

Vergleichender Alterungstest eines neuartigen GtL-Öls mit konventionellen Hochleistungs-Isolierölen

Comparative Ageing Test of New GtL-Oil with Conventional High Grade Insulation Oils

Dr.-Ing. Maik Koch, Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich, Schweiz, koch@fkh.ch
Lars Dreier, Weidmann Electrical Technology AG, Rapperswil, Schweiz, lars.dreier@wicor.com

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt einen vergleichenden Alterungstest zwischen neuartigem Gas-to-Liquid Isolieröl (Shell Diala S4 ZX-I) und herkömmlich raffinierten Hochleistungs-Isolierölen (Shell Diala D, Shell Diala S3 ZX-I und Nynas Nytro 4000X). Die Alterung erfolgte bei 120°C mit Transformator-typischen Werkstoffen (Zellulose, Kupfer) unter Anwesenheit von atmosphärischem Sauerstoff bzw. bei dessen Abschluss. Die Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigt dem neuartigen Isolieröl ein hervorragendes Alterungsverhalten und eine im Vergleich mit den anderen Ölen bessere Performance. Das GtL-Öl kann im IR-Spektrum deutlich unterschieden werden von den raffinierten Ölen. Die weniger widerstandsfähigen Öle bildeten Zersetzungsgase, vor allem Methan und Ethan. Die Wassersättigung (max. Wasseraufnahmefähigkeit) verdoppelte sich während der Alterung. Obwohl alle chemischen Parameter die Alterung deutlich zeigen, blieb die Durchschlagsspannung unverändert hoch für alle Öle. Furane bildeten sich unter Zufuhr von Luftsauerstoff, kaum jedoch bei dessen Abwesenheit und ein Zusammenhang mit dem Polymerisationsgrad kann nicht quantifiziert werden. Die Ergebnisse sollten Betreibern und Herstellern eine Entscheidungshilfe für die Auswahl des geeigneten Isoliermediums für ihre Transformatoren und andere ölgefüllte Betriebsmittel bieten.

Abstract

This article describes a comparative ageing test between new gas-to-liquid oil (Shell Diala S4 ZX-I) and conventional high-performance insulation oils (Shell Diala D, Shell Diala S3 ZX-I and Nynas Nytro 4000X). Ageing was carried out at 120°C temperature, under the presence of typical transformer materials (cellulose-based and copper) and under the presence of atmospheric oxygen res. its absence. The test shows a very good ageing stability of the new GtL-oil and superior performance in comparison to the other oils in this test. The new GtL-oil can be identified in its IR spectrum. Though all chemical parameters showed heavy ageing, the breakdown voltage remained constant for all oils. The capability to dissolve moisture doubled for all oils. Particularly the more aged oils generated saturated hydrocarbon gases as methane and ethane. Furans were produced particularly under the presence of oxygen from air and a relationship to the degree of polymerisation cannot be established.

1 Motivation und Ziele

Qualität und Langzeitverhalten von Isolierölen entscheiden häufig über die Lebensdauer ölgefüllter Betriebsmittel. Vor dem Hintergrund immer schlechterer Rohölqualitäten machen sich Ölhersteller auf die Suche nach Alternativen. Eine davon, die Anreicherung von Isolierölen mit dem inhibierend wirkenden DBDS (Dibenzyl-disulfid) führte in eine Sackgasse, nämlich zur Bildung von „korrosivem Schwefel“ und damit zum Verlust einer bedeutenden Anzahl hochwertiger Leistungstransformatoren. Einen neuen Weg geht Shell Lubricants, indem das Unternehmen im Juni 2013 ein inhibiertes Transformatorenöl mit dem Namen Shell Diala S4 ZX-I auf Basis von GtL-Grundölen einführt [1]. Beim Gas-to-Liquid-Verfahren (GtL) wird Erdgas durch Zufuhr von Wasserdampf und Sauerstoff in ein Synthesegas (Kohlenmonoxid, Methan) umgewandelt. Dieses Synthesegas wird im s.g. Fischer-Tropsch-Verfahren über einen katalytischen Prozess mit Hilfe von Übergangsmetallen (Eisen und Kobalt) in flüssige, vornehmlich unverzweigte Kohlenwasserstoffe umgewandelt, **Bild 1**. Nebenprodukte sind Alkohole, Aldehyde, Ketone und organische Säuren.

