50 %. Folglich erhöhen sich dadurch die prozentuellen Anteile von Methan und Ethen.

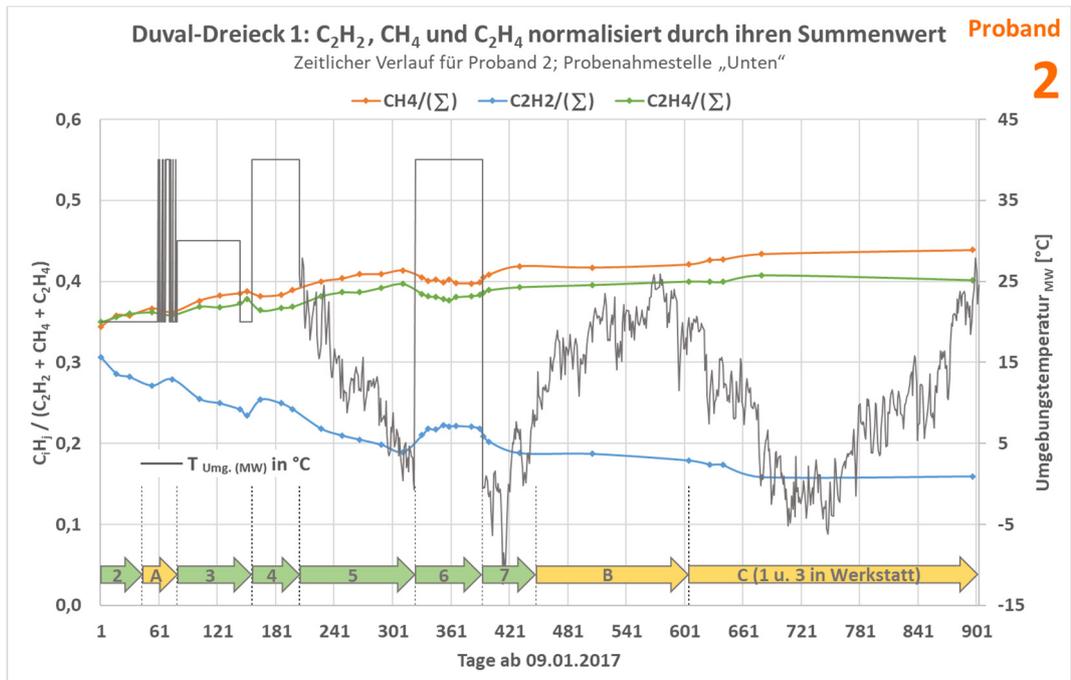


Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Fehlergasanteile nach Duval-Dreieck 1 für Proband 2

Im Duval-Dreieck 1 können die Auswirkungen der Sorptionseffekte für die sechs Probanden gut nachvollzogen werden (Abbildung 68). Für die Probanden ohne Aktivteil, d.h. für die Probanden 3-6 ändern sich die Schnittpunktkoordinaten der drei Gasanteile im Dreieck nur marginal, so dass alle Datenpunkte innerhalb eines kleinen Feldes konzentriert sind. Aus der geringen Streuung der Punkte ist außerdem abzulesen, dass die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Laboranalysen der VUM Verfahren Umwelt Management GmbH eine viel geringere Toleranz aufweisen als die mittlere nach EN 60599 angegebene Analyseunsicherheit von $\pm 15\%$.

Bei den Probanden mit Aktivteil, d.h. bei den Probanden 1 und 2 (blaue bzw. rote Linie in Abbildung 68) verschieben sich die Schnittpunktkoordinaten aus den drei Gasanteilen infolge der erläuterten Sorptionseffekte während der Zeitspanne vom 9.1.2017 bis zum 24.6.2019 hingegen ganz erheblich, so dass in diesem Fall sogar ein anderes Fehlerfeld erreicht wird. Aus den Ergebnissen der DGA wäre nämlich zu Beginn der Untersuchungen auf die Fehlerart D2 und am Ende der Beobachtungsdauer auf die Fehlerart D+T zu schließen.

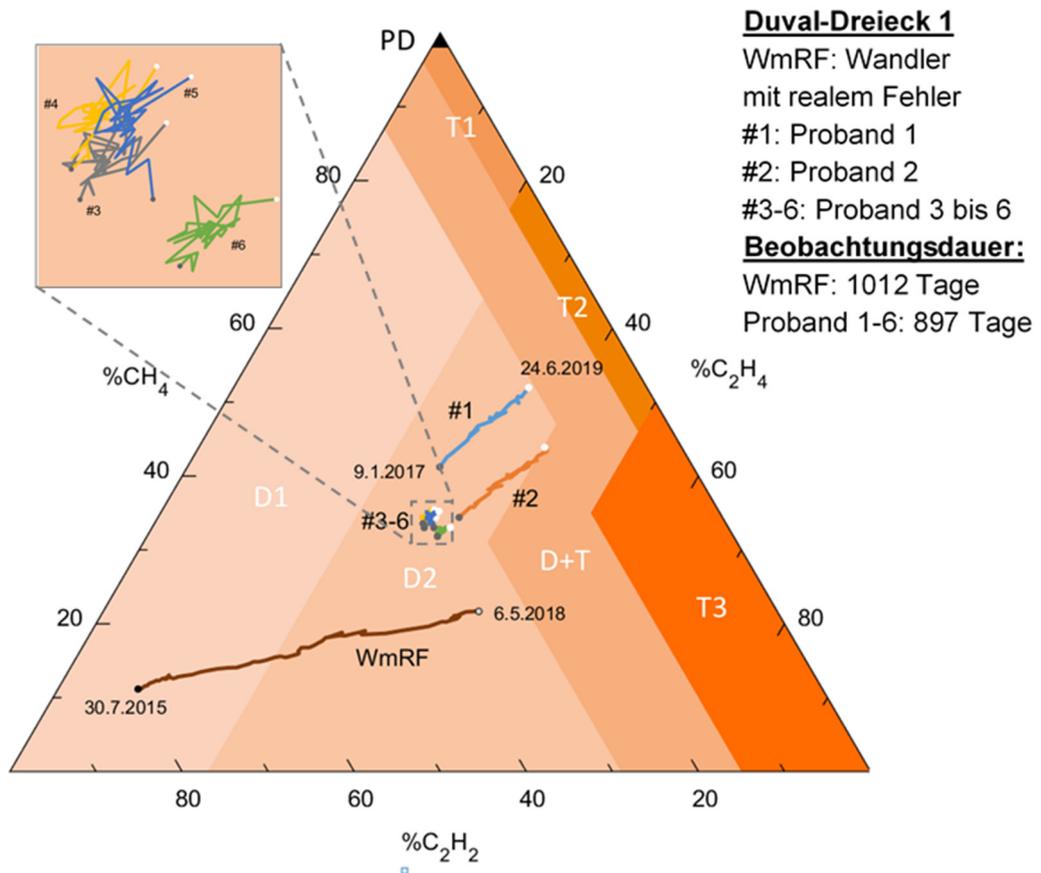


Abbildung 68: Zeitlicher Verlauf des C_2H_2 -Gasanteiles nach Duval-Dreieck 1 für alle Probanden

Das Duval-Dreieck enthält auch die Zeitreihe für den Stromwandler mit dem realen Fehler (WmRF). Im Vergleich mit den Probanden 1 und 2 werden die Schnittpunktkoordinaten der drei Gase ab der Messung nach dem Fehlereintritt (30.7.2019) bis zum Projektende (6.5.2018) wesentlich stärker verschoben. Die Ursachen dieses unterschiedlichen Verhaltens werden im Abschnitt 5.3.3 kommentiert.

5.3.3. Interpretation von Fehlern, die Gase unter Öl-Papierisierungen generieren - neu erkannte Einflussfaktoren

Bei diesem real aufgetretenen Fehler (siehe Kapitel 4) müssen die produzierten Gase erst durch den dicken Öl-Papierwickel ins freie Öl diffundieren. Das in das Öl diffundierte Ethin wird - wie auch der Wasserstoff - mit der Zeit teilweise wieder von der Papierisolierung sorbiert, so dass die C_2H_2 -Konzentration im Öl mit der Zeit abnimmt.

Es ist eine Besonderheit von Dreieckskoordinaten, dass die Koordinaten miteinander verknüpft sind. Nimmt beispielsweise der Anteil einer Komponente ab, so erhöhen sich die Anteile der beiden anderen Komponenten. Daher steigt in Abbildung 69 durch die Abnahme der C_2H_2 -Konzentration auch der Anteil von Methan, obwohl die CH_4 -Konzentration während der gesamten Beobachtungsdauer weitgehend konstant geblieben ist. Das Ethen diffundiert - offenbar stark verzögert (Abbildung 50) - von der Fehlerstelle durch die Papierlagen in das freie Öl, so dass sich die C_2H_4 -Konzentration im Laufe der Untersuchung erheblich erhöht hat. Dadurch steigerte sich der Ethenanteil stärker als der Methananteil, insbesondere erkennbar an den Stufen in der grünen Kurve in Abbildung 69 während der ersten beiden Erwärmungsläufe. Der wesentliche Unterschied zu den Probanden 1 und 2 besteht also darin, dass nicht nur die Ethinkonzentration im Öl stärker fällt, sondern dass gleichzeitig die Ethenkonzentrationen deutlich ansteigen. Dadurch fällt die Verschiebung der Koordinatenschnittpunkte dementsprechend deutlicher aus (siehe Abbildung 68).

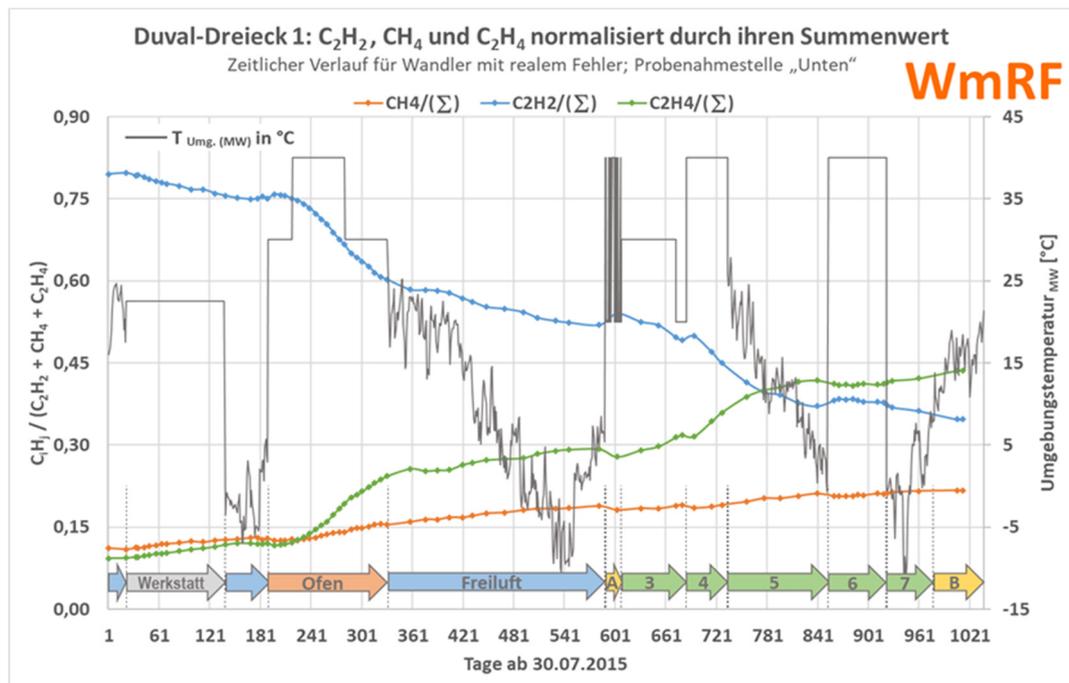


Abbildung 69: Zeitlicher Verlauf der Fehlergasanteile nach Duval-Dreieck 1 für den Stromwandler mit realem Fehler

Aus Abbildung 69 ist in Verbindung mit Abbildung 68 abzuleiten, dass die Auswirkung der Sorptions- und Diffusionseffekte im vorliegenden Fall bereits 45 Wochen nach der Fehlererkennung von der korrekten Diagnose „D1“ (Entladungen mit niedriger Energie) zur Fehldiagnose „D2“ (Entladungen mit hoher Energie) führt. Wie stark sich die im Forschungsprojekt verifizierten Sorptionseffekte und die vorerst vermuteten, aber noch nicht im Detail geklärten, Permeationseffekte bei kontinuierlicher Gasproduktion auswirken, ist noch un-

bestimmt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass C_2H_2 und H_2 jedenfalls vom Papier sorbiert werden, so lange keine Sättigungseffekte wirksam werden. Ebenso sind auch die Auswirkungen auf die Gaszusammensetzung im Öl bei anderen Geräten (z.B. Transformatoren) oder Komponenten (z.B. Durchführungen) beim gegenwärtigen Wissenstand schwer vorherzusagen. Möglichen Auswirkungen können jedoch am Beispiel eines großen Leistungstransformators gezeigt werden, der mittels Online-DGA überwacht wird.

5.3.4. Anwendung der Erkenntnisse auf die Beurteilung eines kurzzeitig aktiven Fehlers in einem Transformator

Ein bis dato nicht geklärter, Vorfall führte kurzzeitig zu einem bedeutenden Anstieg der Konzentrationen von Wasserstoff (H_2) und Ethin (C_2H_2). Methan (CH_4) wurde etwa gleich viel wie Ethen (C_2H_4) produziert, aber in geringeren Mengen als H_2 und C_2H_2 . Die mit einem On-Line-Messsystem im Abstand von 7 ... 8 Stunden analysierten Gaskonzentrationen stiegen dabei nur über einen Zeitraum von rund 24 ... 30 Stunden an. Das Ölvolumen dieses Transformators wird mehrmals täglich forciert umgewälzt, so dass die durch den Fehler generierten Gase in diesem Zeitraum bereits homogen verteilt sein sollten. Danach war der Fehler offenbar nicht mehr aktiv so dass die Gasproduktion gestoppt wurde.

Der Transformator hat keinen Luftabschluss. Ein Teil der im Öl seines Ausdehnungsgefäßes gelösten Gase wird daher über dem freien Ölspiegel zunächst in das darüber liegende Gasvolumen diffundieren. In der Folge werden diese, insbesondere durch temperaturbedingte Schwankungen des Ölstandes (Atmen des Transformators), mit der Zeit in die Umgebungsluft befördert. Das Öl im Transformator-kessel wird durch diesen Prozess laufend mit dem teilentgasten Öl aus dem Ausdehnungsgefäß vermischt, so dass die Gaskonzentrationen nach einer temporären Gasproduktion kontinuierlich sinken werden. Entsprechend diesen Erwartungen fielen die gemessenen Gaskonzentrationen im Laufe einiger Monate auch tatsächlich beträchtlich ab.

