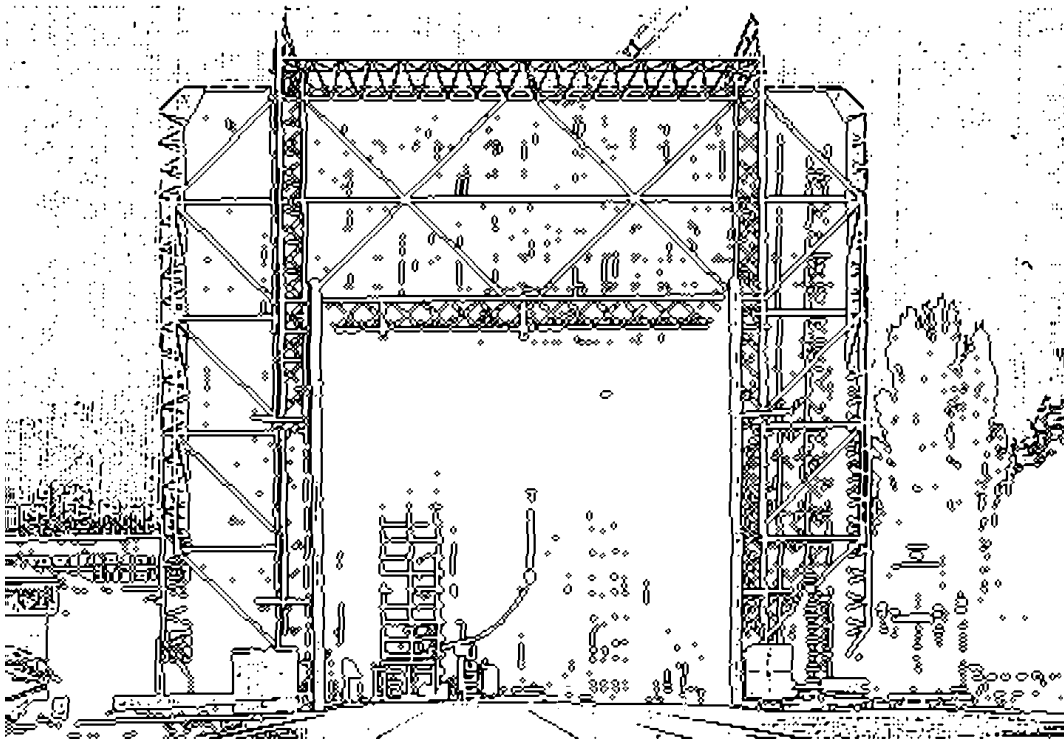


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

DISSERTATION



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK
UND SYSTEMMANAGEMENT

ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN UND GASUNGSVERHALTEN VON BIOLOGISCHEN UND SYNTHETISCHEN ESTERN IN HOCHSPANNUNGS- ISOLATIONSSYSTEMEN UNTER KÄLTEEINFLUSS

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

von

Dipl. Ing. Robert Eberhardt

1. Begutachter: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr.h.c. Michael Muhr
2. Begutachter: Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach, Hannover

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Graz im September 2011

Danksagung

Hiermit möchte ich allen Leuten, die mich während der vier Jahre, die meine Arbeiten rund um die Dissertation dauerten, unterstützt haben, danken.

Meinem Doktorvater Michael Muhr, Betreuer und Coach, der die Arbeit erst ermöglichte und meinem Zweitbegutachter Ernst Gockenbach für seine Anregungen. Ebenso Frank Uhlig für die Hilfestellungen bei Chemie-orientierten Fragen.

Weiters allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der TU Graz für die gute Zusammenarbeit und den Weiterentwicklungsprozeß des vielen voneinander Lernens, im Speziellen Bettina Wieser für ihre Geduld mit mir.

Außerdem meinen Kollegen und Freunden von Siemens Transformers Austria Weiz, Robert Schwarz, Georg Pukel, Fritz Baumann sowie dem Leiter der R&D Martin Stössl für die große Hilfe.

Und natürlich meinen Eltern für die gute Basis, meiner Familie und meinen Freunden, aber ganz besonders meiner Frau Andrea für das stets offene Ohr und die Toleranz, die den Mitmenschen ob des wissenschaftlichen Arbeitens des Öfteren abverlangt wird.

Graz, im September 2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 7.9.2011

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

September 7th , 2011

.....

(signature)

Kurzfassung:

Diese Arbeit befasst sich mit einer vergleichenden Untersuchung des Durchschlagverhaltens und der Gasproduktion von synthetischen und biologischen Estern im Vergleich zu Mineralöl und in Zusammenhang mit Zellulose in inhomogenen Feldern, sowohl bei tiefen Temperaturen als auch bei Raumtemperatur.

Es wurde angenommen, dass nach starker Abkühlung der Feuchtigkeitsaustausch zwischen Isolierflüssigkeit und Zellulose zu einer Herabsetzung der elektrischen Festigkeit führt. Um dies zu untersuchen wurde ein Test Setup entwickelt, mit dem je 20 Proben mit den Abständen 10 mm und 20 mm bei -25 °C , bei -10 °C und bei Raumtemperatur auf Wechsellspannungsdurchschlag mit rampenförmiger Spannung geprüft wurden.

Das Setup wurde so konzipiert, dass zwischen den Elektroden für den Durchschlag an der Zelluloseoberfläche eine Kriechstrecke zur Verfügung stand. Vor der Abkühlung wurde das Test-Setup samt den Proben aus Transformerboard auf eine für Transformatoren typische Arbeitstemperatur (Prüftemperatur $+60\text{ °C}$) erwärmt.

Vor und nach den Durchschlagspannungsversuchen wurde eine Gas-in-Öl-Analyse sowie eine Bestimmung der Durchschlagspannung (nach IEC 60156) und des Feuchtegehalts nach Karl Fischer durchgeführt.

Die gewonnenen Ergebnisse der Gas-in-Öl-Analyse wurden sowohl in Absolutwerten als auch in ihren Differenzen zum Ausgangswert dargestellt, und weiters mit fünf gebräuchlichen Auswerteschemata analysiert.

Die Ergebnisse der Durchschlagspannungsuntersuchungen wurden auf Unabhängigkeit geprüft und mittels deskriptiver Statistik ausgewertet. Abschließend wurde der Zerstörungsgrad der Zellulose anhand der sichtbaren Durchschlagspuren ausgewertet.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wurden Erkenntnisse über das elektrische und chemische Tieftemperaturverhalten von Esterflüssigkeiten gewonnen.

Schlüsselwörter:

Transformatoröl, Transformatorpapier, Schadgase, Gasungsverhalten, Gas-in-Öl-Analyse, synthetische Ester, natürliche Ester, Transformator, Hochspannung;

Abstract:

This work deals with a comparative study of the breakdown behaviour and the gas production of biological and synthetic ester liquids compared with mineral oil in connection with cellulose in inhomogeneous fields at low temperatures and room temperature.

It was assumed that when strongly cooled, the moisture exchange between the insulating liquid and cellulose at strong cooling would lower the dielectric strength. To investigate this, a test setup was developed and breakdown tests were implemented with 20 samples at a gap distance of 10 mm and 20 mm. The tests were conducted at -25 °C, -10 °C and room temperature using ramp-shaped AC voltage.

The setup was designed so that a creepage path was available between the electrodes allowing on the cellulose surface. Before cooling, the test setup, including the transformerboard samples, was heated up to a typical transformer operating temperature (test temperature +60 °C).

Before and after the breakdown voltage tests, a gas-in-oil analysis, a breakdown voltage test (according to IEC 60156), and a moisture content test (Karl Fischer method) were conducted.

The obtained results of the gas-in-oil analysis, both in absolute values and in their differences from the initial values, were shown and analysed with five common evaluation methods.

The results of the breakdown voltage tests were checked for independence and analysed using descriptive statistics. Finally, the degree of cellulose degradation was evaluated by the visible breakdown marks.

Through the investigation knowledge was gained about the electrical and chemical behavior of cooled ester liquids.

Key words:

Transformer oil, transformerboard, pressboard, synthetic ester, natural ester, transformer, high voltage, gas in oil, DGA, dissolved gas analysis;

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Auftretende Probleme für ein Isoliersystem bei tiefen Temperaturen.....	7
1.2	Ziele und Struktur der vorliegenden Arbeit	8
2	Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten und Pressboard	10
2.1	Allgemeines Temperaturverhalten und Gasbildungsmechanismen der Flüssigkeiten	10
2.1.1	Temperaturverhalten	10
2.1.2	Gasbildung	13
2.2	Mineralöl.....	15
2.2.1	Zusammensetzung und Herstellung.....	16
2.2.2	Temperatur- und Gasbildungsverhalten von Mineralöl.....	19
2.3	Synthetische Ester	21
2.3.1	Zusammensetzung und Herstellung.....	23
2.3.2	Temperatur- und Gasbildungsverhalten von synthetischen Estern	24
2.4	Natürliche Ester.....	26
2.4.1	Zusammensetzung und Herstellung von Sojaöl.....	27
2.4.2	Temperatur- und Gasbildungsverhalten von natürlichen Estern	30
2.5	Zellulose.....	31
2.5.1	Herstellung und Aufbau von Zellulose für Transformatoren	33
2.5.2	Gasbildungsverhalten von Zellulose	35
2.6	Das Öl - Zellulose - Isoliersystem.....	35
2.7	Weitere Gasbildungsvorgänge	36
2.8	Durchschlagverhalten.....	36
2.8.1	Durchschlagverhalten der Flüssigkeiten	36
2.8.2	Durchschlagverhalten von imprägnierter Zellulose	42
2.8.3	Spezielle, den Feuchtigkeitsaustausch und tiefe Temperaturen betreffende Aspekte	43
2.9	Verhalten der Flüssigkeiten bei tiefen Temperaturen	44
3	Aufgabenstellung	46

3.1	Derzeitiger Forschungsstand	47
3.2	Versuchsanordnung und Überlegungen zur Abkühlung	48
3.3	Auswahl der Flüssigkeiten.....	50
3.4	Versuchsplanung.....	51
3.5	Ablauf.....	51
3.6	Auswertung	53
4	Untersuchungen an alternativen Flüssigkeiten bei tiefen Temperaturen ..	54
4.1	Versuchsaufbau	54
4.2	Durchschlagsuntersuchungen am abgekühlten Öl-Zellulose-Isoliersystem	55
4.3	DGA – Dissolved Gas Analysis – Gas-in-Öl-Analyse	57
4.3.1	Die Probenentnahme	58
4.3.2	Die Extraktion der gelösten Gase mittels Toepler-Pumpe.....	59
4.3.3	Die Gasanalyse mittels Gaschromatograph	60
4.3.4	Auswertung und Interpretation	62
4.4	Weitere chemische und elektrische Untersuchungen an den Flüssigkeiten	68
4.4.1	Ölfeuchte – Coulometrische Karl Fischer Titration	69
4.4.2	Durchschlagsspannung nach IEC 60156.....	72
4.5	Auswertungsmethoden.....	73
4.5.1	Regression	73
4.5.2	Deskriptive Statistik.....	73
4.5.3	Sichtung der Durchschlagspuren an der Zellulose.....	74
5	Ergebnisse	75
5.1	Durchschlagsspannungsuntersuchungen am Öl-Papier-Isoliersystem	75
5.1.1	Untersuchungen von Unabhängigkeit und Verteilungsfunktion.....	76
5.1.2	Ergebnisse der deskriptiven Statistik	79
5.2	Gas-in-Öl-Analyse	81
5.2.1	Interpretationsergebnisse allgemein anerkannter Schemata	82
5.2.2	Gasbildung bei den Versuchen in Absolutwerten (ppm)	84
5.2.3	Gasbildung bei den Versuchen relativ (in % des Ausgangswertes)	87
5.3	Ölkennwerte	90
5.4	Sichtung der Durchschlagspuren an der Zellulose	92

6	Diskussion	95
6.1	Überlegungen zu Unabhängigkeit, Probenanzahl und Gaskonzentration ..	95
6.2	Durchschlagverhalten bei tiefen Temperaturen.....	96
6.2.1	Diskussion der Durchschlagspannungen	96
6.2.2	Auswertung der Durchschlagspuren an der Zellulose.....	97
6.2.3	Ölkennwerte – Durchschlagspannung nach IEC 60156 und Wassergehalt	98
6.3	Gasungsverhalten	99
6.3.1	Gasbildung	99
6.3.2	Auswertungsschemata.....	100
6.4	Bezugnahme auf den derzeitigen Forschungsstand	102
7	Resümee	104
7.1	Durchschlagverhalten.....	104
7.2	Gasungsverhalten	105
7.2.1	Verwendbarkeit der Auswertungsschemata	105
7.3	Überlegungen für weiterführende Untersuchungen.....	106
8	Auswirkungen auf die Praxis	107
8.1	Kaltstart	107
8.2	Gas-in-Öl-Analyse	108
8.2.1	Gasproduktion.....	108
8.2.2	Auswertungsschemata.....	108
9	Zusammenfassung	110
9.1	Durchschlagsverhalten.....	110
9.2	Gasungsverhalten	111
10	Literaturverzeichnis	113
11	Anhang	120
	Probenimprägnierung.....	120

1 Einleitung

Die weltweite Energieversorgungssituation zeigt, dass die Versorgung großer Ballungsräume eine wichtige Aufgabe bleibt, deren Anforderungen sowohl in der Qualität als auch in der Quantität ansteigen. Schätzungen besagen, dass ab 2030 fast zwei Drittel der Weltbevölkerung in Städten leben werden.

Eine besondere Herausforderung für den Aufbau und die Weiterentwicklung der versorgenden Infrastruktur stellen die sich rasant vermehrenden sogenannten Megacities dar. Gab es 1959 weltweit nur zwei Städte mit mehr als 10 Mio. Einwohnern (Definition der Vereinten Nationen für „Mega City“), nämlich New York und Tokio, so waren es 2004 bereits 22 Städte, in denen beinahe 10 % der städtischen Weltbevölkerung lebten.

Zwei Drittel der Entscheidungsträger der Weltstädte sehen in den kommenden fünf bis zehn Jahren Investitionsbedarf bei der Energieversorgung. Umweltfolgen spielen bei den Investitionsmaßnahmen natürlich eine wichtige Rolle. [1]

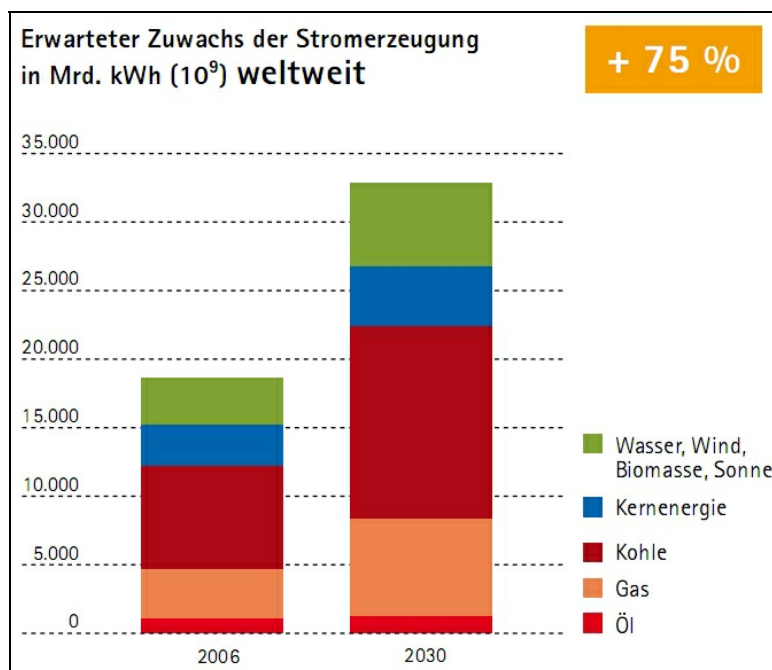


Abbildung 1: Weltweite Energieerzeugung, erwarteter Zuwachs bis 2030 [2]

Hinzu kommt noch der Jahrzehnte dauernde Aufwärtstrend im Energieverbrauch. Laut dem World Energy Report der IEA (International Energy Agency) wird sich der weltweite Energieverbrauch von 2006 bis 2030, selbst unter Berücksichtigung der zu erwartenden Effizienzsteigerungen, um 75 % vergrößern (siehe dazu Abbildung 1) [2].

Der Großteil dieser Verbrauchsentwicklung wird sich, wie oben beschrieben, in Städten vollziehen, wobei es geografisch gesehen die „emerging markets“ der aufstrebenden dritten Welt Staaten sein werden, deren Energieverbrauch sich am meisten steigern wird. Der europäische Raum wird zwar auch, aber nicht so gravierend, betroffen sein (siehe Abbildung 2).

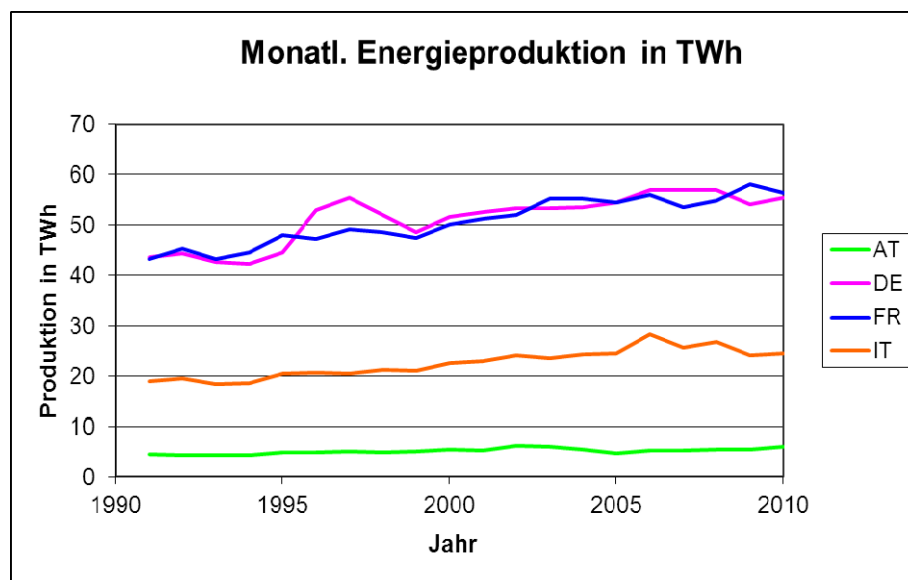


Abbildung 2: Monatliche Produktion an elektrischer Energie in TWh einiger europäischer Länder [3]

In der Versorgung solcher Ballungsräume spielt die Qualität des Übertragungsnetzwerks nach der Erzeugung unbestritten eine der größten Rollen. Es ist notwendig, noch leistungsfähigere Transformatoren und Schaltanlagen auf noch kleinerem Raum und vor allem noch bevölkerungsnäher zu bauen.

Besonders die Leistungstransformatoren als Bindeglied zwischen dem Übertragungsnetz (Hoch- und Höchstspannungsniveau) und dem Verteilnetz (Mittel- bis Hochspannungsniveau) stellen dabei wichtige Komponenten dar.

Einerseits repräsentieren sie große Investitionen mit Lebensdauerzyklen von bis zu 50 Jahren und andererseits befinden sie sich an besonders ausfallkritischen Positionen in der Übertragungskette.

Mit wenigen Ausnahmen handelt es sich dabei beinahe immer um Transformatoren mit einer gemischten Isolierung aus einem mit einer hochviskosen Flüssigkeit getränkten Feststoff. Wobei der Feststoff (hauptsächlich Zellulose) die mechanisch tragenden Eigenschaften übernimmt und die Flüssigkeit neben der elektrischen Isolation auch noch die Aufgabe des Kühlmediums innehat. Genauere Ausführungen hierzu sind in Kap. 3.1 und 3.4 dargestellt. Zwar gibt es auch Transformatorvarianten mit reiner Feststoffisolierung (Gießharztransformatoren) und Gasisolierung (meist SF₆ - Schwefelhexafluorid), diese werden aber nur in Sonderfällen eingesetzt und sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Viele Jahrzehnte wurde zur Isolation Mineralöl verwendet. Es ist tiefgreifend erforscht und sämtliche Eigenschaften sind hinreichend bekannt. Es besitzt neben den vielen Vorteilen auch die gravierenden Nachteile der hohen Brandlast und der langen biologischen Abbaubarkeit.

Aus diesen Gründen ist man bestrebt, die Mineralöle auf lange Sicht durch alternative Isolierflüssigkeiten zu ersetzen. Hierfür bieten sich beispielsweise natürliche oder synthetische Esterflüssigkeiten an.

Zwar gibt es noch weitere alternative Isolierflüssigkeiten, beispielsweise Silikonöl oder Fluorpolymere, mit guten elektrischen und thermischen Eigenschaften [17], jedoch liegen die Kosten für diese Flüssigkeiten teilweise um das zehnfache bis hundertfache höher und damit kommen sie in der Praxis für Leistungstransformatoren nicht in Frage.

Esterflüssigkeiten besitzen die Nachteile des Mineralöls nicht, ihre Brandlast ist wesentlich geringer, ihr Brennpunkt liegt weit höher und sie sind, aus Sicht der Umweltverträglichkeit betrachtet, wesentlich unkritischer [4].

Zum Vergleich: Mineralöl besitzt einen Brennwert von 46 MJ/kg [5], natürliche Esterflüssigkeiten 34 MJ/kg (Sojaöl) [6] und synthetische Ester 31 MJ/kg [5]. Das ergibt für Mineralöl bei einem Leistungstransformator mit 40 t Ölmenge eine gespeicherte Energie von 1840 TJ (nur durch das Öl verursacht, andere brennbare Materialien, wie etwa Zellulose, wurden nicht berücksichtigt).

Bei einem mit synthetischem Ester gefüllten Transformator ist es zwar nur um etwa ein Viertel weniger (gesamt rund 1240 TJ), es gilt jedoch den wesentlich höheren Brennpunkt mit einzubeziehen. Dieser liegt für Mineralöl bei etwa 150 °C [7] und für synthetische und natürliche Ester zwischen 300 °C und 340 °C [5], [8].

Aus der geminderten Brandlast ergeben sich für die Betreiber der Anlagen folgende sekundäre Vorteile [9]:

- Im Schaltfeld sind keine Brandmauern mehr erforderlich
- Die Kosten für die Feuerhaftung und Versicherungen fallen niedriger aus
- Die Anforderungen an die Feuerlöschanlage des Schaltfelds in der Unterstation können optimiert werden
- Der Abstand zwischen dem Transformator und benachbarten Anlagen und/oder Gebäuden ist weniger kritisch
- Umweltverträglichkeitsprüfungen für Bauvorhaben können durch verminderte Gesundheitsgefährdung und Brandlast einfacher bestanden werden

Die sich aus technischer Sicht ergebenden Vorteile von Esterflüssigkeiten gegenüber Mineralölen sind im Folgenden aufgelistet:

- Das wesentlich höhere Feuchtigkeitsaufnahmevermögen von mehreren hundert mg/kg (ppm) ohne Auswirkung auf die dielektrischen Eigenschaften [5]
- Alterungsversuche mit Estern haben im Vergleich mit Mineralöl gezeigt, dass diese das Alterungsverhalten von Pressboard positiv beeinflussen. Der Depolymerisationswert von in Estern gealtertem Board liegt wesentlich höher als jener von Zellulose in gleich behandeltem Mineralöl [10]

Nicht zuletzt macht ein gesteigertes Umweltbewusstsein der Bevölkerung auch das Bedenken der Abbaubarkeit der Isolierflüssigkeit im Fall eines leckbedingten Austritts notwendig.

Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Untersuchungen und praktischer Ergebnisse ist der Einsatz alternativer Isolierflüssigkeiten nach wie vor nur beschränkt möglich. Auch sind noch Untersuchungen zur Verbesserung von Instandhaltungsregeln für diese Isolierstoffe, ihre gelösten Gase betreffend, notwendig.

In dieser Arbeit werden die Eigenschaften von alternativen Isolierflüssigkeiten im Vergleich mit herkömmlichem Mineralöl behandelt.

Einsatzgebiete von alternativen Isolierflüssigkeiten

Die Eigenschaft der guten Brandbeständigkeit und die hervorragenden Abbaueigenschaften prädestinieren diese Flüssigkeiten praktisch für den bevölkerungsnahen Einsatz in Ballungszentren und anderen Gebieten mit Verunreinigungsproblematik. Damit kann die Gefahr von Personen- und Sachschäden aus sekundären Schadensereignissen, die nicht direkt durch Spannungseinwirkung entstehen, wie Verbrennung oder Vergiftung, minimiert werden.

Esterflüssigkeiten sind im Mittelspannungsbereich bis 40 kV bereits seit vielen Jahren im breiten Einsatz. Das beobachtbare Verhalten in diesem Bereich ist zufriedenstellend und viele Transformatorenhersteller haben Estereinheiten im Mittelspannungsbereich im Standardprogramm.

Im Großtransformatorenbereich für Spannungen über 40 kV ist dieser Durchbruch noch ausständig. Dies ist nicht zuletzt auf die fehlenden wissenschaftlichen Untersuchungen zurückzuführen. Der finanzielle Aufwand für einen Großtransformator ist um ein Vielfaches höher als bei einem Verteiltransformator, daher greifen in diesem Bereich Produzenten wie Anwender derzeit noch hauptsächlich auf die mit Mineralöl gefüllten Einheiten zurück.

Diese Beschränkung der Einsatzmöglichkeiten beruht, wie bereits erwähnt, auf nicht ausreichender wissenschaftlicher Betrachtung der Eigenschaften von natürlichen und synthetischen Estern.

Problematik „Kaltstart“ - alternative Isolierflüssigkeiten unter Kälteeinwirkung

Bei Esterflüssigkeiten kommt es unter Kälteeinfluss zu einer drastischen Erhöhung der Viskosität. Dieses Problem ist bei Kraftstoffen im Winter seit langem ein Thema. Beispielsweise benötigte der aus Estern bestehende Biodiesel für seine Verwendbarkeit im Winter eine Lösung.

Für Kraftstoffe ist dieser Aufgabe durch Zugabe von Additiven zur Fließeigenschaftsverbesserung und Pourpoint- Erniedrigung einfach beizukommen. Bei Transformatorenölen ist dies jedoch nur sehr schwer möglich, da die Zugabe von

Additiven die so wichtige Eigenschaft der elektrischen Festigkeit herabsetzt und die Flüssigkeit damit als Hochspannungsisolation unbrauchbar macht. In der Isolierflüssigkeit Envirotemp FR3 von Cooper Power Systems ist beispielsweise laut Hersteller 1 % Additiv zur Fließeigenschaftsverbesserung beigefügt. Größere Mengen wären aus Sicht der elektrischen Festigkeit nicht verwendbar.

Da die Isolierflüssigkeiten im Transformator auch die Funktion als Kühlmittel erfüllen müssen, sind nicht nur die dielektrischen Eigenschaften sondern auch physikalische Eigenschaften, wie die Viskosität, ausschlaggebend für die Einsatzeignung.

Natürliche Esterflüssigkeiten haben aufgrund ihres molekularen Aufbaus (längerkettige Fettsäuren) bereits bei Raumtemperatur eine höhere Viskosität als Mineralöl, diese befindet sich aber noch in einem akzeptablen Bereich.

Bedenkt man weiters, dass ein Transformator im Betrieb durchschnittliche Temperaturen von 50 bis 60 °C aufweist und die Esterflüssigkeiten bei diesen Temperaturen ausreichend Fließneigung besitzen, so stellt dieser Zustand estergefüllter Einheiten aus Sicht der Viskosität kein Problem dar. Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität wirkt sich jedoch in Bezug auf die notwendige Durchführung eines Kaltstarts in geografischen Regionen mit niedrigen Außentemperaturen negativ aus. Die daraus resultierende Herabsetzung der Kühleigenschaften macht eventuell eine Erwärmung der estergefüllten Transformatoren vor der Inbetriebnahme notwendig.

Das elektrische Verhalten bei tiefen Temperaturen ist hingegen ein derzeit noch nicht ausreichend erforschtes Gebiet bei Öl-Papier-Isoliersystemen mit natürlichen und synthetischen Estern. Inwieweit es dadurch zu einer Herabsetzung der elektrischen Festigkeit kommt, soll in der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich untersucht werden.

Besonders das Verhalten des in den Flüssigkeiten vorhandenen Wassers könnte dazu beitragen, die Isoliereigenschaften eines Öl-Papier-Isolationssystems zu verschlechtern. Die maximale Menge an Feuchtigkeit, die in den Estern gelöst sein kann, sinkt mit der Temperatur (siehe Abbildung 3). Es besteht die Möglichkeit, dass es in Esterflüssigkeiten zu einer erhöhten Konzentration von Wasser an der Zelluloseoberfläche kommt.

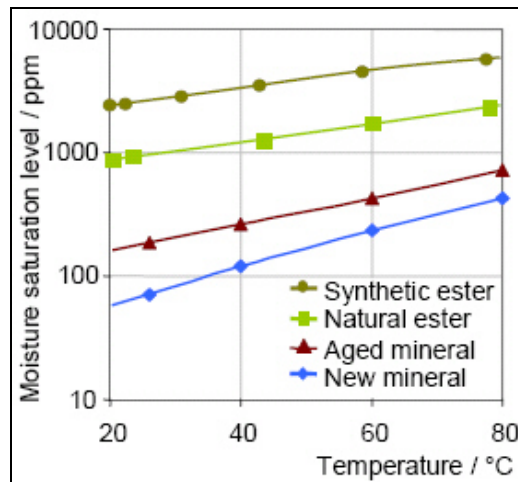


Abbildung 3: Wasseraufnahmeverhalten der Esterflüssigkeiten im Vergleich zu Mineralöl [56]

1.1 Auftretende Probleme für ein Isoliersystem bei tiefen Temperaturen

Für den Anwender eines Öl-Papier-Isoliersystems ergeben sich in Zusammenhang mit tiefen Temperaturen ohne Erstarren der Flüssigkeit immer dann mögliche Probleme, wenn die Notwendigkeit zum sogenannten Kaltstart besteht.

Es handelt sich dabei um das Zuschalten des Transformators an das Netz, möglicherweise unter Vollast, obwohl die Transformatortemperatur und damit die Temperatur des Isoliermediums der Umgebungstemperatur entspricht, die in kalten Regionen oder im Winter ohne weiteres bis zu -30°C oder noch weniger betragen kann. Das bedeutet, dass die Isolieranordnung in kaltem Zustand der vollen elektrischen und thermischen Belastung ausgesetzt wird. Die Isolierflüssigkeit besitzt bei tiefen Temperaturen eine höhere Viskosität, die Kühlkanäle müssen daher auf die geringere Fließfähigkeit ausgelegt sein, damit mögliche Hot Spots, die sich ja auch bei tiefen Umgebungstemperaturen rascher erwärmen als der gesamte Transformator, gekühlt werden und keinen Schaden verursachen.

Aus Sicht der elektrischen Belastung ist insbesondere die Feuchtigkeit in dem Zeitabschnitt kritisch, in dem das Isoliersystem abgekühlt wird bzw. gerade die tiefste Temperatur erreicht hat, aber das Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen Flüssigkeit und Zellulose sich noch nicht eingestellt hat. In dieser Zeit ist die relative Feuchte im

Öl erhöht, da es eine gewisse Zeit dauert, bis das Wasser in die Zellulose diffundiert, um dort gebunden zu werden [11], [14]. Damit steht fest, dass bei tiefen Temperaturen die Isolierflüssigkeit nicht separat von der Zellulose betrachtet werden kann. Diese Annahme soll in der vorliegenden Arbeit erstmalig wissenschaftlich untersucht werden.

Vorrangig sollen folgende Punkte untersucht werden:

- Wie wirkt sich eine kurzzeitige Abkühlung auf tiefe Temperaturen auf das Durchschlagverhalten eines Öl-Papier-Isoliersystems aus?
- Wie unterscheiden sich die bei diesen Durchschlägen entstandenen Gasmengen und –arten der verschiedenen verwendeten Flüssigkeiten?

Um diese bis jetzt ausstehenden Untersuchungen durchzuführen, war es notwendig, einerseits eine Versuchsanordnung zu entwickeln, bei der eine Erwärmungs- und Abkühlungsmöglichkeit bestand und andererseits ein Versuchsprogramm zu erstellen, mit welchem die oben angeführten Punkte hinsichtlich des Schadgas- und Durchschlagverhalten untersucht werden können. Weiters musste diese Anordnung sowohl Flüssigkeit und Zellulose in das Durchschlagszenario mit einbeziehen als auch eine Kriechstrecke an der Zellulosegrenze als Möglichkeit für den Überschlag zur Verfügung stellen.

1.2 Ziele und Struktur der vorliegenden Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den möglichen Anwendungsbereich von synthetischen und natürlichen Estern zu erweitern, indem wissenschaftliche Untersuchungen sowohl mit Estern als auch mit Mineralöl zum Vergleich durchgeführt wurden. Dafür wurden eine Versuchsanordnung und ein Versuchsablauf entwickelt, die mehrere Untersuchungsmöglichkeiten bieten sollten (siehe dazu Kapitel 3.5 und 4.1).

Einerseits war die Einsatztauglichkeit unter realen Transformator-Bedingungen der Flüssigkeiten in Verbindung mit Pressboard bei Kälte von Interesse. Dafür sollte das Durchschlagverhalten bei Raumtemperatur sowie nach rascher Abkühlung und dem

Einfluss der damit verbundenen Öl-Papier Feuchtigkeitsdynamik untersucht werden. Andererseits wurde auch die Möglichkeit ins Auge gefasst, die bei diesen Versuchen verwendeten Flüssigkeiten auf ihr Gasungsverhalten zu prüfen, indem mittels Gas-in-Öl-Analyse die Gaskoeffizienten vor und nach den Durchschlagversuchen bestimmt wurden.

Die Ergebnisse der Gasuntersuchungen sollten mit verschiedenen gebräuchlichen Mineralöl-Beurteilungsschemata bewertet werden, um festzustellen, bei welchen Gasen es zu Ähnlichkeiten, Abweichungen oder sogar Verfälschungen der Fehlerdiagnosen bei Esterflüssigkeiten kommen würde, beispielsweise die Verschleierung bzw. Vortäuschung eines Zellulose-Fehlers durch CO oder CO₂ Produktion im Ester (Siehe dazu Kapitel 2.2.2, 2.3.2 und 2.6.3).

Struktur der Arbeit

Kapitel 2 beschreibt die Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten und Pressboardproben. Es zeigt die Annahmen und deren zugrundeliegende Fakten über die Materialien.

In Kapitel 3 wird die Aufgabenstellung näher erläutert. Es werden die Hintergründe für die Erstellung der Versuchsanordnung und den Versuchsablauf sowie die Auswahl der Flüssigkeiten und die Auswertung umrissen.

Kapitel 4 beinhaltet eine genaue Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen mit den Flüssigkeiten und der Zellulose bei tiefen Temperaturen.

Kapitel 5 enthält die aufgelisteten Ergebnisse der Untersuchungen.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse aus Kapitel 5 diskutiert und mit den in Kapitel 2 und 3 getroffenen Annahmen verglichen.

2 Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten und Pressboard

Im folgenden Kapitel werden die Materialeigenschaften und Beschreibungen der bei den Untersuchungen verwendeten Isolierflüssigkeiten und dem verwendeten Transformerboard erörtert. Zu Beginn werden die relevanten, grundsätzlichen physikalischen und im Speziellen die elektrischen Eigenschaften der Flüssigkeiten zum Vergleich dargestellt.

Tabelle 1: Grundsätzliche Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten zum Vergleich [40],[19],[5],[8]:

Eigenschaft	Einheit	Vorschrift	Mineralöl	Synthetischer Ester	Natürlicher Ester
Durchschlagsspannung	kV	IEC 60156	70	55	50
Verlustfaktor $\tan \delta$		IEC 60247	$< 10 \cdot 10^{-4}$	$10-30 \cdot 10^{-4}$	$10-30 \cdot 10^{-4}$
Permittivitätszahl ϵ		IEC 60247	2,2	3,3	3,2
Pourpoint	°C	ISO 3016	- 40	- 50	- 15 bis - 25
Flammpunkt	°C	ISO 2592	135 - 145	257	310 - 325
Brennpunkt	°C	ISO 2719	150 - 175	310	354 - 360
Viskosität (kin. bei 40° C)	mm ² /s	ISO 3104	20	30	33 - 45
Dichte ρ (20° C)	kg/m ³	ISO 3675	900	960	920

2.1 Allgemeines Temperaturverhalten und Gasbildungsmechanismen der Flüssigkeiten

2.1.1 Temperaturverhalten

Es ergibt sich mit der steigenden Viskosität bei sinkender Temperatur das Problem der sinkenden Fließfähigkeit. Damit verringern sich auch die Kühleigenschaften der Isolierflüssigkeit aufgrund der sinkenden Strömungsgeschwindigkeit drastisch. Im Dauerbetriebsfall, speziell unter Last, muss auf diesen Umstand keine Rücksicht genommen werden, da durch die auftretende Verlustwärme des Transformators die Isolierflüssigkeit ohnehin ausreichend erwärmt ist.

Kritisch ist nur der Fall des Einschaltens nach längerer Pause, in der sich das Isoliermedium auf die niedrige Umgebungstemperatur abkühlen kann. Der Extremfall ist dann erreicht, wenn die Temperatur den Pour-Point der Flüssigkeit unterschreitet. Danach kann das Isoliermedium aufgrund der Erstarrung überhaupt nicht mehr fließen. Der Energieabtransport aus den Abwärme produzierenden Elementen des Transformators beschränkt sich nun auf die Aufnahmefähigkeit der Flüssigkeit durch ihre Wärmekapazität. Ist diese erschöpft, wird keine Wärme mehr aufgenommen und die Temperatur der Papierisolierung kann bis auf kritische Werte ansteigen.