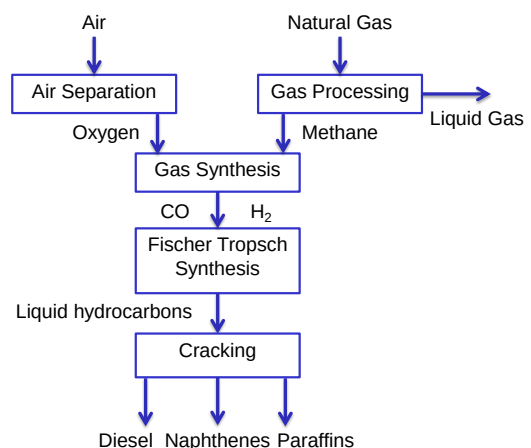
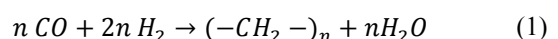


Bild 1: Herstellung von paraffinischem Isolieröl durch die Fischer-Tropsch-Synthese

Das Fischer-Tropsch-Verfahren fand im s.g. Dritten Reich seine erste Großindustrielle Anwendung in der Herstellung von synthetischem Kraftstoff aus Kohle. Die Hauptreaktionsgleichung zeigt (1).



Die Methylengruppe ($-CH_2-$) bezeichnet ein Kettenglied eines Kohlenwasserstoffmoleküls, aus welchem für das vorliegende GtL-Isolieröl lineare Paraffine gebildet werden.

Der Hersteller Shell verspricht für sein GtL-Öl eine isoparaffinische Zusammensetzung ohne Verunreinigungen, exzellente Oxidationsstabilität, hohe Kühlleistung und hohe dielektrische Festigkeit, [2].

Die Verfasser des vorliegenden Artikels erhielten von Transformator-Betreibern eine Reihe von Anfragen zur Eignung dieses neuartigen GtL-Öls, besonders vor dem Hintergrund der sehr hohen Ansprüche an Isolieröle in Leistungstransformatoren und den Erfahrungen mit dem „potentiell korrosiven Schwefel“. Deshalb wurde das GtL-Öl im direkten Vergleich zu bisherigen Ölen geprüft. Ziele der Untersuchungen sind:

1. Langfristiges Verhalten des Öles beim Alterungsprozess des gesamten Öl-Papier Isolationssystems unter typischen Betriebsbedingungen,
2. Verhalten der Inhibitoren und Einfluss auf andere Materialien,
3. Mischbarkeit des GtL-Öls mit herkömmlichen Mineralölen.

Dazu wird ein ausführlicher Alterungstest im direkten Vergleich mit anderen Hochleistungs-Isolierölen ausgeführt und die für die Ölanalyse typischen Parameter als auch zusätzliche Kenngrößen überwacht. Innerhalb dieser Veröffentlichung wird vor allem der wissenschaftlich relevante Teil der Ergebnisse dargestellt.

2 Versuchsbedingungen

Im Alterungstest wurden alle Öle einer Alterung bei 120°C in Edelstahlbehältern mit Kupfer und Zellulosematerialien (Kraft Papier, Transformerboard TIV, Schichtholz) unterzogen, **Bild 2**. Jedes Öl wurde in einem Behälter mit Zufuhr von Luftsauerstoff und dessen Abschluss gealtert, Tabelle 1. Der Wassergehalt im Papier und Pressboard wurde zu Beginn des Versuchs mit coulometrischer Titration nach Karl Fischer bei einer Ausheiztemperatur von 160°C bestimmt. Der Wassergehalt betrug 0,8-1,0 % und blieb während der Alterung etwa konstant. Die Öle wurden nicht dediziert getrocknet, sondern indirekt mittels der Zellulosewerkstoffe.

Tabelle 1: Versuchsbedingungen der Alterung

Parameter	Wert	Kommentar
Öltypen	Shell S4 ZX-I (GtL), Shell S3 ZX-I, Shell Diala D, Nynas Nytro 4000 X	Alle Öle sind inhibiert. Das Shell Diala D wurde nachträglich durch den Anwender inhibiert,
Temperatur	120°C	
Dauer	141 Tage	bzw. 4,5 Monate
Behälter	2 x 3 Edelstahlbehälter, je 18 l	Jeweils mit und ohne Sauerstoffzufuhr (Argon-Füllung ohne Sauerstoff),
Materialproben	Papierumwickeltes Kupfer, Kupfer, Zellulosewerkstoffe	Normales Weidmann Kraft Paper, Transformerboard T4, Schichtholz, (Öl:Zellulosewerkstoffe = 10:1), (Öl:Kupfer = 10:1)



Bild 2: Edelstahlbehälter zur Öl- und Papieranalterung

Tabelle 2 stellt die während der Alterung überwachten Messgrößen dar. Sie wurden im Wesentlichen entsprechend der einschlägigen Normen bestimmt.

Tabelle 2: Messgrößen des Alterungsversuchs

Gruppe	Kenngrößen
Dielektrisch-chemische Kenngrößen (IEC60422)	Farbzahl, Trübung TanDelta und Leitfähigkeit Grenzflächenspannung, Dichte Neutralisationszahl Durchschlagsspannung Wassergehalt
Wassersättigung IR-Spektrum und Inhibitor-gehalt (IEC 60666) Zellulosewerkstoffe	Bestimmung der Wassersättigung IR-Spektrum des Öls Polymerisationsgrad, Ablagerungen auf Papier und Kupfer, Wassergehalt, Zugfestigkeit des Pressboards, Furananalysen (IEC 61198) IEC 60567 bzw. 60599
Zersetzungsgase	

3 Kenngrößen des Öls

3.1 Neutralisationszahl

Die Neutralisationszahl ist ein Mass für organische Säuren im Öl, welche durch Oxidation des Isolieröles und Alterung des Papiers entstehen. Sie wird durch Titration mit einer alkoholischen Kalilauge (KOH) bestimmt.