Der Stoffübergangskoeffizient, d.h. die Kennzahl für den Transport eines Gases aus der Flüssig- in die Gasphase, ist nach [19] für Wasserstoff bedeutend höher als für die C2-Kohlenwasserstoffe und innerhalb dieser Gruppe wiederum etwa gleich hoch. Vorausgesetzt, dass die im Labor experimentell gefundenen Erkenntnisse auch für den komplexeren Gasaustausch eines Transformators gelten, müssten die Konzentrationen aller C2-Kohlenwasserstoffe annähernd gleich schnell, aber bedeutend langsamer abnehmen als die Wasserstoffkonzentration. Bei gleichbleibenden Verhältnissen der Konzentrationen von CH_4 , C_2H_2 und C_2H_4 , zueinander, würde sich auch ihr Schnittpunkt im Duval-Dreieck 1 nicht ändern. Tatsächlich wurde aber C_2H_2 nicht sehr viel langsamer als H_2 abgebaut, aber bedeutend schneller als das nur wenig besser öllösliche C_2H_4 . Aus den Aufzeichnungen wurden die Halbwertszeiten 34, 44, und 79 Tage für H_2 , C_2H_2 und C_2H_4 ermittelt. Infolge dieser Feststellungen ist zu vermuten, dass der Abfall der Ethinkonzentration im Öl durch Sorptionseffekte beschleunigt wurde.

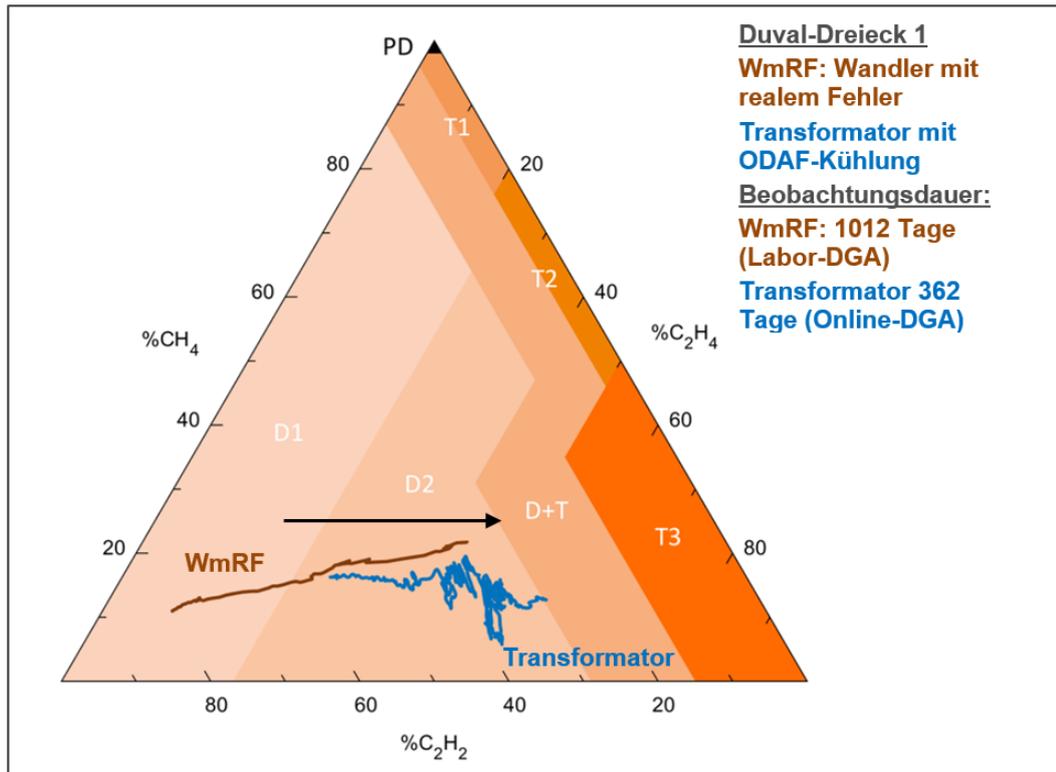


Abbildung 70: Zeitlicher Verlauf des C₂H₂-Gasanteiles nach Duval-Dreieck 1 - WmRF vs. Transformator

Durch die unterschiedlichen Abbauraten der produzierten Zersetzungsgase ändern sich auch die charakteristischen Gasmuster (Gassing Patterns) und damit die Gasquotienten der Diagnoseschemata kontinuierlich. Somit wird die Fehlerinterpretation vom Zeitpunkt der Ölprobenahme abhängig. Dieser Einfluss lässt sich besonders gut im Duval-Dreieck veranschaulichen (Abbildung 70), das zum Vergleich die zeitlichen Verläufe für diesen Transformator und den WmRF zeigt. Mit der DGA einer Ölprobe unmittelbar nach dem Fehlereintritt im Transformator würde die, voraussichtlich richtige, Fehlerart „D2“ diagnostiziert werden. Aus einer rund ein Jahr später gezogenen Ölprobe würde sich nach dem Duval-Dreieck 1 jedoch die Fehlerart „D+T“ ergeben. Da die Gaskonzentrationen jedoch durch die beschriebenen Vorgänge binnen weniger Monate unter die typischen 90 % Gaskonzentrationswerte für Leistungstransformatoren nach EN 60599 gefallen sind, wäre dieser einmalig aufgetretene Fehler ein Jahr nach dem Vorfall durch eine routinemäßige, jährliche DGA wahrscheinlich überhaupt nicht erkannt worden.

5.4. Zusammenfassung der neuen Erkenntnisse

Aus zahlreichen Publikationen, z.B. [20], ist bekannt, dass schlecht öllösliche Gase wie Wasserstoff und Kohlenmonoxid bei Transformatoren der offenen Bauart schneller aus dem Isolieröl ausgetragen werden als die anderen Gase. Dadurch, sowie durch unvollständige Auflösung aufsteigender Gasblasen wird sich das Gasmuster im freien Öl von jenem an der Fehlerstelle produzierten Original-Gasgemisch unterscheiden. Messwandler mit metallischen Dehnelementen sind hingegen weitgehend gasdicht abgeschlossen, so dass allenfalls geringe Mengen an Wasserstoff durch Verbundisolatoren permeieren können. Es war bisher schon für Wasser und die Kohlenoxide bekannt, dass diese Stoffe durch temperaturabhängige Sorptions- und Desorptionsprozesse dynamisch zwischen dem freien Öl

und dem Isolierpapier ausgetauscht werden. Aus den Untersuchungen zum Forschungsprojekt wurde nunmehr die neue Erkenntnis gewonnen, dass auch andere Gase, insbesondere jedoch Wasserstoff und Ethin, vom Isolierpapier sorbiert werden. Diese langsamen Sorptionsprozesse verändern mit der Zeit ebenfalls das Gasmuster gegenüber dem an der Fehlerstelle produzierten Gasgemisch.

Darüber hinaus könnte die durch eine DGA erfassbare Gaszusammensetzung auch noch davon abhängig sein, ob ein Fehler im freien Öl oder innerhalb der Öl-Papierisolierung situiert ist. Die bei einem Stromwandler (WmRF) mit einer Fehlerstelle unter einer dicken Öl-Papierisolierung beobachteten Zeitreihen der im freien Öl gelösten Gase zeigten auch 2 - 3 Jahre nach der Außerbetriebnahme für einige Zersetzungsgase fallende, für andere Gase jedoch steigende Tendenzen ihrer Konzentrationen. Als Ursache dieser langwierigen Prozesse wird von den Autoren dieses Berichts vermutet, dass die molekularen Stofftransporte durch Öl-Papierbarrieren für die unterschiedlichen Gase mit individuellen Geschwindigkeiten ablaufen. Die Konzentrationsabnahmen bestimmter Gase sind auf ihre Sorption durch das Isolierpapier zurückzuführen.

Es ist evident, dass die durch Versuche belegten Sorptions- und die vermuteten Permeationseffekte von Öl-Papierbarrieren das Gasverteilungsmuster im freien Öl, gegenüber dem am Fehlerort produzierten Original verändern und damit die darauf basierende Diagnose erschweren. Unter ähnlichen Verhältnissen wie bei den gegenständlichen Untersuchungen (dichtes Ölbehältnis, Gasproduktion gestoppt oder intermittierend) bestimmt dann der Zeitpunkt der Ölprobenahme das Ergebnis der Zustandsbewertung. Dieser Effekt wurde aber auch bei einem Transformator beobachtet, so dass er für diese Gerätegruppe ebenfalls beachtet werden sollte. Bisher wurde aber dieser potenzielle Einfluss weder in den Normen noch in der Literatur erwähnt und somit wird er bei Gas-in-Öl-Analysen wahrscheinlich auch nicht beachtet. Um die mit diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse zu erweitern und dadurch die Treffsicherheit künftiger DGA-Beurteilungen zu verbessern, wären jedoch weiterführende Untersuchungen erforderlich. Wichtig wäre dabei, die Permeationseigenschaften ölprägnierter Papierstapel und ihre Sorptionsisothermen für verschiedene Gase zu untersuchen. Solche Untersuchungen wären nicht nur für Messwandler nutzbringend, sondern auch für Transformatoren und andere Geräte.

6. Vergleich der definierten und erreichten Projektziele

Mit diesem Forschungsprojekt wurden Erkenntnisse zur Interpretation von Gas-in-Öl-Analyse (DGA) gewonnen, die teilweise weit über die ursprünglich gesetzten Ziele hinausgehen. Dieser unerwartete Zugewinn an Informationen ist nicht nur für Messwandler von Bedeutung, sondern auch für andere Geräte, insbesondere für Transformatoren. Die im Projektantrag definierten Zielvorgaben wurden jedenfalls vollkommen erreicht, wie der Vergleich mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungsergebnissen zeigt.

6.1. Verbesserte Zustandsbeurteilung auf Basis der DGA - Überprüfung der Treffsicherheit der Interpretationsschemata

Mit Hilfe der DGA werden die Konzentrationen der in Isolierflüssigkeiten gelösten Gase erfasst. Diese setzen sich aus gelösten Luftgasen, den bei chemischen Reaktionen entstandenen Gasen sowie den durch natürliche Alterung, Stray Gassing sowie durch thermische und elektrische Fehler generierten Spaltgasen zusammen. Wenn die von Fehlern produzierten Gase insgesamt dominieren, besteht die Möglichkeit, die Art des Fehlers zu identifizieren. Grundsätzlich beruhen dabei alle gebräuchlichen Schemata zur Interpretation von DGA-Werten darauf, dass die unterschiedlichen Fehlerarten gewöhnlich an charakteristischen Gasmustern (Gassing Patterns) erkannt werden können. Die Treffsicherheit der Erkennung wird jedoch zunehmend vermindert, wenn die nicht fehlerspezifischen Gasquellen die charakteristischen Gasmuster von Fehlern relevant verändern. In den Leitfäden zur Interpretation der im Öl gelösten Gase werden daher Schwellenwerte vorgeschlagen, um zwischen normalen und zu berücksichtigenden Gaskonzentrationen zu unterscheiden.

Durch das Forschungsprojekt wurden nun aber zwei neue, bisher nicht publizierte Erkenntnisse zur Interpretation von DGA-Werten gewonnen. Beide üben Einfluss auf die Treffsicherheit dieser Methode aus. Die erste Erkenntnis betrifft die Einflüsse von Sorptions- bzw. Desorptionsprozessen durch die Papierisolierung. Diese Prozesse sind bisher vor allem für den temperaturabhängigen Austausch von Wasser zwischen dem Isolierpapier und dem Öl aus zahlreichen Publikationen bekannt. Nunmehr ist aus den Ergebnissen der gegenständlichen Untersuchungen anzunehmen, dass auch mit weiteren im Öl gelösten Gasen molekulare Stofftransporte in bzw. aus dem Isolierpapier stattfinden. Besonders ausgeprägte Ausgleichsvorgänge wurden dabei für Wasserstoff, Ethin und Kohlendioxid festgestellt. Da die Sorptionsraten relativ hoch sind, können den im Öl gelösten Gasgemisch diese diagnostisch wichtigen Spaltgase im beträchtlichen Ausmaß entzogen werden, so dass eine DGA ein verändertes Gasmuster liefert.

Bisher waren ähnliche molekulare Stofftransporte aber nur für Kohlenoxide bekannt. Die in Publikationen eingemahnte Berücksichtigung thermischer Einflüsse auf CO_2/CO -Quotienten fand auch in den neuesten Leitfäden leider noch keinen Niederschlag. Welche physikalischen bzw. chemischen Wechselwirkungen bei den Ausgleichsprozessen vorherrschen, ist nicht im Detail bekannt. Da in den aufgenommenen Zeitreihen jedoch zumindest für CO_2 und C_2H_2 bereits bei Temperaturerhöhungen auf 40 °C Desorptionsvorgänge festzustellen waren, dürften die Bindekräfte zwischen dem Sorbent (Isolierpapier) und den Sorbaten (CO_2 und C_2H_2) relativ gering sein. Dieser Umstand lässt auf Physisorption und somit auf Adsorption schließen. Anscheinend nimmt Papier, wenngleich im deutlich geringeren Umfang, auch Kohlenmonoxid sowie Methan, Ethen und Ethan auf. Propin (C_3H_4), nach Ethin der zweite Vertreter der homologen Reihe der Alkine, wird – einzelnen Messergebnissen zufolge – ebenfalls stärker vom Papier sorbiert als Propen (C_3H_6).

Die zweite Erkenntnis resultiert aus projektbegleitenden Langzeituntersuchungen an einem Stromwandler, der wegen eines Fehlers außer Betrieb genommen wurde. Die Untersuchungsergebnisse lassen vermuten, dass neben den Sorptionsprozessen auch Permeationsvorgänge durch dicke Barrieren aus Öl-Papierlagen die Gaszusammensetzung im Öl beeinflussen können. Dabei ist anzunehmen, dass die Moleküle verschiedenen Gase – ähnlich wie bei Elastomeren – mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch Öl-Papier-schichten permeieren. Sollte diese Annahme zutreffen, so würde sich ein Gasmuster nach Durchlaufen dieser Barriere, d.h. nach der Ankunft im freien Öl, von dem an der Fehlerstelle produzierten, charakteristischen Gasmuster (Gassing Patterns) unterscheiden.

Um die wahrscheinlichste Fehlerart zu bestimmen, vergleichen alle gängigen Interpretationsschemata die festgestellten DGA-Werte mit den Merkmalen von Gasmustern bekannter Fehler. Für diesen Musterabgleich kommen verschiedene Methoden, wie z.B. die Basis-Gasquotienten nach EN 60599, zur Anwendung. Daher müssen bei der Beurteilung der DGA-Ergebnisse von ölgefüllten Hochspannungs-Messwandlern, aber auch von Transformatoren, mögliche Veränderungen dieser Gasmuster durch die zuvor beschriebenen Effekte in Betracht gezogen werden.