Das Temperaturverhalten der elektrischen Festigkeit der verwendeten Flüssigkeiten für sich ist teilweise bereits erforscht und es wurde gezeigt, dass bei alternativen Flüssigkeiten kein Absinken der Durchschlagfestigkeit mit der Temperatur feststellbar ist [22].

In Verbindung mit Zellulose hingegen ergeben sich neue Forschungsgebiete, die elektrische Festigkeit betreffend, hinsichtlich des Feuchtehaushalts der beiden Stoffe. Speziell bei der Absenkung der Temperatur eines Öl-Zellulose-Isoliersystems kommt es zum Freiwerden von Wasser in der Flüssigkeit, welches nun danach trachtet, sich durch Diffusion statistisch in alle Richtungen bis zur nächstgelegenen Oberfläche zu bewegen und sich dort anzulagern.

Handelt es sich dabei um eine Zelluloseoberfläche, so diffundiert das Wasser in den Stoff hinein, um dort als Papierfeuchte eingelagert zu werden, bis das Gleichgewicht (siehe Abbildung 5) erreicht ist. Da aber die ohnehin geringen Diffusionskoeffizienten in den Flüssigkeiten [41] (bzw. in der mit den Flüssigkeiten imprägnierten Zellulose) mit sinkender Temperatur auch weiter abnehmen, ist anzunehmen, dass es, bei einer Freiwerdung von Wasser, erst zu einer Anlagerung und damit einer Konzentrationserhöhung an der Papieroberfläche kommt, die erst nach und nach durch einen Weitertransport der Wassermoleküle ins Innere der Zellulose abnimmt. Nun stellt sich aus Anwendersicht die Frage, inwieweit dies im Fall einer Transformatorabschaltung einer Estereinheit bei tiefen Umgebungstemperaturen zu einer Herabsetzung der elektrischen Festigkeit einer im ungünstigsten Fall tangential belasteten Zelluloseoberfläche führen kann.

Das Gasbildungsverhalten der Flüssigkeiten lässt sich theoretisch nur ungenau voraussagen, es muss empirisch ermittelt werden. Aus den Inhaltsstoffen und bisherigen Untersuchungen lassen sich nur grobe Abschätzungen treffen.

Da alle Flüssigkeiten im Wesentlichen aus Kohlenwasserstoffen aufgebaut sind, müssen auch die Zersetzungsprodukte aus denselben Bestandteilen zusammengesetzt sein. Als Gase dürfen daher auch bei den Estern die Alkane der niederwertigen Kohlenwasserstoffe Methan, Ethan, Propan und Butan (mit deren Alkenen und Alkinen) sowie freier Wasserstoff und die Zellulosezersetzungsprodukte Kohlenmonoxid und Kohlendioxid erwartet werden. Zwar darf ein erhöhter Anstieg von Ethin und Ethen aufgrund der kurzzeitig hohen Temperaturen im Lichtbogen erwartet werden (siehe Kapitel 2.2.2, 2.3.2 und 2.4.2), die große Anzahl verschiedener Inhaltsstoffe erschwert jedoch hier, wie auch bei der Durchschlagspannung, die Möglichkeit einer Modellbildung.

Unter anderem ändern sich zwei wesentliche Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten sehr stark mit der Temperatur: die Viskosität und die Wasseraufnahmefähigkeit (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Das Ansteigen der Viskosität mit sinkender Temperatur führt einerseits, wie oben beschrieben, zu einer Verminderung der Kühlung aufgrund der geringeren Fließfähigkeit.

Andererseits führt es auch zu einer Verringerung des Diffusionskoeffizienten, und damit zu einer Verzögerung des Stofftransportes, zum Beispiel für Wasser, in der Flüssigkeit. Da die Feuchtigkeit bei Temperaturänderungen zu einem Austausch zwischen Zellulose und Isolierflüssigkeit tendiert, ist bei einer Abkühlung von einem solchen Transport, selbst wenn die Flüssigkeit nicht feuchtegesättigt ist, auszugehen. Die Behinderung der Molekülbewegung an der Zelluloseoberfläche und innerhalb der Zellulose hingegen kann, wie oben erwähnt, zu einer oberflächlichen Konzentrationserhöhung führen.

Gleichzeitig sinkt das Wasseraufnahmevermögen der Flüssigkeiten mit der Temperatur ab. Das bedeutet, auch bei nicht feuchtegesättigten Flüssigkeiten, ein erhöhtes Freiwerden von Wassermolekülen im Isoliermedium, die wiederum dazu tendieren, sich an der nächstgelegenen Oberfläche anzulagern.

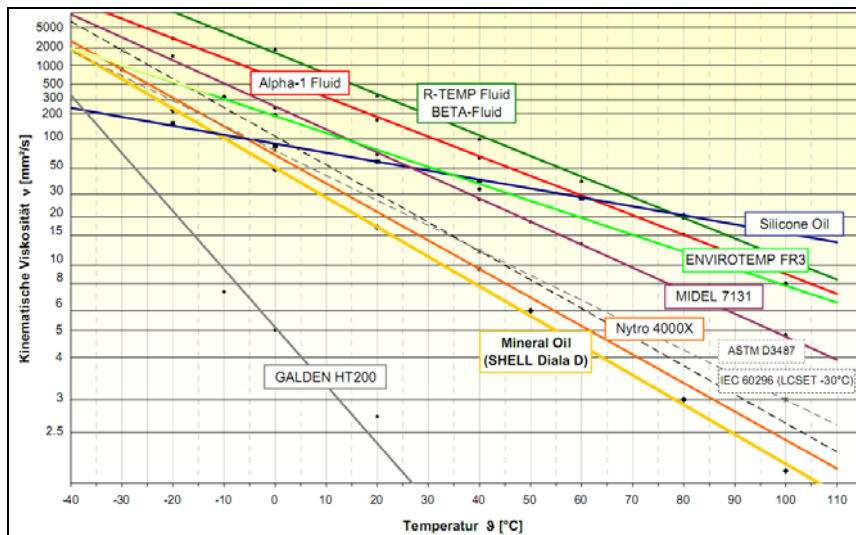


Abbildung 4: Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität verschiedener Isolierflüssigkeiten [29]

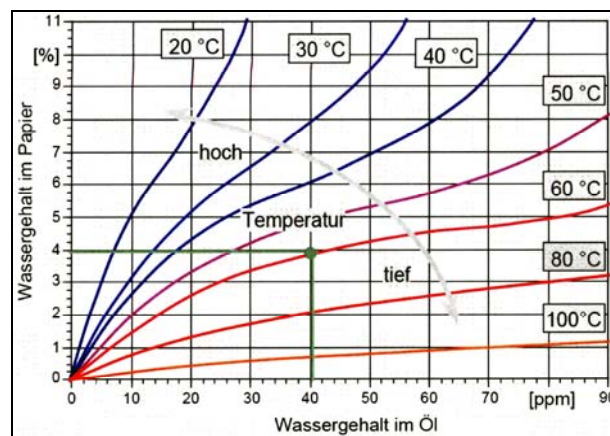


Abbildung 5: Darstellung des Feuchtigkeitsgleichgewichtes zwischen Mineralöl und Zellulose [58]

2.1.2 Gasbildung

Da das Öl-Board-Isoliersystem einerseits aus Polymere verschiedener Kohlenwasserstoffe beinhaltendem Isolieröl und andererseits aus Polymere verschiedener Kohlehydraten beinhaltender Zellulose besteht, werden durch Einwirkung verschiedener Energien Fragmente oder deren Bestandteile abgespalten. Da Flüssigkeiten Bindungen mit anderen Energien beinhalten als die Zellulose, wird deren Gasungsverhalten hier getrennt behandelt.

In der vorliegenden Arbeit wurden die in Tabelle 2 angeführten Gase untersucht [47]

Tabelle 2: Namen und chemische Symbole der in dieser Arbeit analysierten Gase:

Name	Symbol
Stickstoff	N ₂
Sauerstoff	O ₂
Wasserstoff	H ₂
Kohlenmonoxid	CO
Kohlendioxid	CO ₂
Methan	CH ₄
Ethan	C ₂ H ₆
Ethen (Äthylen)	C ₂ H ₄
Ethin (Acetylen)	C ₂ H ₂
Propan	C ₃ H ₈
Propen	C ₃ H ₆

Bindungsarten und -energien

Verschiedene Bindungsarten der Atome in den Molekülen (einfache Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen, einfache, doppelte und dreifache Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen) benötigen verschieden hohe Energien um gespalten zu werden.

Die Bindungsenergie wird in kJ/Mol angegeben. Mit dieser angegebenen Energie können also $6,022 \cdot 10^{23}$ Einzelbindungen aufgespalten werden. In Tabelle 3 sind die Werte der Energien, der in Mineralöl und den Estern vorkommenden Bindungen, zusammengestellt. Die Angaben können aufgrund äußerer Einflüsse auf die Werte nur in Bereichen angegeben werden.

Tabelle 3: Energien der in Mineralöl und Estern vorkommenden Bindungen [57]:

Bindung	Energie in kJ/Mol
C-H	400 - 415
C-C	345 - 355
C=C	610 - 630
C≡C	835
C-O	355 - 380
C=O	724 - 757
O-H	460 - 464

2.2 Mineralöl

Mineralöle sind die in der Praxis mit Abstand am häufigsten eingesetzten Isolierflüssigkeiten. Sie sind grundsätzlich für beinahe jeden Isolierzweck verwendbar und dementsprechend häufig in Transformatoren, in imprägnierten Ölkabeln, Kondensatoren, Wandlern und Durchführungen eingesetzt. Die Hauptanwendung liegt jedoch bei den Transformatoren, weswegen sie auch als „Transformatoröle“ bezeichnet werden [28].

Als Mischdielektrikum in Kombination mit Zellulose ist Mineralöl ein in Jahrzehnten im Dauereinsatz erprobter, elektrisch hochfester Hochspannungsisolator [20].

Da durch den jahrelangen Einsatz des Mineralöls die Eigenschaften bestens bekannt sind, wurde es als Referenz für die durchgeführten Untersuchungen verwendet. Es kam die Sorte Nytro 4000 X der Herstellerfirma NYNAS zum Einsatz. Es wurde durch eine Vakuum- und Wärmebehandlung zur Trocknung und Entgasung sowie durch eine Filterung aufbereitet.

Hier sind nochmals kurz die Herstellerangaben der wichtigsten Kenndaten zusammengefasst: Die Durchschlagspannung nach IEC 60156 ist mit >70 kV bei einem Elektrodenabstand von 2,5 mm angegeben und der Verlustfaktor (IEC 60247) mit $<5 \cdot 10^{-3}$. Der Brennpunkt ist mit mindestens 135 °C angegeben. Die Dielektrizitätszahl ϵ_r beträgt 2,2 bei 25 °C und der Durchgangswiderstand beträgt nach IEC 60247 400 GΩm.

2.2.1 Zusammensetzung und Herstellung

Mineralöl besteht, abgesehen von Verunreinigungen wie Schwefel o.Ä., grundsätzlich aus vier verschiedenen Kohlenwasserstoffgruppen: Paraffinen, Naphthenen, Aromaten und Olefinen (siehe Abbildung 6). Paraffine (oder auch Alkane) sind doppelbindungsfreie Kettenmoleküle, wobei sie, wenn sie Verzweigungen besitzen, „Iso-Paraffine“ genannt werden. Die linearen Typen dieser Moleküle sind auch als Wachse bekannt. Bei Kälte wird ihr freies Fließen beeinträchtigt, daher eignen sie sich nicht für Isolierflüssigkeiten für Anwendungen bei tiefen Temperaturen. Weiters besitzen sie die geringste thermische Stabilität und nur geringes Wasser- und Feststofflösungsvermögen und tragen daher zur Verschlammung bei.

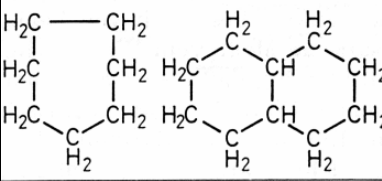
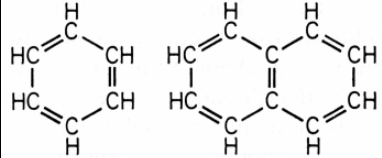
$\dots\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2\dots$	Paraffine (unverzweigt)	gesättigte Kohlenwasserstoffe
$\begin{array}{c} \dots\text{CH}_2 \\ \\ \dots\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2\dots \\ \qquad \qquad \\ \text{CH}-\text{CH}_2\dots \\ \\ \dots\text{CH}_2 \end{array}$	Iso-Paraffine (verzweigt)	
	Naphthene (Cyclo-Paraffine)	ungesättigte Kohlenwasserstoffe
	Aromate	
$\begin{array}{c} \dots\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}-\text{CH}_2\dots \\ \\ \text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\dots\text{CH}_2 \\ \qquad \qquad \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2 \end{array}$	Olefine	

Abbildung 6: Darstellung der Molekülstrukturen von Kohlenwasserstoffen im Mineralöl [29]

Zweiter Hauptbestandteil sind die Naphthene, auch Cyclo-Paraffine oder Cyclo-Alkane genannt. Es handelt sich dabei um ringförmige Kohlenwasserstoffe ohne Doppelbindungen. Sie besitzen wesentlich bessere Tieftemperatureigenschaften und besseres Stofflösungsvermögen.

Aromaten hingegen sind ringförmige Moleküle mit Doppelbindungen, wobei sie als charakteristisches Merkmal einen Ring aus sechs Kohlenstoffatomen mit abwechselnden Doppel- und Einfachbindungen besitzen.

Monocyclische Aromaten haben an sich brauchbare Eigenschaften, besonders was die Gaslösungsfähigkeit und oxidationsstabilisierende Wirkung angeht, jedoch ist die Alterungsbeständigkeit dieser Moleküle sehr begrenzt. Sie werden vermehrt in Kondensatoren eingesetzt, wo ihre Gaslösungsfähigkeit ausgenutzt wird, nicht jedoch in Transformatoren.

Polycyclische Aromaten sind oftmals gesundheitsschädlich (krebserregend) und haben unter elektrischer Belastung negative Auswirkungen, besonders bei Stoßspannung setzen sie die elektrische Festigkeit herab und sie besitzen bei Strömung Aufladungsneigung. Diese Aromaten werden daher bereits im Produktionsprozess der Isolierflüssigkeit, soweit es möglich ist, entzogen.

Als vierter Bestandteil seien die Olefine erwähnt. Grundsätzlich sind sie Bestandteile der Gruppe der Paraffine, sie besitzen jedoch Doppelbindungen und sind damit teilweise ungesättigt. Das macht sie chemisch angreifbar und anfällig gegenüber Alterung und Oxidation. Moderne Isolieröle enthalten nur sehr geringe Mengen an Olefinen.

Der tatsächliche Gehalt dieser Komponenten variiert je nach Zusammensetzung des Rohöls und Art des Raffinationsprozesses (siehe Abbildung 7). Je nachdem, welche Bestandteilgruppe den Hauptanteil ausmacht, werden die Flüssigkeiten unterschiedlich bezeichnet [30][20].

- 42-50 % Paraffinanteil: naphthenische Öle
- 50-56 % Paraffinanteil: Zwischenöle
- 56-65 % Paraffinanteil: paraffinische Öle

Typ	Anteil
n-Alkane Gewichts %	<0.05-15%
C _P (paraffingebundener Kohlenstoff) durch IR-Methode	42-65% *
C _N (naphtegebundener Kohlenstoff) durch IR-Methode	Differenz zu 100%
C _A (aromatgebundener Kohlenstoff) durch IR-Methode	14 - 25%
PAK HPLC%	>2 **
Schwefel Gewichts %	1.0-2.0
Stickstoff ppm	70-600
Sauerstoff als Carbonsäure, in mgKOH/g	0.05-2.0

Abbildung 7: Der Gehalt an unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen nach der Raffination [30]

2.2.1.1 *Herstellung*

Auf seinem Weg vom Rohöl zum einsatzbereiten Isolieröl durchläuft Mineralöl, grob gesagt, einen fünfstufigen Prozess. Zuerst wird durch fraktionierte Destillation bis maximal 350 °C Bitumen abgeschieden und eine Trennung nach den verschiedenen Siedepunkten durchgeführt.

Danach wird durch Abkühlung auf bis zu -30 °C oder Pourpoint-Erniedrigung durch Beigabe von Zusätzen das eventuell enthaltene Wachs abgeschieden. Als dritter Schritt wird durch Extraktion mit einem Lösungsmittel (z.B. SO₂) der Anteil von unerwünschten polyzyklischen Aromaten (PAK's) verringert.

Als vorletzter Schritt der Herstellung wird beim sogenannten Hydrotreating durch Zugabe von Wasserstoff unter hohem Druck eine „Veredelung“ weiterer unerwünschter, aber nicht entfernbarer Anteile durchgeführt. Dadurch werden sie in „erwünschte“ Stoffe umgewandelt. Beispielsweise polare Anteile werden durch diesen Prozeßschritt in nicht polare übergeführt und stellen damit aus elektrischer Sicht kein Problem mehr dar [30].

Zum Schluss erfolgt noch ein „finishing“-Prozess, in welchem das Öl noch aufbereitet wird und eventuelle Additive beigefügt werden. Als Additive kommen Oxidationsinhibitoren und Passivatoren zum Einsatz. Inhibitoren wie 2,6 Di-tertiär-butyl-phenol-para-cresol (DBPC) werden verwendet, um die Alterungsbeständigkeit

durch Blockierung reaktionsfähiger Radikale zu erhöhen, Passivatoren dienen dazu, das Kupfer (und damit die Zellulose) im Transformator durch, wie der Name schon sagt, Passivierung gegen beispielsweise korrosiven Schwefel zu schützen [31][20].

Die Aufbereitung (siehe Abbildung 8) hat eine Reinigung des Mineralöls von Partikeln, Wasser und gelösten Gasen zum Ziel. Dies geschieht einerseits durch eine Grobfiltration mit etwa 100 μm Porenweite und eine Feinfiltration mit 2-10 μm Porenweite. Zur Trocknung und Entgasung wird das Öl auf ca. 60 °C erwärmt und in einem Vakuumprozess dünnflüssig auf eine große Oberfläche verteilt, auf welcher ihm gelöste Gase und Wasserdampf entzogen werden. Nach diesem Herstellungs- und Aufbereitungsprozess ist das Öl betriebsfähig und kann gefüllt werden. [28]

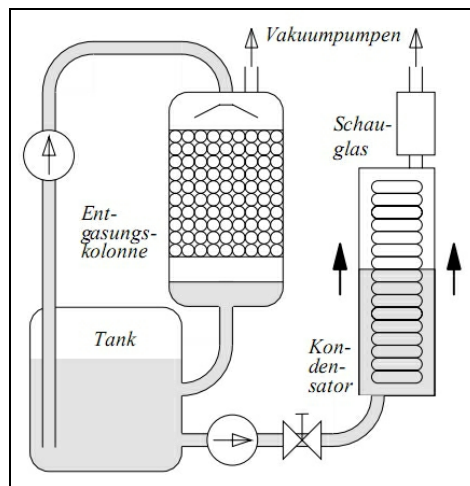


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Ölaufbereitungsprozesses mit Entgasung bzw. Entfeuchtung unter Vakuum [28]

2.2.2 Temperatur- und Gasbildungsverhalten von Mineralöl

Temperaturverhalten

Bei Mineralöl ist in der Literatur ein Brennpunkt von 150 – 175 °C angegeben. Wie bereits in der Einleitung ausgeführt, kommt es durch diesen niedrigen Wert zu massiven Problemen im Brandschutz.

Für Anwendungen bei tiefen Temperaturen gibt es aufgrund des, im Vergleich zu den natürlichen Esterflüssigkeiten, sehr niedrigen Pour-Points keine Einwände. Neues

Mineralöl kann bei Raumtemperatur (nach [56]) etwa 40 bis 50 ppm Wasser aufnehmen und dieser Wert sinkt mit der Temperatur. Bei -20 °C kann nur mehr die Hälfte davon, also 20 bis 25 ppm Wasser aufgenommen werden. Dementsprechend wenig Wasser wird daher bei einer Abkühlung frei.

Bei Mineralöl ist aufgrund der geringen absoluten Feuchtwerte der geringste Abfall der elektrischen Festigkeit zu erwarten. Auch hat die Transformatorpraxis gezeigt, dass es beim Kaltstart in Regionen mit niedrigen Außentemperaturen zu keinen Problemen kommt.

Um hier Veränderungen zu erreichen, ist es sehr wahrscheinlich notwendig, mit wesentlich höheren relativen Feuchtwerten, als in der Praxis üblich, (also über 90 %) zu arbeiten und sogar dann kann nicht von einer sicheren Auswirkung ausgegangen werden.

Es wurde daher für die hier durchgeführten Untersuchungen versucht, Mineralöl mit für die Transformatorpraxis eher hohen Feuchtigkeitswerten (5 bis 14 ppm, siehe Tabelle 20 OBEN) zu verwenden, um hier einen Worst Case der Referenz zu simulieren.

Gasbildungsverhalten

Mineralöle bestehen aus Gruppen von CH_3 -, CH_2 - und CH -. Diese Gruppen sind durch C-C Bindungen miteinander verbunden. Durch mehr oder minder starke, hauptsächlich thermische Energieeinwirkung werden solche Gruppen oder Fragmente davon abgespalten.

Diese Fragmente können sein: CH_3 , CH_2 , CH , C , oder H . Sie sind jedoch äußerst unbeständig und rekombinieren sofort wieder zu Gasmolekülen, wie H-H (Wasserstoff, H_2), $\text{CH}_3\text{-H}$ (Methan, CH_4), $\text{CH}_3\text{-CH}_3$ (Ethan, C_2H_6), $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ (Ethen/Äthylen, C_2H_4) oder $\text{CH}\equiv\text{CH}$ (Ethin/Acetylen, C_2H_2). Seltener werden Kohlenwasserstoffgase mit C_3 und C_4 Gruppen oder noch längerkettige Kohlenwasserstoffe (z.B. X-Wachs) gebildet.

Die Gase lösen sich in Öl oder sammeln sich als freie Gase (Buchholzrelais) und können mittels DGA (Dissolved Gas Analysis bzw. Gas-in-Öl-Analyse) in Qualität und Quantität bestimmt werden (siehe auch Kapitel 4.3).

Je höher die Bindungsenergien der zu spaltenden und zu rekombinierenden Fragmente sind, desto höher ist auch die notwendige, von außen zugeführte

Wärmeenergie, um diese zu trennen. Daher kann man aus den gemessenen Gasen auf die Art des Fehlers rückschließen.

Wasserstoff entsteht dabei bei niedrigster Energie, auch bereits bei Teilentladungen ohne Lichtbogen. Ethen wird vor Ethan und Methan bei Temperaturen um 500 °C gebildet. Ethin hingegen erfordert kurzzeitig höhere Temperaturen (800 bis 1200 °C) und ein rasches Abkühlen, um sich als stabiles Rekombinationsprodukt zu sammeln. Es ist daher ein klarer Indikator für einen Lichtbogen, der in seinem Ionenkanal Temperaturen von mehreren tausend °C erreicht, während er von Öl mit regulärer Temperatur umgeben ist, das den Bereich des Kanals nach dem Zusammenbrechen des Lichtbogens rasch kühlt. CO und CO₂ werden durch Oxidation gebildet, allerdings ist das Entstehen von relevanten Mengen nur in größeren Alterungszeiträumen möglich. [47]

Die grundsätzliche Struktur von Estern unterscheidet sich im Vergleich dazu nur insofern, dass mehrere zusätzliche CO- und OH-Gruppen aus den Fettsäuren in den Molekülen gebunden sind und ebenfalls durch thermische Energieeinwirkung abgespalten werden können.

Daraus ergibt sich die Vermutung, dass bei Estern als Isolierflüssigkeiten zwar einerseits ähnliche Abspaltungs- und Rekombinationsprozesse der Kohlenwasserstoffe stattfinden und damit auch ähnliche Gase produziert werden, allerdings könnten andererseits auch bei reinen Ölfehlern vermehrt Kohlenstoffoxidverbindungen auftreten. Diese würden nach den gängigen DGA-Auswertemethoden (beschrieben in [60]) allerdings als Papierfehler interpretiert werden. Es könnte also zu Vortäuschung bzw. Verschleierung von Zellulosezerersetzung kommen.

2.3 Synthetische Ester

Synthetische Ester sind künstlich hergestellte Esterflüssigkeiten. Ester bilden eine Stoffgruppe organischer Verbindungen, die dadurch entstehen, wenn eine Sauerstoffsäure mit einem Alkohol unter Abspaltung von Wasser reagiert. (siehe Abbildung 10) Die physikalischen Eigenschaften des erzeugten Esters lassen sich

durch die Wahl der Ausgangsmaterialien sehr stark verändern. So sind zum Beispiel kurzkettige Carbonsäureester noch sehr gut wasserlöslich, wohingegen sich alle Ester mit mehr als vier Kohlenstoffatomen bereits vollkommen hydrophob verhalten [12], [53].

Aus der Sicht des Elektrotechnikers bieten Carbonsäureester Merkmale, die sie als Isolieröle qualifizieren. Die elektrische Festigkeit und die dielektrischen Kennwerte sind sehr gut, die Wärmeleitfähigkeit ist hoch, der Pourpoint ist niedrig und sie sind leicht und vollständig biologisch abbaubar. Der hohe Flamm- und Brennpunkt sowie die gute Abbaubarkeit stellen die größten Vorteile gegenüber Mineralöl dar [29].

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde Midel 7131 der Firma M&I verwendet. Dabei handelt es sich um einen Pentaerythrit-Tetracarbonsäureester. Er wurde durch eine Vakuum- und Wärmebehandlung zur Trocknung und Entgasung sowie durch eine Filterung aufbereitet.

Hier sind nochmals kurz die Herstellerangaben der wichtigsten Kenndaten zusammengefasst: Die Durchschlagspannung (nach IEC 60156) ist mit >75 kV bei einem Elektrodenabstand von 2,5 mm angegeben und der Verlustfaktor (nach IEC 60247) mit $<8 \cdot 10^{-3}$. Der Flammpunkt ist mit 260°C angegeben. Die Dielektrizitätszahl ϵ_r beträgt 3,2 bei 25 °C und der Durchgangswiderstand (nach IEC 60247) beträgt für Gleichspannung >30 GΩm [5].

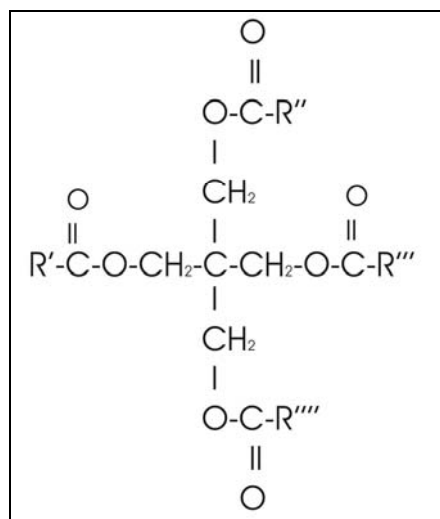


Abbildung 9: Die Strukturformel des Pentaerythrit-Tetracarbonsäureesters Midel 7131 von M&I mit der grundsätzlichen Vierfachstruktur und den Säureresten (R' bis R''') [12]

2.3.1 Zusammensetzung und Herstellung

Aus elektrischer und umwelttechnischer Sicht hat sich der Pentaerythrit-tetracarbonsäureester, der 1982 von BASF lizenziert wurde und seither von M&I als Midel 7131 produziert wird, bereits in einer Vielzahl von Verteiltransformatoren bewährt [4], [54].

Der Ester besteht aus Pentaerythriten (polyfunktionelle Alkohole), die mit Carbonsäuren sechster, siebter oder achter Wertigkeit verestert werden [29]. Die Strukturformel ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Herstellung eines Esters (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11) erfolgt durch Beigabe eines Alkohols in eine Carbonsäure als Gleichgewichtsreaktion unter Abspaltung von Wasser.

Entfernt man das Wasser, so verschiebt sich das Gleichgewicht zugunsten des Esters [55]. Für die Anwendung als Isolierflüssigkeit ist höchstmögliche Reinheit unerlässlich. Darum ist es notwendig, dass die Ausgangsstoffe bereits nur ein Minimum an Verunreinigungen beinhalten, da sich diese sonst bei der Veresterung anlagern und damit den Molekülen unerwünschte Eigenschaften, wie beispielsweise höhere Leitfähigkeit oder ein polares Erscheinungsbild, (und damit einen höheren Verlustfaktor) verleihen können.

Nach der Herstellung ist vor dem Befüllen auch bei den synthetischen Estern eine Aufbereitung mit Filterung und Entgasung bzw. Trocknung unter Vakuum notwendig.

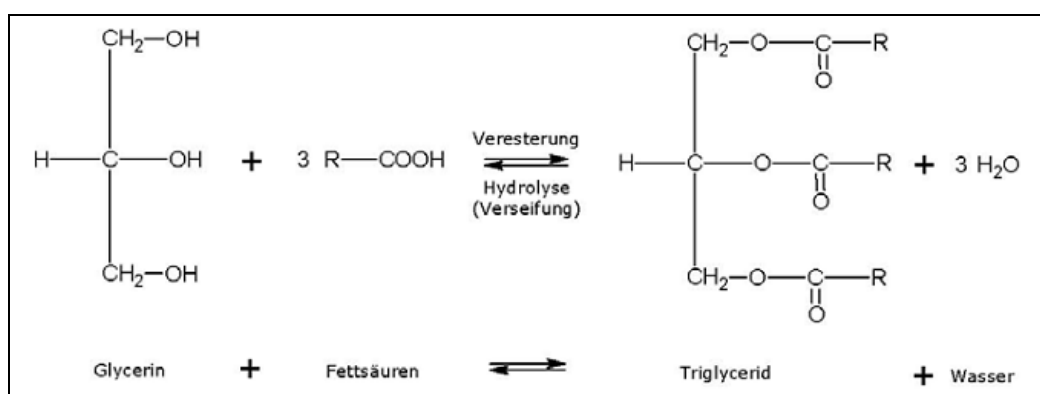


Abbildung 10: Reaktionsgleichung der Estersynthese am Beispiel von Rapsöl [52]

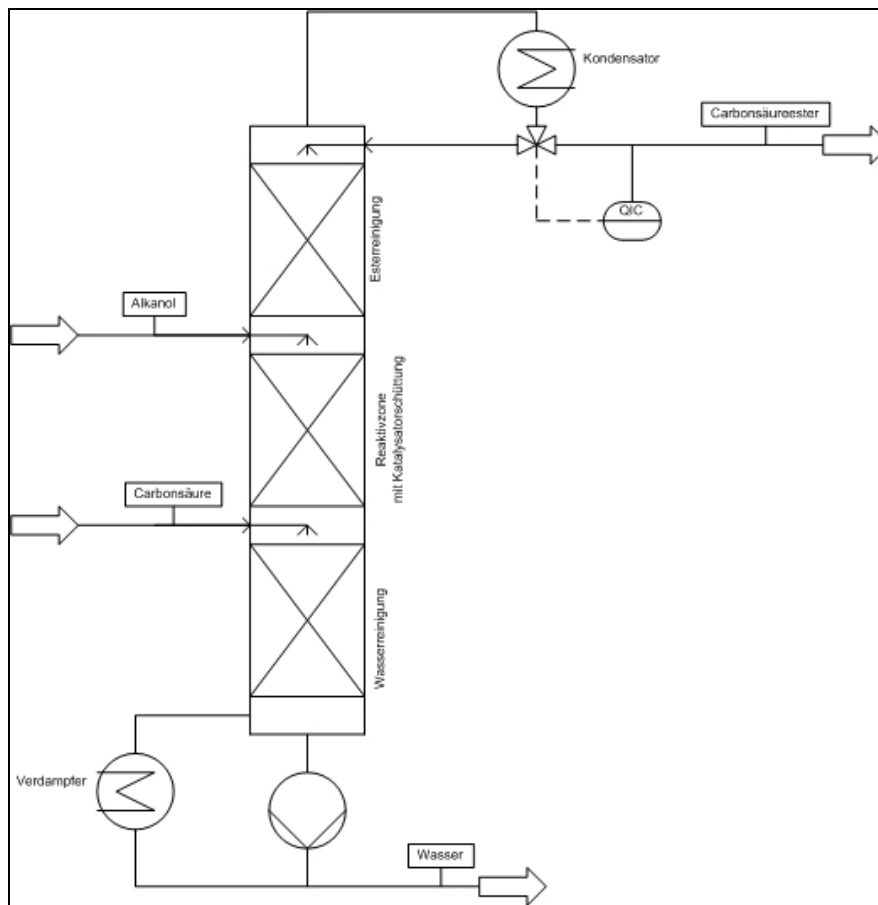


Abbildung 11: Reaktor zur Herstellung von Carbonsäureestern [55]

2.3.2 Temperatur- und Gasbildungsverhalten von synthetischen Estern

Temperaturverhalten

Sowohl der, im Vergleich zum Mineralöl, hohe Brennpunkt von 310 °C als auch der niedrige Pourpoint von -50 °C verleihen dem synthetischen Ester grundsätzlich gute Eigenschaften als Isolierflüssigkeit. Nachteilig ist die vergleichsweise hohe Viskosität (siehe Abbildung 4), die dem Medium bei niedrigen Temperaturen, aufgrund der geringen Fließfähigkeit, nur begrenzte Kühleigenschaften verleiht.

Das Durchschlagsverhalten der reinen Flüssigkeit ist von -25 °C bis +25 °C nur unwesentlich von der Temperatur sondern vielmehr von der Feuchtekonzentration abhängig [22]. Es ist allerdings anzunehmen, dass unter dem Miteinbezug von Zellulose in die Prüfanordnung, mit sinkender Temperatur sehr wohl eine

Verringerung der Durchschlagspannung auftreten wird. Dies ist mit der Tatsache zu begründen, dass beim Absenken der Temperatur Feuchtigkeit aus der Flüssigkeit heraus in die Zellulose abgegeben wird. Während der Abkühlung bildet sich an der Board-Oberfläche eine signifikant höhere Feuchtekonzentration, da das Wasser aufgrund der niedrigen Diffusionskonstante [41] erst einige Zeit benötigt, um weiter ins Innere der Zellulose vorzudringen und sich dort gleichmäßig zu verteilen.

Allerdings bleibt zu bedenken, dass die Sättigungsfeuchte des natürlichen Esters bei -25 °C noch immer bei über 1000 ppm angenommen werden darf [52] und es nur wahrscheinlich, aber nicht sicher ist, ob die Flüssigkeit bei einer Abkühlung auf eine solche Temperatur bei 10 % relativer Feuchte tatsächlich genug Wasser abgibt, um einen messbaren Effekt zu erzielen.

Gasbildungsverhalten

Aus den Strukturformeln des synthetischen Esters (Abbildung 9) ist erkennbar, dass dieser sich vom Mineralöl durch mehrere Punkte unterscheidet. Mineralöl besitzt nur geringste Mengen an gebundenem Sauerstoff, im Gegensatz dazu kommen beim Ester in jedem Molekül mehrere C-O Verbindungen vor.

Grundsätzlich ähnelt das Gasbildungsverhalten daher dem von Mineralöl, auch bei den Estern werden durch äußere Energieeinwirkungen die Ketten der Fettsäuren gespalten und es entstehen Fragmente, die sofort wieder zu stabilen Gasen rekombinieren (siehe auch 2.2.2). Allerdings sind die Fettsäureketten im Estermolekül wesentlich homogener und teilweise länger als in Mineralöl.

Das bedeutet für die Praxis, dass durch einen Lichtbogen eine Kette in viele, sehr instabile C-H Fragmente gesprengt wird, die sich dann rasch zu stabilem $\text{C}_2\text{H}=\text{C}_2\text{H}$ (Ethen) bzw. $\text{CH}\equiv\text{HC}$ (Ethin) verbinden.

Im Unterschied zu Mineralöl sind die Kohlenwasserstoffketten jedoch zu Triglyceridmolekülen verbunden. Eine Energieeinwirkung von außen hat also nicht nur die Möglichkeit, verschiedene Kohlenwasserstofffragmente abzuspalten, sondern auch CO und CO_2 zu erzeugen. Dafür muss erst die gesamte Kohlenwasserstoffgruppe, einzeln oder als gesamte Kette, und danach das C=O oder das O-C=O Fragment abgetrennt werden. Die Bindungsenergie einer C-H Bindung ist nur minimal stärker als die C-O Bindung. Damit ist es mit derselben Energiemenge, die benötigt wird, um von einer Kohlenwasserstoffkette ein

Wasserstoffatom abzuspalten, auch möglich eine gesamte Fettsäurekette von einem Estermolekül zu trennen. Auch bietet sich beim synthetischen Ester die Möglichkeit der Säurebildung und damit in weiterer Folge das Potential zur Zellulosezerstörung (siehe auch Kapitel 2.4.2).

2.4 Natürliche Ester

In dieser Arbeit wurde als natürlicher Ester Sojaöl verwendet. Es wurde vom Hersteller gereinigt, entgast und mit Farb- und Antioxidationsmitteln versetzt. Im Folgenden werden die in der Literaturrecherche gefundenen Ergebnisse, das Sojaöl betreffend, zusammengefasst.

Pflanzenöle bestehen hauptsächlich aus Triglyceridmolekülen mit drei veresterten Fettsäuren (siehe Abbildung 12). Welche Fettsäuren das sind, hängt von der jeweiligen Pflanze ab. Diese unterscheiden sich in der Kettenlänge und in ihrem Sättigungsgrad.

Sind in der gesamten Kette alle Valenzelektronen mit Wasserstoff besetzt und gibt es keine Doppelbindung zwischen zwei Kohlenstoffmolekülen, so spricht man von gesättigten Fettsäuren. Diese sind sehr oxidationsstabil, kommen aber in der Pflanze eher selten vor, sie erhöhen die Viskosität und verringern den Pourpoint. Stoffe mit hohem Anteil an gesättigten Fettsäuren sind bei Raumtemperatur fest (Fette).