Bild 3 vergleicht die Neutralisationszahl für die vier Öle Shell S4 ZX-I, Shell S3 ZX-I, Shell Diala D und Nynas Nytro 4000 X. Klar ist die schlechte Performance des Shell Diala D erkennbar, wo der Grenzwert nach IEC 60422 (Betriebsmittel Gruppe A, Nennspannung von 170-400 kV) bereits nach 20 Tagen Alterung erreicht wurde. Hingegen bildet das auf Basis von GtL-Grundölen hergestellte Shell S4 ZX-I die wenigsten Säuren und zeigt damit die beste Alterungsstabilität, auch im Vergleich zum Vorgängeröl Shell S3 ZX-I und zum Nynas Nytro 4000X.

Unter Luftabschluss wurden geringfügig weniger Säuren gebildet als bei Zufuhr von Luft. Der sprunghafte Anstieg des Säuregehalts einiger Öle gegen Ende des Versuchs ist mit der Erschöpfung der Inhibitoren zu erklären.

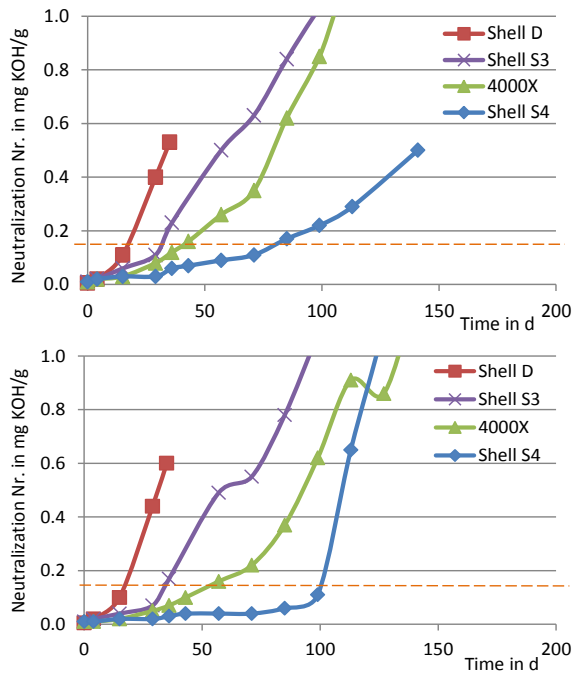


Bild 3: Neutralisationszahl der Öle bei Alterung unter Luftzufuhr (oben) und bei Abschluss von atmosphärischem Sauerstoff (unten). Die gestrichelte Linie ist der Grenzwert nach IEC 60422 für Transformatoren mit einer Nennspannung von 170-400 kV (Gruppe A).

3.2 Grenzflächenspannung

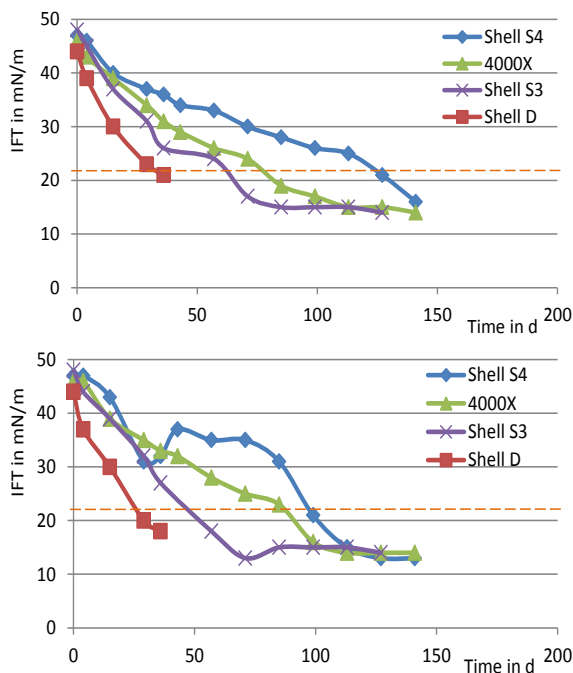


Bild 4: Grenzflächenspannung der Öle bei Alterung unter Luftzufuhr (oben) und bei Abschluss von atmosphärischem Sauerstoff (unten). Die gestrichelte Linie ist der Grenzwert nach IEC 60422 für Transformatoren mit einer Nennspannung von 170-400 kV (Gruppe A).