Die Langzeit-Beobachtung der sechs, eigens für das Forschungsprojekt gefertigten Probanden sowie des fehlerbehafteten Stromwandlers hat gezeigt, dass die Sorptions- und Permeationseffekte die Basis-Gasquotienten nach EN 60599 sowie die Schnittpunktcoordinate im Duval Dreieck 1 mit der Zeit deutlich verändern und damit auch die Zuordnung der Fehlerart maßgeblich beeinflussen können. Dabei spielt die Zeitspanne zwischen dem Fehlereintritt und dem Zeitpunkt der Ölprobenahme für die DGA eine wichtige Rolle, da die Sorptionsprozesse bei Messwandlern wegen der dicken Öl-Isolierpapierlagen relativ langsam ablaufen. Möglicherweise bestimmt dann der Zeitpunkt der Ölprobenahme in unerwünschter Weise das Ergebnis der Zustandsbewertung. Die Lehren aus diesen Fakten müssen in der Praxis erst gezogen werden. Wenn nicht Gefahr in Verzug anzunehmen ist, könnte eine Folgemessung nach einigen Wochen den Trend der Veränderungen zeigen, um daraus Rückschlüsse auf ihre Ursachen zu ziehen. Beim Fehler-Interpretationsschema nach EN 60599 ergab sich der unbefriedigende Befund, dass ein Großteil der Datenpunkte in Interpretationslücken (siehe Abbildung 61 und Abbildung 62) fiel. In solchen Fällen empfiehlt sich weitere Schemata, wie z.B. das Duval-Dreieck, zur Diagnoseerstellung beizuziehen.

6.2. Kriterien für einen optimalen Beprobungszeitpunkt

Im Vergleich zu Transformatoren haben Messwandler eine geringe Ölumlagerung durch Konvektion. Wenn die Probenahmestelle eines Messwandlers weit von seiner Fehlerstelle entfernt ist, könnten sich die Gas-in-Öl-Konzentrationen an diesen beiden Orten bei unzureichender Ölbewegung, wie z.B. bei Innenraumaufstellungen mit wenigen bzw. geringen Temperaturschwankungen, beträchtlich unterscheiden. Sollte sich die Fehlerstelle beispielsweise in der Nähe der Öl-Probenahmestelle befinden, dann könnten dadurch überhöhte Gaskonzentrationen gemessen und die Fehlerintensität überschätzt werden. Im entgegengesetzten Fall könnte ein Fehler eventuell übersehen werden. Eine annehmbare Homogenisierung der Spaltgase im freien Öl wird erst durch ausreichende Konvektionsströmungen erreicht, da Diffusionsprozesse im Öl – besonders bei tiefen Temperaturen – sehr lange dauern. Die Untersuchungsergebnisse ergaben, dass eine einigermaßen gute Homogenisierung – zumindest bei Freiluftaufstellung der Geräte – während der wärmeren

Jahreszeit mit größeren Tagestemperaturänderungen und durch die Erwärmung der Oberflächen infolge von Sonneneinstrahlung zu erwarten ist. Ausreichende Dilatationsbewegungen des Öls werden auch zum Ausgleich der Gaskonzentrationen in den Ölvolumina im Wandler und seinem Dehnelement beitragen, die oft unterschiedlich sein können.

6.3. Erkenntnisse zur Gas- und Wasserdampfdurchlässigkeit von Verbundisolatoren

Für die äußere Isolierung von Hochspannungswandlern wurden bis in die frühen 1980er ausschließlich glasierte Porzellan-Hohlisolatoren verwendet. Mit der Entwicklung von Verbundisolatoren mit Silikonbeschirmung kommen diese Geräteisolatoren seither vermehrt zum Einsatz, da sie gegenüber Porzellan einige gewichtige Vorteile aufweisen. Wegen unzureichender Langzeiterfahrung zur Wasserdampf- und Gasdichtigkeit war es auch ein Ziel des Forschungsprojekts, ausführliche Informationen über die Permeation von Wasserstoff, Kohlenoxiden, Kohlenwasserstoffen und Wasserdampf durch das Wandlergehäuse von Hochspannungswandlern mit Verbund- im Vergleich zu Porzellanisolatoren zu erlangen.

Als generelles Ergebnis der Untersuchungen ist festzuhalten, dass bei keiner der beiden Isolatorarten eine relevante Wasserdampfpermeation festzustellen war. Die voraussichtlich auf diesem Weg in das Isolieröl eingebrachte Wassermasse wird problemlos vom Isolierpapier aufgenommen. Da dieser Wassereintrag zu keiner nennenswerten Anhebung der Papier- und somit der Ölfeuchte führt, spricht aus dieser Sicht nichts gegen den Einsatz von Verbundisolatoren.

Während der langen Beobachtungsdauer wurde an den Probanden ohne Aktivteil auch keine beachtenswerte Abnahme der Konzentrationen von Kohlenoxiden und Kohlenwasserstoffen festgestellt. Die Untersuchungsergebnisse lassen aber zumindest vermuten, dass im Öl gelöster Wasserstoff in geringen Mengen durch das Dichtungssystem und durch die Verbundisolatoren in die Umgebung austritt. Die damit einhergehende Reduktion der H₂-Konzentration im Öl scheint aber – zumindest bei Geräten mit gasdicht gegen die Umgebung schließenden Dehnelementen - von untergeordneter Bedeutung gegenüber der Sorption durch das in ölgefüllten Messwandler eingesetzte Isolierpapier zu sein.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Analyse der im Isolieröl von Hochspannungsgeräten gelösten Spaltgaskonzentrationen (DGA Dissolved Gas Analysis) wird, in Verbindung mit verschiedenen Interpretationsschemata, seit über fünf Jahrzehnten zur Erkennung und Bewertung von Fehlern in ölgefüllten Transformatoren eingesetzt. Sie ermöglicht eine Diagnose, da die unterschiedlichen Arten von Fehlern charakteristische Gasmuster (Gassing Patterns) generieren. Motiviert durch mehrere Schäden, die infolge einiger Explosionen der Porzellanisolatoren Personen und Anlagen gefährdeten, kommt diese Diagnosemethode seit nunmehr 30 Jahren auch bei Hochspannungs-Messwandlern erfolgreich zur Anwendung. Die Bauform, die Materialmassen, die Beanspruchungen und auch die Fehlerursachen dieser Geräte unterscheiden sich jedoch merklich von Leistungstransformatoren. Folglich differenziert die EN 60599: 2016 in den Angaben der 90 %-Konzentrationswerte, d.h. jenen Spaltgaskonzentrationen, die noch keinen weiteren Handlungsbedarf auslösen, auch zwischen den unterschiedlichen Geräten.

Eine treffsichere Interpretation der DGA-Werte zwecks Bestimmung der Fehlerart setzt jedoch voraus, dass die fehlerspezifischen Gasmuster weder durch Prozesse im untersuchten Gerät noch durch die Probenahme und Analyse gravierend verändert werden. Beispielsweise kann eine in die Probe gelangte Luftblase, die nur ein Prozent des Ölvolumens ausmacht, die H₂-Konzentration im Öl um mehr als 15 %-Punkte reduzieren. Das setzt aber voraus, dass die Luftblase mit den darin verteilten Spaltgasen der Ölprobe nicht der Analyse zugeführt wird. Im anderen Fall wäre der Einfluss auf die ermittelten Konzentrationen deutlich geringer, würde aber zu falschen O₂- und N₂-Konzentrationen und O₂/N₂-Verhältnissen führen. Diagnoseprobleme werden auch durch nicht von Fehlern erzeugte Gase verursacht. So stellte VUM bereits vor einigen Jahren fest, dass der durch einen chemischen Prozess von Aluminium und Wasser generierte und im Öl gelöste Wasserstoff in mehreren Fällen eine zutreffende Diagnose auf Basis der üblicherweise verwendeten Interpretationsschemata verhinderte. Bei Routineuntersuchungen jüngerer Datums wurden nunmehr bei mehreren Messwandlern unerklärlich starke Konzentrationsrückgänge einzelner Spaltgase festgestellt, die mit der Zeit zu starken Änderungen der ursprünglichen Gasmuster führte. Da diese Vorkommnisse vor allem bei Messwandlern mit Verbundisolatoren beobachtet wurden, war die Zuverlässigkeit der DGA-Interpretationsschemata für Zustandsbeurteilungen von Geräten mit dieser Ausführungsform in Frage gestellt. Daher strebte VUM ein gefördertes Forschungsprojekt an, um die Ursachen dieser Veränderungen zu untersuchen.

Die Ziele dieses Forschungsprojekts waren mit dem vorgenannten Haupt- und einigen Nebenzielen maßvoll definiert, so dass die Projektdauer mit 18 Monaten veranschlagt wurde. Schon die ersten Untersuchungen an sechs eigens dafür hergestellten Modellen von Messwandlern (Probanden) brachten jedoch einige unerwartete und vorerst schwer deutbare Ergebnisse. Es zeigte sich aber schon bald, dass nicht die potenzielle Gasmigration durch den Verbundisolator die Hauptursache für den Konzentrationsrückgang einiger im Öl gelöster Spaltgase ist, sondern Sorptionseigenschaften des Aktivteils. Als wichtige neue Erkenntnis stellte sich zusätzlich heraus, dass Wasserstoff, Ethin und Kohlendioxid, also Gase, die in der Interpretation Schlüsselrollen einnehmen, bereits im Laufe weniger Monate maßgeblich von der Papierisolierung sorbiert werden. Durch den Konzentrationsabbau dieser Gase im Öl werden jedoch die Basis-Gasquotienten der EN 60599 sowie die Konzentrationsverhältnisse der drei Gase im Duval-Dreieck verändert. Beispielsweise

spielt der Wasserstoff im Basisquotienten CH_4/H_2 eine wichtige Rolle zur Identifikation von Teilentladungen. Ebenso wirken sich starke Veränderungen von C_2H_2 beim Basiskoeffizienten $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ sowie im Duval-Dreieck 1 durch die veränderte Lage des Schnittpunkts der Dreieckskoordinaten aus. Überraschenderweise wurden diese Effekte in der über 50-jährigen Geschichte der DGA nach Wissen der Autoren bisher noch nie publiziert und auch nicht in den Fachnormen berücksichtigt, obwohl die dadurch veränderten Gasmuster zu falschen Diagnosen der Fehlerart führen können.

Die beobachteten Veränderungen der Gaskonzentrationen zeigen Parallelen mit Sorptions- und Desorptionsprozesse zwischen der jeweils im Öl bzw. im Papier gespeicherten Wassermasse auf. Für Kohlendioxid waren vergleichbare Prozesse seit einiger Zeit bekannt, nicht jedoch für Wasserstoff und Ethin, so dass mit den gegenständlichen Untersuchungen Neuland betreten wurde. Durch die speziellen Wechselwirkungen der polaren Wassermoleküle mit der ebenfalls polaren Cellulose sind jedoch direkte Vergleiche der Vorgänge wahrscheinlich nicht zulässig. Die Hauptisolation von Hochspannungswandlern hat im Verhältnis zur Papiermasse eine kleine äußere Oberfläche, über die ein molekularer Stoffaustausch mit dem Öl stattfinden kann. Der Weitertransport der Gase zu den inneren Schichten der Öl-Papierisolation erfolgt dann durch Permeation, so dass sich die Ausgleichsprozesse nur durch langfristige Beobachtungsperioden erfassen lassen. Diese Tatsache war unter anderem einer der Gründe, weshalb die Projektdauer gestreckt werden musste, um zu sinnvollen Ergebnissen zu gelangen.

Insgesamt zeigen die an den Probanden gewonnenen Untersuchungsergebnisse, dass die in ihre Ölfüllungen eingebrachten Ausgangskonzentrationen von H_2 , CO_2 , und C_2H_2 innerhalb nur eines Jahres durch diese Sorptionsprozesse um bis zu 50 % vermindert wurden. Die Gase CO , CH_4 , C_2H_4 und C_2H_6 werden zufolge der Untersuchungsergebnisse zwar ebenfalls, aber eben bedeutend schwächer, sorbiert. Bei zwei im Abstand eines Jahres aufeinanderfolgenden Gas-in-Öl-Analysen könnten durch die erheblich veränderten Gasmuster sogar unterschiedliche Fehlerarten diagnostiziert werden, ohne dass sich der kurzzeitig aktive Fehler dazwischen geändert hat. Bei Geräten mit größeren Quotienten von Papieroberflächen zur Papiermasse, speziell bei Transformatoren, sind entsprechend schneller ablaufende Sorptionsprozesse und somit kurzfristige Änderungen der Gasmuster zu erwarten.

Der qualitative Einfluss dieser Effekte auf die Bestimmung der Fehlerart mit Hilfe der Interpretationsschemata nach EN 60599 und nach Duval konnte durch das gegenständliche Forschungsprojekt geklärt werden. Für den Spezialfall der Probanden und für einen Wandler mit einem realen Fehler werden die beachtlichen Auswirkungen auf die Fehlerinterpretation in den graphischen Darstellungen der Gasquotienten auch eindrucksvoll veranschaulicht. Der wichtige Einfluss höherer Temperaturen, der sich beispielsweise durch stärkere Verlagerung von Wasser aus dem Papier in das Öl äußert, konnte mit diesem Projekt nicht ausreichend untersucht werden. Wenn die Treffsicherheit der DGA für Zustandsbeurteilungen und die Identifikation der Fehlerart verbessert werden soll, dann sind weiterführende Untersuchungen zu Sorptionsprozessen zwischen Papier und den wichtigsten Spaltgasen geboten. Dabei müsste auch eine allenfalls mögliche, konkurrierende Sorption von Gas- und Wasserdampfmolekülen beachtet werden. Die Ergebnisse der Vorversuche haben jedenfalls bereits signalisiert, dass unterschiedliche Feuchten des Papiers sein Sorptionsverhalten für die Gase beeinflussen kann.

Anhand eines realen Vorfalls an einem Transformator wurde aufgezeigt, dass diese Effekte nicht nur für Messwandler von Bedeutung sind, sondern auch für andere Gerätegruppen. Für diesen Transformator zeigten die On-Line aufgezeichneten DGA-Werte nach einem einmaligen Fehlervorfall unterschiedlich stark fallende Konzentrationswerte aller produzierten Gase. Der Rückgang der Konzentrationen ist dabei nur teilweise auf Emissionen über das gegenüber der Umgebungsluft nicht abgeschlossene Dehngefäß rückführbar. Es ist anzunehmen, dass die vergleichsweise kurzen Halbwertszeiten von rund 34 Tagen für Wasserstoff und 44 Tage für Ethin gegenüber jenen von rund 79 Tagen für Ethen durch die besprochenen Sorptionseffekte zusätzlich verkürzt wurden. Gas-in-Öl-Analysen mit Beprobungen im Abstand von einem halben Jahr hätten infolge der veränderten Gasmuster bereits zu zwei unterschiedlichen Interpretationen der zugrundeliegenden Fehlerart geführt. Bei Beprobungsabständen von mehr als zwei Jahren wäre dieser bisher nur einmal aktiv gewordene Fehler möglicherweise sogar unentdeckt geblieben.