Je nachdem wie viele Doppelbindungen vorkommen, nennt man diese einfach, doppelt oder mehrfach ungesättigt. Mit der Anzahl dieser Doppelbindungen sinken die Oxidationsstabilität, der Pourpoint und die Viskosität. In einem Isolieröl sollten so wenig mehrfach ungesättigte Fette vorkommen wie möglich, um ein positives Alterungsverhalten zu gewährleisten. Einerseits sinkt die elektrische Festigkeit, wenn Ketten an der Stelle ihrer Doppelbindungen aufbrechen und damit verkürzt werden und andererseits schädigen die übriggebliebenen Reste der Kette als Säuren die Zellulose und erhöhen die Depolymerisation.

Als Kompromiss zwischen Zähflüssigkeit und rascher Alterung trachtet man also danach, Pflanzenöle mit einem möglichst hohen Anteil an einfach oder doppelt ungesättigten Fettsäuren zu erhalten [51], [19].

2.4.1 Zusammensetzung und Herstellung von Sojaöl

Sojaöl (Oleum Sojae) wird durch Pressen oder Extraktion aus *Glycine max* (L.) Merr. (Fabaceae) gewonnen. Der Ursprung der Sojapflanze liegt in Südostasien, sie wurde in Südchina bereits um 1500 v. Chr. domestiziert. Die Pflanze gedeiht optimal im subtropischen Klima bei Temperaturen zwischen 25 °C und 32 °C und sie wird heute in den USA bereits industriell angebaut. Im Jahr 2003/04 hatte die Sojabohne mit geschätzten 201 Mio. Tonnen einen Anteil von über 58% der Weltölsaatzproduktion [33].

Die Hauptbestandteile von Sojaöl sind Linolsäure (über 50 %), Ölsäure (über 20 %) und Palmitinsäure (ca. 10 %). Weitere Bestandteile sind α -Linolensäure, Stearinsäure, Arachinsäure und Vaccensäure. Da es sich um ein gewachsenes Naturprodukt handelt, können die Zusammensetzungen variieren.

Von Interesse ist auch die Triglyceridzusammensetzung, die hauptsächlich aus LLL und OLL (je 20%) und PLL, LLLn, OOL, und POL (je ca. 10%) besteht, wobei O für Ölsäure, L für Linolsäure, Ln für Linolensäure und P für Palmitinsäure steht [33].

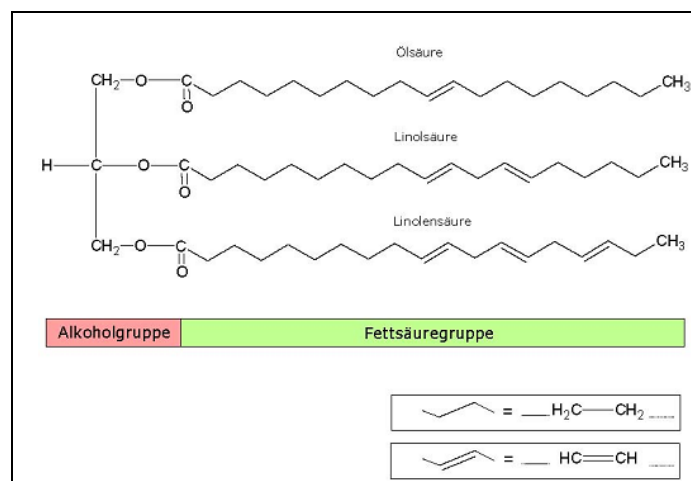


Abbildung 12: Aufbau eines Triglyceridmoleküls, hier in der OLLn-Konfiguration (Ölsäure, Linolsäure, Linolensäure), auch andere Kombinationen sind möglich [52]

Die Gewinnung des Öls beginnt bei der Auswahl des Saatgutes. Durch Züchtung und biotechnologische Verfahren ist es möglich, die Zusammensetzung des Öls sowohl im Fettsäureaufbau als auch in der Triglyceridkonfiguration so zu beeinflussen, dass möglichst wenig nachträgliche Veränderung notwendig ist.

Nach dem nun folgenden Anbau und der Ernte werden die Früchte gelagert und gepresst (siehe Abbildung 13). Anschließend ist es bei Früchten mit geringerem Ölgehalt (wie der Sojabohne) unbedingt notwendig, den Kuchen (fester Pressrückstand) zu extrahieren, um den Ölgehalt des Schrotes auf unter 2 % zu senken. Nur so sind ein ausreichender Ertrag und eine wirtschaftliche Ölgewinnung möglich [51].

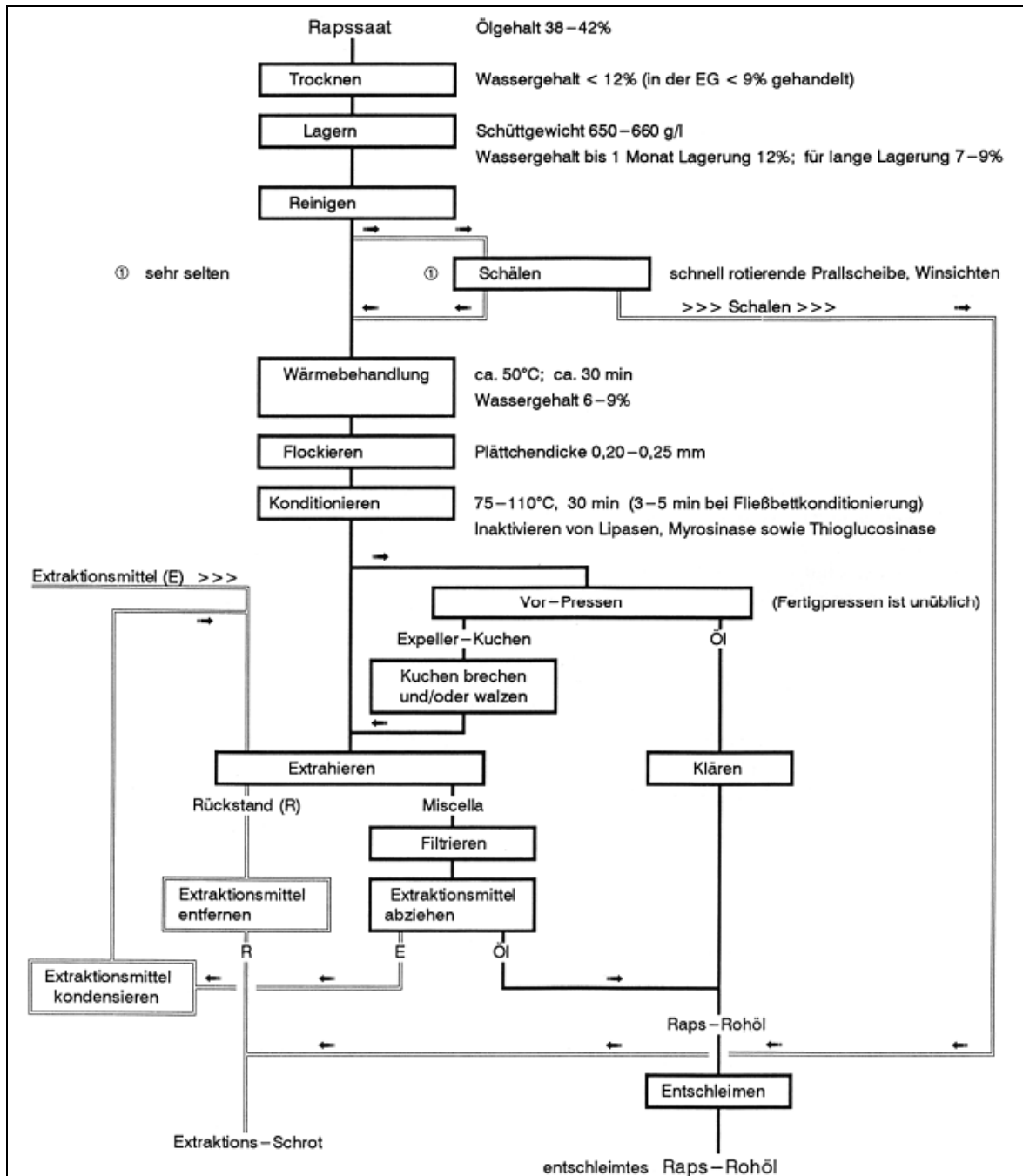


Abbildung 13: Gewinnung von Roh-Pflanzenölen am Beispiel von Rapsöl [51]

Danach erfolgt eine Raffination. In diesem Prozess werden unerwünschte Begleitstoffe entfernt (siehe Abbildung 14). Solche sind beispielsweise Metalle, freie Fettsäuren, Seifenreste und auch Reste von Pflanzenschutzmitteln [51].

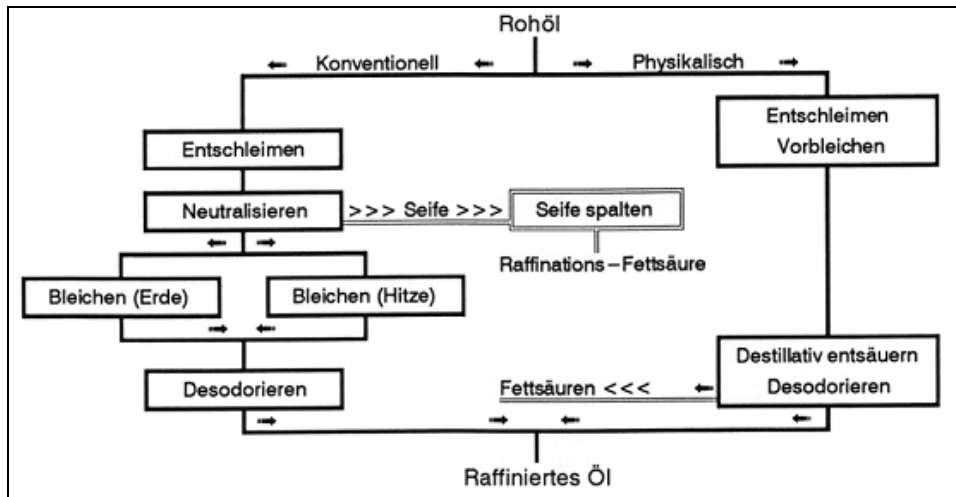


Abbildung 14: Blockdiagramm der Raffination von Pflanzenöl [51]

Um ein so vorbehandeltes Pflanzenöl zur elektrischen Isolation heranziehen zu können, bedarf es noch einer Fettmodifikation. Dies ist notwendig, da es sich um gewachsene, in den Zusammensetzungen schwankende Naturprodukte handelt und nicht alle Inhaltsstoffe dem Zweck der elektrischen Isolierung und der Alterungsstabilität dienlich sind. In den Modifikationsprozessen geht es allerdings hauptsächlich um das Verändern der einzelnen Triglyceridmoleküle, die Entfernung von unerwünschten Inhaltsstoffen fand bereits in den vorherigen Arbeitsschritten statt. Es kommen hauptsächlich die Modifikationsverfahren der Fraktionierung, der Umesterung und der Härtung zum Einsatz (siehe Abbildung 15) [51].

Bei der Fraktionierung werden Triglyceride unterschiedlicher Schmelzpunkte voneinander getrennt. Dabei wird der Pourpoint des Öls herabgesetzt, um es auch für tiefere Temperaturen einsetzbar zu machen [51].

Bei der Umesterung wird durch Zugabe eines Katalysators die Neuverteilung der Fettsäuren am Glycerin und damit eine weitere Veränderung der physikalischen Eigenschaften erreicht. Die Zusammensetzung der einzelnen Fettsäuren bleibt dabei

unangetastet. Somit ist es möglich, sich einer statistischen Gleichverteilung der Fettsäuren auf die Moleküle und damit einer homogeneren Flüssigkeit zu nähern.

Bei der Härtung kommt es hingegen sehr wohl zu einer chemischen Veränderung an den Fettsäuren selbst, genauer gesagt an der Anzahl der vorhandenen Doppelbindungen. Dies erhöht, wie eingangs erwähnt, die Oxidationsstabilität, erhöht jedoch auch den Pourpoint und die Viskosität. Es gilt, einen Kompromiss zu finden, bei dem so viele mehrfach ungesättigte Fettsäuren wie möglich gehärtet werden, ohne die Anzahl der einfach ungesättigten Komponenten stark herabzusetzen.

Abschließend werden noch Additive, wie Farbstoffe, Pourpoint-Erniedriger, Oxidationsinhibitoren oder Passivatoren beigelegt und nach einer letzten Aufbereitung (Filterung, Entfeuchtung, Entgasung) ist das Isolieröl verwendbar.

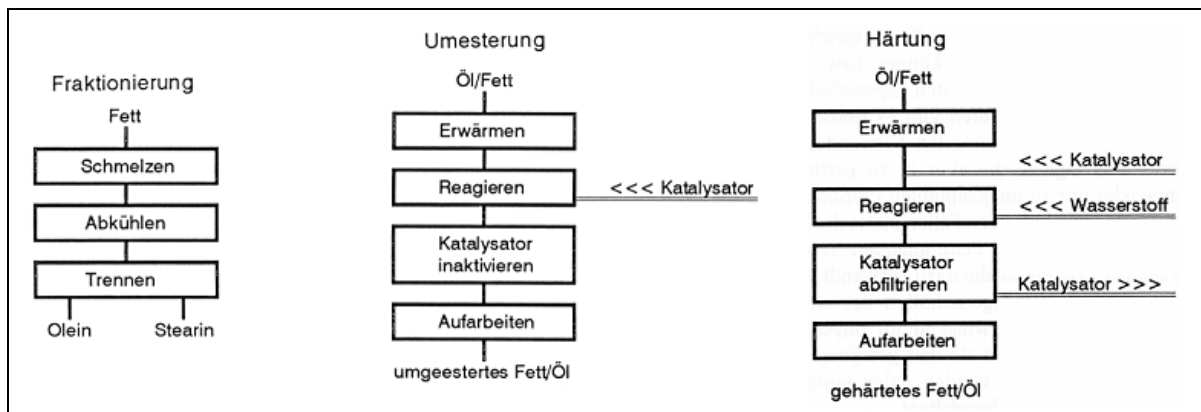


Abbildung 15: Die wichtigsten Verfahren zur Fettmodifizierung: Fraktionierung, Umesterung, Härtung [51]

2.4.2 Temperatur- und Gasbildungsverhalten von natürlichen Estern

Temperaturverhalten

Ein Flammpunkt von über 280 °C macht Sojaöl zu einer sehr brauchbaren Isolierflüssigkeit aus Sicht der Brandlast. Der Erstarrungspunkt wurde in Versuchen mit -21 °C ermittelt. Damit konnte dieser Ester nicht für die Versuche mit -25 °C herangezogen werden, der Einsatz bei -10 °C stellte jedoch kein Problem dar.

An sich gilt für das Feuchte- und Temperaturverhalten des natürlichen Esters Ähnliches wie beim synthetischen Ester. Ein Unterschied besteht jedoch in der

höheren Viskosität, diese hat eine noch niedrigere Diffusionszeitkonstante zur Folge. Daher gilt für den natürlichen Ester die Annahme, dass die Ausgleichsvorgänge noch langsamer vonstatten gehen und es in den 180 Minuten Dauer der Durchschlagsversuche inkl. Vorbereitung noch weniger zu einem Erreichen eines Gleichgewichts kommen kann. Eher darf aufgrund der Langsamkeit der Diffusion von einem „quasi-steady-state“ ausgegangen werden, da in dieser Versuchszeit voraussichtlich gar keine signifikanten Wassermengen, die an der Oberfläche des Papiers fehlen könnten, in die Zellulose eingelagert werden. Da der Feuchtesättigungsgrad beim natürlichen Ester laut [52] nur einige 100 ppm beträgt, sind messbare Auswirkungen einer raschen Abkühlung hier am wahrscheinlichsten.

Gasbildungsverhalten

Das Gasbildungsverhalten des natürlichen Esters ist dem des synthetischen Esters bzw. dem des Mineralöls ähnlich (siehe Kapitel 2.2.2 und 2.3.2). Es besteht also unter Energieeinwirkung auch die Möglichkeit H-C Untergruppen zu erzeugen und in der Strukturformel (siehe Abbildung 12) zeigen sich auch Chancen zur C-O Fragmentbildung.

Weiters bieten sich noch verschiedene Möglichkeiten der Produktion von Säuren, zum Beispiel Methansäure (siehe Abbildung 16). Säuren stellen im Gegensatz zu den gelösten reaktionsträgen Gasen allerdings ein Problem dar. Sie wirken sich stark negativ auf die Zellulosealterung aus und tragen zur Verringerung des DP-Wertes bei.

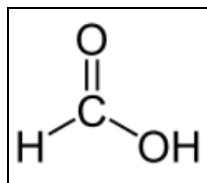


Abbildung 16: Darstellung der Strukturformel von Methansäure (Ameisensäure)

2.5 Zellulose

Da im realen Transformator immer eine Form von Zellulose verwendet wird, kann die zu prüfende Isolierflüssigkeit nicht getrennt davon untersucht werden, wenn praxisorientierte Ergebnisse gefordert sind. Die Zellulose erfüllt im Transformator

zum einen als tragendes Element konstruktive Eigenschaften, beispielsweise als Spulenträger und Stabilisierungselement. Im Fall eines Kurzschlusses ist die Zellulose dabei hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt.

Allerdings besitzt sie zum anderen noch weitere wichtige Eigenschaften. Imprägniert weist Zellulose eine höhere elektrische Festigkeit auf, als die Isolierflüssigkeit alleine. Die ölimprägnierten Zellulosefasern stellen durch ihre vielen eingeschlossenen Ölvolumina eine Vielzahl von Barrieren dar, die Faserbrückendurchschläge verhindern und Streamerentladungen unterbrechen. Es kommt nur zu stromstarken Teilentladungen und nicht zu vollständigen Durchschlägen.

Daher sind Boardbarrieren zur Unterstützung der Isolation in stark belasteten Bereichen, wie beispielsweise dem Wickelkopf, den hochspannungsseitigen Ausleitungen und dem Streuspalt zwischen Ober- und Unterspannungsseite unerlässlich (siehe Abbildung 18) [28], [34].

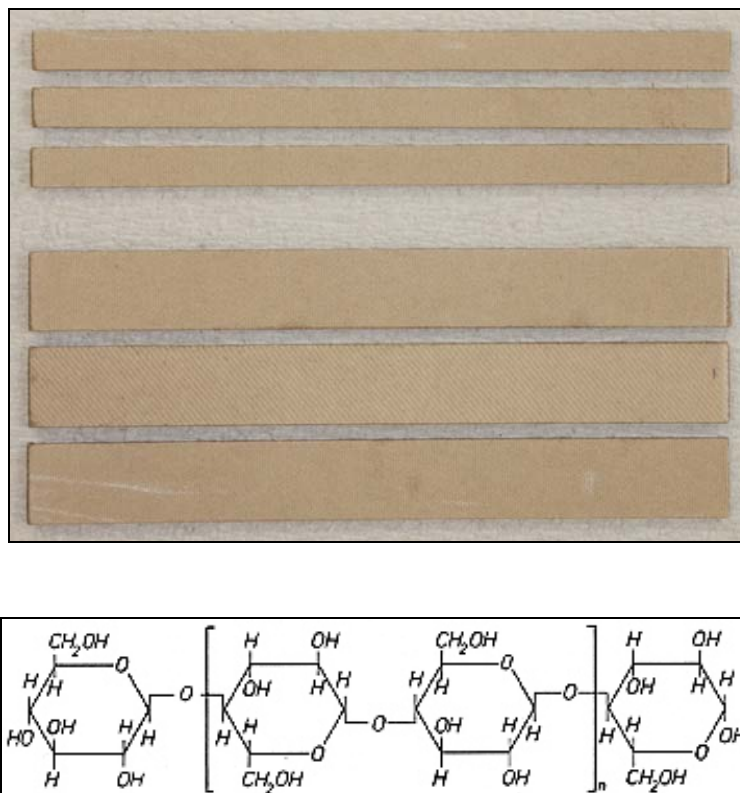


Abbildung 17: OBEN: Fotos der verwendeten 3mm dicken Leisten aus Transformerboard. UNTEN: Die Strukturformel von Zellulose [34]

2.5.1 Herstellung und Aufbau von Zellulose für Transformatoren

Im Transformator werden grundsätzlich zwei Arten von Zelluloseprodukten in der Isolation eingesetzt, das Papier und das Pressboard (oder auch Pressspan bzw. Blockspan). Während Papier nur zur Leiterisolierung ohne mechanische Beanspruchungen verwendet wird, kommen dem Pressboard auch tragende und stabilisierende Aufgaben zu.

Grundsätzlich stellt Pressspan ein dickes Isolierpapier höchster Qualität dar. Beide Faserprodukte werden aus demselben Grundbestandteil gefertigt, aus ungebleichter Sulfatzellulose, bestehend aus langkettigen Kohlehydratmakromolekülen, die durch intra- und intermolekulare Wasserstoffbrücken vernetzt sind.

Als Ausgangsmaterial kommt Holz von besonders langsam und dicht gewachsenen Bäumen zum Einsatz. Engringige Fichten und Kiefern, langsam gewachsen in kaltem Klima, beispielsweise aus Skandinavien oder Kanada, erfüllen diese Bedingungen und damit ist sichergestellt, dass auch hohen mechanischen Beanspruchungen sicher Stand gehalten wird [34].

Wichtigster Bestandteil ist vor allem die α -Zellulose. Sie besteht aus kettenförmig polymerisierter β -Zellulose und vereint eine Vielzahl dieser „Bauteile“ zu einem Faser-Makromolekül [siehe Abbildung 17]. Die mittlere tatsächliche Anzahl von β -Zelluloseeinheiten in der Faser wird durch den DP-Wert (Degree of Polymerisation) angegeben und beträgt bei unverarbeitetem Holz bis zu 15 000. Bei der Verarbeitung zu Papier und Pressspan verringert sich dieser auf einen Neuwert, etwa 2000, welcher sich im Laufe des Transformatorbetriebs hauptsächlich durch Feuchtigkeitseinfluss kontinuierlich verringert. Ist ein Wert von 200 erreicht, bedeutet dies einen signifikanten Verlust von mechanischer Festigkeit und das Ende der Lebensdauer der Einheit.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Papiers und des Pressspans ist die Hemi-Zellulose. Sie besteht aus Makromolekülen aus Kohlehydraten, welche einen Polymerisationsgrad kleiner als 200 aufweisen. Kommt sie beschränkter Menge vor, (< 10%) so trägt sie durch Erleichterung der Wasserstoffbrückenbildung wesentlich zur Erhöhung der Festigkeit bei. Wenn der Anteil der Hemi-Zellulose diese Marke jedoch übersteigt, so verringert sich die mechanische Festigkeit des Gesamtmaterials wieder.

Die tatsächliche Belastbarkeit des Endproduktes hängt ausschließlich von den intermolekularen Wasserstoffbrücken zwischen benachbarten Fasern ab. Diese Brücken bilden die eigentlichen Schwachstellen und brechen bei Überlastung, die Fasern selbst reißen nicht ab, da ihre Belastungsgrenze wesentlich höher liegt als die der intermolekularen Brücken [34].

Der Herstellungsprozess setzt sich aus den wesentlichen Schritten der Fasertrennung, der Reinigung, der Lagenbildung, Trocknung und Verpressung zusammen. Am Beginn der Verarbeitung gilt es, die Fasern so gründlich aber schonend wie möglich voneinander zu trennen, ohne dem Polymerisationsgrad zu stark zuzusetzen. Das gilt auch für alle weiteren Produktionsschritte.

Nach dem Trennen werden in der Reinigung weitere Bestandteile des Holzes, wie zum Beispiel Lignin, von den Fasern getrennt und ausgewaschen. Danach werden, so gut wie möglich, alle Fasern mit geringem DP-Wert entfernt.

Nun beginnt der wichtige Prozess der Lagenbildung. Papier besteht aus vielen einzelnen Lagen (etwa 30 pro mm Dicke des Pressboards). Je dünner die Lagen, desto höher die Qualität des Papiers bzw. des Pressboards. Diese Lagen werden nun in mehreren Stufen getrocknet und gepresst. Dabei kommt es zur Brückenbildung zwischen den Makromolekülen und die eigentliche Struktur des Boards bildet sich aus. Pressboard wird bis 5 mm Dicke hergestellt. Für dickere Elemente werden mehrere Lagen Pressboard mit nicht wässrigem Polyesterharz zum sogenannten Blockspan verklebt [34].



Abbildung 18: Aufbau der Isolierung eines Leistungstransformators [20]

2.5.2 Gasbildungsverhalten von Zellulose

Der Vorgang der Gasbildung in der Zellulose ist ähnlich der in den Flüssigkeiten, es kommt auch hier durch thermische Energieeinwirkung zur Abspaltung von Bausteinen der Polymerketten. Die Bindungsenergien der C-O-Bindung zwischen den Anhydroglucoseringen ist dabei viel geringer als die C-C-Bindungen des Öls oder der Ringe selbst (siehe Tabelle 3).

Die Abspaltungen finden also bereits bei wesentlich geringeren Temperaturen statt (ab ca. 105 °C). Dabei werden einerseits die langkettigen Makromoleküle in kürzere Teile gebrochen und der DP Wert sinkt ab, andererseits entstehen dabei die Gase CO und CO₂ [47].

2.6 Das Öl - Zellulose - Isoliersystem

Das Zusammenspiel von Öl und Papier betrifft viele elektrische und chemische Prozesse. Wie unter 2.4.1 bereits beschrieben, ist die elektrische Festigkeit eines Mischdielektrikums aus Öl und Board höher als bei der Isolierflüssigkeit alleine.

Grundsätzlich besteht eine Öl-Zellulose-Isolierung aus einer Kombination von einer elektrisch isolierenden Flüssigkeit (Mineralöl, Esterflüssigkeiten oder Silikonöle) mit verschiedenen Faserstoffzeugnissen (Pressboard bzw. Pressspan und Papier). Wobei das mechanisch belastbare Pressboard eingesetzt wird, um sowohl mechanisch belastende tragende Aufgaben, als auch elektrisch isolierende Funktionen zu erfüllen. Das (Weich-)Papier hingegen wird nur für Isolationszwecke (Leiterisolierungen) verwendet [28][20].

Abgesehen von der hinlänglich bekannten elektrischen Isolation hat das Öl-Zellulose-Isolationssystem noch eine weitere wichtige Aufgabe, die Abfuhr der durch die Verluste entstehenden Wärme.

Einerseits ist es wichtig, die beim konstanten Betrieb der Einheit an Leitern und Kern entstehende Abwärme abzuführen, um dauerhaft die Betriebstemperatur im zulässigen Bereich zu halten.

Andererseits muss die Wärmekapazität der Isolierung und des Kühlmediums Öl auch in der Lage sein, kurzfristig größere Wärmemengen (wie sie z.B. bei Überlast entstehen) aufzunehmen und abzutransportieren, ohne dabei Schaden zu nehmen

[28], [20]. Hier kommt auch die bereits oben erwähnte Problematik der höheren Viskosität oder gar der Möglichkeit der Erstarrung von Esterflüssigkeiten bei niedrigen Temperaturen zum Tragen. Es wird für die praktische Verwendung einer Estereinheit möglicherweise notwendig sein, das Ölvolumen vor Inbetriebnahme zu erwärmen, um bereits beim Einschalten die Viskosität der Flüssigkeit auf Werte zu senken, die die zur Kühlung notwendige Umwälzung nicht behindert.

2.7 Weitere Gasbildungsvorgänge

Die analysierten Gase können auch aus anderen Gründen als den oben genannten entstehen (siehe Kapitel 2.2.2, 2.3.2 und 2.4.2): Andere thermische Einwirkungen (Hot Spots im Transformator) können Wasserstoff erzeugen. Chemische Reaktionen an der Innenwand des Transformatorgehäuses beispielsweise, mit verschiedenen Schutzanstrichen oder Beschichtungen, die verschiedene Gase produzieren, wurden in der Praxis beobachtet. Auch bei Rostvorgängen und unter Einwirkung von Sonnenlicht oder durch überhitzte Kernbleche können Gase erzeugt werden [47].

Sämtliche dieser nicht-lichtbogenbezogenen Gasquellen können bei dieser Arbeit aufgrund der sehr kurzen möglichen Einwirkdauer (max. 72 Stunden), dem nicht Vorhanden sein von unbekanntem Schutzanstrichen, dem Fehlen von Tageslicht und der Vermeidung unbekannter Materialien mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

2.8 Durchschlagverhalten

2.8.1 Durchschlagverhalten der Flüssigkeiten

Für Entladungen und Durchschläge in flüssigen Isolierstoffen gibt es keine umfassende physikalische Theorie, da sie eine Vielzahl von Stoffen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften enthalten. Diese Eigenschaften sind durch Veränderungen in der Zusammensetzung, unterschiedlichen Fertigungsbedingungen, Verunreinigungen und durch Alterungsvorgänge sehr

großen Streuungen und Abweichungen unterworfen. Verunreinigungen sind daher soweit wie möglich aus den Flüssigkeiten vor deren Einsatz zu entfernen, da sie die größte Schwachstelle (Faserbrückendurchschlag) darstellen können. [28]

Es gibt verschiedene theoretische Ansätze, den Durchschlag in einer Isolierflüssigkeit zu beschreiben. Für verschiedene elektrische Beanspruchungszeiten des Isoliermediums sind verschiedene Ansätze vorhanden. Jeder für sich beschreibt sein Gebiet ausreichend, jedoch ist, wie bereits erwähnt, keine umfassende Theorie für das bewegliche, amorphe Gefüge einer Flüssigkeit vorhanden, da sowohl die mittleren freien Weglängen von Gasen als auch die vollkommen geordneten Strukturen von Kristallen nicht gegeben sind [29].

Man bedient sich daher der mathematischen Modelle aus der Gastheorie (Mikrobläschen – verschleierter Gasdurchschlag) und Festkörpertheorie (Theorie des Elektronenstoßes). Weiters kommen die Modelle der Suspensionsteilchentheorie (Polarisationseffekte an Fasern und Partikeln leiten die Entladung beim Faserbrückendurchschlag ein) und Perkolationsstheorie (Ausbildung von Vorzugsrichtungen in der Flüssigkeit) zum Tragen [29]. In Abbildung 19 sind die Anwendungsbereiche der einzelnen Modelle dargestellt.

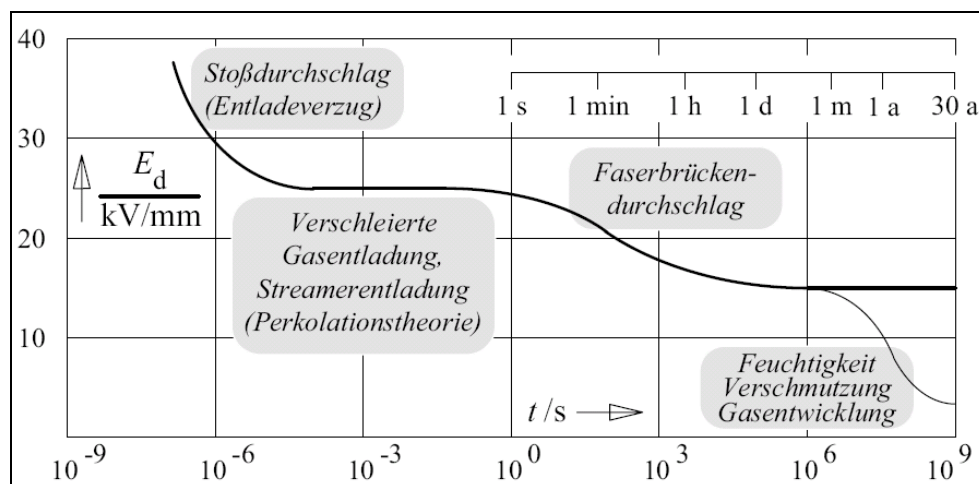


Abbildung 19: Veranschaulichung der verschiedenen Modelle des Durchschlages in Flüssigkeiten

2.8.1.1 Theorie der Mikrobäschen (Gastheoretisches Modell)

Bei stoßspannungsförmiger Beanspruchung ähneln das Entladungsverhalten in Flüssigkeiten dem Entladungsverhalten in Gasen, was zur „Theorie der Mikrobäschen“ bzw. der „verschleierte Gasentladung“ geführt hat. Eine Ausbildung von Elektronenlawinen würde das Vorhandensein von Bereichen erfordern, in denen die mittlere freie Weglänge ausreichend groß ist, sodass Stoßionisation möglich wäre. Dies wiederum wäre gegeben, wenn man davon ausgeht, dass sich in der Flüssigkeit Gebiete niedriger Dichte („öldampfhaltige Mikrobäschen“) befinden [36][28].

Entstehung von Mikrobäschen:

- Natürliches Vorhandensein von Gebieten niedriger Dichte
- Erzeugung durch Beschleunigung geladener Partikel bzw. Volumina und deren intensiver elektrohydrodynamischer Bewegung
- Injizierte Raumladungen lagern sich an Moleküle an und erzeugen durch Coulombsche Abstoßung Ausdehnung und damit Bereiche niedriger Dichte
- Injizierte Ladungen an mikroskopischen Spitzen erzeugen Ströme und damit lokale Überhitzungen, die zur Bildung von Mikrobäschen führen

Im Inneren dieser Bläschen ist das Durchschlagverhalten mit der Theorie von Gasdurchschlägen erklärbar. Verschiedene Vorgänge, wie beispielsweise das druckabhängige Verhalten der Entladungen, sind darüber ebenfalls modellierbar.

2.8.1.2 Perkolationstheorie

Eine weitere Erklärung für das Durchschlagverhalten von Flüssigkeiten ist die Perkolationstheorie. Diese gründet auf der Annahme, dass Entladungen schrittweise aus Ladungsträgern entstehen, welche sich zuerst in ungeordnetem Zustand und ohne Feld, durch Anlegen eines solchen in geordnetere Zustände, bis hin zum Durchschlag entwickeln (siehe Abbildung 20) [28].

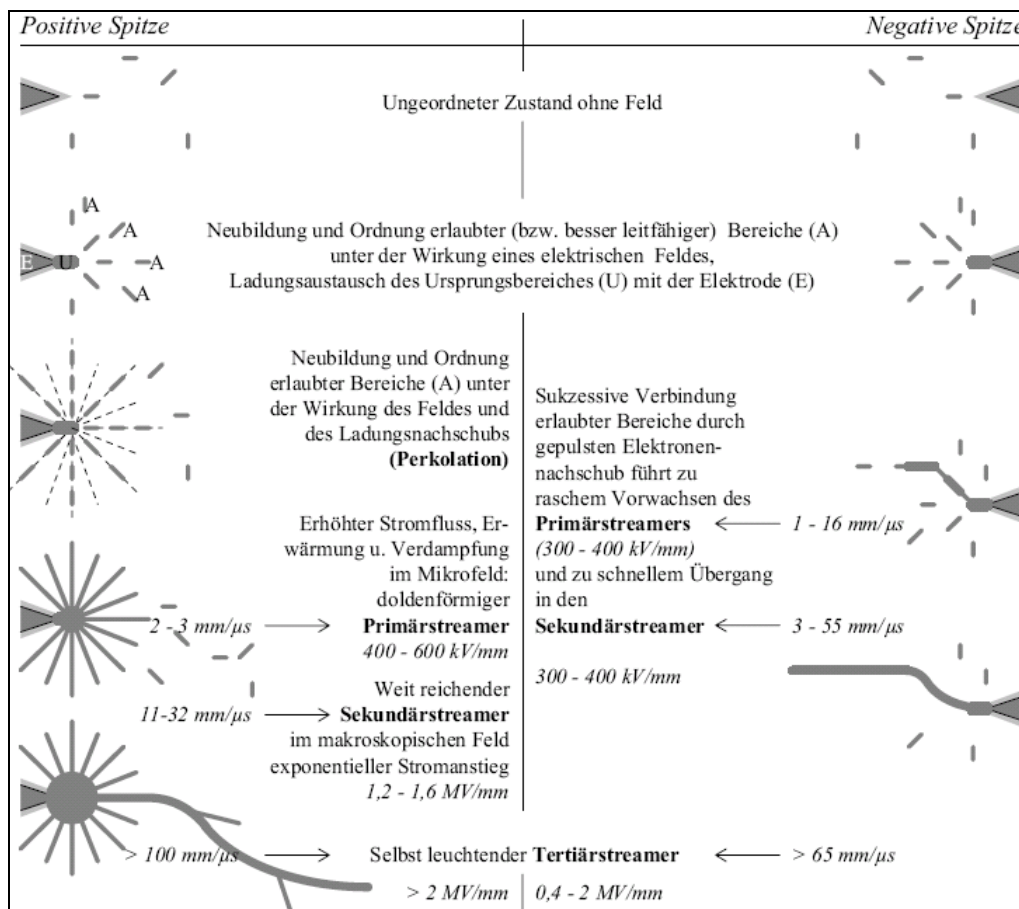


Abbildung 20: Modellierung der Isolierflüssigkeit nach Vorbild der Perkolationstheorie [28]

2.8.1.3 Festkörpertheoretisches Modell

Nun wirft die Theorie der Mikrobubbles die Frage nach deren Herkunft auf. Um diese zu beantworten, ist es hilfreich, auch die theoretische Modellierung der Isolierflüssigkeit, nach Vorbild eines Festkörpers anzuwenden.

Die der Streamerausbreitung nach der Mikrobubblesentheorie vorangehenden Ereignisse, die Bereitstellung von Ladungsträgern, deren Transport und die Entstehung von Bereichen niedriger Dichte, sind über die elektrochemischen Vorgänge, die ablaufen, wenn man das Isoliermedium als Festkörper betrachtet, erklärbar.