Alterungsprodukte beeinflussen die Oberflächenspannung des Öls ähnlich wie Tenside die von Wasser. Gemessen wird diese Änderung als Grenzflächenspannung im System Öl/Wasser. Sie ist ein sehr sensibles Mass für das Alterungsverhalten des Öl-Papier-Isoliersystems und für die Wahrscheinlichkeit des Ausfällens von Schlamm. **Bild 4** vergleicht die Grenzflächenspannung für die vier Öle

Shell S4 ZX-I, Shell S3 ZX-I, Shell Diala D und Nynas Nytro 4000 X. Das auf GtL-Basis hergestellte Shell S4 ZX-I zeigt wiederum die beständigste Grenzflächenspannung und damit die beste Alterungsstabilität.

3.3 Verlustfaktor Tangens Delta

Der Verlustfaktor Tangens Delta bzw. die damit unmittelbar verknüpfte Leitfähigkeit ist ein empfindliches Mass für die Bildung leitfähiger Alterungsprodukte und für Kontaminationen des Öls. Er wird in einer coaxialen Messzelle bei 90°C bestimmt. **Bild 5** vergleicht den Verlustfaktor für die vier Öle. Die teilweise schwankenden Ergebnisse zeigen die Empfindlichkeit des Messverfahrens gegenüber Kontaminationen nach unvollständiger Reinigung der Messzelle. Auf die Ergebnisse bei Alterung unter Luftabschluss wurde hier verzichtet, da sie keinen wesentlichen Unterschied aufzeigen. Wiederum zeigt das auf Basis von GtL-Grundölen hergestellte Shell S4 ZX-I die beste Alterungsstabilität.

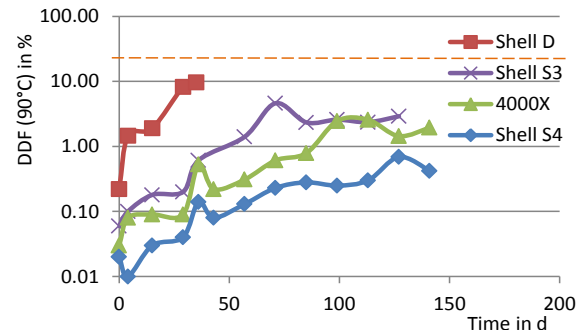


Bild 5: Dielektrischer Verlustfaktor Tangens Delta bei 90°C der Öle bei Alterung unter Luftzufuhr. Die gestrichelte Linie ist der Grenzwert nach IEC 60422 für Transformatoren mit einer Nennspannung von 170-400 kV (Gruppe A).

3.4 Wassergehalt und Wassersättigung

Der Wassergehalt im Öl wird durch die Feuchtigkeit der zellulosehaltigen Materialien bestimmt [3] und ist deshalb in sich diagnostisch uninteressant. Er lag zu Beginn des Versuchs bei 30-60 ppm in allen Ölen. Rechnet man diesen bei einer Entnahmetemperatur von 120°C bestimmten Wert auf Raumtemperatur um, so ergeben sich sehr trockene 1-4 ppm. Während der Alterung erhöhte sich der Wassergehalt im Öl, da sich die Sättigungsfeuchte im Öl durch polare Alterungsprodukte erhöhte. Diese Sättigungsfeuchte wurde zu Beginn und Ende des Versuchs bestimmt und ist für die Öle Shell Diala S4 ZX-I und Nynas Nytro 4000X im **Bild 6** abgebildet.

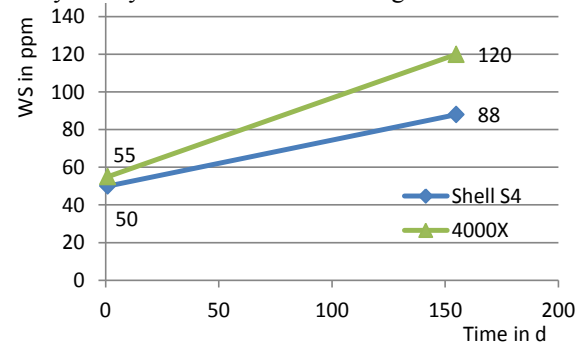


Bild 6: Sättigungsfeuchte der Öle Shell Diala S4 ZX-I und Nynas Nytro 4000X vor und nach dem Alterungsversuch

3.5 Durchschlagspannung

Die Durchschlagspannung ist ein klassischer Indikator für die Isolierfähigkeit von Flüssigkeiten im homogenen Feld. Ihre Aussagefähigkeit zum Alterungszustand ist zwar äußerst beschränkt und die wesentliche Abhängigkeit besteht gegenüber dem Wassergehalt, dennoch wird sie wegen ihrer Verbreitung auch hier abgebildet.