Es kann als Glücksfall gewertet werden, dass begleitend zu den Untersuchungen an den Probanden ein, wegen eines Fehlers außer Betrieb genommener, Stromwandler für Langzeituntersuchungen zur Verfügung stand. Dadurch wurde nämlich eine weitere Erkenntnis gewonnen. Im Gegensatz zu den Probanden war der Fehler und somit die Gasproduktion unter einer dicken Papierisolierung situiert. Somit mussten die erzeugten Spaltgase – zumindest teilweise – durch diese Öl-Papier-Barriere permeieren mussten, um ins freie Öl zu gelangen. Sehr wahrscheinlich ist der Barriereneffekt für die einzelnen Gase unterschiedlich stark, so dass ihre molekularen Stofftransporte ungleich ausfallen werden. Diese Vermutung wird durch die Untersuchungsergebnisse an diesem Wandler gestützt, der – zufolge der Post-Mortem-Untersuchung – nur diese eine Fehlerstelle hatte. Während nämlich die Konzentrationen einiger Gase, wie C_2H_4 und C_2H_6 , noch lange nach der Außerbetriebnahme des Geräts weiter anstiegen, zeigten sie hingegen für H_2 und C_2H_2 eine stark fallende Tendenz. Durch diese divergierenden Veränderungen der Gasmuster werden die zur Interpretation nach EN 60599 verwendeten Basis-Gasquotienten, sowie die Schnittpunktkoordinaten der drei Volumenanteile im Duval-Dreieck 1 noch stärker verändert als bei Fehlern im freien Öl. Daher können die Fehlerzuordnungen in den Interpretationsgraphiken bei Fehlerbeginn und zu einem späteren Zeitpunkt noch weiter auseinanderdriften. Aus diesem Grund erscheinen weiterführende Untersuchungen zur Permeation bzw. Diffusion durch Öl-Papierschichten, gegebenenfalls unter Einbeziehung neuer Isolierflüssigkeiten, sehr sinnvoll.

Grundsätzlich sind Verbund-Hohlisolatoren und ihr Dichtungssystem gas- und wasserdampfdurchlässig. Die im Laufe der Nutzbarkeitsdauer von Messwandlern in ihr Isoliersystem eingebrachten Wassermasse ist nach Erkenntnissen eines deutschen Forschungsprojekts und den gegenständlichen Untersuchungen in Anbetracht des Wasseraufnahmevermögens der Papierisolierung voraussichtlich unerheblich. Durch Schäden am Isolator und am Dichtungssystem sind jedoch auch höhere Wassereinträge vorstellbar. Daher, sowie auch wegen der Wasserbildung durch Alterung der Isolierung, sind gelegentliche Messungen der Ölfeuchte an älteren Geräten zur Erhöhung der Betriebserfahrung zu erwägen. Zur besseren Bewertbarkeit dieser Ergebnisse sollten auch die Basiswerte jüngerer Messwandler erfasst werden.

Grundsätzlich können Gase auch aus dem Öl durch Verbundisolatoren in die Umgebung diffundieren und damit der DGA nicht mehr zugänglich sein. Aus den Untersuchungsergebnissen könnte mit einigem Vorbehalt geschlossen werden, dass dies auf H_2 zutreffen

könnte. Verglichen mit den Veränderungen der Gaskonzentrationen infolge der Sorptionsprozesse scheint dieser Einfluss auf den Gashaushalt jedoch unerheblich zu sein.

Die Untersuchungen an den Probanden sowie am fehlerbehafteten Stromwandler haben neue Erkenntnisse geliefert, die nicht nur für die Interpretation von DGA-Werten von ölierten Messwandlern, sondern besonders auch für Transformatoren zu beachten sind. Durch das verbesserte Know-how wären weitere Untersuchungen an zukünftig entdeckten, fehlerbehafteten Messwandlern in Verbindung mit Post-Mortem-Untersuchungen wichtig, um die Erkenntnisse zu verifizieren und eventuell auch zu erweitern. Um die Emissions- und Sorptionseffekte bei Transformatoren besser auseinanderhalten zu können wären weitere Untersuchungen zweckmäßig. Dazu müssten beispielsweise frei atmenden und hermetisch abgeschlossenen Verteiltransformatoren in ähnlicher Weise wie die Probanden im Forschungsprojekt mit gasbeladenem Öl versetzt und einige Zeit im Betrieb durch einige Gas-in-Öl-Analysen beobachtet werden.

8. Anhang

8.1. Beprobung, Analytik und Berechnung (HS-DGA)

Für die Messung der gelösten Gase im Öl nach EN 60567 [1] hat sich für Messwandler aufgrund der geringen Probenmengen die Variante der Headspacetechnik bewährt. Für dieses Untersuchungsprojekt wurden die Headspacefläschchen kurz vor der Beprobung mit Argon vorgespült, um den Anteil der Luftgase darin auf ein Minimum zu reduzieren. Die Befüllung dieser Headspacefläschchen erfolgt vor Ort mittels Spritze durch Injektion über Kopf.

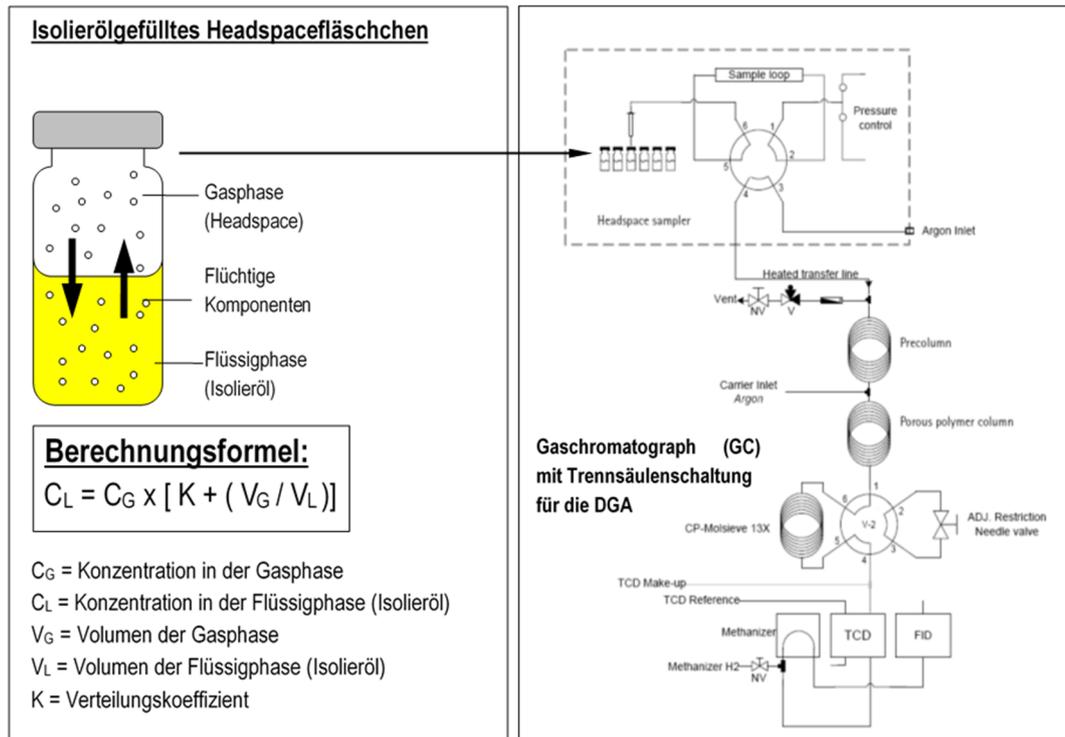


Abbildung 71: DGA mittels Headspacetechnik (Analytik, Berechnung)

Formel 2: Berechnung der Gaskonzentration im Isolieröl gemäß EN 60567

$$C_L = C_G * (K + V_G/V_L)$$

Im Headspacefläschchen verteilen sich die im Öl gelösten Gase zwischen der Öl- und Gasphase. Durch Temperierung und Schütteln in einem Headspacesampler wird die Gleichgewichtseinstellung beschleunigt. Anschließend erfolgt die Analyse (HS-DGA) der Gasphase (C_G). Dazu wird die Probenschleife durch Druckentspannung mit Gas aus dem Headspacefläschchen gefüllt. Nach dem Transfer des Probengases über die Probenschleife in den Gaschromatographen (GC) erfolgt die Auftrennung der Gasbestandteile über eine Trennsäulenschaltung. Die aufgetrennten Gase werden über die Retentionszeit identifiziert und mittels Detektoren (FID, WLD)²⁵ quantifiziert.

²⁵ FID = Flammenionisationsdetektor; WLD = Wärmeleitfähigkeitsdetektor

Vorversuche

Über das Phasenverhältnis (V_G/V_L) und die Verteilungskoeffizienten (K) wird auf die Konzentrationen in der Ölphase (C_L) hochgerechnet. Bei realen Geräten werden nur pure Ölproben zur Messung mittels DGA eingesetzt. Im Falle der Vorversuche erfolgte die Messung des gesamten Probenansatzes (Öl und Papier).

Durch den Zusatz von unterschiedlichen Papiermengen kommt es zu geringfügigen Veränderungen des Quotienten V_G/V_L . Diese geringe Volumsänderung in den Vorversuchsproben wurde weder rechnerisch noch durch entsprechende Ölmengenreduktion korrigiert.

Als Referenzproben diente dasselbe, mit Spaltgasen angereicherte Isolieröl ohne Papier- und Feuchtigkeitszugabe. Diese wurden in derselben Weise gelagert und analysiert.

Die Equilibrierung im Probensamplern erfolgt bei realen Proben üblicherweise gemäß Norm bei 70 °C. Um bei diesem Vorversuch das bei der Lagerungstemperatur eingestellte Verteilungsgleichgewicht der Gase zwischen Isolieröl und Isolierpapier nicht zu verändern, wurde die Equilibrierungstemperatur aller Proben sowie Referenzproben der vorangegangenen Lagerungstemperatur angepasst.

Durch die Gasentnahme aus den Proben bei der ersten Messung wird auch die Gaskonzentration im Öl bzw. im Papier verändert. Um dies in der Darstellung zu kompensieren, wurden sowohl Proben als auch Referenzproben nach der ersten Messung mit gleichem Argon-Druck beaufschlagt und erneut bei höherer (Serie A) bzw. niedriger Temperatur (Serie B) gelagert. Für die relative Darstellung der Ergebnisse aus der zweiten Messung wurde als Ausgangswert auch die zweite Messung der Referenzproben herangezogen.

Hauptversuche

Die Entnahme der Isolierölproben aus den Versuchsobjekten erfolgte mittels 10 Milliliter Spritze mit aufgesetzter Nadel über spezielle Entnahmestellen am Kopf- und Fußteil. Diese sind ausgerüstet mit Rückschlagkugel und Septum, um eine mit Umgebungsluft berührungsfreie Beprobung sicherzustellen.

Eine zwischenzeitliche Beprobung der Dehnelemente war an eingebauten Dreiwegeventilen zwischen Dehnelement und Wandlerkopf möglich. Dazu wurde mit den Dreiwegeventilen während der Beprobung gleichzeitig auch der Weg zum Wandler abgesperrt, um wirklich nur Isolierölprobe aus dem Dehnelement zu entnehmen.

Vor der Abfüllung der Isolierölproben vor Ort zur DGA wurde ein Spritzenvolumen zu Spülzwecken verworfen. Erst von der zweiten und dritten Entnahme (Doppelproben) wurden jeweils exakt 5 Milliliter in die, kurz zuvor mit Argon gespülten, Headspace-Fläschchen über Kopf abgefüllt. Die Proben wurden noch am selben Tag der Analyse zugeführt. Die im Bericht dargestellten Ergebnisse sind bereits Mittelwerte der Doppelproben, deren Abweichung von einander unter 2 % lag.

Direkt im Anschluss an die Entnahme der Proben für die DGA wurde zur Messung des Wassergehaltes mittels Karl-Fischer-Methode ein weiteres Spritzenvolumen an Isolieröl entnommen und sofort ohne Luftkontakt vor Ort der Messung zugeführt. Die im Bericht dargestellten Ergebnisse sind bereits Mittelwerte aus zumindest 3 übereinstimmenden Ergebnissen.

8.2. Erläuterungen zur Diffusion von Gasen in Luft und in Flüssigkeiten

Diffusion (Quelle: <https://www.chemie.de/lexikon/Diffusion.html>)

Diffusion (v. lat.: *diffundere* „ausgießen, verstreuen, ausbreiten“) ist ein physikalischer Prozess, der zu einer gleichmäßigen Verteilung von Teilchen und somit vollständigen Durchmischung zweier Stoffe führt. Diese Durchmischung entsteht durch die thermische Bewegung (Brown'sche Molekularbewegung) der Teilchen und verläuft gleichmäßig in alle Richtungen. Ein anschauliches Beispiel ist der Duft eines Parfums, der sich durch Diffusion in der Raumluft ausbreitet.

Diffusionskoeffizient

Die Diffusionszeit eines Teilchens über eine Diffusionsstrecke Δx kann aus der Einstein-Smoluchowski-Gleichung berechnet werden:

$$t_{\Delta x} = \frac{\Delta x^2}{2 \cdot D}$$

Der Diffusionskoeffizient D wird in [21] beispielsweise mit $6,9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Diffusion von Wasserstoff in Luft bei Normaldruck und $20 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben. Die Diffusionszeit für eine Strecke von 100 mm würde unter diesen Voraussetzungen 72 s betragen. Erfahrungsgemäß wird man den Geruch eines Parfums aus 10 cm Entfernung jedoch schneller wahrnehmen, so dass bereits bei relativ kleinen Distanzen die Luftströmung (Konvektion) eine größere Rolle spielt als die Diffusion. Mit zunehmender Molekülgröße wird der Diffusionskoeffizienten kleiner. Solche Moleküle diffundieren daher deutlich langsamer durch Medien als Wasserstoff. Im Vergleich mit Wasserstoff ist der Diffusionskoeffizient von Sauerstoff in Luft mit $2,31 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ bereits um den Faktor 3 kleiner. Weitere Informationen zum Diffusionskoeffizienten:

https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusionskoeffizient#Diffusionskoeffizienten_in_Gasen

Diffusion in Mineralöl und anderen Flüssigkeiten

Flüssigkeiten haben ein sogenanntes „Freies Volumen“ verteilt auf molekulargroße Löcher, die nicht mit Flüssigkeitsmolekülen besetzt sind. Diese Löcher können von Gasmolekülen besetzt werden, die dann durch Brown'sche Bewegungen zu weiteren freien Löchern weiterspringen und sich dabei im Mittel in Richtung des Konzentrationsgefälles fortbewegen. Das freie Volumen und die Intensität der Teilchenbewegungen nehmen mit der Temperatur zu, womit auch der Diffusionskoeffizient größer wird.

