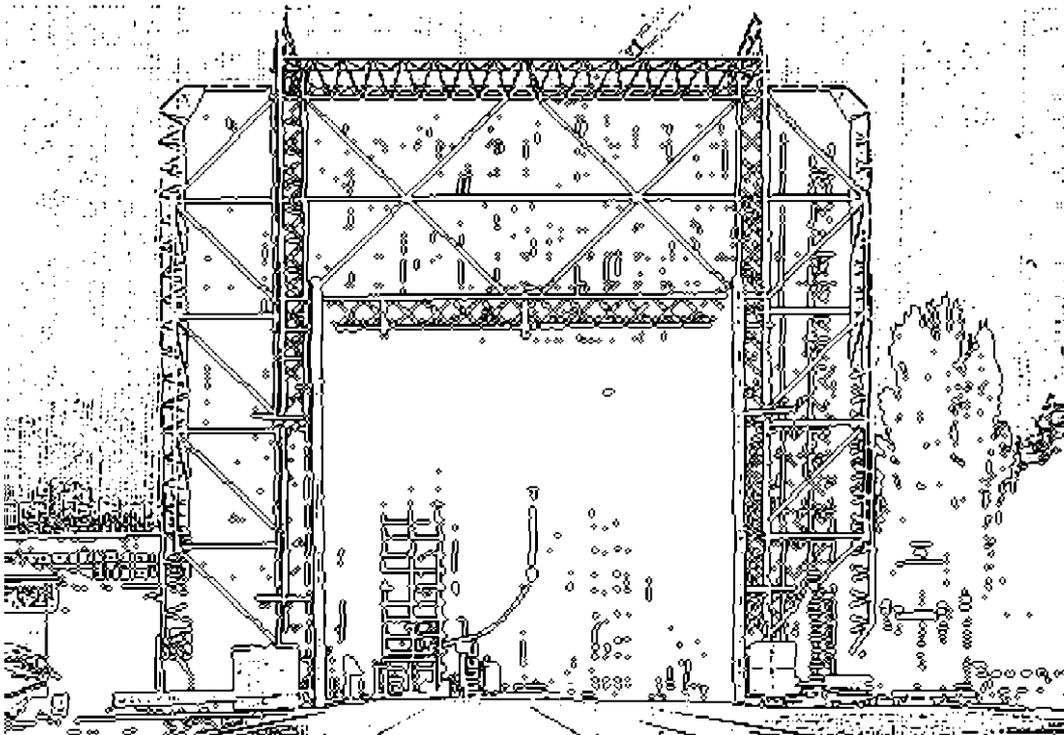


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

**DIPLOMARBEIT**



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK  
UND SYSTEMMANAGEMENT

---

# Dielektrische Vergleichsmessungen an repräsentativen Öl-Board Anordnungen

*Diplomarbeit von*

Christian Gastinger

Durchgeführt am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement  
der Technischen Universität Graz  
Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Österreich  
[office.hspt@tugraz.at](mailto:office.hspt@tugraz.at), [www.hspt.tugraz.at](http://www.hspt.tugraz.at)



*Betreuer*

Judendorfer, Thomas, Dipl.-Ing.

*Begutachter*

Sumereder, Christof, Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz.

*Institutsvorstand*

Muhr, Hans Michael, O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c

Graz, im Juni 2011

## Danksagung

In erster Linie möchte ich mich beim Institutsvorstand O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c Hans Michael Muhr bedanken, dass es mir ermöglicht wurde an seinem Institut diese Diplomarbeit zu verfassen. Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Thomas Judendorfer für die tatkräftige Unterstützung bei den Messungen, sowie die hilfreichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge bei der Erstellung meiner Diplomarbeit. Vielen Dank auch an meinen Begutachter Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz. Christof Sumereder, der mir bei der Fertigstellung meiner Diplomarbeit mit seinem Wissen und seinen Anregungen wertvolle Hilfestellung leistete.

Auch möchte ich mich bei meiner Freundin Babsi bedanken. Vielen Dank für deine große Geduld, deine Aufmerksamkeit, deine Unterstützung, deine Vorschläge und vor allem für das Korrekturlesen! Ebenfalls möchte ich mich auch bei ihrer Familie bedanken.

Weiters möchte ich mich bei meinen Freunden, ehemaligen WG-Mitbewohnern und Studienkollegen bedanken für die vielen schönen und lustigen Erlebnisse während meiner Studienzeit, die den Uni-Alltag aufgelockert haben. Im Besonderen möchte ich an dieser Stelle meine langjährigen Schulfreunde Tofi, Tom und Wu erwähnen, mit deren Hilfe so manche Dinge, sei es nun in organisatorischer Hinsicht oder auf der Uni, erleichtert wurden.

„Last but not least“ gilt ein besonderer Dank meinen Eltern Renate und Helmut, sowie meinen Geschwistern für die Unterstützung während meiner Studienzeit.

## 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 .....

.....

(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.

.....

date

.....

(signature)

## Kurzfassung

Mit der Elektrizitätsversorgungsrichtlinie 2005/89/EG wurden die Netzbetreiber unter anderem dazu aufgefordert die Versorgungsqualität und Netzsicherheit zu gewährleisten. Transformatoren zählen dabei oft zu den wichtigsten und teuersten Bestandteilen in der Energieversorgungskette, da sie beispielsweise bei Kraftwerken, in Übertragungs-/Verteilungsnetzen und in großen Industrieanlagen zu finden sind. Unerwartete Ausfälle von Transformatoren sollten daher vermieden werden, damit es z. B. zu keinen Versorgungsengpässen kommt. Gründe für Ausfälle liegen meistens in einer mangelhaften Instandhaltung, falscher Bedienung, unzureichendem Schutz, unerkannten Fehlern, Blitzschlag oder Kurzschlüssen. Besonders der Kostendruck, aber auch das Ansehen der Firma und mögliche Umsatzeinbußen sind Gründe für eine gewissenhafte Instandhaltung und Zustandsbewertung der Anlagen. Auch die Risikobeurteilung und somit das Ausfallrisiko kann mit einer Zustandsbewertung des Transformators mit gewissen Wahrscheinlichkeiten beurteilt werden, wobei vor allem das Alter und die Beanspruchung bzw. die Auslastung bis hin zu den Belastungsgrenzen ausschlaggebend sind [89] [91] [92].

Der Zustand des Isolationssystems von Transformatoren, welches aus Isolieröl und Feststoffen, wie z. B. Papier, besteht, ist maßgebend für die Lebensdauer des Betriebsmittels. In dieser Diplomarbeit wird daher der Fokus auf das dielektrische Verhalten dieses Mischdielektrikums gelegt, wobei zuerst der Stand des Wissens in Form einer Literaturrecherche erhoben und danach an einem selbst entworfenen Isolierstoffmodell bzw. Transformatormodell die Aussagekraft und praktische Anwendbarkeit dieser dielektrischen Methoden getestet wurde. Wichtig bei den dielektrischen Messungen ist, dass die Ergebnisse unter Berücksichtigung von Parametern, wie der Materialzusammensetzung, dem Materialzustand, den Umgebungsbedingungen und dem Isoliersystemaufbau ausgewertet werden. So können beispielsweise die Parameter Sauerstoff, Feuchtigkeit und Temperatur zu einem Abbau der mechanischen und elektrischen Festigkeit bis hin zum Isolationsdurchbruch führen [82].

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden anhand eines geeigneten und repräsentativen Versuchsaufbaues dielektrische Vergleichsmessungen bei den Messtemperaturen 20°C, 50°C und 90°C durchgeführt. Die verwendeten Messmethoden sind die Frequenzbereichsspektroskopie (FDS), Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC), sowie die Karl-Fischer-Titration (KFT) für Flüssigkeiten und Feststoffe. Bei den Messungen wird ein besonderes Interesse auf den Wassergehalt, den Verlustfaktor, sowie die elektrische Leitfähigkeit des Dielektrikums gelegt. Außerdem wird mit Hilfe der Ergebnisse aus der Isolierölanalyse auf die sogenannten Gleichgewichtskurven näher eingegangen.

## Abstract

With the directive 2005/89/EG implemented by the European Union, system operators were asked to define performance goals for the quality of supply and the power system security and to observe them. Thereby transformers are one of the most important and expensive components during the supply chain of energy because we find them in power plants, in transmission networks and in industrial plants. Hence unexpected breakdown of transformers should be avoided so that e.g. no supply shortfall can occur. Reasons for a breakdown are often deficient maintenance, false handling, insufficient protection, undetected errors, a lightning bolt or a short circuit. Cost pressure, reputation of the company and possible losses in revenues make a conscientious maintenance and a condition assessment very interesting. With a condition assessment of the transformer also the risk of default can be estimated, whereby the important factors are age and workload of the transformer [89] [91] [92].

The condition of the insulation system that consists of insulating oil and a solid like e.g. paper, is essential to estimate the lifespan of the equipment. For this diploma thesis especially the dielectric behavior of the insulation system is necessary to know. First of all the current state of knowledge has been investigated, then with a self-designed insulation model respectively with a transformer model the methods found in the research were tested on their practicability. Important to consider is that the results of dielectric measurements can be influenced by many parameters like material composition, material conditions, ambient conditions and the construction of the insulation system. As an example it could be mentioned that the parameters oxygen, moisture and temperature can cause a reduction of mechanic and electric consistence or even lead to an insulation breakthrough [82].

For this diploma thesis suitable and representative test set-ups were built and dielectric comparative measurements at temperatures of 20°C, 50°C and 90°C were carried out. The used testing methods were the Frequency Domain Spectroscopy (FDS), the Polarization and Depolarization Currents (PDC) and the titration by Karl Fischer (KFT) for solids and liquids. The measurements especially focus on the moisture content, the dielectric loss and the conductivity of the dielectric. Besides with the results of the analysis of the insulating oil the so-called “moisture equilibrium” can be discussed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	3
1.2 Problemstellung .....	4
1.3 Zielsetzung und Methodik .....	5
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>6</b>
2.1 Geschichtliche Entwicklung der Transformatorisierungen.....	6
2.2 Forschungsergebnisse aus der Literatur.....	11
2.2.1 Versuchsaufbauten .....	11
2.2.2 Elektrische Methoden .....	15
2.2.3 Nicht elektrische Methoden .....	23
2.2.4 Vergleich von Ergebnissen der unterschiedlichen Messmethoden ...	27
<b>3 Dielektrische Diagnostik (verwendete Methoden)</b> .....	<b>31</b>
3.1 Grundlagen .....	32
3.1.1 Elektrische Leitfähigkeit.....	33
3.1.2 Verlustfaktor und Kapazität .....	36
3.1.3 Wassergehalt .....	43
3.2 Elektrische Diagnostik.....	46
3.2.1 Frequenzbereichsspektroskopie (FDS) .....	47
3.2.2 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC).....	50
3.3 Chemische Diagnostik / Analytik.....	52
3.3.1 Karl-Fischer-Titration für Flüssigkeiten.....	54
3.3.2 Karl-Fischer-Titration für Feststoffe .....	57
<b>4 Prüfaufbau</b> .....	<b>59</b>
4.1 Prüfling.....	59
4.2 Verwendete Materialien und deren Eigenschaften (Prüfling) .....	63
4.2.1 Aluminium.....	63
4.2.2 Transformerboard.....	64
4.2.3 Mineralöl.....	66
4.2.4 Ölimprägniertes Transformerboard .....	68
4.3 Prüfgefäß .....	71
4.4 Verwendete Materialien und deren Eigenschaften (Prüfgefäß) .....	74
4.4.1 Glas.....	74
4.4.2 Edelstahl.....	76
4.5 Kapazität der Anordnung (analytische Berechnung).....	77

<b>5 Messungen</b> .....	<b>79</b>
5.1 Messvorbereitung .....	79
5.2 Prüfplan/Probenentnahmeplan .....	80
5.3 Messablauf .....	82
5.3.1 Frequenzbereichsspektroskopie.....	82
5.3.2 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung.....	86
5.3.3 Karl-Fischer-Titration für Flüssigkeiten .....	90
5.3.4 Karl-Fischer-Titration für Feststoffe .....	93
5.4 Fehlerquellen bei den Messmethoden .....	96
5.4.1 Elektrische Methoden.....	96
5.4.2 Nichtelektrische Methoden .....	98
<b>6 Messergebnisse</b> .....	<b>101</b>
6.1 Experimentelle Ergebnisse der Vorversuche (Anordnung 1 & 2).....	102
6.1.1 Daten zur Messvorbereitung .....	104
6.1.2 Frequenzbereichsspektroskopie.....	104
6.1.3 Karl-Fischer-Titration.....	107
6.2 Experimentelle Ergebnisse des Hauptversuches (Anordnung 3).....	109
6.2.1 Daten zur Messvorbereitung .....	111
6.2.2 Frequenzbereichsspektroskopie.....	112
6.2.3 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung.....	115
6.2.4 Karl-Fischer-Titration.....	121
6.2.5 Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Messmethoden .	125
6.3 Diskussion der Vorversuche (Anordnung 1 & 2) .....	131
6.4 Diskussion des Hauptversuches (Anordnung 3) .....	135
6.4.1 Frequenzbereichsspektroskopie.....	136
6.4.2 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung.....	137
6.4.3 Karl-Fischer-Titration.....	139
6.4.4 Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Messmethoden .	141
<b>7 Schlussfolgerungen</b> .....	<b>143</b>
<b>8 Zusammenfassung</b> .....	<b>149</b>
<b>9 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>153</b>
<b>10Anhang</b> .....	<b>161</b>
<b>11Abkürzungen</b> .....	<b>168</b>

# 1 Einleitung

Dank der immer besser werdenden Diagnostikmethoden und der immer größer werdenden Auswahl an Messgeräten bzw. der Vielzahl an Analyseverfahren für Betriebsmittel, wie Transformatoren, kann durch eine entsprechende Auswertung von Messergebnissen eine aussagekräftigere Zustandsbewertung durchgeführt werden. Dazu kommt, dass auch die Leistungsanforderungen an die Betriebsmittel stetig steigen und aufgrund von wirtschaftlichen Anforderungen diese bis an die Grenzen belastet werden. Mit Hilfe der Diagnostik versucht man nun beispielsweise die Leistungsfähigkeit, sowie das Ausfallrisiko und somit die Zuverlässigkeit von Betriebsmitteln zu bewerten. Weiters gehen die Betreiber weg von zeitabhängiger und somit ausfallorientierter Instandhaltung und hin zu zustandsbasierter und somit risikoorientierter Instandhaltung. Die Zustandsbewertung stellt allerdings nur ein Teilgebiet der Beurteilungsstrategien der Betreiber dar, wie man in der nachfolgenden Abbildung sehen kann. Aufbauend auf die Betriebsmittelanalyse werden beim sogenannten „Asset-Management“ für Transformatoren auch die Risikobeurteilungen und die Planung mit Rücksichtnahme auf die Lebenszykluskosten für weitere Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt [5] [92].

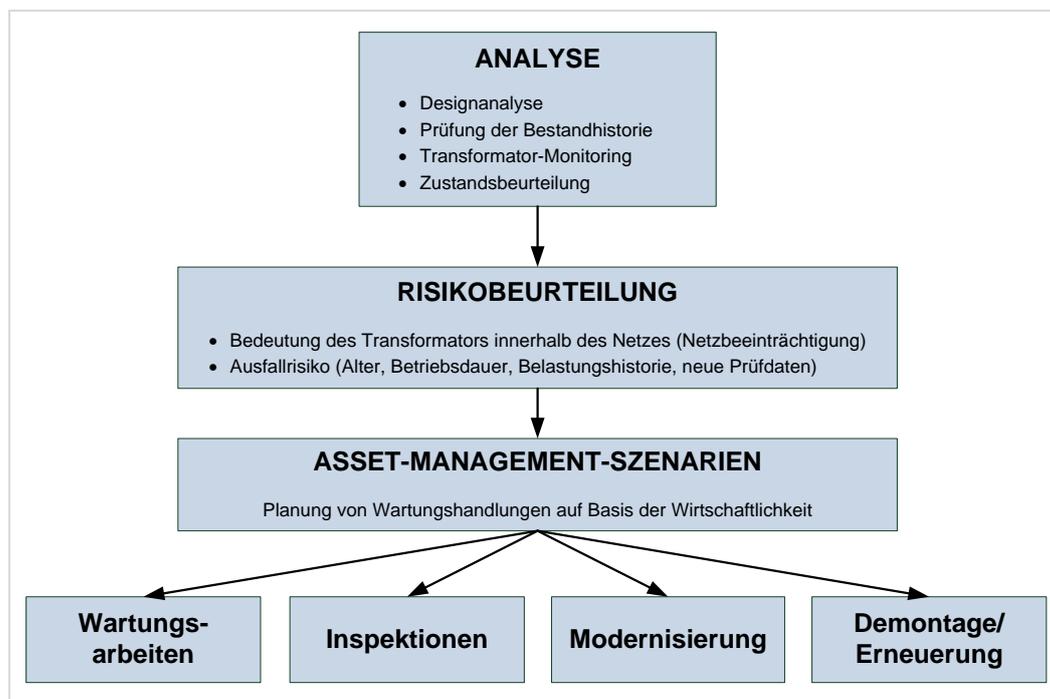
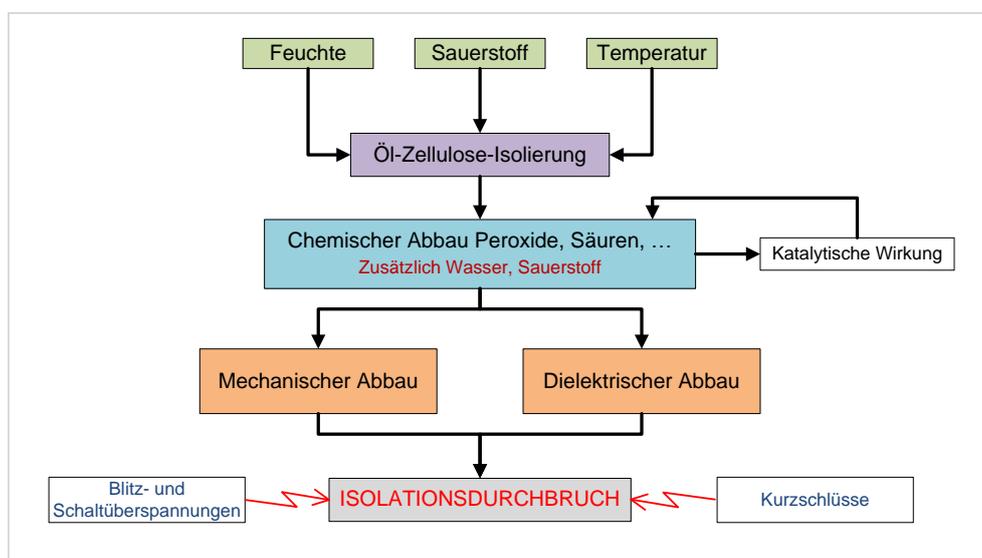


Abbildung 1.0-1: Mögliches Asset-Management für einen Transformator (adaptiert aus [92])

Die Diagnostik, als Teil des Asset-Management, ist somit ein sehr wichtiges Instrument für die Zustandsbewertung von Betriebsmitteln. In weiterer Folge kann durch treffsichere Diagnostik und aussagekräftigere Zustandsbewertung die Versorgungssicherheit der elektrischen Energiesysteme und ein kosteneffizienter Betrieb gewährleistet werden. So kann mit Hilfe der Zustandsbewertung eine rechtzeitige Maßnahme gegen einen möglichen Ausfall bzw. ein Fehlverhalten des Betriebsmittels durchgeführt werden. Die nachstehende Abbildung zeigt mögliche Lebensdauer-Einflussfaktoren, sowie deren Auswirkungen auf eine Öl-Zellulose-Isolierung eines Transformators. Die Öl-Zellulose-Isolierung dient dabei als Dielektrikum. Die Auswirkungen reichen bis zum Isolationsdurchbruch und somit bis zu einem möglichen Ausfall des Transformators. Weiters kann mittels einer Zustandsbewertung eine Lebensdauerabschätzung und im ökonomischen Sinne eine Kostenersparnis realisiert werden, da es zu einer zustandsbasierenden Wartungsmaßnahme und nicht mehr zu einem Komplettaustausch eines Betriebsmittels kommen muss [5] [82].



**Abbildung 1.0-2: Einflussfaktoren auf eine Öl-Zellulose-Isolierung und deren Auswirkungen (adaptiert aus [82])**

Im weiteren Verlauf wird neben der Motivation für die Durchführung der Diplomarbeit und der Problemstellung auch die geforderte Zielsetzung, sowie die verwendete Methodik erläutert. Außerdem wird ein grober Überblick über den Aufbau der Diplomarbeit gegeben.

## 1.1 Motivation

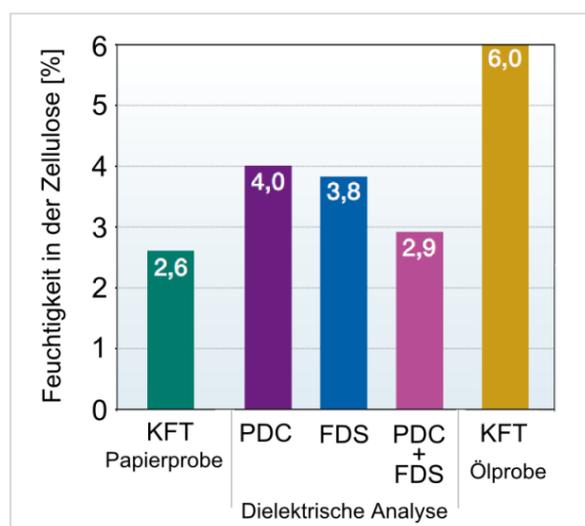
Um den derzeitigen und noch wachsenden Lebensstandard zu gewährleisten sind unter anderem ausreichende Erzeugungs- und Übertragungskapazitäten, sowie eine damit einhergehende Versorgungssicherheit bzw. betriebssichere Netze notwendig. Transformatoren sind dabei eines der wichtigsten und teuersten Betriebsmittel in der Energieversorgungskette. So findet man Transformatoren auf jeder Spannungsebene in Übertragungs- und Verteilungsnetzen, bei Kraftwerken, in Umspannwerken, bei Transformatorstationen usw. Besonders Ausfälle von Leistungstransformatoren können nicht nur lokale Netzabschaltungen, sondern im schlimmsten Fall auch Stromnetzausfälle über die Landesgrenzen hinaus verursachen. Aus diesem Grund ist eine rechtzeitige Zustandsbewertung von Transformatoren sehr wichtig. Außerdem können durch eine fachgerechte Bewertung der Isolationssysteme und anschließende Wartung und Instandhaltung Kosten eingespart werden, da z. B. keine Neuinvestitionen getätigt werden müssen [5].

Bei Transformatoren mit einem Öl-Zellulose-Isolationssystem dominiert die Feststoffisolierung aus mehreren Gründen die Lebensdauer. Diese Gründe sind z. B. schwere bis keine ökonomische Wartbarkeit oder kein Selbstheilungsvermögen des Feststoffes. Wichtige Parameter für die Zustandsbewertung sind beispielsweise Sauerstoff, hohe Temperaturen oder Feuchtigkeit, wie man auch in der vorherigen Abbildung 1.0-2 sehen kann. Außerdem ist die hygroskopische Zellulose maßgebend für die Lebensdauer des Betriebsmittels, da unter der Wirkung des H<sub>2</sub>O-Moleküls eine Aufspaltung der Zellulose begünstigt wird und es dadurch zu einer Herabsetzung der mechanischen Festigkeit kommt. Im Vergleich zum Isolieröl wird das vorhandene Wasser hauptsächlich in der Zellulose gespeichert, da die Wasseraufnahmefähigkeit der Zellulose z. B. um den Faktor 1:2000 größer ist. Abhängig vom Messgerät erfolgt die Bestimmung des Wassergehaltes in den Proben in der Regel entweder in % oder in ppm, dabei entspricht 1 % Wassergehalt 10.000 ppm [21] [78] [82].

Besonders die Vielzahl an möglichen Messmethoden macht die Vergleichbarkeit der Ergebnisse interessant. So kann es vorkommen, dass bei unterschiedlichen Methoden auch unterschiedliche Ergebnisse ermittelt werden und dementsprechend beurteilt werden müssen.

## 1.2 Problemstellung

Durch die Vielzahl an Messmethoden wird es immer schwieriger ein geeignetes Analyseverfahren auszuwählen bzw. bei der Ermittlung verschiedener Ergebnisse eine fachgerechte Interpretation für die Zustandsbewertung von Betriebsmitteln zu erstellen. So zeigt beispielsweise die nachstehende Abbildung unterschiedliche Messergebnisse für den Wassergehalt in einer Zellulose. Die Karl-Fischer-Titration (KFT) einer Feststoffprobe ist in der Regel eine sehr genaue Messmethode und wird sehr oft als Referenzmessung verwendet. Wie man in der Abbildung sieht, können bei der Karl-Fischer-Titration einer Ölprobe und anschließender Nutzung von Gleichgewichtskurven zur Ermittlung der Zellulosefeuchtigkeit (in Abbildung als „KFT Ölprobe“ bezeichnet) Messabweichungen von über 100 Prozent entstehen. Selbst die vielversprechenden elektrischen Diagnosemethoden, wie z. B. die Polarisations-/Depolarisationsstrommessung (PDC) oder die Frequenzbereichsspektroskopie (FDS), weisen im Vergleich zum Referenzwert einen um rund 50 Prozent höheren Messwert für die Zellulosefeuchtigkeit auf. Allerdings kann beispielsweise an Transformatoren nur sehr schwer bis gar keine Feststoffprobe entnommen werden und somit muss man über indirektem Weg den Wassergehalt in der Feststoffisolierung bestimmen. Daher kann es vorkommen, dass die ermittelten Messwerte zu groß sind und es zur Fehlinterpretation des tatsächlichen Zustandes kommen kann.



**Abbildung 1.2-1: Vergleich von verschiedenen Messmethoden zur Bestimmung des Feststoffwassergehalts (nach [28])**

### 1.3 Zielsetzung und Methodik

Ziel der Diplomarbeit ist es, anhand eines geeigneten und repräsentativen Versuchsaufbaues, welcher selber entworfen und teilweise selber konstruiert wurde, dielektrische Vergleichsmessungen durchzuführen. Die im Labor aufgebaute Versuchsanordnung repräsentiert dabei das Öl-Zellulose-Isolationssystem eines Transformators. Die verwendeten elektrischen und chemischen Diagnostikmethoden (FDS, PDC und KFT) entsprechen dem Stand der Technik und obwohl eine kombinierte Anwendung von FDS und PDC möglich ist, wird im Rahmen dieser Diplomarbeit diese Methode nicht näher untersucht. Bei den Messungen wird besonderes Interesse auf den Wassergehalt, den Verlustfaktor, sowie die elektrische Leitfähigkeit des Dielektrikums gelegt. Als Isolationssystem wird ein geschichtetes Dielektrikum, bestehend aus Mineralöl (Nytro 4000X von der Firma Nynas AB) und Pressboard (Transformerboard TIV von der Firma Weidmann AG) verwendet.

Neben der Messung der bereits genannten Größen soll die Wechselwirkung von Isolieröl und Zellulose bezüglich deren Wassergehalts untersucht werden. Die Messungen erfolgen bei unterschiedlichen Temperaturen, im Speziellen bei 20°C, 50°C und 90°C, und mit Hilfe von unterschiedlichen Messmethoden.

In weiterer Folge wurden die Messergebnisse ausgewertet und diskutiert. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden Forschungsbeiträge zu derselben Thematik recherchiert und die für die Diplomarbeit notwendigen Kenngrößen, sowie die Messmethoden näher erläutert. Weiters wurde noch das gesamte Projekt und die gemachten Erfahrungen dokumentiert. Nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die groben Bestandteile der Diplomarbeit.

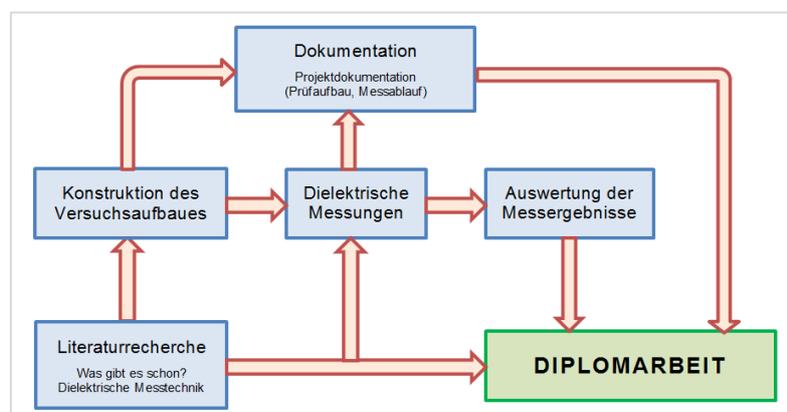


Abbildung 1.3-1: Schematischer Aufbau der Diplomarbeit [eigene Darstellung]

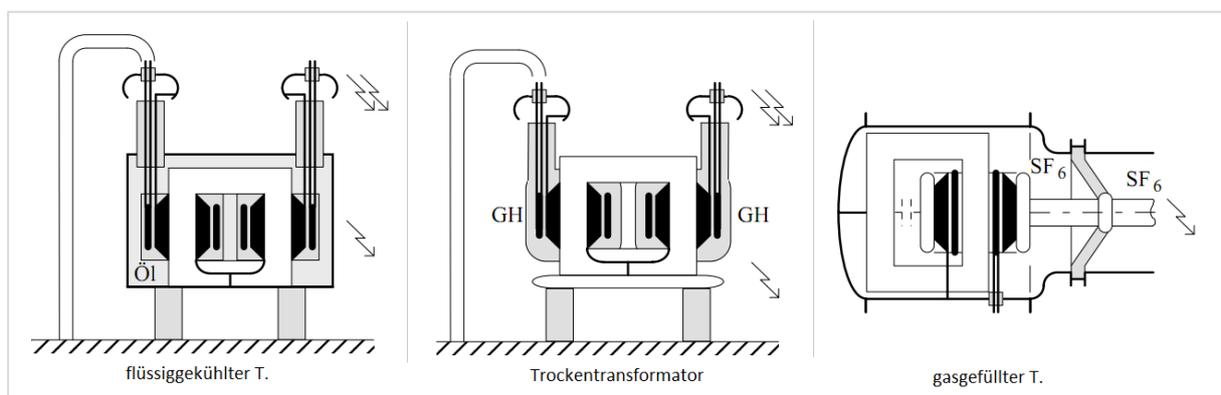
## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Transformatortypen, sowie die geschichtliche Entwicklung von Transformatorisierungen gegeben, die bis in das 19. Jahrhundert zurückgeht.

Nach dem geschichtlichen Rückblick mit Bemerkungen zu jetzigen bzw. zukünftigen Technologien werden einige Forschungsergebnisse von anderen Institutionen und Forschungsgruppen angeführt. Neben unterschiedlichen Versuchsaufbauten werden Untersuchungen in den Bereichen der elektrischen und nicht elektrischen Messmethodik beschrieben.

### 2.1 Geschichtliche Entwicklung der Transformatorisierungen

Grundsätzlich können drei verschiedene Transformatortypen bezüglich ihrer Isolationstechnik unterschieden werden. Diese sind der flüssiggekühlte, der trockene und der gasgefüllte Transformator. Die verschiedenen Typen kommen entsprechend der Spannungsebene und der Nennleistung zum Einsatz. In der nachfolgenden Abbildung wird der prinzipielle Aufbau der drei unterschiedlichen Transformatortypen dargestellt. Zu sehen ist, dass beim Trockentransformator diverse Konstruktionsausführungen entfallen können, wie beispielsweise der Kessel bzw. muss der gasgefüllte Transformator druckfest sein [1, S.352,353] [16, S.40].



**Abbildung 2.1-1: Prinzipieller Aufbau der verschiedenen Transformatortypen (adaptiert aus [1, S.353])**

Trockentransformatoren werden in der Regel bis zur Mittelspannungsebene eingesetzt. In höheren Spannungsebenen oder für spezielle Anwendungen kommen, unter anderem aufgrund der besseren Wärmeabfuhr, die anderen beiden Transformatortypen zum Einsatz [16, S.40]. Nähere Informationen über aktuelle Entwicklungen, Materialien, Fertigungstechniken und Ausblicke können in [17] nachgelesen werden.

Bei flüssiggekühlten Transformatoren werden bis heute vor allem Mineralöle als Isolier- bzw. Kühlflüssigkeiten verwendet. Allerdings besteht, aufgrund von ökologischen Anforderungen, immer mehr die Tendenz hin zu umweltverträglicheren Mitteln. Daher kommen beispielweise biologische Transformatoröle, wie z. B. die natürliche Esterflüssigkeit Envirotemp® FR3™, zum Einsatz. Prinzipiell besteht ein flüssiggekühlter Transformator aus zwei Komponenten, nämlich aus festen und flüssigen Isolierstoffen. Wobei die Zellulosefasern während des Herstellungsprozesses mit dem Transformatoröl imprägniert werden [16, S.40] [35].

Die Geschichte der festen Isolierstoffe beginnt schon am Ende des 19. Jahrhunderts. So wurden bei den ersten gebauten Transformatoren vor allem Asbest- oder Kartonisolierungen in Verbindung mit einer Luftkühlung verwendet. Zur Jahrhundertwende wurden diese Isolierstoffe durch das neue Schellack abgelöst. Schellack sind einfach zusammengeklebte Papierlagen. Damals war die Schellack-Einführung ein sehr großer Fortschritt, obwohl die weitreichenden gesundheitlichen Folgen, wie z. B. Lungenkrebs und Tumorerkrankungen, von Asbest zu dieser Zeit noch nicht bekannt waren. Ein EU-weites Verbot von Asbest wurde erst 2005 eingeführt. Durch Erhöhung der benötigten Leistungen bei den Transformatoren waren Schellack und Luft aber nicht mehr als Isolationssystem ausreichend, da mit steigender Leistung auch die thermische Beanspruchung stieg. Somit musste man an einem neuen Isolationskonzept arbeiten [6, S.5] [36].

Zeitgleich wurde an Öl-Transformatoren in Verbindung mit Hartpapier oder Pressspann geforscht, welche bessere Kühlungseigenschaften aufwiesen. Die Firma Weidmann AG entwickelte am Ende der 20er Jahre des letzten Jahrhunderts

schlussendlich das Transformerboard, welches im Prinzip ein verbesserter Pressspan ist. Genauer betrachtet handelt es sich beim Transformerboard um eine hochwertige Sulfatzellulose ohne jegliches Bindemittel. Die Gründe warum das Transformerboard heutzutage immer noch verwendet wird, sind unter anderem, dass man es vollständig trocknen, entgasen und hervorragend mit Öl imprägnieren kann [6, S.7,8].

Obwohl die sogenannten OIP (ölimprägnierten Papiere) als Stand der Technik bezeichnet werden können, gehen neuere Entwicklungen in Richtung der Hochtemperatur- und Trockentransformatoren, da das Papier thermische Grenzen besitzt und es infolgedessen zu größeren negativen Auswirkungen in Bezug auf die Betriebs- bzw. Versorgungssicherheit kommt. Derzeit gibt es Entwicklungen hin zu einem zellulosefreien Stoff (Aramide), welcher unter dem Namen NOMEX<sup>®</sup>-Board bekannt ist. Die großen Vorteile dieses Stoffes sind die Dauertemperaturbeständigkeit bei über 220°C, die Formstabilität, die hervorragenden dielektrischen Eigenschaften unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt und die bessere Teilentladungsfestigkeit. Der wesentlichste Nachteil ist allerdings der hohe Preis und daher wird NOMEX<sup>®</sup>-Board bis jetzt noch nicht in Standardtransformatoren eingesetzt [16, S.41,42].

Schon zu Beginn der flüssiggekühlten Transformatoren wurde Mineralöl als Isolier- bzw. Kühlflüssigkeit eingesetzt. Aufgrund von ökologischen Aspekten wurde in den letzten Jahren vermehrt in Richtung biologische Verträglichkeit und Abbaubarkeit geforscht. Neben den ökonomischen Gesichtspunkten waren auch die höher werdenden Temperaturanforderungen, sowie die Brandsicherheit (siehe nachfolgende Tabelle 2.1-1 unter Brennpunkt) ausschlaggebend für die Forschung in diesem Bereich. So wurden beispielsweise Silikonöle oder biologische Öle, wie Esterflüssigkeiten, immer genauer erforscht. Des Weiteren wurden Öle mit dem Inhaltsstoff PCB (polychlorierte Biphenyle) ab einer Nachweisgrenze von 30 ppm mit dem Bundesgesetzblatt 210/1993 verboten, da diese Chlorverbindung als giftig und krebserregend eingestuft wurden [16, S.42] [37].

In der nachstehenden Tabelle werden die Eigenschaften von verschiedenen Isolierflüssigkeiten aufgelistet.

**Tabelle 2.1-1: Eigenschaften verschiedener Isolierflüssigkeiten (adaptiert aus [16, S.43])**

Eigenschaft	Einheit	Vorschrift	Norm	Esterflüssigkeit	Silikonflüssigkeit	Mineralöl
Durchschlagsspannung	kV	IEC 60156	> 45	55	50	60
Verlustfaktor		IEC 60247	< 30 $10^{-4}$	10 $10^{-4}$	0,9 $10^{-4}$	< 10 $10^{-4}$
Dielektrizitätszahl $\epsilon_r$				3,3	2,7	2,2
Gefrierpunkt	°C	ISO 3016	< -45	-50	-53	-40
Flammpunkt	°C	ISO 2592	> 250	257	> 300	135-145
Brennpunkt	°C	ISO 2719	> 300	310	> 355	150-175
Kinematische Viskosität bei 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	< 35	33	30	20
Dichte bei 20°C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 3675	< 1.000	980	960	900

Trockentransformatoren werden vor allem für Innenraumanwendungen eingesetzt, da von diesen Transformatoren eine geringere Gefahr bezüglich der verwendeten Isolierstoffe ausgeht. Die bekanntesten Isolationsmaterialien sind Gießharz oder harzverklebte Wicklungen. Diese Transformatortypen werden bis in die Mittelspannungsebene eingesetzt und verfügen über eine Nennleistung bis ungefähr 12 MVA. Ein großes Problem bei diesen Transformatoren ist unter anderem die Wärmeabfuhr, da die Wahrscheinlichkeit, dass es Lufteinschlüsse gibt, im Vergleich zu ölisolierten Transformatoren, größer ist und es somit zu Teilentladungen kommt. Zur besseren Kühlung kommen allerdings Kühlkanäle zwischen Kern, Wicklung und innerhalb der Wicklungen selbst oder auch Ventilatoren zum Einsatz. Als Isolationsmaterial zwischen den Wicklungen können beispielsweise Kunststofffolien, Polyesterimid-Lack, Epoxydharz oder Zellulosematerialien zum Einsatz kommen, wobei bei einem Verzicht auf Zellulose die aufwendige Trocknung weggelassen werden kann. Weiters ist eine offene Bauweise möglich, da kein Kessel benötigt wird. Um die mechanischen Eigenschaften von Gießharz zu verbessern, werden in der Regel Glasfaserverstärkungen eingesetzt, um so Rissbildungen zu vermeiden und eine gute Formstabilität zu sichern [1, S.493] [16, S.40ff] [38].

Eine andere Möglichkeit um Trockentransformatoren zu realisieren, ist die Verwendung von Kunststoffkabeln anstatt der üblichen Wicklungssysteme. Zum Einsatz kommen vor allem sogenannte VPE-Kabel (**v**ernetzte **P**oly**e**thylen-Kabel). Trockentransformatoren, welche mit VPE-Kabeln aufgebaut werden, werden als Dryformer™ (Firma ABB) bezeichnet und werden in [1] auf der Seite 479 näher erläutert. Aufgrund der technischen und ökologischen Eigenschaften werden diese Transformatoren besonders in Grundwasserschutzgebieten, sowie EMV-empfindlichen, feuchten und tropischen Gebieten eingesetzt. Der große Vorteil dieser Kabel ist, dass sie praktisch keine Wartung benötigen und eine lange Lebensdauer bei Temperaturen unter 90°C besitzen. Weiters verfügen sie über eine gute Feuchtigkeitsbeständigkeit, hervorragende elektrische Festigkeit, ausgezeichnete thermische Stabilität und können an höhere Spannungen angeschlossen werden. So sind derzeitige Kabel mit einer Wechselspannung von bis zu 500 kV betreibbar. Der große Nachteil ist die niedrige Temperaturbeständigkeit. Somit muss auf die Temperaturabfuhr besonders geachtet werden [1, S.473,479] [16, S.40ff] [39].

Der dritte Transformatortyp ist, wie bereits anfangs erwähnt, der gasgefüllte Transformator. Bei diesen Transformatoren wird ein Gas bzw. ein Gasgemisch als Isolier- und Kühlmedium eingesetzt. Diese Transformatorentechnik gibt es schon seit einigen Jahrzehnten und bekam zur Jahrtausendwende einen neuen Aufschwung. Vor allem im energiehungrigen Japan wird diese Technik vorangetrieben und eingesetzt, da der benötigte Platzbedarf für solche Anlagen verglichen mit anderen Techniken relativ gering ist. Als Isoliergas wird hauptsächlich SF<sub>6</sub> (Schwefelhexafluorid) verwendet. Vorteile von gasgefüllten Transformationen sind, dass entsprechend der Leistungsanforderung der Gasdruck eingestellt werden kann. Außerdem werden keine Ölauffangwanne, Löscheinrichtungen und diverse andere Konstruktionen dieser Art benötigt, da SF<sub>6</sub> unter anderem unbrennbar ist. Ein weiterer wesentlicher Pluspunkt ist, dass das SF<sub>6</sub> unter normalen Betriebsbedingungen keiner Alterung unterworfen ist und es eine hohe elektrische Festigkeit besitzt. Nichtsdestotrotz ist SF<sub>6</sub> ein sehr teures Gas und wie jeder leicht flüchtige Stoff benötigt man für den Einsatz total luftdichte Gehäuse. Außerdem ist SF<sub>6</sub> das derzeit stärkste Treibhausgas und besitzt eine der längsten Verweildauern in der Atmosphäre. Deshalb wurde schon öfters über ein gänzlich Verbot von SF<sub>6</sub> diskutiert [1] [16, S.45] [40, S.178].

## 2.2 Forschungsergebnisse aus der Literatur

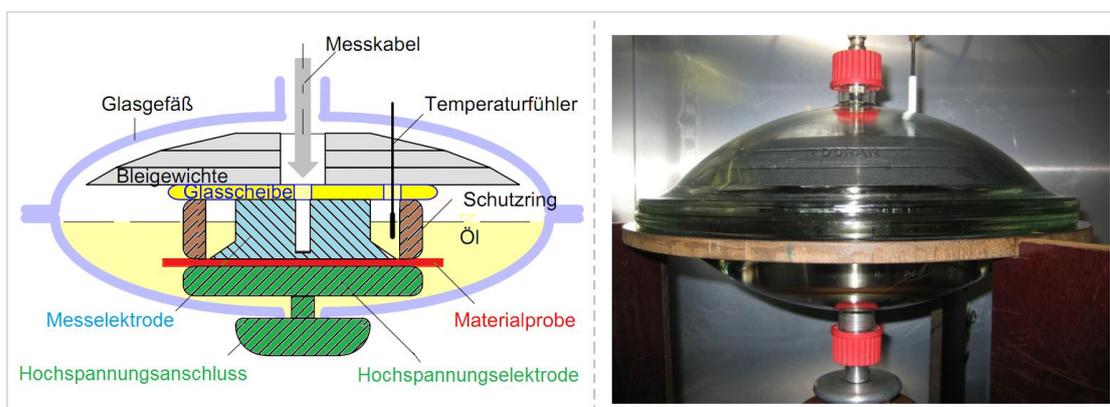
Neben den in dieser Diplomarbeit ermittelten Ergebnissen, existieren bereits andere Publikationen, die sich mit dieser Thematik beschäftigt haben. So gibt es verschiedene Versuchsaufbauvarianten, Ergebnisse bei den elektrischen und nicht elektrischen Messmethoden, sowie Vergleiche der verschiedenen Messmethodenergebnisse. In diesem Abschnitt werden einige dieser Publikationen angeführt und erläutert.