Bild 7 zeigt die Durchschlagspannung vor und nach dem Alterungsversuch. Da das Shell Diala S4 ZX-I nicht getrocknet war (Wassergehalt 24 ppm, Wassersättigung ca. 47 %), war die Durchschlagspannung vergleichsweise niedrig. Dies sagt nichts über die tatsächliche Isolierfähigkeit aus, sondern wird allein durch den Wassergehalt bzw. eigentlich durch die damit verbundene Wassersättigung verursacht. Deshalb zeigt Bild 7 auch den Wert der Durchschlagspannung bei einer Wassersättigung von 10 %, berechnet mittels [4], Fig.11. Die Wassersättigung stellte sich in den Behältern während des Versuchs bei etwa 1-5 % ein. Beeindruckend ist, dass trotz der extremen Alterung, mit z.B. einer Säurezahl teilweise jenseits 1 mg KOH/g, die Durchschlagspannung dennoch sehr hoch ist und die Anforderungen der IEC 60422 klar erfüllt. Diese Ergebnisse stellen wiederum den diagnostischen Wert dieses Parameters in Frage, zumal er ohnehin nur für ein homogenes Feld bestimmt wird.

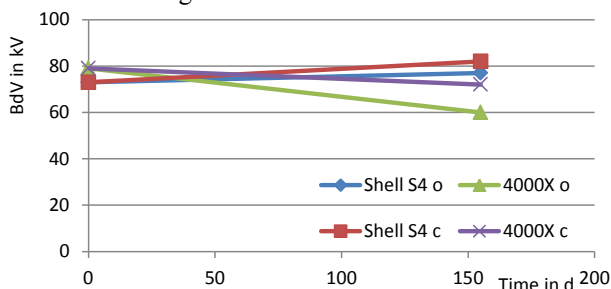


Bild 7: Durchschlagspannung der Öle der Öle Shell Diala S4 ZX-I und Nynas Nytro 4000X vor und nach dem Alterungsversuch. Die Indizes bedeuten: o – Zufuhr von Luftsauerstoff, c – Abschluss von Luft

3.6 Farbe

Die Farbe ist ein einfacher, aber aussagefähiger Indikator für Ölalterung. Der unterschiedliche Alterungszustand nach gleicher Zeit (35 d) wird eindrucksvoll durch das Foto in **Bild 8** illustriert.



Bild 8: Farbe und Erscheinen der Öle Shell Diala S4 ZX-I (GtL), Nynas Nytro 4000X, Shell Diala S3 ZX-I und Shell Diala D (v.l.n.r.) nach 35 Tagen Alterung unter Abschluss von Luftsauerstoff.

3.7 Bestimmung des IR-Spektrums

Das Infrarotspektrum wurde mit einem FTIR Spektrometer gemäss IEC 60666 bestimmt. Zur Bestimmung des

Inhibitorgehalts diente die Absorptionslinie bei einer Wellenzahl von ca. 3660 /cm.

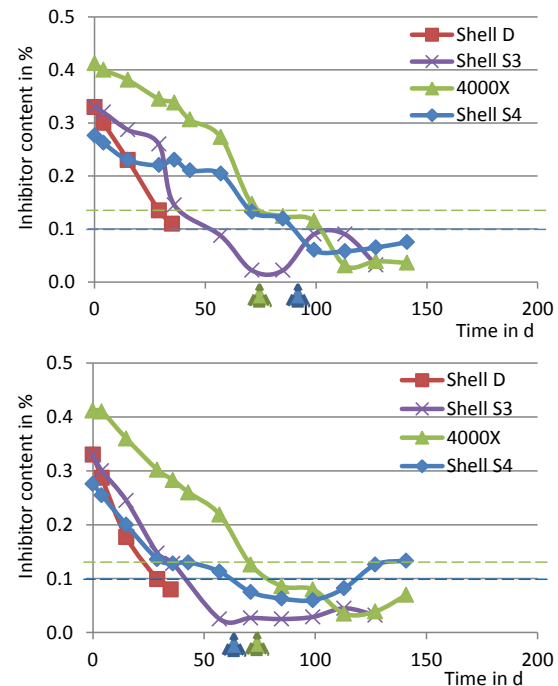


Bild 9: Inhibitorgehalt der Öle bei Alterung unter Luftzufuhr (oben) und bei Abschluss von atmosphärischem Sauerstoff (unten). Die gestrichelte Linie kennzeichnet in etwa den Grenzwert nach IEC 60422, welcher 40 % des Ursprungswertes beträgt.

Bild 9 vergleicht den Inhibitorgehalt der vier Öle. Das Nynas Nytro 4000 X ist mit 0.41 % am höchsten inhibiert. Für das auf GtL-Basis hergestellte Shell S4 ZX-I beträgt der Inhibitorgehalt ursprünglich nur 0.28 %, obwohl für dieses hochreine Öl ein deutlich höherer Wert erwartet wurde. Eventuell mischte der Hersteller noch andere Inhibitoren bei, welche im IR-Spektrum an anderer Stelle sichtbar werden, den Autoren aber nicht bekannt sind.

Erstaunlicherweise nimmt der Inhibitorgehalt aller Öle bei der Alterung unter Luftabschluss stärker ab als bei Zufuhr von Luft, wiewohl im letzteren Fall eine höhere Alterungsdynamik zu erwarten wäre.