Ladungsträger sind teilweise als negative und positive Ionen sowie als freie Ladungsträger bereits in der Flüssigkeit vorhanden. Ständig ablaufende

Dissoziations- und Rekombinationsprozesse sowie durch den Schottky-Effekt aus dem Metallgefüge austretende höherwertige Elektronen stellen weitere Ladungsträger bereit [29].

Das Einbringen einer Metallelektrode in eine Isolierflüssigkeit führt zur Entstehung einer Doppelschicht nach Stern, welche eine Weiterentwicklung der Helmholtz-Doppelschicht darstellt. Durch ständig vorhandenen Sauerstoff und dessen Adsorption sind Metalloberflächen mit einer Oxydschicht überzogen.

Kommt es an der Außenseite der Elektrode zur Anlagerung von polarisierbaren Molekülen und positiven Ladungsträgern, so stellt dies die innere Helmholtzschicht dar. Angrenzend sind negative Ladungsträger zwischen den positiven Ionen adsorbiert, dies stellt die äußere Helmholtzschicht dar. Diese beiden monomolekularen Schichten bilden die starre Helmholtzdoppelschicht. Durch Wärmebewegung der Ionen grenzt an die äußere Schicht eine weitere. In dieser - diffusen - Schicht entsteht ein exponentieller Ladungsverlauf [29].

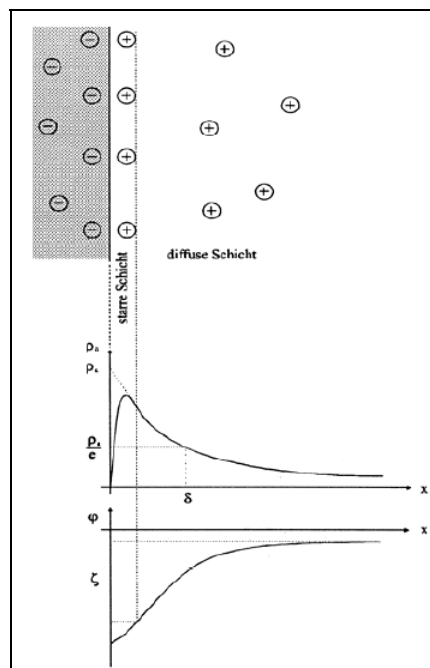


Abbildung 21: Doppelschicht nach Stern [29]

Wird nun eine Spannung angelegt, kommt es an der positiven Elektrode durch Feldionisation zum Übergang von Elektronen aus der Isolierflüssigkeit in das Metall (siehe Abbildung 22). Bei der negativen Elektrode treten Elektronen sowohl aus dem

Metall als auch aus den elektrodennahen Flüssigkeitsmolekülen aufgrund von Feldemission aus [29].

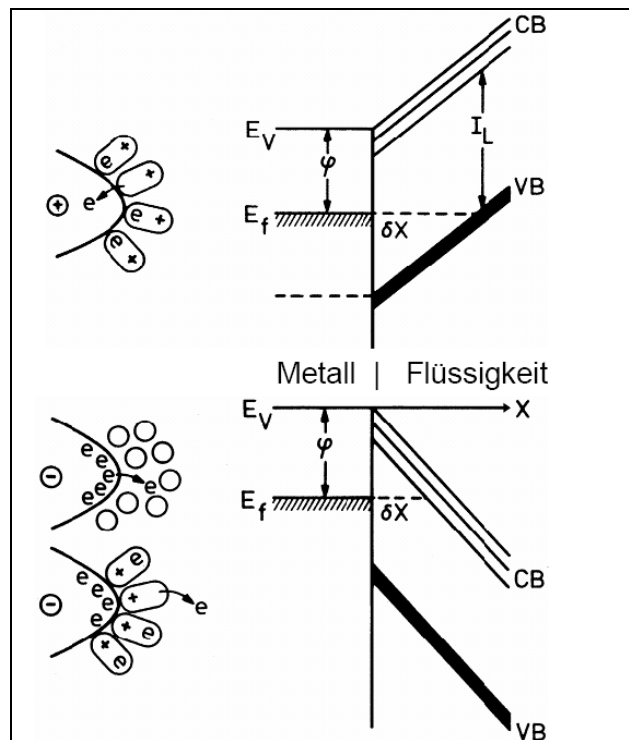


Abbildung 22: Darstellung der Mechanismen der Ladungsträgerabgabe von Metallspitzen (oder Oberflächenrauheiten) in die Isolierflüssigkeit, OBEN: Feldionisation; UNTEN: Feldemission [29],[37]

2.8.1.4 Suspensionsteilchentheorie

Dieses Modell behandelt besonders den sogenannten Faserbrückendurchschlag.

In dieser Arbeit wurde mit imprägnierter Zellulose gearbeitet. Dies bedingt unvermeidlich die Verunreinigung der Flüssigkeit mit mikroskopisch kleinen Zellulosefasern. Bei längerer Beaufschlagung mit Gleich- und auch Wechselspannung richten sich diese faserförmigen Verunreinigungen gemäß dem äußeren Feld aus und wandern in den Bereich maximaler Feldstärke.

In weiterer Folge bilden sich daraus komplexe Faserbrücken, die die Spannungsfestigkeit der Isolierstrecke enorm herabsetzen können (siehe Abbildung 23). Auslöser dafür ist der, auch in neuer, gut getrockneter Zellulose vorhandene, höhere Feuchteanteil (0,5 % Wasser). Dadurch entstehen leitfähige Kanäle und es

kommt zur Bildung, der in Kapitel 2.8.1.1 bei der Mikrobläschentheorie beschriebenen Bedingungen zur Entstehung von Bereichen geringerer Dichte, wie höheren Stromdichten und örtliche Überhitzungen. Der dadurch erleichterte Durchschlag kann als lokaler Wärmedurchschlag dargestellt werden [29], [39].

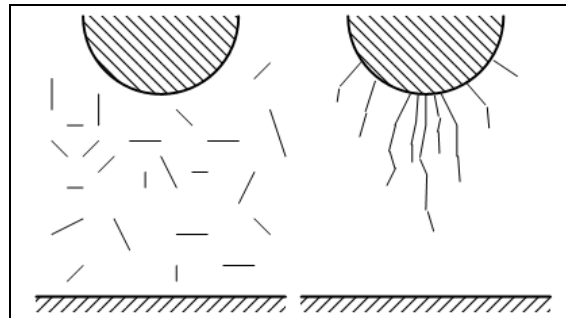


Abbildung 23: Darstellung der Ausbildung einer Faserbrücke [29]

2.8.2 Durchschlagverhalten von imprägnierter Zellulose

Der Einsatz von Zellulose als Barriere steigert die elektrische Festigkeit des Isoliersystems, verglichen mit der reinen Ölstrecke, erheblich. Aus durchschlagmechanischer Sicht trägt die Zellulose an sich nicht durch eine höhere Durchschlagfestigkeit sondern durch die sich aus der Faserstruktur ergebenden vielen mikroskopischen Barrieren zur elektrischen Festigkeit bei. Ein Durchschlag durch ein Öl-Board-System kann daher, abgesehen von der erhöhten Festigkeit aufgrund der Barrierenbildung gegen Faserbrücken, wie ein Durchschlag durch eine Flüssigkeit ohne Zellulose betrachtet werden [28].

Weiterhin können tangentielle Feldkomponenten auftreten, die an vielen hochspannungstechnischen Grenzflächen eine kritische Belastung darstellen. Öl-Zellulose-Grenzflächen stellen in dieser Hinsicht aber eine Ausnahme dar: Durch die Faserstruktur des Boards ergibt sich ein quasi stetiger Übergang aus dem Pressspan in das freie Öl (siehe Abbildung 24).

Die Kapillarkräfte verhindern die von glatten Oberflächen bekannten Benetzungsprobleme. Außerdem nimmt die im Pressspan gegebene sehr geringe Ölspaltweite (mit hoher elektrischer Festigkeit) nach außen hin quasi stetig ab, wobei die elektrische Festigkeit stetig auf die Werte der freien Ölstrecke sinkt. Die ins Öl

ragenden Fasern wirken praktisch als mikroskopische Barrieren in tangentialer Richtung [28].

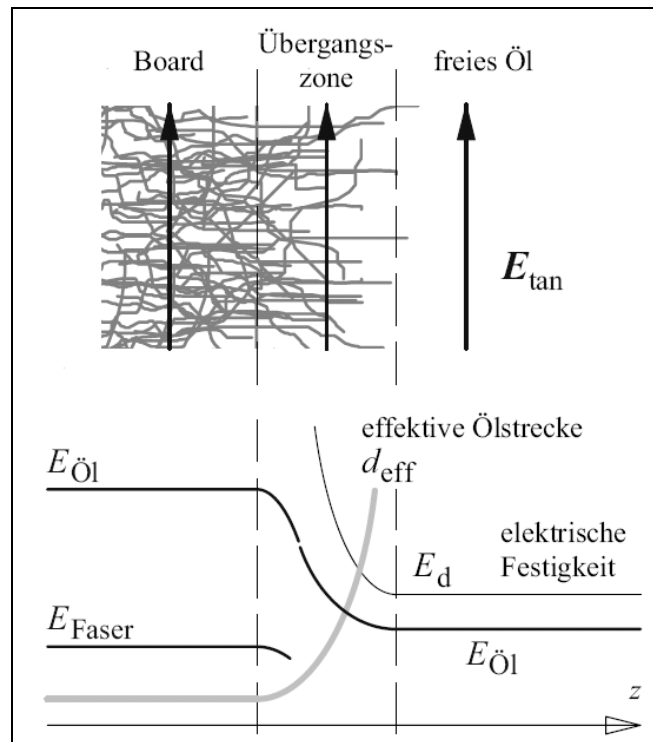


Abbildung 24: Eine Zellulose-Gleitstrecke unter tangentialer Feldbelastung [28]

2.8.3 Spezielle, den Feuchtigkeitsaustausch und tiefe Temperaturen betreffende Aspekte

Bei der hier vorliegenden Arbeit wurde, einerseits durch eine rasche Abkühlung und die zusätzliche Verwendung von Zellulose andererseits, versucht, festzustellen, inwieweit der Feuchtigkeitsaustausch zwischen Isolierflüssigkeit und Papier die elektrische Festigkeit beeinflusst. Es wurde für die Messungen versucht, möglichst „nicht-stationäre“ Bedingungen des Feuchtehaushalts des Öl-Zellulose-Isoliersystems zu erreichen, es wurde quasi mit einem Temperaturgradienten gearbeitet.

Die Abkühlung wurde knapp vor dem Erreichen der gewählten Temperatur (-10 °C und -25 °C, ausgenommen davon sind die Versuchsdurchläufe bei Raumtemperatur, hierbei wurde vorher keine Erwärmung bzw. Abkühlung vorgenommen) gestoppt, sodass die gewünschte Temperatur durch die Trägheit des Systems (in

Vorversuchen ermittelt) erreicht wurde. Danach wurde das Setup sofort nach Ziehen der DGA-Probe (ca. 30 Minuten) mit Spannung beaufschlagt. Der Prüfablauf dauerte 90 bis 120 Minuten.

Es wurde angenommen, dass sich in dieser kurzen Zeit kein Feuchtegleichgewicht zwischen der jeweils getesteten Flüssigkeit und der imprägnierten Zellulose einstellen konnte. Allerdings hat die Abkühlung zur Folge, dass die Sättigungfeuchte zurückgeht und damit die relative Feuchte stark ansteigt und daher ein Überschuss an enthaltenem Wasser in die Zellulose abgegeben werden muss.

Daher wurde erwartet, dass sich diese Feuchte aufgrund sehr hoher Diffusionszeiten [41] an der Oberfläche der Zellulose häuft und dort die elektrische Festigkeit, speziell in tangentialer Richtung, herabsetzt. Die vorliegende Untersuchung soll zeigen, inwieweit diese Annahme für Bedingungen, wie sie im realen Transformator gefordert sind, korrekt ist.

2.9 Verhalten der Flüssigkeiten bei tiefen Temperaturen

Durch H. Borsi wurde in [22] bereits gezeigt, dass die elektrische Festigkeit der meisten herkömmlichen Isolierflüssigkeiten für sich alleine getestet, (ohne Zellulose) zwischen +25 °C und -25 °C und konstanten Bedingungen, im Wesentlichen nicht von der Temperatur abhängt.

Mineralöl

Mineralöl hat sich bereits in jahrzehntelanger Verwendung in Transformatoren, aufgestellt in kalten Regionen, bewährt. Der Pourpoint liegt mit ca. -40°C niedrig und die Viskosität ist im Vergleich zu den Esterflüssigkeiten gering. Bei -20°C entspricht diese etwa dem Wert der Ester bei 0°C (siehe Abbildung 4).

Die Wasseraufnahmefähigkeit sinkt mit der Temperatur ab. Bei einer Temperatur von -20 °C können noch 20 bis 25 ppm Wasser aufgenommen werden, bei Raumtemperatur etwa 40 bis 50 ppm. Für gealterte Öle können diese Werte um den Faktor zwei ansteigen [56].

Das Durchschlagverhalten von Mineralöl bei tiefen Temperaturen fällt für feuchte Öle ab einer Temperaturabsenkung unter 10 °C ab und bleibt ab 0 °C konstant. Für

trockenes Öl, mit Feuchtwerten unter 5 ppm, ändert sich die Durchschlagspannung mit fallender Temperatur nicht [22].

Synthetische Ester

Im Verteiltransformatorenbau gibt es auch für synthetische Ester bereits langjährige Erfahrungen. Mit einem Pourpoint von -50 °C prädestiniert sich diese Flüssigkeit geradezu für leistungsstärkere und kühlungsintensivere Transformatorenklassen, abgesehen von der hohen Viskosität (bei -20 °C ein Mehrfaches von Mineralöl). Auch die hohe Wasseraufnahmefähigkeit von über 1000 ppm bei -25 °C ist grundsätzlich nicht unbedingt ein Nachteil.

Problematisch könnte der Transport dieses Wassers werden, da bei tieferen Temperaturen die von vornherein niedrigen Diffusionskoeffizienten des Esters [41] noch weiter gesenkt werden. Daher kann ein Miteinbeziehen der in der Praxis immer vorhandenen Zellulose möglicherweise zu neuen Aufschlüssen aufgrund der Tendenz des Feuchteaustausches führen.

Ohne Zellulose wurde für den synthetischen Ester keine Temperaturabhängigkeit der Durchschlagspannung festgestellt, auch wenn die Feuchte auf bis zu 1000 ppm erhöht wurde. Dabei konnte nur eine grundsätzliche Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit des synthetischen Esters von seinem Feuchtegehalt, nicht aber von der Temperatur, gezeigt werden [22].

Natürliche Ester

Der Einsatz für nicht erwärmte Pflanzenöle als Kühl- und Isoliermedien in Leistungstransformatoren ist durch deren relativ hoch gelegenen Pourpoint von -15 bis -25 °C klar begrenzt. Der Erstarrungspunkt des hier verwendeten Esters wurde in Vorversuchen mit -21 °C ermittelt.

Grundsätzlich gilt für das Feuchte- und Temperaturverhalten des natürlichen Esters Ähnliches wie beim synthetischen Ester. Ein Unterschied besteht jedoch in der höheren Viskosität, diese hat eine noch niedrigere Diffusionszeitkonstante zur Folge. Daher darf für Pflanzenöle angenommen werden, dass die Ausgleichsvorgänge noch langsamer vonstatten gehen. Die maximale Feuchteaufnahmefähigkeit von natürlichen Estern beträgt bei -20 °C einige hundert ppm [56].

3 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit war es, Untersuchungen über die Eigenschaften von natürlichen und synthetischen Esterflüssigkeiten bei tiefen Temperaturen und deren Gasungsverhalten durchzuführen, um auf diese Weise wissenschaftlich fundierte Analysen für diverse Anwendungsfälle zu erhalten.

Im Speziellen wurde Augenmerk auf die elektrische Festigkeit der Flüssigkeiten im Zusammenspiel mit Zellulose, also als Öl-Board-Isoliersystem, gelegt. Als Vorlage der Rahmenbedingungen für die Erstellung einer Prüfanordnung und eines Prüfprogramms dienten die realen Verhältnisse in einem Transformator, um auch Aussagen über den praktischen bzw. tatsächlichen Einsatz der Flüssigkeiten treffen zu können. Dabei galt es, das Folgende zu berücksichtigen:

- Verwendung von aufbereiteten Flüssigkeiten bzw. Neuöl
- Verwendung von aufbereiteter Zellulose
- Abkühlung nicht mit Raumtemperatur sondern mit realer Betriebstemperatur als Startwert (typ. Umgebungstemperatur +60 °C), um einen möglichst realen Feuchtigkeitsgradienten in der Flüssigkeit zu erreichen
- Zelluloseproben müssen sich während des Temperaturspiels in der zu prüfenden Flüssigkeit befinden, um Feuchtaustausch zu ermöglichen

Eine wichtige Prämisse aus der Praxis musste allerdings umgangen werden, es wurde eine Zelluloseoberfläche mit tangentialer Feldbelastung, wie sie im realen Transformator nicht vorkommen darf, in der Prüfanordnung realisiert (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26). Dies war für die Untersuchung der These, dass die Feuchte nach rascher Abkühlung zu einer starken Herabsetzung der elektrischen Festigkeit einer Zelluloseoberfläche führt, notwendig.

Die Verhältnisse in realen Einheiten sind aus Sicht der elektrischen Feldstärke ausschließlich unkritischer, da sie geringere Inhomogenitätsgrade aufweisen und die tangentialen Flächen mit wesentlich geringeren Feldstärken belastet werden. Sollen daher aus den Ergebnisse dieser Arbeit Schlüsse für die Praxis gezogen werden, so bedeutet dies, dass diese Untersuchungen als „Worst Case“ angenommen werden

dürfen, da es im realen Transformator nie zu solch schlechten Bedingungen kommen wird.

3.1 Derzeitiger Forschungsstand

Das Verhalten von Esterflüssigkeiten bei tiefen Temperaturen rückte bereits kurz nach der Markteinführung von Midel 7131 der Firma M&I in das Interesse der Forschung. Borsi untersuchte in [22] die Abhängigkeit des Wasserlösungsvermögens und die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von den Flüssigkeiten mit verschiedenen Wassergehalten von der Temperatur, unter anderem von diesem synthetischen Ester ohne Zellulose. Er zeigte, dass das Wasserlösungsvermögen eine starke Temperaturabhängigkeit aufwies, die elektrische Festigkeit jedoch wesentlich stärker vom Feuchtegehalt abhängig war als von der Temperatur.

Kahn et al. untersuchten in [61] und [62] das Gasungsverhalten von synthetischen und natürlichen Esterflüssigkeiten in Bezug auf Temperaturfehler (mit Zellulose) und Durchschläge (ohne Zellulose). Ihre Ergebnisse der Untersuchungen für elektrische Fehler zeigten, dass sich, abgesehen von einer vermehrten CO-Produktion und einer etwas geringeren Ethinproduktion bei den Estern, keine wesentlichen Veränderungen in den Schadgaszusammensetzungen und -konzentrationen zwischen den Flüssigkeiten ergeben hatten. Es konnte von Ihnen festgestellt werden, dass die Gesamtgasproduktion bei den Estern geringer war als beim verwendeten Mineralöl.

Von Höhlele-Atanasova und Frotscher wurde in [64] durch eine Wärme-Alterungsuntersuchung von verschiedenen Estern in Headspace-Gefäßen gezeigt, dass CO und CO₂ in den Estern auch bei thermischen Fehlern erzeugt werden. Weiters wurde herausgefunden, dass die CO-Konzentration in Estern bei einer thermischen Alterung noch vor den, für Mineralöl typischen Gasen ansteigt.

In [63] wurde das Duval-Dreieck um einige Varianten, unter anderem auch für Esterflüssigkeiten (,nicht-mineralische-Öle'), erweitert. Die Untersuchungen simulierter Durchschlagfehler ergaben, dass eine Änderung des Grenzwertes zwischen schweren und leichten Entladungen des Ethen/Ethin-Quotienten von 0,29 auf 0,33 sinnvoll ist.

3.2 Versuchsanordnung und Überlegungen zur Abkühlung

Als Versuchsanordnung wurde eine neue Probenform entwickelt, die sowohl das Öl-Papier-Isoliersystem beinhaltet als auch eine inhomogene Feldverteilung darstellt und eine Kriechstrecke als Durchschlagsmöglichkeit bietet (siehe Abbildung 27). Diese Anordnung besteht aus einer kreisrunden Plattenelektrode, die mit dem Erdpotential verbunden ist, und einem Kupferbügel aus Standard-Flachleitermaterial [15], an den das Hochspannungspotential angelegt wird.

Dazwischen wird stehend eine Zelluloseleiste [16] eingesetzt, die mit ihren Längskanten beide Elektroden berührt. Die Höhe dieser Zelluloseleiste ergibt somit den Elektrodenabstand. Gewählt wurden 10 mm und 20 mm, um die Spannungsfestigkeit des Prüfgefäßes, die 150 kV beträgt, nicht zu überschreiten. Die Plattenelektrode mit Erdpotential hatte einen Durchmesser von 120 mm und besaß einen Kantenradius von 10 mm. Der Kupferbügel hatte die Querschnittsabmessungen von 1,6 mm Dicke und 13 mm Breite mit einem Kantenradius von 0,5 mm und war zu einem Radius von 60 mm gebogen (siehe Abbildung 26).

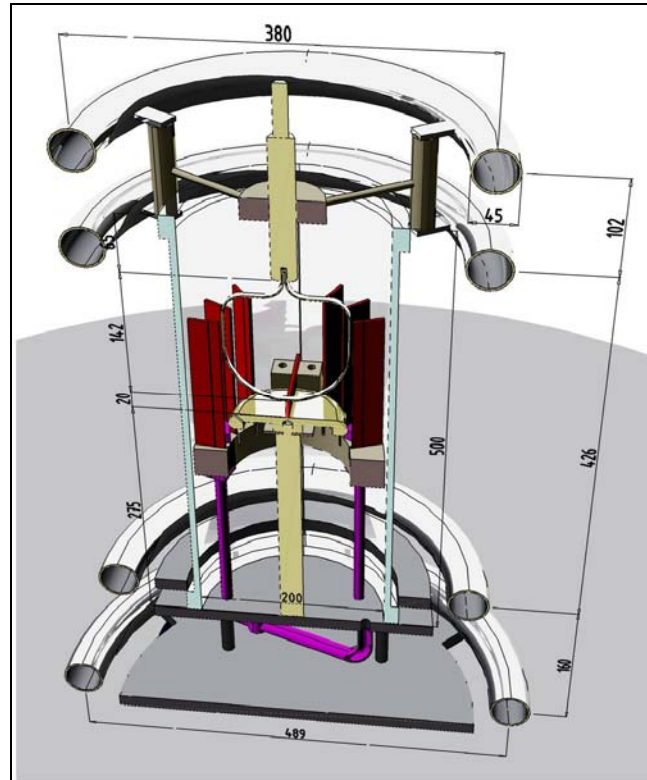


Abbildung 25: LINKS: Die Probenform U-Bügel-Flachleiter unter Öl; RECHTS: Skizze des gesamten Prüfgefäßes (alle Maße in mm) mit eingesetzter Probe und weiteren Proben (senkrecht im Haltering)

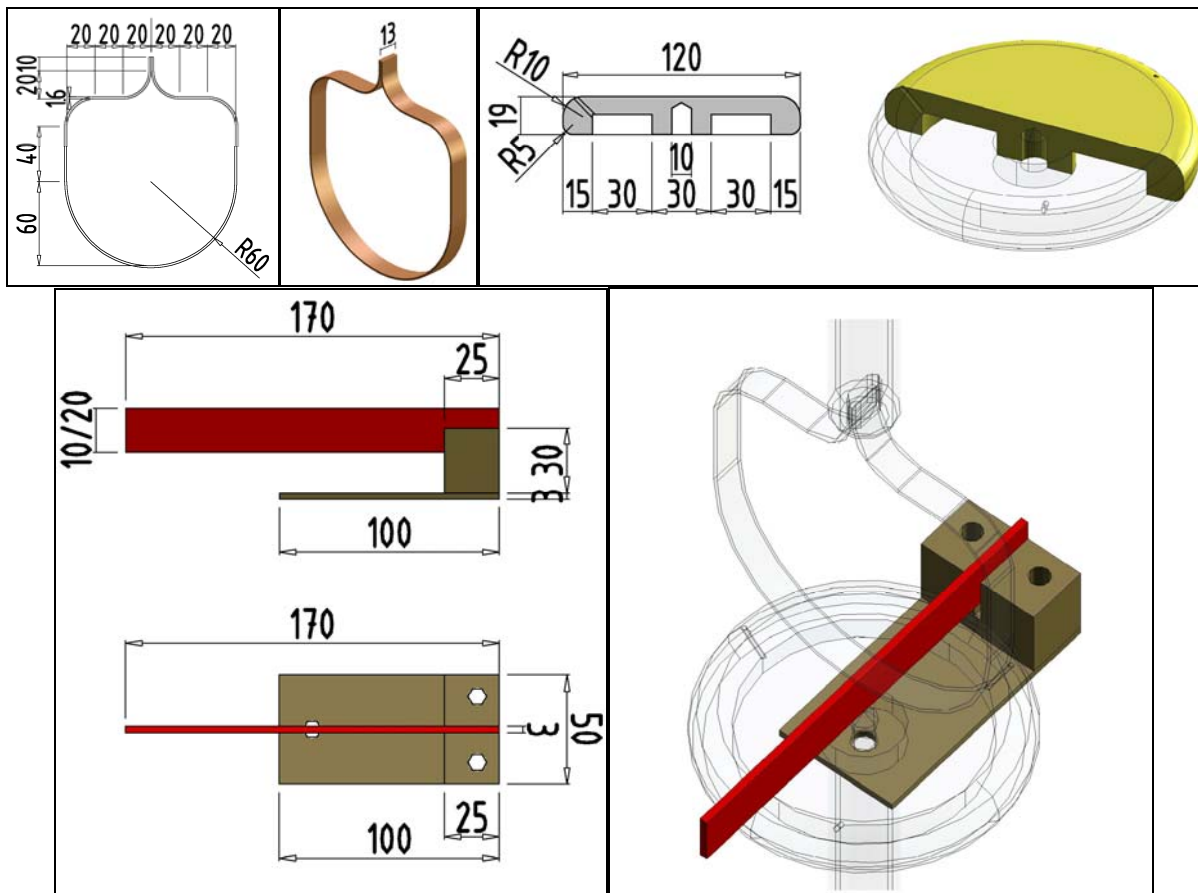


Abbildung 26: Maßzeichnungen der verwendeten Probenform mit Platte, den Zelluloseleisten in den zwei verschiedenen Breiten (10 mm und 20 mm) und dem Kupferbügel einzeln und in Einbaulage (alle Maße in mm)

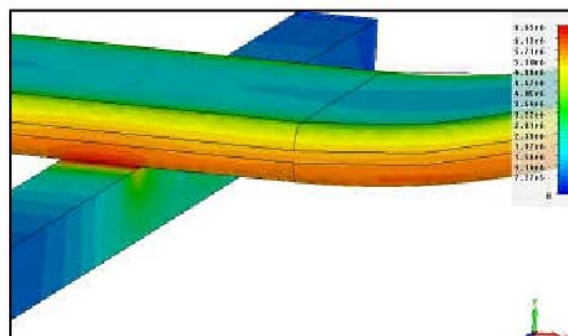


Abbildung 27: Feldsimulation der verwendeten Probenform, Auflage des Kupferleiters

3.3 Auswahl der Flüssigkeiten

Grundsätzlich sollte Mineralöl und je ein natürlicher und synthetischer Ester zum Einsatz kommen. Es sollte eine praxisbezogene Arbeit werden, deren Ergebnisse auch Bezug auf tatsächlich betriebene oder zumindest in naher Zukunft betreibbare Einheiten Relevanz besitzen sollten.

Dabei war wichtig, dass es sich um Ölsorten handelt, die bereits am Markt als Isolierflüssigkeiten erhältlich waren und weiters bereits zumindest in der Mittelspannungsebene zum Einsatz gekommen sind. Dies schloss neue bzw. neuartige Isolierflüssigkeiten, die sich noch im Forschungsstadium befanden, aus. Auch die Flüssigkeit Midel eN von M&I kam wegen der patentrechtlichen Probleme der Firma nicht in die engere Wahl.

BEC-Fluid von Elantas wurde nicht eingesetzt, da diese Flüssigkeit noch nicht in Großtransformatoren eingesetzt werden konnte und dies einen wichtigen Gesichtspunkt für die Anwendung der Gas-in-Öl-Analyse darstellt. Diese wird nur für das Monitoring in Großtransformatoren eingesetzt. Da BEC-Fluid als Pentaerythrit-Tetrafettsäureester dieselbe Basis wie das für die TU Graz wesentlich einfacher verfügbare Midel 7131 vom M&I besitzt, sind die erhaltenen Ergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf die Flüssigkeit BEC-Fluid übertragbar.

Als Mineralöl wurde die Sorte Nynas Nytro 4000X, ein inhibiertes naphthenisches mineralisches Isolieröl, gewählt. Hauptgrund für diese Flüssigkeit war die große Verfügbarkeit, da diese Flüssigkeit bereits bei vielen anderen Untersuchungen am Institut für Hochspannungstechnik an der TU Graz zum Einsatz gekommen ist.

Die meisten am Markt befindlichen Mineralöle verschiedener Hersteller (z.B. Shell, Technol, Nynas, etc.) sind, was das Durchschlags- und Gasungsverhalten betrifft, gleichwertig und daher konnte nach Verfügbarkeit entschieden werden.

Als synthetischer Ester kam Midel 7131 von M&I zum Einsatz. Es handelt sich dabei um einen Tetracarbonsäureester, der bereits seit mehreren Jahrzehnten vielfach im Verteiltransformatorenbau bis 50 kV eingesetzt wird und in Kürze auch in Großtransformatoren bis 220 kV verwendet werden soll. Auch gibt es Untersuchungen über die Eignung dieser Flüssigkeit in Stufenschaltern [12].

Die Wahl des natürlichen Esters fiel auf die Flüssigkeit Envirotemp FR3 des Herstellers Cooper Power Systems. Für den natürlichen Ester war der Pourpoint (die Temperatur, bei der der Ester gerade noch flüssig ist) ein sehr wichtiges Kriterium.

Da es voraussichtlich nicht möglich sein würde, die Versuchsreihen bei einer Temperatur von -25 °C mit einem natürlichen Ester durchzuführen, sollten aber zumindest die Reihen mit -10 °C abgeschlossen werden. Daher wurden Vorversuche, die Abkühlung betreffend, auch mit der Flüssigkeit Biotemp von ABB durchgeführt. Dabei wurde allerdings festgestellt, dass diese bereits bei -4 °C erstarrt und somit nicht für die geplanten Tieftemperaturversuche brauchbar war.

3.4 Versuchsplanung

Um wissenschaftlich relevante Ergebnisse zu erhalten, mussten in der Versuchsplanung bereits mehrere Punkte berücksichtigt werden. Einschränkende Faktoren waren die voraussichtlich hohe Streuung der Ergebnisse aufgrund der stochastischen Eigenschaften der Durchschlagmechanismen bei einem Öl-Zellulose-Isoliersystem und die begrenzte Anzahl von unabhängigen Durchschlägen in dem 17 Liter fassenden Prüfgefäß.

Durch die daraus resultierende Notwendigkeit, möglichst viele Proben zu prüfen, wurde die Anzahl der zu prüfenden Distanzen auf zwei beschränkt (10 mm und 20 mm Abstand). Weiters wurden sämtliche Versuche doppelt ausgeführt, um eine statistische Absicherung gegen mögliche unterschiedliche Behandlungen zu erreichen. Das bedeutete für jede Distanz, jede Flüssigkeit und jede Temperatur zweimal 10 gemessene Werte.

3.5 Ablauf

Als Referenz dienten Versuche mit aufbereitetem Neuöl bei Raumtemperatur. Für die Tieftemperaturversuche wurde vom Betriebsfall eines Transformators ausgegangen. Da Transformatoren so dimensioniert werden, dass die Betriebstemperatur 60 °C

über der Umgebungstemperatur liegt, wurde dies auch für die Planung der Tieftemperaturversuche herangezogen. Das Versuchsgefäß, inklusive Füllung und imprägnierter Proben, wurde daher vor dem Abkühlen 36 Stunden auf diese Betriebstemperatur erwärmt. Damit wurde der Betriebsfall des Transformators simuliert. Für die Versuche bei -10 °C entsprach die angenommene Betriebstemperatur 50 °C und bei -25 °C wurde auf 35 °C erwärmt.

Nach dem Verstreichen der 36 Stunden Aufwärmphase wurde mit der Abkühlung im institutseigenen Extremklimaraum begonnen. Um ein „Worst Case“ Szenario zu erhalten, begannen die folgenden Wechsellspannungs-Durchschlagversuche unmittelbar nach dem Erreichen der geplanten Temperatur, wobei zuvor noch die Proben für die DGA entnommen und die Durchschlagspannungsmessung nach IEC 60156 sowie die Ölfeuchte nach Karl Fischer (siehe Kapitel 4.3) vorgenommen wurden.

Nun wurden die eigentlichen Durchschlagspannungsversuche mit der Versuchsanordnung durchgeführt. Die Ermittlung der Durchschlagspannung erfolgte angelehnt an DIN 53481 mit rampenförmig ansteigender Spannung, beginnend von null Volt bis zum Durchschlag, wobei die Anstiegsgeschwindigkeit nach der Norm so gewählt wurde, dass der Durchschlag in einer Zeit von 10 bis 20 Sekunden nach dem Einschalten erfolgte. Dies sollte gewährleisten, dass die zugeführte Energiemenge für alle drei Flüssigkeiten so vergleichbar wie möglich war, um eine möglichst gleichartige Beanspruchung zu erreichen. Damit sollte für die DGA-Untersuchungen eine vergleichbare Basis geschaffen werden, die aufgrund des unterschiedlichen Teilentladungsverhaltens der Flüssigkeiten [13], beispielsweise unter Verwendung von 1-Minuten-Stehspannungsuntersuchungen, nicht möglich gewesen wäre.

Unmittelbar nach Beendigung der elektrischen Untersuchungen wurden weitere Ölproben für die oben genannten Untersuchungen entnommen, um festzustellen, wie hoch der Unterschied der gemessenen Werte im Vergleich zum Zustand vor der elektrischen Beanspruchung war.

3.6 Auswertung

Die wissenschaftliche Auswertung der verschiedenen Ergebnisse erfolgte mittels mehrerer statistischer Methoden. Es wurde unterschieden zwischen der Auswertung der elektrischen und der Auswertung der chemischen Ergebnisse. Die Ergebnisse der Ölfeuchte nach Karl Fischer und der Durchschlagspannung nach IEC 60156 dienten der Absicherung, die Ölqualität betreffend.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der elektrischen Untersuchungen wurden zuerst die Einzelmesswerte mittels Streudiagramm mit linearer Regression auf ihre Unabhängigkeit hin überprüft. Nach einer nun erfolgten grafischen Bestimmung der Verteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz konnte die Verwendbarkeit der Daten bestätigt werden und es wurden die statistischen Parameter wie Mittelwert und Standardabweichung berechnet.

Aus diesen Ergebnissen konnte einerseits die Verwendbarkeit der geprüften alternativen Isolierflüssigkeiten bei tiefen Temperaturen und andererseits die Richtigkeit der Annahme, dass die sich durch die Temperaturänderung ergebende Oberflächenfeuchte die elektrische Festigkeit herabsetze, geprüft werden.

Für die Auswertung der durch die Gas-In-Öl-Analyse erhaltenen Daten wurden grundsätzlich vorhandene Auswertungsschemata herangezogen (siehe auch Kapitel 4.2):

- IEC 60599
- IEEE / TDGC
- Nach Doernenburg
- Nach Rogers
- Nach Duval
- Schema nach MSS / VDE

Weiters wurden die Gasmengendifferenzen zwischen der Messung vorher und der Messung nachher gebildet und die Differenzen absolut in ppm und prozentuell zwischen den Flüssigkeiten auf Auffälligkeiten hin untersucht. Die Ergebnisse wurden danach diskutiert und es konnte daraus geschlossen werden, auf welche Gase bei alternativen Isolierflüssigkeiten für den Fehler von Entladungen schwacher Energie mit Board-Involvierung besonders geachtet werden muss.

4 Untersuchungen an alternativen Flüssigkeiten bei tiefen Temperaturen

4.1 Versuchsaufbau

Als Prüfgefäß wurde ein, auf einer dichten und fahrbaren Metallplattform montiertes zylindrisches Rohr aus Duranglas® verwendet. Weiters war die Anordnung mit Schirmelektroden versehen, um die elektrische Festigkeit des Gefäßes zu erhöhen. Ein Bild und eine Maßzeichnung ist in Abbildung 25 bzw. Abbildung 28 zu sehen. In dem Rohr befand sich die Prüfanordnung (siehe Kapitel 3.2), bestehend aus einer scheibenförmigen Masseelektrode mit seitlich angebrachtem Probenhalter (der den senkrechten Stand der Papierprobe gewährleistete) und der bügelförmigen Hochspannungselektrode aus Kupfer.

Weiters war ein Probenhalter eingebaut, in welchem die noch zu prüfenden Papierproben während des Temperaturzyklus bis zu ihrer Prüfung aufbewahrt wurden. Zur Probenentnahme und zur Entleerung des Gefäßes war an der Unterseite der Metallplattform ein Auslass mit Kugelhahn angebracht.