Die Grundlagen der dielektrischen Messmethoden „FDS (Frequency Domain Spectroscopy)“, „PDC (Polarization Depolarization Current)“ und der chemischen Analytik „KFT (Karl-Fischer-Titration)“ können im Kapitel 3.2 und 3.3 nachgelesen werden. Weiters wird im Kapitel 3.1 auf grundlegende Größen, welche im Rahmen der Diplomarbeit von Interesse sind, näher eingegangen.

### 2.2.1 Versuchsaufbauten

Der Versuchsaufbau, im Folgenden auch als Messzelle bzw. Prüfgefäß bezeichnet, kann in vielen unterschiedlichen Varianten ausgeführt sein. Nachfolgend werden einige beispielhafte Aufbauvarianten aus unterschiedlichen Publikationen angeführt.

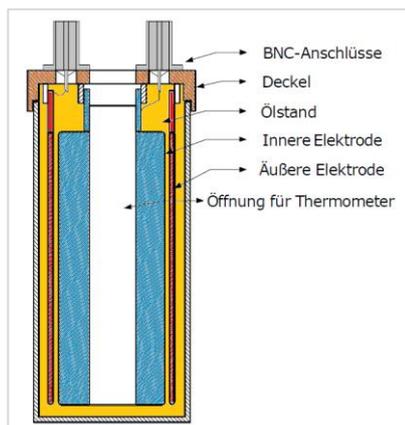
In [68] wird eine Messanordnung mit einer Schutzringelektrode für die Bestimmung von dielektrischen Eigenschaften verwendet. In Abbildung 2.2-1 wird diese Messzelle dargestellt.



**Abbildung 2.2-1: Möglicher Aufbau einer Messzelle zur Bestimmung von dielektrischen Eigenschaften (adaptiert aus [68])**

Die Schutzringelektrode dient dazu, um die zu messenden Ströme, welche z. B. bei der PDC-Messmethode im nano- oder pico-Bereich liegen, von parasitären Leck- und Oberflächenströmen abzuschirmen. Wichtig bei dem Messzellenaufbau ist, dass die Elektroden und die Materialprobe sich im Isolieröl befinden, sowie, dass die Elektrodenkanten abgerundet sind. Durch die Abrundung der Kanten sollen Feldüberhöhungen und nichtlineare Stromerhöhungen vermieden werden. Bevor allerdings Messungen durchgeführt werden können, ist eine Messvorbereitung notwendig. So muss man die Messzelle zuerst gründlich reinigen, das Probenmaterial in der Messzelle nachtrocknen, entgastes Isolieröl unter Vakuum einfüllen und zum Schluss die Anordnung positionieren. Zur Durchführung der Messungen wird die Messzelle in einen Wärmeschrank gegeben, damit unterschiedliche Messtemperaturen eingestellt werden können. Anzumerken ist noch, dass die Messzelle luftdicht aufgebaut ist [68].

Eine andere Möglichkeit einer Messzelle zur Analyse von Flüssigkeiten mit Hilfe einer Schutzelektrode, wird in [33] verwendet. Abbildung 2.2-2 zeigt den schematischen Aufbau dieser Messzelle. Der Abstand zwischen der inneren und äußeren Elektrode beträgt beispielsweise 2 mm.



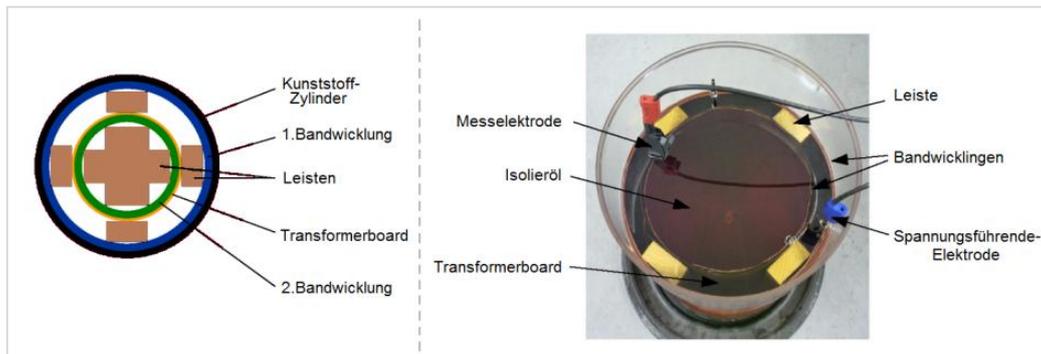
**Abbildung 2.2-2: Möglicher Aufbau für Messungen an hochisolierenden Flüssigkeiten (adaptiert aus [33])**



**Abbildung 2.2-3: Photo von einer Messzelle für Flüssigkeiten [80]**

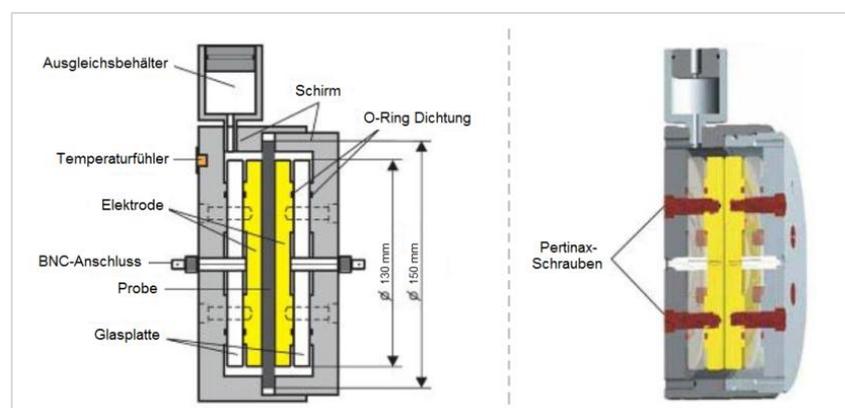
In [34] wird der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Versuchsaufbau zur Messung von dielektrischen Eigenschaften verwendet. Mit Hilfe dieses Aufbaues wurde eine FDS- und Impedanz-Messung durchgeführt. Wie man allerdings in

Abbildung 2.2-4 zeigt, ist das Gehäuse nicht luftdicht und auch nicht abgeschirmt, weshalb es für längere Messdauern ungeeignet ist. Es ist jedoch anzumerken, dass die Messungen mit relativ hohen Frequenzen (1 bis 100 kHz) durchgeführt wurden und somit kurze Messdauern entstanden.



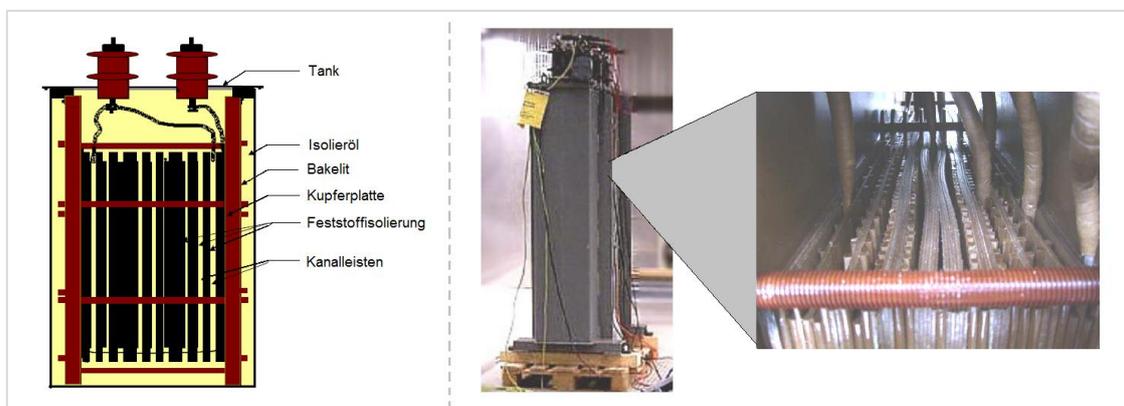
**Abbildung 2.2-4: Möglicher Versuchsaufbau mit Bandwicklungen (nach [34])**

In [67, S.76ff] bzw. auch in [69, S.226ff] wird für Messversuche ein Messzellenaufbau wie in Abbildung 2.2-5 verwendet. Der Aufbau ist abermals so konstruiert, dass über längere Messdauern annähernd konstante Bedingungen in der Messzelle herrschen. Mit Hilfe eines Gewindes am Schirm können die Elektrodenabstände verändert und somit unterschiedliche Öl-Papier-Anordnungen realisiert werden. Der Schirm dient wiederum dazu um Messstörungen zu minimieren. Der hermetisch abgeschlossene Ausgleichsbehälter wird dazu benötigt um bei Temperaturänderungen in der Messzelle den Druck im Gefäß konstant zu halten. Als Elektroden- und Gefäßmaterial kam Stahl zu Anwendung, wobei die Trennung dieser beiden mittels Floatglasplatten durchgeführt wurde [67, S.76ff].



**Abbildung 2.2-5: Möglicher Messzellenaufbau mit einem abgedichteten Stahlgehäuse (adaptiert aus [67, S.77])**

In [70, S.265ff] kommt für den Aufbau der Messzelle das sogenannte „Pancake-Modell“ zur Anwendung. Der prinzipielle Aufbau, sowie zwei Photos eines realen Messzellenaufbaues werden in Abbildung 2.2-6 dargestellt. Grundsätzlich besteht die Messzelle aus einem großvolumigen isoliergefüllten Kessel, in dem diverse Messanordnungen aufgebaut werden können. Mit Hilfe einer Kombination aus Kanalleisten und Feststoffisolationen kann man unter anderem die Auswirkungen der Geometrie der Öl-Papier-Isolation untersuchen. Ergebnisse bezüglich verschiedener Geometrieanordnungen können aus Abbildung 2.2-17 und Abbildung 2.2-18 auf Seite 21, aus Abbildung 2.2-25 auf Seite 28 oder aus [70] ab Seite 265 entnommen werden.



**Abbildung 2.2-6: Aufbau einer Messzelle nach dem „Pancake-Modell“  
(linkes Bild adaptiert aus [70, S.267], rechte Bilder aus [71, S.7])**

Eine Anordnung um Materialproben mit einem definierten und homogenen Wassergehalt zu befeuchten wird beispielsweise in [32] ab Seite 165 oder in [72] beschrieben. So wird mit Hilfe einer  $\mu\text{l}$ -Spritze eine definierte Wassermenge in ein Gefäß gebracht und durch Temperaturzyklen ein Feuchtigkeitstransfer erzwungen. Nachdem sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat, kann die Probe z. B. mit der Messzelle aus Abbildung 2.2-1 vermessen werden.

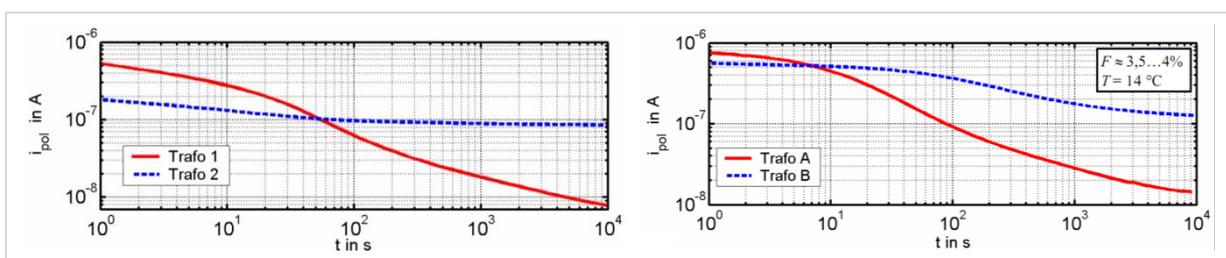
Wichtig für die aufgezählten Versuchsaufbauten ist das Einstellen eines Gleichgewichtszustandes im Öl-Zellulose-Isolationssystem. Es kommt zum sogenannten Diffusionsprozess, welcher einen Stoffaustausch innerhalb der Isolierung herbeiführt. Einzelheiten über die Physik des Feuchteausstausches in einem Öl-Zellulose-Isolationssystem können beispielsweise in [76] nachgelesen werden.

## 2.2.2 Elektrische Methoden

Aufgrund einer größeren Datentiefe und einfacheren Anwendbarkeit gewinnt die elektrische Diagnostik in der Praxis immer mehr an Bedeutung. Ein Überblick über mögliche elektrische Analyseverfahren wird in Tabelle 3.2-1 auf Seite 47 gegeben. In weiterer Folge beschränkt sich meine Recherche auf Ergebnisse für die FDS- und PDC-Analyse, da diese bei dem praxisorientierten Teil der Diplomarbeit zur Anwendung kamen.

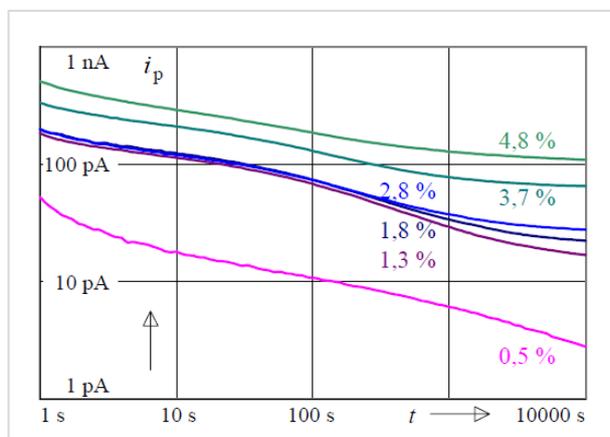
Wie in der Praxis eine FDS- bzw. PDC-Messung durchgeführt werden soll und eine Empfehlung, welche Werte man für die Messparameter einstellen soll, wird beispielsweise in [95] ab Seite 39 angeführt. Allerdings ist es empfehlenswert ebenfalls das Gerätehandbuch des jeweiligen Messgeräteherstellers bezüglich etwaiger Einstellungen am Messgerät durchzulesen.

In [31] wird eine mögliche Problematik bei der Vermessung von zwei anscheinend baugleichen Transformatoren, d.h. mit gleichen Nenndaten und einem identischen äußeren Erscheinungsbild, aufgezeigt. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Polarisationsstrom von zwei baugleichen 360-MVA-Transformatoren aus dem Jahre 1970. Aus dem linken Verlauf in Abbildung 2.2-7 wurde geschlossen, dass der „Trafo 2“ aufgrund des sehr flachen Verlaufs einen erheblichen Abbau des Isolationssystems aufweist. In [31] wird hingegen angemerkt, dass dieser Isolationssystemabbau mit einer durchgeführten Ölanalyse nicht bestätigt werden konnte. Der rechte Verlauf in der Abbildung soll zeigen, dass obwohl annähernd gleiche Messbedingungen bei den Transformatoren herrschten, es aufgrund des unterschiedlichen Isolationaufbaues zu erheblichen Abweichungen des Polarisationsstromes kommt.

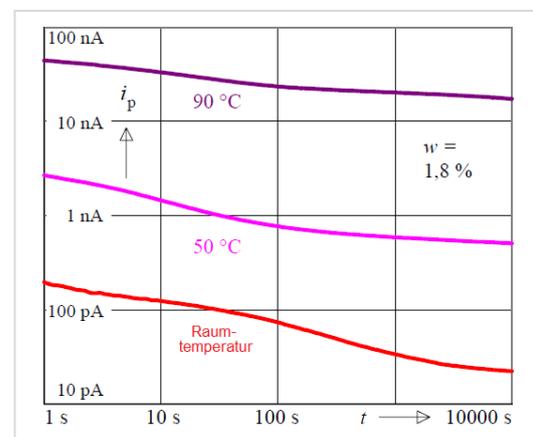


**Abbildung 2.2-7: Polarisationsströme von zwei baugleichen Transformatoren (rechtes Bild zeigt den Verlauf für gleiche Messtemperatur und ungefähr gleichen Wassergehalt) [31]**

Die möglichen Auswirkungen der Temperatur und des Wassergehaltes von ölprägnierten Papierproben auf den Polarisationsstrom werden in [32] näher untersucht. Abbildung 2.2-8 zeigt den Polarisationsstromverlauf für unterschiedliche Wassergehalte. Man sieht, dass mit steigendem Wassergehalt auch der Polarisationsstrom größer wird. Abbildung 2.2-9 zeigt den Verlauf des Polarisationsstroms für unterschiedliche Temperaturen, wobei der Wassergehalt konstant bleibt. Auch hier kann man feststellen, dass mit steigender Temperatur der Polarisationsstrom größer wird. Weiters werden in [32] noch Leitfähigkeitsendwerte für verschiedene Temperaturen und verschiedene Wassergehalte diskutiert, diese Ergebnisse werden allerdings in dieser Diplomarbeit nicht näher erläutert.



**Abbildung 2.2-8: Einfluss von unterschiedlichem Wassergehalt in ölprägniertem Papier auf Polarisationsströme [32]**



**Abbildung 2.2-9: Polarisationsströme bei unterschiedlichen Temperaturen (konst. Wassergehalt  $w$ ) (nach [32])**

Die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung kann beispielsweise auch an OIP-Durchführungen bei Transformatoren für eine Alterungsdiagnose der Durchführungen verwendet werden. In [32] werden dazu die Polarisationsströme von unterschiedlichen betriebsgealterten OIP-Durchführungen dargestellt, welche auch aus Abbildung 2.2-10 und Abbildung 2.2-11 entnommen werden können. Aus den beiden nachfolgenden Abbildungen ist ersichtlich, dass ein hoher Anfangswert für den Polarisationsstrom auf eine fortgeschrittene Alterung hinweist. Außerdem ist anhand der Abbildung 2.2-11 erkennbar, dass besonders das Öl einen wesentlichen Einfluss auf den Polarisationsstromverlauf besitzt.

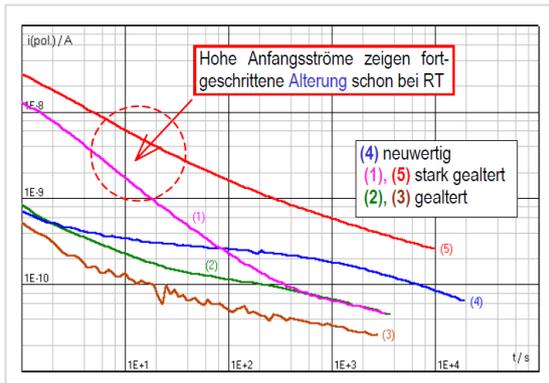


Abbildung 2.2-10: Polarisationsströme von gealterten OIP-Durchführungen bei Raumtemperatur (RT) [32]

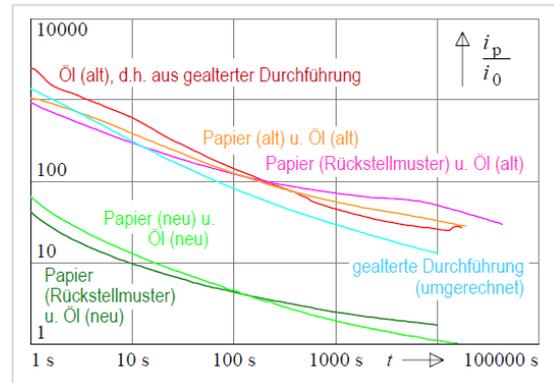


Abbildung 2.2-11: Polarisationsströme für unterschiedlich gealterte OIP-Durchführungen [32]

Mit den aus [32] ermittelten Verläufen für den Polarisationsstrom von OIP-Durchführungen wurde in der Untersuchung schlussgefolgert, dass man mit Hilfe der Anfangs- und Endwerte des Stromverlaufes, sowie aus den Stromverhältnissen Zusammenhänge für den Alterungs- und Befeuchtungszustand in homogenen und geschichteten Isolationen treffen kann. Außerdem können mit Hilfe des Leitfähigkeitsendwertes Rückschlüsse auf den Feuchtigkeitsgehalt im Papier und auf den Alterungszustand des Öls angestellt werden.

In [73] wurde der Verlauf des Polarisations- und Depolarisationsstromes unter Berücksichtigung von verschiedenen Wassergehalten und der Isolationsgeometrie untersucht. Die nachfolgende Abbildung zeigt die ermittelten Verläufe. Dabei sind die beiden rechten Verläufe für eine Ölkanalbreite von 9,6 mm gemessen worden.

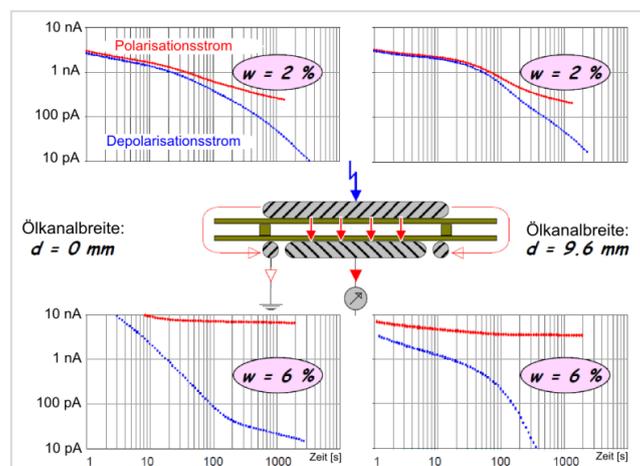
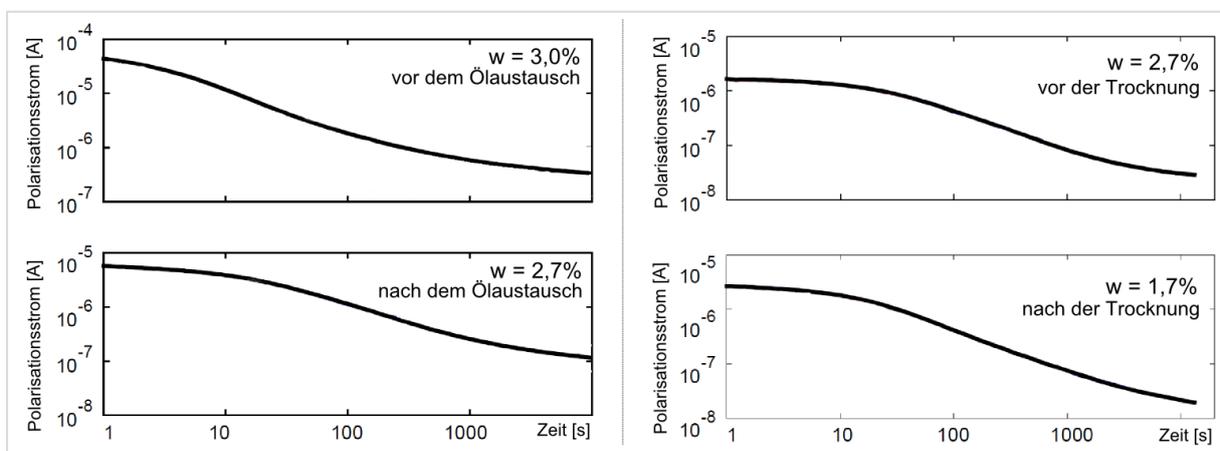


Abbildung 2.2-12: Einfluss des Wassergehaltes ( $w$ ) und der Isolationsgeometrie (Öl-Papier) auf den Polarisations- und Depolarisationsstrom (nach [73])

Weiters werden in [73] die Auswirkungen von einem Ölaustausch und einer Nachtrocknung eines 23 Jahre alten 300-MVA-Transformators diskutiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Polarisationsstromverlauf, sowie den durch „Kurven-Fitting“ ermittelten Wassergehalt in der Feststoffisolierung der Anordnung. Die Schlussfolgerung der Messungen ist, dass der Ölaustausch einen geringen Einfluss auf den Wassergehalt in der Feststoffisolierung hat, da sich der Hauptanteil des Wassers im hygroskopischen Feststoff befindet. Größere Auswirkungen auf den Wassergehalt hat hingegen eine Nachtrocknung des Transformators. Genauere Erklärungen über das Trocknungsverfahren können in [73] nachgelesen werden.

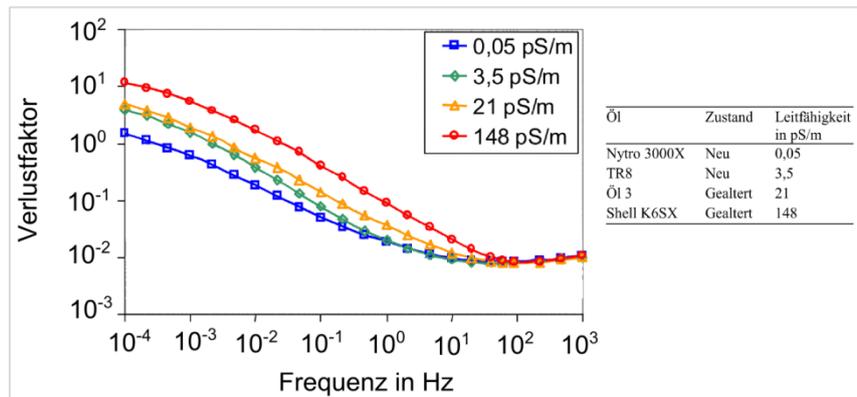


**Abbildung 2.2-13: Polarisationsstromverlauf mit ermitteltem Wassergehalt im Feststoff vor und nach dem Ölaustausch, sowie vor und nach der Trocknung des Transformators (nach [73])**

In [74] können äquivalente Beobachtungen bezüglich des Nutzens einer Nachtrocknung bei einem Transformator nachgelesen werden. Dabei erfolgt die Untersuchung mit Hilfe des Polarisationsstromverlaufs und des Verlustfaktors in Abhängigkeit der Frequenz. So kam man in [74] zu der Schlussfolgerung, dass der verringerte Wassergehalt vor allem im Zeitbereich größer 10 Sekunden Auswirkungen auf den Polarisationsstrom hat. Der Anfangsstrom wird hauptsächlich durch die Leitfähigkeit des Öls bestimmt. Im Frequenzbereich zeigen sich die Auswirkungen des Wasserentzuges vor allem bei sehr kleinen Frequenzen.

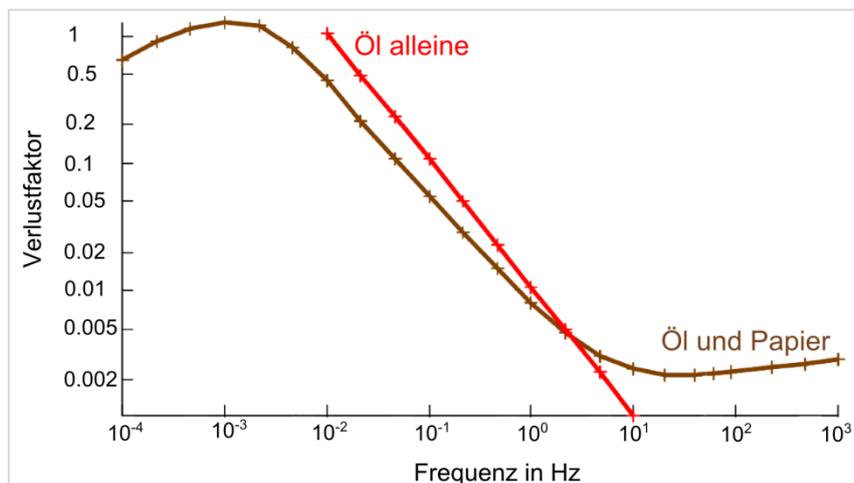
Mit Hilfe einer FDS-Analyse wurde im Rahmen einer Untersuchung in [33] der Verlustfaktor von ölprägnierten Pressboardproben bestimmt. Die ermittelten

Verläufe sind in der nächsten Abbildung ersichtlich. Man sieht, dass mit steigender Leitfähigkeit des imprägnierten Öls auch der Verlustfaktor ansteigt.



**Abbildung 2.2-14: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz von neuen Pressboardproben mit unterschiedlichen Ölimprägnierungen (konst. Wassergehalt 2,6%) (adaptiert aus [33])**

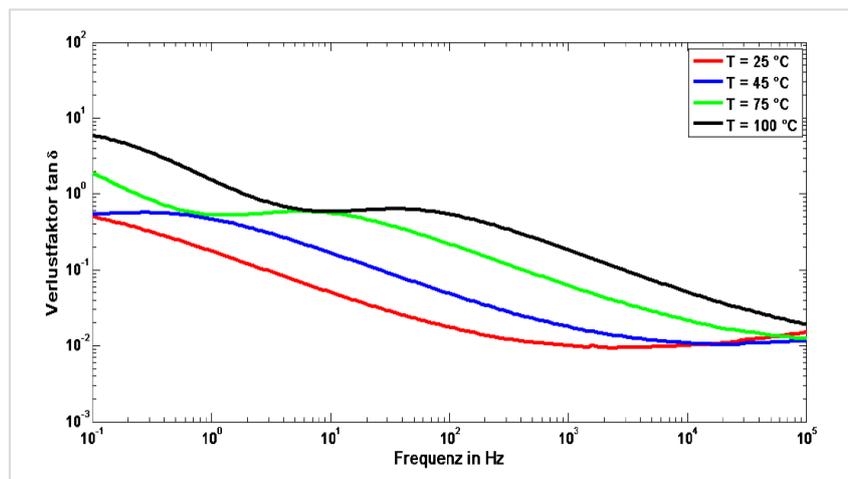
Weiters wurde in [33] noch der Verlustfaktorverlauf eines geschichteten Öl-Papier Dielektrikums und der des Öls alleine aufgenommen. Die ermittelten Verläufe sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Der Grund für einen nicht deckenden Verlauf der beiden Kurven ist der Zelluloseanteil beim kombinierten Dielektrikum.



**Abbildung 2.2-15: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz für ein Öl alleine und für ein geschichtetes Öl-Papier Dielektrikum (adaptiert aus [33])**

Neben den hier angeführten Ergebnissen aus den Untersuchungen in [33] wird in der Arbeit auch die elektrische Leitfähigkeit von unterschiedlichen Isolierölen in Abhängigkeit von der Temperatur diskutiert. Auf diese Ergebnisse wird allerdings nicht näher eingegangen.

In [34] wurde der Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz für unterschiedliche Temperaturen ermittelt. Abbildung 2.2-16 zeigt die ermittelten Verlustfaktorverläufe. Ziel der Arbeit war es, den Einfluss von höheren Frequenzen bei einer FDS-Messung festzustellen. Normalerweise reicht eine obere Frequenz von ungefähr 1 kHz aus, um alle wichtigen Informationen zu erhalten, bei dieser Untersuchung wurde jedoch bis zu einer Frequenz von 100 kHz gemessen. Die Schlussfolgerungen der Untersuchung werden aber nicht weiter erklärt, sondern können unter [34] nachgelesen werden.



**Abbildung 2.2-16: Verlustfaktor von ölprägniertem Transformatorboard bei unterschiedlichen Temperaturen (0,1 bis 100 kHz, 5% Wassergehalt) [34]**

Wie sich die Isolationsgeometrie auf den Polarisationsstrom, den Verlustfaktorverlauf und den Wassergehalt in der Anordnung auswirkt, wird in [70] ab Seite 265 angeführt und diskutiert. Abbildung 2.2-17 und Abbildung 2.2-18 zeigen einige Ergebnisse aus den Messversuchen. In Abbildung 2.2-17 sind die Ergebnisse aus der Messwertanalyse für den Feuchtegehalt in der Zellulose in Abhängigkeit der verschiedenen Isolationsgeometrie, ermittelt aus der PDC- und FDS-Messung, dargestellt. Darüber hinaus erfolgten die Untersuchungen bei den Mess-temperaturen  $21^\circ\text{C}$ ,  $55^\circ\text{C}$  und  $78^\circ\text{C}$ , wie man teilweise in Abbildung 2.2-18 sehen kann. Anwendung fand hier das „Pancake-Modell“, welches im vorherigen Abschnitt erläutert wurde. Anzumerken ist, dass der Versuchsaufbau nach der Temperaturänderung von  $21^\circ\text{C}$  auf  $78^\circ\text{C}$  drei Jahre lang aufbewahrt wurde, damit sich ein entsprechender Gleichgewichtszustand einstellen konnte.

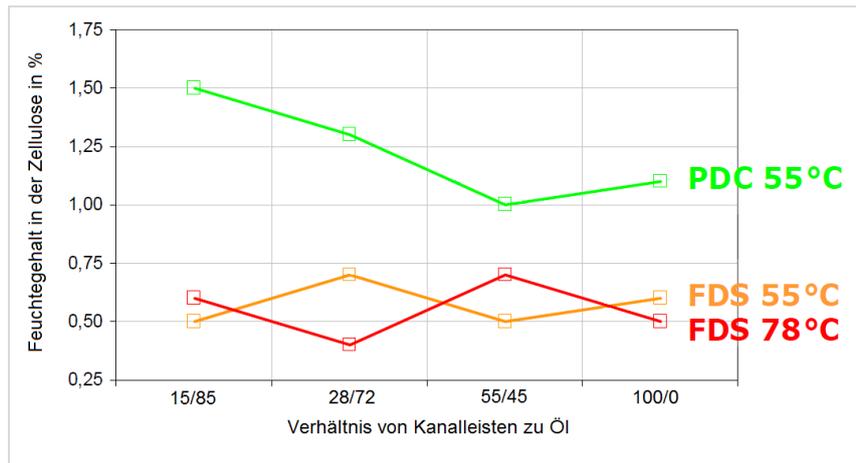


Abbildung 2.2-17: Analytisch ermittelter Feuchtegehalt in der Zellulose für verschiedene Isolationsgeometrien bei 55°C und 78°C (nach [70, S.269])

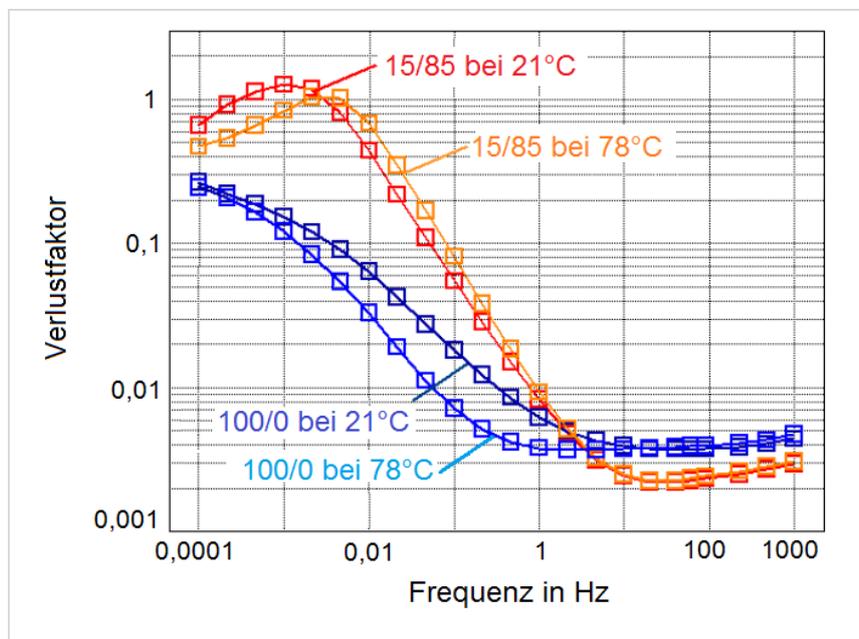
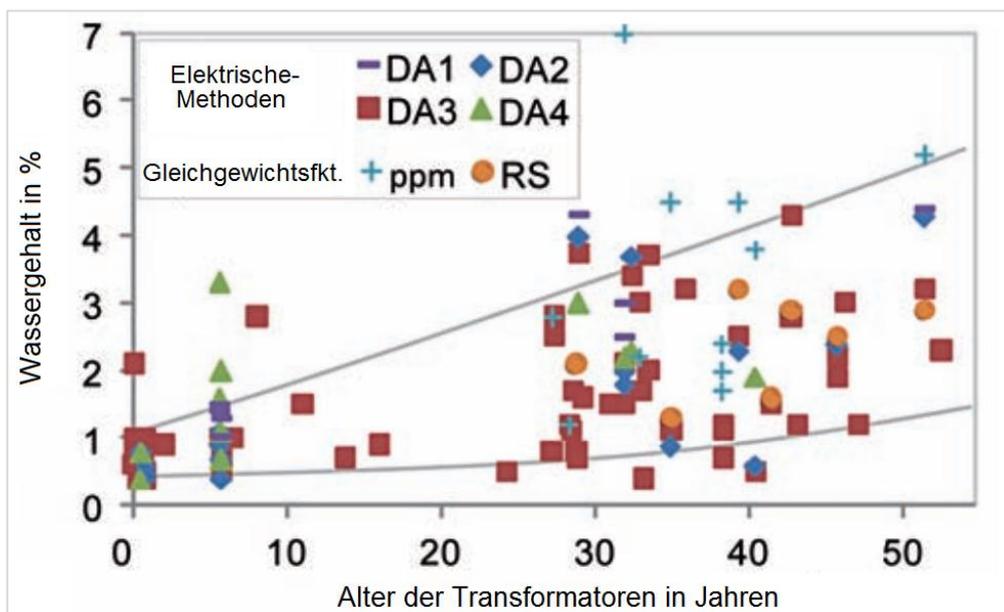


Abbildung 2.2-18: Verlustfaktorverlauf ermittelt mittels FDS-Messung für unterschiedliche Isolationsgeometrien bei 21°C und 78°C (adaptiert aus [70, S.269])

In [75] wird unter anderem die Schichtung von Feststoffproben näher untersucht. Dabei werden Feststoffproben mit gleicher Querschnittsfläche, unterschiedlichen Dicken und ungleicher Anzahl von Schichten analysiert. Bei den Messergebnissen wurde festgestellt, dass sich die Verläufe der Polarisationsströme unterscheiden obwohl die Proben gleich dick waren. Die Ursache darin liegt in dem Leitfähigkeitsgradienten an den Oberflächen. Auf die genauen Erklärungen wird aber nicht näher eingegangen, sondern diese können in [75] nachgelesen werden.

Wie sich die Zellulosefeuchtigkeit mit dem Alter des Transformators ändern kann, wird unter anderem in [96] diskutiert. Insgesamt wurden 61 Transformatoren mit unterschiedlichem Alter untersucht. Abbildung 2.2-19 zeigt die Ergebnisse aus der Untersuchung. Als Messmethoden kamen die sogenannten Gleichgewichtskurven (ppm), die Beschreibung über die Wassersättigung im Öl (RS), sowie vier verschiedene elektrische Methoden (DA1-DA4) zum Einsatz. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass neue Transformatoren in der Regel eine Zellulosefeuchtigkeit von rund 0,3 bis 1 Prozent besitzen, wohingegen 30 Jahre alte Transformatoren rund 1 bis 4 Prozent Feuchtigkeit in der Zellulose haben. Wesentlicher für diese Diplomarbeit ist, dass die traditionellen Gleichgewichtskurven die größten Feuchtigkeitswerte ermittelten. Die elektrischen Methoden lagen zum größten Teil im erwarteten Streubereich der Ergebnisse.

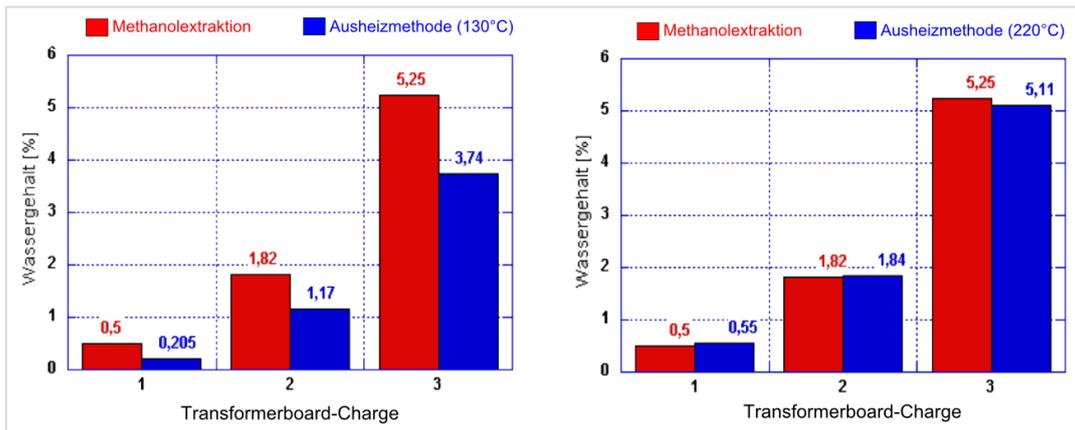


**Abbildung 2.2-19: Zellulosefeuchtigkeit in Abhängigkeit des Transformatoralters, Messungen an 61 Transformatoren durchgeführt (adaptiert aus [96, S.11])**

### 2.2.3 Nicht elektrische Methoden

Die Karl-Fischer-Titration bietet die Möglichkeit den Wassergehalt von flüssigen Proben, aber auch von Feststoffproben messtechnisch zu ermitteln. Wobei die Vermessung einer Feststoffprobe, welche z. B. in einem Transformator verbaut ist, nur sehr schwer möglich ist. Um allerdings trotzdem näherungsweise den Wassergehalt von schwer zugänglichen Feststoffproben zu ermitteln, geht man den Weg über sogenannte Gleichgewichtskurven oder entsprechende mathematische Modelle dieser Kurven. Für den Fall, dass eine Feststoffprobe vermessen werden kann, z. B. wenn der Transformator gewartet oder ausrangiert wird, kann mit Hilfe der Methanolextraktion oder des Verdampfungsverfahrens (auch als Ausheizverfahren bezeichnet) der Wassergehalt bestimmt werden. Zur Vermessung von flüssigen Proben erfolgt eine direkte Titration. Alle drei Möglichkeiten beruhen auf der IEC 60814 und werden auch in dieser beschrieben [30].

In [30] werden Messergebnisse aus der Methanolextraktion und dem Ausheizverfahren bei zwei unterschiedlichen Ausheiztemperaturen miteinander verglichen. In der Arbeit wird unter anderem das Ausheizverfahren bei einer Ausheiztemperatur von 130°C und 220°C durchgeführt. Die erste Temperatur wird in der Norm IEC 60814 angegeben, wobei bei den in [30] durchgeführten Untersuchungen, herausgefunden wurde, dass diese Temperatur zu gering und somit für repräsentative Messungen ungeeignet ist. Durch verschiedene Analysen, wie z. B. die Aufnahme der Ausheizcharakteristik, wurde als Schlussfolgerung der Messungen als geeignete Ausheiztemperatur ein Wert von ungefähr 220°C ermittelt. Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen können aus Abbildung 2.2-20 entnommen werden. Nähere Informationen über die Ermittlung der Temperatur können in [30] nachgelesen werden.



**Abbildung 2.2-20: Vergleichsmessungen Methanolextraktion vs. Ausheizmethode (Ausheiztemperatur bei 130°C und 220°C) für drei Transformerboard-Chargen (adaptiert aus [30])**

Außerdem wird in [30] noch auf die Problematik bei der Bestimmung des Wassergehaltes im Öl hingewiesen. So kann man durch Hinzugabe von Zusatzstoffen, wie z. B. Oxidationsinhibitoren und Metallpassivatoren, den Alterungsprozess des Öls hinausschieben. Dadurch können die chemischen Eigenschaften des Öls verbessert werden. Durch diese Zusatzstoffe oder aufgrund von beanspruchungsbedingten Inhaltsstoffen, können die Messergebnisse der Karl-Fischer-Titration verfälscht werden, da es in der Titrierzelle mit den Reagenzien zu chemischen Reaktionen kommen kann. Beispielsweise reagieren Schwefelverbindungen mit dem Jod und erhöhen so den Messwert bzw. senken Phenole in Verbindung mit dem Jod das Ergebnis.