Grenzwert laut IEC 60422 ist hier eine Abnahme auf 33 % des Ursprungswerts, was für Nynas Nytro 4000 X in einen höheren Grenzwert resultiert als für Shell Diala S4 ZX-I. Die Unterschreitung des Grenzwerts wird in Bild 9 durch Dreiecke markiert. Mindestens für das Shell S4 ist diese Grenzziehung allerdings zweifelhaft, da nach ca. 80 d bereits 33 % des Ursprungswerts unterschritten werden, jedoch die Ölkennzahlen noch alle die Anforderungen der Norm erfüllen.

Die scheinbare Steigerung des Inhibitorgehalts bei langer Alterungsdauer entsteht aus einem Messfehler, da das Öl zu diesem Zeitpunkt bereits insgesamt sehr trüb ist.

Im Infrarotspektrum können unterschiedliche Molekülgruppen durch ihre spezifischen Absorptionslinien nachgewiesen werden. Einer Dämpfung (vertikale Verschiebung des Spektrums) wird im Allgemeinen keine Bedeutung zugemessen. Die Transmissionsspektren bedürfen für jede Isolierflüssigkeit mit ihren Funktionalgruppen auf Molekülebene einer eigenen Interpretation.

Das folgende **Bild 10** zeigt die Transmissionsspektren der vier Öle im Neuzustand. Der Bereich bei 2750 /cm wird durch C-H Bindungen, und um 1400 /cm durch C-C und C=C Bindungen verursacht. Klar sind die Gemeinsamkeiten der drei durch konventionelle Raffinierung hergestellten Öle erkennbar als auch die Unterschiede zum Shell S4, welches durch den Fischer-Tropsch-Syntheseprozess entstand. Dieses GtL-Öl hat neue Absorptionslinien bei Wellenzahlen von 4300, 2600, 1150 und 720 / cm. Alterung verringert die Transmission deutlich, wie **Bild 11** illustriert.

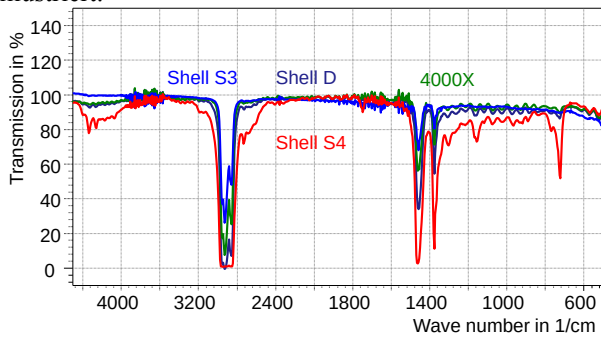


Bild 10: IR-Transmissionsspektrum der vier Öle Shell S4 ZX-I, Shell S3 ZX-I, Shell Diala D und Nynas Nytro 4000 X im Neuzustand

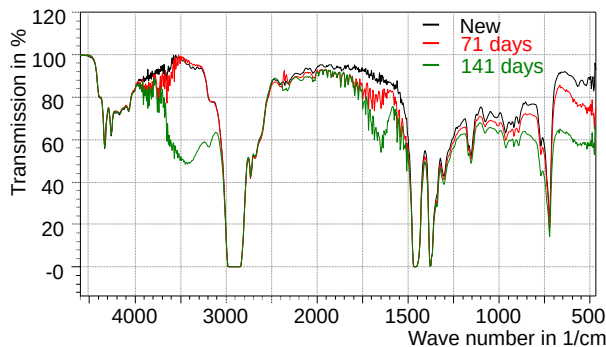


Bild 11: IR-Transmissionsspektrum des Shell S4 ZX-I (GtL), im Neuzustand und nach 71 bzw. 141 Tagen Alterung bei offenem Gefäß

3.8 Zersetzungsgasanalyse DGA

Die Analyse der Zersetzungsgase (engl. Dissolved Gas Analysis DGA) liefert vordergründig Informationen über elektrische Fehler im Transformator. Jedoch kann aus den Kohlenoxiden (CO , CO_2) die Alterung durch Oxidation und Pyrolyse abgeleitet werden und aus der Bildung gesättigter Kohlenwasserstoffe (Methan CH_4 , Ethan C_2H_6) thermischer Stress bzw. Übertemperaturen. Schließlich könnte auch die oft als Stray Gassing bezeichnete Bildung von Wasserstoff aufgrund von Materialunverträglichkeiten diagnostiziert werden.

Beim vorliegenden Alterungsversuch zeigt die Zersetzungsgasanalyse eindrucksvoll den Stress des Isolieröls anhand der Produktion von Methan, **Bild 12**. Das Shell Diala D, nachträglich inhibiert, zeigt die stärkste Bildung von Methan, gefolgt vom Shell Diala S3 ZX-I. Besonders das Shell Diala S4 ZX-I (GtL) bildet hingegen kein Methan. Dies korrespondiert mit der allgemeinen Alterung der Flüssigkeiten.