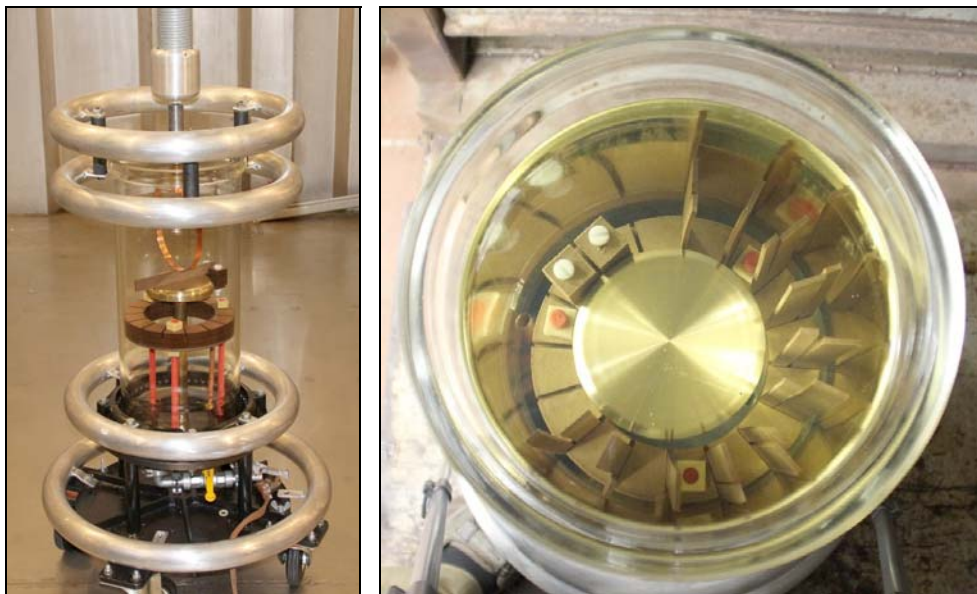


Abbildung 28: LINKS: Foto des verwendeten Prüfgefäßes mit eingesetzter Probe, ohne Öfüllung und weiteren Proben; RECHTS: Draufsicht auf das gefüllte Prüfgefäß mit Proben im Haltering, ohne Kopfelektrode, Kupferbügel und Probe im Supportblock

4.2 Durchschlagsuntersuchungen am abgekühlten Öl-Zellulose-Isoliersystem

Die in Kapitel 4.2 beschriebene Prüfanordnung wurde, nach einer Reinigung mit Alkohol und Aceton, mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt und es wurden die zuvor imprägnierten Proben am Probenhalterring eingebaut. Zeitgleich wurde die Ölprobe für die Bestimmung der Durchschlagspannung nach IEC 60156 und des Feuchtegehaltes nach Karl Fischer entnommen. Danach fand optional der Temperaturzyklus mit Erwärmung und Abkühlung statt.

Das Aufwärmen wurde im Wärmeofen (Leistung 42 kW), in den das Versuchsgefäß mitsamt den Proben eingebracht wurde, durchgeführt (siehe Abbildung 29). Dort wurde das Setup 36 h entweder auf +50 °C (für die -10 °C Versuche) oder auf +35 °C (für die -25 °C Versuche) erwärmt.

Nach diesem simulierten Betrieb erfolgte die Aufstellung im institutseigenen Extremklimaraum. Für die Untersuchungen bei Raumtemperatur erfolgte sofort nach Probeneinbau die Prüfung. Dafür wurde das Gefäß über einen 2 k Ω -Dämpfungswiderstand an zwei kaskadierte 100 kV Baukastentransformatoren angeschlossen (Hersteller: Firma Meßwandlerbau, maximale Ausgangsspannung: 200 kV, 50 Hz). Das parallel zum Prüfling kontaktierte Spannungmeßsystem bestand aus einem Teiler der Firma Isofarad (Verhältnis 1:2000, 100 nF) und einem Multimeter von Voltcraft (VC 5070).



Abbildung 29: Aufstellung des Versuchsgefäßes im Großraumofen zur Erwärmung auf die simulierte Betriebstemperatur



Abbildung 30: LINKS: Kontaktierter Versuchsaufbau im Extremklimaraum (Vorversuche); RECHTS: Foto der starken Bläschenbildung (Vorversuch, $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, synthetischer Ester)

Für die Prüfungen der gekühlten Flüssigkeiten erfolgte die Spannungseinleitung in den Extremklimaraum über eine 150 kV Deckendurchführung (siehe Abbildung 30 links). Unmittelbar vor den Durchschlagversuchen wurde über das Ablassventil des Versuchsgefäßes eine DGA-Probe gezogen.

Nach Abschluss der Probenentnahme wurde mit den Durchschlagversuchen begonnen. Dazu wurde immer abwechselnd eine 10 mm und eine 20 mm Papierprobe im Supportblock befestigt, die U-Bügel-Elektrode zentral und rechtwinklig dazu aufgesetzt, und nach einer Ruhezeit von rund einer Minute die Prüfwechselfspannung angelegt. Diese wurde rampenförmig bis zum Durchschlag gesteigert. Die Anstiegsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass es in einer Zeit von 10 bis 20 s nach dem Einschalten zum Zusammenbruch der Isolationsfestigkeit des Prüflings kam. Diese Prozedur orientierte sich am Standard DIN 53481.

Nach der Prüfung wurde wieder eine DGA-Probe gezogen. Da nach Erkenntnissen, die aus Vorversuchen gewonnen wurden, davon ausgegangen werden konnte, dass sich eine Veränderung der Gaskonzentrationen nur im oberen Drittel vollziehen

würde (siehe Abbildung 30 rechts) und zur Vermeidung von Verunreinigung und Blasenbildung das DGA-Gefäß nur am unteren Auslass angeschlossen werden konnte, wurden zwei Drittel des Gefäßvolumens durch das DGA-Gefäß abgelassen und erst dann die Ventile geschlossen, um eine Probe zu ziehen (siehe auch Kapitel 4.3.1).

4.3 DGA – Dissolved Gas Analysis – Gas-in-Öl-Analyse

Die Analyse der in der Isolierflüssigkeit gelösten Gase ist eine hervorragende Möglichkeit, den Zustand der Öl-Papier Isolation eines Leistungstransformators zu bestimmen. Sie bietet mehrere große Vorteile.

Einerseits ist die Entnahme und Untersuchung ohne jegliche Einschränkung des Betriebes unter Spannung, respektive unter Volllast möglich.

Andererseits bietet sie Einblick in den Zustand der Papierisolation, ohne dass eine Zelluloseprobe entnommen werden muss (und die Isolation damit eventuell zerstört würde). Sie bietet gute Aussagekraft über eventuell in der letzten Betriebsperiode aufgetretene Fehler. Nachteilig ist jedoch der integrale Bewertungscharakter, es lässt sich nicht feststellen, ob viele kleine oder wenige große Fehler die Ursache für die Veränderung der Zusammensetzung der gelösten Gase sind.

Grundsätzlich lassen sich typische Hauptfehlerursachen wie Teilentladungen, Durchschläge, Papierzerstörung und thermische Fehler aufgrund der unterschiedlichen Konzentrationserhöhungen der wichtigsten gemessenen Gase diagnostizieren.

Die analysierten Gase sind im Allgemeinen niederwertige Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffoxide. Üblicherweise werden Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4), Ethan (C_2H_6), Ethen (C_2H_4 , auch Ethylen), Ethin (C_2H_2 , auch Azetylen), Propan (C_3H_8) und Propen (C_3H_6 , auch Propylen), Kohlenstoffmonoxid (CO , auch Kohlenmonoxid) und Kohlenstoffdioxid (CO_2 , auch Kohlendioxid) bestimmt.

Im Gaschromatographen werden die Mengen der Gase bestimmt und danach mittels des Probenvolumens die Konzentrationen berechnet. Sind diese ermittelt, so können anhand verschiedener Auswertungsschemata die oben genannten Fehler mit mehr oder weniger großer Sicherheit benannt werden [45].

Die Analyse der im Öl gelösten Gase gliedert sich in vier wichtige Bereiche:

- Probenentnahme
- Extraktion der gelösten Gase mittels Toepler-Pumpe
- Gasanalyse
- Auswertung

Im Folgenden wird auf jeden dieser Teilbereiche kurz eingegangen werden.

4.3.1 Die Probenentnahme

Das Entnehmen der Probe ist ein sehr genau und gewissenhaft durchzuführender Vorgang, da hier gemachte Fehler, wie beispielsweise ein Lufteinschluss im Probengefäß, zu starken Messungenauigkeiten führen können. Es ist daher immer nach dem gleichen Schema vorzugehen:

- Anschluss des Probengefäßes (siehe Abbildung 31) an das Prüfgefäß. Dies geschah mit DN 16/12 Kleinflanschbauteilen und Silikonschlauch mit 10 mm Innendurchmesser. Dabei wurde das Gefäß mittels eines Laborstativs senkrecht fixiert, sodass alle Blasen nach oben aufsteigen konnten bzw. aus dem Gefäß gespült wurden.

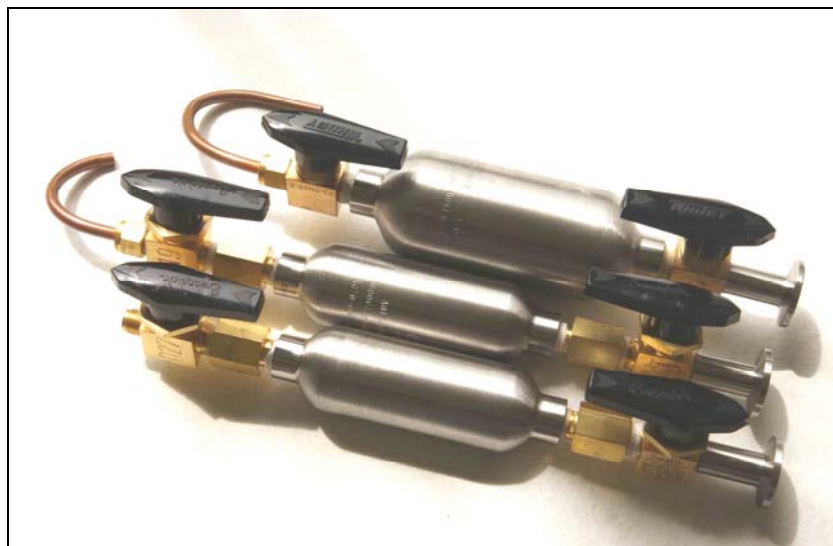


Abbildung 31: Probengefäß für die „Gas-in-Öl“ – Analyse. Die Anordnung von einem Behälter zwischen zwei Hähnen erlaubt die vollständig blasenfreie Abfüllung der zu untersuchenden Isolierflüssigkeit. Das Volumen der Gefäße betrug 150, 200 und 300 ml [46]

- Entlüften und spülen des Probengefäßes. Dies geschieht bei senkrecht stehendem Probengefäß, wobei sich der Einlaufschlauch an der Unterseite befindet. Damit ist gewährleistet, dass sich alle Luftblasen, unter Zuhilfenahme der Auftriebskraft und der Strömung, nach oben fortbewegen können und ausgespült werden. Dabei wird mit mindestens einem Liter Flüssigkeit gespült, die Nachher-Probe sogar mit etwa zwei Drittel des Prüfgefäßinhaltes (ca. 13 Liter).
- Ziehen der Probe. Zuerst wird während des Durchlaufs der Isolierflüssigkeit der Hahn am Auslauf und danach der Hahn am Einlauf geschlossen. Damit ist die Probe im Inneren des Gefäßes verschlossen und kann an die Toepler-Pumpe angeschlossen werden.

4.3.2 Die Extraktion der gelösten Gase mittels Toepler-Pumpe

Die Toepler-Pumpe (siehe Abbildung 32) ist eine Vakuum-Extraktionseinrichtung, deren Kolben aus flüssigem Quecksilber bestehen. Dies ist aufgrund dessen, dass sich Gase in Quecksilber nur schwer lösen die einzige Methode, mit der Gase hinreichend genau aus einer Probe extrahiert werden können.

Die Toepler-Pumpe zieht mit mehreren Hüben des Quecksilberkolbens das gelöste Gas aus der Probe und speichert es in einem Glasvolumen, mit welchem durch Öffnen eines Ventils der Gaschromatograph beschickt wird (siehe Abbildung 34).



Abbildung 32: Foto der Toepler-Pumpe, die im Öllabor der Verbund-Umwelttechnik GmbH in Sankt Andrä/Kärnten verwendet wird und auch für die Analysen der vorliegenden Arbeit verwendet wurde [46]

4.3.3 Die Gasanalyse mittels Gaschromatograph

Ein Gaschromatograph (siehe Abbildung 33) analysiert eine gasförmige Probe bezüglich der in ihr enthaltenen Gase, sowohl qualitativer als auch quantitativer Natur, indem er die Bestandteile voneinander trennt und die Mengen der Einzelsubstanzen ermittelt.

Grundsätzlich besteht ein Gaschromatograph aus folgendem Aufbau (siehe Abbildung 34): Eine Quelle für das Trägergas (Argon, Helium oder Stickstoff), die Eingabemöglichkeit für die Gasprobe, einem kapillaren Metallrohr von definierter Länge und definiertem Durchmesser (der sogenannten „Trennsäule“, in der das Aufteilen der Probe in die Bestandteile stattfindet) und einem an die Trennsäule

angeschlossenen Detektor, der das Austreten eines Bestandteils der Probe anzeigt. Hierfür wird zumeist ein Flammenphotometer oder ein Ionisationsdetektor verwendet.



Wasserstoff (H ₂)	etwa 5 ppm
Methan (CH ₄)	etwa 1 ppm
Acetylen (C ₂ H ₂)	etwa 1 bis 2 ppm
Ethylen (C ₂ H ₄)	etwa 1 ppm
Ethan (C ₂ H ₆)	etwa 1 ppm
Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO ₂)	etwa 25 ppm
Sauerstoff (O ₂) und Stickstoff (N ₂)	etwa 50 ppm

Abbildung 33: LINKS: Bild des Gaschromatographs der Verbund-Umwelttechnik in Sankt Andrä/Kärnten [46]; RECHTS: Nachweisgrenzwerte der detektierten Gase [45]

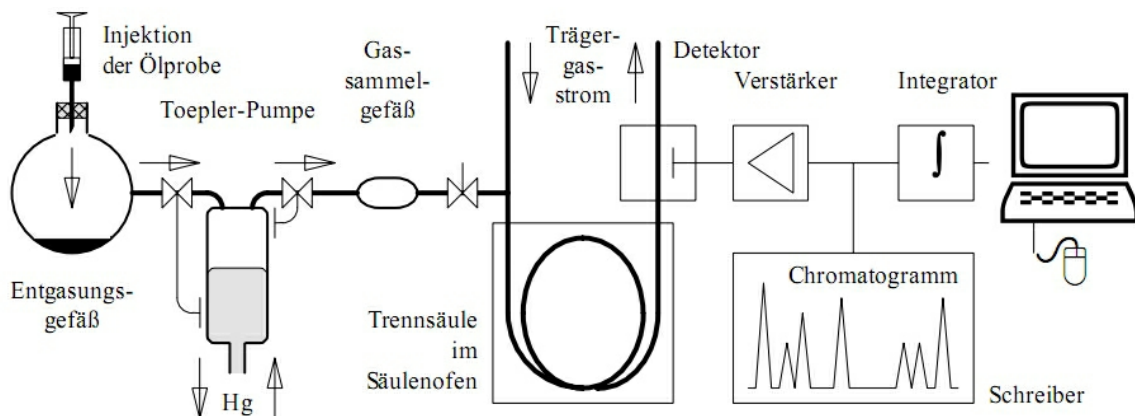


Abbildung 34: Schematischer Aufbau eines Gaschromatographen [28]

Die Analyse der Art der unterschiedlichen, in der Probe enthaltenen Gase geschieht durch Zerlegung des Gasgemisches durch ein Trägergas, das die diversen Anteile durch die Trennsäule transportiert, wobei verschiedene Stoffe verschieden schnell bewegt werden. Dafür wird eine Probe des zu untersuchenden Gasgemisches in den

Trägergasstrom vor der Trennsäule eingebracht und von diesem Gasstrom durch die Säule bewegt. Immer wenn ein Anteil der Probe (nach der Zerlegung in der Säule nur mehr aus einem Stoff bestehend) am Ende der Trennsäule ankommt, wird dies vom Detektor gemeldet. Die Durchlaufzeit durch die Säule ist charakteristisch für die Art des Stoffes und die Amplitude des Ausschlags des Detektors trifft Aussage über die Menge des enthaltenen Stoffes. Dafür ist wiederum eine genaue Kalibrierung mit Gasgemischen bekannter Zusammensetzung unerlässlich [28].

4.3.4 Auswertung und Interpretation

Aufgrund der Tatsache, dass die Art der entstandenen Spaltgase von der Energiedichte an der Fehlerstelle und den beteiligten Isolierstoffen abhängt, lässt sich durch die Kenntnis von Art und Menge der produzierten Gase eine Aussage über das Vorhandensein und die Art eines Fehlers treffen. Es ließen sich aus bisherigen Erfahrungen sogenannte Schlüssel- und Begleitgase bestimmen, die Hinweise auf die Fehler liefern (siehe Tabelle 4) [28]. Es sind aber nicht nur die Absolutwerte dieser Gase ausschlaggebend, auch die Verhältnisse der Gase zueinander geben wichtige Aufschlüsse zur Diagnose der Fehler. Es wurden mehrere Bewertungsverfahren entwickelt, die unterschiedliche Gasquotienten zur Beurteilung verwenden [45].

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Auswertung der durch die Gas-in-Öl-Analyse erhaltenen Daten wurden die nachfolgend beschriebenen Auswertungsschemata herangezogen. Weiters wurden die Gasmengendifferenzen zwischen der Messung vorher und der Messung nachher (absolut in ppm und prozentuell auf den Ausgangswert bezogen) gebildet.

Tabelle 4: Schlüssel- und Begleitgase bei der Fehlererkennung in Transformatoren [28]:

Gasart und maximale normale Gas-konzentration nach mehrjährigem Betrieb von Transformatoren [98] <i>µl/l bzw. ppm</i>			elektrische Entladungen			lokale Überhitzung			Zersetzung von Zellulose	
			Lichtbogen	Funken	TE	>1000°C	1000 ... 300°C	<300°C		
Wasserstoff	H ₂	200	☞	☞	☞	●	○	○		
Methan	CH ₄	50	●●	●	●	●●	●	●		
Äthan (Ethan)	C ₂ H ₆	15	○	○	○	○	○	☞		
Äthylen (Ethylen, Ethen)	C ₂ H ₄	60	●●	●	○	☞	☞	●		
Acetylen (Ethin)	C ₂ H ₂	15	☞	☞	●*)	●	○			
Propan	C ₃ H ₈		○			○	○	●●		
Propylen	C ₃ H ₆		●	○		●	●●	○		
Kohlenmonoxid	CO	1000							☞	
Kohlendioxid	CO ₂	11000							●●	

Schlüsselgase: ☞ Begleitgase: großer Anteil: ●● kleiner Anteil: ● unspezifisch: ○
*) nur bei hoher Energiedichte

4.3.4.1 IEC 60599

Es werden folgende 6 Fehlertypen unterschieden:

- PD Teilentladungen
- D1 Entladungen geringer Energie
- D2 Entladungen hoher Energie
- T1 Temperaturerhöhungen unter 300 °C
- T2 Temperaturerhöhungen zwischen 300 °C und 700 °C
- T3 Temperaturerhöhungen über 700 °C

Die Charakterisierung ergibt sich durch die Gasverhältnisse Ethin/Ethen, Methan/Wasserstoff, Ethen/Ethan und Kohlendioxid/Kohlenmonoxid. Die genauen Koeffizienten der Interpretation sind in Tabelle 4 angeführt. Weiters deutet ein CO₂/CO Verhältnis < 3 oder > 10 darauf hin, dass die Zellulose Schaden genommen hat [45].

Tabelle 5: DGA-Fehlercharakterisierung nach IEC 60599 [47]:

Fehlerart	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	-	<0,1	<0,2
D1	>1	0,1 – 0,5	>1
D2	0,6 – 2,5	0,1 – 1	>2
T1	-	>1	<1
T2	<0,1	>1	1 – 4
T3	<0,2	>1	> 4

4.3.4.2 IEEE Standard

Dieses Verfahren vergleicht zwei, soweit wie möglich auseinanderliegende Messungen miteinander. Unter Zuhilfenahme der Zeit zwischen den Messungen wird aus den aktuellen Werten eine Tagesrate der brennbaren Gase (Total Daily Combustible Gas - TDCG) errechnet.

Für diese Rate gibt es nun - über einem Schwellwert - vier verschiedene Bereiche der Fehlereinstufung, von C1 (zufriedenstellender Betrieb) bis C4 (sicherer Ausfall in kurzer Zeit), siehe Tabelle 6. Zusätzlich dazu werden auch verschiedene Gasverhältnisse herangezogen und entweder nach Dörnenburg oder nach Rogers bewertet [50].

Tabelle 6: Fehlercodes und Kriterien nach IEEE Standard [45]:

Status	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
C1	100	120	35	50	65	350	2500	720
C2	101 - 700	121 - 400	36 - 50	51 - 100	66 - 100	351 - 570	2500 - 4000	721 - 1920
C3	701 - 1800	401 - 1000	51 - 80	101 - 200	101 - 150	571 - 1400	4001 - 10000	1921 - 4630
C4	Mehr	Mehr	Mehr	Mehr	Mehr	Mehr	Mehr	Mehr

Status	Fehler
C1	kein Fehler
C2	Normalbetrieb, Fehler können auftreten
C3	Hohe Fehlerwahrscheinlichkeit
C4	Sichere Fehlerwahrscheinlichkeit

4.3.4.3 MSS / VDE

Das Müller-Schliesing-Soldner-Verfahren bewertet beim Überschreiten einer Absolutmenge an Fehlergasen fünf Quotienten mit einem fünfstelligen Gesamtcode als Ergebnis, siehe Tabelle 7. Es bewertet auch die für thermische Fehler relevanten Gase Propan und Propen [45].

Tabelle 7: MSS Quotientenkriterium [45]:

Fehlerart	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	$\frac{H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_4}{C_3H_6}$	$\frac{CO_2}{CO}$
Quotientenbereiche					
<0,3	0	0	0	0	1
0,3 – 1,0	1	0	0	1	1
1,0 - 3,0	1	1	1	2	1
3,0 - 10,0	2	2	1	3	0
>10,0	2	3	1	3	2
Diagnose	Kennziffern-Folgen				
Normale Alterung	0	0	0	0	0
Entladung mit großer Energie	2	1	2	2/3	1
Entladung mit kleiner Energie	2	2	1	2/3	1
TE hoher Energiedichte	1	3	0	nicht indikativ	0
TE geringer Energiedichte	0	3	0	nicht indikativ	0
örtl. Erwärmung bis 300°C	0	0	0	1	2
örtl. Erwärmung 300 – 1000°C	0	0	1	2	2
örtl. Erwärmung >1000°C	1	0	1	2/3	2
örtl. Erwärmung und Entladung	1	1	1	2	2
örtl. Erwärmung und TE	0	3	1	2	2

4.3.4.4 Dörnenburg

Diese Auswertemethode gibt als Ergebnis eine von drei Fehlerindikationen aus: Temperaturschädigung, Teilentladungen, Überschläge. Es wird nach einem genau definierten Auswertungsschema vorgegangen (siehe Abbildung 35), erst werden Schwellwerte für die Gase überprüft und wenn diese überschritten sind, werden vier Dörnenburg-Verhältnisse überprüft. Nachteilig ist, dass nur eine einzige Fehlerindikation möglich ist und Mischformen nicht detektiert werden [45].

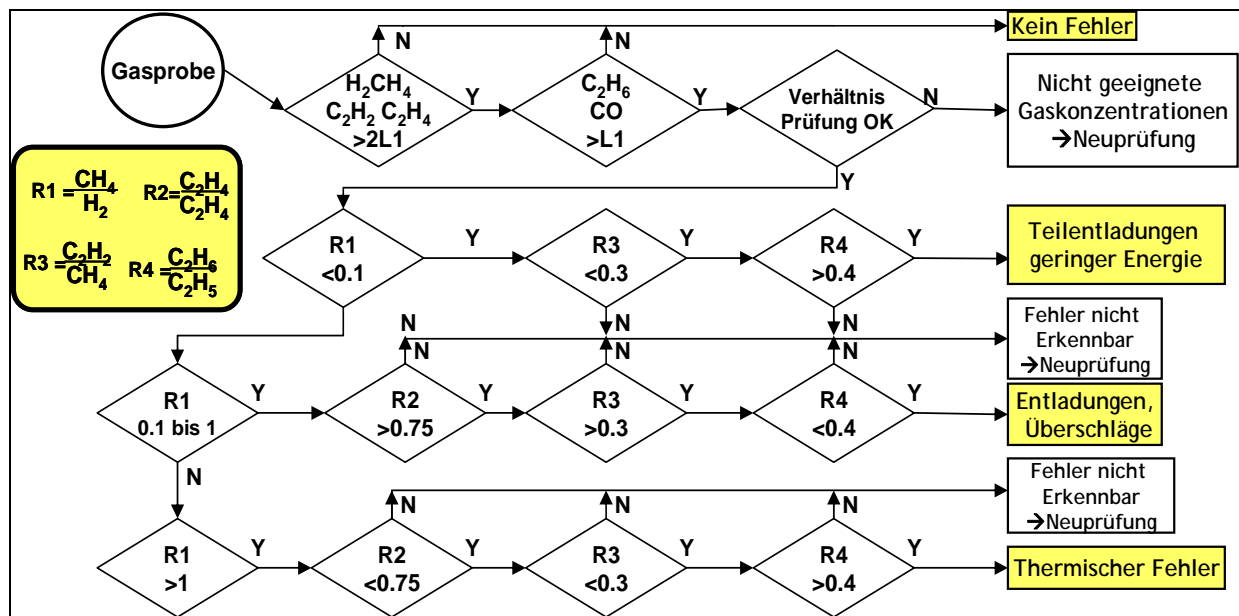


Abbildung 35: Flussdiagramm der Dörnenburg-DGA Bewertung [45]

4.3.4.5 Duval

Die Methode nach Duval wurde ursprünglich zur Analyse der Gase aus dem Buchholzrelais entwickelt und musste für die Verwendung zur DGA-Bewertung erst modifiziert werden. Sie bewertet die drei Gase Methan, Ethen und Ethin nach ihrer prozentuellen Aufteilung, wobei die Summe der drei Gase 100 % entspricht. Die Auswertung erfolgt grafisch am so genannten „Duval-Dreieck“, siehe Abbildung 36 [45].

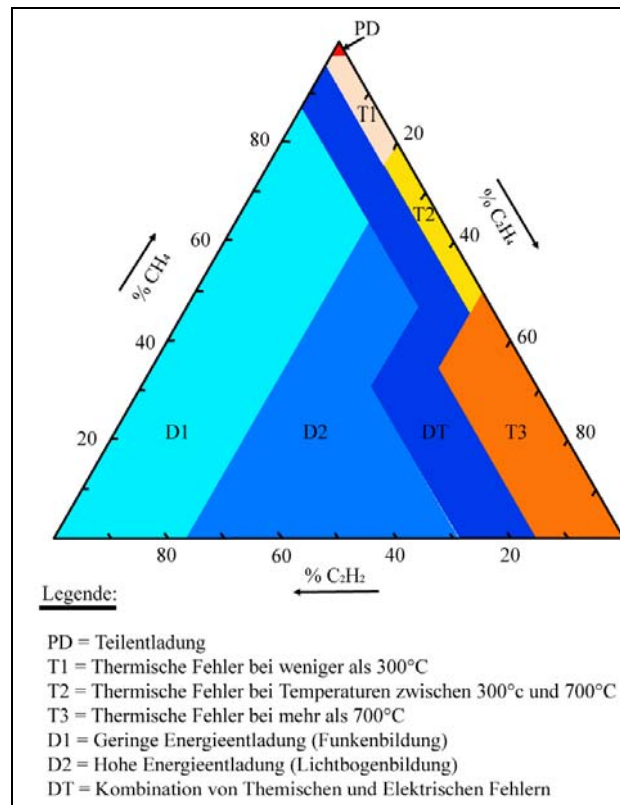


Abbildung 36: Duval'sches Dreieck [45].

4.3.4.6 Rogers

Die Bewertung nach Rogers ist lediglich als Zusatzwerkzeug zu betrachten und nicht als eigenständige Methode zur Fehlerfeststellung. Sie dient zur genaueren Fehlereingrenzung und bedient sich vier verschiedener Gasverhältnisse (siehe Tabelle 8). Die Grenzwerte wurden rein empirisch ermittelt und werden auch in Zukunft Schwankungen unterliegen [45].

Tabelle 8: Fehlercodes nach Rogers [45]:

	Charakteristische Gasverhältnisse	Code der Verhältnisse			Grenzwerte und 10fache Grenzwerte
		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	
	< 0,1	0	1	0	C₂H₂ 1ppm 10ppm C₂H₄ 1ppm 10ppm CH₄ 1ppm 10ppm H₂ 5ppm 50ppm C₂H₆ 1ppm 10ppm
	0,1 – 1	1	0	0	
	1 – 3	1	2	1	
	> 3	2	2	2	
Nr.	Charakteristische Fehler				Typische Beispiele
0	Kein Fehler	0	0	0	Normale Alterung
1	Teilentladungen niedriger Energiedichte	0 aber nicht signifikant	1	0	Entladungen in gasgefüllten Räumen resultierend aus mangelhafter Imprägnierung, Übersättigung, Kavitation oder durch große Feuchtigkeit
2	Teilentladung höherer Energiedichte	1	1	0	Wie oben, führt jedoch zur Perforation von festen Isolierungen
3	Niederenergetische Entladungen	1 → 2	0	1 → 2	Ständige Funkenbildung im Öl durch Potential – Differenzen an schlechten Kontakten
4	Hochenergetische Entladungen	1	0	2	Entladungen mit Leistungsdurchbrüchen, Lichtbogenzusammenbrüche zwischen Windungen oder Spulen oder zwischen Spulen zur Erde. Schalterzerstörende Ströme
5	Thermischer Fehler bei niedriger Temperatur < 150°C	0	0	1	Allgemeine Überhitzung der isolierten Leiter
6	Thermischer Fehler im unteren Temperaturbereich zwischen 150°C – 300°C	0	2	0	Lokale Überhitzung des Kerns durch die Konzentration des Flusses. Zunehmende Hot-Spot- Temperaturen; Variation von kleinen Hot-Spots im Kern, Kurzschlussverbindungen im Kern, Überhitzung des Kupfers durch Wirbelströme, schlechte Kontakte bis zum Kern und Anodenschwingkreisströme.
7	Thermischer Fehler im mittleren Temperaturbereich zwischen 300°C – 700°C	0	2	1	
8	Thermischer Fehler bei hohen Temperaturen > 700°C	0	2	2	

4.4 Weitere chemische und elektrische Untersuchungen an den Flüssigkeiten

Die durchgeführten Untersuchungen gliedern sich in einen chemischen und einen elektrischen Teil. Chemisch wurde vor und nach jedem Versuch sowohl eine DGA-

Untersuchung (siehe Kapitel 4.3) als auch eine Bestimmung der Ölfeuchte mittels der coulometrischen Karl-Fischer-Methode und aus elektrischer Sicht eine Messung der Durchschlagsspannung nach IEC 60156 durchgeführt. Die Ölfeuchte und die Durchschlagsspannung wurden im institutseigenen Öllabor bestimmt, die DGA-Analysen wurden von der Verbund-Umwelttechnik GmbH St. Andrä/Kärnten durchgeführt.

4.4.1 Ölfeuchte – Coulometrische Karl Fischer Titration

Die coulometrische Karl-Fischer-Titration ermittelt über ein elektrochemisches Verfahren den absoluten Wassergehalt einer eingegebenen flüssigen Probe. Um den anteilmäßigen Feuchtwert zu erhalten, ist eine genaue Gewichtsbestimmung der Probe notwendig. Das Messgerät selbst besteht aus zwei Teilen, der Steuereinheit und der eigentlichen Titrationszelle, in welche durch ein Diaphragma die Probe eingebracht wird (siehe Abbildung 37). Dieses Verfahren zur Feuchtebestimmung von Flüssigkeiten und Feststoffen ist bereits seit 1935 bekannt und wird standardmäßig in allen Öllabors verwendet. Es erlaubt Wasserdetektion bis 1 µg, das bedeutet bei Einwaage von einem Gramm kann bis auf 1 ppm (mg/kg) genau gemessen werden. Eine Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Genauigkeit der verwendeten Waage, da nur durch ein hinreichend genau bekanntes Gewicht auch der relative Wasseranteil berechnet werden kann.



Abbildung 37: Ölfeuchtemeßgerät nach Karl Fischer

Der Feuchtegehalt von Mineralöl liegt zwischen 1 und 30ppm. Um solch geringe Wassermengen genau bestimmen zu können, ist ein gewissenhaftes Handling der Proben und ein genaues Arbeiten unerlässlich.

Bei den Esterflüssigkeiten liegt der Feuchtegehalt wesentlich höher, genauer gesagt bis 800ppm, wobei in dieser Arbeit 200ppm als Grenze sowohl beim natürlichen Ester als auch beim synthetischen Ester festgelegt wurde.

Die Feuchtebestimmung mit der coulometrischen Karl-Fischer-Methode basiert auf einer zweistufigen elektrochemischen Reaktion. Im ersten Schritt bildet Schwefeldioxid mit Methanol einen Ester (Alkylsulfid), der mit einer Stickstoffbase (RN) neutralisiert wird (siehe Abbildung 38). Im zweiten Schritt wird dieser Ester mit Jod und Wasser zu Alkylsulfat oxidiert. Das dabei konsumierte Wasser entspricht der zu detektierenden Ölfeuchte.

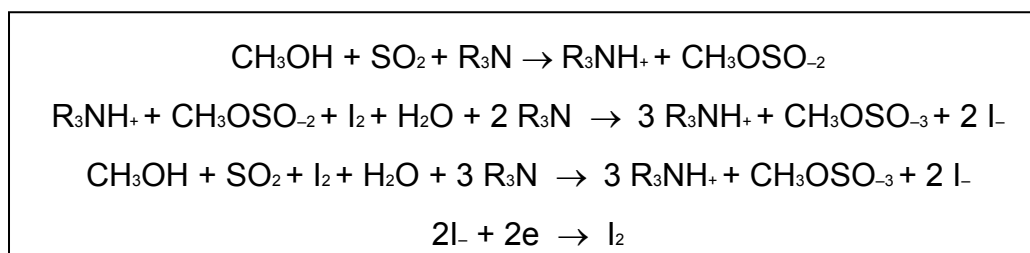


Abbildung 38 Bei der Karl-Fischer-Titration ablaufende Reaktionen [43]

Der elektrochemische Anteil dieses Prozesses ist die Produktion von Jod aus Jodid. Dieses Jod wird mit Hilfe der Generatorelektrode in der Titrationszelle erzeugt. Die Menge an benötigtem Jod entspricht stöchiometrisch genau der zu bindenden Wassermenge und ist durch einfaches Aufintegrieren des Jod-erzeugenden Stromes berechenbar.

Sobald das gesamte Wasser, das mit der Probe in die Titrationszelle eingebracht wurde, mit dem Jod und dem Ester reagiert hat, erfolgt eine Überproduktion (von Jod), die wiederum mit der Sensorelektrode mittels amperometrischer Meßmethode detektiert wird. Damit wird das Ende des Prozesses festgestellt und das Ergebnis steht fest. Ziel des Titrationsprozesses ist also, gerade detektierbar mehr Jod zu erzeugen als für die Wasserabsorption notwendig ist.

Aufgrund der Sensitivität der amperometrischen Messmethode beträgt der detektierbare Jodüberschuss allerdings nur einen vernachlässigbaren Bruchteil des Messwerts. In der Praxis wird der Regelkreis durch eine geringe, stetig in die Zelle eindringende Menge Wasser dazu gezwungen, dauernd ein wenig Jod zu produzieren um diese Menge zu kompensieren. Diese sogenannte Drift bewegt sich im Bereich von weniger als 10 µg/min und muss konstant sein, da sie die eigentliche Stop-Bedingung für die Wasserbestimmung einer Probe darstellt. Es wird in der Praxis so lange titriert, bis der stetige Titrationswert auf den Wert der Drift zurückgegangen ist [44].

Prozeßablauf einer Feuchtebestimmung:

- Vor der Probeneingabe muss sich die Zelle in einem Steady State mit konstanter Drift befinden
- Die Probe wird in die Zelle eingebracht und der Titrationsvorgang durch einen Tastendruck gestartet
- Nun produziert die Zelle Jod und dieses wird mit Wasser kombiniert, bis das gesamte Wasser der eingebrachten Probe aufgebraucht ist und es zu einer Überproduktion von Jod kommt
- Diese Überproduktion wird detektiert und der Prozess gestoppt.
- Der zur Jodproduktion benötigte Strom wurde ausintegriert und so die benötigte Ladung bestimmt

- Aus der Ladung wird über das Faradaysche Gesetz die Jod-Menge und damit die Masse des gebundenen Wassers berechnet
- Nach der Eingabe des Probengewichtes wird der relative Wasseranteil in ppm (mg/kg) angezeigt

Um mögliche Ausreißer und Messunsicherheiten zu eliminieren, wird der Feuchtegehalt dreimal bestimmt und danach gemittelt. Offensichtliche Ausreißer werden aus der Messreihe gestrichen.

4.4.2 Durchschlagspannung nach IEC 60156

Begleitend zu jedem Hauptversuch wurde vor und nach der Prüfung die Durchschlagspannung nach IEC 60156 gemessen. Dafür wurde ein DTA Durchschlagspannungsmessgerät der Firma Baur mit einer genormten Prüftasse verwendet (siehe Abbildung 39).