Die Diffusionskoeffizienten von Gasen in Flüssigkeiten sind in grober Näherung um etwa vier Zehnerpotenzen kleiner als in Luft oder anderen Gasen. Beispielsweise wurde der Diffusionskoeffizient von Wasserstoff in $30 \text{ }^\circ\text{C}$ warmen Mineralöl mittels eines numerischen Simulationsverfahrens mit $2,58 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ berechnet [22]. Damit würde sich für eine Diffusionsstrecke von 100 mm bereits eine Diffusionszeit von 194.000 s, d.h. von rund 54 h, ergeben. Bei einem größeren Gerät, wie einem ölgefüllten Messwandler, würde eine gute Durchmischung ausschließlich auf Basis von Diffusion somit sehr lange dauern. Da neben der Diffusion noch weitere Verteilungsmechanismen wirksam werden, wird eine gute Durchmischung der Phasen (Gase und Isolieröl) meist nach viel kürzerer Zeit erreicht. Im freien Öl werden an Fehlerstellen Gasbläschen unterschiedlicher Größe gebildet, die während des Aufstiegens Gase mit dem umgebenden Öl austauschen. Wenn das Öl nicht gasgesättigt ist, werden kleinere Bläschen, die langsamer aufsteigen als große, bei ausreichend langen Aufstiegswegen vollständig aufgelöst. Größere Bläschen, die bei heftiger

Gasentwicklung entstehen, werden oft nur teilweise aufgelöst, so dass sich das Gas im Dehnelement sammelt. Dabei ist anzumerken, dass die Zusammensetzung dieses gesammelten Gases und der am Fehlerort erzeugten Gasmischung nicht identisch sind (vgl. mit Stripping, siehe z.B. <https://de.wikipedia.org/wiki/Strippung>). Für den Transport der Gasteilchen spielt auch der Entstehungsort eine Rolle. Bei Kopfstromwandlern sind die Aufstiegswege von Bläschen i.a. kürzer als bei Spannungswandlern. Noch größere Einfluss auf die beschleunigte Durchmischung von Ölvolumina mit unterschiedlichen Gaskonzentrationen haben die freie und vor allem die erzwungene Konvektion. Im Gegensatz zu OF- oder OD-gekühlten Transformatoren gibt es bei Messwandlern nur die freie Konvektion. Einige Erläuterungen dazu folgen in Absatz 8.3.

Der Transport von Gasteilchen über weitere Strecken im freien Öl sowie die Durchmischung des freien Ölvolumens werden zum überwiegenden Teil durch das Aufsteigen von Gasbläschen und durch Konvektion erfolgen. Diffusion wird vorwiegend in den feinen Ölspalten zwischen Papierlagen wirksam, wo keine Konvektion auftritt. Bei einem 0,2 mm dicken Ölspalt würde die Diffusionszeit von Wasserstoff weniger als 1 s betragen. Für Gase mit einem kleineren Diffusionskoeffizienten (z.B. $0,43 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ für CO_2) verlängert sich die Diffusionszeit auf etwa 6 s.

Zur Diffusion von Wasserstoff und anderen Spaltgasen durch ölprägniertes Papier wurden keine veröffentlichten Diffusionskoeffizienten im Web gefunden, sie werden jedoch vermutlich zumindest um zwei Größenordnungen kleiner sein als im Öl. Der Diffusionskoeffizient eines dünnen Isolierpapiers (0,15 mm) für die Aufnahme von Wasser aus dem Isolieröl wurde in einer Untersuchung sogar nur mit $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ ermittelt [23]. Dieser Wert erscheint äußerst niedrig, da er bereits um sechs Zehnerpotenzen kleiner wäre als der Diffusionskoeffizient für Wasserstoff in Mineralöl. Ungeachtet dessen, wird der Stofftransport von Gasen durch dickere Öl-Papierlagen viel Zeit in Anspruch nehmen und für verschiedene Gase auch deutliche Unterschiede aufweisen. Konkretes Zahlenmaterial dazu wäre zur Beurteilung der möglichen Verzögerungen zwischen Fehlerereignis und Detektierbarkeit daher nutzbringend und dementsprechende Untersuchungen wünschenswert.

8.3. Natürliche Konvektion in ölgefüllten Messwandlern

Konvektion (von lateinisch *convehere* „zusammentragen“, „zusammenbringen“

<https://de.wikipedia.org/wiki/Konvektion>)

Konvektion wird durch eine Strömung hervorgerufen, die Teilchen transportiert. Ursache dieser transportierenden Strömung können unterschiedliche Kräfte sein, wie z. B. die Schwerkraft oder Kräfte, die von Druck-, Dichte-, Temperatur- oder Konzentrationsunterschieden herrühren.

In ölgefüllten Messwandlern kann nur natürliche Konvektion auftreten, die durch thermische Dichteunterschiede sowie möglicherweise auch durch Dichteunterschiede aufgrund von Ölvolumina mit unterschiedlicher Gaskonzentrationen hervorgerufen wird. Die Dichteänderung von Mineralöl beträgt $6,9 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Zur Dichteänderung durch gelöste Gase gibt es kaum verwertbare Informationen. Eigene Versuche der VUM haben jedoch gezeigt, dass das spezifische Gewicht von Öl während des Lösens von Propan abnimmt. Bei anderen Gasen, die im freien Volumen des Öls absorbiert werden, wären auch Zunahmen des spezifischen Gewichts vorstellbar. In Messwandlern entstehen im Normalbetrieb nur geringe Verlustleistungen, so dass Erwärmungsunterschiede viel weniger zur natürlichen Konvektion beitragen als bei Transformatoren. In einer Masterarbeit an der TU Graz wurden

Berechnungen der Ölströmungen bei einem, mit dem thermischen Grenzstrom betriebenen, 220 kV-Stromwandler durchgeführt [24]. Zu Beginn stellt sich noch eine Konvektionsströmung über die gesamte Baulänge des Wandlers ein, wie aus Abbildung 72 ersichtlich wird.

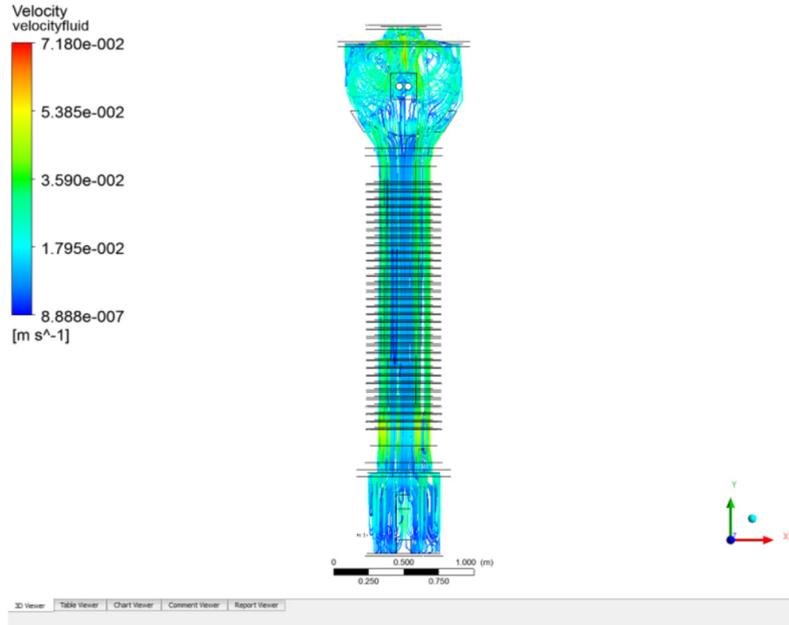


Bild 4-30 –Ölbewegung bei instationärem Zustand (Frontansicht)

Abbildung 72: Berechnete Konvektionsströmung bei einem Stromwandler im instationären Zustand, veröffentlicht in [24]

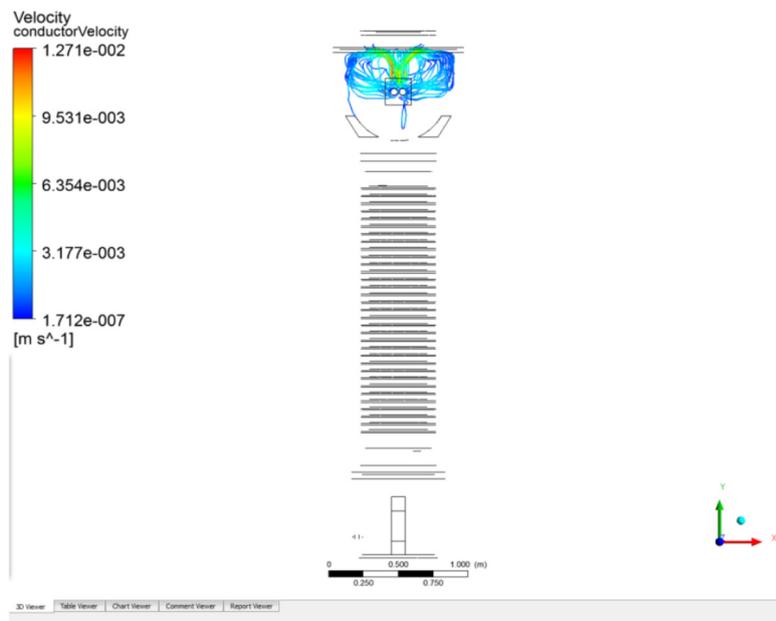


Bild 4-32 –Ölbewegung bei stationärem Zustand (Frontansicht)

Abbildung 73: Berechnete Konvektionsströmung bei einem Stromwandler im stationären Zustand, veröffentlicht in [24]

Für den stationären Zustand reißt die Strömung zum Fußteil laut der Berechnung in [24] jedoch ab, und eine Konvektionsströmung tritt nur noch im Kopfteil auf. Diese Berechnungen wurden unter der Annahme konstanter Umgebungstemperaturen vorgenommen. Solche Verhältnisse ergeben sich näherungsweise bei Innenraumaufstellungen von Messwandlern. Bei Aufstellungen in Freiluftanlagen wirken sich hingegen wechselnde Tagestemperaturen, ungleichmäßige Sonneneinstrahlungen und unterschiedliche Luftströmungen auf Erwärmungsunterschiede innerhalb der Wandler aus. Somit dürften alle aufgezählten Effekte insgesamt, besonders während der wärmeren Jahreszeit, zu einer relativ guten Homogenisierung der Gaskonzentrationen im freien Öl der Wandler führen.

8.4. Erläuterungen zu den Begriffen Sorption, Adsorption und Absorption

Sorption (Quelle: <https://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/04/05H021/t3.pdf>)

Kondensierte Phasen, d.h. Flüssigkeiten und Festkörper, können aus ihrer Umgebung Fremdmoleküle aufnehmen. Dieser Vorgang wird allgemein als Sorption bezeichnet. Der aufzunehmende Stoff (Sorptiv) kann dabei in das Innere der kondensierten Phase (Sorbens) eindringen oder sich an seiner Grenzfläche anreichern. Desorption ist die Umkehrung von Sorptionsvorgängen.

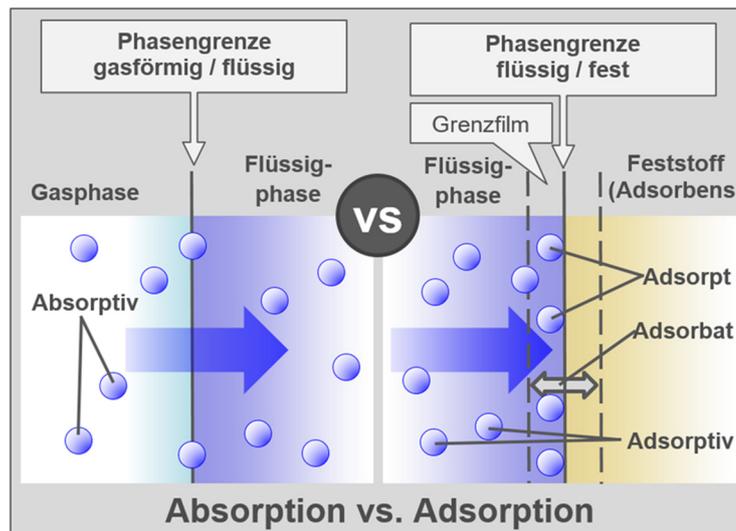


Abbildung 74: Unterscheidung zwischen Adsorption und Absorption

Absorption

Dringt das Sorptiv in die Volumenphase des Sorbens ein und verteilt es sich dort homogen, dann spricht man von Absorption. Flüssigkeiten besitzen ein Volumen, das nicht mit ihren Molekülen besetzt ist und das als „Freies Volumen“ bezeichnet wird. Gasmoleküle werden im Öl oder anderen Flüssigkeiten in solche „Freien Volumina“ **absorbiert**. Freie Volumen existieren aber auch in Polymeren zwischen den Molekülketten, womit auch Feststoffe Gas- oder Flüssigkeitsmoleküle „lösen“ können. Eine Absorption ist häufig mit einer Volumsvergrößerung des sorbierenden Mediums verbunden.

Adsorption

Erfolgt eine Anreicherung des Sorptivs (Flüssigkeiten, Gase) an der Grenzfläche des Sorbens, dann handelt es sich um Adsorption. Unter dem Begriff Adsorptiv versteht man die freien, noch nicht adsorbierten Anteile eines Stoffes. Den adsorptionsaktiven Feststoff, an

dem die Adsorption stattfindet, nennt man Adsorbens. Die adsorbierten Teile des Adsorptivs, d.h., die durch verschiedene Bindekräfte an der Oberfläche festgehaltenen Teilchen, heißen Adsorpt. Bei porösem Adsorbens ist die gesamte zugängliche Oberfläche aller Mikro-, Meso- und Makroporen an der Adsorption beteiligt. Sie ist oft viel größer als die, von außen direkt sichtbarer Oberfläche. Silicagel hat beispielsweise eine innere Oberfläche von bis zu 800 m²/g.

Sorption ist der Oberbegriff für Absorption und Adsorption und er wird auch verwendet, wenn nicht eindeutig zwischen Ad- und Absorption unterschieden werden kann.

Adsorptionsisothermen beschreiben den Gleichgewichtszustand der Adsorption eines Stoffes an der Oberfläche des Adsorbens bei konstanter Temperatur. Sie stellen den Zusammenhang zwischen der adsorbierten Menge und der Konzentration bzw. des Partialdrucks des Adsorptivs dar. In der Literatur findet man verschiedene Adsorptionsisothermen (Henry, Freundlich, Langmuir, BET-Modell [25]), die jeweils unter anderen Randbedingungen anwendbar sind. Diese wurden entweder empirisch gewonnen oder unter Anwendung physikalischer Modelle theoretisch abgeleitet.