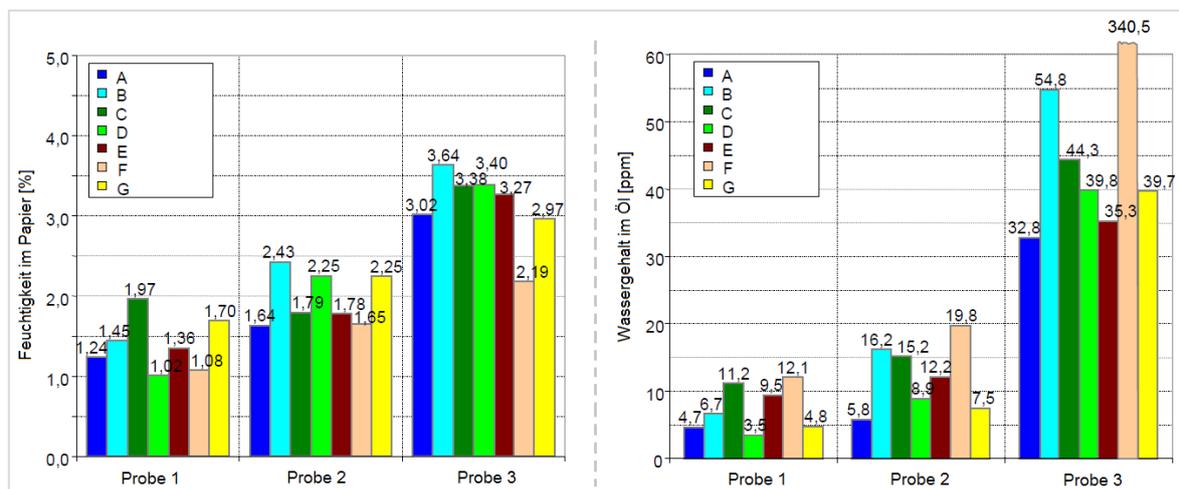
In [29] werden ebenfalls mögliche Fehlerquellen für die Karl-Fischer-Titration, sowohl für die Analyse von Flüssigkeiten als auch für die Bestimmung des Wassergehaltes von Feststoffproben erläutert. Als Beispiele dafür werden die Probenaufbereitung und die Messunsicherheit angeführt.

Wie problematisch die Karl-Fischer-Titration (KFT) in Bezug auf den Vergleich von Messergebnissen ist, wird in [77] beschrieben. So wurden jeweils drei Öl- und Papierproben an sieben verschiedenen Laboratorien untersucht („Round Robin Test“). Die nachfolgende Tabelle zeigt die eingesetzten Methoden der sieben Laboratorien für das jeweilige Probenmaterial. In Abbildung 2.2-21 sind die unterschiedlichen Messergebnisse der sieben Laboratorien für die jeweiligen Proben

aus dem Round Robin Test ersichtlich. Nähere Informationen über die Testbedingungen, weitere Ergebnisse für den Vergleich der direkten Titration mit der Ausheizmethode für Ölproben, sowie der Vergleich von zwei verschiedenen Lösungsmitteln für die Ölextraktion können in [77] nachgelesen werden.

**Tabelle 2.2-1: Technische Details der KFT für den Round Robin Test (adaptiert aus [77])**

Labor	Verfahren für die Feststoffprobe	Ausheiztemperatur	Verfahren für die flüssige Probe
A	Coulometrie mit Ofen	160°C	Coulometrie, direkte Titration
B	Coulometrie mit Ofen	200°C	Coulometrie, direkte Titration
C	Coulometrie mit Ofen	135°C	Coulometrie mit Ofen
D	Coulometrie mit Ofen	135°C	
E	Volumetrie	-	Volumetrie
F	Coulometrie mit Ofen	140°C	Coulometrie mit Ofen bei 80°C
G	Coulometrie mit Ofen		Coulometrie mit Ofen



**Abbildung 2.2-21: Messergebnisse mittels der KFT für die Feuchtigkeit im Papier und den Wassergehalt im Öl aus dem Round Robin Test (adaptiert aus [77])**

Mit den Ergebnissen aus dem Round Robin Test kam man in [77] zu der Schlussfolgerung, dass bei der Karl-Fischer-Titration viele Einflussfaktoren bei den Messungen, wie z. B. die Ausheiztemperatur oder das genaue Messverfahren, existieren. Aufgrund dessen kommt es in der Praxis vor, dass Messergebnisabweichungen von rund 20 Prozent zustande kommen. Außerdem werden noch einige Vorschläge für das Arbeiten mit der Karl-Fischer-Titration gegeben, sowie worauf man dabei besonders achten muss, um die Qualitätssicherheit im Laboratorium zu gewährleisten. In [95] ab Seite 41 wird ebenfalls auf die Ergebnisse aus dem Round Robin Test näher eingegangen und werden mitunter gleiche Schlussfolgerungen aufgestellt.

Eine andere Möglichkeit um den Wassergehalt in Feststoffen zu ermitteln, ist die Verwendung von den bereits erwähnten Gleichgewichtskurven. Neben unmittelbaren potentiellen Fehlerquellen, wie z. B. Luftfeuchtigkeit oder Sauberkeit der Apparaturen, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff erst nach längerer Zeit ein. Wie viel Zeit benötigt wird, ist abhängig von der Temperatur und kann daher in der Praxis oft nicht abgewartet werden bzw. wird ein Gleichgewichtszustand erst gar nicht erreicht. Auch ist es wichtig bei der Nutzung von Gleichgewichtskurven zu berücksichtigen, dass es verschiedene Verläufe für diese Kurven, wie z. B. von Oommen, Piper, Griffin, Fabre-Pichon oder Jeffry, gibt [28] [29] [65]. Detaillierte Ausführungen bezüglich möglicher Fehlerquellen können beispielsweise in [28], [29] oder [96] nachgelesen werden.

In [29] wird unter anderem der Alterungszustand des Öls als Einflussgröße in Bezug auf die Bestimmung des Wassergehaltes in Feststoffen bei der Nutzung von Gleichgewichtskurven beschrieben. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Einfluss des möglichen Alterungszustandes des Öls auf die Feststofffeuchtigkeit im Gleichgewichtsdigramm. In der Darstellung sind verschiedene Gleichgewichtsverläufe für verschiedene Temperaturen, sowie unterschiedliche Zellulosearten und Alterungszustände abgebildet.

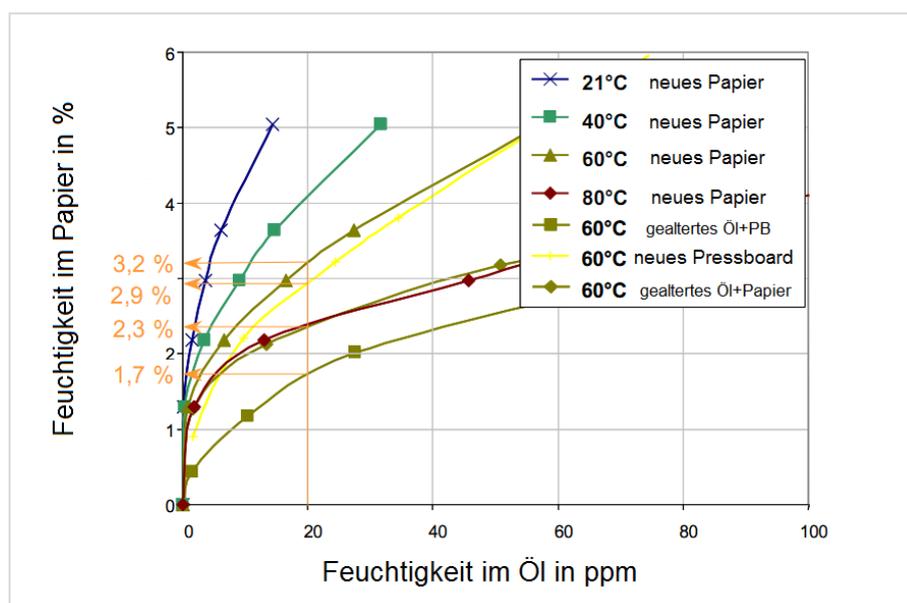
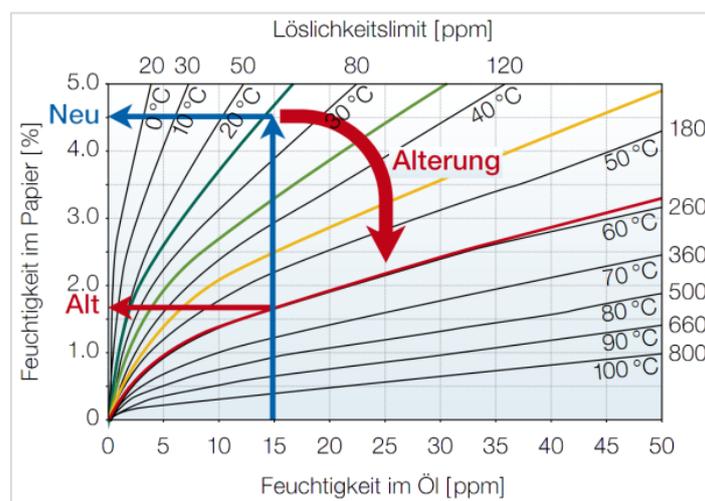


Abbildung 2.2-22: Gleichgewichtsdigramm für unterschiedliche Zellulosearten und Alterungszustände (adaptiert aus [29])

Wie man in Abbildung 2.2-22 erkennt, ist der Wassergehalt im Papier nicht nur abhängig von der Temperatur, der Zelluloseart und dem Wassergehalt im Öl, sondern auch vom Alterungszustand der beiden Komponenten. Der Grund dafür ist, dass im Öl durch den Alterungsprozess Oxidationsprodukte entstehen, welche die Aufnahmefähigkeit des Wassers im Öl erhöhen, wodurch das Gleichgewicht in Richtung der Abszisse verschoben wird [29].

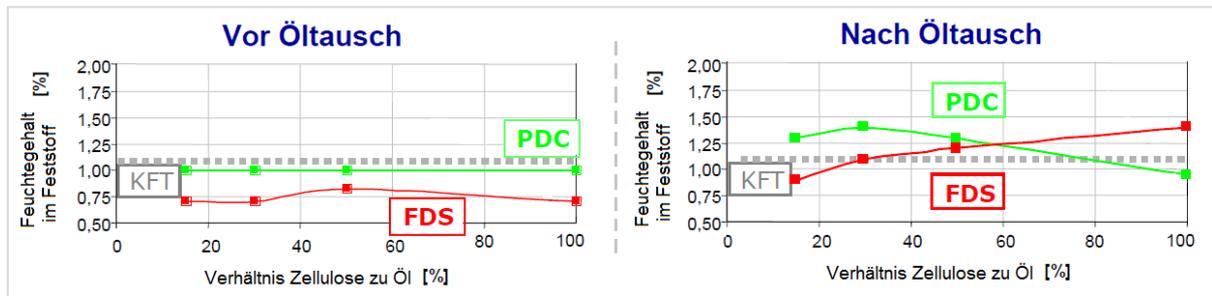
In [28] bestätigen sich die gerade angeführten Erläuterungen bezüglich der Auswirkung des Alterungszustandes des Öls. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der nachstehenden Abbildung dargestellt. Wie man in der Abbildung sieht, ändert sich die Feuchtigkeit im Papier bei Annahme einer Ölfeuchtigkeit von 15 ppm unter Einfluss der Ölalterung von rund 4,5 Prozent auf rund 1,7 Prozent.



**Abbildung 2.2-23: Gleichgewichtsdiagramm mit dem Einfluss der Ölalterung (adaptiert aus [28])**

#### 2.2.4 Vergleich von Ergebnissen der unterschiedlichen Messmethoden

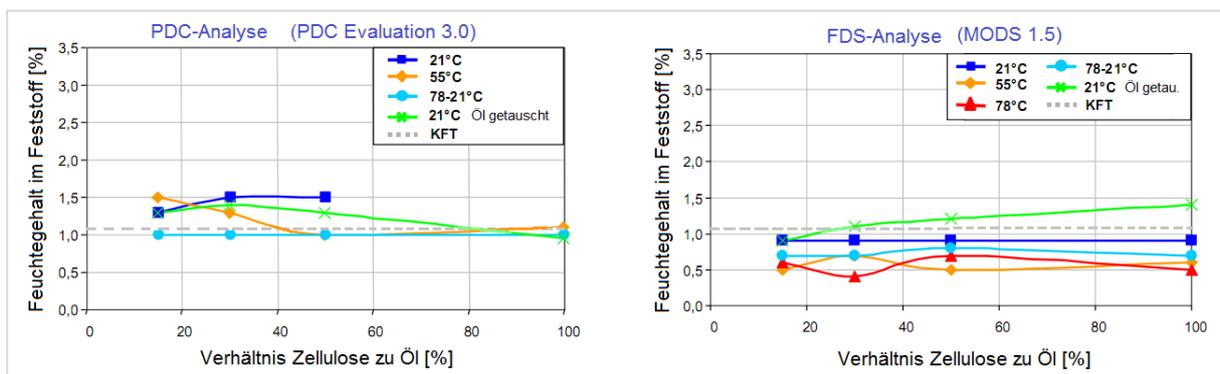
In [78] wurde unter anderem der Einfluss eines Ölaustauschs und der Isolationsgeometrie mit dem „Pancake-Modell“ mit Hilfe der KFT-, PDC- und FDS-Messmethode untersucht. Außerdem wurden die ermittelten Messergebnisse miteinander verglichen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse aus dieser Untersuchung. Genauere Informationen über die verwendeten Messgeräte und über das alte und neue Öl können in [78] nachgelesen werden.



**Abbildung 2.2-24: Vergleich von Analyseergebnissen von dielektrischen Messmethoden vor und nach dem Ölaustausch bei Verwendung des „Pancake-Modells“ (nach [71])**

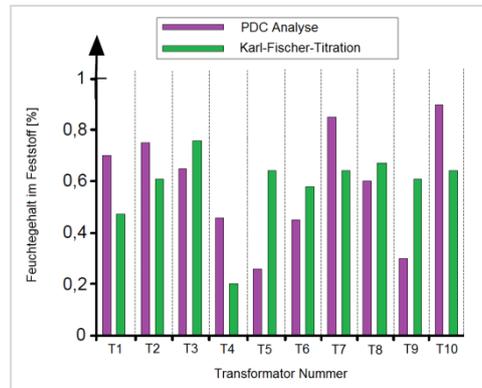
Mit den Ergebnissen aus der Untersuchung in [78] wurde festgestellt, dass die elektrischen Messmethoden nach dem Ölaustausch einen höheren Feuchtegehalt in der Zellulose ermitteln, obwohl mittels der KFT vor und nach dem Ölaustausch gleiche Werte gemessen wurden. Außerdem ist die Wasseraufnahmefähigkeit vom Öl im Vergleich zur Zellulose um sehr vieles geringer (z. B. rund 1:2000). Die Schlussfolgerung war, dass die elektrischen Messmethoden nur eine mäßige bis mangelhafte Kompensation des Einflusses der Ölleitfähigkeit beherrschen und es somit zu Fehlinterpretationen der Analysesoftware kommen kann.

Zu vergleichbaren Ergebnissen (wie gerade beschrieben aus [78]) für die PDC-, FDS- und KFT-Analyse kam auch die Untersuchung in [29]. Zusätzlich wurden in [29] die Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt (siehe dazu Abbildung 2.2-25). In Bezug auf die Temperatur wurde festgestellt, dass die Kompensation dieser teilweise nur unzureichend funktioniert.



**Abbildung 2.2-25: Vergleich von Analyseergebnissen von dielektrischen Messmethoden mit Berücksichtigung der Temperatur (adaptiert aus [29])**

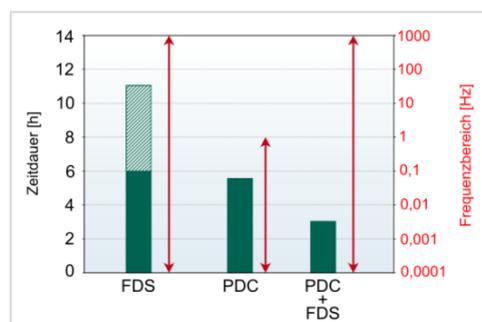
In [79] wurde die PDC-Messmethode mit der Karl-Fischer-Titration verglichen. Dabei wurden zehn neue, aber unterschiedliche Transformatoren hinsichtlich ihres Feuchtegehalts in der Feststoffisolation analysiert. Abbildung 2.2-26 zeigt die Messergebnisse dieser Untersuchungen.



**Abbildung 2.2-26: Vergleich zwischen PDC-Analyse und Karl-Fischer-Titration anhand von zehn neuen, aber unterschiedlichen Transformatoren (nach [79])**

Die Autoren von [79] kamen zu dem Schluss, dass die Messergebnisse aus der PDC-Analyse mit dem Messgerät PDC-Analyser-3205 von der Firma ALFF engineering vergleichbare Ergebnisse wie die Karl-Fischer-Titration liefert. Außerdem ist es mit der PDC-Analyse beispielsweise möglich, den Alterungszustand des Transformators zu bestimmen, sowie selektiv Teile der Isolation zu messen, wie z. B. zwischen Windungen oder Durchführungen.

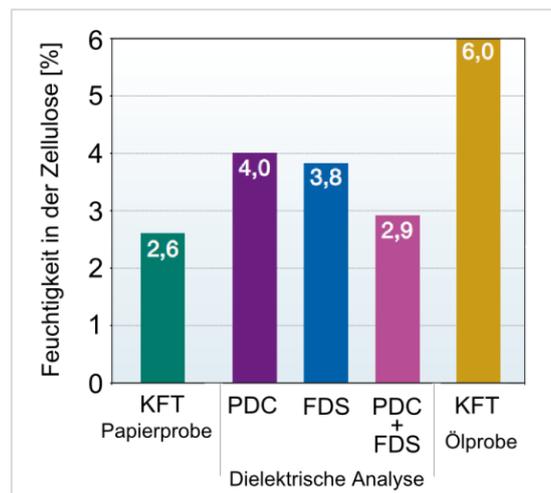
Neben separaten Messungen für die FDS- bzw. PDC-Analyse wird eine kombinierte Anwendung beider Verfahren immer mehr forciert. Grund dafür ist, dass die Messdauer erheblich kürzer ausfällt, wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen ist. Die Bestimmung der Feuchtigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit erfolgt in der Regel über den Verlustfaktor bzw. durch das sogenannte „Kurven-Fitting“ [28].



**Abbildung 2.2-27: Messzeiten für die FDS-, PDC- und PDC+FDS-Messung (adaptiert aus [28])**

Im Rahmen einer Untersuchung einer ETG Arbeitsgruppe (**E**nergi**e**technische **G**esellschaft im VDE) wurden in [28] mehrere unterschiedliche Messverfahren für die Bestimmung des Wassergehaltes im Feststoff an einem stark gealterten Transformator aus dem Jahr 1950 miteinander verglichen (siehe nachfolgende Abbildung). Als Referenzmessung diente die Karl-Fischer-Titration für Feststoffe, welche einen Feuchtegehalt in der Zellulose von 2,6 Prozent ergab. Eine genauere Erläuterung, wie die einzelnen Ergebnisse ermittelt wurden, kann beispielsweise auch in [95] ab Seite 44 nachgelesen werden.

Wie man in Abbildung 2.2-28 sieht, liefert die Kombination der Verfahren PDC und FDS das beste Ergebnis zur Referenzmessung. Die hohen Werte bei der separaten Messung mit PDC bzw. FDS sind darin begründet, dass die verwendeten Messgeräte keine Kompensation von leitfähigen Alterungsprodukten besitzen, wohingegen dies bei der kombinierten Messung schon der Fall ist. Bei der konventionellen Bestimmung über die Gleichgewichtskurven (in Abbildung als „KFT Ölprobe“ bezeichnet) bekommt man aufgrund der Ölalterung den größten Messwert [28].



**Abbildung 2.2-28: Vergleich von verschiedenen Messmethoden zur Bestimmung des Feststoffwassergehalts (nach [28])**

### **3 Dielektrische Diagnostik (verwendete Methoden)**

Die dielektrische Diagnostik wird vor allem in der Zustandsbewertung von Betriebsmitteln und hierbei besonders bei der Analyse von Isoliersystemen verwendet. Mit Hilfe einer fachgerechten Zustandsbewertung kann in weiterer Folge die Versorgungssicherheit und die Lebensdauerabschätzung von Betriebsmitteln steigen bzw. besser werden. Wichtig bei der Diagnostik ist nicht nur die Messung an sich, sondern besonders die Messergebnisinterpretation und die Erstellung einer Trendanalyse besitzen einen hohen Stellenwert. Denn so bekommt man Hinweise auf bereits geschehende bzw. mögliche zukünftige Veränderungen im Isoliersystem. Die Auswirkung einer solchen Trendanalyse wäre z. B., dass das Isolieröl aufgrund von diversen Verunreinigungen getrocknet oder aufbereitet werden sollte, da man andernfalls mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit mit einem Ausfall der Anlage rechnen kann. Von Bedeutung für eine Zustandsbewertung sind unter anderem dielektrische Messgrößen, die Betriebsbedingungen, sowie die möglichen Auswirkungen auf das Isoliersystem [1] [5].

Die in diesem Kapitel angeführten Messmethoden sind nur ein kleiner Ausschnitt der Möglichkeiten, wie man ein Isoliersystem bzw. ein Dielektrikum analysieren kann. In Abbildung 3.0-1 wird ein Überblick über mögliche Diagnoseverfahren für die Zustandsbewertung eines Transformators gegeben.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden bei der elektrischen Diagnostik die Frequenzbereichsspektroskopie und die Polarisations-/Depolarisationsmethode verwendet. Bei der chemischen Diagnostik wurde mit der Karl-Fischer-Titration gearbeitet. Bei den Messungen ergaben sich etwaige Vor- und Nachteile der verwendeten Methoden, welche in den einzelnen Abschnitten näher beschrieben werden bzw. werden im Kapitel 5.4 auf Seite 96 mögliche Fehlerquellen angeführt. Auch sind die teilweise unterschiedlichen Messergebnisse der einzelnen Methoden interessant, welche im Kapitel 6 miteinander verglichen und diskutiert werden. Im direkten Anschluss werden nun die für die Diplomarbeit relevanten Kenngrößen näher erläutert. Anschließend folgt die Beschreibung der verwendeten Diagnostikmethoden.

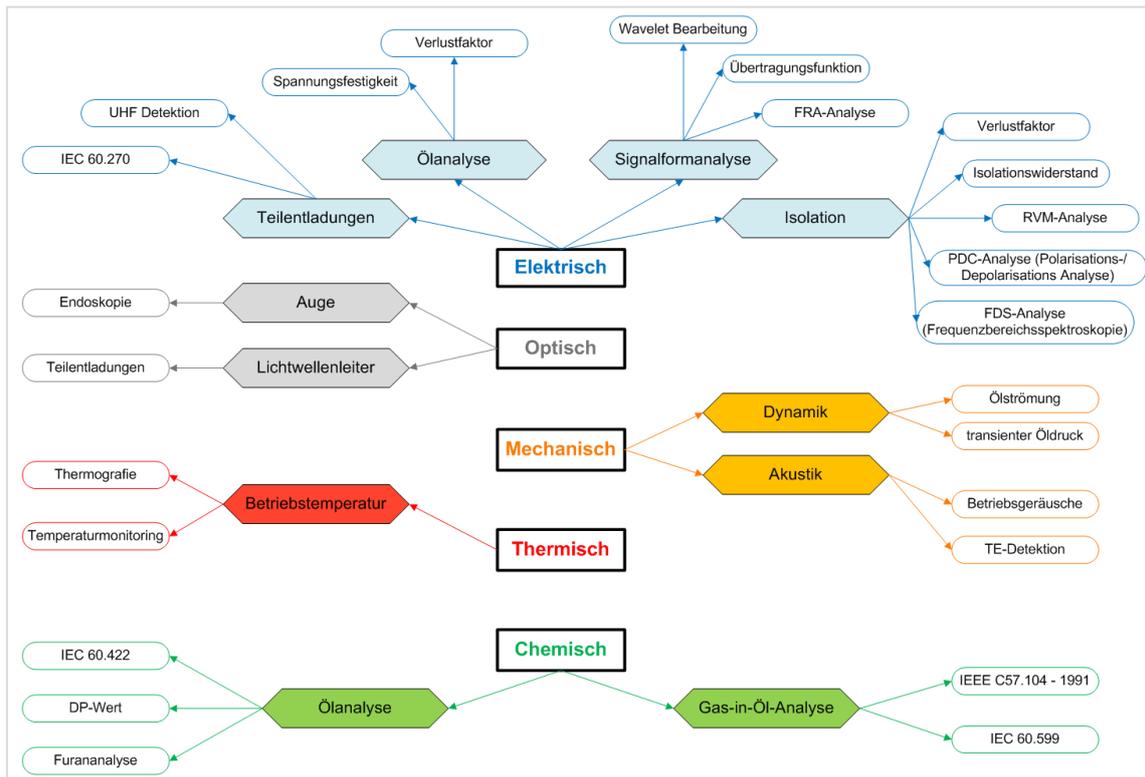


Abbildung 3.0-1: Überblick möglicher Diagnoseverfahren für die Zustandsbewertung eines Transformators (nach [54])

### 3.1 Grundlagen

Eine Zustandsbewertung von Betriebsmitteln kann mit Hilfe von unterschiedlichsten Kenngrößen und Methoden durchgeführt werden. Für die Diplomarbeit wurden im Speziellen folgende Kenngrößen für die Analyse eines Dielektrikums ermittelt:

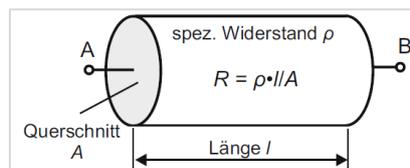
- elektrische Leitfähigkeit
- Verlustfaktor
- Kapazität
- Wassergehalt

Diese Messgrößen umfassen im Großen und Ganzen Materialgrößen, welche man prinzipiell nur durch einen Austausch von Materialien bzw. Stoffen oder durch eine Änderung der Anordnung bzw. des Aufbaues beeinflussen kann. Die beschriebenen Größen sind von den Parametern Temperatur, Frequenz, Beanspruchungsdauer, sowie dem Wassergehalt abhängig. Neben den hier angeführten dielektrischen

Größen, können unter anderem noch die Dielektrizitätszahl  $\epsilon$ , die komplexe Dielektrizitätszahl  $\epsilon^*$ , der Durchgangswiderstand  $R_D$  oder der Oberflächenwiderstand  $R_O$  unterschieden werden, welche allerdings nur vollständigheitshalber angeführt und nicht näher erläutert werden [1].

### 3.1.1 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  ist eine Materialgröße und wird im Allgemeinen durch frei bewegliche Ladungsträger verursacht. Grundsätzlich wird die elektrische Leitfähigkeit in der Elektrotechnik über den Kehrwert des spezifischen Widerstandes beschrieben und gibt an, wie viele Meter des Leiterstückes von 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt bei 20°C einen Widerstand von 1 Ohm ergeben (siehe nachstehende Gleichung). Die Einheit der elektrischen Leitfähigkeit wird üblicherweise in Siemens je Meter (S/m) angegeben [2, S.80].



**Abbildung 3.1-1: Linienhafter Leiter zur Veranschaulichung der Gleichung für die elektrische Leitfähigkeit (adaptiert aus [41, S.78])**

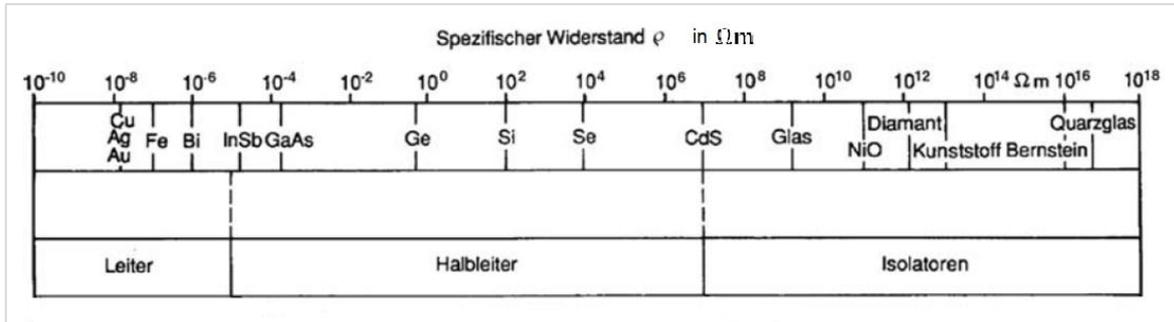
Elektrische Leitfähigkeit: 
$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{R * A} \quad 3.1-1$$

A... Querschnittfläche des Leiters [m<sup>2</sup>]  
 $\kappa$ ... elektrische Leitfähigkeit [S/m]  
 R... elektrischer Widerstand [ $\Omega$ ]  
 $\rho$ ... spezifischer Widerstand [ $\Omega$ m]  
 l... Länge des Leiters [m]

Mit Hilfe des spezifischen Widerstandes kann eine grobe Einteilung in drei Werkstoffgruppen erfolgen, welche nachstehend angeführt werden [42, S.809].

- Leiterwerkstoffe (Leiter):  $\rho < 10^{-5} \Omega\text{m}$
- Halbleiterwerkstoffe (Halbleiter):  $10^{-5} \Omega\text{m} < \rho < 10^7 \Omega\text{m}$
- Isolatoren:  $\rho > 10^7 \Omega\text{m}$

In der nachfolgenden Abbildung werden einige Materialien mit deren spezifischem Widerstand dargestellt [42, S.809].



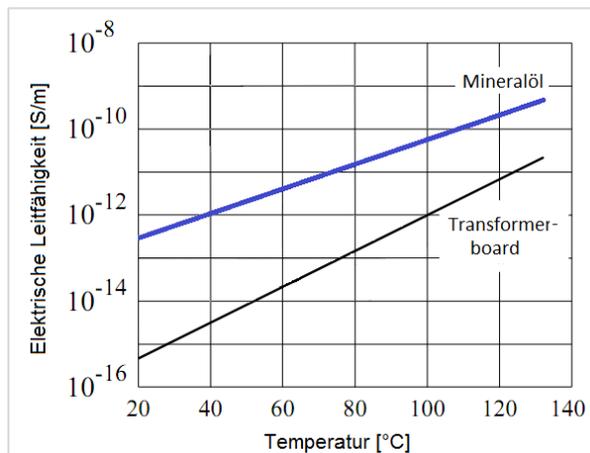
**Abbildung 3.1-2: Einleitung der Werkstoffgruppen anhand des spez. Widerstandes inkl. einiger Materialien [42, S.809]**

Eine genauere Erklärung der physikalischen Betrachtung des spezifischen Widerstandes bzw. der elektrischen Leitfähigkeit, bezüglich des atomaren Aufbaus von Materialien, kann beispielsweise in [42] ab Seite 809 nachgelesen werden.

Allgemein kann die elektrische Leitfähigkeit in zwei verschiedene Leitungsprozesse eingeteilt werden, nämlich in die Ionenleitung und in die Elektronenleitung. Eine detailliertere Erläuterung der Leitungsprozesse wird unter anderem in [43] ab Seite 355 gegeben. Grundsätzlich kann man sagen, dass die elektrische Leitfähigkeit in Flüssigkeiten bzw. in festen Stoffen bis ungefähr zur elektrischen Festigkeitsgrenze von der Ionenleitung beeinflusst wird. Erst bei hohen Feldstärken wirkt in beiden Fällen auch die Elektronenleitung. Bei der Ionenleitung kommt es durch die sogenannte Dissoziation, also die Zerlegung einer chemischen Verbindung (z. B. von Verunreinigungen), zu einer Bildung von positiven und negativen Ionen. Der Grund, warum die Elektronenleitung erst bei höheren Feldstärken wirkt, ist, dass sich die freien Elektronen nicht mehr mit positiven Ionen rekombinieren bzw. sich an Moleküle binden [1, S.267ff].

Eine allgemein gültige Angabe für die elektrische Leitfähigkeit von Medien ist schwer bis gar nicht möglich, da sie von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst wird. So ist die Leitfähigkeit von den Parametern Beanspruchungszeit, Feldstärke, Temperatur, Feuchtigkeit (siehe dazu Abbildung 3.1-12 auf Seite 46), Reinheit bzw.

Verschmutzungsgrad und Materialzusammensetzung abhängig [1, S.271] [58]. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Temperatur- und Materialabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit bei einer konstanten Feldstärke.



**Abbildung 3.1-3: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit bei einer Feldstärke von 0,5 kV/mm (stationäre Werte) (nach [7, S.76])**

Wie in Abbildung 3.1-3 ersichtlich ist, ergibt sich für unterschiedliche Medien, bei einer Änderung der Temperatur, eine relativ große Bandbreite für die elektrische Leitfähigkeit. So besitzt z. B. Transformerboard eine Bandbreite von ungefähr fünf Dekaden zwischen Temperaturen von rund 20°C bis ungefähr 130°C. Der Anstieg der Leitfähigkeit ist dadurch begründet, dass die Beweglichkeit der Ionen, sowie die Anzahl der auf Leitungsniveaus gehobenen Elektronen, also die Anzahl der Ladungsträger, sich exponentiell erhöhen. Mit Hilfe der sogenannten Arrhenius-Beziehung (siehe nachstehende Gleichung) kann der Verlauf der Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur beschrieben werden. Da in Abbildung 3.1-3 eine logarithmische Skala für die Leitfähigkeit gewählt wurde, ergeben sich Geraden für die Verläufe [1, S.272]. Eine äquivalente mathematische Beschreibung, sowie in Abbildung 3.1-3 dargestellte Zusammenhänge sind unter anderem in [59] zu finden.

Elektrische Leitfähigkeit:  
(Arrhenius-Beziehung)

$$\kappa = \kappa_0 * e^{\frac{-W}{kT}}$$

3.1-2

W... materialspezifische Aktivierungsenergie [J]  
 K... Boltzmann-Konstante [J/K]  
 κ... elektrische Leitfähigkeit [S/m]  
 κ<sub>0</sub>... Grundleitfähigkeit [1/Ωm]  
 T... Temperatur [K]

Neben der Arrhenius-Beziehung ist es auch möglich, über sogenannte Temperaturkoeffizienten die elektrische Leitfähigkeit unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit zu berechnen. Wichtig hierfür ist, dass die Temperaturkoeffizienten für eine Referenztemperatur, meistens 20°C oder 25°C, angegeben werden. Die Temperaturkoeffizienten sind selbst auch temperaturabhängig und können z. B. aus Werkstofftabellen entnommen werden. Die nachstehenden Gleichungen ergeben sich aus messtechnisch ermittelten und in einem Koordinatensystem eingetragenen Verläufen, welche danach mit Hilfe von mathematischen Beziehungen beschrieben wurden [44, S.19].

$$\begin{array}{ll} \text{Elektrische Leitfähigkeit:} & \kappa = \kappa_{20} * (1 + \alpha_{20} * \Delta\vartheta) \\ \text{(für lineares Verhalten bis } \vartheta=200^{\circ}\text{C)} & \end{array} \quad \mathbf{3.1-3}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Elektrische Leitfähigkeit:} & \kappa = \kappa_{20} * [1 + \alpha_{20} * \Delta\vartheta + \beta_{20} * (\Delta\vartheta)^2] \\ \text{(für nichtlineares Verhalten)} & \end{array} \quad \mathbf{3.1-4}$$

$\kappa_{20}$  ... elektrische Leitfähigkeit bezogen auf 20°C [1/Ωm]  
 $\Delta\vartheta$  ... Temperaturdifferenz ( $\vartheta$  – Bezugstemperatur) [K]  
 $\alpha_{20}$  ... Temperaturkoeffizient (1. Ordnung) [K<sup>-1</sup>]  
 $\beta_{20}$  ... Temperaturkoeffizient (2. Ordnung) [K<sup>-1</sup>]  
 $\kappa$  ... elektrische Leitfähigkeit [S/m]

Berechnungsbeispiele, eine Wertetabelle für verschiedene Materialien, sowie eine genauere mathematische Erklärung für die eben angeführten Gleichungen können beispielsweise in [44] ab Seite 18 nachgelesen werden.

### 3.1.2 Verlustfaktor und Kapazität

Der Verlustfaktor  $\tan \delta$  bildet die realen Bauteileigenschaften einer Kapazität bzw. einer Induktivität ab. Im Allgemeinen wird der Verlustfaktor bzw. der Verlustwinkel  $\delta$  bei idealen Betrachtungen vernachlässigt, um so die Eigenschaften der vorhandenen Elemente zu vereinfachen. Der Verlustfaktor zählt zu einer der bedeutendsten Materialgrößen für die Zustandsbewertung von Betriebsmitteln.

Er beschreibt im Wesentlichen die Verluste in einem Dielektrikum bei angelegter Wechselspannung. Im Idealfall würde sich ein Phasenwinkel  $\varphi$  zwischen Strom und Spannung von 90° ergeben, wobei der Strom  $\underline{I}$  der Spannung  $\underline{U}$  bei einem kapazitiven Verhalten vorausgeht. Bei einer realen Anordnung ergibt sich durch die

Polarisations-, Leitfähigkeits- und Ionisationsverluste ein Verlustwinkel  $\delta$ , welcher vom Phasenwinkel abgezogen wird. Genauere Erklärungen und das Zustandekommen der einzelnen Verluste können in [46] oder [47] nachgelesen werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Zeigerdiagramm einer Anordnung, wobei das Dielektrikum als serielles oder paralleles Ersatzschaltbild mit Hilfe einer Kapazität C und eines Isolationswiderstandes R beschrieben werden kann [1, S.272] [45, S.126].

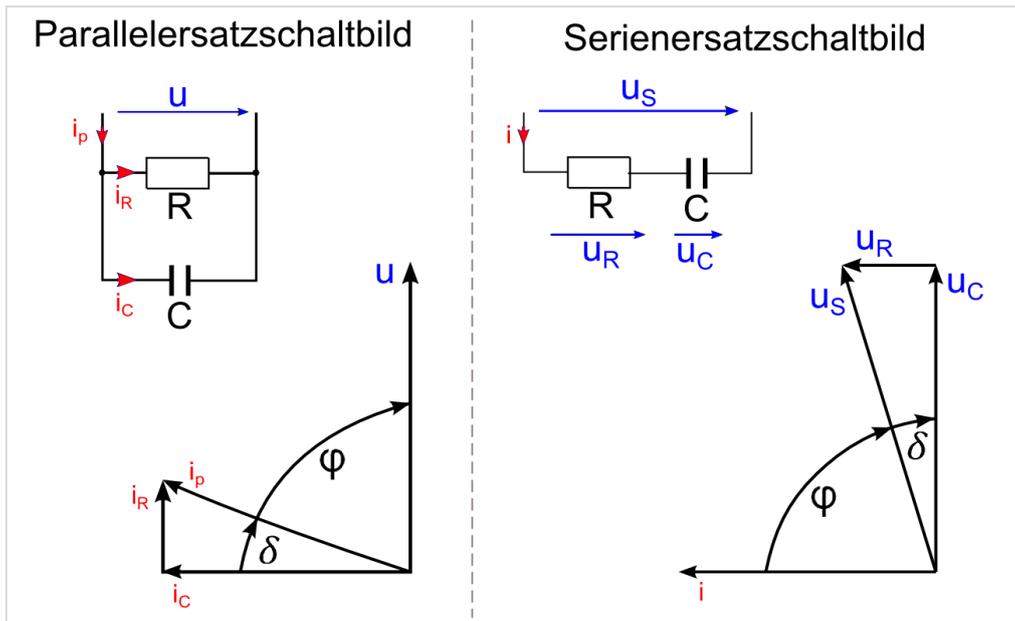


Abbildung 3.1-4: Serien- und Parallelersatzschaltbild für die Ermittlung des Verlustwinkels (nach [46, S.48])

Zur rechnerischen Ermittlung des Verlustfaktors können einfache mathematische und trigonometrische Beziehungen angewendet werden. Der Verlustfaktor ergibt sich nun, veranschaulicht mit der Abbildung 3.1-4, aus dem Verhältnis zwischen Wirk- zu Blindstrom für die Parallelersatzschaltung bzw. äquivalent mit Hilfe der Spannungen für die Serienersatzschaltung. Die hier angestellten Überlegungen sind mit nachfolgenden Gleichungen für ein Parallelersatzschaltbild beschrieben [57, S.148ff] [46, S.48].

$$\text{Verlustwinkel:} \quad \delta = 90^\circ - \varphi \quad 3.1-5$$

$$\text{Verlustfaktor:} \quad \tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad 3.1-6$$

$$\text{Wirkleistung: } P_R = U * I_R \quad 3.1-7$$

$$\text{Blindleistung: } Q_C = U * I_C \quad 3.1-8$$

$U...$ elektrische Spannung [V]	$I_R...$ Wirkstrom [A]
$\tan \delta...$ Verlustfaktor [1]	$I_C...$ Blindstrom [A]
$\delta...$ Verlustwinkel [°]	$P_R...$ Wirkleistung [W]
$\varphi...$ Phasenwinkel [°]	$Q_C...$ Blindleistung [var]

Durch Anwendung der Beziehungen zwischen Strom, Spannung und Leistung kann der Verlustfaktor auch als Verhältnis zwischen Wirk- und Blindleistung beschrieben werden. Der Verlustfaktor kann somit durch Einsetzen der Gleichungen 3.1-7 und 3.1-8 in Gleichung 3.1-6 und unter Berücksichtigung der beiden Ersatzschaltbilder (ESB) folgendermaßen angeschrieben werden [57, S.153]:

$$\text{Verlustfaktor: } \tan \delta = \frac{P_R}{Q_C} \quad 3.1-9$$

$$\text{Verlustfaktor für das Serien-ESB: } \tan \delta = \frac{I^2 * R}{I^2 / \omega C} = \omega RC \quad 3.1-10$$

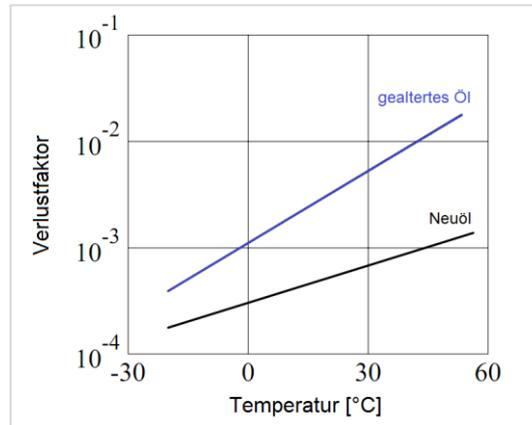
$$\text{Verlustfaktor für das Parallel-ESB: } \tan \delta = \frac{U^2 / R}{U^2 * \omega C} = \frac{1}{\omega RC} \quad 3.1-11$$

$\omega$ ... Kreisfrequenz [ $s^{-1}$ ]
$\tan \delta$ ... Verlustfaktor [1]
$R$ ... Widerstand [ $\Omega$ ]
$C$ ... Kapazität [F]

Genauere Erklärungen zu den einzelnen Ersatzschaltbildern, sowie tiefergehende mathematische Betrachtungen können beispielsweise in [1] ab Seite 278 oder in [57] nachgelesen werden.