Für eine Messung wird ein Probenvolumen von 500 ml benötigt. Als Elektroden kommen kalottenförmige Standardelektroden ($R=30\text{ mm}$, $d=2,5\text{ mm}$) zum Einsatz. Die Spannung (AC, 50 Hz) wird von null Volt beginnend, mit einer Anstiegsgeschwindigkeit von 2 kV/s bis zum Durchschlag gesteigert. Dieser Versuch wird sechsmal durchgeführt und danach der Mittelwert gebildet. Zwischen zwei Durchschlägen wird das Öl 5 Minuten mit einem Magnetrührer durchgemischt [49].



Abbildung 39: Prüftasse nach IEC 60156 mit Elektroden und Rührstäbchen [45]

4.5 Auswertungsmethoden

4.5.1 Regression

Um auf einfache Art und Weise die Unabhängigkeit und Tendenzfreiheit der zwei jeweils gemachten Meßserien zu überprüfen, wurde für alle Messreihen eine Analyse mittels linearer Regression durchgeführt.

Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate (die Normalabstände der Geraden zu den einzelnen Messpunkten sind so klein wie möglich) wird in die Messreihe eine Gerade eingepasst, die den Verlauf bestmöglich annähert. Diese wird mit ihrer Gleichung $y = kx + d$ vollständig bestimmt. Streut eine sehr große Anzahl von Messpunkten exakt normalverteilt, so stellt d den Mittelwert dar und die Steigung $k = 0$.

In der Praxis ist jedoch immer eine Steigung $k \neq 0$ gegeben. Kommen bei den Steigungen der einzelnen Messreihen positive und negative Vorzeichen in etwa gleich oft vor und sind die Werte der Steigungen vergleichbar, so kann Unabhängigkeit angenommen werden. Sind die einzelnen Messwerte jedoch abhängig voneinander (etwa eine kontinuierliche Verbesserung oder Verschlechterung während der Messung), so haben die Steigungen aller Messreihen immer das selbe Vorzeichen [42].

4.5.2 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik dient zur übersichtlichen Veranschaulichung bzw. zur zweckmäßigen Beschreibung empirisch ermittelter Daten durch Darstellung spezieller Kennwerte in Grafiken und Tabellen. [42]. Für die in dieser Arbeit ermittelten Daten wurden der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung verwendet.

Arithmetischer Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert ist ein Schätzwert für den Erwartungswert, auch Stichprobenmittel oder Durchschnitt genannt. Er errechnet sich wie folgt [42]:

$$\bar{x}_{\text{arithm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Standardabweichung

Die Standardabweichung ist ein Maß der Streuung der Messwerte um den Mittelwert. Sie besitzt dieselbe Dimension wie die Stichprobe und entspricht der mittleren Abweichung vom Mittelwert [42] und wird mit der Formel

$$\sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

berechnet.

4.5.3 Sichtung der Durchschlagspuren an der Zellulose

Die Auswertung der zum Teil erkennbaren optischen Durchschlagspuren an den Proben wurde durch Sichtung durchgeführt. In Tabelle 9 sind die verwendeten Kategorien, zu denen die Proben zugeordnet wurden, angeführt.

Tabelle 9: Kategorien der Durchschlagspuren der Papierproben:

Sichtbare Spur	Kategorie	Abkürzung
Keine optischen Spuren sichtbar	Öldurchschlag	K0
Verfärbung der Probe, keine oder nur sehr geringe Eindringtiefe	Papierdurchschlag	K1
Durchschlagkanal gut sichtbar, zum Teil Furchen	Papierdurchschlag	K2

5 Ergebnisse

5.1 Durchschlagspannungsuntersuchungen am Öl-Papier-Isoliersystem

Hier sind die Ergebnisse der Untersuchungen der elektrischen Festigkeit aufgeführt. Beginnend mit den Messwerten (siehe Tabelle 10 bis Tabelle 12), es folgen die Untersuchungen der Ergebnisse auf Abhängigkeit und Verteilung (siehe Kapitel 5.1.1) bis zu den Ergebnissen der deskriptiven Statistik (siehe Kapitel 5.1.2)

Tabelle 10: Die gemessenen Werte der einzelnen Proben für die Durchschlaguntersuchungen mit Mineralöl:

	Temp	Reihe	Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	°C			kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
Mineralöl	20	1	10 mm	55	55	65	60	50	55	60	55	55	40
				55	60	65	60	50	60	55	50	60	55
		2	20 mm	70	75	80	75	70	85	75	75	65	65
				75	65	80	75	80	70	70	85	75	85
	-10	1	10 mm	65	55	45	65	60	65	60	65	70	75
				65	65	65	60	60	65	55	65	65	60
		2	20 mm	100	85	85	85	90	100	95	85	90	85
				85	85	80	80	75	95	85	90	90	85
	-25	1	10 mm	50	55	55	55	55	50	55	65	50	50
				65	50	50	55	55	50	60	55	55	55
		2	20 mm	70	70	55	75	65	75	75	75	75	70
				70	70	75	70	65	75	65	70	75	65

Tabelle 11: Die gemessenen Werte der einzelnen Proben für die Durchschlaguntersuchungen mit synthetischem Ester:

	Temp.	Reihe	Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	°C			kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
Synthetischer Ester	20	1	10 mm	80	80	75	60	70	80	75	65	75	65
		2		75	70	75	65	65	75	70	80	75	65
		1	20 mm	95	90	130	105	110	120	110	120	95	110
		2		90	105	100	110	95	95	100	100	95	90
	-10	1	10 mm	70	80	95	80	90	90	85	75	80	70
		2		60	80	75	75	70	95	75	80	60	70
		1	20 mm	90	95	90	90	95	90	90	95	95	95
		2		115	120	80	100	100	95	85	95	100	100
	-25	1	10 mm	75	75	75	70	80	70	65	65	75	80
		2		75	45	70	70	80	70	65	70	70	65
		1	20 mm	100	95	105	105	110	105	110	105	105	80
		2		100	115	95	110	95	85	105	115	100	115

Tabelle 12: Die gemessenen Werte der einzelnen Proben für die Durchschlaguntersuchungen mit natürlichem Ester:

	Temp.	Reihe	Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	°C			kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
Natürlicher Ester	20	1	10 mm	60	70	60	60	75	75	80	70	70	70
		2		75	70	75	75	75	65	65	65	60	60
		1	20 mm	110	100	100	90	110	110	95	115	80	95
		2		105	100	105	105	90	80	90	80	100	95
	-10	1	10 mm	70	80	70	80	70	80	75	75	70	80
		2		80	80	80	85	85	90	70	75	80	75
		1	20 mm	85	80	85	85	90	90	85	95	90	95
		2		90	95	90	105	95	105	110	105	90	90

5.1.1 Untersuchungen von Unabhängigkeit und Verteilungsfunktion

Zur Feststellung der Unabhängigkeit wurde eine Regressionsanalyse der Versuchsreihen mittels Excel durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Die berechneten Werte für die Steigungen k der Regressionsgeraden der durchgeführten Versuchsreihen mit Mineralöl, synthetischem Ester und natürlichem Ester (je kleiner die Werte für k sind, desto weniger Tendenz besitzen die Messwerte):

Regression Mineralöl			Regression synthetischer Ester		
Temperatur / Distanz	k Reihe 1	k Reihe 2	Temperatur / Distanz	k Reihe 1	k Reihe 2
20°C 10mm	-1,09	-0,48	20°C 10mm	-1,00	0,00
20°C 20mm	-0,75	0,96	20°C 20mm	0,87	-0,66
-10°C 10mm	1,72	-0,33	-10°C 10mm	-0,50	0,00
-10°C 20mm	-0,36	0,72	-10°C 20mm	0,39	-1,50
-25°C 10mm	0,06	-0,12	-25°C 10mm	-0,18	0,33
-25°C 20mm	0,87	-0,24	-25°C 20mm	-0,6	0,63

Regression natürlicher Ester		
Temperatur / Distanz	k Reihe 1	k Reihe 2
20°C 10mm	1,21	-1,78
20°C 20mm	1,12	-1,63
-10°C 10mm	0,24	-0,66
-10°C 20mm	1,27	0,39

In Abbildung 40 sind die Wahrscheinlichkeitsnetze der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Diese wurden sowohl für Normalverteilung als auch für Weibullverteilung (beide mit Konfidenzintervall 95 %) berechnet.

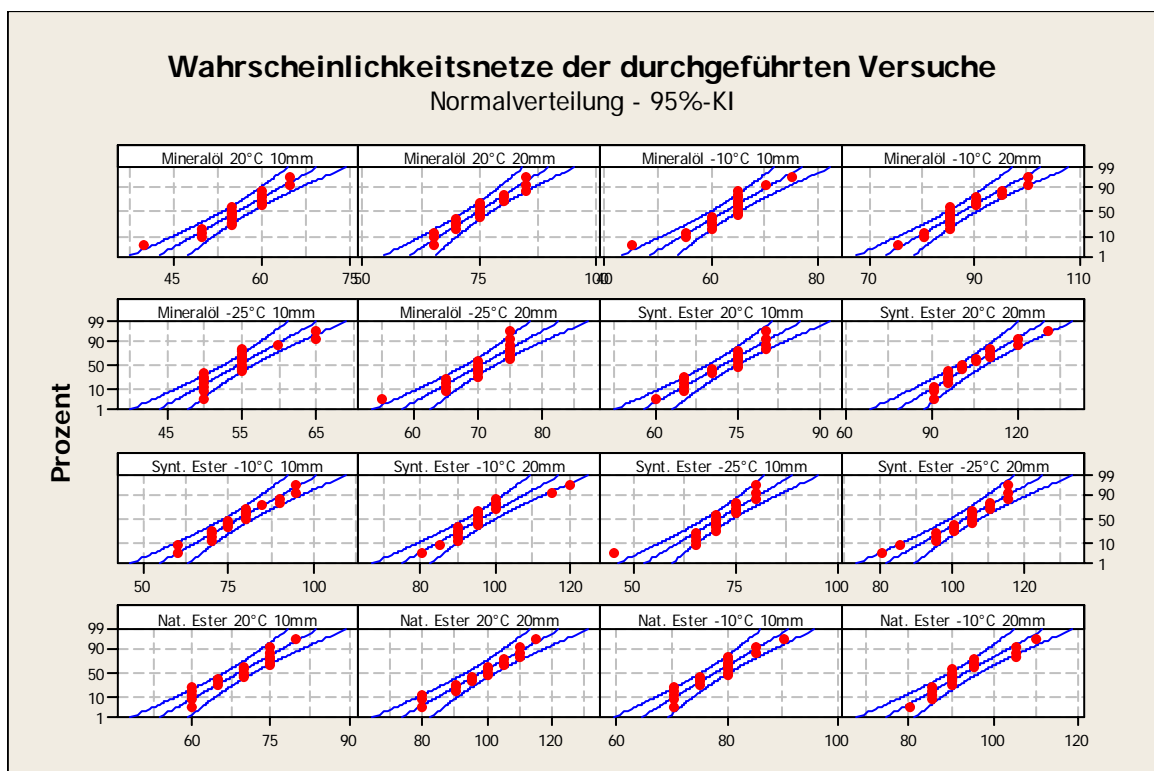
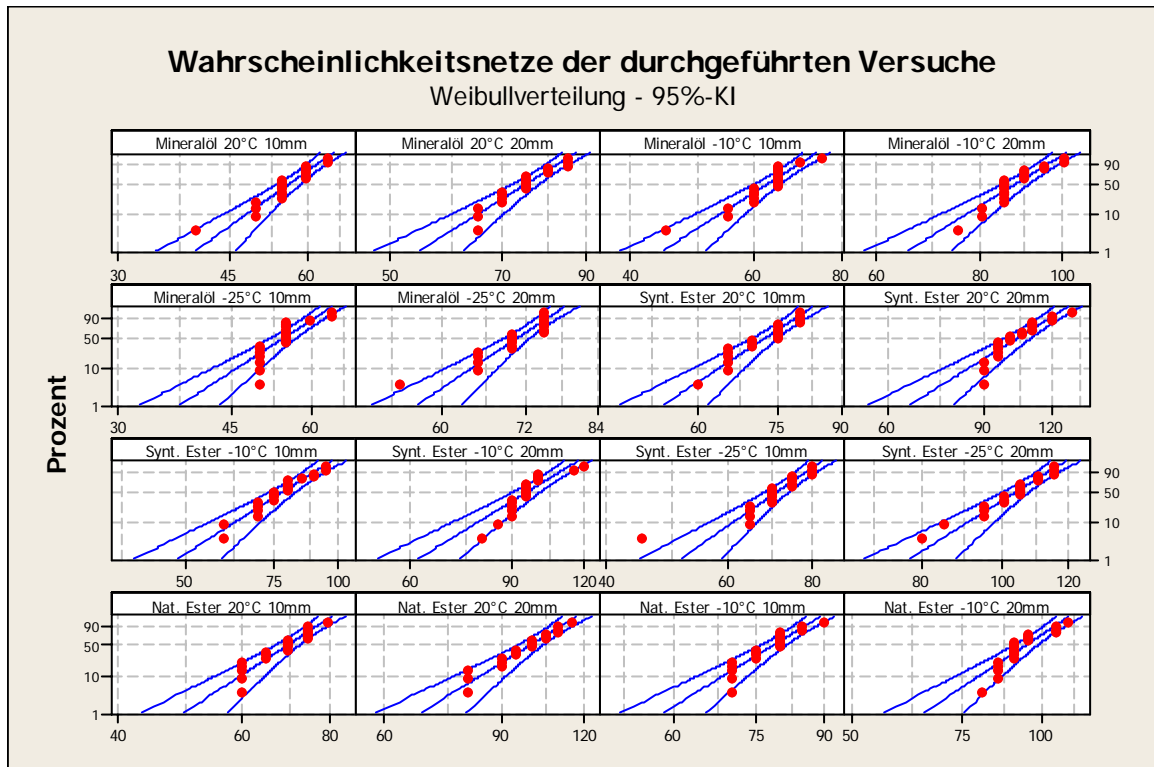


Abbildung 40: Die aus den Ergebnissen der Versuche berechneten Wahrscheinlichkeitsnetze OBEN: für Weibullverteilung; UNTEN: für Normalverteilung;

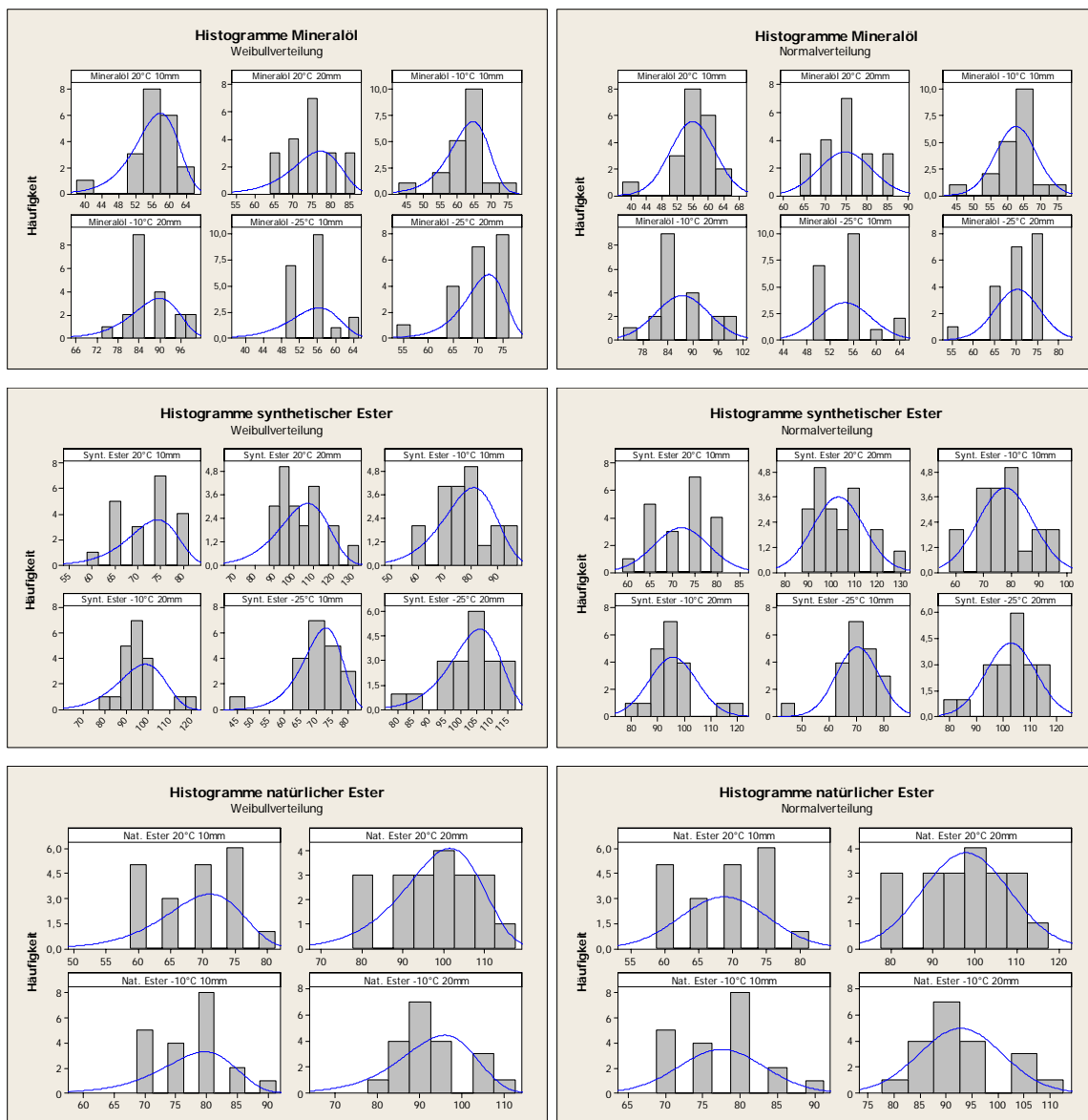


Abbildung 41: Die Histogramme zu den erhaltenen Versuchsdaten, für jede Flüssigkeit sowohl mit angepasster Weibull- als auch mit angepasster Normalverteilung. OBEN: für Mineralöl; MITTE: für den synthetischen Ester; UNTEN: für den natürlichen Ester

5.1.2 Ergebnisse der deskriptiven Statistik

In Diagramm 1 sind die Mittelwerte der Durchschlagsspannungen und zugehörigen Standardabweichungen der durchgeführten Versuche zusammengefasst. Die Werte dazu finden sich in Tabelle 14. Die zur Berechnung der Durchschlagsspannungen

herangezogenen Werte der einzelnen Proben sind in Tabelle 10 bis Tabelle 12 aufgelistet.

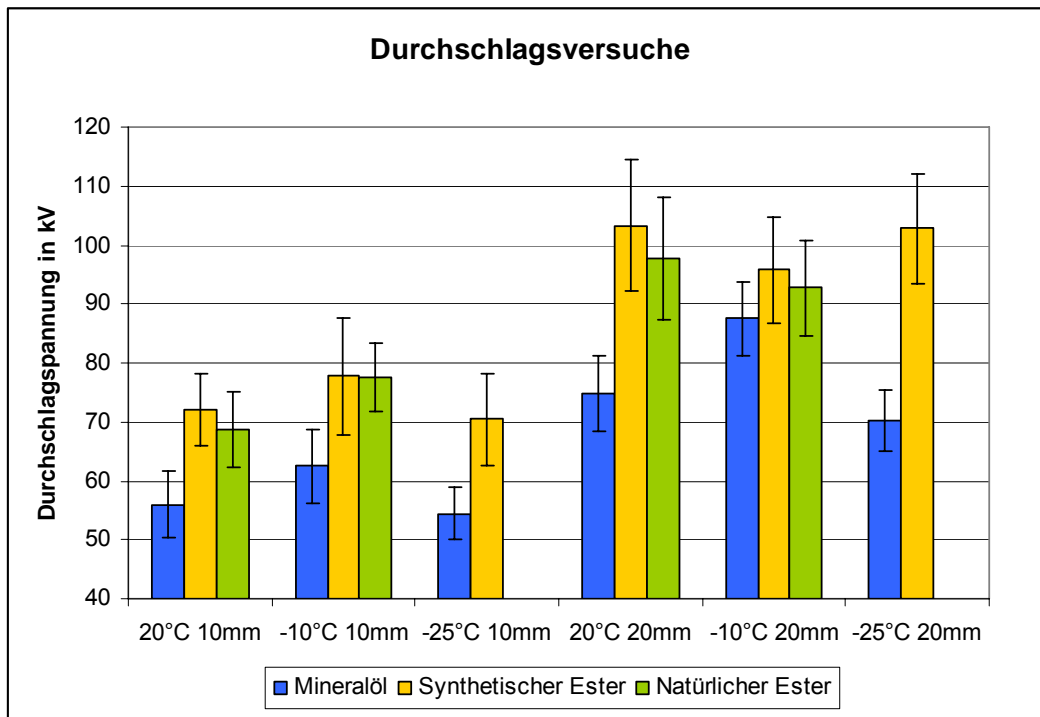


Diagramm 1: Die Mittelwerte und Standardabweichungen der durchgeführten Versuche mit den drei Flüssigkeiten

Tabelle 14: Mittelwerte und Standardabweichungen der Durchschlaguntersuchungen in Tabellenform:

Flüssigkeit		Temperatur und Abstand					
		20°C 10mm	-10°C 10mm	-25°C 10mm	20°C 20mm	-10°C 20mm	-25°C 20mm
MW in kV	Mineralöl	56,0	62,5	54,5	74,8	87,5	70,3
	Synthetischer Ester	72,0	77,8	70,5	103,3	95,8	102,8
	Natürlicher Ester	68,8	77,5	0,0	97,8	92,8	0,0
STDABW in kV	Mineralöl	5,8	6,2	4,6	6,4	6,4	5,3
	Synthetischer Ester	6,2	9,9	7,8	11,2	9,1	9,4
	Natürlicher Ester	6,5	5,7	0,0	10,4	8,0	0,0

5.2 Gas-in-Öl-Analyse

In Tabelle 15 sind die grundsätzlichen Werte sämtlicher analysierten Proben dargestellt. In den darauf folgenden Unterkapiteln werden die Interpretationen und Auswertungen nach verschiedenen gängigen Verfahren (Doernenburg, Rogers, IEC, MSS, Duval und IEEE, siehe Kapitel 4.3.4) gezeigt.

Tabelle 15: Ergebnisse der Gas-in-Öl-Analyse, Auflistung der Mengen aller analysierten Gase, V = vor der Durchschlagprüfung, N = danach; TGG = Gesamtgasgehalt:

Gaskonzentration Mineralöl in ppm														
Temp.	Nr.	V / N	TGG	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈
20°C	1	V	7,8%	23350	53360	21,1	8,1	291	3,9	12,7	4,4	0,7	13,7	2,3
		N	7,7%	23360	52140	155	18,2	302	28	256	55,9	4,9	27,6	5
	2	V	7,8%	23410	53390	42,9	8,4	271	4,5	22,1	6,3	0,6	2,8	0,4
		N	7,3%	21570	50110	151	14,7	274	29,5	278	58,9	5	21,6	2
-10°C	1	V	8,9%	26300	61200	66,7	15,6	386	3	2,9	2,6	0,3	1,7	0,4
		N	8,9%	26350	60460	98,4	18,2	376	18,5	192	39,5	3,5	18,3	1,6
	2	V	9,2%	27450	63120	50,1	10,4	443	2,9	2,4	2	0,2	1,1	0,2
		N	9,3%	28030	62050	68,7	14,9	479	11,6	104	22,7	2,1	10,4	1
-25°C	1	V	8,7%	25450	60270	54,7	13,7	372	3,6	3,4	2,7	0,3	2	0,3
		N	8,1%	24950	54850	34,7	13	361	5,5	32,5	8,5	0,8	4,8	0,6
	2	V	8,1%	24180	55370	14	10,1	377	2,4	2	1,8	0,2	1,4	0,3
		N	8,5%	25430	57340	56	12,5	396	6,5	46,8	11,5	1	5,9	0,5

Gaskonzentration synthetischer Ester in ppm														
Temp.	Nr.	V / N	TGG	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈
20°C	1	V	7,4%	20560	52190	14	13	454	2,4	1,7	2,4	0,4	1,6	0,4
		N	7,4%	20210	52950	61,2	34	507	6,5	141	17,1	1,3	4,3	0,8
	2	V	7,6%	21900	53060	83,7	27,9	553	5,2	79	11,4	1	3,7	0,7
		N	7,7%	21710	53970	75,8	45,9	593	9,2	201	25	1,9	6,3	1,1
-10°C	1	V	8,4%	24230	58200	28,3	18,8	658	2,8	1,1	1,6	0,3	0,7	0,1
		N	8,6%	24690	58700	11,9	17,2	745	3,3	15,5	2,6	0,4	1,1	0,4
	2	V	8,6%	24620	59400	24,9	23,3	771	4,3	11,7	3,1	0,6	1,3	0,4
		N	8,6%	25050	59310	23,5	28,6	725	4,9	45,5	6,4	0,8	1,9	0,5
-25°C	1	V	8,5%	24370	58550	14,2	14,6	832	3,3	0,7	1,4	0,4	1	0,3
		N	8,3%	24180	57820	12,6	15,8	632	3,2	38,1	2,7	0,4	1,1	0,3
	2	V	7,7%	22160	52710	52,2	6	620	3,1	8,1	2,8	0,5	1,5	0,5
		N	7,5%	21580	52310	19,5	9,8	482	3,7	62,6	5,6	0,6	1,8	0,4

Gaskonzentration natürlicher Ester in ppm														
Temp.	Nr.	V / N	TGG	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈
20°C	1	V	6,2%	830	55730	35	9,4	586	2,7	1,2	0,7	3,3	0,6	0,6
		N	6,2%	250	57940	110	56,1	559	10,7	261	30,1	6,3	5,5	1,1
	2	V	6%	4850	52490	33,2	9,8	522	3,5	13,1	2	2,9	0,5	0,4
		N	6,3%	4510	55260	95,5	35,2	589	9	208	23,5	4	3,3	0,8
-10°C	1	V	7%	9360	58490	37,6	9,7	653	2,8	0,5	0,5	1,9	0,4	0,4
		N	7,4%	10330	60860	54,8	13,6	708	5,6	54,7	8,2	2,4	1,7	0,7
	2	V	7,6%	14650	59300	10,9	13,3	476	2,9	3,4	1,6	1,3	0,3	0,2
		N	7,3%	14240	57850	39,2	14,4	393	5,7	57	9,1	1,6	1,5	0,4

Tabelle 16: Mittelwerte (aus allen Messreihen bei allen Temperaturen der jeweiligen Flüssigkeit) und Standardabweichungen der Gasdifferenzen der Durchschlaguntersuchungen in % des Ausgangswertes und absolut in ppm:

Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen												
Art	Flüssigkeit	Größe	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	
ppm	Mineralöl	MW	52,4	4,2	8,0	13,2	144,0	29,5	2,5	11,0	1,1	
		STDABW	57,7	3,7	18,0	9,9	99,3	20,5	1,7	6,5	0,9	
	syn. Ester	MW	-2,1	8,0	-34,0	1,6	66,9	6,1	0,4	1,1	0,2	
		STDABW	26,9	9,3	115,1	1,9	51,3	6,3	0,4	1,2	0,2	
	nat. Ester	MW	45,7	19,3	3,0	4,8	140,6	16,5	1,2	2,6	0,4	
		STDABW	27,4	21,3	70,9	2,5	103,6	10,8	1,2	1,7	0,1	
%	Mineralöl	MW	205,8	46,4	2,1	369,0	2820,6	868,9	652,8	509,4	230,7	
		STDABW	247,8	46,9	4,4	229,2	2166,4	438,0	337,4	373,0	154,2	
	syn. Ester	MW	31,7	52,0	-3,4	49,3	2660,4	182,3	66,9	62,1	77,0	
		STDABW	151,8	61,2	16,8	65,4	3331,6	211,6	83,0	56,9	117,2	
	nat. Ester	MW	176,8	201,1	-0,2	162,5	8888,6	1820,9	44,6	525,4	89,6	
		STDABW	92,3	226,5	13,7	93,4	9572,5	1645,6	31,6	217,5	12,5	

5.2.1 Interpretationsergebnisse allgemein anerkannter Schemata

Die Ergebnisse der Gas-in-Öl-Analyse wurden mit den sechs Schemata nach Doernenburg, Rogers, IEC, MSS, Duval und IEEE ausgewertet, und die Ergebnisse sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Abkürzungen sind am unteren Ende der Tabellengruppe erläutert.

Tabelle 17: Ergebnisse der Interpretationen der Gas-in-Öl-Analyse nach verschiedenen Schemata, DARUNTER: Abkürzungen:

Mineralöl	20 °C	20 °C	-10 °C	-10 °C	-25 °C	-25 °C
	1	2	1	2	1	2
Doernenburg	LNÜ	LNÜ	FNE	LNÜ	LNÜ	FNE
Rogers	FNE	FNE	FNE	FNE	FNE	FNE
IEC	D1 / ZT	D1 / ZT	D1 / ZT	D1 / ZT	D1 / ZT	D1 / ZT
MSS	FNE	FNE	D1	FNE	FNE	FNE
Duval	D1	D1	D1	D1	LNÜ	D1
IEEE/TDGC	C1	C1	C1	C1	C1	C1

Synthetischer Ester	20 °C	20 °C	-10 °C	-10 °C	-25 °C	-25 °C
	1	2	1	2	1	2
Doernenburg	FNE	FNE	LNÜ	FNE	FNE	FNE
Rogers	FNE	FNE	FNE	FNE	FNE	FNE
IEC	D1 / ZT / ST	D1 / ZT / ST	D1 / ZT	D1 / ZT	D1 / ZT / ST	D1 / ZT / ST
MSS	D1	D1	FNE	D1	FNE	D1
Duval	D1	D1	LNÜ	D1	D1	D1
IEEE/TDGC	C1	C1	C1	C1	C1	C1

Natürlicher Ester	20 °C	20 °C	-10 °C	-10 °C
	1	2	1	2
Doernenburg	FNE	FNE	FNE	FNE
Rogers	FNE	FNE	FNE	FNE
IEC	OX / ST	ZT / OX / ST	D1 / ZT / OX	D1 / ZT / OX
MSS	FNE	FNE	D1	D1
Duval	D1	D1	D1	D1
IEEE/TDGC	C1	C1	C1	C1

D1	Entladungen niedriger Energie
D2	Entladungen hoher Energie
T1	Temperaturfehler unter 300 °C
T2	Temperaturfehler zwischen 300 und 700 °C
T3	Temperaturfehler über 700°C
LNÜ	Limit nicht überschritten
FNE	Fehler nicht erkannt
C1	Kein Fehler
C2	Normalbetrieb, Fehler können auftreten
C3	Hohe Fehlerwahrscheinlichkeit
C4	Sichere Fehlerwahrscheinlichkeit
ZT	Zellulosezerersetzung thermisch
ST	Mögl. Kontamination durch Stufenschalter
OX	Öloxydation

5.2.2 Gasbildung bei den Versuchen in Absolutwerten (ppm)

Als wichtigstes Kriterium der Untersuchungen der erzeugten Gase wurden hier in den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 die Differenzen der gemessenen Gase vor und nach den Durchschlaguntersuchungen berechnet. Zum Teil sind diese Differenzen so hoch und unterschiedlich, dass ungleiche Maßstäbe für verschiedene Gase verwendet werden mussten. In Diagramm 2 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der errechneten Differenzen der gemessenen Gase in ppm dargestellt und in Diagramm 3 bis Diagramm 5 die Werte der Differenzen der einzelnen Versuche zum Vergleich.

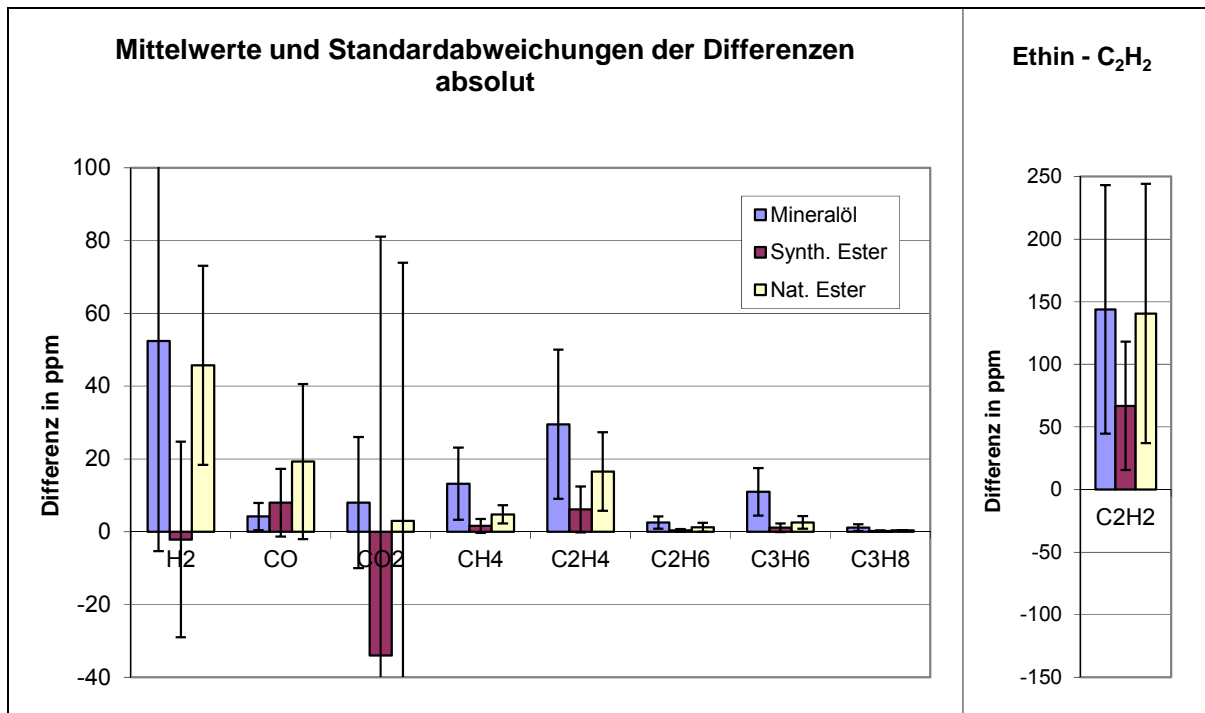


Diagramm 2: Die Differenzen der gemessenen Gase vor und nach den Durchschlagversuchen in Absolutwerten (Mittelwert und Standardabweichung, Einheit: ppm). LINKS: alle gemessenen Schadgase außer Ethin; RECHTS: die gemessenen Werte von Ethin, wegen der herausragenden Mengen in einem anderen Maßstab dargestellt

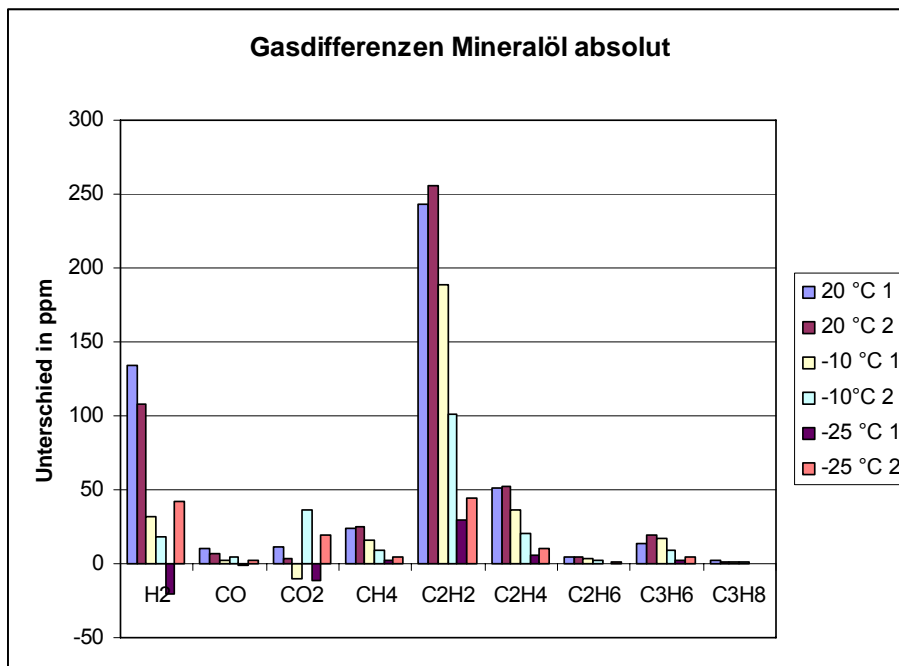


Diagramm 3: Die Gasdifferenzen der einzelnen Versuche in Absolutwerten (in ppm) für Mineralöl

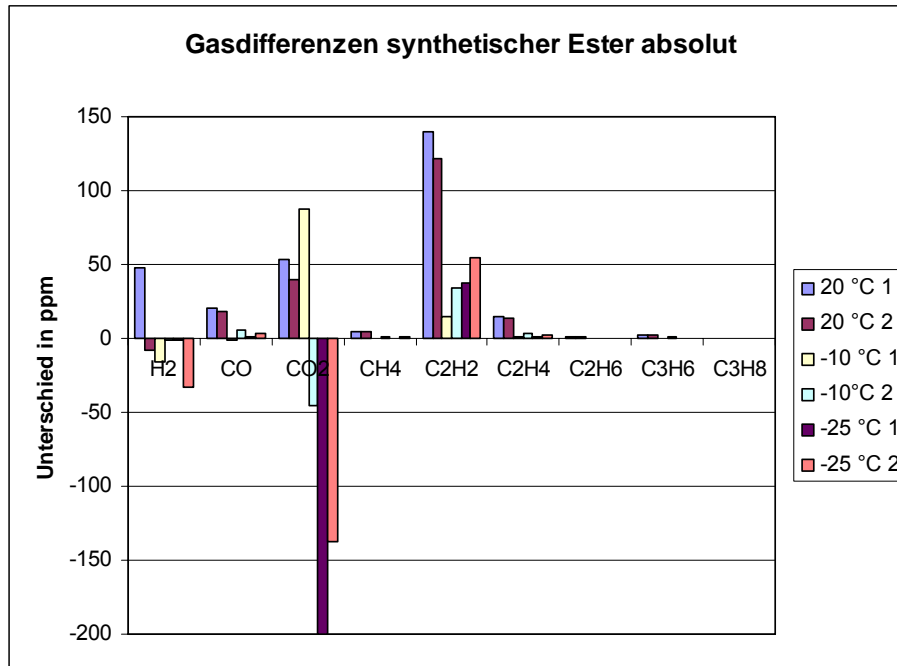


Diagramm 4: Die Gasdifferenzen der einzelnen Versuche in Absolutwerten (in ppm) für den synthetischen Ester