Nach der Art der Wechselwirkungen wird zwischen physikalischer Adsorption (Physisorption) und chemischer Adsorption (Chemisorption) unterschieden. Die Physisorption ist vor allem auf van-der-Waals'sche Wechselwirkungen zurückzuführen. Bei einer Chemisorption kommt es zwischen Adsorbens und Adsorptiv zu einer chemischen Reaktion. An den Grenzflächen bilden sich chemische Verbindungen. Besteht das Sorptiv aus einem Stoffgemisch, dann kann konkurrierende Adsorption auftreten.

8.5. Erläuterungen zum Begriff Permeation

Permeation (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Permeation>):

Unter Permeation (Lateinisch permeare: „durchdringen, durchlaufen, durchwandern“) versteht man den Vorgang, bei dem ein Stoff (Permeat) einen Festkörper durchdringt oder durchwandert. Die Permeabilität wird als Maß der Permeation üblicherweise in der Einheit $\mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ angegeben. Der Stoff, der durch einen Festkörper dringt (permeiert), wird Permeat bezeichnet.

Der Permeationsprozess durch ein Polymer lässt sich - vereinfacht dargestellt - in drei Stufen unterteilen. Die Moleküle werden zuerst an der Grenzfläche sorbiert, diffundieren bei Partialdruckunterschieden durch diesen hindurch und desorbieren schließlich auf der gegenüberliegenden Seite. Dieser Prozess ist in Abbildung 75 am Beispiel der Permeation von Umgebungsgasen durch das Isolierrohr eines Verbund-Hohlisolators in die Isolierölfüllung dargestellt. Nicht eingezeichnet ist der umgekehrte Prozess, bei dem nämlich auch die im Isolieröl durch einen Fehler produzierten Gase durch das Isolatorrohr in die Umgebung permeieren können.

Eine Diffusion findet in einem porenfreien Festkörper nur dann statt, wenn sich den bewegten Teilchen Aufenthaltsmöglichkeiten bieten. Dazu müssen sie im Festkörper gelöst sein (Lösungsdiffusion). Diese Bezeichnung wird auch oft verwendet, wenn der Diffusionsprozess in Gasräumen (Poren) im Festkörper stattfindet, wie das bei der Wasserdampfdiffusion oder der Oberflächendiffusion der Fall ist [6]. Polymere haben molekulargroße Räume, die nicht von den Polymersegmenten besetzt sind. Die Summe dieser Räume wird als

freies Volumen bezeichnet. Die in solchen Räumen gelösten Moleküle des Permeats werden durch die Wärmebewegungen der Polymerketten in Richtung des Konzentrationsgefälles weiterbewegt. Sie springen dabei von Zwischenraum zu Zwischenraum und werden auf der Seite mit der niedrigeren Konzentration desorbiert.

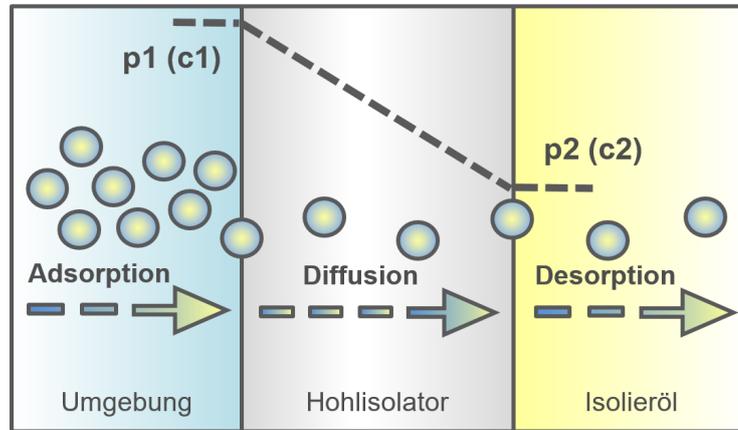


Abbildung 75: Permeation durch ein Polymer (Verbund-Hohlisolator), Lösungs-Diffusionsmodell

Unter idealisierten Bedingungen beschreibt die Formel

$$Q = \frac{P \cdot A \cdot t \cdot \Delta p}{d}$$

die Gas- bzw. Dampfmenge, die in der Zeit t durch eine Schicht mit der Fläche A und der Dicke d permeiert, wenn der Partialdruckunterschied des Permeats vor und hinter der Schicht Δp beträgt. Der Permeationskoeffizient errechnet sich als Produkt des Diffusionskoeffizienten D und dem Löslichkeitskoeffizienten S .

$$P = D \cdot S$$

Der Permeationskoeffizient wird in unterschiedlichen Einheiten angegeben, z.B. in Barrer oder in SI-Einheiten (Umrechnungsformeln siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Barrer>). Der Permeationskoeffizient ist temperaturabhängig und sein Betrag wird von der Art des Polymeres und der Art des Permeats bestimmt [26]. Bei Stoffen, die in Wechselwirkungen mit dem Polymer treten können, wie z.B. Wasserdampf, ist er außerdem konzentrationsabhängig. Der Diffusionskoeffizient nimmt mit abnehmender Molekülgröße und steigender Temperatur zu. Beispielsweise diffundieren Wasserstoffmoleküle und Helium schneller durch Polymere als Sauerstoff oder Stickstoff. Kohlendioxid ist andererseits in NBR (Nitril-Butadien-Rubber) sehr gut löslich, so dass sein Permeationskoeffizient sogar höher ist als jener für Wasserstoff [27].

8.6. Gas- und Wasserdampfdurchlässigkeit von Verbund-Hohlisolatoren

Für die äußere Isolierung von Hochspannungswandlern wurden bis in die frühen 1980er ausschließlich glasierte Porzellan-Hohlisolatoren verwendet. Mit der Entwicklung von Verbundisolatoren mit Silikonbeschirmung kommen diese Geräteisolatoren - wie auch bei Hochspannungsdurchführungen und anderen Hochspannungskomponenten – seither vermehrt zum Einsatz, da sie gegenüber Porzellan einige gewichtige Vorteile aufweisen:

- Explosionssicherheit, d.h. Sicherheit für Personal und Anlagen beim Auftreten von Überdrücken infolge energiereicher innerer Entladungen
- Ausgezeichnetes Betriebsverhalten bei Verschmutzung infolge der Hydrophobie des Silikonmaterials und der Fähigkeit diese Eigenschaften auch auf Fremdschichten zu übertragen
- Höhere Erdbbensicherheit
- Geringeres Gewicht

Im Gegensatz zu Porzellanisolatoren sind die für Verbund-Hohlisolatoren verwendeten organischen Materialien grundsätzlich gas- und somit auch wasserdampfdurchlässig. Feuchtigkeit im Öl kann die Durchschlagfestigkeit deutlich herabsetzen. Sauerstoff ist im Öl ebenfalls unerwünscht, da er Stray Gassing begünstigt und für die Ölalterung verantwortlich ist. Es ist daher von Interesse, ob bei Verwendung von Verbundisolatoren für ölsolierte Hochspannungswandler im Laufe der langjährigen Betriebsdauer relevante Mengen an Wasser und Sauerstoff in das Öl-Papierisoliersystem eingetragen werden können. Außerdem ist das Ausmaß der Gasdurchlässigkeit aus dem Öl über den Verbundisolator in die Umgebung für die Analysen der im Öl gelösten Gase (DGA) von grundsätzlicher Bedeutung. Unter der Annahme, dass die Stofftransporte für verschiedene Spaltgase unterschiedlich hoch und insgesamt auch relevant sind, werden die DGA-Ergebnisse und ihre Interpretation grundsätzlich beeinflusst. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass vor der Abwicklung dieses Forschungsprojektes noch eine signifikante H₂-Permeation als potenzielle Begründung für die unerklärlich rasche Abnahme der H₂-Konzentrationen im Öl mehrerer Hochspannungswandler mit Verbund-Isolatoren in Betracht gezogen wurde. Die gegenständlichen Untersuchungen haben aber dann gezeigt, dass die Sorption durch das Isolierpapier sowie vermutlich auch eine inhomogene Verteilung der Gaskonzentration im Isolieröl die tatsächlichen Ursachen für dieses Ereignis war.

Obwohl mit gasgefüllten Verbund-Hohlisolatoren nach 20-jährigem Betrieb durchwegs positive Erfahrungen vorlagen, wurde 2003 von einem deutschen Arbeitskreis ein 2010 abgeschlossenes Forschungsprojekt initiiert, da das Langzeitverhalten als noch nicht vollständig durch systematische Untersuchungen abgesichert erachtet wurde. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts [7] wurden die Wasserdampfdichtigkeit sowie die mechanischen Schädigungsgrenzen von Komposit-Hohlisolatoren eingehend untersucht. Im Rahmen dieses Projekts entstanden mehrere Publikationen, namentlich die Dissertation Möhring [6] sowie eine internationale Veröffentlichung für die CIGRÉ-Konferenz 2010 [8].

Für die Untersuchungen im Rahmen des deutschen Forschungsprojekts waren die Probanden mit Trockenluft gefüllt, so dass die Diffusionsgeschwindigkeit der Gasmoleküle um etwa vier Zehnerpotenzen höher war als bei den ölgefüllten Probanden für das gegenständliche Forschungsprojekt. Auf Grund dieses und weiterer Unterschiede der beiden Untersuchungskollektive sind die Untersuchungsergebnisse des deutschen Forschungsprojekts auf ölgefüllte Geräte nur eingeschränkt anwendbar.

In der Folge werden die potenziellen Permeationswege in das Wandlergehäuse von ölgefüllten Hochspannungs-Messwandlern beschrieben. Diese gelten grundsätzlich auch für die Probanden 1 bis 4, bei den Probanden 5 und 6 sind sie wegen der fehlenden Fußteile jedoch etwas reduziert:

- Im Fußteil aus Aluminiumguss (bei den Probanden 1 bis 4)
 - Durchführungsplatte aus Epoxidharz einschließlich zugehöriger Dichtung
 - Dichtung der Probenahmeverrichtung gegen das Gehäuse, Kugelventil
 - Dichtungen des Öl-Ablaufrohrs
- Unterer Blindflansch (nur bei den Probanden 5 und 6)
 - Flanschdichtung mit axial verpressten O-Ring
 - Kleine Durchführungsplatte aus Epoxidharz mit zugehöriger Dichtung
 - Dichtung der Probenahmeverrichtung gegen den Blindflansch, Septum
 - Dichtungen des Öl-Füllrohrs
- Hohlkörperisolator mit oberem und unterem Anschlussflansch
 - Verbundisolator mit Silikonbeschirmung (SiR: Silicon Rubber)
 - Obere und untere Flanschdichtung mit axial verpressten O-Ringen
 - Verbindung zwischen Hohlkörperisolator und Flanscharmatur (z.B. Epoxidharzklebung der aufgeschrumpften Armatur)
- Oberer Blindflansch
 - Flanschdichtung mit axial verpressten O-Ring
 - Dichtung der Probenahmeverrichtung gegen den Blindflansch, Septum
 - Dichtung des Verbindungsrohrs zum Dehnelement
 - Dichtungen des Öl-Anschlussrohrs
- Dehnelement, Verbindungsrohr zum Wandler
 - Dichtung des Verbindungsrohrs am Dehnelement sowie
 - Dichtungen des Dreiwegventils

Die glasfaserverstärkten Kunststoffrohre (GfK) von Verbundisolatoren bestehen im Normalfall aus endlosen Glasfasern als Verstärkungsmaterial und Epoxidharz als Matrix. Die Fasermenge und Lagenzahl, der Wickelwinkel sowie das Wickelverfahren werden an die mechanischen Anforderungen angepasst. Die Herstellung erfolgt entweder im Nasswickel- oder im Vakuumimprägnierverfahren. Der Glasfaseranteil beträgt rund 70 % und trägt zur verminderten Wasserdampfpermeation bei. Wesentlich ist dabei eine gute Haftung des Epoxidharzes an der Grenzschicht zum Glas, was durch einen Schlichteauftrag erreicht wird. Die Silikonkautschuk-Ummantelung ist zwar hydrophob, bietet aber – entgegen verbreiteter Meinung - keinen nennenswerten Widerstand gegen die Permeation von Wasserdampf und Gasen [28].

Der Austausch von Wasserdampf und Umgebungs- bzw. Spaltgasen zwischen der Umgebung und der Öl-Papier-Isolierung kann daher über folgende Permeationswege erfolgen:

1. Über die verschiedenen Elemente des Dichtungssystems
2. Durch die Durchführungsplatte mit den zahlreichen Schraubenbolzen
3. Über die Probenahmestellen
4. An den Übergängen zwischen Rohren und dem Fußteil bzw. einem Blindflansch
5. Durch die Verbundisolatoren
6. Über Schäden bzw. Unregelmäßigkeiten an den vorgenannten Komponenten (Mikrorisse durch die Einwirkung äußerer Kräfte)

Die weitaus größte Durchtrittsfläche für Permeationen von Umgebungsgasen und Wasserdampf in das Isolieröl des Wandlers sowie für den Austritt von Spaltgasen in die Umgebung bietet der Verbund-Hohlisolator. Die Untersuchungen von Frau Möhring [6] ergaben jedoch sehr stark streuende Messergebnisse (im Verhältnis bis zu 1:4 bei einem Kollektiv mit identischen Prüflingsabmessungen) für die unter kontrollierten Umgebungsbedingungen (Klimaschrank) in, mit Trockenluft gefüllten, Hohlisolatoren eindringenden Wassermassen. Es konnte daher auch der theoretisch bestehende, lineare Zusammenhang zwischen der permeierten Wasserdampfmenge und der Länge bzw. der Wandstärke des Isolators nicht nachgewiesen werden. Die Streuungen der Messwerte wurden auf unterschiedliche Fertigungsverfahren der Isolatorrohre bzw. auf die Ausführung und Qualität der Verklebung mit der Armatur zurückgeführt. Gegenüber den Probanden für das deutsche Forschungsprojekt haben die Probanden des gegenständlichen Forschungsprojekts zusätzliche Durchführungsplatten, Probenahmeventile und Rohranschlüsse, welche weitere Permeationswege darstellen.

Im Unterschied zu den vorerwähnten, mit Trockenluft gefüllten Prüflingen, waren die Probanden des gegenständlichen Forschungsprojekts ölgefüllt. Es könnte sein, dass die Ölfüllung die Desorption von Wassermolekülen an der Innenseite des Hohlisolators langsamer erfolgt als bei Luftfüllung mit beigelegtem Trocknungsmittel.