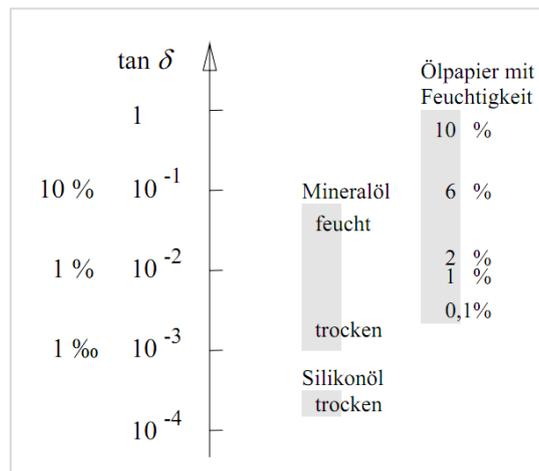
Die größten Auswirkungen auf den Verlustfaktor besitzen die Feuchtigkeit, die Frequenz und die Temperatur. Des Weiteren gibt es noch andere Einflussfaktoren, wie z. B. die elektrische Feldstärke oder die Dielektrizitätszahl. Diese werden allerdings im weiteren Verlauf der Arbeit nicht näher erläutert, da diese im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht genauer analysiert wurden. Ebenfalls hat der Alterungszustand des Isolieröls einen Einfluss auf den Verlustfaktor, welcher unter anderem auch in der nachstehenden Abbildung dargestellt wird. Aus dieser

Abbildung ist ersichtlich, dass ein gealtertes Öl im Vergleich zu einem neuen Öl einen größeren Verlustfaktor aufweist und dass mit steigender Temperatur der Verlustfaktor größer wird [1, S.273].



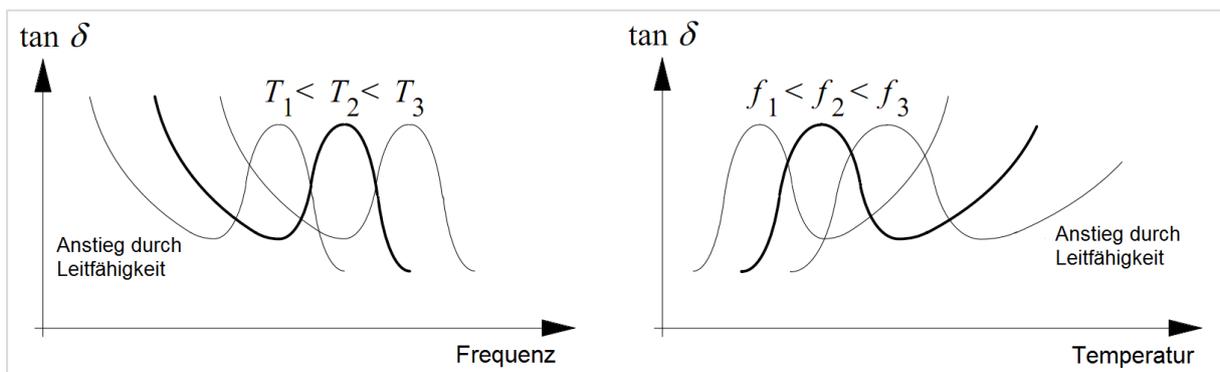
**Abbildung 3.1-5: Verlustfaktor von neuem und gealtertem Isolieröl im Vergleich bei unterschiedlicher Temperatur (adaptiert aus [1, S.320])**

In Abbildung 3.1-6 wird der Zusammenhang von unterschiedlichen Isolationsmedien mit unterschiedlichem Feuchtegehalt und dem Verlustfaktor dargestellt. Der Grund für die unterschiedlichen Verlustfaktoren in der Abbildung ist, neben der Dielektrizitätszahl  $\epsilon$ , dass aufgrund der sehr guten polarisierbaren Wassermoleküle, sowie einer Erhöhung der Leitfähigkeit durch einen größeren Feuchtegehalt in den Medien, der Verlustfaktor (siehe dazu Gleichung 3.1-13 auf Seite 41) erhöht wird [1, S.273].



**Abbildung 3.1-6: Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit bei 50 Hz und Raumtemperatur (adaptiert aus [1, S.274])**

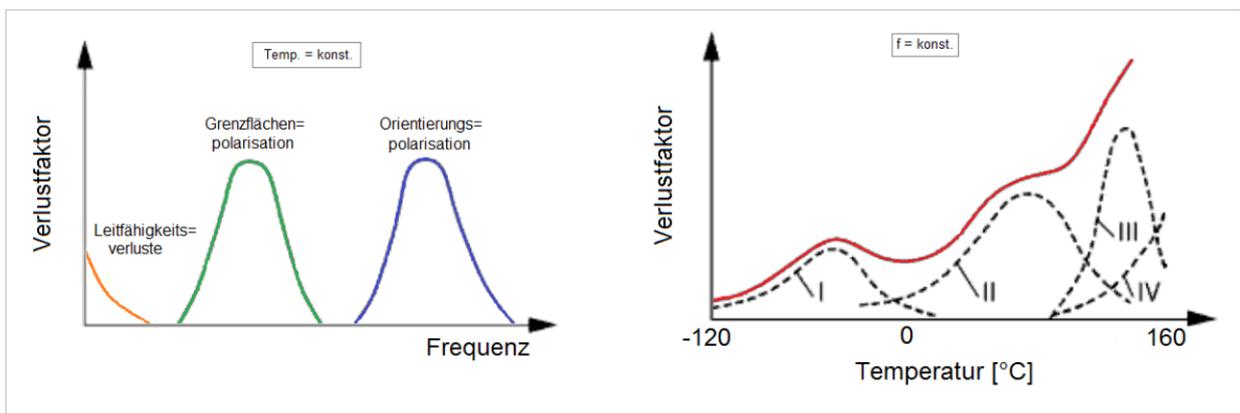
Die nachfolgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit des Verlustfaktors von den Einflussgrößen Frequenz und Temperatur. In der Abbildung ist ersichtlich, dass sich der Verlauf bei einer entsprechenden Veränderung der Frequenz  $f$  bzw. Temperatur  $T$  nach links oder nach rechts verschiebt. Dieser charakteristische Verlauf ergibt sich aufgrund der Beweglichkeit der Dipole. So können die Dipole bei niedrigen Frequenzen dem langsam veränderlichen Feld schnell folgen bzw. wird bei hohen Frequenzen die Beweglichkeit der Dipole stark eingeschränkt. Der starke Anstieg des Verlustfaktors bei niedrigen Frequenzen (linker Verlauf) lässt sich über die Leitfähigkeitsverluste mit Hilfe von Gleichung 3.1-13 (auf der nächsten Seite) beschreiben. Bei einer Temperaturänderung (rechter Verlauf) verändert sich ebenfalls die Beweglichkeit der Dipole. So steigt die Beweglichkeit der Dipole bei einer Erhöhung der Temperatur solange an, bis die Wärmebewegung die Ausrichtung der Dipole hindert. Es entstehen maximale Polarisationsverluste und in weiterer Folge kommt es zum Absinken des Verlustfaktors. Der bei hohen Temperaturen exponentielle Anstieg des Verlustfaktors bei konstanter Frequenz lässt sich aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit nach Gleichung 3.1-2 auf Seite 35 erklären [1, S.275, 276].



**Abbildung 3.1-7: Abhängigkeit des Verlustfaktors von Frequenz und Temperatur für ein Dielektrikum mit Orientierungspolarisation (nach [1, S.276])**

Da normalerweise in einem Dielektrikum mehrere unterschiedliche dielektrische Verluste auftreten, wie z. B. die bereits erwähnten Polarisations-, Leitfähigkeits- und Ionisationsverluste, kommt es gewöhnlich zu mehreren lokalen Maxima beim Verlauf des Verlustfaktors. Abbildung 3.1-8, zeigt wie auch die vorherige Abbildung, die prinzipielle Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Frequenz und der Temperatur. In

der linken Darstellung sieht man wiederum, dass bei niedrigen Frequenzen der Verlustfaktor durch die Leitfähigkeitsverluste bestimmt wird. Bei höheren Frequenzen treten aufgrund der unterschiedlichen Relaxationszeiten mehrere lokale Maxima der verschiedenen Polarisationsmechanismen auf. Im rechten Bild hingegen werden die verschiedenen Einzelmechanismen, sowie der Verlustfaktor als Summe dieser Mechanismen bei Variation der Temperatur dargestellt. Bei den einzelnen Verläufe handelt es sich bei (I) um die Orientierung kleiner polarer Kettensegmente, bei (II) um die Grenzflächenpolarisation, bei (III) um die Orientierung großer polarer Kettensegmente und bei (IV) um die Leitfähigkeitsverluste [46, S.50,51].



**Abbildung 3.1-8: Abhängigkeit des Verlustfaktors von Frequenz und Temperatur für Epoxidharz für unterschiedliche dielektrische Verluste (adaptiert aus [46, S.51])**

Die nachfolgenden Gleichungen zeigen den mathematischen Zusammenhang des Verlustfaktors unter Berücksichtigung der Leitfähigkeits- und Polarisationsverluste, sowie die mathematische Beschreibung dieser beiden dielektrischen Verluste [46, S.49,50].

$$\text{Verlustfaktor:} \quad \tan \delta = \tan \delta_L + \tan \delta_{Pol} \quad 3.1-12$$

$$\text{Leitfähigkeitsverluste:} \quad \tan \delta_L = \frac{\kappa}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'} \quad 3.1-13$$

$$\text{Polarisationsverluste:} \quad \tan \delta_{Pol} = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \quad 3.1-14$$

$\varepsilon_r''$  .... relative Dielektrizitätszahl (Imaginärteil) [1]  
 $\varepsilon_r'$  .... relative Dielektrizitätszahl (Realteil) [1]  
 $\varepsilon_0$  .... elektrische Feldkonstante [As/Vm]  
 $\kappa$  .... elektrische Leitfähigkeit [1/Ωm]  
 $\omega$  .... Kreisfrequenz [s<sup>-1</sup>]  
 $\tan \delta$  .... Verlustfaktor [1]

Die in den Ersatzschaltbildern (Abbildung 3.1-4 auf Seite 37) eingezeichnete Kapazität bzw. der Kondensator kann als ein kapazitives Modell betrachtet werden, welches beispielsweise aus planparallelen Elektroden mit einem dazwischen liegenden Dielektrikum besteht. Die nachfolgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Anordnung [25, S.120].

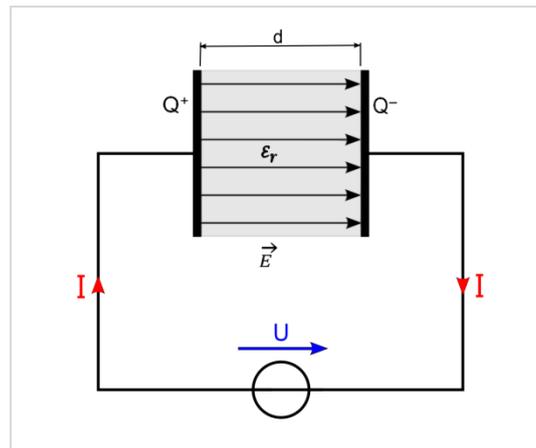


Abbildung 3.1-9: Beispielhafte Anordnung eines Plattenkondensators (nach [25, S.120])

Im Allgemeinen beschreibt die Kapazität, auch als Proportionalitätsfaktor  $C$  bezeichnet, den gesetzmäßigen Zusammenhang einer gespeicherten Ladung  $Q$  und einer Ladespannung  $U$ . Anhand der nachstehenden mathematischen Beziehungen kann die Kapazität einer gegebenen Anordnung berechnet werden [24, S.198].

$$\text{Ladung: } Q = \iint \vec{D} * dA = \vec{D} * A \quad 3.1-15$$

$$\text{Spannung: } U = \int_d \vec{E} * ds = \vec{E} * d \quad 3.1-16$$

$$\text{Materialbeziehung: } \vec{D} = \varepsilon * \vec{E} \quad 3.1-17$$

$$\text{Kapazität (allgemein): } C = \frac{\iint \vec{D} * dA}{\int_d \vec{E} * ds} \quad 3.1-18$$

$\vec{D}$  ... dielektrische Verschiebungsdichte [C/m<sup>2</sup>]  
 $\vec{E}$  ... elektrische Feldstärke [V/m]  
 $A$  ... Fläche der Elektrode [m<sup>2</sup>]  
 $\varepsilon$  ... Dielektrizitätszahl [As/Vm]  
 $d$  ... Plattenabstand [m]

Durch einsetzen der ersten drei Gleichungen (3.1-15, 3.1-16 und 3.1-17) in die Gleichung 3.1-18 wird gezeigt, dass die Kapazität grundsätzlich nur von der geometrischen Form der Anordnung und den Materialeigenschaften bestimmt wird. Voraussetzung dafür muss allerdings sein, dass die Dielektrizitätszahl konstant ist. Die nachfolgende Gleichung bezieht sich auf die Betrachtung einer parallelen Plattenanordnung. Die Einheit der Kapazität ist Farad (F), welche prinzipiell aussagt, dass ein Farad vorliegt, wenn die Elektroden bei 1 V Potentialunterschied Ladungen von 1 As aufnehmen [24, S.198,199].

$$\text{Kapazität: } C = \frac{\varepsilon * E * A}{E * d} = \varepsilon * \frac{A}{d} \quad 3.1-19$$

$$\text{Dielektrizitätszahl: } \varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r \quad 3.1-20$$

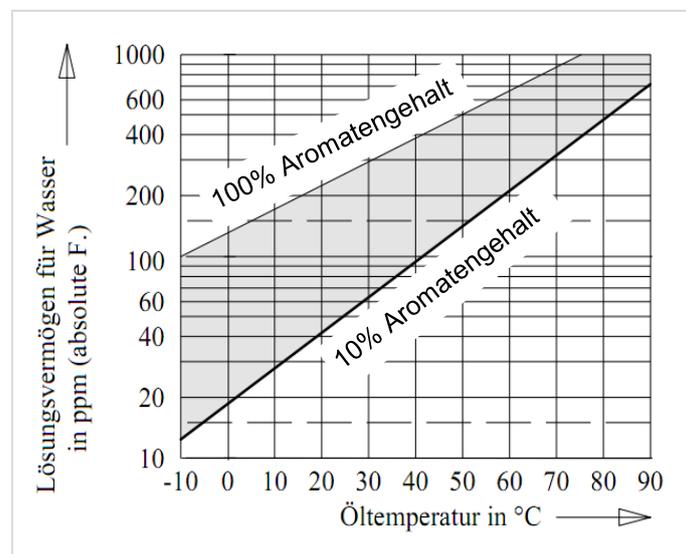
$\varepsilon_0$  ... elektrische Feldkonstante [As/Vm]  
 $\varepsilon_r$  ... relative Dielektrizitätszahl [1]  
 $\varepsilon$  ... Dielektrizitätszahl [As/Vm]  
 $C$  ... Kapazität [F]

Nähere Informationen sowie weitere mathematische Beziehungen für andere Kapazitätsanordnungen können beispielsweise in [24] im Kapitel 12 nachgelesen werden.

### 3.1.3 Wassergehalt

Wie schon in den beiden vorherigen Kapiteln erörtert, beeinflusst der Wassergehalt bzw. die Feuchtigkeit in einem Dielektrikum unter anderem die elektrische Leitfähigkeit, die Alterung aber auch den Verlustfaktor. Neben diesen Faktoren ist die Entladung in Flüssigkeiten in Verbindung mit faserförmigen Verunreinigungen im Öl besonders interessant. Durch hygroskopische Zellulosefasern mit einem Feuchtigkeitsgehalt von einigen Prozent können leitfähige Zellulosebahnen entstehen, welche schon unter geringen elektrischen Feldstärken den sogenannten Faserbrückendurchschlag hervorrufen. Da elektrische Entladungen in Flüssigkeiten für diese Diplomarbeit nicht von Bedeutung sind, wird nicht näher darauf eingegangen [1, S.217,434]. Gegebenenfalls kann dies in [48] ab Seite 80 nachgelesen werden.

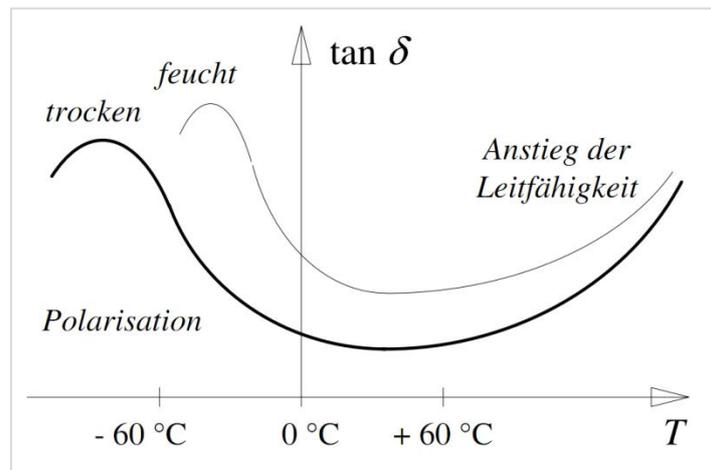
Der Feuchtegehalt des Isolieröls ist neben den naheliegenden Parametern, wie z. B. Umgebungsluftfeuchtigkeit bzw. direkter ausgesetzter Wassereexposition bei einem offenen bzw. undichten Gehäuse, auch von der Temperatur abhängig. So zeigt die nachstehende Abbildung einen direkten Zusammenhang zwischen dem Lösungsvermögen für Wasser und der Öltemperatur. Wie man in der Darstellung sieht, wird mit steigender Temperatur auch das Lösungsvermögen des Wassers größer. Neben der Temperatur sind weiters noch der Aromatengehalt des Isolieröls, die Ölsorte, sowie der Alterungszustand des Öls von Bedeutung [1, S.226]. In [7] wird ab Seite 145 beispielsweise die Alterung von Öl-Zellulose-Isolationssystemen näher behandelt.



**Abbildung 3.1-10: Absolute Sättigungsfeuchte für unterschiedliche Aromatengehalte in Abhängigkeit von der Öltemperatur für ein Mineralöl (nach [1, S.227])**

Neben der Temperaturabhängigkeit des Isolieröls in Bezug auf den Wassergehalt existiert für einen festen Isolierstoff bzw. für das kombinierte Isolationssystem ebenso eine derartige Abhängigkeit. Wobei dies anhand von Abbildung 4.2-8 auf Seite 70 nachvollzogen werden kann. Bei der Abbildung handelt es sich um die sogenannten Gleichgewichtskurven (engl. moisture equilibrium) für den Wassergehalt zwischen einem Mineralöl und einer Zellulose. Man erkennt, dass sich in Abhängigkeit der Temperatur unterschiedliche Wassergehalte in den Isolationsmedien ergeben.

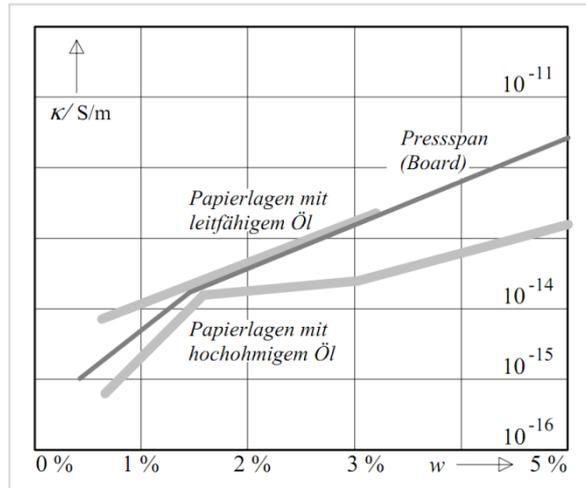
Wie bereits erwähnt, verändert der Wassergehalt auch den Verlustfaktor eines Isolationssystems. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit, der Temperatur und dem Verlustfaktor für ein ölimprägniertes Papier. Man sieht, dass durch einen größeren Wassergehalt im Isolationssystem der Verlustfaktor ansteigt. Außerdem kommt es zu einer Verschiebung des lokalen Maximums des Polarisationsmechanismus hin zu einer höheren Temperatur. Ein ähnlicher Verlauf ist schon aus dem Kapitel 3.1.2 bekannt [1, S.330].



**Abbildung 3.1-11: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Temperatur für ein ölimprägniertes Papier mit unterschiedlichem Wassergehalt [1, S.330]**

Die Feuchtigkeit der Zellulose ist in Bezug auf das Verhalten von ölimprägniertem Papier sehr wichtig, da bei einem Feuchtigkeitsgehalt von mehr als 0,1 Prozent die elektrische Leitfähigkeit und der Verlustfaktor exponentiell ansteigen. Bei einer Feuchtigkeit von über 2 Prozent sinkt die elektrische Durchschlagsfestigkeit und bei ungefähr 10 Prozent besitzt die Zellulose so gut wie keine elektrische Festigkeit mehr. Aufgrund von Erfahrungen und den derzeitigen verwendeten Trocknungsprozessen, um eine Alterung durch höhere Temperaturen auszuschließen, wird für neue Transformatoren eine Feuchtigkeit in dem Bereich von 0,3 bis 0,5 Prozent realisiert. Dieser Bereich ist somit ein Kompromiss, um gute dielektrische Eigenschaften, hohe Durchschlagsfestigkeiten, sowie lange Lebensdauern zu erreichen [1, S.331].

Aus der nachstehenden Abbildung ist ersichtlich, dass aufgrund des ansteigenden Wassergehalts die Leitfähigkeit der Isolationsmedien exponentiell wächst. Dieser Zusammenhang wird beispielsweise in [60] anhand von messtechnisch ermittelten Verläufen, welche anschließend mathematisch beschrieben wurden, thematisiert.



**Abbildung 3.1-12: Leitfähigkeit von verschiedenen ölprägnierten Papieren in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei Raumtemperatur [1, S.332]**

Werden bei Untersuchungen des Dielektrikums, z. B. bei Wartungsarbeiten oder Zustandsbewertungen von Öl-Papier isolierten Transformatoren, erhöhte Werte des Wassergehaltes festgestellt, ist es erforderlich, rechtzeitig Korrekturmaßnahmen durchzuführen. Mögliche Korrekturmaßnahmen wären in diesem Zusammenhang beispielsweise Trocknung oder Regeneration der Ölfüllung [51]. Nähere Informationen zu möglichen Verfahren kann man z. B. in [49] oder [50] nachlesen.

### 3.2 Elektrische Diagnostik

Die elektrische Diagnostik vereint alle möglichen Analysemethoden, welche die Eigenschaften von elektrisch messbaren Parametern ausnutzen. Aufgrund der relativ einfachen Anwendbarkeit kommen elektrische Methoden heutzutage immer öfters zur Anwendung. Ein Vorteil dieser Methoden ist die teilweise vorhandene Kompaktheit der Messapparaturen, da man zum Teil nur ein einziges Messgerät für die Zustandsbewertung des Betriebsmittels benötigt. Weitere Vorteile sind die rasche Messauswertung und Messdarstellung, die vielfache Möglichkeit der Messung bzw.

der Messaufzeichnung ohne das der Benutzer anwesend sein muss, sowie die flexible Weiterverarbeitung der Messergebnisse.

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Überblick über derzeitige Analyseverfahren für die elektrische Diagnostik, sowie einige Eigenschaften bzw. Besonderheiten dieser Verfahren.

**Tabelle 3.2-1: Überblick über Diagnoseverfahren im Zeit- und Frequenzbereich (adaptiert aus [1, S.452])**

Analyseverfahren		Vollständige System-information	Integrale Zwei-Elektroden-Messung	Selektive Drei-Elektroden-Messung	Ausschluss parasitärer Oberflächen-/Leckströme	Leitfähigkeitsmessung	Analysesoftware für komplexe Geometrien
Polarisationsstrom-A.	PDC	ja	möglich	möglich	möglich	gegeben	bekannt
Deopolarisationsstrom-A.		nein	möglich	möglich	gegeben	nicht möglich	bekannt
Isotherme Relaxionsstrom-A.	IRC	nein	möglich	möglich	gegeben	nicht möglich	n.b. *)
Entladespannungs-A.	ESU	n.b. *)	möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich	n.b. *)
Rückkehrspannungs-A.	RVM	n.b. *)	möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich	n.b. *)
Frequenzbereichs-A.	FDS	ja	möglich	möglich	möglich	möglich	bekannt
Messungen bei diskreter Frequenz	50/ 0,1 Hz	nein	möglich	möglich	möglich	nicht möglich	n.b. *)
n.b. *): z.Zt. ist keine diesbezügliche Nutzung oder Anwendung bekannt							

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die beiden Analyseverfahren FDS und PDC näher erläutert, da im Rahmen der Diplomarbeit mit diesen beiden Verfahren gearbeitet wurde.

### 3.2.1 Frequenzbereichsspektroskopie (FDS)

Bei der FDS-Methode (**F**requency **D**omain **S**pectroscopy Methode) bzw. der Frequenzbereichsspektroskopie wird durch Variation der Frequenz unter anderem der Verlustfaktor, die Anordnungskapazitäten, die elektrische Leitfähigkeit, sowie der Wassergehalt von einem Dielektrikum bestimmt. Entsprechende Messgeräte können mit Hilfe der Messauswertungssoftware noch weitere Messdaten ermitteln, wie z. B. die Impedanz oder die komplexe Dielektrizitätszahl.

Bei dieser Methode wird mit Hilfe einer sinusförmigen Wechselspannung die Phasenverschiebung zwischen der am Prüfling angelegten Spannung und des

Stromes bestimmt. Wesentlich dabei ist, dass für jede Einzelmessung ein stationärer Zustand abzuwarten ist. Es werden in der Regel bis zu vier Perioden abgewartet, daher ergeben sich bei der Messung von geringen Frequenzen dementsprechend lange Messzeiten [1, S.455].

In der nachfolgenden Abbildung wird die prinzipielle Messschaltung für eine FDS-Messung dargestellt. Dabei bieten das Amperemeter und das Voltmeter die Möglichkeit die Werte für Strom und Spannung zu ermitteln. Mit Hilfe eines Oszilloskops kann unter anderem die Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Größen bestimmt werden. Da ein Oszilloskop nur Zeitverläufe von elektrischen Spannungen an einem Bildschirm darstellen kann, verwendet man einen sogenannten Messshunt  $R_m$ , mit dessen Hilfe man auf den Strom rückschließen kann. Bei der abgebildeten Messanordnung ist es wichtig, den „Eingangskanal 2 (Ch2)“ vom Oszilloskop zu invertieren, damit die Spannung am Prüfling vorzeichenrichtig am Bildschirm dargestellt wird. Der Grund dafür ist, dass das gemeinsame Bezugspotential für die beiden Eingänge am Oszilloskop nur einmal vergeben werden kann. Weiters muss man noch darauf achten, dass beispielsweise das Netzgerät oder der Funktionsgenerator galvanisch vom Netz getrennt ist, z. B. mittels eines Trenntransformators. Ansonsten würde der Prüfling über den Schutzleiter kurzgeschlossen werden und es wäre somit keine Messung mehr möglich.

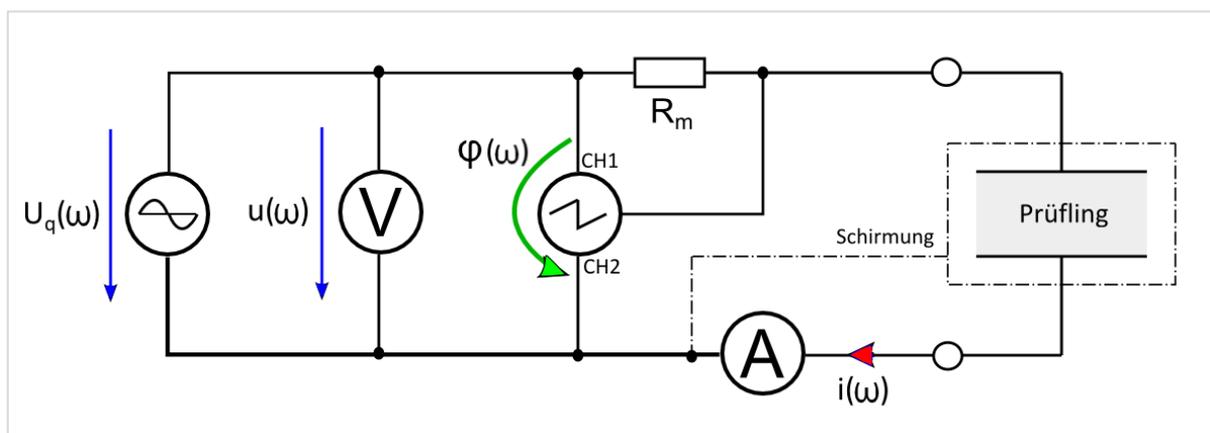


Abbildung 3.2-1: Prinzipielle Messschaltung für die FDS-Methode [eigene Darstellung]

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe eines Diagramms (Abbildung 3.2-2), indem der Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt wird. Durch Einteilung in drei charakteristische Frequenzbereiche können Aussagen über die Feuchtigkeit in der Zellulose und die Leitfähigkeit des Isolieröles getroffen werden. Wie diese Einteilung gemacht wird bzw. wie man unterschiedliche Verläufe interpretieren kann, ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Eine nähere Erklärung, wie es zu dieser Interpretation kommt, kann beispielsweise in [95] auf Seite 6 nachgelesen werden.

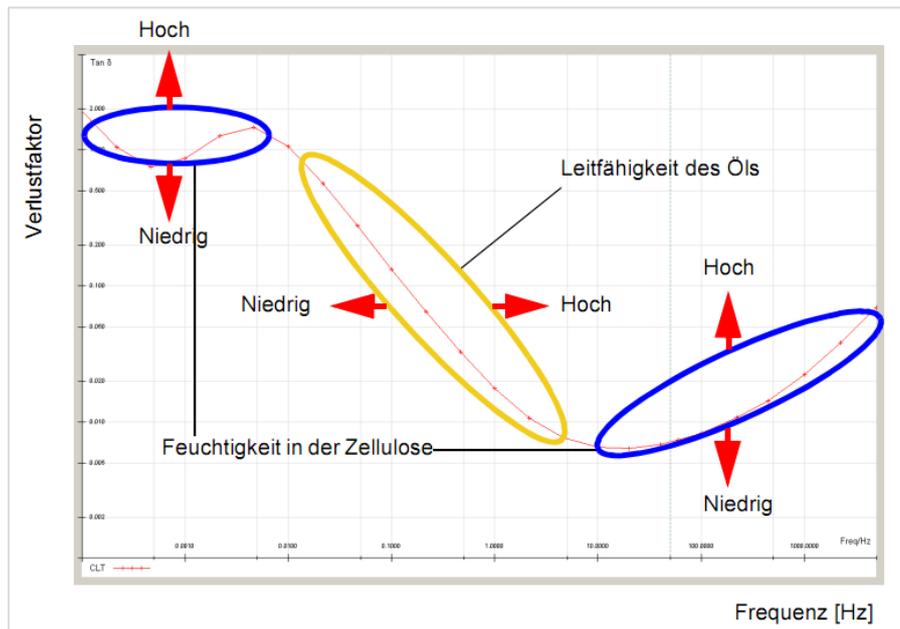
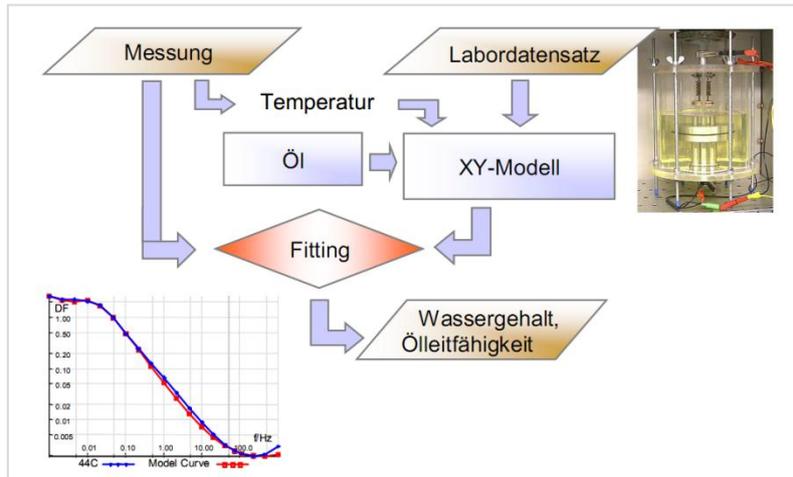


Abbildung 3.2-2: Ergebnis und Interpretation einer FDS-Analyse [3]

Mit Hilfe eines sogenannten „Kurven-Fittings“ kann man mit dem ermittelten Verlauf einer FDS-Analyse eine Feuchtigkeitsbestimmung durchführen, sowie die Ölleitfähigkeit eines Dielektrikums bestimmen. Dabei wird der gemessene Verlauf mit einer modellierten dielektrischen Antwort verglichen. Die modellierte Funktion setzt sich, unter Berücksichtigung der Temperatur des Isolationssystems, aus einer dielektrischen Antwort von einem Pressboard und dem Transformatoröl zusammen, wobei hierfür schon entsprechende Datenbanken bei diversen Messgeräteherstellern existieren. Durch Einsatz eines Analysealgorithmus können nun Aussagen über die Feuchtigkeit und Ölleitfähigkeit gemacht werden. Die nachfolgende Darstellung zeigt den Programmablauf eines solchen Analysealgorithmus [4].



**Abbildung 3.2-3: Ablauf des Analysealgorithmus zur Bestimmung der Wassergehaltes und der Öleitfähigkeit bei einer FDS-Analyse [4]**

### 3.2.2 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC)

Bei der PDC-Methode (**P**olarization and **D**epolarization **C**urrent Methode) bzw. der Polarisations- und Depolarisationsstrommessung erfolgt eine Zustandsbewertung des Dielektrikums mit Hilfe von Strömen beim Polarisieren (Laden) bzw. Depolarisieren (Entladen). Es können wiederum Rückschlüsse auf den Verlustfaktor, die Kapazitäten, die elektrische Leitfähigkeit, sowie den Wassergehalt von einem Dielektrikum gemacht werden. Hierzu müssen gegebenenfalls die erhaltenen Ergebnisse mit einer entsprechenden Importierungssoftware bzw. der Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich, z. B. mit Hilfe der Laplace- oder Fourier-Transformation, durchgeführt werden [5, S.16].

Die dielektrische Polarisation nutzt den Effekt, dass es in einem Isoliermedium beim Einwirken eines elektrischen Feldes zu Verschiebungen von positiven und negativen Ladungen kommt. Das elektrische Feld versucht nun die Ladungsträger auszurichten (Polarisation). Bei keiner weiteren Feldeinwirkung versuchen sich die Ladungsträger wieder in die anfängliche Lage zurückzubewegen (Depolarisation). Durch anschließen einer Gleichspannungsquelle werden die genannten Polarisationserscheinungen aktiv und es können die Stromverläufe ermittelt werden. Ein prinzipieller Aufbau einer solchen Messanordnung ist in Abbildung 3.2-4 ersichtlich. Der grundsätzliche Verlauf der Ströme bzw. der Spannung kann aus Abbildung 3.2-5 entnommen werden. Beide Stromverläufe besitzen einen exponentiellen Verlauf.

Eine genauere mathematische Betrachtung kann unter anderem in [53] nachgelesen werden. Interessant ist diese Analyseverfahren aufgrund des unterschiedlichen Zeitverhaltens der Ströme [5, S.16].

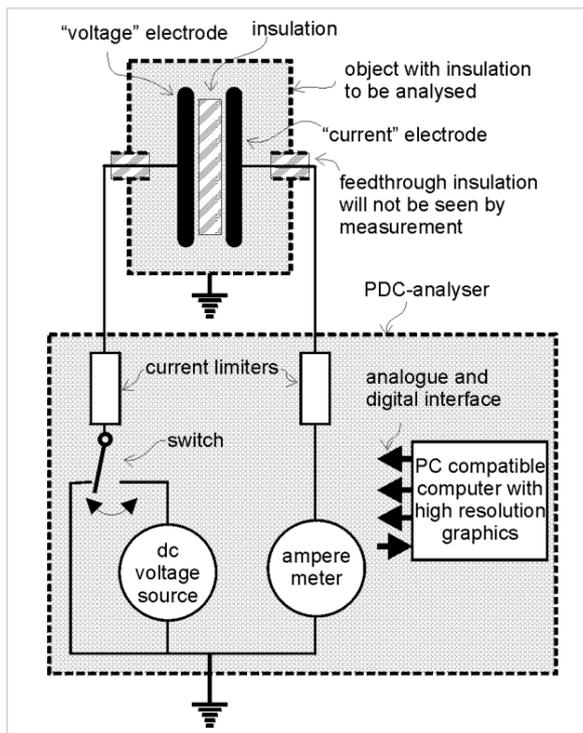


Abbildung 3.2-4: Prinzipielle Messanordnung für eine PDC-Analyse [52, S.163]

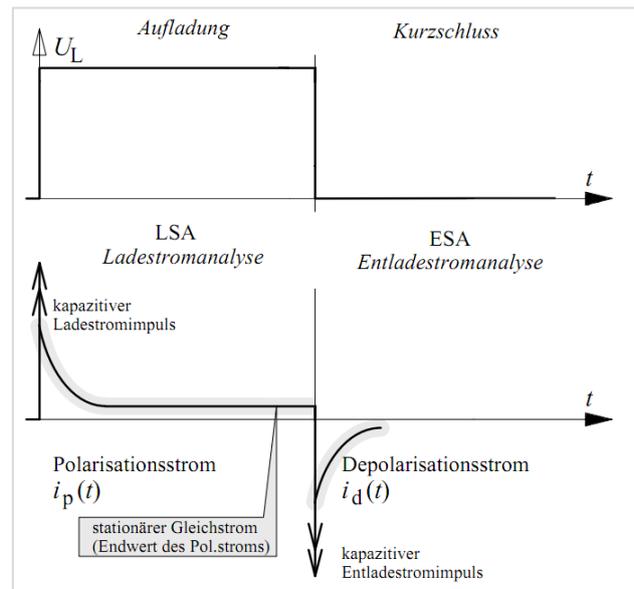


Abbildung 3.2-5: Prinzipieller Strom-/Spannungsverlauf im Zeitbereich für die PDC-Methode (nach [1, S.451])

Bei angelegter Gleichspannung wird zuerst der Polarisationsstrom  $i_p(t)$  mit einem sehr empfindlichen Amperemeter für eine gewisse Ladezeit gemessen. Nach Ablauf der Zeit wird der Prüfling kurzgeschlossen und der Depolarisationsstrom  $i_d(t)$  ermittelt. Wie das Amperemeter aufgebaut wird bzw. auf was man dabei achten muss, wird in [52] erläutert. Aus den Stromverläufen kann man direkte Rückschlüsse auf den Wassergehalt in der Zellulose, sowie die Leitfähigkeit des Öls ziehen [52]. Die nachfolgende Abbildung zeigt, wie diese Stromverläufe aussehen und wie eine mögliche Interpretation gemacht werden kann. Eine nähere Erklärung, wie es zu dieser Interpretation kommt, kann beispielsweise in [95] auf Seite 6 nachgelesen werden.

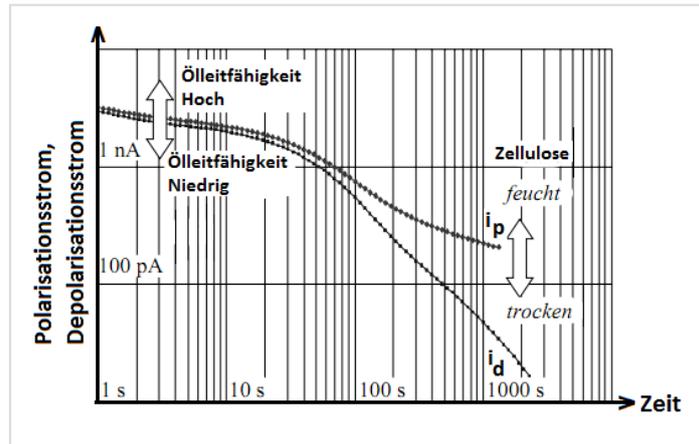


Abbildung 3.2-6: Verlauf und Interpretation des Polarisations-/Depolarisationsstromes (nach [1, S.463])

Wie bei der FDS-Analyse kann mit Hilfe eines „Kurven-Fittings“ wiederum der Wassergehalt, sowie die Ölleitfähigkeit bestimmt werden. Dazu muss man allerdings, wie bereits erwähnt, unter Umständen zuerst eine Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich durchführen, falls keine entsprechende Analysesoftware für den Zeitbereich mitgeliefert wurde. Außerdem wird durch Nutzung von nur einer Analyse- bzw. Auswertungssoftware die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von unterschiedlichen Messmethoden oder Messgeräteherstellern erleichtert. Eine prinzipielle Erklärung bezüglich des „Kurven-Fittings“ wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt (FDS-Analyse) gemacht.

### 3.3 Chemische Diagnostik / Analytik

Die chemische Diagnostik ist neben der elektrischen Diagnostik eine der wichtigsten Analytik-Methoden. Besonders für Öl-Papier-Isolierungen, aber auch in anderen Bereichen wie z. B. der Lebensmittelindustrie, ist diese Analysemethode von Bedeutung. So können mit Hilfe von chemischen Methoden, wie beispielsweise der Karl-Fischer-Titration, unter anderem folgende Größen bestimmt werden [1, S.433]:

- Wassergehalt in Flüssigkeiten oder Feststoffen
- in Öl gelöste Spaltgase
- diverse Zersetzungsprodukte von Feststoffen
- Polymerisationsgrad (DP-Wert) von Zellulose

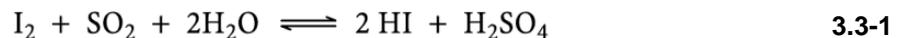
Für die Diplomarbeit war hauptsächlich der Wassergehalt in einem Mineralöl und in einer Zellulose von Bedeutung. Nähere Informationen zu den verwendeten Materialien sind in Kapitel 4 zu finden. Als Messmethode kam die bereits genannte Karl-Fischer-Titration zum Einsatz. Diese Methode wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch näher erläutert. Eine detaillierte und weiterführende Beschreibung kann z. B. in [55] nachgelesen werden. Grund für die Auswahl dieses Messverfahrens war, dass diese Methode sehr genaue Ergebnisse liefert und zudem in der Praxis sehr häufig Verwendung findet.

Eine andere chemische Methode wäre z. B. die Gas-in-Öl-Methode, welche die thermischen Zersetzungsprodukte, beispielsweise eines Isoliersystems aus Öl und Zellulose, anhand der entstehenden Gase bzw. Spaltgase überprüft. Die Hochdruck-Flüssigkeitschromatographie (**high pressure/performance liquid chromatography - HPLC**) wäre eine weitere mögliche Methode. Bei dieser Methode werden die sogenannten Furan-Derivate, oft auch als Furfurale, Furfurole oder Furane bezeichnet, genutzt. Bei den Furan-Derivaten handelt es sich um verkürzte Zelluloseketten, welche aufgrund der Alterung von Zellulose entstehen. Eine Analyse mit Hilfe eines Gaschromatographen ist, im Vergleich zur Gas-in-Öl-Methode, wegen der höhermolekularen Verbindungen nicht mehr möglich. Daher benötigt man einen Hochdruck-Flüssigkeitschromatographen. Als letzte chemische Methode ist die Bestimmung des Polymerisationsgrades von Zellulose zu nennen. Bei dieser Methode erfolgt eine Auflösung von Zelluloseproben in einer Kupferethyldiamin-Lösung. Dabei ist die Viskosität der Lösung ein Maß für die Anzahl der Glukosemoleküle im Kettenmolekül der Zellulose und somit auch ein Indikator für den Alterungszustand. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird allerdings, wie bereits erwähnt, nur mehr auf die Karl-Fischer-Titration näher eingegangen [1, S.433ff].

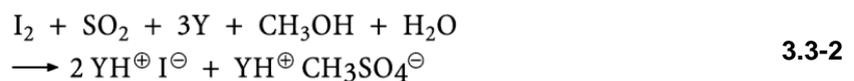
### 3.3.1 Karl-Fischer-Titration für Flüssigkeiten

Mit der **Karl-Fischer-Titration** (KFT) für Flüssigkeiten wird grundsätzlich der Feuchtegehalt in unterschiedlichsten Flüssigkeiten bestimmt. Bei dieser Diplomarbeit wurde lediglich der Feuchtegehalt vom Mineralöl Nytro 4000X von der Firma Nynas AB untersucht. Nähere Informationen über das Mineralöl können im Kapitel 4.2.3 nachgelesen werden.