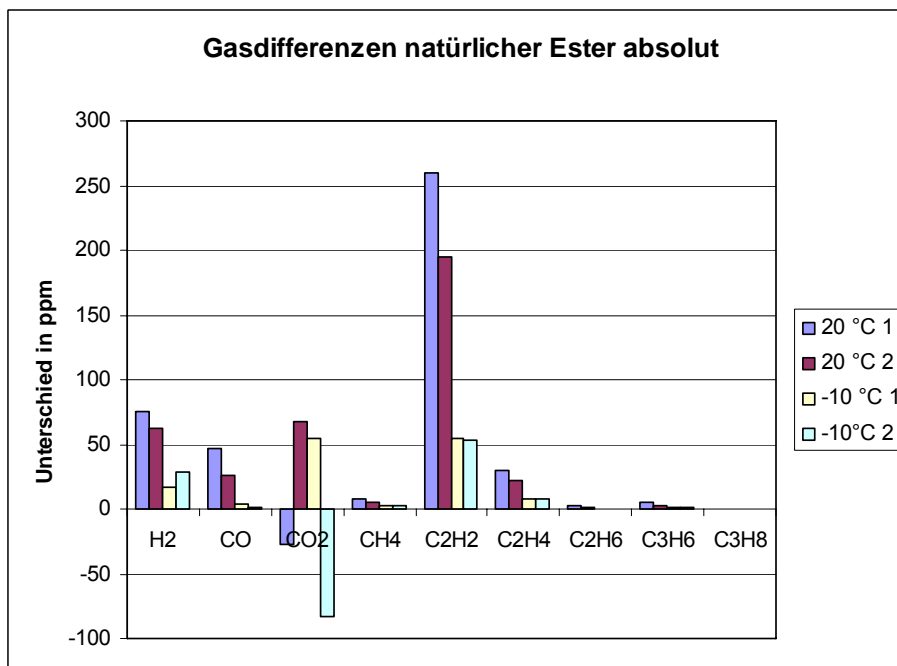


Diagramm 5: Die Gasdifferenzen der einzelnen Versuche in Absolutwerten (in ppm) für die natürlichen Ester

Tabelle 18: Die errechneten Unterschiede in den Gaskonzentrationen vor und nach den Durchschlagversuchen in Absolutwerten (in ppm bzw. mg/kg; TGG = Gesamtgasgehalt):

Gasdifferenzen Mineralöl in ppm													
Temp.	Nr.	TGG	O2	N2	H2	CO	CO2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
20°C	1	-0,1	10	-1220	133,9	10,1	11	24,1	243,3	51,5	4,2	13,9	2,7
	2	-0,5	-1840	-3280	108,1	6,3	3	25,0	255,9	52,6	4,4	18,8	1,6
-10°C	1	0	50	-740	31,7	2,6	-10	15,5	189,1	36,9	3,2	16,6	1,2
	2	0,1	580	-1070	18,6	4,5	36	8,7	101,6	20,7	1,9	9,3	0,8
-25°C	1	-0,6	-500	-5420	-20,0	-0,7	-11	1,9	29,1	5,8	0,5	2,8	0,3
	2	0,4	1250	1970	42,0	2,4	19	4,1	44,8	9,7	0,8	4,5	0,2

Gasdifferenzen synthetischer Ester in ppm													
Temp.	Nr.	TGG	O2	N2	H2	CO	CO2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
20°C	1	0	-350	760	47,2	21,0	53	4,1	139,3	14,7	0,9	2,7	0,4
	2	0,1	-190	910	-7,9	18,0	40	4,0	122,0	13,6	0,9	2,6	0,4
-10°C	1	0,2	460	500	-16,4	-1,6	87	0,5	14,4	1,0	0,1	0,4	0,3
	2	0	430	-90	-1,4	5,3	-46	0,6	33,8	3,3	0,2	0,6	0,1
-25°C	1	-0,2	-190	-730	-1,6	1,2	-200	-0,1	37,4	1,3	0,0	0,1	0,0
	2	-0,2	-580	-400	-32,7	3,8	-138	0,6	54,5	2,8	0,1	0,3	-0,1

Gasdifferenzen natürlicher Ester in ppm													
Temp.	Nr.	TGG	O2	N2	H2	CO	CO2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
20°C	1	0,0	-580	2210	75,0	46,7	-27	8,0	260	29,4	3,0	4,9	0,5
	2	0,3	-340	2770	62,3	25,4	67	5,5	195	21,5	1,1	2,8	0,4
-10°C	1	0,4	970	2370	17,2	3,9	55	2,8	54	7,7	0,5	1,3	0,3
	2	-0,3	-410	-1450	28,3	1,1	-83	2,8	54	7,5	0,3	1,2	0,2

5.2.3 Gasbildung bei den Versuchen relativ (in % des Ausgangswertes)

Die Gasbildung wurde auch in Prozent, relativ zum Ausgangswert, dargestellt. Dabei ergeben sich bei den Esterflüssigkeiten für Ethin (und z.T. für Ethen) so hohe Unterschiede zu den anderen Gasen, dass diese in getrennten Maßstäben abgebildet werden mussten, um eine übersichtliche Darstellung zu erreichen. In Diagramm 6 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der errechneten

Differenzen der gemessenen Gase in % dargestellt und in Diagramm 7 bis Diagramm 9 die Werte der Differenzen der einzelnen Versuche zum Vergleich.

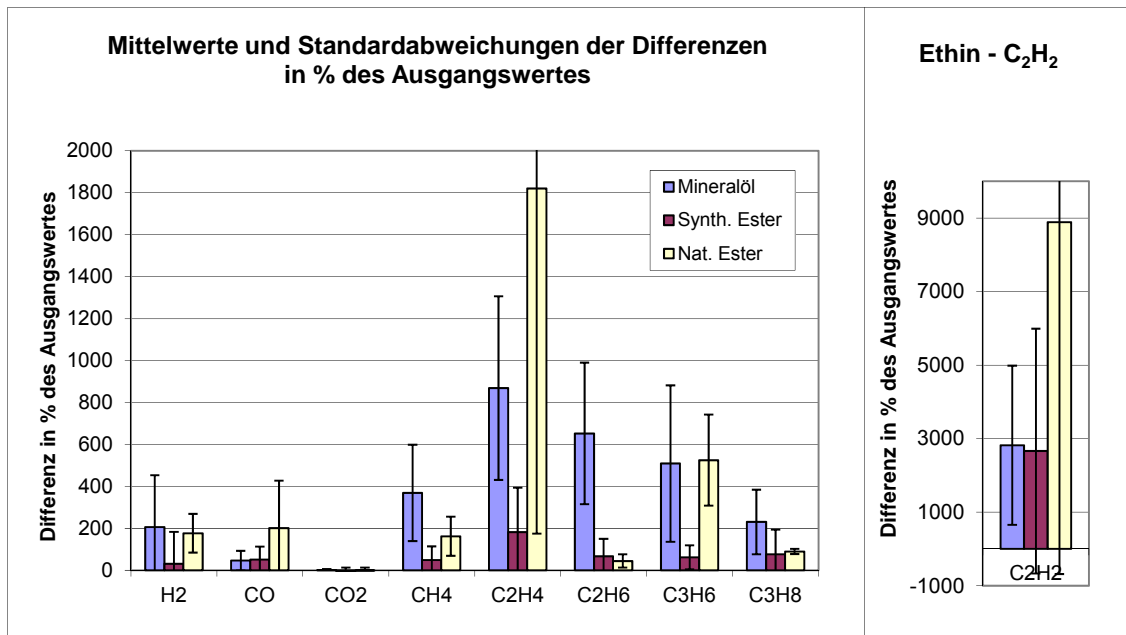


Diagramm 6: Die Differenzen der gemessenen Gase vor und nach den Durchschlagversuchen in Relativwerten (Mittelwert und Standardabweichung, Darstellung in % des Ausgangswertes). LINKS: alle gemessenen Schadgase außer Ethin; RECHTS: die gemessenen Werte von Ethin, wegen der herausragenden Mengen in einem anderen Maßstab dargestellt

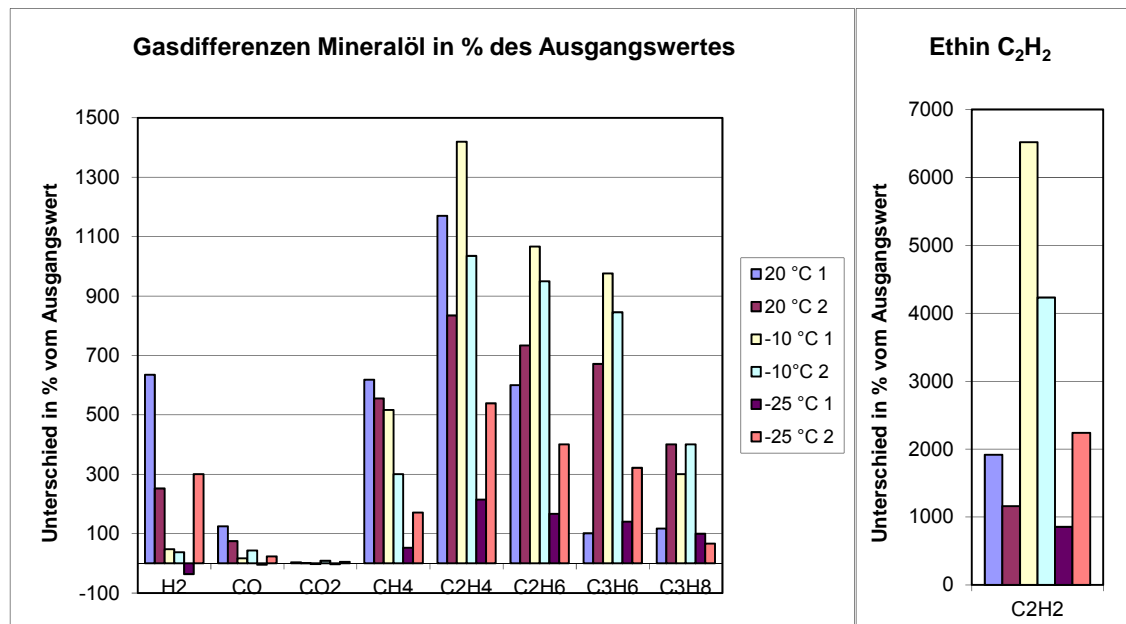


Diagramm 7: Die relativen Gasdifferenzen der einzelnen Versuche (in % des Ausgangswertes) für Mineralöl; LINKS: alle gemessenen Schadgase außer Ethin; RECHTS: die gemessenen Werte von Ethin, wegen der herausragenden Mengen in einem anderen Maßstab dargestellt

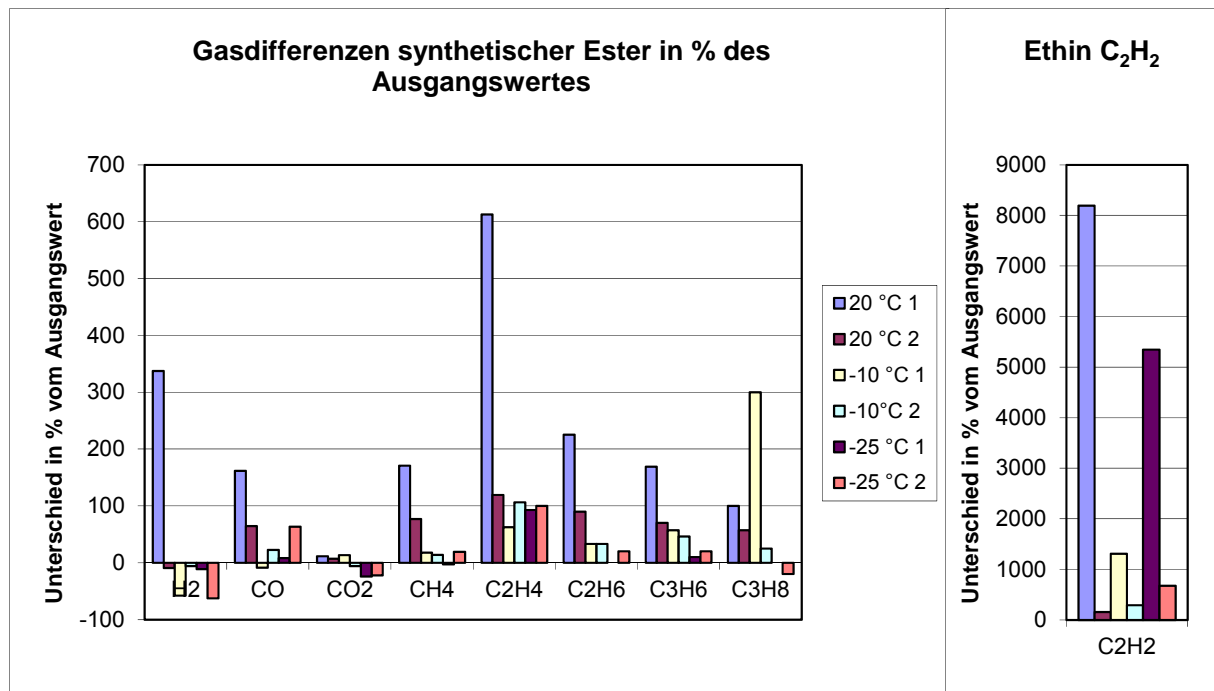


Diagramm 8: Die relativen Gasdifferenzen der einzelnen Versuche (in % des Ausgangswertes) für synthetischen Ester. LINKS: Ergebnisse für alle Gase außer Ethin; RECHTS: Ethin, aufgrund der hohen Werte in einem anderen Maßstab dargestellt

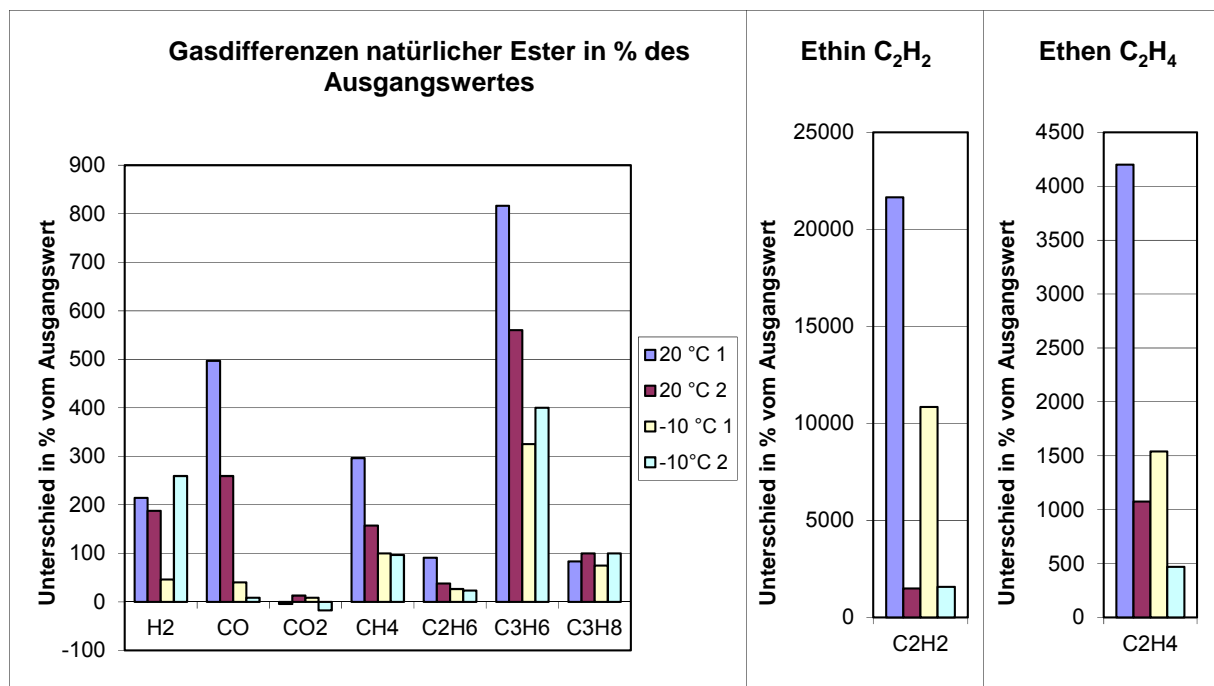


Diagramm 9: Die relativen Gasdifferenzen der einzelnen Versuche (in % des Ausgangswertes) für natürlichen Ester. LINKS: Ergebnisse für alle Gase außer Ethin und Ethen; MITTE und RECHTS: Ethen und Ethin, aufgrund der hohen Werte in einem anderen Maßstab dargestellt

Tabelle 19: Die errechneten Unterschiede in den Gaskonzentrationen vor und nach den Durchschlagversuchen in Prozent des Ausgangswertes:

Gasdifferenzen Mineralöl in % des Ausgangswertes													
Temp.	Nr.	TGG	O2	N2	H2	CO	CO2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
20°C	1	-1,3	0,0	-2,3	634,6	124,7	4	618	1916	1170	600	101	117
	2	-6,4	-7,9	-6,1	252,0	75,0	1	556	1158	835	733	671	400
-10°C	1	0,0	0,2	-1,2	47,5	16,7	-3	517	6521	1419	1067	976	300
	2	1,1	2,1	-1,7	37,1	43,3	8	300	4233	1035	950	845	400
-25°C	1	-6,9	-2,0	-9,0	-36,6	-5,1	-3	53	856	215	167	140	100
	2	4,9	5,2	3,6	300,0	23,8	5	171	2240	539	400	321	67

Gasdifferenzen synthetischer Ester in % des Ausgangswertes													
Temp.	Nr.	TGG	O2	N2	H2	CO	CO2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
20°C	1	0,0	-1,7	1,5	337	162	12	171	8194	613	225	169	100
	2	1,3	-0,9	1,7	-9	65	7	77	154	119	90	70	57
-10°C	1	2,4	1,9	0,9	-58	-9	13	18	1309	63	33	57	300
	2	0,0	1,7	-0,2	-6	23	-6	14	289	106	33	46	25
-25°C	1	-2,4	-0,8	-1,2	-11	8	-24	-3	5343	93	0	10	0
	2	-2,6	-2,6	-0,8	-63	63	-22	19	673	100	20	20	-20

Gasdifferenzen natürlicher Ester in % des Ausgangswertes													
Temp.	Nr.	TGG	O2	N2	H2	CO	CO2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	C3H6	C3H8
20°C	1	0,0	-69,9	4,0	214	497	-4,6	296	21650	4200	91	817	83
	2	5,0	-7,0	5,3	188	259	12,8	157	1488	1075	38	560	100
-10°C	1	5,7	10,4	4,1	46	40	8,4	100	10840	1540	26	325	75
	2	-3,9	-2,8	-2,4	260	8	-17,4	97	1576	469	23	400	100

5.3 Ölkennwerte

Es wurden bei allen Untersuchungen, sowohl davor als auch danach, die Durchschlagspannung und der absolute Wassergehalt gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 aufgelistet.

Ergebnisse

Tabelle 20: Ölkennwerte der einzelnen Messreihen; OBEN: Mineralöl; MITTE: synthetischer Ester; UNTEN: natürlicher Ester:

		Mineralöl			
		davor		danach	
		Feuchte	Durchschlag	Feuchte	Durchschlag
		ppm	kV	ppm	kV
20°C I	10mm	11	84	11	71
	20mm	11	84	11	71
20°C II	10mm	5	89	5	83
	20mm	10	86	11	74
-10°C I	10mm	11	87	11	84
	20mm	11	87	11	84
-10°C II	10mm	14	94	15	82
	20mm	14	94	15	82
-25°C I	10mm	8	88	9	94
	20mm	11	74	17	62
-25°C II	10mm	8	88	9	94
	20mm	13	82	13	75

		synth. Ester			
		davor		danach	
		Feuchte	Durchschlag	Feuchte	Durchschlag
		ppm	kV	ppm	kV
20°C I	10mm	67	67	133	61
	20mm	72	65	129	51
20°C II	10mm	58	61	96	55
	20mm	58	61	96	55
-10°C I	10mm	68	75	204	76
	20mm	68	75	204	76
-10°C II	10mm	128	80	253	79
	20mm	128	80	253	79
-25°C I	10mm	72	77	199	62
	20mm	72	77	199	62
-25°C II	10mm	71	69	240	66
	20mm	71	69	240	66

		natürl. Ester			
		davor		danach	
		Feuchte	Durchschlag	Feuchte	Durchschlag
		ppm	kV	ppm	kV
20°C I	10mm	83	79	92	56
	20mm	83	79	92	56
20°C II	10mm	25	71	38	61
	20mm	25	71	38	61
-10°C I	10mm	82	67	139	64
	20mm	82	67	139	64
-10°C II	10mm	30	63	82	61
	20mm	30	63	82	61

5.4 Sichtung der Durchschlagspuren an der Zellulose

In Abbildung 42 bis Abbildung 47 sind die nach den durchgeführten Durchschlaguntersuchungen gemachten Bilder eingefügt. Regulär sind die Seitenansichten der Proben dargestellt, bei Sonderfällen, wo es sich um einen Durchschlag zentral im Board ohne äußerliche Spuren handelte, wurden die Proben in der Draufsicht (Schmalseite) fotografiert, um den vorhandenen Kanal sichtbar zu machen. Zur besseren optischen Vergleichbarkeit wurden die Bilder so angeordnet, dass Versuchsreihen mit gleicher Temperatur gruppiert sind.



Abbildung 42: Fotos der bei Raumtemperatur geprüften Boardleisten mit 10 mm Distanz; LINKS: Mineralöl; MITTE: synthetischer Ester; RECHTS: natürlicher Ester

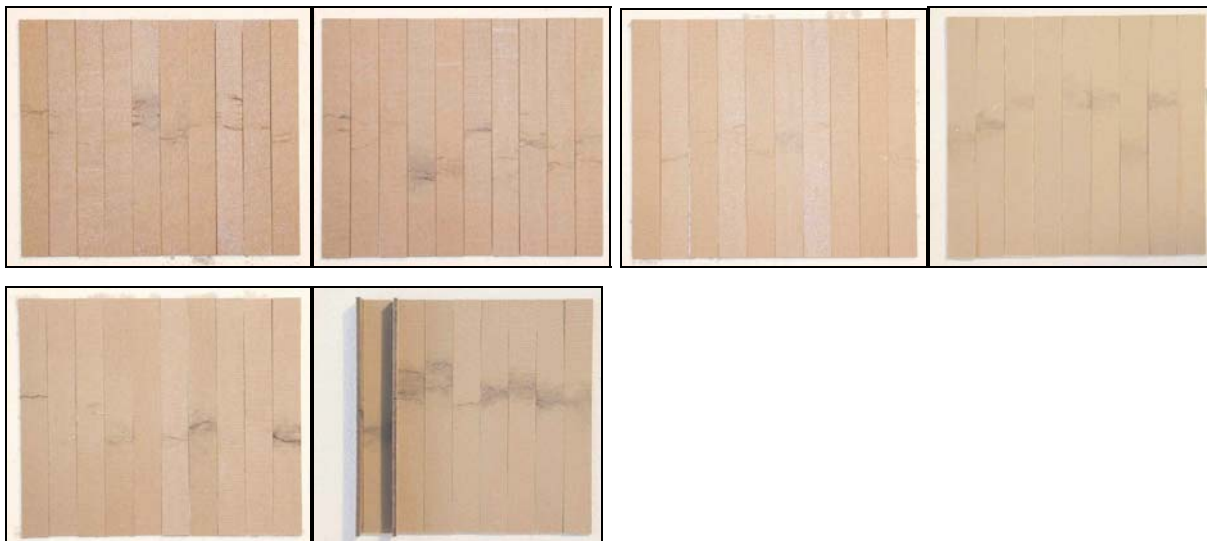


Abbildung 43: Fotos der bei Raumtemperatur geprüften Boardleisten mit 20 mm Distanz; OBEN LINKS: Mineralöl; OBEN RECHTS: synthetischer Ester; UNTEN: natürlicher Ester

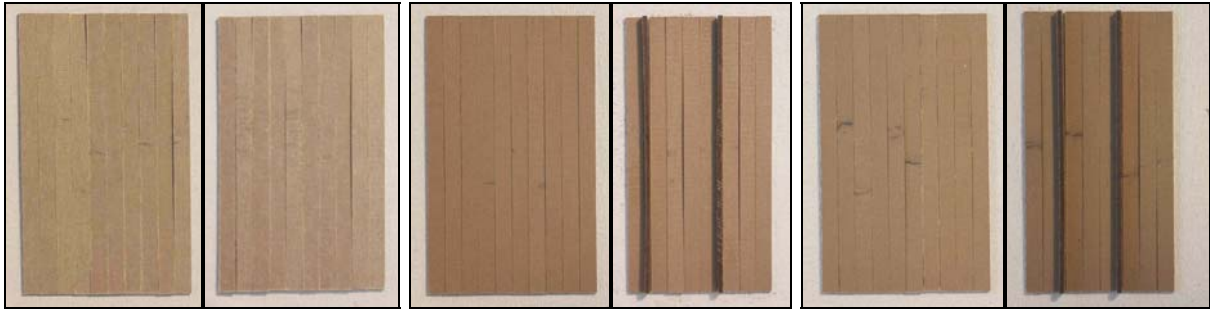


Abbildung 44: Fotos der bei -10 °C geprüften Boardleisten mit 10 mm Distanz; LINKS: Mineralöl; MITTE: synthetischer Ester; RECHTS: natürlicher Ester

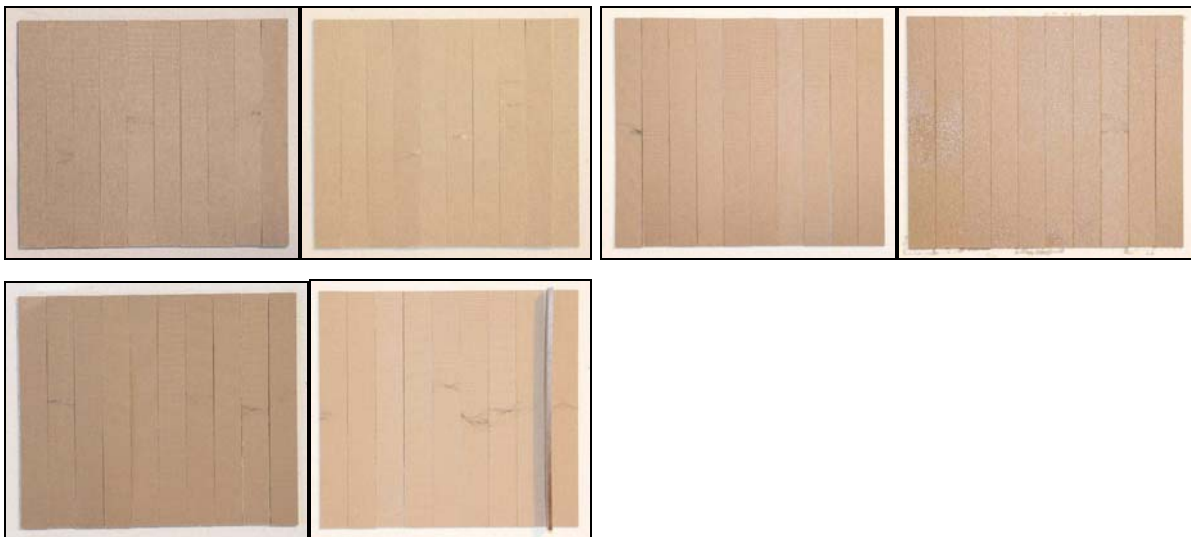


Abbildung 45: Fotos der bei -10 °C geprüften Boardleisten mit 20 mm Distanz; OBEN LINKS: Mineralöl; OBEN RECHTS: synthetischer Ester; UNTEN: natürlicher Ester



Abbildung 46: Fotos der bei -25 °C geprüften Boardleisten mit 10 mm Distanz; LINKS: Mineralöl; RECHTS: synthetischer Ester

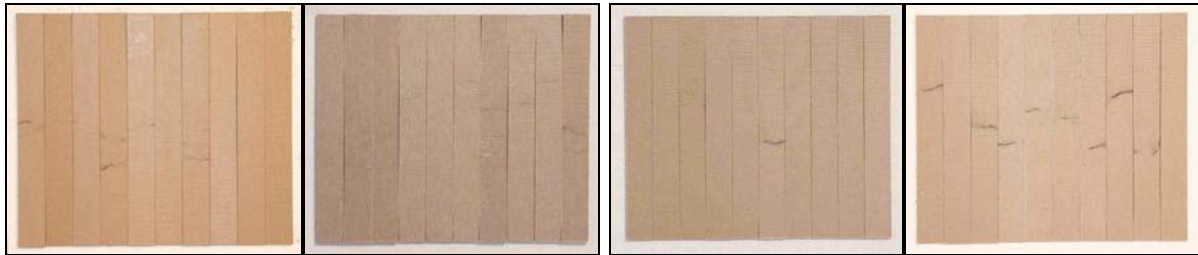


Abbildung 47: Fotos der bei -25 °C geprüften Boardleisten mit 20 mm Distanz; LINKS: Mineralöl; RECHTS: synthetischer Ester

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse der Durchschlagspurensichtungen zusammengefasst. Wenn die Summen signifikant höher waren als der Durchschnitt, wurde eine farbliche Kennzeichnung durchgeführt.

Tabelle 21: Ergebnisse der Sichtungen der Durchschlagspuren an den Proben (K0 = Öldurchschlag, K1 = leichte Spuren am Board, K2 = starke Spuren am Board):

Flüssigkeit	Temperatur	Distanz	Kategorie		
	°C		mm	K0	K1
Mineralöl	20	10	6	9	4
		20	1	0	19
	-10	10	9	5	6
		20	11	2	7
	-25	10	4	12	4
		20	6	3	11
Synthetischer Ester	20	10	6	6	8
		20	3	7	10
	-10	10	11	6	3
		20	18	0	2
	-25	10	6	7	5
		20	10	5	5
Natürlicher Ester	20	10	3	5	12
		20	1	2	17
	-10	10	7	4	9
		20	9	2	9

6 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 5 tabellarisch und in Diagrammen dargestellten Ergebnisse diskutiert. Zuerst erfolgt eine grundsätzliche Diskussion der Tauglichkeit und Verwendbarkeit der Vorgangsweise und der Messergebnisse in Kapitel 6.1.

Danach werden die Überlegungen zu den Ergebnissen der Durchschlagsuntersuchungen mit Diskussion der Durchschlagwerte, der Auswertung der Durchschlagspuren und der Daten der Ölkennwerte im Kapitel 6.2 behandelt. Die Ergebnisse der Gasuntersuchungen der einzelnen Flüssigkeiten samt den Ergebnissen der Auswertungsschemata werden im Kapitel 6.3 behandelt.

6.1 Überlegungen zu Unabhängigkeit, Probenanzahl und Gaskonzentration

An den Ergebnissen der Regression (siehe Tabelle 13 in Kapitel 5.1.1) ist erkennbar, dass sich in der Zeitdauer der Untersuchungen an der elektrischen Festigkeit der Proben nichts verändert hat und das Feuchteverhältnis zwischen der jeweiligen Flüssigkeit und der Zellulose nicht geändert wurde.

An sich ist dieser Beweis der Unabhängigkeit zwar von Vorteil für die Verwendbarkeit der Durchschlagdaten zur Auswertung mit deskriptiver Statistik, andererseits produzierte diese Probenanzahl zum Teil nur geringe Gasmengen.

In einem realen Transformator sind ob der, im Vergleich zum Lichtbogen, großen Ölmenge allerdings auch keine größeren Konzentrationen zu erwarten. Würden also eindeutigere Ergebnisse, die Gaskonzentrationen betreffend, verlangt, wären wesentlich mehr Durchschläge pro Versuch notwendig.

Größere Konzentrationen wären zwar einfacher zu detektieren, allerdings würden die Ergebnisse der Durchschlaguntersuchungen mit hoher Wahrscheinlichkeit Abhängigkeit voneinander aufweisen und wären damit für die Auswertung nicht verwendbar. Weiters entfernte man sich damit auch von der in dieser Untersuchung geforderten Praxisnähe.

6.2 Durchschlagverhalten bei tiefen Temperaturen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Durchschlagspannungsuntersuchungen besprochen. Dabei wird mit der Abhandlung der Spannungswerte begonnen, es folgt eine Diskussion über die Ergebnisse der Auswertung der optischen Durchschlagspuren und abschließend ein Abriss der Resultate der Messungen der Ölkennwerte.

6.2.1 Diskussion der Durchschlagspannungen

In Tabelle 10 bis Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Durchschlagspannungsuntersuchungen aufgelistet und in Diagramm 1 sind sie, grafisch aufbereitet, mit Mittelwert und Standardabweichung dargestellt. Keine der Flüssigkeiten weist in Verbindung mit Zellulose und Abkühlung auf -10 °C bzw. -25 °C eine signifikante Verschlechterung der elektrischen Festigkeit im Vergleich zu den Werten bei Raumtemperatur auf.

Damit lässt sich kein eindeutiger Beweis für die Annahme erbringen, dass es zu einer feuchtigkeitsbedingten Verschlechterung des Durchschlagverhaltens nach einer Abkühlung kommt. Bei alternativen Isolierflüssigkeiten mit üblichem Wassergehalt muss in der Transformatorpraxis also nicht mit Ausfällen, bedingt durch Feuchtigkeitsanlagerungen an Kriechstrecken, gerechnet werden.

Es ist in Diagramm 1 ersichtlich, dass die Esterflüssigkeiten konstant höhere Durchschlagwerte liefern als das Mineralöl. Dies ist mit der Tatsache zu erklären, dass, wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, Mineralöl mit, zwar aus Sicht der Transformatorpraxis noch realistischen, aber relativ hohen Werten (5 bis 14 ppm, siehe Tabelle 20) verwendet wurde, wobei 10 ppm im Allgemeinen als Obergrenze für störungsfreien Betrieb angesehen wird.

Bei den 10 mm Proben ist bei allen Flüssigkeiten das gleiche Verhalten der Werte beobachtbar: Bei Raumtemperatur und -25 °C unterscheiden sich die Mittelwerte kaum und bei -10 °C ist die Durchschlagspannung um 8 bis 10 % erhöht. Da sich diese Werte jedoch im Bereich der Standardabweichung bewegen, wird ihnen statistisch keine Bedeutung beigemessen.

6.2.2 Auswertung der Durchschlagspuren an der Zellulose

In Abbildung 42 bis Abbildung 47 und in Tabelle 21 sind die Ergebnisse der optischen Durchschlagsauswertung dargestellt. Die sich signifikant vom Mittelwert abhebenden Ergebnisse sind farblich hervorgehoben.

Auffällig ist, dass bei Raumtemperatur bei allen drei Flüssigkeiten wesentlich gehäufte starke Spuren an der Zellulose sichtbar sind als bei den Versuchen mit tieferen Temperaturen. Nur Mineralöl zeigt auch bei -25 °C Tendenzen zum Zellosedurchschlag. Dies bedeutet, dass anhand der Zellulosezerstörung die Theorie, dass an der Zelluloseoberfläche abgelagerte Feuchte die elektrische Festigkeit herabsetzt, nicht bestätigt werden kann.

Da sich die elektrische Festigkeit insgesamt nicht wesentlich verschlechtert, kann man davon ausgehen, dass zu wenig Wasser abgegeben wurde. Auch die über alle Temperaturen konstanten Durchschlagspannungswerte sind ein Indiz dafür.

Weiters ist in Tabelle 21 erkennbar, dass, abgesehen von den Messreihen des synthetischen Esters bei -10 °C und einer Messreihe mit Mineralöl bei derselben Temperatur, kein signifikanter Anstieg der Öldurchschläge mit sinkender Temperatur stattfindet. Warum gerade die Durchschläge der synthetischen Ester bei -10 °C so starke Zellosetendenzen besaßen, lässt sich auch anhand der Ölfeuchte bzw. der Durchschlagspannung (Tabelle 20 Mitte) nicht erklären, diese liegen im Bereich der Werte der anderen Versuche.

Anhand der Fotos der Zelluloseproben ist erkennbar, dass es bei den Esterflüssigkeiten und zwar sowohl beim natürlichen als auch beim synthetischen Ester, Tendenzen zum zentralen Durchschlag durch die Zelluloseprobe, im Gegensatz zum Durchschlag an der Zelluloseoberfläche oder durch das Öl, gab. Alle Proben bei denen dies der Fall war, wurden beim Fotografieren der Abbildung 44 bis Abbildung 47 aufgestellt (stirnseitig) dargestellt.

Es fällt auf, dass bei den Versuchen mit Mineralöl keine einzige Probe zentral durchgeschlagen wurde, bei den Esterflüssigkeiten trat dieser Fall sehr wohl auf. Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass die Proben der Esterflüssigkeiten aufgrund ihrer höheren Viskosität eine längere Imprägnierzeit benötigen und die Leisten in ihrem Zentrum schlichtweg noch unimprägniert waren. Dies lässt sich jedoch, abgesehen von den in Vorversuchen gemachten Erfahrungen mit ausreichender

Imprägnierzeit, aus einem weiteren Grund ausschließen. Und zwar, weil die abgekühlten Proben vor den Versuchen für 24 Stunden auf 50 °C bzw. auf 35 °C erwärmt wurden. Bei diesen Temperaturen ist die Viskosität wieder geringer und trotzdem war kein Unterschied in der Häufigkeit der zentralen Durchschläge zwischen erwärmten und nicht erwärmten Proben feststellbar.