Bemerkenswert ist weiterhin, dass auch Ethylen C_2H_4 gebildet wurde, wiewohl die Temperatur 120°C nicht überstieg. Die höchste Konzentration wurde mit 67 ppm im

Shell Diala S3 ZX-I erreicht. Das gesättigte Ethan C_2H_6 wurde nur in geringerem Maße gebildet und Acetylen gar nicht.

Materialinkompatibilitäten mit Stray Gassing wurden nicht festgestellt. Weiter konnte kein Zusammenhang zwischen der Bildung von Kohlenoxiden und der Zufuhr bzw. dem Abschluss von Luftsauerstoff gefunden werden.

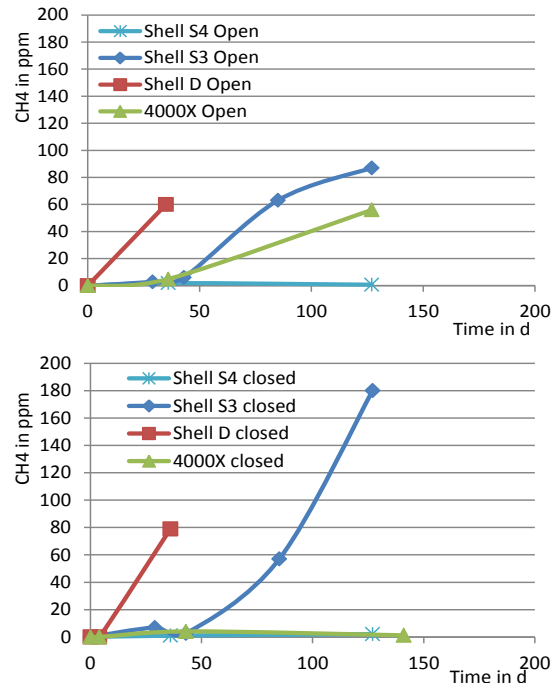


Bild 12: Bildung von Methan in den Isolierölen bei Alterung unter Luftzufuhr (oben) und bei Abschluss von Luft (unten)

4 Alterung des Papiers

4.1 Furananalyse

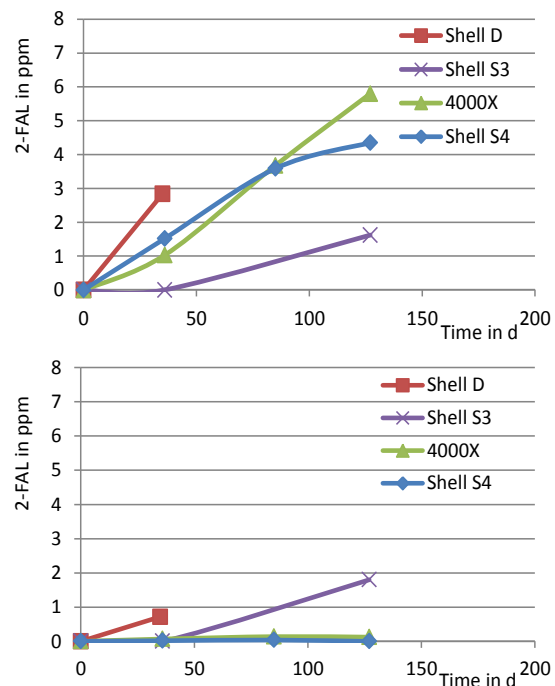


Bild 13: Konzentration des Furan-Derivats 2-FAL in den Ölen bei Alterung unter Luftzufuhr (oben) und bei Abschluss von atmosphärischem Sauerstoff (rechts)

Bei der thermischen Alterung der Feststoffisolation (Zellulose) bilden sich verschiedene Furan-Derivate. Mit der Analyse der im Öl gelösten Furane kann die mechanische Festigkeit der Feststoffisolation (Papier, Pressboard) beurteilt werden. Die Konzentration verschiedener Furan-Derivate wurde mit HPLC (High Performance Liquid Chromatography) bestimmt, dargestellt wird hier nur das am intensivsten gebildete Furan-Derivat 2-FAL. Bild 13 vergleicht die Bildung des Furan-Derivats 2-FAL für die verschiedenen Öle bei den unterschiedlichen Alterungsbedingungen. Unter Einwirkung von atmosphärischem Sauerstoff (oben) werden Furane in deutlich höherer Konzentration gebildet als ohne (unten). Zudem werden in den stärker gealterten Ölen mehr Furane gebildet als in den alterungsresistenten Ölen. Damit wird vor allem die übliche Ableitung des Polymerisationsgrads aus der Furankonzentration im Öl fraglich. Wie diese Parameter zusammenhängen, wird im nächsten Abschnitt betrachtet.