Die Karl-Fischer-Titration beruht auf der von Karl Fischer entwickelten Methode aus dem Jahre 1935 und arbeitet unter anderem mit einer methanolischen Lösung von Jod, Schwefeldioxid und einer Base als Puffersubstanz. Der Wassergehalt eines Stoffes wird dadurch bestimmt, dass es in Anwesenheit von Wasser (H<sub>2</sub>O) zu einer chemischen Umwandlung von Jod (I) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) hin zu Jodwasserstoff (HI) und Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) kommt. Mit Hilfe der nachfolgenden chemischen Reaktionsgleichung kann dieser als „Bunsen-Reaktion“ bezeichnete Prozess nachvollzogen werden [19] [20].

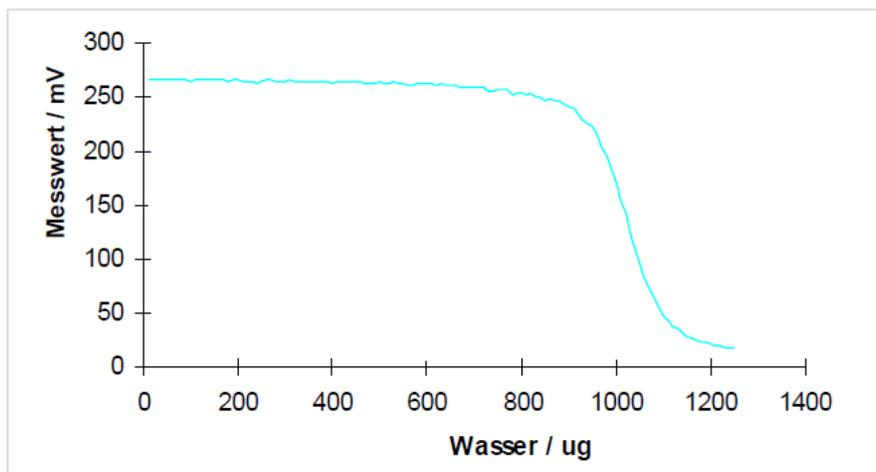


Durch Zusatz einer Base (Y), z. B. Amine, Salicylate oder Dichloracetat, und von Methanol (CH<sub>3</sub>OH) kommt es zu einer quantitativen Aussage über den Wassergehalt des zu untersuchenden Stoffes. Die Aussage beruht auf der Erkenntnis das 1 Mol SO<sub>2</sub> mit 1 Mol I<sub>2</sub> genau 1 Mol H<sub>2</sub>O benötigt. Wichtig dabei ist, dass die entstehenden Protonen von der Base abgefangen werden und nicht mehr frei auftreten. Die Reaktionen lassen sich mit der nachfolgenden Gleichung erklären [19].



Der Endpunkt der Titration kann unter anderem voltametrisch bestimmt werden. Das bedeutet, dass durch einen konstant angelegten Wechselstrom eine Spannungsdifferenz zwischen zwei polarisierbaren Elektroden, in der Regel sind dies Platin-Doppelelektroden, beobachtet werden kann. Durch eine vorhandene Menge an freiem Jod, da das gesamte vorhandene Wasser chemisch gebunden wurde,

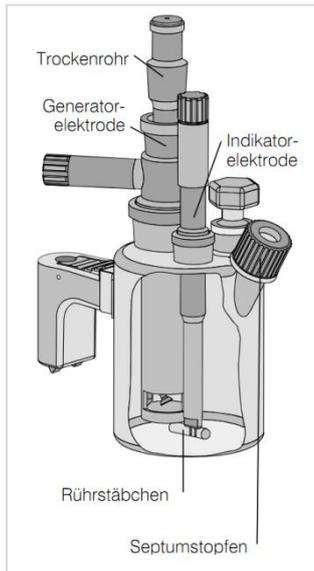
nimmt die Spannungsdifferenz ab und der Endpunkt ist erreicht. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen exemplarischen Verlauf für die Bestimmung des Wassergehaltes einer Probe. Wichtig für die Versuchsanordnung ist es, diese so gut wie möglich luftdicht zu halten bzw. die Reagenzien vor der Umgebungsluftfeuchtigkeit zu schützen, damit die Messungen so gering wie möglich beeinflusst werden und auch die Langzeitstabilität der im Titriergefäß befindlichen Lösung gewährleistet wird [21]. Andere Möglichkeiten für die Bestimmung des Endpunktes können beispielsweise in [20], [55] oder [56] nachgelesen werden.



**Abbildung 3.3-1: Exemplarischer Verlauf für die Bestimmung des Wassergehaltes einer Probe (nach [21, S.32])**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Karl-Fischer-Titration nach dem coulometrischen Verfahren angewendet. Als weiteres Verfahren ist noch das Verfahren nach der Volumetrie zu erwähnen. Der wesentlichste Unterschied zwischen diesen beiden Verfahren ist, dass bei der Coulometrie kein Titrant (Base) dazugegeben wird, sondern das benötigte Jod direkt im jodidhaltigen Elektrolyt auf elektrochemischer Basis erzeugt wird. Dieses Verfahren bietet den großen Vorteil, dass selbst kleinste Mengen von Wasser bestimmt werden können [21].

Die nachstehenden Abbildungen zeigen den Aufbau einer Karl-Fischer-Apparatur, sowie den schematischen Aufbau eines Titriergefäßes.



**Abbildung 3.3-2: Schematischer Aufbau eines Titriergefäßes [21, S.5]**



**Abbildung 3.3-3: 831 KF Coulometer [84]**

Der Vorteil der Karl-Fischer-Titration ist, dass es möglich ist, Wasser nicht nur spezifisch, sondern auch selektiv zu erfassen, da dem Verfahren chemische Reaktionen zugrunde liegen. Außerdem kann die Karl-Fischer-Titration für Flüssigkeiten als eine Schnellanalysemethode bezeichnet werden, da in der Regel nur in etwa ein bis zwei Minuten für die Messung benötigt werden [19].

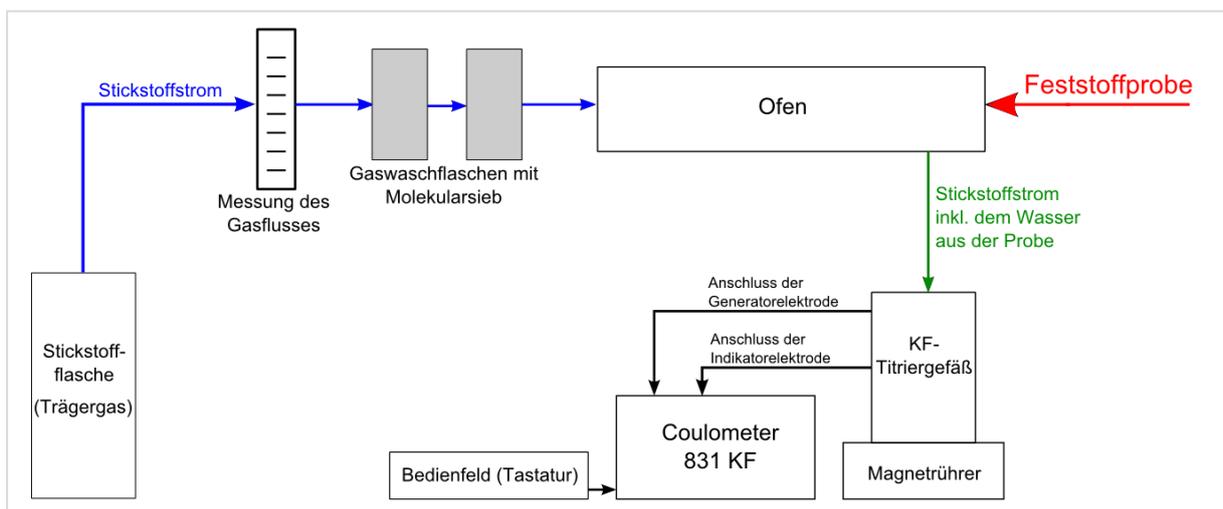
Ein Nachteil der Karl-Fischer-Titration liegt darin, dass keine kontinuierliche Überwachung von Betriebsmitteln möglich ist. Außerdem ist es sehr wichtig exakt und sorgfältig zu arbeiten, damit es zu keinen Verunreinigungen und somit zu Messungenauigkeiten kommt. Vor allem in der Probenentnahme, dem Transport und der Probeneinspritzung sind sehr große Fehlerpotentiale enthalten, da es vorkommen kann, dass die Probe z. B. Feuchtigkeit aufnimmt. Wie die Probenvorbereitung und –bearbeitung im Speziellen aussehen kann, wird im Kapitel 5.3.3 erläutert. Neben dem Messprozess an sich, kann die Messlösung durch verschiedene Einflussfaktoren, wie z. B. Alterungsprodukte, ebenso die Messungen verfälschen. Daher ist es ratsam, in gewissen Intervallen die Messlösung zu tauschen bzw. mit sogenannten Wasserstandards die Lösung zu kontrollieren [18].

### 3.3.2 Karl-Fischer-Titration für Feststoffe

Die Karl-Fischer-Titration für Feststoffe beruht prinzipiell auf den gleichen Überlegungen wie die Analyse von flüssigen Proben. Allerdings werden noch zusätzliche Geräte, wie z. B. ein Ofen, und andere Lösungsmittel bzw. Reagenzien benötigt. Grundsätzlich können zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung kommen [30]:

- Ausheizverfahren bzw. Verdampfungsverfahren
- Methanolextraktion

Bei der Methanolextraktion wird die Feststoffprobe bei einer Temperatur von 20°C und einer Dauer von 2 Stunden in eine Methanollösung eingelegt, damit das im Feststoff enthaltene Wasser extrahiert wird. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Wassergehaltes der Probe mit Hilfe der direkten Titration für Flüssigkeiten. Im weiteren Verlauf wird allerdings das Ausheizverfahren genauer erklärt, da dieses bei der Bestimmung des Wassergehaltes von Zellulose verwendet wurde. In der nachstehenden Abbildung wird der schematische Aufbau einer solchen Anordnung dargestellt [30].



**Abbildung 3.3-4: Schematischer Aufbau einer Karl-Fischer-Titration für Feststoffe [eigene Darstellung]**

Bei der Analyse von Feststoffen benötigt man, wie erwähnt, einen Ofen, der in diesem Fall bei einer Temperatur von 180°C betrieben wird. Wie es zur Ermittlung dieser Temperatur kommt, wird im Kapitel 2.2.3 erläutert. Anzumerken ist, dass im Kapitel 2.2.3 bzw. in [30] eine geeignete Ausheiztemperatur von 220°C angegeben wird. Mein Betreuer informierte mich aber, dass eine Temperatur von 180°C ausreicht, damit das Risiko verringert wird, dass bei einer zu langen Extraktionszeit die Boardoberfläche bzw. feine Zellulosefasern verbrannt werden.

Der Ofen dient dazu, um die Feuchtigkeit aus dem Feststoff, in diesem Fall aus dem Pressboard, in das Titriergefäß zu transferieren. Als Trägergas für das verdampfte Wasser kann beispielsweise trockener Stickstoff verwendet werden. Dieser wird, bevor er in den Ofen kommt, über zwei Gaswaschflaschen mit einem Molekularsieb (5 Ångstrom) geführt. Der Vorgang in dem Titriergefäß entspricht im Prinzip dem Ablauf bei der Analyse von Flüssigkeiten, welche im vorherigen Abschnitt erklärt wurde.

Wichtig bei der Analyse von Feststoffen ist der sorgsame Umgang mit der Probe, da beim gesamten Prozess, von der Probenentnahme bis hin zur Probeneinführung in den Ofen, eine Vielzahl von Fehlerquellen existieren bzw. die Probe durch Unachtsamkeit verunreinigt werden kann. Wie die Probenvorbereitung und -bearbeitung im Speziellen aussehen kann wird im Kapitel 5.3.4 erläutert.

## 4 Prüfaufbau

Der Prüfaufbau an sich setzt sich aus einem Prüfling und einem Prüfgefäß zusammen, wobei der Prüfling selbst gefertigt wurde. Das Prüfgefäß, sowie die beiden Isolationsmaterialien wurden von externen Firmen bezogen. In diesem Kapitel werden die unterschiedlich realisierten Prüflinge und Prüfgefäße erläutert, sowie die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften angeführt. Außerdem wird die Kapazität für die Messanordnung analytisch berechnet. Eine genauere Darstellung des Messaufbaues für die einzelnen Messanordnungen kann aus Kapitel 6 entnommen werden.

### 4.1 Prüfling

Insgesamt gab es zwei verschiedene Versionen für den Prüfling, wobei beide Prüflinge aus den gleichen Materialien bestanden. Die wesentlichsten Komponenten des Prüflings sind die Elektroden, sowie die Feststoffisolierung. Für die Elektroden wurde Aluminium und als Feststoffisolierung Transformerboard verwendet. Ein mineralisches Isolieröl kommt als Isolationsflüssigkeit zum Einsatz. Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen den prinzipiellen Aufbau des ersten Prüflings.

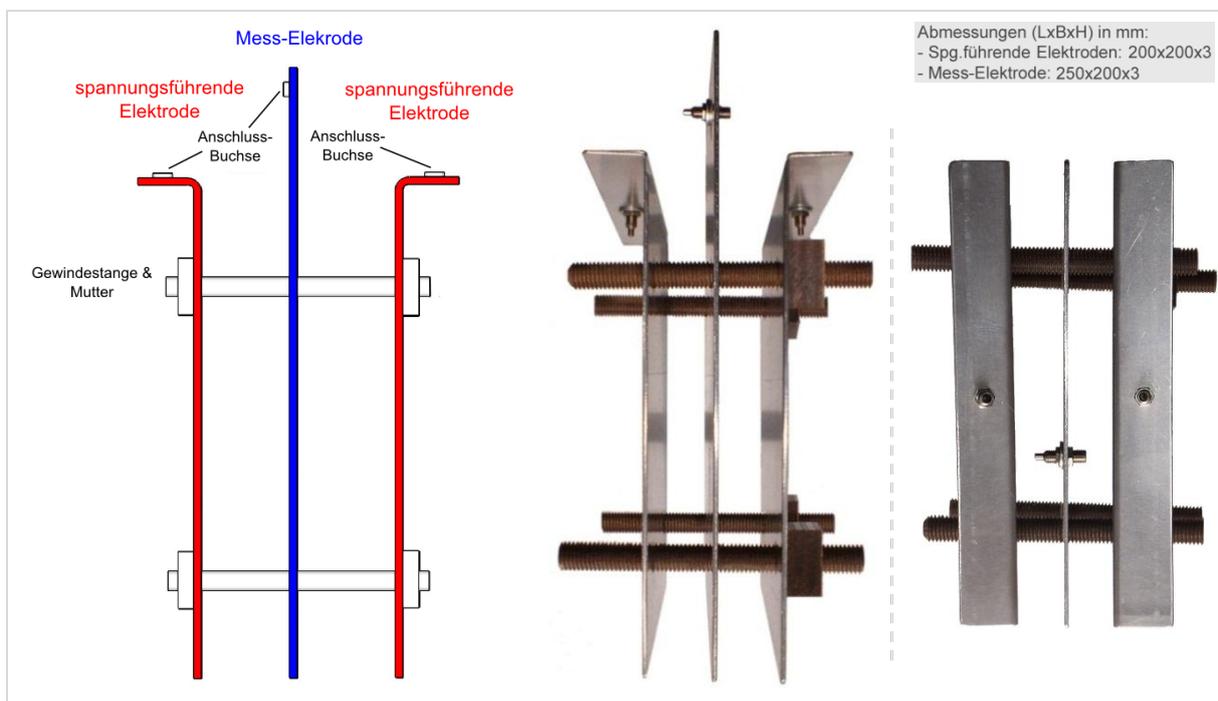
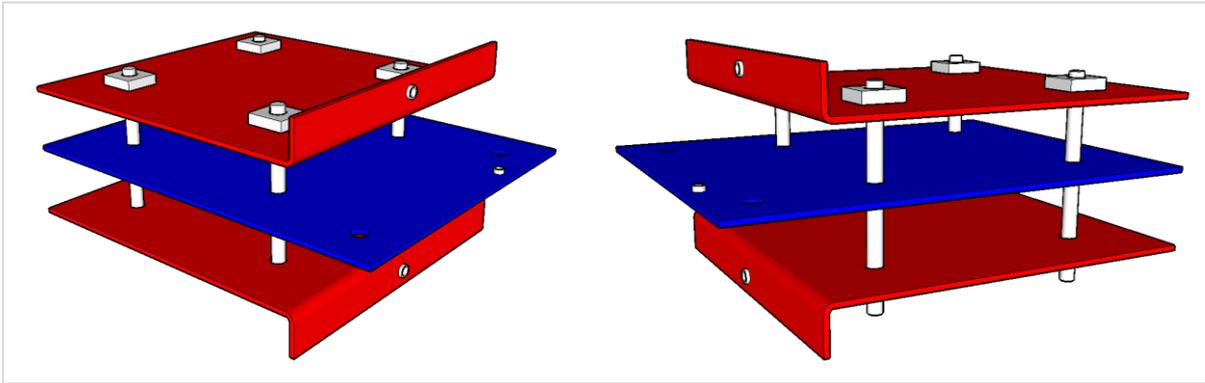


Abbildung 4.1-1: Skizze und Photos des ersten Prüflings (Ansicht von der Seite und von oben)  
[eigene Darstellung und Photos]



**Abbildung 4.1-2: Skizze des ersten Prüflings – blau ist die Messelektrode, rot sind die spannungsführenden Elektroden (Ansicht schräg) [eigene Darstellung]**

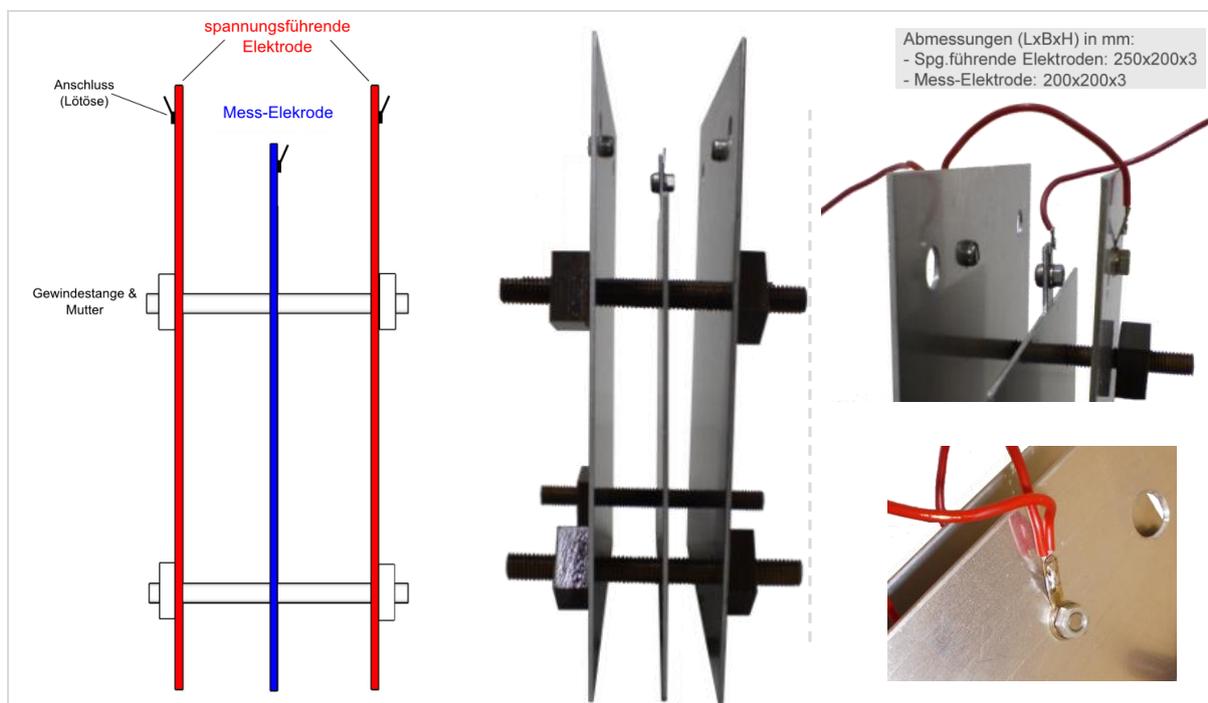
Genauere Angaben über die Abmessungen der jeweiligen Elektroden, sowie Konstruktionsskizzen können aus dem Anhang ab Seite 161 unter B.1 entnommen werden.

Ein Grund für den Neuentwurf des Prüflings war die Elektrodenform der Messelektrode, da die Messelektrode über die Feststoffisolierung ragte. Außerdem wurde die Messelektrode zusätzlich noch für die Aufhängung auf dem Prüfgefäß genutzt, damit der Prüfling nicht am Gefäßboden stand (siehe dazu die Photos im Kapitel 6.1 auf Seite 102). Aufgrund der daraus resultierenden größeren Fläche der Messelektrode und der schlechteren elektromagnetischen Abschirmung war eine größere Störanfälligkeit bzw. eine leichtere Einkopplung von Störsignalen möglich. Eine weitere Schwachstelle des ersten Prüflings waren die Anschlüsse der Messleitungen bzw. für die Messgeräte. Das Problem mit den Anschlüsse war, dass es aufgrund von zu großen Übergangswiderständen teilweise zu Kontaktfehlern und somit zu Messfehlern kam. Anzumerken ist noch, dass für die Anschlüsse des ersten Prüflings Bananensteckerbuchsen verwendet wurden und dass die Enden der Elektroden wegen des benötigten Platzbedarfs für die Stecker umgebogen waren.

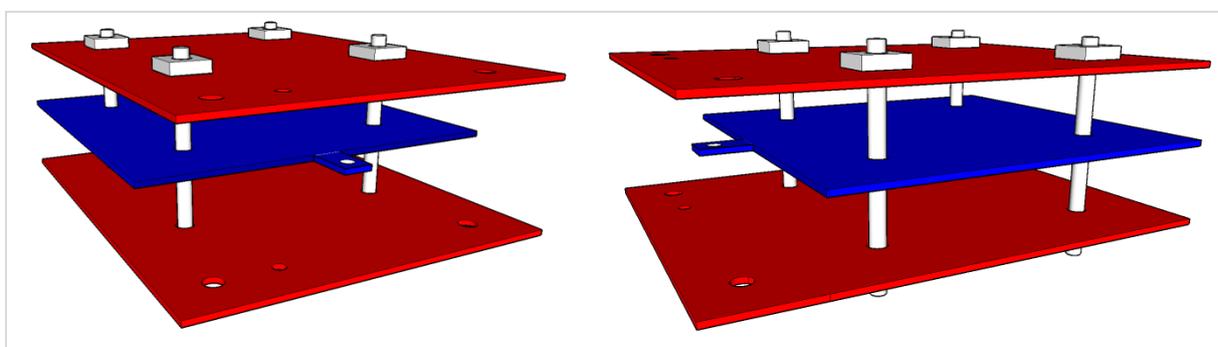
Zusammenfassend waren die Nachteile des ersten Prüflings:

- die größere Messelektrodenfläche (störanfälliger durch äußere Einflüsse)
- die Messelektrode wurde für die Aufhängung des Prüflings im Gefäß genutzt
- die Anschlüsse (Bananenstecker führten teilweise zu Kontaktfehlern)

Um die Störeinflüsse zu minimieren und die Übergangswiderstände zu verringern, wurde der erste Prüfling überarbeitet und ein verbesserter Prüfling konstruiert. Dieser besitzt, wie man in den beiden nachfolgenden Abbildungen sieht, eine kleinere Messelektrode und andere Anschlusskontakte. Die Messelektrode wurde gleichgroß wie die Feststoffisolierung gefertigt und bei den Anschlusskontakten handelt es sich um Lötösen, mit denen ein verringerter Übergangswiderstand realisiert wurde. Außerdem befinden sich die Bohrungen für die Aufhängung des Prüflings im Prüfgefäß in den spannungsführenden Elektroden und nicht mehr in der Messelektrode.



**Abbildung 4.1-3: Skizze und Foto des zweiten Prüflings (Ansicht von der Seite und von den Anschlüssen) [eigene Darstellung und Photos]**



**Abbildung 4.1-4: Skizze des zweiten Prüflings – blau ist die Messelektrode, rot sind die spannungsführenden Elektroden (Ansicht schräg) [eigene Darstellung]**

Genauere Angaben über die Abmessungen der jeweiligen Elektroden, sowie Konstruktionsskizzen des zweiten Prüflings können aus dem Anhang ab Seite 161 unter C.1 entnommen werden.

Neben den Elektroden ist das bereits erwähnte Transformerboard als Feststoffisolation ein wichtiger Bestandteil des Prüflings. So können beispielsweise unterschiedliche Öl-Board-Anordnungen durch Kombination von Transformerboard und Abstandshaltern im Elektrodenzwischenraum realisiert werden. In der nachfolgenden Abbildung werden die Komponenten Feststoffisolation, Abstandshalter, Gewindestange und Mutter abgebildet. Anzumerken ist noch, dass diese vier Komponenten aus Transformerboard bestehen.



**Abbildung 4.1-5: Photos von der Feststoffisolation, dem Abstandshalter, der Gewindestange und der Gewindemutter [eigene Photos]**

Erläuterungen zu den erwähnten Materialien, dem verwendeten Mineralöl, sowie der kombinierten Anwendung von ölprägnierten Transformerboard werden in den folgenden Abschnitten gemacht.

## **4.2 Verwendete Materialien und deren Eigenschaften (Prüfling)**

Für den Prüfling wurden die Materialien Aluminium für die Elektroden, sowie Transformerboard und Mineralöl für das Isolationssystem verwendet. Der Grund für die Wahl dieser Materialien war unter anderem die Verfügbarkeit am Institut, aber hauptsächlich die verbreitete Anwendung dieser Werkstoffe in der Praxis. Für die Elektroden wurde Aluminium verwendet, da es gute elektrische Eigenschaften aufweist und leicht zu bearbeiten ist. Anzumerken ist allerdings, dass Stahl aufgrund einiger Eigenschaften ein noch besserer Werkstoff für die Elektroden gewesen wäre. Als Material für das Isolationssystem kommt die kombinierte Anwendung von Transformerboard und Mineralöl zum Einsatz und wird als ölprägniertes Transformerboard bezeichnet. In den nächsten vier Abschnitten wird nun näher auf die Materialien, die für den Prüfling verwendet wurden, eingegangen.

### **4.2.1 Aluminium**

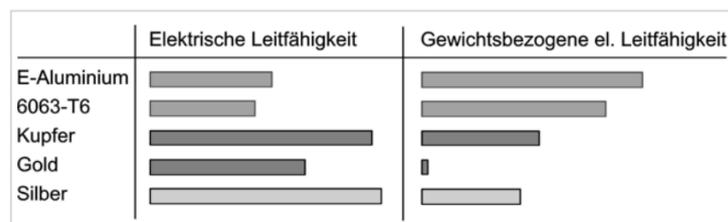
Aluminium hat im Vergleich zu anderen Materialien, wie z. B. Stahl oder Kupfer, einige wesentliche Vorteile. So besitzt es beispielsweise im Vergleich zu Stahl nur ein Drittel dessen spezifischen Gewichtes. Weitere Vorteile von Aluminium sind unter anderem die vielfältigen Herstellungsmöglichkeiten, z. B. durch gießen, walzen, schmieden, ziehen usw. und die vielseitigen Formgebungsmöglichkeiten, z. B. durch spanen, tiefziehen, biegen oder stanzen. Weiters kann sich Aluminium noch durch ein großes Festigkeitsspektrum (70 bis 800 N/mm<sup>2</sup>), eine gute Korrosionsbeständigkeit und der Eigenschaft, dass es ungiftig ist, auszeichnen [10, S.2].

Besonders interessant sind die elektrotechnischen Eigenschaften von Aluminium, wie z. B. die hohe elektrische Leitfähigkeit oder die gute Wärmeleitfähigkeit. Im Vergleich zu dem häufig verwendeten Material Kupfer besitzt Aluminium, bezogen auf das gleiche Gewicht, eine doppelt so hohe elektrische Leitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit ist im Vergleich zu Stahl dreimal so hoch. Diese und noch weitere Eigenschaften machen Aluminium nach Stahl zum wichtigsten Gebrauchsmetall weltweit. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die physikalischen Eigenschaften von Reinaluminium bei einer Temperatur von 20°C [10, S.2].

**Tabelle 4.2-1: Physikalische Eigenschaften von Reinaluminium (Al 99,99 %) bei 20°C (adaptiert aus [10, S.221])**

Eigenschaft	Maßzahl	Einheit
Ordnungszahl	13	
Gitteraufbau	kubisch flächenzentriert	
Atomradius	0,1431	nm
Dichte	$2,6989 \cdot 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul	66,6	kN/mm <sup>2</sup>
Mittlere linearer Wärmeausdehnungskoeffizient zw. 20°C und 100°C	$23,6 \cdot 10^6$	1/°C
Wärmeleitfähigkeit	235	W/mK
Schmelztemperatur	660,2	°C
Siedetemperatur	2470	°C
Spezifische Wärme bei konst Druck, $c_p$	0,89	kJ/kg K
Elektrische Leitfähigkeit	37,67	m/Ω mm <sup>2</sup>
Spezifischer elektrischer Widerstand	26,55	nΩ m
Magnetisierbarkeit	$0,62 \cdot 10^{-9}$	m <sup>3</sup> /kg

Wie bereits erwähnt besitzt Aluminium eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Es besitzt zwar in seiner reinen Form (99,99 %) und bei Raumtemperatur nur eine Leitfähigkeit von 63,8 Prozent, allerdings bezogen auf das Gewicht ist es diesbezüglich eines der besten Materialien. Die nachstehende Abbildung gibt einen Überblick über die elektrische Leitfähigkeit von unterschiedlichen Metallen mit absoluten und gewichtsbezogenen Werten. Anzumerken wäre noch, dass die elektrische Leitfähigkeit sowohl von der genauen Zusammensetzung als auch vom Wärmebehandlungszustand abhängig ist [10, S.223].



**Abbildung 4.2-1: Elektrische Leitfähigkeit von verschiedenen Metallen – absolute und gewichtsbezogene Werte [10, S.223]**

## 4.2.2 Transformerboard

Das Transformerboard TIV wurde von der Firma Weidmann AG aus der Schweiz bezogen und als Feststoffisolierung für das Isolationssystem verwendet. Grundsätzlich kann man sagen, dass Transformerboard bzw. Board ein dickes Isolierpapier höchster Qualität ist. Wie Papier wird es aus ungebleichter

Sulfatzellulose hergestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Strukturformel der Zellulose [6, S.21].

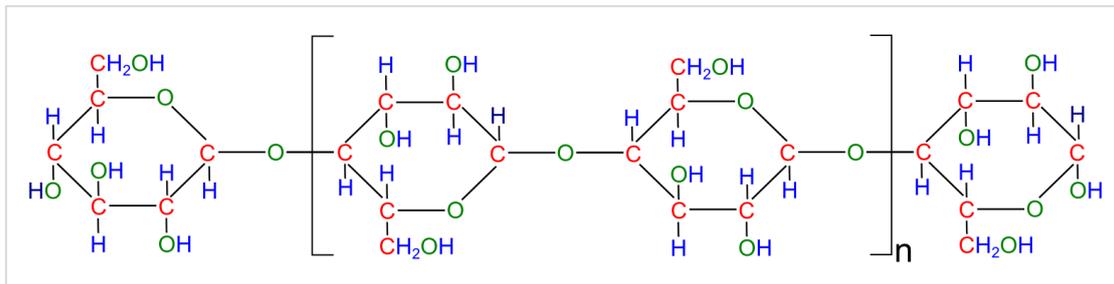


Abbildung 4.2-2: Makromolekül der Zellulose (adaptiert aus [6, S.21])

Für eine gute mechanische Eigenschaft des Transformerboards ist eine große Menge der sogenannten Hemizellulose notwendig, da diese die Bildung von Wasserstoffbrücken unterstützt. Holz besteht zu rund 40 bis 60 Prozent aus Zellulosefasern und zu rund 6 bis 27 Prozent aus Hemizellulose. Ein weiterer wichtiger Bestandteil von Holz ist das Bindemittel Lignin mit einem Anteil von rund 18 bis 41 Prozent. Die Nebenbestandteile machen zwischen 2 und 7 Prozent aus. Eine Übersicht über die Bestandteile des Holzes ist in der nachfolgenden Grafik zu sehen [6, S.21] [22, S.3].

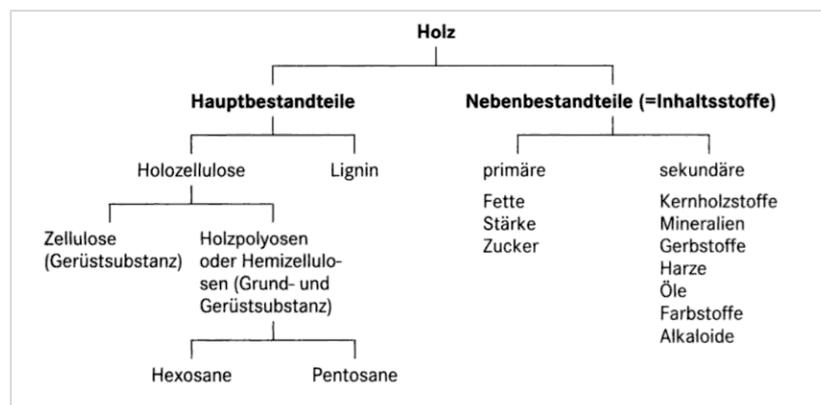


Abbildung 4.2-3: Bestandteile des Holzes [23, S.39]

Für eine weitere Verarbeitung bzw. um die Zellulosefasern aus dem Holz herauslösen zu können, müssen verschiedene chemische Verfahren durchlaufen werden, um z. B. das Lignin und diverse Verunreinigungen zu entfernen. Wichtig bei

dem Verfahrensprozess ist es, die Zellulose so wenig wie möglich anzugreifen, um für die Weiterverarbeitung noch möglichst gute und lange Fasern zu haben [6, S.21].

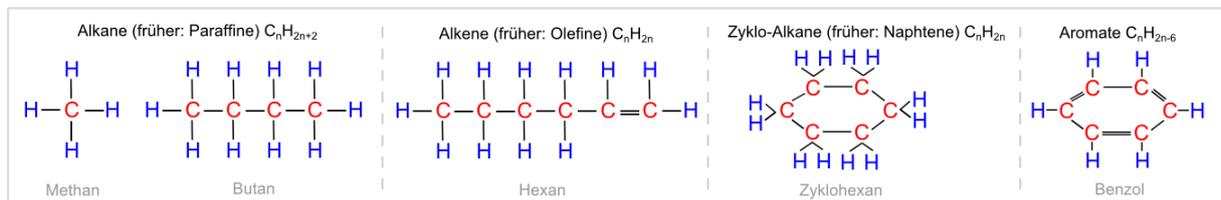
Für besondere Ansprüche gibt es spezielle Zusätze, um bestimmte Eigenschaften des Isolierstoffes zu verbessern. Bei den Zusätzen handelt es sich z. B. um synthetische Fasern, damit die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Es ist auch möglich ganze Isoliertafeln aus synthetischen Fasern herzustellen. Hier kommen in der Regel Polytetrafluorethylen (das sogenannte Teflon®), Aramide (bekannt unter Kevlar®) oder Polyetheretherketon (PEEK) zum Einsatz. Allerdings steigen die Herstellungskosten für das Transformerboard entsprechend den gestiegenen Anforderungen an die Eigenschaften des Isolierstoffes [7, S.17].

Beim Einsatz von Transformerboard ist eine kombinierte Nutzung mit einer Isolierflüssigkeit sehr wichtig, denn aufgrund von etwaigen Einflussfaktoren kann es zu Änderungen der elektrischen Eigenschaften des Isolationssystems kommen. So sinkt unter anderem die elektrische Festigkeit bei einem hohen Wassergehalt im Feststoff. Außerdem erfolgt eine schnellere Alterung und es kommt vermehrt zu Durchschlägen infolge von Störungen im Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen Transformerboard und Isolierflüssigkeit. Bei der Alterung haben Untersuchungen ergeben, dass ein Wassergehalt von 1 Prozent im Transformerboard dieses um den Faktor zehn schneller altern lässt als ein Transformerboard mit nur 0,1 Prozent Wassergehalt [6, S.32].

### **4.2.3 Mineralöl**

Als Mineralöl wurde Nytro 4000X von der Firma Nynas AB verwendet. Hauptsächlich werden Mineralöle als Füllung von Transformatoren, als Imprägnierung von Ölkabeln, für Kondensatoren usw. eingesetzt. Grundsätzlich wird Mineralöl aus Erdöl hergestellt und basiert auf der Zusammensetzung von verschiedenen Kohlenstoffverbindungen. Hergestellt wird es z. B. über Raffination oder Hydrierung. Die Grundbestandteile von Mineralöl sind Alkane (früher: Paraffine), Zylo-Alkane (Naphtene), Alkene (Olefine) und Aromate. Die nachfolgende Abbildung zeigt einige einfache Beispiele für die unterschiedlichen Grundbestandteile, welche sich

hauptsächlich in ihrer chemischen Anordnung unterscheiden [1, S.319] [8, S.39] [61, S.630]. Weiterführende Erklärungen können beispielsweise in [61] ab Seite 630, in [62] ab Seite 186 oder in [63] ab Seite 78 nachgelesen werden.



**Abbildung 4.2-4: Anordnung der verschiedenen Grundbestandteile von Mineralöl (adaptiert aus [61, S.630ff] [62, S.186ff])**

In Tabelle 4.2-2 werden die physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften des Mineralöls Nytro 4000X aufgelistet. Dieses Mineralöl ist durch einen sehr guten Wärmetransport, geringe Viskosität, lange Alterungsbeständigkeit, sehr gute Eigenschaften bei niedrigen Temperaturen und sehr gute elektrische Eigenschaften gekennzeichnet [9].

**Tabelle 4.2-2: Eigenschaften des Mineralöls Nytro 4000X von der Firma Nynas AB (adaptiert aus [9])**

Eigenschaft	Einheit	Norm	Garantierte Werte		Typische Werte
			MIN	MAX	
<b>Physikalisch</b>					
Aussehen		IEC 60296	Sauber, frei von Ablagerungen		erfüllt
Dichte, 20°C	kg/dm <sup>3</sup>	ISO 12185		0,895	0,872
Viskosität, 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104		12,0	9,2
Viskosität, -30°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104		18000	850
Fließpunkt	°C	ISO 3016		-40	-60
<b>Chemisch</b>					
Säurezahl	mg KOH/g	IEC 62021		0,01	< 0,01
Korrosiver Schwefel		DIN 51353	nicht korrosiv		nicht korrosiv
Korrosiver Schwefel		ASTM D 1275 B	nicht korrosiv		nicht korrosiv
Korrosiver Schwefel		IEC 62535	nicht korrosiv		nicht korrosiv
Schwefelgehalt	%	ISO 14596		0,15	0,01
Aromatengehalt	%	IEC 60590			4
Antioxidans, Phenole	Wt %	IEC 60666	0,08	0,40	0,38
Wassergehalt	mg/kg	IEC 60814		30	< 20
Furfurale-Gehalt	mg/kg	IEC 61198		0,1	< 0,1
<b>Elektrisch</b>					
Verlustfaktor, 90°C		IEC 60247		0,005	< 0,001
Grenzflächenspannung	mN/m	ISO 6295	40		52
Durchschlagsspannung					
vor Behandlung	kV	IEC 60156	30		40 – 60
nach Behandlung	kV		70		> 70
<b>Stabilität gegen Oxidation</b>					
Bei 120°C, 500 h		IEC 61125 C			
Gesamter Säuregehalt	mg KOH/g			0,30	< 0,01
Ölrückstände (Schlamm)	Wt %			0,05	< 0,01
Verlustfaktor/90°C				0,050	< 0,010

Wichtig bei der Nutzung von Mineralöl in Transformatoren ist unter anderem eine gute Alterungsbeständigkeit. Eine Alterung des Öls wird besonders durch verschiedenste Oxidationsmechanismen hervorgerufen, die durch Sauerstoff und Wärme verursacht werden [1, S.320]. Weitere Erläuterungen bezüglich der thermischen Alterung eines Mineralöls, sowie genauere Betrachtungen der wesentlichsten Alterungsprodukte können in [7] ab Seite 145 nachgelesen werden. Darin werden vor allem die Alterungsprodukte Wasser, Säuren, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, sowie feste Bestandteile, wie z. B. Schlamm, näher untersucht.

#### **4.2.4 Ölimprägniertes Transformerboard**

Wie schon im Kapitel 4.2.2 erwähnt, ist eine kombinierte Anwendung von einer Isolierflüssigkeit und einem Feststoff sehr wichtig, da die Eigenschaften der beiden Materialien verknüpft werden. In der Regel kommen Pressspan, sowie Isolieröl zur Anwendung. Diese Kombination wird als ölimprägniertes Papier (OIP) bzw. imprägnierter Pressspan bezeichnet. Beim Versuchsaufbau im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde Transformerboard TIV der Firma Weidmann AG und das Mineralöl Nytro 4000X der Firma Nynas AB verwendet.

Sehr wichtig für die Eigenschaften des verwendeten ölimprägnierten Transformerboards sind nicht nur die Ausgangsmaterialien, sondern auch der Ablauf des Trocknungs- und des Imprägnierprozesses. Wesentliche Faktoren bei der Trocknung bzw. Imprägnierung sind die Zeit und die Temperatur, sowie die geometrischen Abmessungen des Boards. Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen die Trocknungszeit, sowie die Imprägnierdauer für ein exemplarisches Transformerboard bei Vakuum mit 1,33 mbar [6, S.38ff].

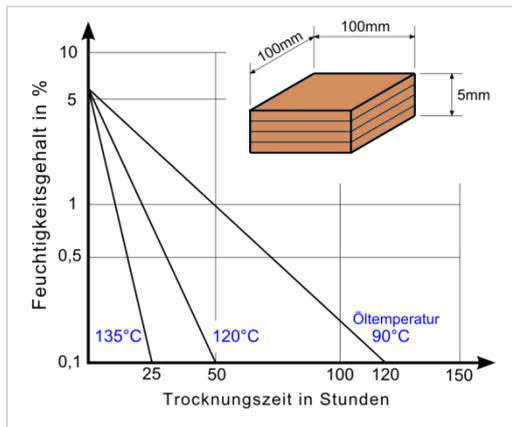


Abbildung 4.2-5: Trocknungszeit für ein Board (nach [6, S.38])

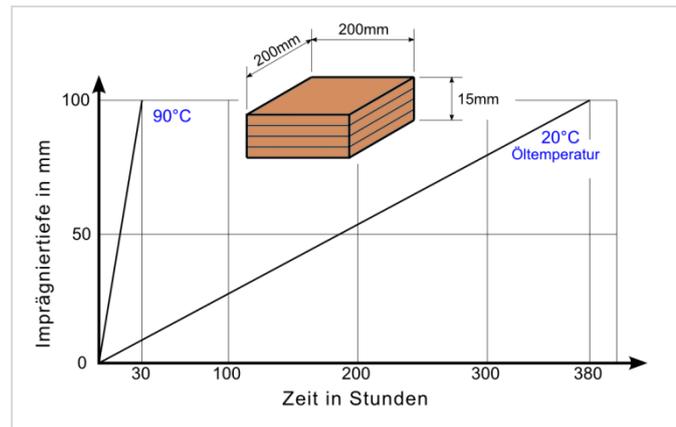


Abbildung 4.2-6: Imprägnierungszeit für ein Board (nach [6, S.40])

Im Vergleich zum Transformerboard ist die Trocknung von Transformatorölen wesentlich einfacher, da diese weniger hygroskopisch sind. Das bedeutet, dass das Isolieröl beispielsweise weniger Feuchtigkeit von der Umgebung aufnimmt bzw. diese leichter an die Umgebung abgibt. Als Richtwert kann eine Wassergehaltsmenge im nicht vorbehandelten Isolieröl von rund 50 bis 100 Gramm pro Tonne angenommen werden, wobei etliche Faktoren, wie z. B. die Temperatur, die Lagerung, der Transport, die Type usw., einfließen. Mit Hilfe einer entsprechenden Vorbehandlung, wie z. B. der Trocknung, kann der Wassergehalt im Isolieröl auf rund 1 Gramm pro Tonne reduziert werden [6, S.39].