Theoretisch ist zu erwarten, dass aus den ölgefüllten Probanden am ehesten Wasserstoff in die Umgebung permeiert. Für Wasserstoff ist der Permeationskoeffizient für den Verbund-Hohlisolator einschließlich seiner Verklebung mit der Armatur sowie die Durchführungsplatte bedeutend höher als für die meisten anderen Spaltgase. Außerdem ist der Partialdruck gegenüber der Umgebungsluft wegen der geringen Löslichkeit des Wasserstoffs im Öl bedeutend höher als bei den gut öllöslichen Gasen. Der Permeationskoeffizient ist auch für die NBR-O-Ringe (Nitril Butadiene Rubber) nur etwas kleiner als für Kohlendioxid und außerdem höher als für die anderen Spaltgase. Grundsätzlich könnten im Laufe der langen Betriebsdauer auch relevante Mengen von Sauerstoff und Stickstoff durch den Verbundisolator und die anderen potenziellen Permeationswege in das Öl gelangen. Aus den Untersuchungsergebnissen konnten dazu jedoch keine ausreichenden Erkenntnisse gewonnen werden.

8.7. Zusammenstellung der Eigenschaften einiger Spalt- und Umgebungsgase

Chem. Formel	Chem. Bezeichnung	Synonyme	Strukturformel	CAS-Nr.
O ₂	Sauerstoff	-	$\langle \text{O}=\text{O} \rangle$	7782-44-7
N ₂	Stickstoff	-	$ \text{N}\equiv\text{N} $	7727-37-9
H ₂	Wasserstoff	-	H-H	1333-74-0
CO	Kohlenmonoxid	Kohlenoxid	$ \text{C}\equiv\text{O} $	630-08-0
CO ₂	Kohlendioxid	Kohlenstoffdioxid	$\langle \text{O}=\text{C}=\text{O} \rangle$	124-38-9
CH ₄	Methan	-	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	74-82-8
C ₂ H ₂	Ethin	Acetylen, Äthin	H-C≡C-H	74-86-2
C ₂ H ₄	Ethen	Ethylen, Äthylen	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}=\text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	74-85-1
C ₂ H ₆	Ethan	Äthan	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}-\text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	74-84-0

Physikalische Daten (1)

Chem. Formel	Schmelzpunkt (1013 hPa)	Siedepunkt (1013 hPa)	Sublimationspunkt (1013 hPa)	Molare Masse [g/mol]	Dichte [kg/m ³] 0°C, 1,013 hPa
O ₂	54,8 K (-218,3 °C)	90,15 K (-183 °C)		31,9988	1,429
N ₂	63,05 K (-210,1 °C)	77,15 K (-196 °C)		28,0134	1,250
H ₂	14,01 K (-259,14 °C)	21,15 K (-252 °C)		2,0158	0,0899
CO	-205,07 °C	-191,5 °C		28,0104	1,2506
CO ₂			-78,5 °C	44,0098	1,9767
CH ₄	-182 °C	-162 °C		16,043	0,7175
C ₂ H ₂			-84,03 °C	26,038	1,1772
C ₂ H ₄	-169,18 °C	-103,8 °C		28,054	1,2611
C ₂ H ₆	-183,3 °C	-88,6 °C		30,069	1,3551

Physikalische Daten (2)

Chem. Formel	Ostwald-Koeffizient L 20°C in Wasser	Ostwald-Koeffizient L 50°C in Wasser	Ostwald-Koeffizient K 20°C in Mineralöl	Ostwald-Koeffizient K 50°C in Mineralöl	Wasser-Löslichkeit [g/l] 20°C	Wasser-Löslichkeit [g/l] 50°C
O ₂	0,0334	0,0248	0,17	0,17	0,0434	0,0266
N ₂	0,0169	0,0134	0,09	0,09	0,019	0,0122
H ₂	0,0194	0,0191	0,05	0,05	0,0016	0,0013
CO	0,0249	0,0191	0,12	0,12	0,029	0,02
CO ₂	0,9368	0,5124	1,08	1,00	1,688	0,761
CH ₄	0,0367	0,0257	0,43	0,40	k. A.	k. A.
C ₂ H ₂	1,1080	0,7337	1,20	0,90	1,21	k. A.
C ₂ H ₄	0,1275	0,0825	1,70	1,40	0,154	k. A.
C ₂ H ₆	0,0514	0,0294	2,40	1,80	0,064	0,0333

Datenquellen:

Ostwald-Koeffizient L in Wasser [29]:

Ostwald-Koeffizient K in Mineralöl: EN60599:1999

Wasser-Löslichkeit: https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_L_öslichkeit_einiger_Gase_und_Ionensubstanzen

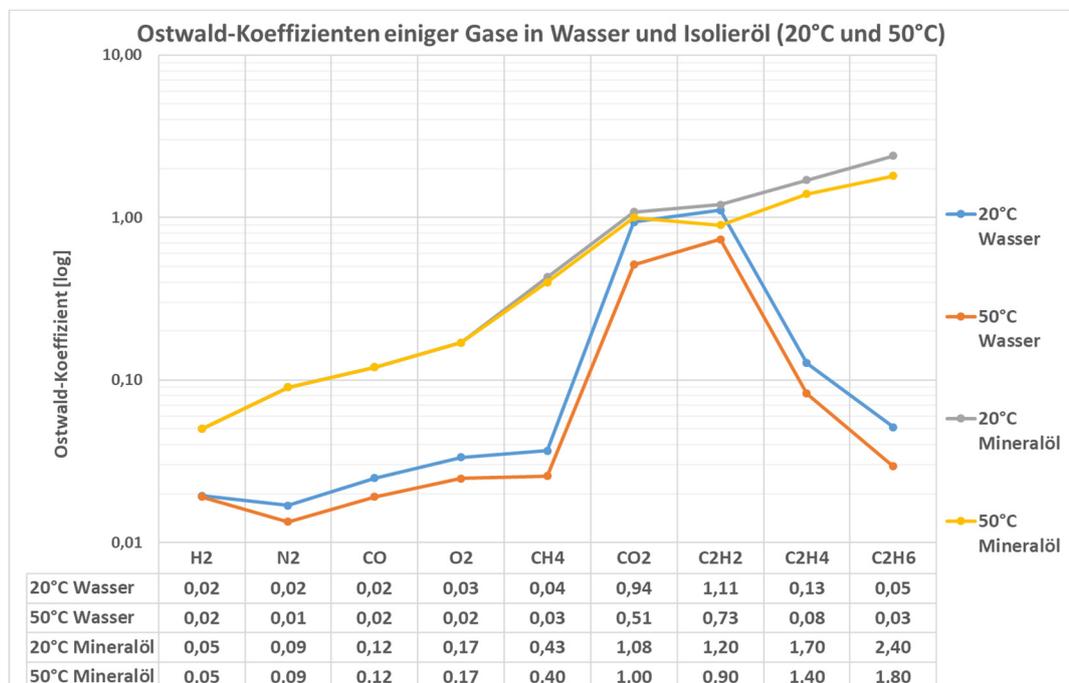


Abbildung 76: Vergleich der Ostwald-Koeffizienten einiger Gase in Wasser und Mineralöl

8.8. Projektantrag

Verbesserung der Zustandsbeurteilung von Messwandlern mittels DGA

- Veranlassung und Projekthintergrund
- Ablauf und vorgesehene Untersuchungen
- Projektdurchführung

Gemäß Angebot der VUM Verfahren Umwelt Management GmbH (VUM)
(vormals VERBUND Umwelttechnik GmbH) vom 16.9.2015

1 Veranlassung für das Untersuchungsprojekt (Projekthintergrund)

Gegenwärtig ist das Diffusionsverhalten von Wasserstoff, Kohlenoxiden, Kohlenwasserstoffen und Wasserdampf durch die Wandlerhülle von Hochspannungswandlern bei den im Betrieb auftretenden Temperaturen weder für Porzellan- noch für Verbundisolatoren bekannt.

Für Unternehmen der österreichischen Elektrizitätswirtschaft ist die Beurteilung der ermittelten Gaskonzentrationen über die DGA (Dissolved Gas Analysis) - neben der visuellen Kontrolle - die wichtigste Inspektionsmethode zur Feststellung des Wandlerzustandes. Die Beurteilung des Wandlerzustandes über die ermittelten Gaskonzentrationen wird vor allem bei sich langsam entwickelnden Mängeln durch Gasverluste infolge von Diffusionsvorgängen durch die Wandlerhülle beeinflusst und erschwert. Im Extremfall könnte das jeweilige Spaltgas, das im Wandler produziert wird, auch verhältnismäßig rasch wieder nach außen abgegeben werden. Die Vermutung liegt nahe, dass sich das Diffusionsverhalten für die relevanten Gase sehr unterschiedlich gestaltet. Weiters ist anzunehmen, dass sich die relevanten Spaltgase durch Sorptionsprozesse bei verschiedenen Betriebstemperaturen (Sommer/Winter) unterschiedlich zwischen Öl und Öl-Papier-Dielektrikum verteilen. Beide vorgenannten Phänomene sind relevant für die Beurteilung der DGA-Ergebnisse nach den Quotientenkriterien und sollen mit Versuchsserien festgestellt werden.

Die praktische Bedeutung dieser Untersuchungen kann am Beispiel dreier Messwandler (Baujahr 2008) gezeigt werden, die in den Jahren 2009 bis 2011 unter gleichmäßigen Umweltbedingungen ohne elektrische Beanspruchung gelagert wurden. Der entstandene Wasserstoff sank innerhalb relativ kurzer Zeit von Werten um 1.000 µl/l wieder auf Normalwerte von <50 µl/l ab. Diese Wandler waren mit Verbundisolatoren ausgestattet. Parallel dazu gibt es Fälle mit Porzellanisolatoren, in denen sich die Wasserstoffwerte über viele Jahre konstant verhielten.

Über das Diffusionsverhalten von Wasserdampf durch den Hauptisolator in den Wandler-Aktivteil wurde viel diskutiert, da eine Verfeuchtung des Isolieröles und des Öl-Papier-Dielektrikums sich auf jeden Fall negativ auf den Betriebszustand des Wandlers auswirkt. Dies ist vor allem eine Frage für den Verbundisolator. Auch diesem Thema soll mit dem gegenständlichen Projekt auf den Grund gegangen werden.

Mit dem Untersuchungsprojekt wird die Erreichung folgender Ziele angestrebt:

- Verbesserte Beurteilung des Istzustandes der Wandler im Betrieb auf Basis der GC-Analyse (DGA)
- Aussage über die Treffsicherheit der Quotientenbeurteilung bei Messwandlern, welche für Transformatoren entwickelt wurde
- Information über den richtigen Zeitpunkt für die Abnahme von Ölproben (Jahreszeit) bzw. für die Beurteilung bei der Abnahme zu einem gegebenen Zeitpunkt (Sommer/Winter)
- Zusätzliche Erkenntnisse für den Einsatz von Verbundisolatoren

2.1 Vorversuche

Mittels Vorversuchen soll anhand einfacher Probennachbildungen im Labormaßstab mit Öl-Papier-Dielektrikum grundsätzlich das Produktions- sowie das Adsorptions- bzw. Desorptionsverhalten der Spaltgase bei verschiedenen Temperaturen festgestellt werden. Die Ergebnisse dieser Vorversuche bilden die Basis für die Hauptversuche an 123 kV-Messwandlern betreffend Dotierung mit Schadgasen, Zeitablauf und Umfang der gesamten Versuche.

2.2 Hauptversuche

Die Hauptversuche werden an folgenden Untersuchungsobjekten, die von der Herstellerfirma Pfiffner Messwandler AG¹ (Schweiz) für Versuche bei Kärnten-Netz-GmbH (KNG) zur Verfügung gestellt werden, durchgeführt:

- 2 x 123 kV Messwandler mit Porzellanisolator, 1 x ohne und 1 x mit Aktivteil (wie tatsächlich ausgeführt)
- 2 x 123 kV Messwandler mit Verbundisolator, 1 x ohne und 1 x mit Aktivteil (wie tatsächlich ausgeführt)

Bei konstanter Temperatur werden die Basisdaten ermittelt (DGA, Feuchtemessung). Nach erfolgter Dotierung der Messwandler mit den einzelnen Spaltgasen werden die Gaskonzentrationen über die Zeit von etwa 12 Monaten bei verschiedenen Temperaturen im Trockenofen und bei Freiluftaufstellung ermittelt. Dazu sind auch Versuche bei niedrigen Temperaturen in den Wintermonaten und hohen Temperaturen in den Sommermonaten geplant. Parallel dazu wird eine eventuell stattfindende Feuchtigkeitsdiffusion von außen nach innen bei beiden Isolator Typen im Trockenofen durch Anhebung der relativen Luftfeuchtigkeit untersucht werden.

¹ Pfiffner Messwandler AG stellt die Messobjekte kostenlos bei und wird im Gegenzug auch über die Ergebnisse informiert.

3 Projektdurchführung

3.1 Projektteam

Das Untersuchungsprojekt wird im Projektteam, bestehend aus der VUM und der Kärnten-Netz GmbH, durchgeführt. Die Aufgabenverteilung im Projektteam ist wie folgt vorgesehen:

- VUM Verfahren Umwelt Management GmbH (VUM)
Analytische Betreuung incl. Erstellung des Versuchsberichtes sowie wissenschaftliche Betreuung durch das Chemisch-Physikalische Prüflabor Obersielach
- Kärnten-Netz GmbH
Durchführung der Versuche im Trockenofen und in Freiluft (Betreuung DI Filipot)

9. Verzeichnisse

9.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wasserstoffverlauf (H_2) von 3 neuen Kombiwandlern.....	2
Abbildung 2: 24 Messwandler einer Produktionscharge – 3 Stück davon mit nicht inhibierter Ölfüllung zeigen Stray Gassing.....	5
Abbildung 3: Headspace-Proben mit 0 % (Referenzprobe), 11,6 % und 23,1 % Papierzusatz	9
Abbildung 4: Thermische Lagerungsbedingungen für Serie A und B.....	10
Abbildung 5: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der H_2 -Konzentration im Öl	12
Abbildung 6: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der CO -Konzentration im Öl.....	12
Abbildung 7: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der CO_2 -Konzentration im Öl	13
Abbildung 8: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der CH_4 -Konzentration im Öl.....	13
Abbildung 9: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der C_2H_2 -Konzentration im Öl	14
Abbildung 10: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der C_2H_4 -Konzentration im Öl	14
Abbildung 11: Vorversuche - relative Änderung (+/-) der C_2H_6 -Konzentration im Öl	15
Abbildung 12: Probanden mit Porzellan- und Hohlkomposit-Isolatoren (Verbund-Isolatoren)	20
Abbildung 13: Skizze von Proband 1, 2 mit Aktivteil eines realen Wandlers	21
Abbildung 14: Proband 3: Dehnelement mit Dreiwegventil in der Verbindungsleitung zum Wandlerteil	22
Abbildung 15: Proband 3: Öl-Probenabnahme „Oben“, Überwurfmutter abgeschraubt... ..	22
Abbildung 16: Skizze der ohne Aktivteil ausgeführten Probanden 3, 4.....	23
Abbildung 17: Skizze der ohne Aktivteil/Fußteil ausgeführten Probanden 5, 6.....	23
Abbildung 18: Isolieröl-Entgasung (Glasfritte/Vakuum) und anschließende Sättigung mit Spaltgasen	25
Abbildung 19: Dosierpositionen für Wandler und Dehnelement.....	27
Abbildung 20: Septum-Entnahme „Oben“ und „Unten“ (für DGA).....	27
Abbildung 21: Dosierapparatur während Sättigung (links) und kurz vor Dosierung (rechts)	28
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Projektphasen; Umgebungstemperatur der Probanden	31
Abbildung 23: Wechselnde Temperierung in Projektphase A zu Beschleunigung der Gasverteilung	31
Abbildung 24: Ofen-, Öl- und Wicklungstemperaturverlauf für Proband 1 (Porzellanisolator)	32
Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CH_4 -Konzentrationen im Öl von Proband 5 (alle Probenahmestellen)	33
Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CH_4 -Konzentrationen im Öl von Proband 1 (alle Probenahmestellen)	34
Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C_2H_2 -Konzentrationen von Proband 1. (alle Probenahmestellen)	34
Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO_2 -Konzentrationen von Proband 1. (alle Probenahmestellen)	35