Aufgrund des hohen Diffusionskoeffizienten war es auch nicht möglich, dass es in der Zeit der Abkühlung (ca. 9 Stunden) zu einer Wasseranreicherung im Inneren des Zellulosestreifens kam. Dieser Umstand bietet Möglichkeiten für weiterführende Experimente. Er ist, wie die hier gemachten Untersuchungen zeigen, nicht temperaturabhängig und tritt bei beiden Distanzen (10 und 20 mm) gleichermaßen auf.

6.2.3 Ölkennwerte – Durchschlagspannung nach IEC 60156 und Wassergehalt

Bei den Ölkennwerten ist in Tabelle 20 ersichtlich, dass beide Esterflüssigkeiten nach den Durchschlagversuchen wesentlich stärker verfeuchtet waren als das Mineralöl. Die Proben wurden jeweils vor der Aufwärmphase bzw. sofort nach Beendigung der Prüfung der Zelluloseproben gezogen.

Nun lässt sich die erhöhte Feuchte zwar bei den erwärmten Proben durch das vom Öl-Zellulose-Isoliersystem angestrebte Feuchtegleichgewicht (siehe Kapitel 2.1) erklären, nicht jedoch die erhöhte Feuchte der Proben der Versuche bei Raumtemperatur, die ja NICHT erwärmt wurden.

Einerseits erhöht sich die Ölfeuchte durch Absorption von Luftfeuchte durch die Flüssigkeit, andererseits wird auch durch die Zersetzung der Zellulose durch den Lichtbogen Wasser erzeugt. Inwieweit dies bei Öl-Zellulose-Isoliersystemen mit Esterflüssigkeiten zu Problemen im Transformatorbetrieb führen kann, muss weiter untersucht werden.

6.3 Gasungsverhalten

Anhand der Diagramme 2 bis 9 sind die Ergebnisse der Gas-in-Öl-Analyse dargestellt. Die Diagrammen 2 bis 5 zeigen die Absolutwerte und die Diagrammen 6 bis 9 die Werte in Prozent, relativ zum Ausgangswert. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die grundsätzlichen Muster der meisten Gase grob wiedererkennen lassen, Konzentrationsunterschiede zwischen den Flüssigkeiten sind jedoch deutlich.

Grundsätzlich wurden bei den abgekühlten Flüssigkeiten durchwegs geringere Gaskonzentrationen gemessen als bei den Flüssigkeiten mit Raumtemperatur.

6.3.1 Gasbildung

In Summe lässt sich sagen, dass die Gesamtgasbildung beim synthetischen Ester am geringsten war.

Am Auffälligsten ist die erwartete, starke Ethin- und Ethenproduktion bei den Esterflüssigkeiten. Beim natürlichen Ester war nach den Versuchen eine Ethinzunahme vom Faktor 200 und eine Ethenproduktion vom Faktor 40, bezogen auf den Ausgangswert, messbar, für den synthetischen Ester bei Ethin bis Faktor 80 und bei Ethen bis Faktor 6. Im Vergleich dazu nahmen die Werte von Ethin bei Mineralöl maximal um den Faktor 60 und bei Ethen um den Faktor 14 zu. Dies ist mit der Tatsache begründbar, dass in den Estermolekülen (synthetische wie natürliche) langkettige Kohlenwasserstoffe von der, bei der Entladung freiwerdenden, Energie in viele einzelne homogene C-H-Fragmente zersprengt werden, die unmittelbar danach wieder zu stabilen HC≡CH (also Ethin) Molekülen rekombinieren.

Für den starken Anstieg von Ethen gilt Ähnliches. Bei Mineralöl sind die Ergebnissgase vielfältiger, da auch die Ausgangsstoffe aus einem Gemisch vieler unterschiedlicher Kohlenwasserstoffmoleküle mit differierender Länge und verschiedenen Verzweigungen, respektive Ringbildungen bestehen.

Beim synthetischen Ester weichen die Ethen- und Ethinproduktion nicht so stark von den Werten von Mineralöl ab. Man kann also davon ausgehen, dass im Gegensatz zum natürlichen Ester beim synthetischen Ester die Ketten in größere Fragmente gespalten werden, bzw. zu größeren stabilen Endprodukten rekombinieren.

Eine Kohlendioxidproduktion konnte bei allen Flüssigkeiten nur in sehr geringen und stark variierenden Konzentrationen festgestellt werden. Bei Mineralöl lagen die Werte der Konzentrationsdifferenzen zwischen -10 und 36 ppm, beim synthetischen Ester zwischen -200 und 87 ppm und beim natürlichen Ester zwischen -83 und 67 ppm. Sechs der sieben negativen Werte traten bei den Versuchen mit tiefen Temperaturen auf, nur einer davon bei Raumtemperatur. Der Rückgang der Messwerte dieses Gases ist voraussichtlich auf die schlechte Löslichkeit des CO₂ in Öl zurückzuführen. Bei den Versuchen wurde wahrscheinlich nicht nur das wenige neu produzierte Gas nicht gelöst und über Bläschenbildung abgegeben, sondern auch das bereits gelöste CO₂ durch die Vibrationen aus den Flüssigkeiten über deren Oberfläche an die Umgebungsluft ausgeschieden.

Die gemessenen Werte für Kohlenmonoxid lassen eindeutige Schlüsse zu: Bei Mineralöl wurden nur Werte bis 10 ppm produziert, beim synthetischen Ester bis 21 ppm und beim natürlichen Ester sogar bis 46 ppm. Das Pflanzenöl produziert also beinahe fünfmal so viel Kohlenmonoxid wie Mineralöl. Weil es auch als Schlüsselgas für die Zellulosezersetzung gilt, ist diese Mehrproduktion zu beachten. Eine direkte Ergebnisverfälschung durch einen zu hohen CO-Wert trat allerdings bei den hier verwendeten Energien noch nicht auf, dafür war die Absolutkonzentration mit unter 100 ppm bei allen Versuchen zu gering.

Da bei den anderen Flüssigkeiten wesentlich weniger CO entsteht als beim natürlichen Ester, ist davon auszugehen, dass dieses Kohlenmonoxid aus den thermischen Aufschließungen der Triglyceridmoleküle entsteht und nicht aus der Zellulose. Die Tatsache, dass im Mineralöl, in dem in etwa gleich viel Zellulosezersetzung durch den Lichtbogen stattfand wie in den Estern (siehe Tabelle 21), ein geringerer Kohlenmonoxidwert feststellbar war, bekräftigt diese Aussage.

6.3.2 Auswertungsschemata

Die in Tabelle 17 dargestellten Ergebnisse der sechs verwendeten Auswertungsschemata zeigen, dass diese Methoden den Fehler nur teilweise erkennen. Die Methoden nach Doernenburg, Rogers und IEEE/TDGC schlugen bei

keinem Versuch an, auch nicht bei Mineralöl. Das bedeutet, dass die produzierten Gaskonzentrationen für diese Methoden generell zu gering waren.

Die Methode nach Duval erkannte in 14 von 16 Fällen den Fehler „Entladungen niedriger Energie“ korrekt. Die beiden nicht erkannten Fälle zeigen das Ergebnis „Limit nicht überschritten“ und traten bei den Versuchen mit Mineralöl (-25 °C) und dem synthetischen Ester (-10 °C) auf, und weisen daher nicht auf zu berücksichtigende, flüssigkeitsspezifische Problematiken dieser Methode hin.

Die Methode nach MSS konnte bei Mineralöl nur einen von sechs möglichen „Treffern“ verzeichnen, beim synthetischen Ester wurden dafür vier von sechs Proben richtig bewertet und beim natürlichen Ester zwei von vier. Bei geringerer Fehlerhäufigkeit und großem Ölvolumen besteht darum hier die Gefahr, dass Durchschläge mit geringer Energie unerkannt bleiben, wobei die Erkennungschance bei Estern höher liegt als bei Mineralöl.

Die IEC-Methode kann auf mehrere Fehler hinweisen, gemeldet wurden „Entladungen niedriger Energie“, „Öloxidation“, „Zellulosezersetzung thermisch“ und „Kontamination durch Stufenschalter“. Der Fehler „Entladungen niedriger Energie“ wurde bei allen Versuchen mit Mineralöl und synthetischem Ester richtig erkannt. Beim natürlichen Ester konnte er nur bei den Versuchen bei -10 °C festgestellt werden und nicht bei jenen bei Raumtemperatur.

Allerdings wurde bei den Esterflüssigkeiten in sechs von zehn Fällen fälschlicherweise der Fehler „Kontamination durch Stufenschalter“ festgestellt. Bei den Versuchen mit Mineralöl war dies kein einziges Mal der Fall. Das bedeutet, dass es bei Interpretation von Entladungsfehlern bei Esterflüssigkeiten mit den herkömmlichen Methoden zu einer falschen Detektion von Ölkontamination durch den Stufenschalterölraum kommt.

Ein weiterer falsch diagnostizierter Fehler ist die Öloxidation. Diese Fehleinschätzung der IEC-Methode trat ausschließlich beim natürlichen Ester auf, und zwar bei vier von vier Versuchen. Besonders auffällig war auch, dass das Kriterium für Öloxidation ($O_2 / N_2 < 0,3$) bereits im Neuzustand des natürlichen Esters (sowohl entgast als auch nicht entgast) unterschritten war. Solche Unterschiede in den Konzentrationen sind aufgrund der unterschiedlichen relativen Gaslöslichkeiten zwischen Mineralöl und Estern denkbar.

Diese Auffälligkeiten sind bei der Verwendung von natürlichen Estern in Verbindung mit einer Auswertung mittels IEC-Schema unbedingt zu berücksichtigen. Der Fehler „Zellulosezerstörung thermisch“ wurde bei allen Versuchen mit Mineralöl und synthetischem Ester aufgezeigt. Nur bei einem der Versuche mit natürlichem Ester bei Raumtemperatur wurde dieser Fehler nicht gemeldet. Dies ist insofern ein interessanter Trugschluss, da man aus Tabelle 20 ersehen kann, dass gerade der synthetische Ester am wenigsten Zellulosebeteiligung bei den Durchschlägen zeigte und der natürliche Ester bei den Raumtemperaturversuchen eine signifikant hohe Zellulosezerstörung aufwies.

6.4 Bezugnahme auf den derzeitigen Forschungsstand

Wie auch in [22] von Borsi für die Flüssigkeiten allein festgestellt wurde, ändert sich das Durchschlagverhalten eines trockenen Öl-Zellulose-Isoliersystems mit tangential belasteter Papieroberfläche mit der Temperatur nur marginal. Allerdings führten auch höhere Feuchtwerte als bei Borsi beschrieben (bis 15 ppm) noch nicht zu einer Herabsetzung der Durchschlagspannung. Die Vermutung liegt nahe, dass die elektrische Festigkeit auch hier mit weiter steigender Feuchte abnimmt. Um dies zu beweisen sind jedoch weitere Untersuchungen mit höheren Wassergehalten notwendig.

Die von Kahn et al. in [61] und [62] für Raumtemperatur publizierten Ergebnisse sind nur teilweise mit den in dieser Arbeit erhaltenen Resultaten vergleichbar. Die produzierten Gasmengen der Esterflüssigkeiten waren nicht eindeutig geringer, verglichen mit Mineralöl. Auch wurden bei den hier durchgeführten Untersuchungen, speziell für den natürlichen Ester, im Gegensatz zu [61], signifikant höhere Ethinmengen gemessen als bei Mineralöl.

Da in der vorliegenden Arbeit keine Alterungsuntersuchungen durchgeführt wurden, kann auf die Publikation von Höhle-Atanasova und Frotscher [64] kein direkter Bezug genommen werden. Trotzdem fällt die im Mittel leicht erhöhte CO-Produktion beim natürlichen Ester auf. Eine thermische Zersetzung der Flüssigkeit im Lichtbogen liegt selbstverständlich vor. Allerdings wurde dieser Anstieg im

Gegensatz dazu in [64] beim synthetischen Ester festgestellt. Dieses Ergebnis ist nicht eindeutig auf die Abkühlung zurückzuführen.

Die in [63] gemachten Änderungen am Duval-Dreieck bezüglich der Grenzen zwischen leichten und schweren Entladungserscheinungen waren für die Ergebnisse dieser Arbeit nicht von Belang. Für den hier simulierten Fehler der leichten Entladungen lieferte auch das Duval-Dreieck für mineralische Transformatoröle eindeutige Ergebnisse.

7 Resümee

7.1 Durchschlagverhalten

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigten keine statistisch relevanten Verschlechterungen der elektrischen Festigkeit mit sinkender Temperatur. Damit konnte die Tauglichkeit von Esterflüssigkeiten zur Verwendung bei tiefen Umgebungstemperaturen bestätigt werden. Die Annahme, dass sich durch Temperatursenkung an elektrisch, tangential belasteten Zelluloseoberflächen anreicherndes Wasser die elektrische Festigkeit herabsetzt, konnte unter den Bedingungen, wie sie für die hier gemachten Versuchen festgelegt wurden, nicht bewiesen werden.

Es ist allerdings hinreichend bekannt, dass die Isolierflüssigkeiten bei Temperaturabsenkung geringere Sättigungsfeuchtwerte aufweisen und damit Wasser abgeben müssen. Ein naheliegender Grund für die konstant guten Werte der elektrischen Festigkeit ist daher möglicherweise, dass das an die Zellulose abgegebene Wasser ausreichend gut absorbiert wird, um die Durchschlagfestigkeit an der Oberfläche nicht zu verringern.

Da die Diffusionszeiten bei den niedrigen Temperaturen allerdings sehr hoch sind, ist es viel wahrscheinlicher, dass die Ursachen in den Standardfeuchtebedingungen, wie sie in der Transformatorpraxis üblich sind und in dieser Arbeit zugrunde gelegt wurden, zu finden sind. Die damit auf relativ geringe Werte begrenzte Feuchtigkeit reicht sehr wahrscheinlich nicht aus, um einen signifikanten Effekt auf den zellulosenahen Durchschlagmechanismus zu haben. Um dies zu überprüfen, müssen weiterführende Versuche mit höheren relativen Feuchtigkeitswerten in Betracht gezogen werden.

7.2 Gasungsverhalten

7.2.1 Verwendbarkeit der Auswertungsschemata

Die Methode nach Duval erkannte den Fehler bei den Esterflüssigkeiten in neun von zehn Fällen und ist daher auch zur Untersuchung von Entladungsproblemen bei der Diagnose von Estereinheiten geeignet.

Das IEC-Schema bewertete den Fehler sowohl bei Mineralöl als auch beim synthetischen Ester bei allen Versuchen korrekt. Beim natürlichen Ester wurden nur zwei von vier Versuchen richtig bewertet. Allerdings kam es bei dieser Methode auch zur Anzeige falscher Fehler: Ausschließlich bei den Esterflüssigkeiten wurde in sechs von zehn Fällen fälschlicherweise eine Kontamination der Isolierflüssigkeit mit Öl aus dem Stufenschalterölraum gemeldet. Dies bedeutet, dass man bei der Detektion von Entladungsfehlern auch eine, mit hoher Wahrscheinlichkeit falsche, Leckdiagnose des Stufenschalterraumes erhält. Bei der Verwendung dieser Methode mit natürlichen Estern haben die Untersuchungen gezeigt, dass es zu einer falschen Anzeige des Fehlers der Öloxidation kommt. Bei den synthetischen Estern ist dies nicht der Fall. Auch das muss bei der praktischen Anwendung dieser Methode besonders beachtet werden.

Bei der Methode nach MSS wurden bei den Estern nur sechs von zehn Entladungsfehlern richtig bewertet, die Möglichkeit von unerkannten Entladungsfehlern ist hoch.

Die Methoden nach Doernenburg, Rogers und IEEE erkannten keine Fehler, da die Gaskonzentrationen zu gering waren. Dafür sind weitere Untersuchungen mit noch stärker belasteten Flüssigkeiten notwendig.

Für höhere Gaskonzentrationen wäre eine größere Anzahl von Proben bzw. Durchschlägen notwendig gewesen. Eine Erhöhung der Durchschlagbelastung der Flüssigkeiten hätte allerdings die Unabhängigkeit der Messergebnisse gefährdet, da mit steigender Beanspruchungsanzahl natürlich die Ölqualität und damit die

elektrische Festigkeit sinken. Dies wäre mit der Forderung nach unabhängigen Ergebnissen unvereinbar gewesen.

7.3 Überlegungen für weiterführende Untersuchungen

Eine wichtige Veränderung für weitere Untersuchungen wäre, mit hohen Feuchtigkeitsgehalten der Flüssigkeiten zu arbeiten, um festzustellen, ob sich die elektrische Festigkeit dann, auch im Vergleich zu den Werten ohne Zelloberfläche, verschlechtert. Weiterführend dazu wäre die Variation der Ölfeuchte, um daraus eine eventuelle Abhängigkeit der Verringerung der Durchschlagspannung zur steigenden Feuchte ableiten zu können.

Ebenso stellt sich die Frage, inwieweit die Zellulose beim Durchlaufen vieler Temperaturzyklen, durch die Feuchtigkeitsausgleichsvorgänge bei Esterflüssigkeiten, aus Sicht der Alterung, in Mitleidenschaft gezogen wird.

Bei den Estern sind in der Praxis durch viele Zu- und Abschaltungen wesentlich größere Wassermengen zu transportieren als bei Mineralöl (siehe auch Abbildung 3). Spricht man bei Mineralöl von 10 bis 30 ppm Wasser, das bei 60 °C Temperaturunterschied zwischen Öl und Board wechseln muss, können es bei Estern bis zu 400 ppm Wasser sein, das entspricht dem Faktor 10 bis 40. Diese Menge an Wasser ist unter Umständen bei einer Papierfeuchte von 1 bis 2 % nicht mehr vernachlässigbar.

Hierzu bedarf es allerdings weiterer Untersuchungen, da diese Alterungsversuche den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschritten hätten.

Die Auswirkungen der Abspaltung von freien Säuren von den Estermolekülen bedürfen ebenso weiterer Forschungen. Untersuchungen der Säurezahl bei verschiedenen Lichtbogenenergien bieten sich an. Auch die Auswirkungen auf den DP-Wert der Zellulose bzw. die genauen Zusammensetzungen der erzeugten Säuren müssen untersucht werden.

8 Auswirkungen auf die Praxis

Die Planung und Durchführung der Untersuchungen hatten zum Ziel, Aussagen über die praktische Verwendbarkeit und die Möglichkeiten der Ausweitung der Einsatzgebiete von alternativen Isolierflüssigkeiten, im Speziellen von Esterflüssigkeiten, treffen zu können.

Im Besonderen ging es dabei um die, bei tiefen Temperaturen möglicherweise auftretenden elektrischen Probleme und um die möglichen und notwendigen Unterschiede in der Betrachtung und Interpretation von Ergebnissen der Gas-in-Öl-Analyse.

8.1 Kaltstart

Es sollte das elektrische Verhalten eines Öl-Zellulose-Isoliersystems im ungünstigen Fall der tangentialen Feldbeanspruchung, nach der Abkühlung von einer simulierten Betriebstemperatur auf eine definierte Außentemperatur, experimentell geprüft werden.

Die hier durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Flüssigkeiten problemlos bei Temperaturen von bis zu -10 °C bzw. -20 °C einsetzbar sind. Auch ein Einschaltvorgang bereits während des Abkühlens ist möglich, ohne dass die elektrische Festigkeit der Isolierung beeinträchtigt wird.

Dies ist voraussichtlich darauf zurückzuführen, dass die in der Praxis verwendeten Feuchtegehalte der Flüssigkeiten, die auch in den Untersuchungen verwendet wurden, ausreichend gering waren. Die Vorgaben dafür orientierten sich an den in der Transformatorpraxis üblichen Werten, um eine Aussage über deren Verwendbarkeit für Estereinheiten bei tiefen Temperaturen treffen zu können.

8.2 Gas-in-Öl-Analyse

8.2.1 Gasproduktion

Für die Praxis erschwerend gilt der Umstand, dass der synthetische Ester bei gleicher Belastung grundsätzlich eine geringere Gasmenge als die beiden anderen Flüssigkeiten produzierte. Dies machte ein penibleres Handling bei der Probenentnahme und eine genauere Messung der Schadgase notwendig. Ansonsten ist das Gasproduktionsverhalten des synthetischen Esters ähnlich dem von Mineralöl.

Der natürliche Ester weist eine wesentlich höhere Produktion von Ethen (Schlüsselgas für lokale Überhitzung) und Ethin (Schlüsselgas für Lichtbögen) auf. Letzteres ist für die Praxis von Vorteil, da es die Detektion von Entladungen aufgrund der höheren Konzentration vereinfacht. Ersteres könnte sich zumindest theoretisch verfälschend auf die Auswertung auswirken, jedoch zeigte keines der fünf in dieser Arbeit verwendeten Auswertungsverfahren einen thermischen Fehler an.

8.2.2 Auswertungsschemata

Die Methode nach Duval erkannte den Fehler bei den Esterflüssigkeiten in neun von zehn Fällen, die Methode nach MSS hatte mit nur sechs von zehn Fällen eine wesentlich schlechtere Trefferquote und die Möglichkeit von unerkannten Entladungsfehlern ist hoch.

Die Methode nach IEC bewertet zwar oft den Fehler richtig, zeigt aber auch bei den Estern fälschlicherweise andere, nicht vorhandene Fehler auf. So wurde beim natürlichen Ester und bei keiner anderen Flüssigkeit in allen Fällen Öoxidation gemeldet und sowohl beim natürlichen als auch beim synthetischen Ester wurde der Fehler der Kontamination durch Isolierflüssigkeit aus dem Stufenschalterraum falsch positiv angezeigt. Für die natürlichen Ester müssen daher die Grenzwerte des IEC-Auswertungsverfahrens für Öoxidation neu überdacht werden, da diese Methode durchwegs fälschlicherweise diesen Fehler aufzeigte.

Für die Methoden nach Doernenburg, Rogers und IEEE waren die in den durchgeführten Untersuchungen erzeugten Gaskonzentrationen zu gering um eine Fehlererkennung zu ermöglichen.

Daher sind alle hier verwendeten Schemata in der Praxis nur mit Vorbehalt verwendbar, einzig die Methode nach Duval lieferte einheitliche Ergebnisse.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit berichtet über das Verhalten von abgekühlten, natürlichen und synthetischen Estern, verglichen mit Mineralöl, betreffend ihre Durchschlagfestigkeit in Zusammenhang mit einer Kriechstrecke mit Pressboard und die, durch häufige Durchschläge feststellbaren, im Öl gelösten Gase.

Um Ergebnisse zu dieser Aufgabenstellung zu erhalten, wurden ein Test-Setup sowie eine passende Probenform sowie ein Prüfprogramm entwickelt und durchgeführt. Vor und nach der Beaufschlagung mit Wechselspannung wurden die in den Flüssigkeiten gelösten Gase bestimmt. Danach erfolgte eine Auswertung der gewonnenen Daten und eine Interpretation.

Ein Ziel der Arbeit, das Ermöglichen einer Erweiterung der Anwendungsgebiete von Esterflüssigkeiten, konnte erreicht werden, indem gezeigt wurde, dass die alternativen Isoliermedien in Zusammenhang mit Zellulose nach Abkühlung auf bis zu -25 °C (synthetischer Ester) und -10 °C (natürlicher Ester) keine Verschlechterung der elektrischen Festigkeit aufwiesen. Die Annahme, dass dies aufgrund von Anlagerung von Wasser an der Zelluloseoberfläche der Fall sein könnte, konnte unter den gegebenen Umständen nicht bestätigt werden.

9.1 Durchschlagsverhalten

Es wurde zu Beginn angenommen, dass sich durch eine Senkung der Temperatur eine signifikante Verringerung der Durchschlagspannung feststellen lassen würde. Dies wurde mit dem Feuchtigkeitshaushalt der Flüssigkeit, in Zusammenhang mit der verwendeten Zellulose begründet.

Bei Verringerung der Temperatur sinkt auch das Wasseraufnahmevermögen der Öle und es wurde angenommen, dass das, im abgekühlten Zustand frei werdende Wasser, sich an der Zelluloseoberfläche sammelt, ehe es vom Papier aufgenommen wird und dort zu einer Herabsetzung der elektrischen Festigkeit führt.

Diese Annahme konnte mit den durchgeführten Experimenten nicht bestätigt werden. Die Durchschlagspannung der verwendeten Versuchsanordnung änderte sich mit der

Temperatur nicht signifikant. Auch kam es bei einer Abkühlung nicht, wie angenommen, zu einem gehäuften Durchschlagen an der Oberfläche der Zellulose. Dieses Verhalten konnte sowohl bei Mineralöl als auch bei beiden verwendeten Esterflüssigkeiten festgestellt werden.

Eine mögliche Erklärung für die unverändert gute elektrische Festigkeit ist, dass der vorhandene Feuchtegehalt – typischerweise Werte, wie sie im Betrieb eines Transformators gefordert werden – zu gering war, um den angenommenen Zustand der Verfeuchtung der Papieroberfläche zu erreichen.

Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine Studie von Betriebsfällen und -bedingungen handelte, wurden höhere, für den Betrieb nicht zulässige, Feuchtwerte nicht untersucht. Es wird vermutet, dass es dafür so hoher Feuchtwerte bedarf, dass die elektrische Festigkeit auch bei Raumtemperatur ohne Abkühlung herabgesetzt würde.

9.2 Gasungsverhalten

Beim Gasungsverhalten wurde anfangs angenommen, dass es zwischen Mineralöl und den Esterflüssigkeiten Unterschiede in den, beim angewendeten Fehlerfall von Entladungen mittlerer Energie erzeugten Fehlern kommen würde. Diese Annahme konnte durch die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden.

Es kommt sowohl beim natürlichen als auch beim synthetischen Ester zu einem signifikanten Anstieg des Gases Ethin, wobei dieser Anstieg beim natürlichen Ester stärker ausgeprägt ist. Weiters ist beim natürlichen Ester ein wesentlich stärkerer Anstieg des Gases Ethen zu verzeichnen als bei Mineralöl und dem synthetischen Ester.

Die Verwendung verschiedener anerkannter Auswertungsschemata zeigte, dass diese nicht alle vorbehaltlos verwendbar sind. Die Methode nach Duval arbeitet korrekt (neun von zehn Fehlern richtig erkannt), die Methode nach MSS arbeitet zwar korrekt, aber nicht zuverlässig, da sie nur sechs von zehn Fehlerfällen richtig diagnostizierte. Die Methode nach IEC ist zwar zuverlässig, es wurden zehn von

zehn Fehlern richtig bewertet, aber zusätzlich wurde bei beiden Esterflüssigkeiten oft (sechs von zehn Fällen) fälschlich Kontamination durch Stufenschalteröl und ausschließlich beim natürlichen Ester, dort jedoch in vier von vier Fällen, fälschlich Öloxidation festgestellt. Über die Methoden nach Doernenburg, Rogers und IEEE kann keine Aussage getroffen werden, da diese ob der zu geringen Gaskonzentrationen keine Fehler erkannten.

10 Literaturverzeichnis

- [1] McLean, Hazel: Siemens Bericht Megacities und ihre Herausforderungen http://www.siemens.com/pool/de/uber_uns/megacities/MegaCity-Report_1430995.pdf, abgerufen am 6.1.2011
- [2] Theis K.A., Langnickel U., et al.: Zahlen und Fakten zur Stromerzeugung 2009/2010; Publikation des VGB PowerTech e. V., Essen, Deutschland, September 2009.
- [3] UCTE Stromverbrauchsabfrage, URL: <https://www.entsoe.eu/resources/data-portal/production/>, abgerufen am 6. Jänner 2011
- [4] Hegemann G.: Midel 7131 – Eine Isolier- und Kühlflüssigkeit für Transformatoren mit niedrigem toxischen und ökologischen Potential; BASF Lacke und Farben, Hamburg, Erscheinungsjahr unbekannt
- [5] M&I Midel: Midel 7131 Technisches Datenblatt; www.midel.com Jänner 2007
- [6] Brennwert von Sojaöl <http://de.wikipedia.org/wiki/Pflanzenöl-Kraftstoff>, abgerufen im Dezember 2010
- [7] Nynas Napthenics: Product Data Sheet Nytro 4000X, Nynas Napthenics Schweden, Version vom 28. 3. 2008
- [8] Cooper Power Systems: Envirotemp FR3 Fluid Product Information, Cooper Power Systems, Waukesha USA, 2005
- [9] Mendes J.C., Reis A.S.G., et al.: Gut geölt – Fortschrittlicher Einsatz von ABB Biotemp Pflanzenöl in einem Hochspannungs-Leistungstransformator; S53-57, ABB Technik 3/2007

- [10] Jany S.: Alterungsverhalten von biologischen und synthetischen Transformatorenölen, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2008
- [11] Setayeshmehr A., Abdallah J., et al.: Evaluating of Water Exchange Between Oil and Paper in Transformers Under Operating Conditions; Schering Institut, Leibniz Universität Hannover, 2009
- [12] Breuer W., Hegemann G.: Behaviour of on-load Tap Changers in Midel 7131 A PCB Alternative for Transformers, cigrè Symposium Wien, 1987
- [13] Eberhardt R., Muhr H.M.: Partial discharge behaviour of an alternative insulating liquid compared to mineral oil; IEEE ISEI Conference, San Diego, 2010
- [14] Du Y., Zahn M., et al.: Moisture Equilibrium in Transformer paper oil systems IEEE Electr. Insulation Mag., Vol 15, No 1, 1999
- [15] Material Data Sheet Asta Paper insulated single conductors, Asta Elektrodraht GmbH & Co, herausgegeben am 2.8.2006
- [16] Weidmann AG, Technisches Datenblatt Transformerboard T IV, Weidmann AG, Schweiz Rapperswil, Erscheinungsjahr unbekannt
- [17] 3M: Datenblatt 3M Fluoriniert Electronic Liquid FC-40; 3M Electronics Markets Materials Division, 2010
- [18] Trinh N.G., Vincent C., Oliver R., Benoit C.: Low-Temperature Behavior of Synthetic Oils, ICDL Rom, 1996
- [19] Oommen T. V.: Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers; IEEE Electr. Insulation Magazine, USA, 2002

- [20] Kuen Ch.: Alterung von Zellulosematerialien des Öl-Papier-Isolationssystems von Leistungstransformatoren, Dissertation, TU Graz, 2010
- [21] Tenbohlen S., Seibold R., Koch M.: Das Alterungsverhalten verschiedener Esterflüssigkeiten für Leistungstransformatoren, ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Würzburg, 2008
- [22] Borsi H.: Das elektrische Verhalten von Isolierflüssigkeiten für Transformatoren bei tiefen Temperaturen, Elektrizitätswirtschaft Jg. 97, Heft 13, 1998
- [23] Gockenbach E., Borsi H.: Granzflächen Feststoff – Flüssigkeit Beanspruchungen, Wechselwirkungen, Design, Prüfverfahren, Lebensdauer, Schering Institut, Universität Hannover, Deutschland, 2005
- [24] Bargel H., Schulze G.: Werkstoffkunde; 9. Auflage, Springer Verlag, 2005
- [25] Eberhardt R., Muhr H.M., Lick W., Baumann F., Pukel G.: Comparison of alternative insulating fluids, CEIDP Konferenz, Quebec, Kanada, 2008
- [26] Konermann M., Schäfer M.: Einsatz von Pflanzenöl in Leistungstransformatoren, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Zeitschrift für Energiewirtschaft, 2009
- [27] Meyers G.C., Hettwer P.F., Insulation Pressboard for electrical Transformers, Forest Products Journal, Vol. 43, No.3, S 49-52, 1993
- [28] Küchler A.: Hochspannungstechnik, Grundlagen, Technologie, Anwendungen; 2. Auflage, Springer Verlag, 2005
- [29] Pukel G.: Elektrische Festigkeit von Isolieröl, Dissertation, TU Graz, 2008

- [30] Nynas Naphtenics: Transformatorenöl Handbuch
www.nynas.com/naphtenics, abgerufen im November 2010
- [31] Hjörtsbert A., Mendes J.C.: Oil Corrosion & Cu₂S deposition, ABB Power Technologies, 2004
- [32] Bernhard F.: Technische Temperaturmessung; 1.Auflage, Springer Verlag, 2004
- [33] Krist S., Buchbauer G., Klausberger C.: Lexikon der pflanzlichen Fette und Öle, Springer Verlag
- [34] Moser H.P.: Transformerboard, H. Weidmann AG, CH-8640 Rapperswil, 1979
- [35] Moser H.P.; Dahinden V.: Transformerboard II, H. Weidmann AG, CH-8640 Rapperswil
- [36] Sinz P.; Der Einfluß von Feuchte und Partikeln auf die elektrische Festigkeit von Isolierölen; Dissertation, TU Graz, 1990
- [37] Schmidt W. F.: Elementary processes in the development of the electrical breakdown of liquids; IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-17, No. 6, S 478-483, 1982
- [38] Pukel. G., Baumann F., Eberhardt R.: Large Power Transformers for Alternative Insulating Liquids, ISH, 2009
- [39] Leschanz A.: Hochspannungstechnik 2; Studienbehelf für die Vorlesung; Graz, Techn. Univ., 1975
- [40] Borsi H., Gockenbach E., Dumke K.: A Synthetic Insulating Liquid for Application in Transformers, ISH Graz, 1995

- [41] Buerschaper B., Leibfried T.: Physik des Feuchteaustausches in einem Öl-Zellulose-Isoliersystem unter Beachtung des Grenzschichtverhaltens, ETG Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau 2005
- [42] Hauschild W., Mosch W.: Statistik für Elektrotechniker, VEB Verlag Technik Berlin, Berlin 1984
- [43] Hahn M.: Karl-Fischer-Titration in solids, pastuous substances and oils, Elektrochemie Halle, http://www.ebahagia.com/upload/DGA/KF_appli_e.pdf, abgerufen im April 2011
- [44] Supartano W., Rückold S., et al.: Karl Fischer Titration as an Alternative Method Determinig the Water Content of Cloves, Lebensmittel- Wiss. U. Technol., Nr. 31, S 402-405, 1998
- [45] Muhr H.M., Pukel G:, et al.: Diagnosemethoden an Leistungstransformatoren, Skriptum TU Graz, 2005
- [46] Pagger E.: Durchführung der Gas-in-Öl-Analytik, Broschüre der Verbund-Umwelt-Technik GmbH in St. Andrä/Kärnten
- [47] Norm IEC 60599
- [48] Norm IEC 60814
- [49] Norm IEC 60156
- [50] IEEE Standard C57.104-2008
- [51] Bockisch M.: Nahrungsfette und –öle; Handbuch der Lebensmitteltechnologie, Verlag Ulmer, Stuttgart, 1993

- [52] Tenbohlen S.; Seibold R.: Wasseraufnahmevermögen und Alterungsverhalten von Pflanzenölen für Leistungstransformatoren, Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2008
- [53] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ester>, abgerufen am 12.2.2011
- [54] Hegemann G.: Toxikologische und ökologische Aspekte beim Einsatz von Midel 7131, beck isoliertechnik 57, 1988
- [55] <http://de.wikipedia.org/wiki/Carbonsäureester> abgerufen am 12.2.2011
- [56] Koch M., Krüger M., Tenbohlen S. : Moderne Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts in Leistungstransformatoren, Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2008
- [57] Smith M. B., March J.: March's Advanced Organic Chemistry, John Wiley & Sons, 2001
- [58] Jahresbericht IEH Hannover, 2000
- [59] Cussler E.L.: Diffusion, Mass Transfer in Fluid Systems, Second Edition, Cambridge University Press, 1997
- [60] Norm IEC 60567
- [61] Khan I., Wang Z., Cotton I., Northcote S.: Dissolved Gas Analysis of Alternative Fluids for Power Transformers, DEIS Magazin, Vol.23 No. 5 September/October, 2007
- [62] Khan I., Wang Z., Dai J., Cotton I., Northcote S.: Fault Gas Generation in Ester based Transformer Fluids and Dissolved Gas Analysis (DGA), ICCMD Konferenz Peking China, April, 2008

- [63] Duval M.: The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers, DEIS Magazin, Vol. 24, No. 6, November/Dezember, 2008
- [64] Höhllein-Atanasova I., Frotscher R.: Carbon Oxides in the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers and Tap Changers, DEIS Magazin, Vol. 26, No. 6, November/Dezember, 2010

11 Anhang

Probenimprägnierung

Die Proben wurden fertig geschnitten, kerosinofentrocken und mit Trockenmittel zusammen vakuumverpackt geliefert und wie folgt imprägniert:

1. Schichten in ein Glasgefäß und Beschweren mit einem Metallgegenstand
2. Einbringen in den Vakuumtrockenschrank und Platzieren des Einlaufschlauches
3. Verschließen des Schrankes und Anlegen des Vakuums
(< 1 mbar, typ. 0,4 mbar)
4. Vakuumhalten für 1 Stunde
5. Einlassen der Isolierflüssigkeit bis der Spiegel mindestens 2 cm höher steht als die oberste Probe
6. Vakuumhalten für 4 Stunden
7. Vakuumbrechen, wobei der Lufteinlass über eine, mit trockenem Silicagel gefüllte, Trockenpatrone (Volumen 1 Liter) geschieht
8. Ruhezeit, 48 Stunden

Danach wurden die Proben zusammen mit dem gefüllten Prüfgefäß entweder sofort geprüft (bei Versuchen mit Raumtemperatur), oder zusammen mit dem gefüllten Prüfgefäß der Temperaturbehandlung unterzogen.