Die Dielektrizitätszahl, beispielsweise von imprägniertem Transformerboard TIV, hängt nicht nur von der Dichte des zu imprägnierenden Materials, sondern auch vom Imprägniermittel ab. In der nachfolgenden Abbildung wird ein solcher Zusammenhang dargestellt [1, S.330].

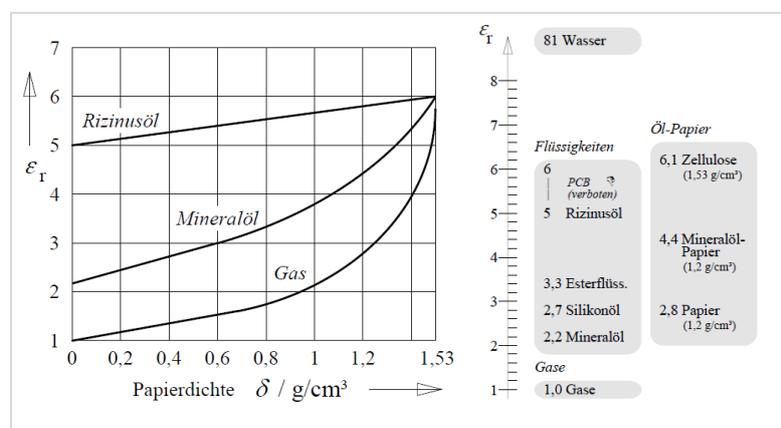
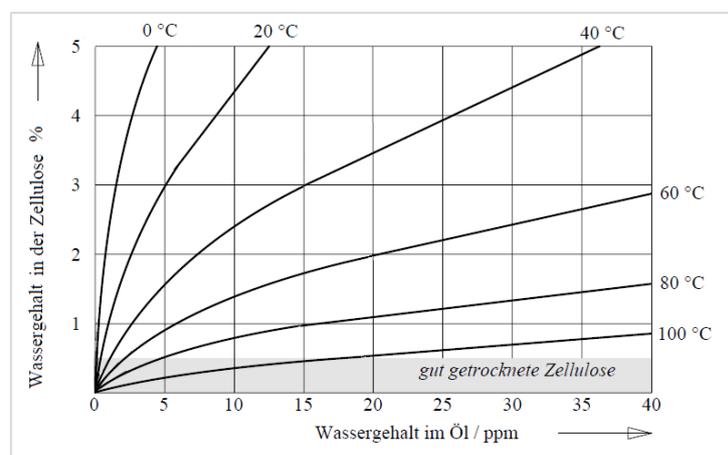


Abbildung 4.2-7: Dielektrizitätszahl von verschiedenen Materialien [1, S.264,330]

Einer der wichtigsten Parameter beim Einsatz von ölprägniertem Papier ist der Wassergehalt, sowohl in der Zellulose als auch im Isolieröl. Die nachfolgende Abbildung zeigt mögliche Zusammenhänge zwischen dem Wassergehalt in einem Mineralöl und in einer Zellulose im Gleichgewicht für verschiedene Temperaturen. Allerdings gibt es unterschiedliche Verläufe für die Gleichgewichtskurven, wie z. B. von Oommen, Griffin, Fabre-Pichon oder EHV-Weidmann [64]. Die anderen Kurvenverläufe, sowie eine Beschreibung, wie z. B. Oommen die Gleichgewichtskurven ermittelte, können beispielsweise aus [65] ab Seite 11 entnommen werden. Grundsätzliche Vorgehensweisen zur Erstellung von Gleichgewichtskurven auf Basis von thermodynamischen Prozessen können in [66] nachgelesen werden.



**Abbildung 4.2-8: Gleichgewichtskurven für den Wassergehalt zwischen einem Mineralöl und einer Zellulose, von Oommen (nach [1, S.333])**

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung des Wassergehaltes von z. B. Feststoffen ist die Verwendung von mathematischen Modellen. Allerdings gibt es auch hier, wie auch bei den Gleichgewichtskurven, mehrere unterschiedliche Vorgehensweisen bzw. Modelle. So gibt es unter anderem Ansätze von ABB, Serena, Myers oder Shkolnik, welche beispielsweise in [64] oder [90] angeführt werden. Die nachfolgende Gleichung gibt den analytischen Zusammenhang nach Myers an. Mit Hilfe dieser Gleichungen ist es möglich, bei zwei bekannten Größen die dritte unbekannt Größe auszurechnen [26, S.13] [64] [90, S.276]. So kann beispielweise mit der bekannten Temperatur und dem gemessenen Wassergehalt im Öl der Wassergehalt in der Zellulose berechnet werden (Gleichung 4.2-2).

$$T = 31,52 - 26,605 * \ln(\% \text{ Papier}) + 17,524 * \ln(\text{ppm } \ddot{O}l) \quad 4.2-1$$

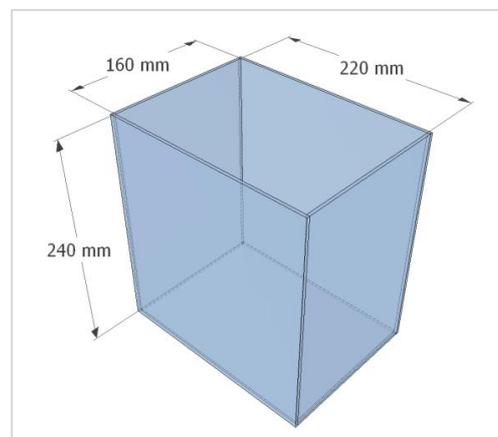
$$\text{umgeformt nach: } (\% \text{ Papier}) = 3,270 * (\text{ppm } \ddot{O}l)^{0,659} * 0,963^T \quad 4.2-2$$

*T* ... Temperatur der gezogenen Ölprobe [°C]  
*% Papier*... Wassergehalt im Isolierpapier [%]  
*ppm Öl*... Wassergehalt im Isolieröl [ppm]

Anzumerken ist, dass eine Bestimmung des Wassergehaltes vom Board bzw. Öl mit Hilfe der Gleichgewichtskurven bzw. der mathematischen Beziehung nur bei genügend verstrichener Zeit, genau genommen im Gleichgewichtszustand, bei einer konstanten Temperatur möglich ist. Der Grund für die lange Wartezeit ist die relativ lange Diffusionszeit der Wassermoleküle, da diese abhängig von den verwendeten Materialien und den geometrischen Abmessungen ist. Somit benötigt man eine entsprechende Zeit, damit sich ein Gleichgewicht einstellen kann [1, S.511,435].

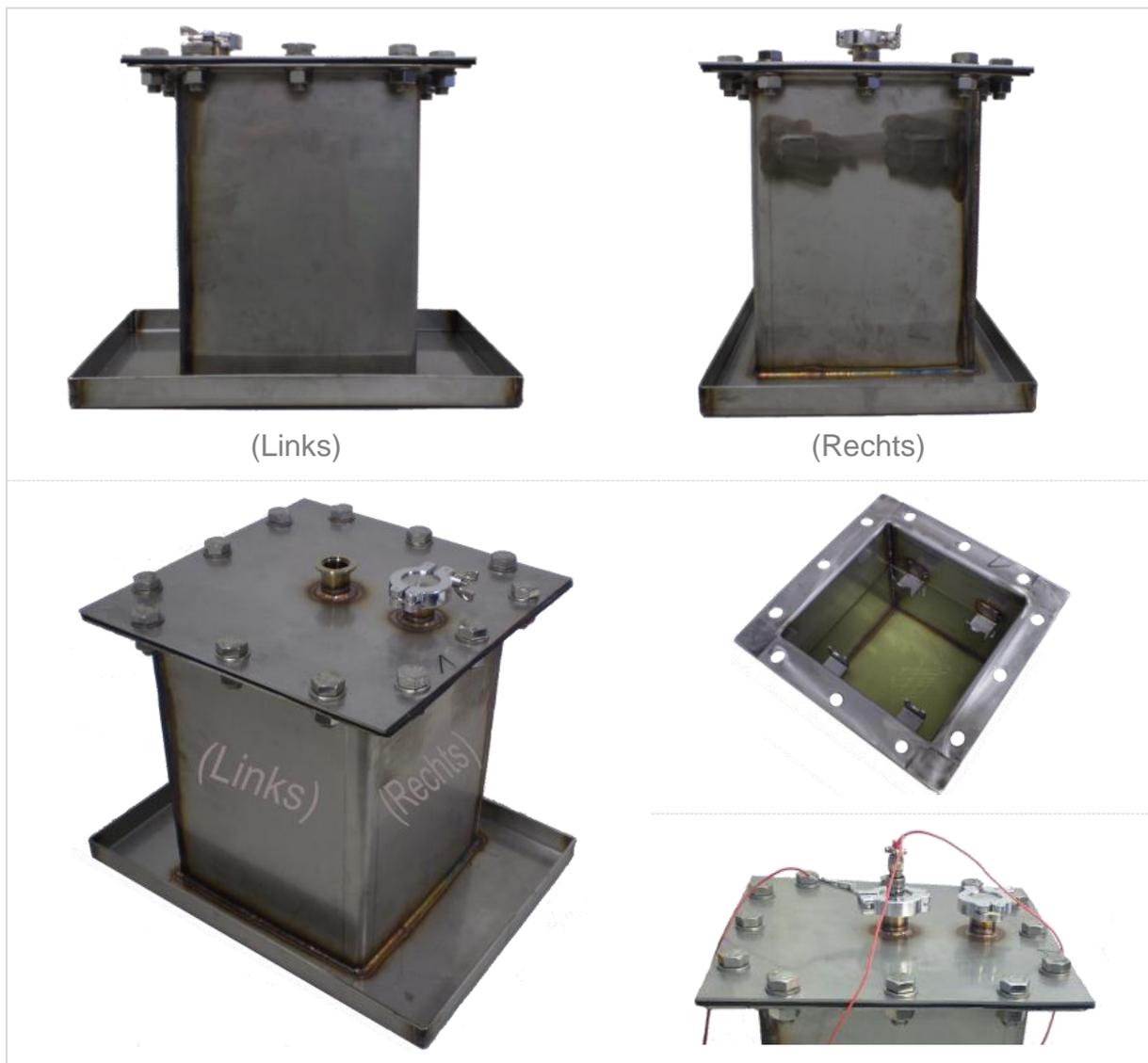
### 4.3 Prüfgefäß

Wie schon beim Prüfling wurden auch beim Prüfgefäß zwei Varianten entworfen. Das erste Prüfgefäß bestand aus Glas und war für eine längere Messdauer nicht brauchbar, da es keinen Deckel hatte und somit ein Feuchteaustausch zwischen Prüfling und Umgebung stattfinden konnte. Beide Gefäße wurden entsprechend eigenen Überlegungen von externen Firmen hergestellt. In der nachfolgenden Abbildung wird das erste Prüfgefäß dargestellt. Photos wie das erste Prüfgefäß (inkl. des ersten Prüflings) in der Realität aussieht, werden z. B. in Abbildung 6.1-4 auf Seite 103 gezeigt.



**Abbildung 4.3-1: Skizze des ersten Prüfgefäßes aus Floatglas (inkl. Innenabmessungen) [eigene Darstellung]**

Um nun über eine längere Zeitspanne mit annähernd konstanten Bedingungen messen zu können wurde ein Prüfgefäß entworfen, welches nicht nur luftdicht ist, sondern auch mögliche Störeinflüsse minimiert bzw. abschirmt. Als Material für das zweite Prüfgefäß kam daher Edelstahl X5CrNi18-10 zur Anwendung. Das zweite Prüfgefäß wird auf den nachfolgenden Photos dargestellt.



**Abbildung 4.3-2: Diverse Photos des zweiten Prüfgefäßes [eigene Photos]**

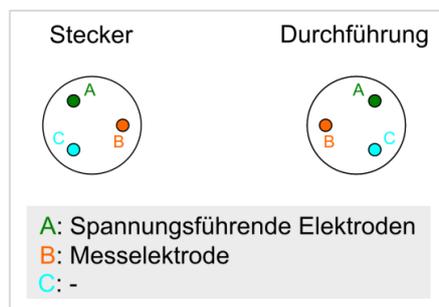
Genauere Angaben über die Abmessungen des zweiten Prüfgefäßes, sowie Konstruktionsskizzen können aus dem Anhang ab Seite 161 unter D.1 entnommen werden. Bezüglich den Abmessungen in den Skizzen kam es beim realen Gefäß zu einigen Abweichungen, da dadurch Kosten gespart werden konnten. So wurden z. B.

alle vier Seitenteile gleich groß gefertigt oder die Bohrdurchmesser im Deckel vergrößert.

In Abbildung 4.3-3 wird der Stecker und die Durchführung für das zweite Prüfgefäß dargestellt. Der Stecker trägt die Bezeichnung „AERO J MS3476L8-339-0915“. Für die Leitungen (spannungsführende Leitung und Messleitung) kam eine Silikon-Schaltlitze mit einem Innenleiterdurchmesser von 0,5 mm<sup>2</sup> aus Kupfer zum Einsatz, welche unter [85] näher beschrieben wird. Die Silikon-Schaltlitze wurde dazu verwendet, um die Elektroden mit den Kontaktstiften der Durchführung im Inneren des Prüfgefäßes zu verbinden. Außerdem wurde die Silikon-Schaltlitze mit den Kontakten des Steckers verbunden, da dieser nur einen maximalen Kabeldurchmesser von 0,5 mm<sup>2</sup> erlaubte. Die anderen Enden der beiden Silikon-Schaltlitzen wurden mit schutzisolierten und berührungssicheren Bananensteckern ausgeführt, an denen die Messgeräte angeschlossen wurden. Wichtig bei der Kontaktierung der Durchführung und des Steckers ist, dass man die entsprechenden Silikon-Schaltlitzen an die gleichen Kontaktbezeichnungen anschließt (siehe Abbildung 4.3-4).



**Abbildung 4.3-3: Photos des Steckers und der Durchführung (inkl. Dichtungsring und abgeschnittenen Silikon-Schaltlitzen) für das zweite Prüfgefäß [eigene Photos]**



**Abbildung 4.3-4: Anschlüsse und deren Belegung für den Stecker und für die Durchführung im Deckel (zweites Prüfgefäß) [eigene Darstellung]**

## 4.4 Verwendete Materialien und deren Eigenschaften (Prüfgefäß)

Wie bereits erwähnt, bestand das erste Prüfgefäß aus Glas. Aufgrund der messtechnischen Eigenschaften, sowie mit der Absicht über eine längere Zeit annähernd konstante Bedingungen zu haben, wurde für das zweite Prüfgefäß als Material Edelstahl ausgewählt. In den nachfolgenden Abschnitten wird näher auf den Aufbau der Werkstoffe, sowie deren Eigenschaften eingegangen.

### 4.4.1 Glas

Glas gehört allgemein zu den künstlichen anorganischen Stoffen und ist ein nichtmetallischer Werkstoff. Eine Abgrenzung zu den metallischen Werkstoffen erfolgt anhand der chemischen Bindung, da sie keine metallischen Bindungen besitzen und die äußere Elektronenschale bis zur Gänze gefüllt ist. In der Regel wird amorphe Keramik als Glas bezeichnet. Amorph heißt, dass die Struktur nicht geordnet ist. Prinzipiell können allerdings auch Metalle in amorpher Struktur vorliegen, umgangssprachlich werden diese als metallische Gläser bezeichnet. Am häufigsten werden silikatische-oxidische Werkstoffe, welche vorwiegend aus Sand oder Quarz bestehen, aber auch Kalkstein, Dolomit, Feldspat, Soda und Pottasche verwendet [11, S.16ff] [12, S.337].

Zur Beeinflussung der unterschiedlichen Eigenschaften, wie z. B. optische, elektrische, mechanische und korrosionschemische Eigenschaften, werden noch zusätzliche oder andere Oxide verwendet. Die nachstehende Tabelle zeigt einen kleinen Überblick über typische Glaszusammensetzungen [12, S.337].

**Tabelle 4.4-1: Typische Glaszusammensetzungen  
in Gewichtsprozent (adaptiert aus [12, S.337])**

Glastyp	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	CaO/MgO	Sonstiges	
Fensterglas	72	15	12	1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Glas für Laborgeräte	80	5	2	10 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Optisches Glas	28	2	-	70 PbO	
Grünes Flaschenglas	65	12	14	6 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1 MnO	1 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Im Wesentlichen kann zwischen Hohlglas und Flachglas unterschieden werden. Beim ersten Prüfgefäß kam das sogenannte Flachglas (Floatglas), früher als

Fensterglas oder Spiegelglas bezeichnet, zum Einsatz, da es hinsichtlich unserer Abmessungen und Anforderungen langzeitstabiler ist, wie uns die Herstellerfirma versicherte [12] [13]. Nähere Beschreibungen zu den einzelnen Herstellungsverfahren der Glasarten können in [12] ab Seite 337, in [13] ab Seite 702 und in [14] ab Seite 184 nachgelesen werden.

In der nachfolgenden Tabelle werden einige Eigenschaften von normal gekühltem Flachglas angeführt. Diese Werte sind allerdings nur Richtangaben, da die Kennwerte stark von der genauen Zusammensetzung des Glases abhängig sind [13, S.703].

**Tabelle 4.4-2: Eigenschaften von Flachglas (adaptiert aus [13, S.703])**

Eigenschaft	Maßzahl	Einheit
Dichte, bei 18°C	2,5	g/cm <sup>3</sup>
Härte	6	
Elastizitätsmodul	$7 \cdot 10^4$	N/m <sup>2</sup>
Spezifische Wärmekapazität	$0,72 \cdot 10^3$	J/kg K
Wärmeausdehnungskoeffizient (20-300°C)	$9 \cdot 10^{-6}$	1/K
Wärmeleitfähigkeit	1	W/mK

Bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit von Glas kann man sagen, dass die im Glas enthaltenen Alkaliionen für den hauptsächlichen Ladungsträgertransport verantwortlich sind. Fehlen allerdings Alkaliionen, so können auch die Erdalkaliionen als freie Ladungsträger dienen. Die größte Beweglichkeit der Ionen besitzt der Glasbestandteil Natriumoxid (Na<sub>2</sub>O). Durch Hinzugabe von Zusatzstoffen wie Blei (Pb<sup>2+</sup>) oder Barium (Ba<sup>2+</sup>) kann die Beweglichkeit der Natrium-Ionen verringert werden. Neben der Beigabe von Zusatzstoffen kann auch durch das Herstellungsverfahren die elektrische Leitfähigkeit beeinflusst werden. So kann man beispielsweise durch eine sorgfältige Entgasung den spezifischen Widerstand des Glases um den Faktor 2,5 oder durch den Abkühlungsprozess um den Faktor 3 erhöhen. Durch diese verfahrenstechnische Beeinflussung ist ersichtlich, dass allgemein gültige Kennwerte für die elektrische Leitfähigkeit eines Glases nicht angegeben werden können und man daher Messungen am jeweiligen Objekt durchführen muss [15, S.49].

#### 4.4.2 Edelstahl

Als Stahl werden Materialien bezeichnet, welche einen Kohlenstoffgehalt von weniger als zwei Prozent besitzen, für eine Warmumformung geeignet sind und bei denen es sich um sogenannte Knetlegierungen handelt. Bei einem Kohlenstoffgehalt von mehr als zwei Prozent wird von Gusseisen gesprochen. Grundsätzlich wird in Grundstähle, Qualitätsstähle und Edelstähle unterschieden. Diese Unterteilung wird durch den Grad der Verunreinigung und den Gehalt an Legierungselementen bestimmt. Stahl ist weltweit eine der wichtigsten Werkstoffgruppen, wobei es mehrere tausend verschiedene Ausführungsformen gibt [12, S.431,432].

Neben teilweise günstigen Preisen für Massentähle zeichnet sich Stahl besonders durch eine hohe Steifigkeit, hohe Verformbarkeit, sehr gute Schweißbarkeit und sehr gute Härbarkeit aus. Ein Nachteil von Stahl ist die relativ hohe Dichte von ungefähr  $7,8 \text{ g/cm}^3$  und das damit verbundene Gewicht. Abbildung 4.4-1 zeigt einen Überblick über die Dichte von unterschiedlichen Werkstoffgruppen, wobei das Elastizitätsmodul einen Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers darstellt [12, S.431,432].

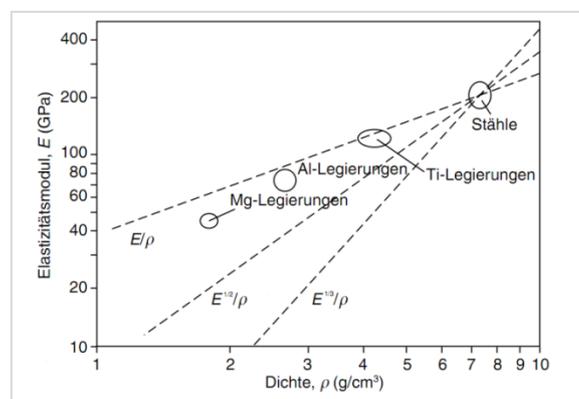


Abbildung 4.4-1: Vergleich der Dichte von unterschiedlichen Werkstoffgruppen [12, S.433]

Für das zweite Prüfgefäß kam, wie schon beschrieben, Edelstahl X5CrNi18-10 zur Anwendung. Edelstahl gehört allgemein zur Gruppe der Stähle, welche zur Wärmebehandlung bestimmt sind und über eine besondere Reinheit verfügen [12, S.443]. Das Datenblatt des verwendeten Edelstahls kann beispielsweise unter [81] eingesehen werden.

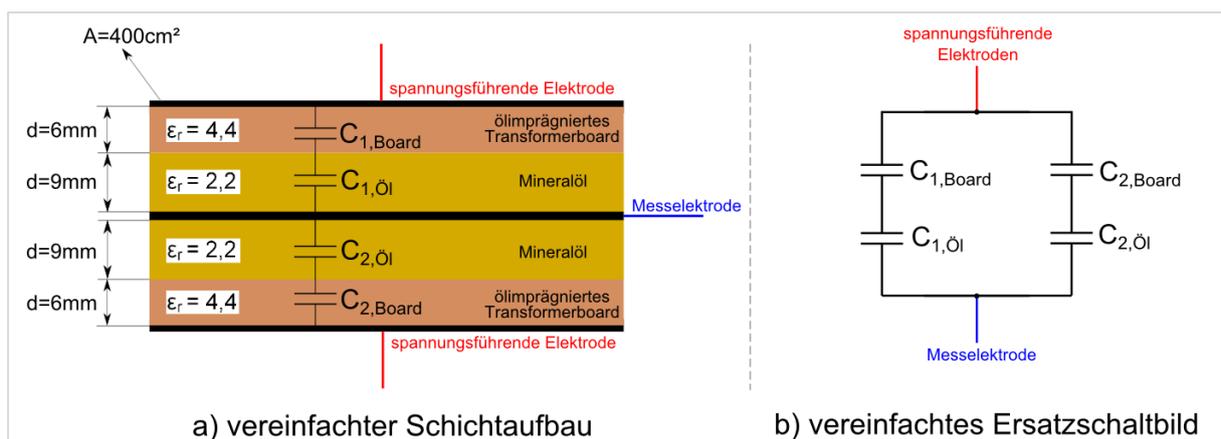
In der nachfolgenden Tabelle wird ein Überblick über die elektrische Leitfähigkeit verschiedener Werkstoffgruppen gegeben. Man sieht sehr gut, dass Edelstahl im Vergleich zu Kupfer oder Aluminium eine eher schlechte elektrische Leitfähigkeit, allerdings, im Vergleich zu Materialien die nicht leitend sind, eine gute Leitfähigkeit besitzt. Bezüglich der Wärmeleitfähigkeit soll hier angemerkt werden, dass diese proportional zur elektrischen Leitfähigkeit ist [13, S.1003ff].

**Tabelle 4.4-3: Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit von verschiedenen Werkstoffen (adaptiert aus [13, S.1003])**

Werkstoff	$\kappa$ in MS/m	Werkstoff	$\kappa$ in MS/m
Kupfer	58	Edelstahl	1,36
Aluminium	37,7	Halbleiter (Si, Ge)	0,200
Magnesium	22,2	Leitungswasser	0,05
Titan	2,1	Nichtleiter	$< 10^2$

#### 4.5 Kapazität der Anordnung (analytische Berechnung)

Um die ermittelten Ergebnisse für die Anordnungskapazität aus den Messungen (siehe Kapitel 6) vergleichen zu können, wird diese in diesem Abschnitt analytisch bestimmt. Allgemeine Erklärungen zu einer Kapazität können im Kapitel 3.1.2 nachgelesen werden. In der nachfolgenden Abbildung wird die Versuchsanordnung, welche der Versuchsanordnung 3 entspricht, in vereinfachter Form als Plattenkondensator mit einem Zweistoffdielektrikum aus Öl und Pressspan dargestellt.



**Abbildung 4.5-1: Schematischer Aufbau des Isolationsmodells (quer geschichtetes Öl/Pressspan Dielektrikum) zur Berechnung der Kapazität [eigene Darstellung]**

Die nachfolgenden Berechnungen für die gesamte Anordnungskapazität beziehen sich auf die Erläuterungen in [1] ab Seite 84.

$$C_{1,Board} = C_{2,Board} = \epsilon_r * \epsilon_0 * \frac{A}{d} = 4,4 * 8,854 * 10^{-12} \frac{As}{Vm} * \frac{0,04 m^2}{0,009 m} \cong 260 pF \quad 4.5-1$$

$$C_{1,öl} = C_{2,öl} = \epsilon_r * \epsilon_0 * \frac{A}{d} = 2,2 * 8,854 * 10^{-12} \frac{As}{Vm} * \frac{0,04 m^2}{0,006 m} \cong 86 pF \quad 4.5-2$$

$$C_{gesamt} = \left( \frac{C_{1,Board} * C_{1,öl}}{C_{1,Board} + C_{1,öl}} \right) + \left( \frac{C_{2,Board} * C_{2,öl}}{C_{2,Board} + C_{2,öl}} \right) \cong 2 * 64 pF = 128 pF \quad 4.5-3$$

$C_{1,Index}$ ... Teilkapazität [F]	$C_{gesamt}$ ... gesamte Anordnungskapazität [F]
$A$ ... Fläche der Elektrode [m <sup>2</sup> ]	$\epsilon_0$ ... elektrische Feldkonstante [As/Vm]
$d$ ... Schichtdicke des Dielektrikums [m]	$\epsilon_r$ ... relative Dielektrizitätszahl [1]

In Tabelle 4.5-1 werden Ergebnisse für die relative Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  und die Anordnungskapazität  $C_{gesamt}$  angegeben. Die Berechnung für  $C_{gesamt}$  beruht auf den gerade angeführten Gleichungen 4.5-1 bis 4.5-3. Die angenommenen Werte für die jeweilige relative Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  dienen als Orientierungswerte und werden z. B. in Abbildung 4.2-7 auf Seite 69 für ein ölprägniertes Papier mit  $\epsilon_{r,Board}=4,4$  und für ein Mineralöl mit  $\epsilon_{r,öl}=2,2$  angegeben. Eine nähere Erläuterung, sowie eine Möglichkeit zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätszahl für das gesamte, quer geschichtete Dielektrikum kann beispielsweise in [1] ab Seite 263 nachgelesen werden. Die gemessenen Werte für die Anordnungskapazität  $C_{gesamt}$  basieren auf den gemittelten und gerundeten Messergebnissen aus Tabelle 6.2-2 auf Seite 112 und Tabelle 6.2-4 auf Seite 116.

**Tabelle 4.5-1: Angenommene, gemessene und berechnete Werte für die relative Dielektrizitätszahl und Anordnungskapazität  $C_{gesamt}$**

Nr.	angenommen (aus der Literatur)		gemessen		berechnet	
	$\epsilon_{r,öl}$	$\epsilon_{r,Board}$	DIRANA (FDS, 20°C)	ALFF (PDC, 20°C)	$\epsilon_{r,gesamt}$	$C_{gesamt}$
	1	1	$C_{gesamt}$ pF	$C_{gesamt}$ pF	1	pF
1	2,2	4,4				128
2			156		3,3	
3				139	3,0	

Die Gründe für die Abweichung zwischen dem gemessenen und berechneten Wert der Anordnungskapazität  $C_{gesamt}$  sind unter anderem die Einflüsse der abgerundeten Ränder, sowie die größeren spannungsführenden Elektroden im Vergleich zur Messelektrode. Weitere Einflüsse sind auf die „Lichteneckersche Mischungsregel“ zurückzuführen, welche in [1] auf Seite 266 angeführt wird. Außerdem wird in [67] auf die Problematiken bei der Modellierung von Isolationssystemen, wie z. B. die elektrische Feldstärke, den Wassergehalt oder die Temperatur, näher eingegangen.

## 5 Messungen

In diesem Abschnitt werden die Messvorbereitung, der Prüf- bzw. Probenentnahmeplan, sowie die einzelne Messmethoden und deren mögliche Fehlerquellen näher erläutert. Zu den angeführten Messmethoden gehören die Frequenzbereichsspektroskopie (FDS), die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC) und die Karl-Fischer-Titration (KFT), sowohl für flüssige Proben als auch für Feststoffproben.

### 5.1 Messvorbereitung

Bevor die eigentlichen Messungen durchgeführt werden können, muss die Versuchsanordnung unter anderem zuerst getrocknet und dann mit dem Isolieröl imprägniert werden. Bei den Versuchsanordnungen wurden ungefähr sieben Tage für die Messvorbereitung benötigt. Nachfolgend wird der prinzipielle Ablaufplan, inklusive einiger Erklärungen, abgebildet.

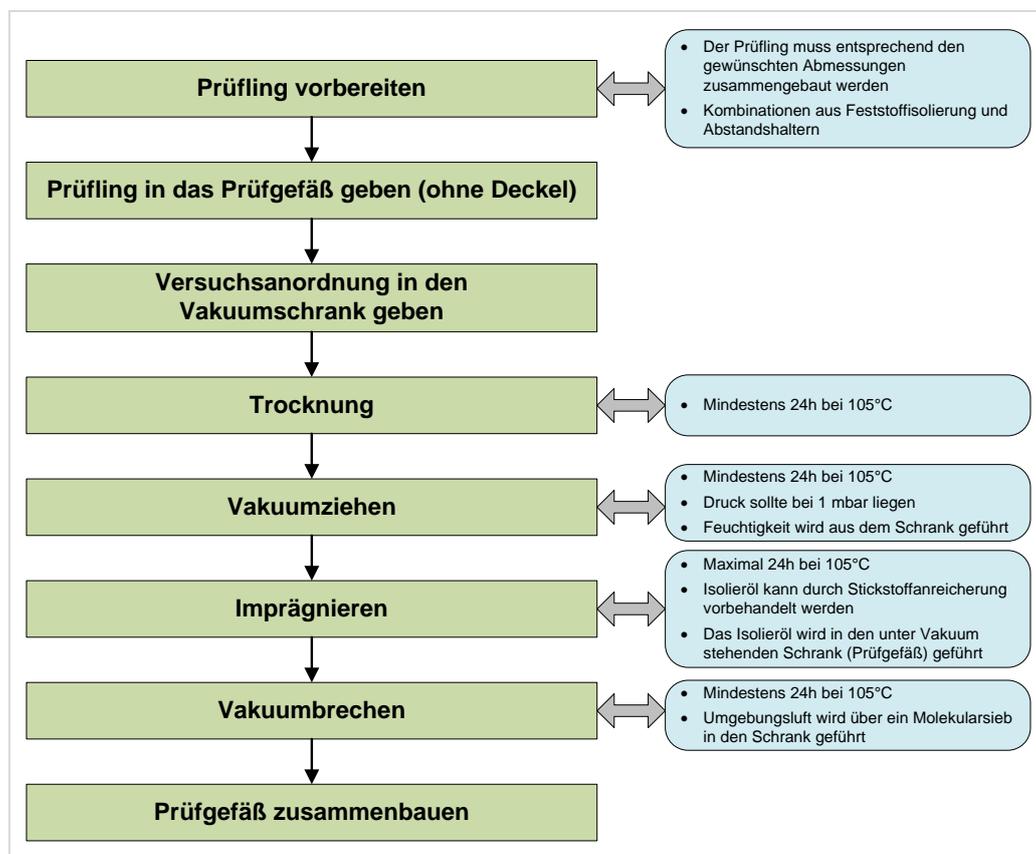


Abbildung 5.1-1: Ablaufplan für die Messvorbereitung [eigene Darstellung]

Nähere Informationen bezüglich der Trocknung und Imprägnierung von Transformerboard können beispielsweise in [6] ab Seite 32 nachgelesen werden. Genauere Beschreibungen über die jeweiligen Versuchsanordnungen, sowie die genauen Zeitdauern für die einzelnen Vorgänge (Trocknung bis Prüfgefäß zusammengebaut) werden im Kapitel 6 gegeben.

In der nachfolgenden Abbildung wird der verwendete Vakuumschrank abgebildet. Außerdem sind noch unterschiedliche Anzeigen, das Bedienfeld für den Schrank und die manuellen Ventilregler für die Vakuumpumpe und das Öleinlasssystem dargestellt.

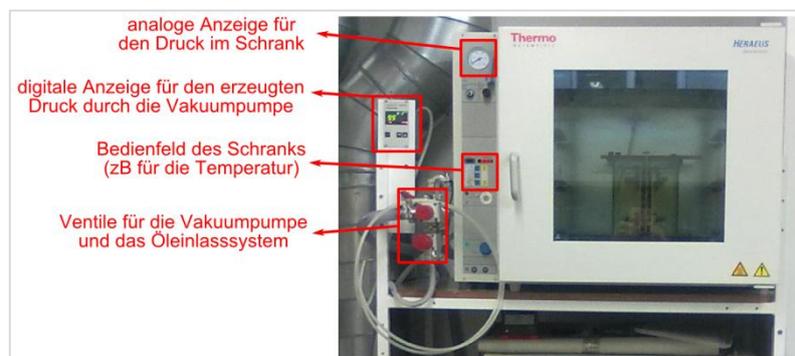


Abbildung 5.1-2: Photo vom Vakuumschrank (inkl. Prüfaufbau: Versuchsanordnung 1)  
[eigenes Photo]

## 5.2 Prüfplan/Probenentnahmeplan

Der Prüf- bzw. Probenentnahmeplan erstreckt sich über die ganze Versuchsprozedur. So erfolgt die erste Messung, welche die Bestimmung des Wassergehaltes vom Mineralöl ist, vor der Imprägnierung im Vakuumschrank. In Abbildung 5.2-1 wird dieser Prüfplan dargestellt, wobei auch der Ablaufplan der Messvorbereitung abgebildet ist. Die angeführten Messungsmethoden bei den drei unterschiedlichen Messtemperaturen können in der Praxis abweichen und sind, ohne eine bestimmte Wertigkeiten zu nennen, aufgelistet. Allerdings sollte man das Prüfgefäß für die Entnahme der Proben für die Karl-Fischer-Titration so kurz wie möglich öffnen, damit so wenig Umgebungsfeuchtigkeit wie nur möglich oder etwa Verunreinigungen in das Gefäß gelangen können. Im Anhang unter A.1 ab Seite 161 befindet sich das selbst entworfene Messdatenblatt, indem alle wichtigen Messergebnisse, sowie Einzelheiten von der Messvorbereitung eingetragen werden können.

Um die Versuchsanordnungen auf die entsprechende Messtemperatur von 20°C, 50°C und 90°C zu bekommen, wurde der Aufbau in einen Wärmeschrank (Heraeus T 6120) gegeben. Der verwendete Wärmeschrank hat die Möglichkeit mit Hilfe einer Durchführung die Messkabel in das Innere des Wärmeschanks zu führen.

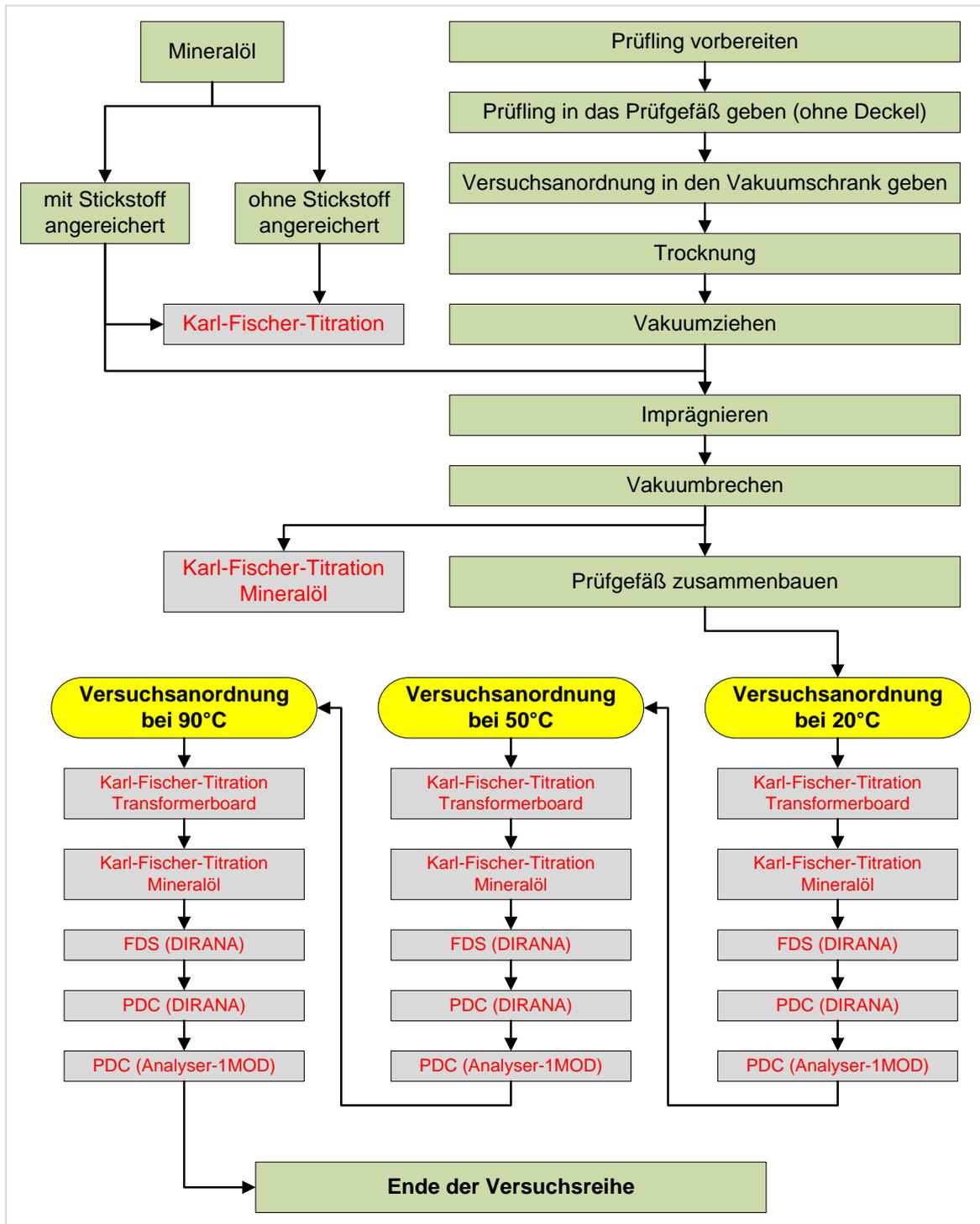


Abbildung 5.2-1: Prüfplan/Probenentnahmeplan [eigene Darstellung]

### 5.3 Messablauf

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Messmethoden mit Hilfe von Ablaufplänen und schematischen Aufbauplänen erläutert. Weiters werden noch die benötigten Geräte für die einzelnen Methoden, sowie die Einstellungen für die unterschiedlichen Messgeräte angeführt.

#### 5.3.1 Frequenzbereichsspektroskopie

Für die Frequenzbereichsspektroskopie wurde das Messgerät DIRANA der Firma Omicron electronics GmbH verwendet, welches nachfolgend abgebildet ist.



Abbildung 5.3-1: Messgerät DIRANA [83]

In Abbildung 5.3-2 wird der prinzipielle Messaufbau für die Frequenzbereichsspektroskopie dargestellt. Dabei wird der Output-Kanal an den spannungsführenden Elektroden und der Kanal 1 (Ch1) an der Messelektrode angeschlossen. Die zusätzliche Schirmung bei den Kabeln wird mit Hilfe eines Metallschlauchs, indem die Leitungen geführt werden, realisiert. Etwaige Steckverbindungen wurden in Metallboxen, welche mit der Schirmung verbunden wurden, untergebracht.

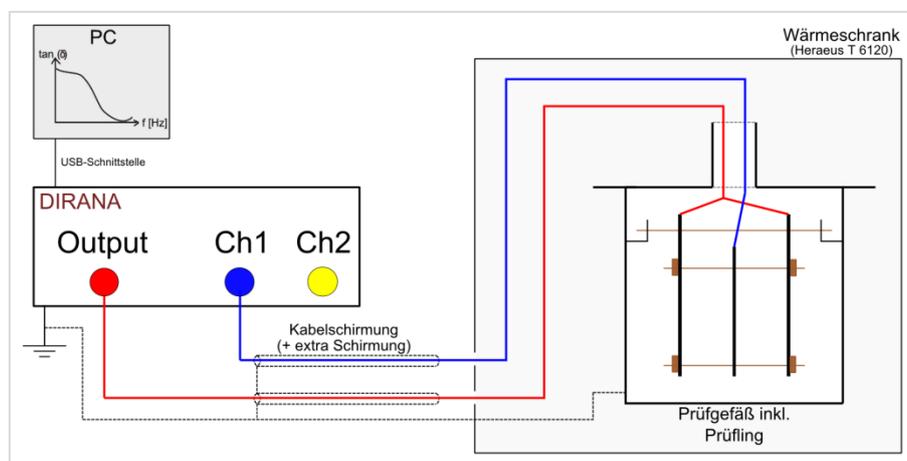


Abbildung 5.3-2: Schematischer Messaufbau für die FDS-Messung [eigene Darstellung]

In der nachfolgenden Abbildung ist der Ablaufplan inklusive einiger Anmerkungen für die FDS-Messung dargestellt. Die Bezeichnungen (A) bis (E) bei den Bemerkungen unter „Messparameter auswählen“ werden in Abbildung 5.3-5 näher angeführt.