Abbildung 29: Histogramm mit den täglichen Differenzen der Umgebungstemperaturen während der Projektphasen 7 bis einschließlich C für die Probanden 2, 4, 5 und 6	36
Abbildung 30: Histogramm mit den täglichen Temperaturdifferenzen während der Projektphasen 7 bis einschließlich C für die Probanden 1 und 3	37
Abbildung 31: Ofen- und Öltemperaturen (Temperaturfühler im Kopfbereich) für die Probanden 1 und 2 (Vergleich Porzellan- und Verbundisolator)	38
Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der normalisierten H ₂ -Konzentrationen aller Probanden... (Probenahmestelle „Unten“).....	39
Abbildung 33: Deckel-Blindflansch mit Hartpapier-Trägerrohr für Thermoelement.....	40
Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“).....	42
Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO ₂ -Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“).....	43
Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CH ₄ -Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“).....	44
Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C ₂ H ₂ -Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“).....	45
Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C ₂ H ₄ -Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“).....	46
Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C ₂ H ₆ -Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“).....	47
Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der H ₂ O-Konzentrationen im Öl aller Probanden (Probenahmestelle „Unten“).....	49
Abbildung 41: Gleichgewichtsdiagramm auf Basis der Wassersättigung im Öl mit Grenzen nach IEC 60422 (aus [9]).....	51
Abbildung 42: Zeitlicher Verlauf der H ₂ O-Konzentrationen im Öl von Proband 5 (alle Probenahmestellen)	52
Abbildung 43: Zeitlicher Verlauf der H ₂ O-Konzentrationen im Öl der Probanden 3 und 5... (Probenahmestellen „Oben“ u. „Unten“)	52
Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf der H ₂ O-Konzentrationen Im Öl von Proband 6 (alle Probenahmestellen)	53
Abbildung 45: Zeitlicher Verlauf der normalisierten Konzentrationen aller Gase für einen Wandler mit realem Fehler (WmRF).....	55
Abbildung 46: Starke Überhitzung im Bereich der Verschraubung des Durchführungsrohres mit der Kernschale des Stromwandlers. Über dieser Schadensstelle befindet sich im Originalzustand ein dicker Isolierpapierwickel.	56
Abbildung 47: Zeitreihen der H ₂ -Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2.....	57
Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der normalisierten CO ₂ -Konzentrationen für einen Stromwandler mit realem Fehler (WmRF).....	58
Abbildung 49: Zeitreihen der C ₂ H ₂ -Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2	59
Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C ₂ H ₄ -Konzentrationen für einen Stromwandler mit realem Fehler (WmRF).....	60
Abbildung 51: Zeitreihen der C ₂ H ₄ -Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2	61

Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der normalisierten C_2H_6 -Konzentrationen für einen Stromwandler mit realem Fehler (WmRF)	62
Abbildung 53: Zeitreihen der C_2H_6 -Konzentrationen für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF) und dem Probanden 2	62
Abbildung 54: Verteilungswege von gelösten Gasen in mineralölgefüllten elektrischen Geräten bei einem Fehler im freien Öl.....	63
Abbildung 55: Verteilungswege von gelösten Gasen in mineralölgefüllten elektrischen Geräten bei einem Fehler in/unter der Öl-Papierisolierung	64
Abbildung 56: CH_4/H_2 -Verhältnisse in isolierölgefüllten Messwandern (Datenstand 2014)	69
Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf der normalisierten Konzentrationen aller Gase für Proband 2	70
Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf der (normalisierten) Gasquotienten nach EN 60599 für Proband 2.....	70
Abbildung 59: Zeitlicher Verlauf der (normalisierten) Gasquotienten nach EN 60599 für Proband 4.....	72
Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der (normalisierten) Gasquotienten nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler (WmRF)	73
Abbildung 61: Graphische Darstellung 2 für Gasquotienten nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler.....	75
Abbildung 62: Graphische Darstellung 1 für Gasquotienten nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler.....	76
Abbildung 63: Duval Dreieck 1 für Mineralöl.....	77
Abbildung 64: Duval Pentagon 1 für Mineralöl [18]	78
Abbildung 65: Duval Pentagon 2 für Mineralöl [18]	79
Abbildung 66: Zeitlicher Verlauf der Fehlergasanteile nach Duval-Dreieck 1 für Proband 4	80
Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Fehlergasanteile nach Duval-Dreieck 1 für Proband 2	80
Abbildung 68: Zeitlicher Verlauf des C_2H_2 -Gasanteiles nach Duval-Dreieck 1 für alle Probanden.....	81
Abbildung 69: Zeitlicher Verlauf der Fehlergasanteile nach Duval-Dreieck 1 für den Stromwandler mit realem Fehler.....	82
Abbildung 70: Zeitlicher Verlauf des C_2H_2 -Gasanteiles nach Duval-Dreieck 1 - WmRF vs. Transformator.....	84
Abbildung 71: DGA mittels Headspace-Technik (Analytik, Berechnung)	93
Abbildung 72: Berechnete Konvektionsströmung bei einem Stromwandler im instationären Zustand, veröffentlicht in [24].....	97
Abbildung 73: Berechnete Konvektionsströmung bei einem Stromwandler im stationären Zustand, veröffentlicht in [24].....	97
Abbildung 74: Unterscheidung zwischen Adsorption und Absorption	98
Abbildung 75: Permeation durch ein Polymer (Verbund-Hohlisolator), Lösungs-Diffusionsmodell.....	100
Abbildung 76: Vergleich der Ostwald-Koeffizienten einiger Gase in Wasser und Mineralöl	105

9.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitreihen der Wasserstoff- (H_2) und Methankonzentrationen (CH_4) von 3 Kombiwandlern (BJ 2003), Konzentrationswerte in $\mu l/l$	3
Tabelle 2: Zeitreihen der Methan- (CH_4) und Ethankonzentration (C_2H_6) eines Messwandlers (BJ 1975)	4
Tabelle 3: Methan- (CH_4) und Ethanverlauf (C_2H_6) eines Messwandlers (BJ 1981)	4
Tabelle 4: Projektzeitplan laut Antrag	7
Tabelle 5: Tatsächlicher Projektablauf	8
Tabelle 6: Chronologische Vorgangsweise der Probenvorbereitung	10
Tabelle 7: Probenserien mit Papieranteil, Papierfeuchte, Lagerungsbedingungen bis zur Messung	11
Tabelle 8: Lagerungsbedingungen und Zeiten bis zur 1. und 2. Messung (DGA)	11
Tabelle 9: Gehäuse-Ausführung der 6 Probanden	19
Tabelle 10: Massen, Oberflächen, Volumen im Probanden-Innern	20
Tabelle 11: Massen und Massenverhältnisse von Öl und Papier	21
Tabelle 12: Ausgangswerte der Probanden (DGA, H_2O)	24
Tabelle 13: Nach Formel 1 berechnete Spaltgaskonzentrationen für das Prüfgas	26
Tabelle 14: Konzentrationen der angereicherten Dosierlösungen	26
Tabelle 15: Konzentration im Öl der Probanden, berechnet für 3% Volumsdosierung	26
Tabelle 16: Tatsächliche Anfangskonzentration im Öl der Probanden, 3-5 Wochen nach Dosierung	29
Tabelle 17: Quotienten: Absolute / errechnete Konzentrationen im Öl der Probanden, 3-5 Wochen nach Dosierung	29
Tabelle 18: Tatsächlicher Projektablauf (Kurzfassung von Tabelle 5)	30
Tabelle 19: Bezugswerte für die normalisierte Darstellung der Gaskonzentrationen und Quotienten (Proband 1 - 6)	33
Tabelle 20: Veränderung der anfänglichen Ölfeuchten bis zum Projektende	49
Tabelle 21: Bezugswerte für die normalisierte Darstellung der Gaskonzentrationen und Quotienten für den Stromwandler (WmRF)	54
Tabelle 22: Interpretationstabelle für Gas-in-Öl-Analysen (nach EN 60599)	68
Tabelle 23: Interpretation der Gas-in-Öl-Analyse zur Identifizierung der Fehlerart nach EN 60599 für den Stromwandler mit realem Fehler	74

9.3. Literaturverzeichnis

- [1] „ÖVE EN 60567 Ausgabe 2012-09-01: Ölgefüllte elektrische Betriebsmittel - Probenahme von Gasen und Analyse freier und gelöster Gase - Anleitung“.
- [2] *OVE EN 60599 Ausgabe: 2016-11-01: In Betrieb befindliche, mit Mineralöl befüllte elektrische Geräte - Leitfaden zur Interpretation der Analyse gelöster und freier Gase.*
- [3] *C57.104-2019 - IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers.*
- [4] H. KAN UND T. MIYAMOTO, *Proposal for an Improvement in Transformer Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis (DGA), IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995 - Vol. 11, No. 6, pp. 15-21.*
- [5] *Österreichs Energie: Untersuchung des Auftretens von Einzelgasen im Isolieröl von Messwandlern, 2012.*
- [6] N. MÖHRING, „Wasserdampfdurchlässigkeit von Komposit-Hohlisolatoren“, Dissertation, TU Darmstadt, 2010,“ Shaker-Verlag, ISBN 978-3-8322-9142-6, Download unter www.hst.tu-darmstadt.de sowie unter www.shaker.de., 2010.
- [7] AIF, „Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 14121 N: „Wasserdampfdichtigkeit und mechanische Schädigungsgrenzen von Komposithohlisolatoren für Hochspannungsgeräte in der elektrischen Energieversorgung“,“ 2010.
- [8] V. HINRICHSEN, N. MÖHRING, T. WIETOSKA, H. HAUPT, A. BOCKENHEIMER, C. HEINEMANN, C. BERGER, I. GOTTSCHALK, N. KURDA, N. MIKLI, F. SCHMUCK UND J. SEIFERT, „Resistance to Vapour Permeation of Factory New and of Mechanically Stressed Composit Hollow Insulators.“ Cigré Konferenz 2010, 23.-27. August 2010, Paris, Report A3_304_2010.
- [9] M. KOCH, M. KRÜGER UND S. TENBOHLEN, „Methoden zur Feuchtebestimmung in Transformatoren im Vergleich, ETG-Kongress 2009, Düsseldorf“.
- [10] R. ROGERS, *IEEE and IEC Codes to interpret Incipient Faults in Transformers Using Gas in Oil Analysis, IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol EI-13, No 5. October 1978.*

- [11] E. DÖRNENBURG UND W. STRITTMATTER, *Überwachung von Öltransformatoren durch Gasanalyse, Brown Boveri Mitt.* 5-74.
- [12] M. DUVAL, *A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 8-17, 2002.
- [13] ÖVE/ÖNORM, „EN 60296 Ausgabe: 2013-01-01 Flüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen - Neue Isolieröle auf Mineralölbasis für Transformatoren und Schaltgeräte“.
- [14] I. ATANASOVA-HÖHLEIN, „Stray Gassing Cases of Insulation Liquids in HV Equipment, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation , Vol. 22, No. 5, October 2015, pp. 2718-2722“.
- [15] M. DUVAL UND J. DUKARM, *Improving the Reliability of Transformer Gas-in-Oil Diagnosis, IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 21, No. 4, pp 21-27, 2001.*
- [16] M. DUVAL, *The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 22-29, (2008).
- [17] M. DUVAL, *The Duval Pentagon - A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 9-12, (2014).
- [18] M. DUVAL UND L. LAMARRE, *The New Duval Pentagons Available for DGA Diagnosis in Transformers Filled with Mineral and Ester Öils, Electrical Insulation Conference, 2017, pp. 279-281.*
- [19] X. WANG, Z. WANG, Q. LIU, G. WILSON, P. JARMAN UND D. WALKER, „Evaluation of Mass Transfer Rate of Dissolved Gases in Transformer Oils. Int. Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016“.
- [20] E. BRÄSEL, O. BRÄSEL UND U. SASUM, „Gashaushalt bei Transformatoren der offenen Bauart - Neue Erkenntnisse, ew Jg 109 (2010) Heft 14-15, S. 56-59“.
- [21] G. WIEGLEB, *Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, 2016, Springer-Vieweg Verlag.*
- [22] W. YE, J. HAO, Y. CHEN, M. ZHU, Z. PAN UND F. HOU, *Difference Analysis of Gas Molecules Diffusion Behavior in Natural Ester and Mineral Oil Based on Molecular Dynamic Simulation, Molecules 2019, 24, 4463.*

- [23] B. BUERSCHAPER UND T. LEIBFRIED, „Physik des Feuchteausstauschs in einem Öl-Zellulose Isoliersystem unter Beachtung des Grenzschichtverhaltens, ETG-Fachtagung 2005, Hanau“.
- [24] F. AINHORN, „Empirische und Simulationsgestützte Untersuchung der Auswirkungen von thermischem Stress auf einen 220 kV - Kombiwandler, Masterarbeit an der TU Graz, 2016“.
- [25] R. ORTMANN, „Untersuchungen zur Adsorption und Desorption von Aldehyden und Aminen im Spurenbereich, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2016“.
- [26] A. MAXWELL UND S. ROBERTS, „Review of Data on Gas Migration through Polymer Encapsulants, SERCO/TAS/000500/001 - Issue 2, September 2008“.
- [27] K. BECK, R. KREISELMAIER, V. PETERSEIM UND E. OSEN, *Permeation durch elastomere Dichtungswerkstoffe, Grundlagen - Werkstoffeigenschaften - Entwicklungstrends, KGK Kautschuk Gummi Kunststoff, 56. Jahrgang, Nr. 12/2003, 657-660.*
- [28] H. ZHANG UND A. CLOUD, „The Permeability Characteristics of Silicon Rubber, Sampe Fall Technical Conference, 2006“.
- [29] AIR LIQUIDE Deutschland GmbH, „Das 1x1 der Gase Physikalische; Daten für Wissenschaft und Praxis, 3. überarbeitete Auflage 2007“.