4.2 Polymerisationsgrad DP

Der Polymerisationsgrad DP (engl. Degree of Polymerization) gibt die Anzahl der Glukoseringe je Zellulosemolekül an und steht in direktem Zusammenhang mit der mechanischen Festigkeit des Papiers oder Pressboards. Neupapier besitzt einen DP von 1000-1300, während bei einem DP von 200 die Alterung so weit fortgeschritten ist, dass man die mechanische Festigkeit als unzulänglich betrachtet.

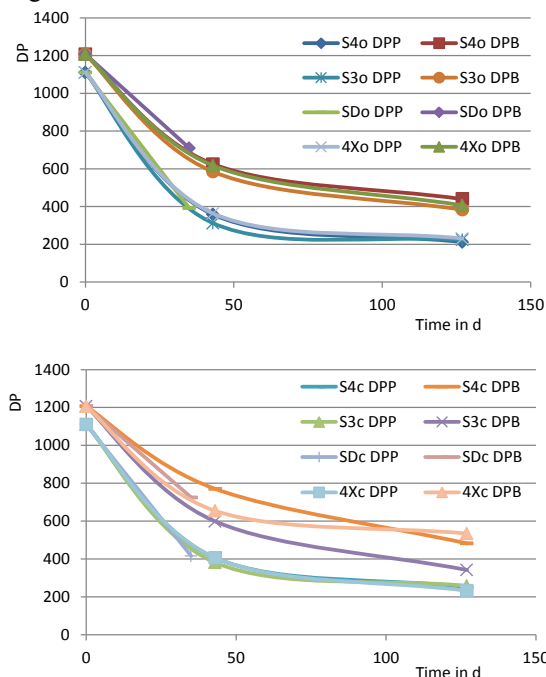


Bild 14: Polymerisationsgrad DP von Papier (P) und Pressboard (B) bei Alterung unter Luftzufuhr (oben) und bei Abschluss von atmosphärischem Sauerstoff (unten)

Bild 14 zeigt die Abnahme des DP von Papier (Index P) und Board (Index B) im Verlauf der Alterung. Die Alterung verläuft im offenen System etwas schneller als im geschlossenen. Die DP des Pressboard sind durchgängig höher als beim Papier, wiewohl die Temperaturen gleich waren. Die erstaunlichste Feststellung ist jedoch die Ähnlichkeit der DP-Werte für alle Öle. Kein Öl verhält sich

papierfreundlicher als das andere. Demnach ist die Bildung der Furane vor allem auf den thermischen Stress des Öls zurückzuführen, steht jedoch in keinem quantitativen Zusammenhang mit der Alterung der Zellulosematerialien. Die häufig verwendeten Formeln zur einfachen Ableitung des Polymerisationsgrads aus der Furankonzentration müssen einmal mehr in Frage gestellt werden.

5 Zusammenfassung

In einem erweiterten Alterungstest wurden aktuelle Hochleistungs-Isolieröle miteinander verglichen: Shell Diala S4 ZX-I auf GtL-Basis, Shell Diala S3 ZX-I, Shell Diala D und Nynas Nytro 4000X.

- Die Alterung erfolgte bei 120°C mit Transformatortypischen Werkstoffen (Zellulose, Kupfer) unter Luftzufuhr bzw. bei –abschluss.
- Die Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigt dem neuen Shell Diala S4 ZX-I ein hervorragendes Alterungsverhalten und eine im Vergleich mit den anderen Ölen bessere Performance.
- Das GtL-Öl kann im IR-Spektrum deutlich unterschieden werden von den raffinierten Ölen.
- Die weniger widerstandsfähigen Öle bildeten Zersetzungsgase, vor allem Methan CH_4 und Ethan C_2H_6 .
- Die Wassersättigung (max. Wasseraufnahmefähigkeit) verdoppelte sich während der Alterung.
- Die Durchschlagsspannung blieb unverändert hoch für alle Öle.
- Furane bildeten sich unter Zufuhr von Luftsauerstoff, kaum jedoch bei dessen Abwesenheit. Ein quantitativer Zusammenhang mit dem Polymerisationsgrad kann nicht hergestellt werden.

6 Danksagung

Die Autoren danken folgenden Unternehmen für ihre Unterstützung: Arnold AG, Axpo Power AG, Berner Kraftwerke, CKW Centralschweizerische Kraftwerke AG, ewz Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, EKZ Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, Groupe E, Hydro Exploitation SA, KWO Kraftwerke Oberhasli AG, SBB. Wir danken weiter den Herstellern der Isolieröle für das Bereitstellen von Mustern.

7 Literatur

- [1] Pressemitteilung der Shell, abgerufen am 01.09.2013, <http://www.shell.de>
- [2] Peter Smith: "The benefits of inhibited transformer oils using gas-to-liquids based technology" CWIEME - Berlin 2013, abgerufen am 01.09.2013, <http://www.coilwindingexpo.com>
- [3] M. Koch, S. Tenbohlen: „Diagnostic Application of Moisture Equilibrium for Power Transformers“, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 25, Issue 4, 2010
- [4] S. Tenbohlen, M. Koch: “Ageing Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, 2010