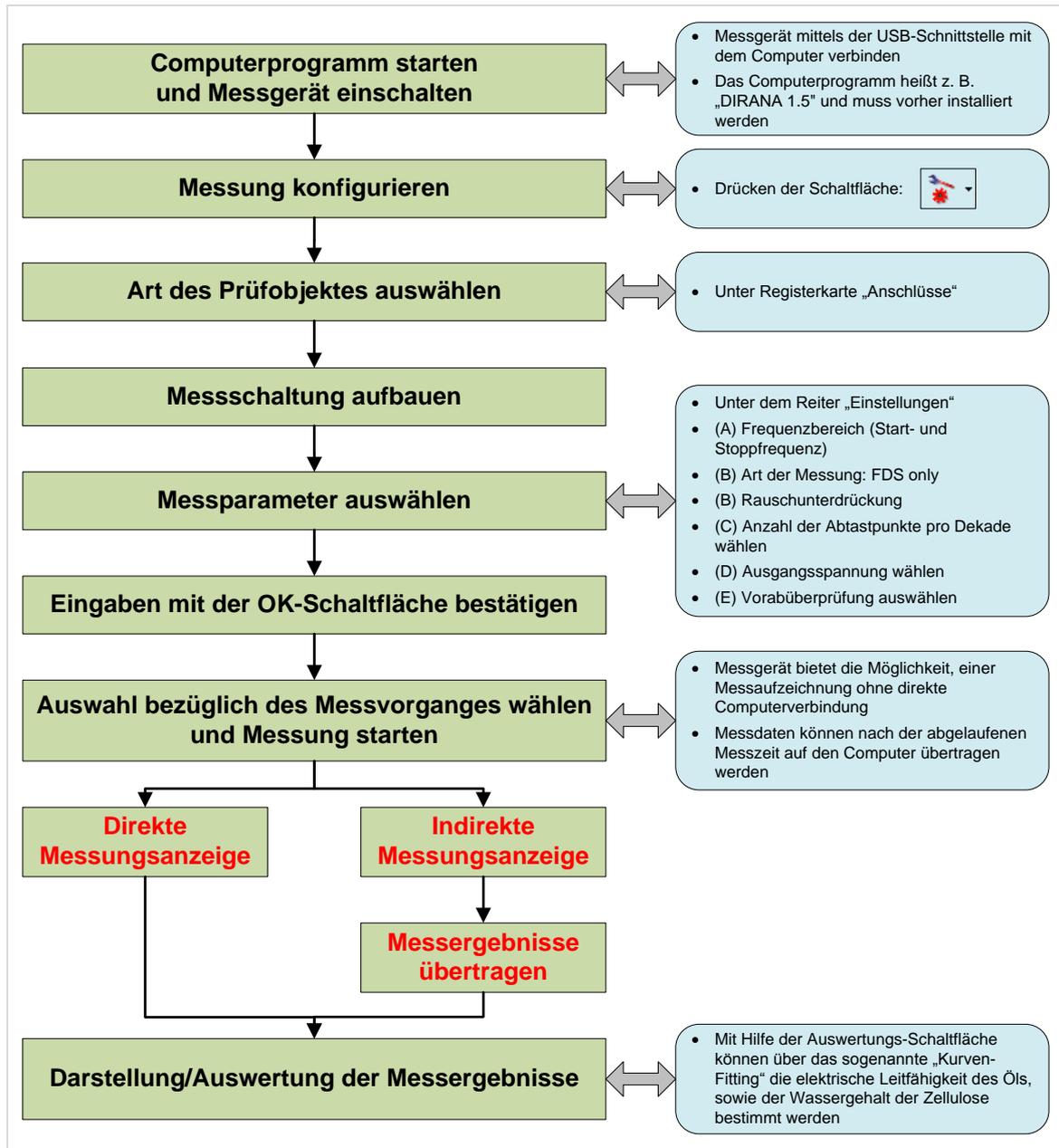
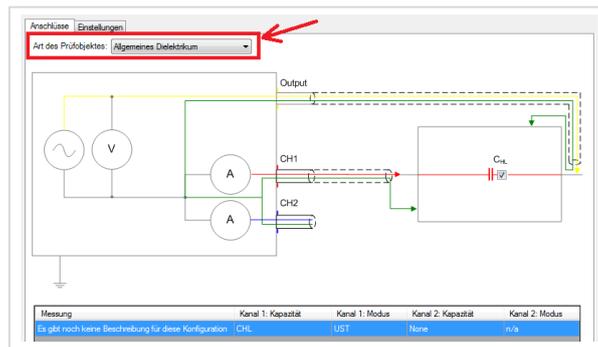


Abbildung 5.3-3: Ablaufplan für die FDS-Messung [eigene Darstellung]

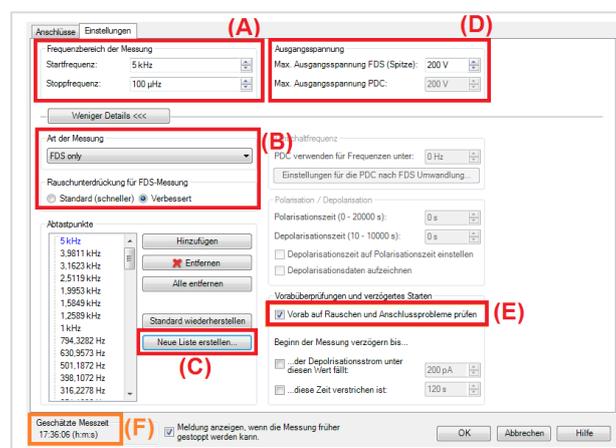
Nachfolgend werden unter anderem wichtige Konfigurationsschritte für die Durchführung einer Messung näher erläutert. Die Software wurde mit dem Messgerät mitgeliefert und heißt „DIRANA 1.5“. Genauer handelt es sich bei dem verwendeten Programm um die Versionsnummer 1.5.168.

Nach dem Starten der Software auf dem Computer kann die Konfiguration der Messung beginnen. Bei der Messkonfiguration werden die Art des Prüfobjektes, sowie unterschiedliche Messparameter eingestellt. In der nachfolgenden Abbildung wird gezeigt, wo die Art des Prüfobjektes ausgewählt wird. Bei dem hier gewählten Messobjekt handelt es sich um ein „Allgemeines Dielektrikum“. Außerdem wird die aufzubauende Messschaltung angezeigt.



**Abbildung 5.3-4: Fenster zum Auswählen des Prüfobjektes, sowie Anzeige der Messschaltung (adaptiert aus [screenshot SW „DIRANA 1.5“])**

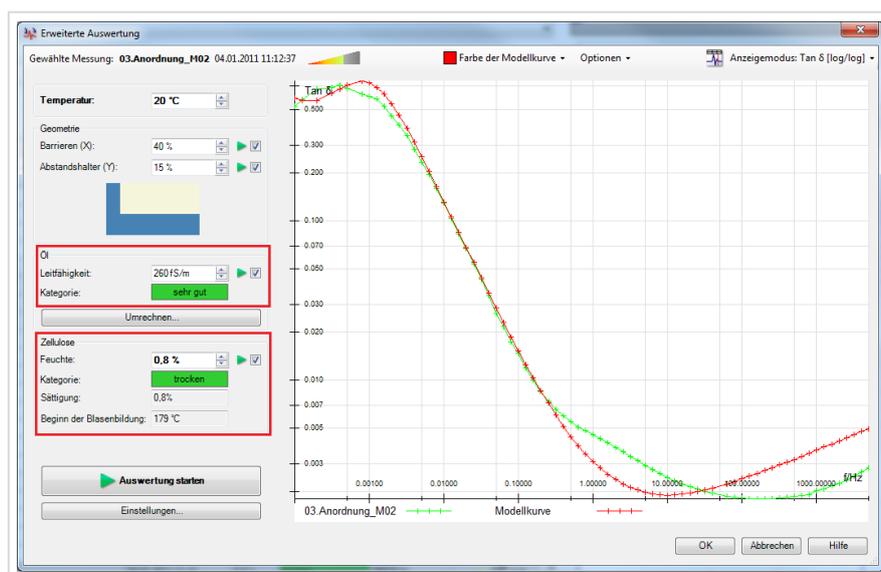
Im nächsten Schritt müssen die Einstellungen für die Messung bearbeitet werden. Zu diesen gelangt man mittels der Registerkarte „Einstellungen“. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Einstellungsfenster für die FDS-Messung, sowie die wichtigen Einstellbereiche für die Messung (A bis E). Entsprechend der gewünschten Messkonfiguration, welche beispielsweise im Kapitel 6 unter der jeweiligen Versuchsanordnung angeführt wird, bekommt man unter (F) die geschätzte Messdauer angezeigt.



**Abbildung 5.3-5: Fenster für die unterschiedlichen Einstellungsmöglichkeiten für die FDS-Messung (adaptiert aus [screenshot SW „DIRANA 1.5“])**

Nachdem alle Einstellungen durchgeführt wurden und die Messschaltung aufgebaut ist, kann die Messung durch betätigen der „Start-Schaltfläche“ beginnen. Neben der direkten Anzeige der Messergebnisse am Computermonitor bietet das Messgerät auch die Option einer Messung ohne verbundenen Computer. Nach Ablauf der Messzeit können die Messdaten aus dem Gerät auf den Computer übertragen werden.

Nach der Messung können die Messdaten in unterschiedlichen Verläufen dargestellt werden, wie z. B. der Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz. Wie diese Messverläufe aussehen, ist beispielsweise im Kapitel 6.1.2 ab Seite 104 ersichtlich. Mit Hilfe der „Auswerte-Funktion“ ist es möglich den Wassergehalt in der Zellulose, sowie die elektrische Ölleitfähigkeit zu bestimmen. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Auswerte-Fenster der Software „DIRANA 1.5“. Die Bestimmung der Werte erfolgt mit Hilfe von Modellkurven („Kurven-Fitting“). In Abbildung 5.3-6 entspricht der rote Kurvenverlauf der Modellkurve und der grüne Verlauf dem ermittelten Messverlauf der Versuchsanordnung 3 – Messung 2. Durch drücken des Buttons „Auswertung starten“, erfolgt entsprechend den Einstellungen für die Grenzen der automatischen Auswertung und der Ölparameter ein selbstständiges angleichen der Modellkurve an die Messkurve. Im linken Bildschirmteil erfolgt die Ausgabe der Messwerte für das Isolieröl und die Zellulose.



**Abbildung 5.3-6: Auswerte Bildschirm der Software „DIRANA 1.5“  
(adaptiert aus [screenshot SW „DIRANA 1.5“])**

### 5.3.2 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung

Für die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung kamen zwei Messgeräte zum Einsatz. Zum Einen das schon bekannte Messgerät DIRANA von der Firma Omicron electronics GmbH und zum Anderen das Messgerät PDC-Analyser-1MOD von der Firma ALFF engineering. Da es sich bei dem Messgerät DIRANA um dasselbe wie bei der vorher beschriebenen FDS-Messung handelt, werden nur mehr die Unterschiede bei der Messkonfiguration für die reine PDC-Messung angeführt (siehe Abbildung 5.3-10).



Abbildung 5.3-7: Messgerät PDC-Analyser-1MOD [80]

In der nachfolgenden Abbildung wird der prinzipielle Messaufbau für die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung mit dem PDC-Analyser-1MOD dargestellt. Die Messschaltung für das Messgerät DIRANA kann aus Abbildung 5.3-2 auf Seite 82 entnommen werden, da sich bei dem Messaufbau keine Änderungen ergeben.

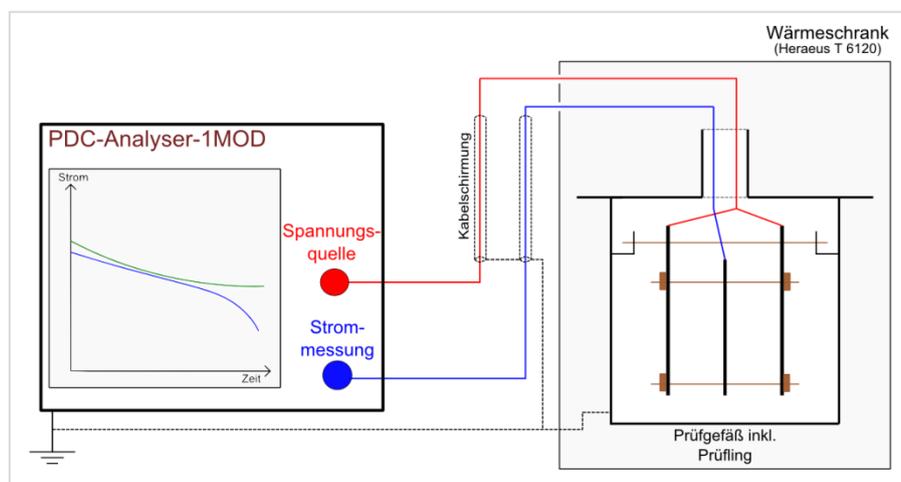
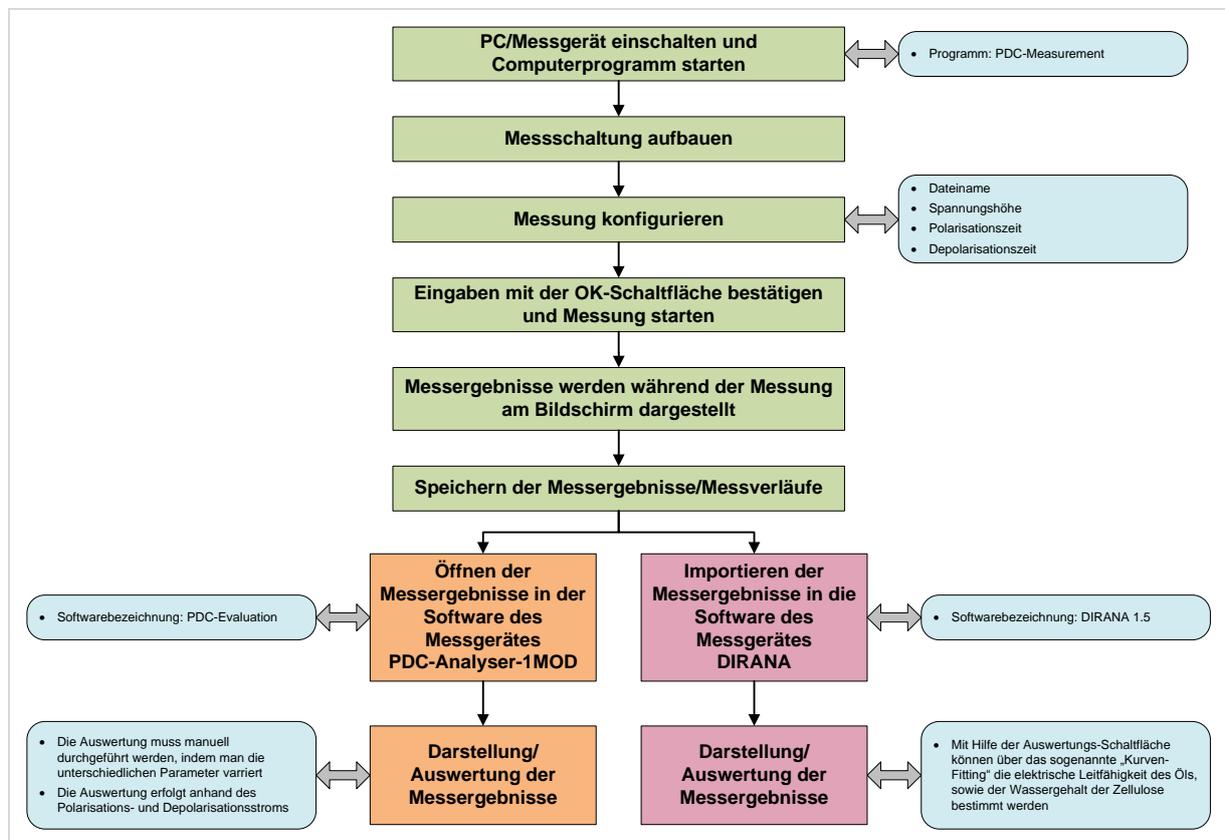


Abbildung 5.3-8: Schematischer Messaufbau für die PDC-Messung mit dem PDC-Analyser-1MOD [eigene Darstellung]

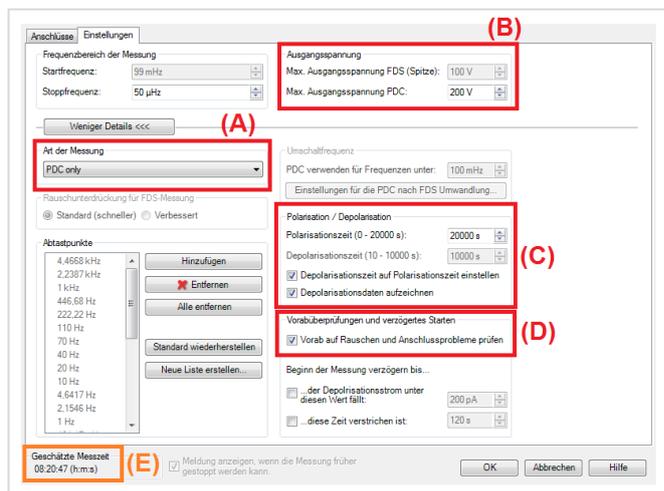
Nachfolgend ist der Ablaufplan inklusive einiger Anmerkungen für die PDC-Messung mit dem PDC-Analyser-1MOD dargestellt.



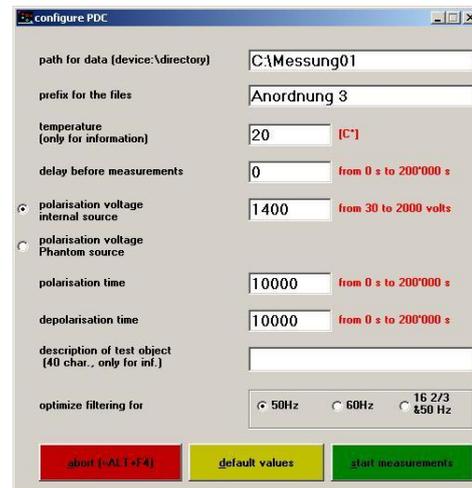
**Abbildung 5.3-9: Ablaufplan für die PDC-Messung mit dem PDC-Analyser-1MOD [eigene Darstellung]**

Wie bereits erwähnt unterscheidet sich die PDC-Messung mit dem Messgerät DIRANA lediglich bei den Einstellungen für die Messkonfiguration. Der Ablaufplan aus Abbildung 5.3-2 auf Seite 82 kann grundsätzlich auch für die PDC-Messung mit dem Messgerät DIRANA übernommen werden. Abbildung 5.3-10 zeigt das Konfigurationsfenster für die PDC-Messung vom Messgerät DIRANA. Die Art der Messung wird unter (A) ausgewählt, die Ausgangsspannung unter (B), die Zeiten für den Polarisations- und Depolarisationsstrom unter (C). Außerdem kann man unter (C) noch die Aufzeichnung der PDC-Daten auswählen. Im Bereich (D) kann ausgewählt werden, ob eine Vorabüberprüfung des Aufbaues durchgeführt werden soll. Die geschätzte Messdauer wird unter (E) angezeigt.

In Abbildung 5.3-11 ist das Konfigurations- und zugleich das Startfenster des Messgerätes PDC-Analyser-1MOD dargestellt. Wie man sieht, erfolgt hier ebenso die Eingabe für die Spannungshöhe, sowie für die Polarisations- und Depolarisationszeit.



**Abbildung 5.3-10: Messkonfiguration für die PDC-Messung mit dem Messgerät DIRANA (adaptiert aus [screenshot SW „DIRANA 1.5“])**



**Abbildung 5.3-11: Konfigurations- und Startfenster vom Messgerät PDC-Analyser-1MOD [screenshot SW „PDC-Measurement“]**

Nachfolgend wird die Vorgehensweise für das „Kurven-Fitting“ mit der Software „PDC-Evaluation“ des Messgerätes PDC-Analyser-1MOD der Firma ALFF engineering demonstriert. Mit Hilfe des „Kurven-Fittings“ können der Wassergehalt in der Zellulose, sowie die elektrische Leitfähigkeit des Isolieröls bestimmt werden. Anzumerken ist, dass die Modellkurve manuell bzw. graphisch an den ermittelten Messverlauf des Polarisations- und Depolarisationsstroms angenähert werden muss. Im Vergleich zur Mess- und Analysesoftware „DIRANA 1.5“, bei der es möglich ist, eine automatisch erstellte Modellkurve generieren zu lassen.

Nachdem das Programm „PDC-Evaluation“ (Version 3.0 – June 2000) am Computer gestartet wurde, muss die Datei mit den Messdaten geöffnet werden. Im Auswahlménü unter „Diagnosis“ und weiter unter „Oil-paper insulation“ kommt man zu den zwei möglichen Analysetools „Homogeneous systems“ und „Multi-layer systems“. Für die in dieser Diplomarbeit realisierten Versuchsanordnungen wurde das zweite Analysetool verwendet. Nähere und detailliertere Informationen über die

Software „PDC-Evaluation“ können in den Handbüchern des Messgerätes nachgelesen werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch den Messverlauf für die Messung 17 der Versuchsanordnung 3, sowie entsprechende Modellkurven für unterschiedliche Zellulosefeuchtigkeit und Ölleitfähigkeit. Die Modellkurven wurden mit Hilfe der geometrischen Abmessung und der Anordnungskapazität für 50 Hz, sowie durch Variation einiger Parameter, wie der Zellulosefeuchtigkeit und Ölleitfähigkeit, erstellt. Der graphische Abgleich der Modellkurve an den Messverlauf ermöglicht in weiterer Folge unter anderem eine Aussage über den Wassergehalt in der Zellulose. Bei der Auswertung für die Zellulosefeuchtigkeit wird der nächst höhere Wert genommen, da im Allgemeinen Schrittweiten für die Zellulosefeuchtigkeit von nur 0,5 Prozent möglich sind.

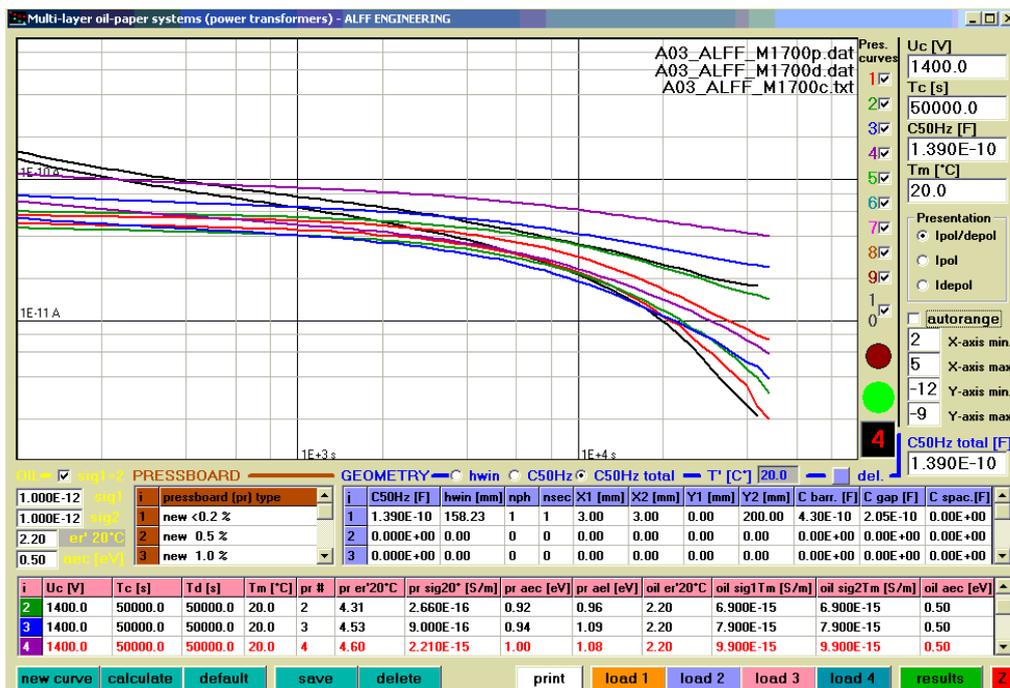


Abbildung 5.3-12: Analyse Bildschirm der Auswertesoftware „PDC-Evaluation“ [screenshot SW „PDC-Evaluation“]

### 5.3.3 Karl-Fischer-Titration für Flüssigkeiten

Folgende Geräte wurden für die Bestimmung des Wassergehaltes des Mineralöls Nynas Nytro 4000X benötigt und sind auch teilweise nachfolgend abgebildet:

- 831 KF Coulometer
- Magnetrührer
- Waage (AND GR-300)
- Titriergefäß
- Tastatur
- Spritze, Nadel, fusselfreie Tücher



Abbildung 5.3-13: 831 KF Coulometer, Titriergefäß, Magnetrührer, Tastatur [84]



Abbildung 5.3-14: Waage und Spritze mit langer Nadel (inkl. einer Probe) [eigenes Photo]

In der nachfolgenden Abbildung wird der prinzipielle Versuchsaufbau für die Karl-Fischer-Titration zur Analyse von flüssigen Proben dargestellt.

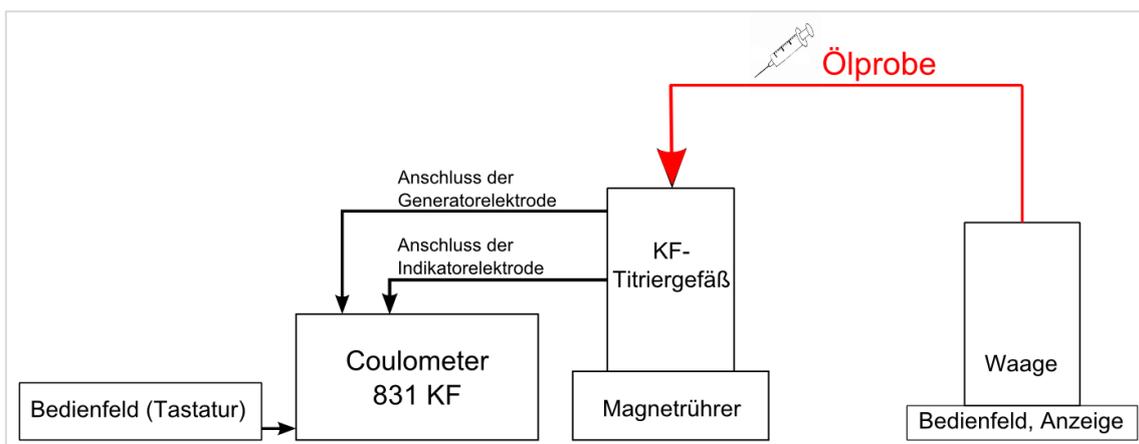


Abbildung 5.3-15: Schematischer Aufbau der Karl-Fischer-Titration für Flüssigkeiten [eigene Darstellung]

In Abbildung 5.3-16 ist der Ablaufplan für die Bestimmungen des Wassergehaltes einer flüssigen Probe, inklusive einiger wichtiger Erläuterungen, abgebildet.

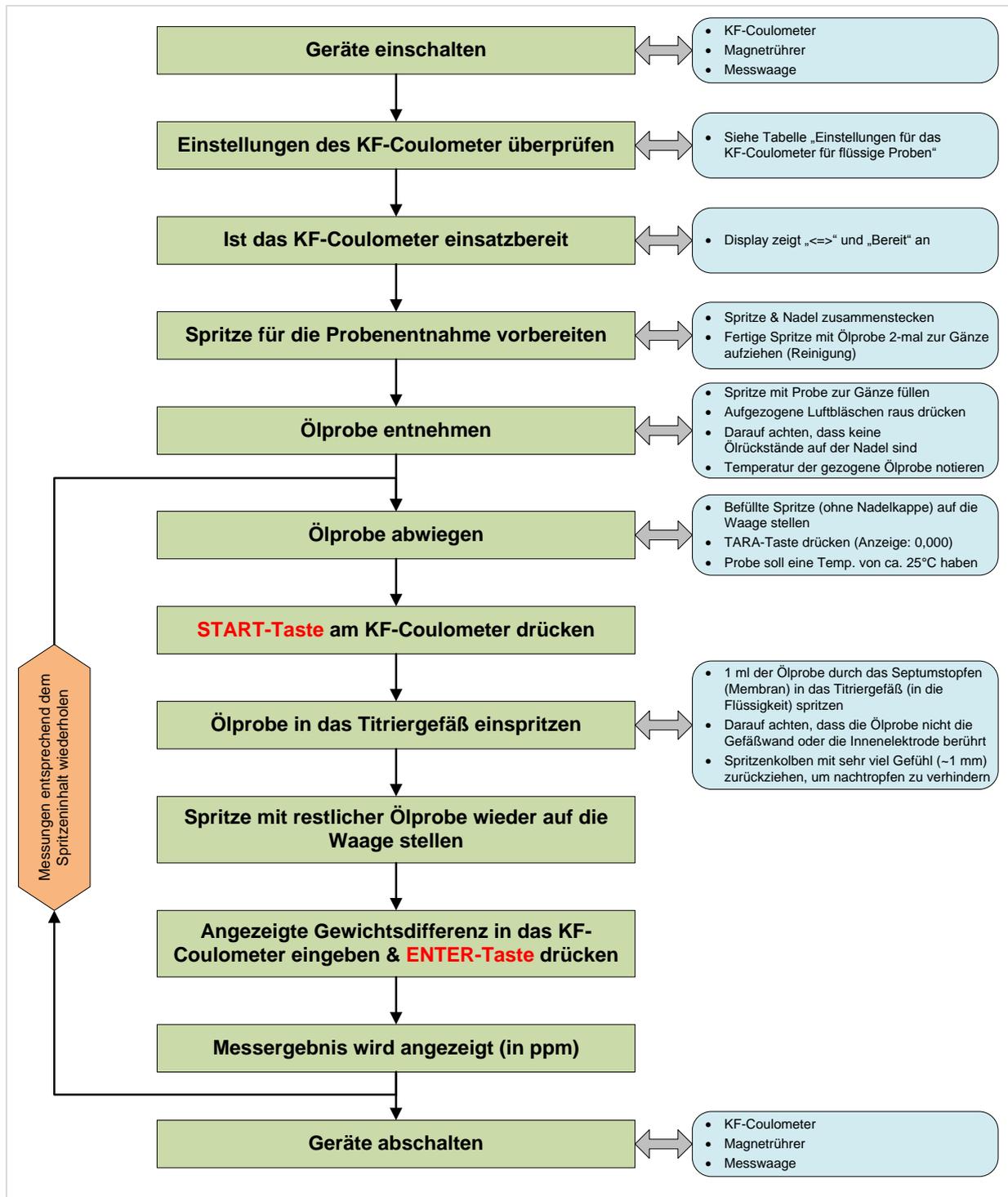


Abbildung 5.3-16: Ablaufplan für die Bestimmung des Wassergehaltes in flüssigen Proben [eigene Darstellung]

In Tabelle 5.3-1 können die Einstellungsparameter für das KF-Coulometer 831 entnommen werden. Wichtig ist es die Einstellungen vor jeder Messprozedur zu überprüfen, damit die Messergebnisse vergleichbar sind. Ein weiterer Grund für eine Überprüfung ist, dass es bei längeren Messpausen sein kann, dass die Einstellungen von anderen Personen entsprechend deren Anforderungen verändert wurden.

**Tabelle 5.3-1: Einstellungen für das KF-Coulometer 831 für flüssige Proben**

Bezeichnung	Wert	Einheit	Bezeichnung	Wert	Einheit
<b>REGELPARAMETER</b>			<b>STATISTIK</b>		
Regelbereich	70,0	mV	Status	aus	
Max.Rate	Max	µg/min			
Min.Rate	15	µg/min	<b>VORWAHL</b>		
Stoppkrit	Rel. Drift		Driftkorr	auto	
rel.Drift	5	µg/min	Ident.abfragen	aus	
<b>TITRATIONSPARAMETER</b>			Einmass abfr.	Wert	
Pause	0	s	Abfragen+Titr	ein	
Extr.zeit	30	s	Einmass-Einheit	g	
Start Drift	40	µg/min	Grenzw.Einmass	aus	
Temperatur	25	°C	Text Id1	Id1/C21	
Zeitintervall	2	S	Text Id2	Id2/C22	
Max.Titr.Zeit	aus		Text Id3	Id3/C23	
			Ofen	nein	
			Aktivierpuls	aus	

### 5.3.4 Karl-Fischer-Titration für Feststoffe

Folgende Geräte wurden für die Bestimmung des Wassergehaltes vom Feststoff „Transformerboard TIV“ von der Firma Weidmann AG benötigt, sowie nachfolgend teilweise abgebildet:

- KF-Coulometer 831
- Titriergefäß
- Magnetrührer
- Tastatur
- Ofen (688 KF)
- Probenschiffchen
- Stickstoffflasche
- Gasflussanzeigergerät
- Gaswaschflaschen
- Waage (AND GR-300)
- Gefäß mit Hexan
- div. Werkzeuge und Hilfsmittel



Abbildung 5.3-17: Teil des KFT-Aufbaues für Feststoffe [eigenes Photo]



Abbildung 5.3-18: 831 KF-Coulometer 831, Magnetrührer und Titrierzelle [eigenes Photo]

In der nachfolgenden Abbildung wird der prinzipielle Versuchsaufbau für die Karl-Fischer-Titration zur Analyse von Feststoffproben dargestellt.

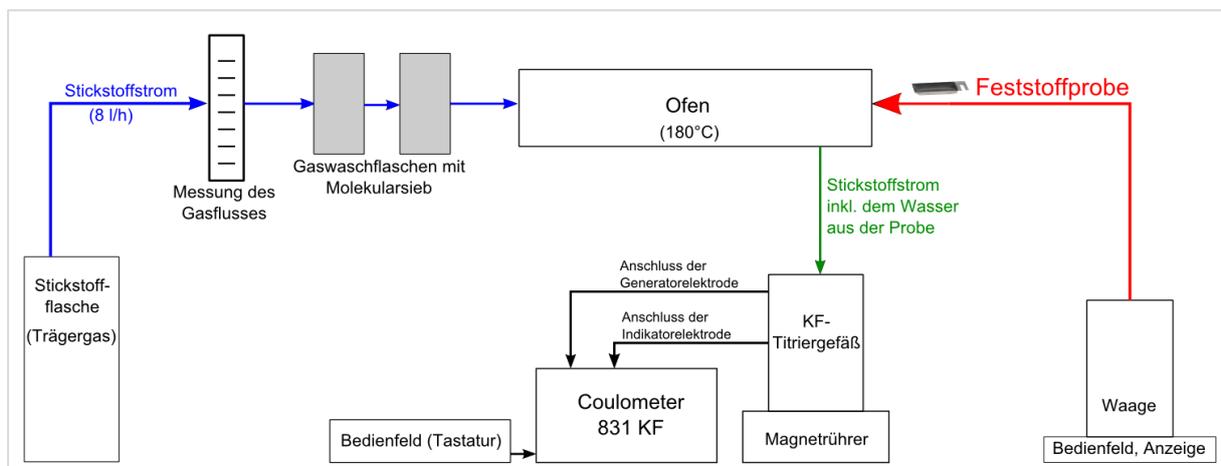


Abbildung 5.3-19: Schematischer Aufbau der Karl-Fischer-Titration für Feststoffe [eigene Darstellung]

Abbildung 5.3-20 zeigt den Ablaufplan für die Bestimmungen des Wassergehaltes einer Feststoffprobe, inklusive einiger wichtiger Erläuterungen.

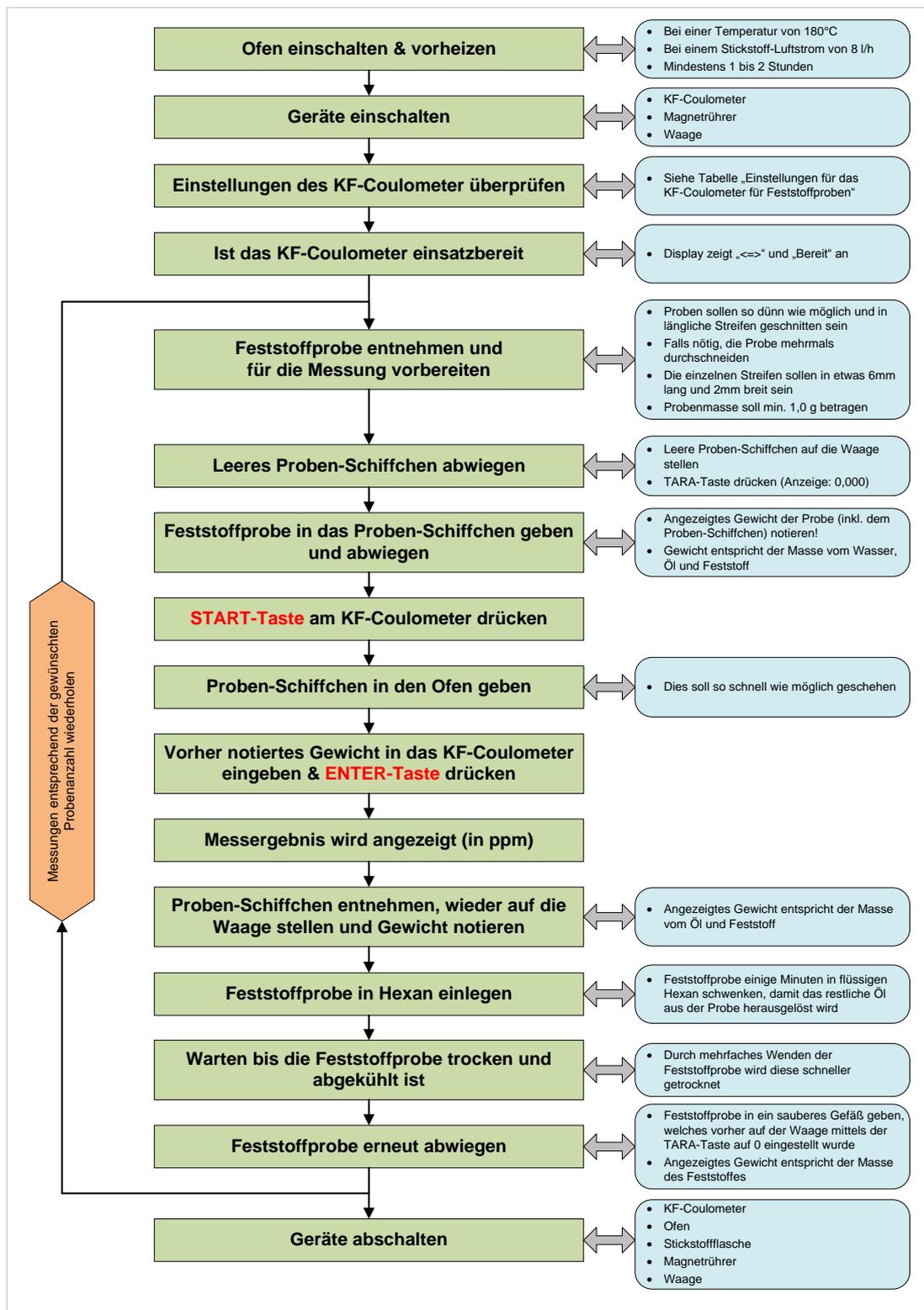


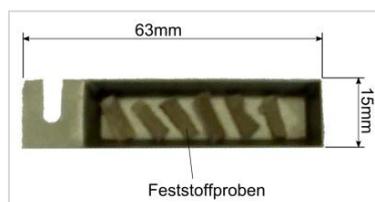
Abbildung 5.3-20: Ablaufplan für die Bestimmung des Wassergehaltes in Feststoffproben [eigene Darstellung]

Das KF-Coulometer 831 bietet eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten für diverse Parameter. Damit die einzelnen Messreihen miteinander vergleichbar sind, ist es wesentlich, dass vor Beginn jeder einzelnen Messreihe die Einstellungen überprüft werden. Außerdem kann es sein, dass bei längeren Messpausen die Einstellungen von anderen Personen verändert wurden. In der nachfolgenden Tabelle werden die eingestellten Werte angeführt.

**Tabelle 5.3-2: Einstellungen für das KF-Coulometer 831 für Feststoffproben**

Bezeichnung	Wert	Einheit	Bezeichnung	Wert	Einheit
<b>REGELPARAMETER</b>			<b>STATISTIK</b>		
Regelbereich	70,0	mV	Status	aus	
Max.Rate	Max	µg/min	<b>VORWAHL</b>		
Min.Rate	15	µg/min	Driftkorr	auto	
Stoppkrit	Rel. Drift		Ident.abfragen	aus	
rel.Drift	5	µg/min	Einmass abfr.	Wert	
<b>TITRATIONSPARAMETER</b>			Abfragen+Titr	ein	
Pause	0	s	Einmass-Einheit	g	
Extr.zeit	30	s	Grenzw.Einmass	aus	
Start Drift	40	µg/min	Text Id1	Id1/C21	
I(pol)	10	µA	Text Id2	Id2/C22	
Elektrodentest	ein		Text Id3	Id3/C23	
Temperatur	25	°C	Zelle	kein Diaph	
Zeitintervall	2	S	Generator I	400	mA
Max.Titr.Zeit	aus		Ofen	nein	
			Aktivierpuls	aus	

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Proben-Schiffchen inklusive zugeschnittener Feststoffproben. Wie im Ablaufplan (Abbildung 5.3-20) unter „Feststoffprobe entnehmen und für die Messung vorbereiten“ in der Anmerkung beschrieben, ist es wichtig, die Proben in dünne, längliche Streifen zu schneiden. Außerdem müssen die zusammengehörenden bzw. übereinanderliegenden Transformerboard-Schichten vermessen werden. Ansonsten könnten zu hohe oder zu niedrige Werte für den Wassergehalt gemessen werden, da beispielsweise nur die oberste Schicht vermessen wird.



**Abbildung 5.3-21: Proben-Schiffchen inklusive zugeschnittener Feststoffproben [eigenes Photo]**

## **5.4 Fehlerquellen bei den Messmethoden**

Um mögliche Fehlerquellen zu verhindern bzw. zu reduzieren ist es wichtig, die Ursachen für das Zustandekommen von Fehlern zu analysieren. Im weiteren Verlauf werden mögliche Fehlerquellen, sowohl für die elektrischen als auch für die nichtelektrischen Methoden, angeführt und erläutert. Anzumerken ist noch, dass die hier beschriebenen Fehlerquellen nur einen Teil der denkbaren Fehler umfassen, da die Versuche bezüglich ihres Ablaufs, sowie Aufbaus unterschiedlich sind und in jedem speziellen Fall untersucht werden müssen.

### **5.4.1 Elektrische Methoden**

Die elektrischen Messmethoden bieten in der Regel eine relativ einfache und unkomplizierte Handhabung der Messgeräte. Auch scheint die Anzahl von möglichen Fehlerquellen geringer, als bei den nichtelektrischen Methoden, zu sein. Allerdings heißt eine geringere Anzahl von möglichen Fehlerquellen nicht, dass die Auswirkungen der Fehler geringer sind.

Mögliche Fehlerquellen wären beispielsweise:

- Einkopplung von Störsignalen bzw. induzierte Spannungen
- Übergangswiderstände an Verbindungsstellen (z. B. Stecker-Buchse)
- Quantisierungsfehler
- zu geringe Erdungsdauer der Elektroden
- Fehler bei der Erstellung der Modellkurve für das „Kurven-Fitting“

Das Einkoppeln von Störsignalen oder auch das Induzieren von Spannungen in die Messleitungen bzw. den Prüfling ist eine sehr häufige Fehlerquelle. Aufgrund des für diese Diplomarbeit realisierten Versuchsaufbaues, mittels eines geschlossenen Edelstahlgefäßes (siehe dazu Kapitel 4), kann mit einer großen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass der Prüfling vom Umfeld nicht beeinflusst wird. Neben dem Prüfbjekt an sich besitzen die Messleitungen, falls diese nicht komplett und durchgehend vom Prüfling bis zum Messgerät abgeschirmt werden, besondere

Aufmerksamkeit, da die Kabellängen in der Praxis einige Meter und mehr sein können. Weiters ist zu beachten, ob andere Geräte oder Betriebsmittel, wie z. B. andere Transformatoren oder diverse Laborgeräte, den Messaufbau beeinflussen können. Zu berücksichtigen ist, dass es Messgeräte gibt, welche ein entsprechendes Störsignal durch eine entsprechende Störsignalmessung (Grundrauschen) filtern können. Falls möglich, ist eine Kalibrierung der Anlage zu empfehlen.

Durch große Übergangswiderstände an den unterschiedlichen Anschlusskontakten kann es vorkommen, dass Messungen unbrauchbare Ergebnisse liefern. Um das Risiko von schlechten Übergängen zu minimieren, sollte man so wenige Steckverbindungen wie möglich in einem Versuchsaufbau haben. Bei den vorhandenen Verbindungen ist es ratsam, die Kontakte am besten vor jeder Messung sauber zu reinigen, damit diverse Verunreinigungen entfernt werden.

Bei jedem digitalen Mess- oder Anzeigegerät entstehen bei der Digitalisierung von kontinuierlichen Messsignalen Messfehler, die sogenannten Quantisierungsfehler. Durch eine entsprechend hohe Messbereichsauflösung kann der Messfehler verringert werden, da jedem analogen Wertebereich ein digitaler Wert zugeordnet ist.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist, wenn die Elektroden eine zu geringe Zeit geerdet werden und so noch Restladungen auf den Elektroden verbleiben. In der Regel sollte der Versuchsaufbau solange geerdet werden, wie die Messung gedauert hat.

Bei der Erstellung der Modellkurve für das „Kurven-Fitting“ mit Hilfe einer Analysesoftware können ebenfalls etwaige Einflussparameter, wie z. B. die Temperatur, die Dichte der Feststoffisolierung, die Ölqualität oder ungenaue Isolationsgeometriedaten, die Ergebnisse der Auswertung beeinflussen. Wie sich diese Fehlerquellen auf die Ergebnisse auswirken können, sowie eine nähere Erläuterung dieser Fehlerquellen können beispielsweise in [95] ab Seite 18 nachgelesen werden.

### 5.4.2 Nichtelektrische Methoden

Als nichtelektrische Methode kam die Karl-Fischer-Titration (KFT) für Flüssigkeiten und Feststoffe zum Einsatz. Grundsätzlich gilt die KFT als eine sehr genaue Messmethode, allerdings sind aufgrund der größeren Anzahl an nötigen Arbeitsschritten die möglichen Fehlerpotentiale ebenfalls größer. Mögliche Fehlerquellen sind nachfolgend aufgelistet [55, S.57ff].

- Verunreinigungen
- Luftfeuchtigkeit
- nicht geeignetes Arbeitsmedium
- falscher pH-Wert
- Nebenreaktionen
- Indikation
- Probenbehandlung

Bei der Karl-Fischer-Titration ist stets ein sorgfältiges und sehr exaktes Arbeiten notwendig, um eine mögliche Verunreinigung der Probe zu verhindern. So ist es beispielsweise sehr wichtig die benötigten Werkzeuge, andere Hilfsmittel und den Arbeitsplatz sauber zu reinigen (z. B. mit Aceton), sowie bei der ganzen Messprozedur Handschuhe zu tragen. Außerdem ist es ratsam, die Transportwege der benötigten Utensilien, sowie der Probe zu minimieren, damit nicht unnötig lange Wege zurückgelegt werden müssen.

Die Luftfeuchtigkeit ist eine der größten Fehlerquellen bei der Karl-Fischer-Titration, da man in der Regel nicht die gesamte Messprozedur (von der Probenentnahme bis zur Messung) in einem Klimaraum durchführen kann. Grundsätzlich kann die Luftfeuchtigkeit entweder direkt aus der Umgebungsluft in das Titriergefäß oder in die Probe eindringen bzw. über die verwendeten Apparaturen oder durch Lösungsmittel und Hilfsreagenzien eingebracht werden. So kann beispielsweise 1 l Luft bis zu 20 mg Wasser enthalten. Um nun die Luftfeuchtigkeit als mögliche Fehlerquelle zu minimieren, können einige einfache Maßnahmen durchgeführt werden, wie zum Beispiel [55, S.63,64]:

- Verwendung einer schnellen KF-Reagenz
- Titrierzelle soll möglichst luftdicht sein, wenige Einbauten besitzen und gut trockentitriert werden
- Absaugvorrichtung soll mittels eines schließenden Stopfen an die Titrierzelle angeschlossen werden
- Titriergefäß mittels trockener Luft zwangsbelüften

Das Arbeitsmedium bestimmt den Reaktionsablauf und muss entsprechend den Anforderungen ausgewählt werden. Mögliche Arbeitsmedien wären beispielsweise Methanol, 1-Propanol, 1-Butanol, Ethylenglykol, Methylglykol, Pyridin und weitere. Allgemein muss allerdings das Arbeitsmedium drei Grundvoraussetzungen erfüllen. Diese wären [55, S.58,59]:

- Stöchiometrie der KF-Reaktion muss erfüllt sein
- Es muss die Probe und die Reaktionsprodukte der KF-Reaktion lösen
- Indikation muss möglich sein

Generell entsteht bei jeder Indikation von wasserhaltigen Proben Säure, welche normalerweise durch die im Reagenz enthaltene Base gebunden wird. Wird allerdings dieses Säuren-Basen-Gleichgewicht gestört, wird die Endpunktbestimmung schleppend oder rückläufig. Es kann sogar passieren, dass der Endpunkt nicht mehr erreicht wird. In der Praxis wird ein pH-Wert in einem Bereich von 4 bis 7 bevorzugt [55, S.61,62].

Ein weiteres Problem können entstehende Nebenreaktionen darstellen, wobei diese bezüglich einer möglichen Fehlerquelle in der Praxis ein geringes Fehlerpotential darstellen. Welche Nebenreaktionen auftreten können und wie man diese mit Hilfe von Reduktionsmitteln weitestgehend verhindern kann, ist von den verwendeten Lösungsmitteln abhängig [55, S.62].

Bei der Indikation können zwei Methoden unterschieden werden und zwar die visuelle und die instrumentelle (voltametrische) Indikation. Der Endpunkt der

visuellen Indikation ist wegen der teilweise geringen Verfärbung der Lösung bei einem geringen Wassergehalt der Probe schwer zu bestimmen. Dazu kommt noch, dass es aufgrund einer teilweise langsamen Gleichgewichtseinstellung wegen der subjektiven Beurteilung der Verfärbung zu einem vorzeitigen Abbruch der Titration kommt. Das Problem der langsamen Gleichgewichtseinstellung ist allerdings auch bei der instrumentellen Indikation vorhanden. Lösungsansätze wären z. B. durch entsprechende Geräteeinstellungen den Fehler zu korrigieren oder die Lösungszusammensetzung zu ändern [55, S.65ff].

Die Probenbehandlung umfasst die Probenentnahme, die Probenaufbewahrung, sowie die Probendosierung. Ein wesentlicher Punkt ist, von wo die Probe entnommen wird. So besitzen beispielsweise hygroskopische Stoffe die Eigenschaft, dass sie an der Oberfläche leicht Wasser speichern und infolgedessen ein höherer Wassergehalt gemessen wird. Das gleiche Problem haben Flüssigkeiten, welche eine höhere Dichte als Wasser besitzen und viskos sind. So wird beispielsweise bei Flüssigkeiten in den oberen Schichten oft ein höherer Wassergehalt gemessen. Bezüglich der Probenaufbewahrung sollte man bei längeren Lagerungsdauern Gefäße aus Glas anstatt aus Kunststoff nehmen, da Kunststoffe nicht zur Gänze wasserdampfdicht sind und sie Feuchtigkeit an der Oberfläche absorbieren. Außerdem kann eine Vortrocknung der Gefäße sehr vorteilhaft sein. Bei flüssigen Proben ist es ratsam das Probengefäß mehrmals mit dem Probenmaterial auszuspülen. Auch der Lagerungsort sollte sorgfältig gewählt werden, denn steht beispielsweise ein Probengefäß an einer kalten Wand, wird sich Feuchtigkeit an der kalten Seite anreichern. In Bezug auf die Probendosierung von Flüssigkeiten muss man darauf achten, dass das Dosiergerät, wie z. B. eine Spritze oder Pipette, absolut trocken und sauber ist. Außerdem sollte man auch das Dosierwerkzeug mehrmals mit dem Probenmaterial durchspülen. Bei Feststoffproben ist es wichtig, dass das Probenmaterial so schnell wie möglich bearbeitet bzw. zugeschnitten wird, damit es der Umgebungsfeuchtigkeit nicht zulange ausgesetzt wird. Weiters sollten die Probenstücke nicht zu groß und dick sein, damit kein Wasser in der Probe verbleiben kann [55, S.67ff].

## 6 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden unter anderem die Messergebnisse der einzelnen Versuchsanordnungen angeführt. In den Abschnitten 6.3 und 6.4 wird eine Diskussion der jeweiligen Ergebnisse durchgeführt. Im Anschluss an diese Diskussionen erfolgt die Schlussfolgerung auf Basis der ermittelten Messergebnissen.

Neben dem Verlustfaktor des Isolationssystems oder der elektrischen Leitfähigkeit des Isolieröls ist besonders der Wassergehalt in der Feststoffisolierung eine sehr wichtige Größe für die Zustandsbewertung. Der Wassergehalt im Isolieröl ist, aufgrund des sehr geringen Werts im Normalbetrieb, wie man in den nachfolgenden Unterabschnitten feststellen kann, absolut gesehen eher vernachlässigbar. Allerdings kann mit dessen Hilfe, z. B. über sogenannte Gleichgewichtskurven, indirekt der Wassergehalt in der Zellulose bestimmt werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Einteilung der Feuchtigkeitskategorien nach IEC 60422. Ziel ist es, mit Hilfe einer solchen Einteilung rechtzeitige Korrekturmaßnahmen, wie z. B. eine Trocknung, durchzuführen, damit es in weiterer Folge zu keinem Ausfall des Betriebsmittels kommt.

**Tabelle 6.0-1: Einteilung der Feuchtigkeitskategorien nach IEC 60422 (adaptiert aus [51, S.5])**

Zustand	Wassergehalt w
Trocken	$w < 2,2\%$
Mäßig feucht	$2,2\% \leq w < 3,7\%$
feucht	$3,7\% \leq w < 4,8\%$
Extrem feucht	$4,8\% \leq w$

Mit Hilfe von ermittelten Verläufen, wie beispielsweise dem Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz, ist es unter anderem möglich Trendanalysen zu erstellen. Besonders interessant sind hierbei die Vergleichbarkeit der Verläufe bzw. die unterschiedlichen Messergebnisse, welche von unterschiedlichen Messmethoden oder Messgeräten bei gleichen Messbedingungen ermittelt wurden. Auf diesen Zusammenhang wird im Kapitel 6.2.5 näher eingegangen.

## 6.1 Experimentelle Ergebnisse der Vorversuche (Anordnung 1 & 2)

Die Vorversuche dienten dazu, um zu überprüfen, ob der Prüfling zuallererst den zu erwartenden Verlauf bei der Frequenzbereichsspektroskopie liefert. Außerdem wurden anhand der beiden Vorversuche der Prüfling und das Prüfgefäß näher analysiert und in weiterer Folge mit den ermittelten Daten und gemachten Beobachtungen verbessert. Weiters dienten die Vorversuche dazu um mit den zu verwendenden Geräten, Einrichtungen und den Abläufen, wie z. B. der Messvorbereitung, vertraut zu werden. Im Kapitel 6.3 werden etwaige Ergebnisse und aufgetretene Beobachtungen bzw. Probleme diskutiert. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden hauptsächlich die Messergebnisse, sowie eingestellte Parameter angeführt.

Abbildung 6.1-1 zeigt eine Anordnungsskizze für die Versuchsanordnungen 1 und 2. Die Anordnungen befinden sich im ersten Prüfgefäß, welches aus Floatglas besteht. Als Isolationssystem wird eine Kombination von Pressboard (Transformerboard TIV) und Mineralöl (Nynas Nytro 4000X) verwendet. Alle im Isolieröl befindlichen Komponenten (Mutter, Gewindestange, Feststoffisolierung, Abstandshalter) bestehen aus Transformerboard.

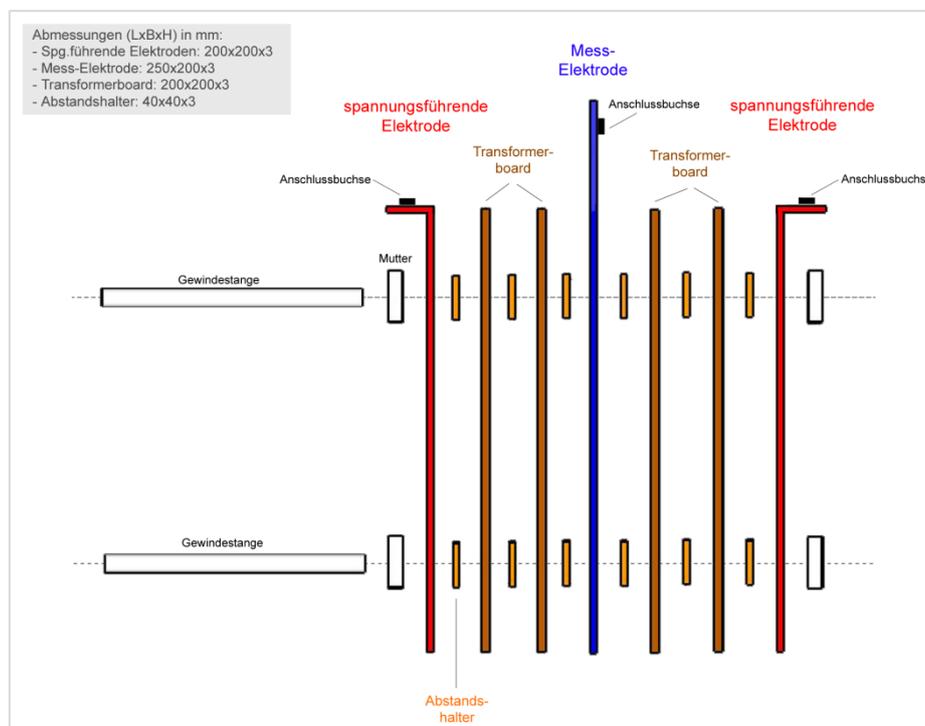
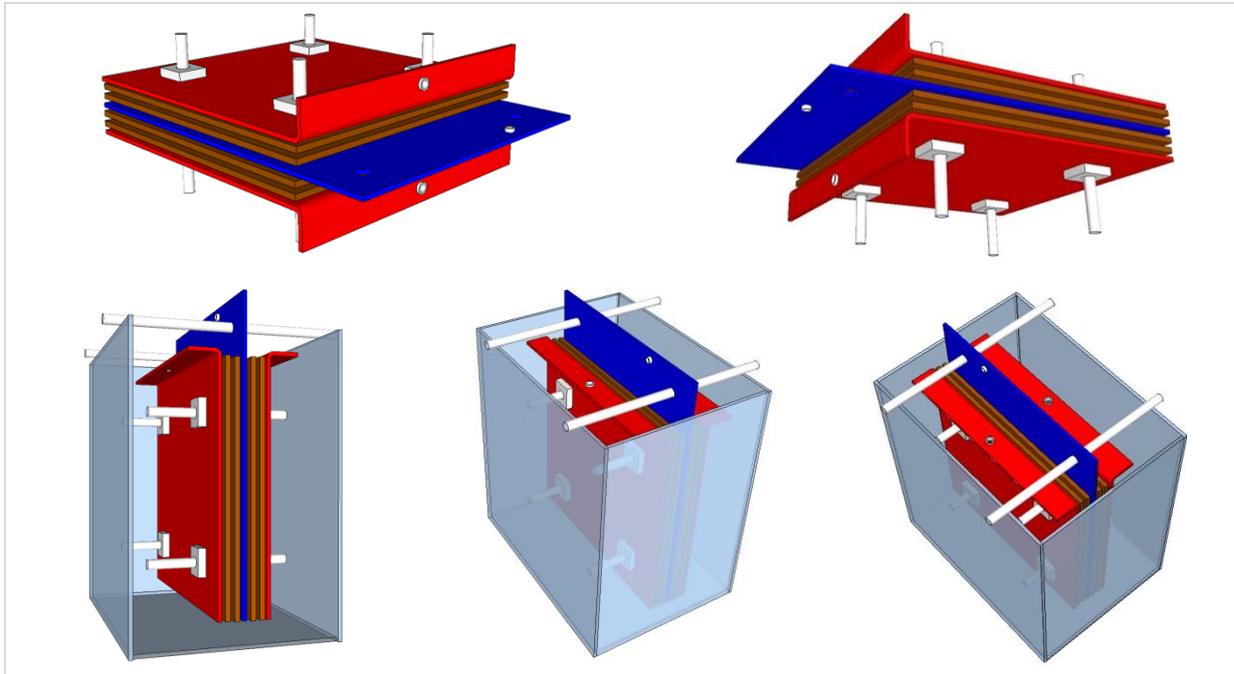


Abbildung 6.1-1: Skizze der Versuchsanordnungen 1 und 2 [eigene Darstellung]

Zur besseren Veranschaulichung der Versuchsanordnungen dienen die nachfolgenden Abbildungen. So zeigt z. B. Abbildung 6.1-2 dreidimensionale Modellierungen der Versuchsanordnungen.



**Abbildung 6.1-2: Dreidimensionale Modellierungen der Versuchsanordnungen 1 und 2 [eigene Darstellung]**



**Abbildung 6.1-3: Photos der Versuchsanordnung 1 (im ersten Prüfgefäß) [eigene Photos]**



**Abbildung 6.1-4: Photos der Versuchsanordnung 2 (im ersten Prüfgefäß) [eigene Photos]**

### 6.1.1 Daten zur Messvorbereitung

In den zwei nachfolgenden Tabellen werden detaillierte Informationen und Zeitdauern für die jeweiligen Arbeitsschritte der Messvorbereitung angeführt.

**Tabelle 6.1-1: Eingestellte Parameter und Zeitdauer der einzelnen Arbeitsschritte für die Messvorbereitung (Versuchsordnung 1)**

<b>VERSUCHSANORDNUNG 1</b>	
<b>Start der Trocknung</b>	
Datum	05.11.2010
Uhrzeit	11 Uhr
Eingestellte Temperatur	105°C
<b>Start Vakuumziehen</b>	
Datum	06.11.2010
Uhrzeit	17 Uhr 45
Eingestellte Temperatur	90°C
Druck	< 1 mbar
<b>Start Imprägnierung</b>	
Datum	08.11.2010
Uhrzeit	11 Uhr
Öl-Typ	Nytro 4000X
Dauer N-Anreicherung (Kanister 1)	10 min
Dauer N-Anreicherung (Kanister 2)	-
Druck	< 1 mbar
<b>Start Vakuumbrechen</b>	
Datum	10.11.2010
Uhrzeit	8 Uhr 10
<b>ENDE der Messvorbereitung</b>	
Datum	11.11.2010
Uhrzeit	12 Uhr 30
Prüfgefäß	(offenes Glasgefäß)

**Tabelle 6.1-2: Eingestellte Parameter und Zeitdauer der einzelnen Arbeitsschritte für die Messvorbereitung (Versuchsordnung 2)**

<b>VERSUCHSANORDNUNG 2</b>	
<b>Start der Trocknung</b>	
Datum	12.11.2010
Uhrzeit	13 Uhr 15
Eingestellte Temperatur	105°C
<b>Start Vakuumziehen</b>	
Datum	13.11.2010
Uhrzeit	15 Uhr
Eingestellte Temperatur	90°C
Druck	< 1 mbar
<b>Start Imprägnierung</b>	
Datum	15.11.2010
Uhrzeit	13 Uhr 45
Öl-Typ	Nytro 4000X
Dauer N-Anreicherung (Kanister 1)	10 min
Dauer N-Anreicherung (Kanister 2)	-
Druck	< 1 mbar
<b>Start Vakuumbrechen</b>	
Datum	16.11.2010
Uhrzeit	11 Uhr 15
<b>ENDE der Messvorbereitung</b>	
Datum	17.11.2010
Uhrzeit	11 Uhr
Prüfgefäß	(offenes Glasgefäß)

### 6.1.2 Frequenzbereichsspektroskopie

In den nachfolgenden Tabellen werden die eingestellten Messparameter, sowie die Messergebnisse für die Versuchsordnung 1 und 2 dargestellt. Als Messapparatur diente das von der Firma Omicron electronics GmbH entwickelte FDS- und PDC-Messgerät namens DIRANA. Anzumerken ist, dass bei den ersten beiden Messungen der Versuchsordnung 1 die FDS- in Verbindung mit der PDC-Messung verwendet wurde. Die restlichen Messungen der Anordnungen 1 und 2 wurden nur

mehr mit der FDS-Methode durchgeführt. Zur Ermittlung der gemessenen Werte wurde die Mess- und Analysesoftware „DIRANA 1.5“, welche zum Lieferumfang des Messgerätes dazugehört, genutzt.

**Tabelle 6.1-3: Eingestellte und gemessene Werte für die FDS-Messmethode, Versuchsanordnung 1 (Messgerät: Omicron DIRANA)**

Messgerät: DIRANA		Versuchsanordnung 1					
Mess.Nr.:	M01	M02	M03	M04	M05	M06	
eingestellt	Messtemperatur:	55°C	34°C	29°C	29°C	23°C	23°C
	Gefäß:	Floatglas	Floatglas	Floatglas	Floatglas	Floatglas	Floatglas
	Art des Prüfobjektes:	Allgemeines Dielektrikum					
	Zusätzliche Schirmung der Leitungen:	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Messmethode:	FDS + PDC	FDS + PDC	FDS	FDS	FDS	FDS
	PDC Umschaltfrequenz	100 mHz	100 mHz	-	-	-	-
	Max. Ausgangsspg. FDS:	100 V	200 V				
	Max. Ausgangsspg. PDC:	100 V	200 V	-	-	-	-
	Rauschunterdrückung FDS:	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
	Frequenzbereich in Hz:	1k – 200µ	1k – 600µ	1k – Abbruch	1k – Abbruch	1k – 5m	1k – 20m
gemessen	Zellulosefeuchtigkeit:	1,0 %	0,9 %	-	-	0,3 %	0,3 %
	Ölleitfähigkeit in fS/m:	2.600	760	-	-	440	660
	Kapazität bei 50Hz in pF:	159,5802	158,5460	158,0816	158,1871	155,0220	153,4580
	Verlustfaktor bei 50Hz:	0,001753	0,001279	0,001200	0,001222	0,000954	0,001965
	Verlauf dargestellt in Abbildung:	6.1-5	6.1-5	-	-	6.1-5	6.1-5

**Tabelle 6.1-4: Eingestellte und gemessene Werte für die FDS-Messmethode, Versuchsanordnung 2 (Messgerät: Omicron DIRANA)**

Messgerät: DIRANA		Versuchsanordnung 2						
Mess.Nr.:	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	
eingestellt	Messtemperatur:	56°C	32°C	25°C	24°C	22°C	22°C	21°C
	Gefäß:	Floatglas						
	Art des Prüfobjektes:	Allgemeines Dielektrikum						
	Zusätzliche Schirmung der Leitungen:	Nein						
	Messmethode:	FDS						
	Max. Ausgangsspg.:	200 V						
	Rauschunterdrückung:	Verbessert						
	Frequenzbereich in Hz:	5k – 300µ	5k – 300µ	5k – 1	5k – 100µ	5k – 300µ	5k - Abbruch	5k – 300µ
gemessen	Zellulosefeuchtigkeit:	0,2 %	0,4 %	0,3 %	1,2 %	-	-	0,3 %
	Ölleitfähigkeit in fS/m:	4.500	1.300	1.000	780	-	-	300
	Kapazität bei 50Hz in pF:	155,9201	155,7290	155,5879	155,6385	157,1252	155,3713	157,2266
	Verlustfaktor bei 50Hz:	0,001221	0,001056	0,001247	0,001217	-	0,000300	-
Verlauf dargestellt in Abbildung:	6.1-6	6.1-6	6.1-6	6.1-6	6.1-6	6.1-6	6.1-6	

Die Messungen M03 und M04 der Versuchsanordnung 1 werden in Abbildung 6.1-5, aufgrund des manuellen Abbruchs des Messvorganges für Messfrequenzen unter ungefähr 20 Hz, nicht dargestellt.

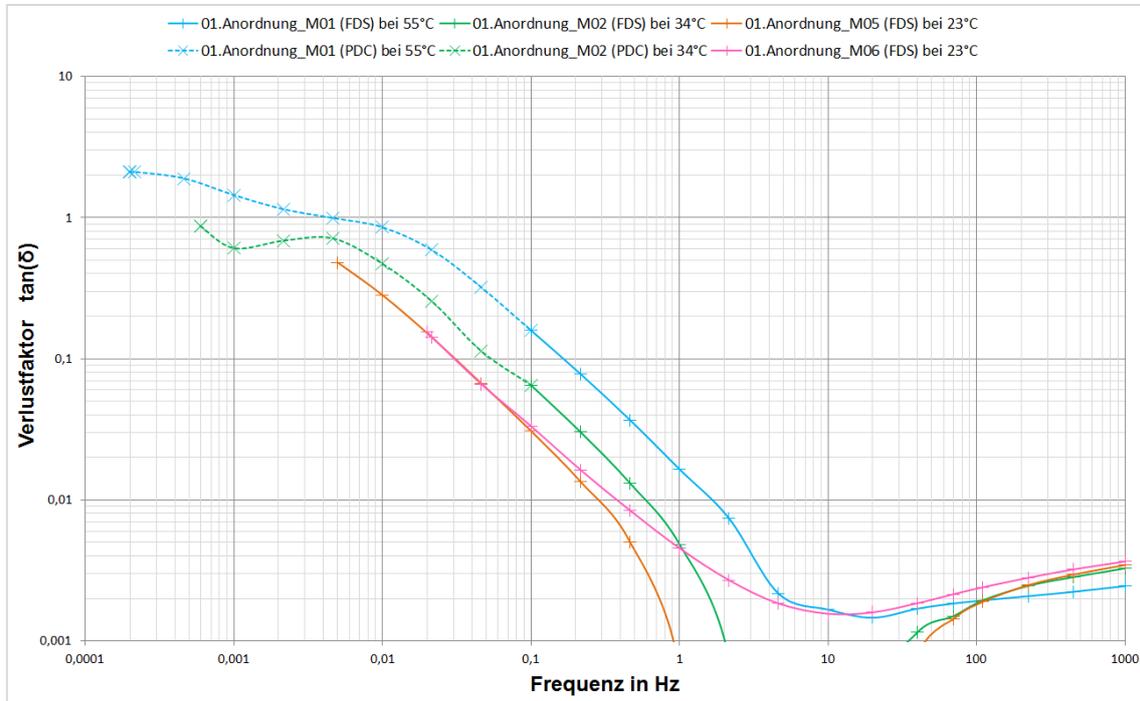


Abbildung 6.1-5: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz für die Versuchsanordnung 1 (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]

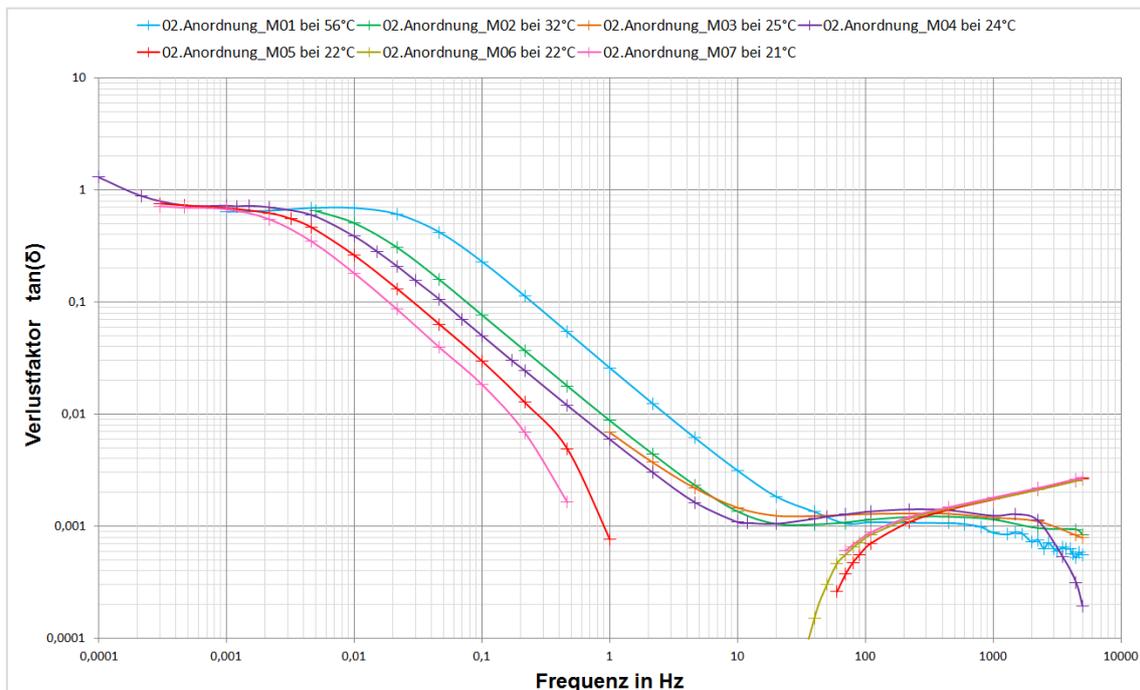


Abbildung 6.1-6: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz mittels FDS-Methode für die Versuchsanordnung 2 (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]

### 6.1.3 Karl-Fischer-Titration

Mit Hilfe der Karl-Fischer-Titration wurde der Wassergehalt im Mineralöl Nynas Nytro 4000X ermittelt. Eine Feststoffanalyse konnte zu diesem Zeitpunkt für die beiden Versuchsanordnungen nicht durchgeführt werden, da die Apparatur noch nicht einsatzbereit war. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Messwerte für die Versuchsanordnung 1, welche direkt nach der Messvorbereitung ermittelt wurden.

**Tabelle 6.1-5: Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Bestimmung des Wassergehaltes des Mineralöls Nytro 4000X – Versuchsanordnung 1 (Messungen nach der Messvorbereitung)**

KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) nach der Messvorbereitung			
11.11.2010	Ent.Temp: <b>30°C</b>	Messtemp: 23°C	
	Drift	Menge	Feuchte
	µg/min	g	ppm
Probe1	-	0,900	6,2
Probe2	-	0,938	6,0
Probe3	-	0,836	5,5
Mittelwert	-	-	<b>5,9</b>

In Tabelle 6.1-6 und Tabelle 6.1-7 werden die ermittelten Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Versuchsanordnung 2 angeführt. Untersucht wurde wiederum das mineralische Isolieröl Nynas Nytro 4000X. Die Messungen wurden vor dem Imprägniervorgang, sowie nach der Messvorbereitung durchgeführt.

**Tabelle 6.1-6: Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Bestimmung des Wassergehaltes des Mineralöls Nytro 4000X – Versuchsanordnung 2 (Messungen vor dem Imprägniervorgang)**

KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) vor dem Imprägniervorgang							
Vor der Stickstoffanreicherung				Nach der Stickstoffanreicherung			
Kanister: 1	Ent.Temp: <b>23°C</b>	Messtemp: 23°C		Kanister: 1	Ent.Temp: <b>21°C</b>	Messtemp: 21°C	
	Drift	Menge	Feuchte		Drift	Menge	Feuchte
	µg/min	g	ppm		µg/min	g	ppm
Probe1	-	0,827	8,3	Probe1	-	0,856	3,2
Probe2	-	0,858	8,4	Probe2	-	0,847	3,5
Probe3	-	0,861	6,7	Probe3	-	0,838	3,8
Probe4	-	0,989	8,2	Probe4	-	0,851	4,1
Mittelwert	-	-	<b>7,9</b>	Mittelwert	-	-	<b>5,45</b>

**Tabelle 6.1-7: Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Bestimmung des Wassergehaltes des Mineralöls Nytro 4000X – Versuchsanordnung 2 (Messungen nach der Messvorbereitung)**

KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) nach der Messvorbereitung													
17.11.2010 13 Uhr		Ent.Temp: <b>40°C</b>		Messtemp: 32°C		17.11.2010 17 Uhr		Ent.Temp: <b>28°C</b>		Messtemp: 28°C			
	Drift		Menge		Feuchte			Drift		Menge		Feuchte	
	µg/min		g		ppm			µg/min		g		ppm	
Probe1	-		0,891		3,3		Probe1	-		0,846		3,4	
Probe2	-		0,860		2,0		Probe2	-		0,868		3,7	
Probe3	-		0,878		3,0		Probe3	-		0,878		4,0	
Probe4	-		0,912		2,7		Probe4	-		0,868		4,0	
Probe5	-		0,836		1,4		Probe5	-		0,77		3,6	
Probe6	-		0,891		2,5		Probe6	-		0,853		3,3	
Mittelwert	-		-		<b>2,48</b>		Mittelwert	-		-		<b>3,67</b>	
18.11.2010 8 Uhr 30		Ent.Temp: <b>21°C</b>		Messtemp: 21°C		25.11.2010 19 Uhr 20		Ent.Temp: <b>21°C</b>		Messtemp: 21°C			
	Drift		Menge		Feuchte			Drift		Menge		Feuchte	
	µg/min		g		ppm			µg/min		g		ppm	
Probe1	-		0,873		4,8		Probe1	1,2		1,3682		4,1	
Probe2	-		0,809		5,2		Probe2	2,1		1,1309		3,2	
Probe3	-		0,869		4,1		Probe3	1,2		0,9371		4,3	
Probe4	-		0,850		4,6		Probe4	1,1		1,1962		4,3	
Probe5	-		0,842		4,9		Probe5	1,0		0,8592		3,7	
Probe6	-		0,830		4,2		Probe6	1,2		1,1276		4,8	
Mittelwert	-		-		<b>4,63</b>		Mittelwert	-		-		<b>4,07</b>	

Im Kapitel 4.2.4 auf Seite 71 wird die Gleichung nach Myers für die Bestimmung der Feuchtigkeit in einer Zellulose mit Hilfe der Ölprobenfeuchtigkeit angegeben. Dabei handelt es sich um die Gleichung 4.2-2. Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten Werte für die Feuchtigkeit in der Zellulose mit Zuhilfenahme der genannten Gleichung. Für die Berechnung wird nur der Mittelwert der gemessenen Feuchtigkeit der jeweiligen Probenentnahmereihe herangezogen.

**Tabelle 6.1-8: Berechnete Feuchtigkeit in der Zellulose (Transformerboard TIV) mittels der Gleichung 4.2-2 mit den Messwerten aus Tabelle 6.1-7**

KARL-FISCHER-TITRATION (Berechnung der Feststofffeuchtigkeit aus der Ölmessung)					
Messung vom		gemessen		berechnet	
		Feuchtigkeit im Öl	Entnahmetemp.	Feuchtigkeit in der Zellulose	
Datum	Uhrzeit	ppm	°C	ppm	%
17.11.2010	13:00	2,48	40	13.224,8	1,32248
17.11.2010	17:00	3,67	28	26.877,6	2,68876
18.11.2010	08:30	4,63	21	40.749,9	4,07499
25.11.2010	19:20	4,07	21	37.432,6	3,74326

## 6.2 Experimentelle Ergebnisse des Hauptversuches (Anordnung 3)

In den nachfolgenden Abschnitten werden Informationen über die Messvorbereitung (von der Trocknung bis zum Zusammenbau der Versuchsanordnung), die eingestellten Messparameter und die ermittelten Messergebnisse angeführt. Die Messungen erfolgten bei den Messtemperaturen 20°C, 50°C und 90°C. Außerdem werden für diese Temperaturen unterschiedliche Messverläufe dargestellt. Neben den Ergebnissen der einzelnen angewendeten Messmethoden, wie der Frequenzbereichsspektroskopie (FDS), der Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC) und der Karl-Fischer-Titration (KFT), werden im letzten Unterabschnitt unter anderem die ermittelten Messergebnisse miteinander verglichen.

Bei dem Aufbau handelt es sich um die Versuchsanordnung 3, welche sich aus dem zweiten Prüfling, sowie dem luftdichten Edelstahl-Prüfgefäß zusammensetzt. Der detailliertere Aufbau bzw. die Anordnung des Prüflings kann aus den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

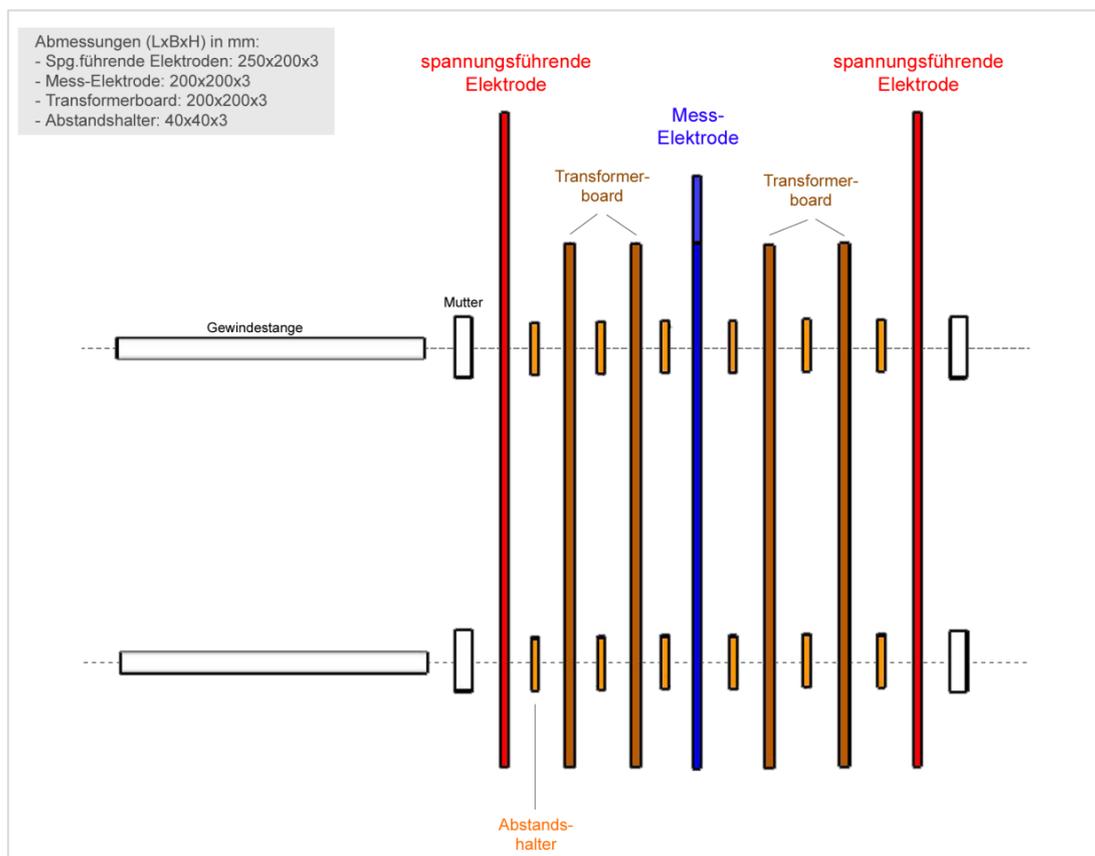
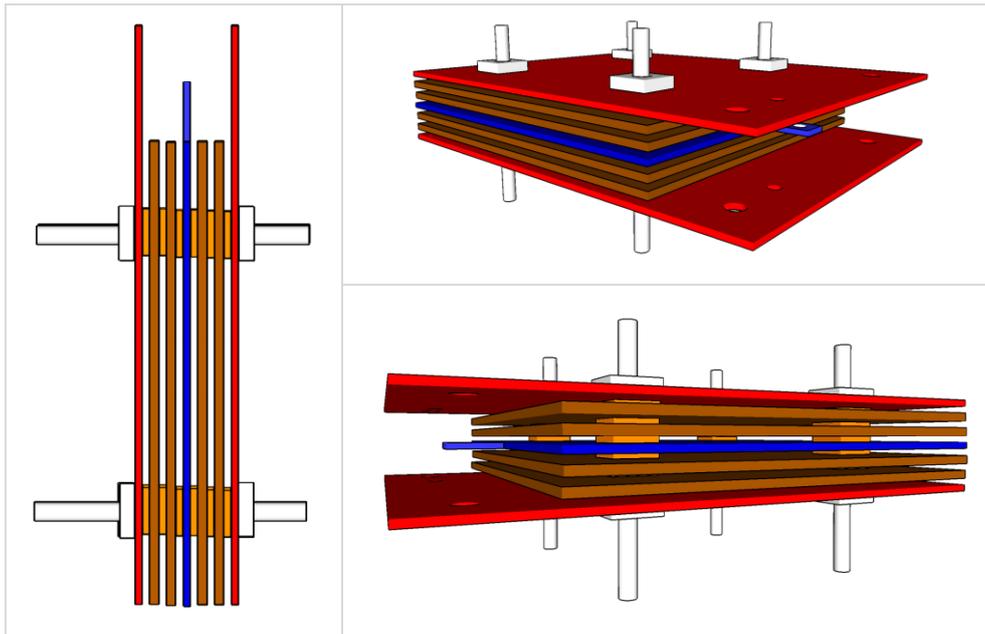
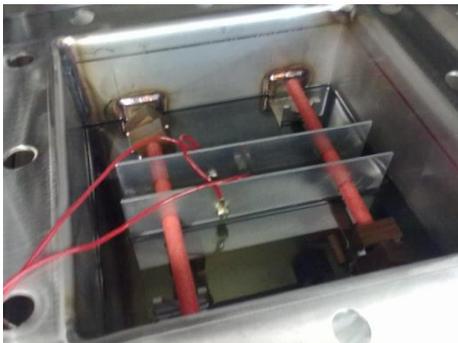


Abbildung 6.2-1: Skizze der Versuchsanordnung 3 [eigene Darstellung]

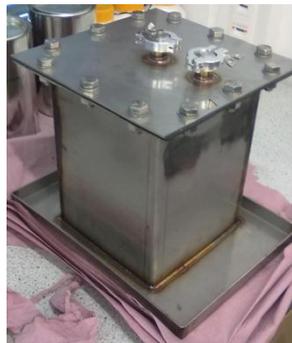


**Abbildung 6.2-2: Weitere modellierte Darstellungen des Prüflings der Versuchsanordnung 3 [eigene Darstellung]**

(Prüfling im Prüfgefäß)



(Prüfgefäß inkl. Prüfling zusammengebaut)



(fertiges Prüfgefäß im Wärmeschrank)



(Messgerät DIRANA, inkl. Abschirmbox der Steckverbindungen der Messgeräte)



(Abschirmbox der Steckverbindungen beim Wärmeschrank)



**Abbildung 6.2-3: Photos der Versuchsanordnung 3 [eigene Photos]**

### 6.2.1 Daten zur Messvorbereitung

Die Messvorbereitung ist einer der wesentlichsten Bestandteile der Messprozedur, denn mit Hilfe der eingestellten Parameter, wie z. B. der Temperatur, sowie den entsprechenden Zeitdauern für die einzelnen Arbeitsschritte, wird der Prüfling für die Messungen unter anderem getrocknet und imprägniert. Nachfolgend werden die detaillierten Informationen für die jeweiligen Arbeitsschritte von der Messvorbereitung angeführt.

**Tabelle 6.2-1: Eingestellte Parameter und Zeitdauer der einzelnen Arbeitsschritte für die Messvorbereitung (Versuchsordnung 3)**

<b>VERSUCHSANORDNUNG 3</b>	
<b>Start der Trocknung</b>	
Datum	11.12.2010
Uhrzeit	10 Uhr 20
Eingestellte Temperatur	110°C
<b>Start Vakuumziehen</b>	
Datum	13.12.2010
Uhrzeit	14 Uhr
Eingestellte Temperatur	105°C
Druck	< 1 mbar
<b>Start Imprägnierung</b>	
Datum	15.12.2010
Uhrzeit	15 Uhr
Öl-Typ	Nytro 4000X
Dauer N-Anreicherung (Kanister 1)	12 min
Dauer N-Anreicherung (Kanister 2)	10 min
Druck	< 1 mbar
<b>Start Vakuumbrechen</b>	
Datum	16.12.2010
Uhrzeit	13 Uhr
<b>ENDE der Messvorbereitung</b>	
Datum	17.12.2010
Uhrzeit	12 Uhr
Prüfgefäß zusammengebaut am	18.12.2010 um 12 Uhr

## 6.2.2 Frequenzbereichsspektroskopie

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse aus der Frequenzbereichsspektroskopie-Analyse (FDS-Analyse) angeführt. In der nachfolgenden Tabelle können die eingestellten Messparameter und die ermittelten Messwerte entnommen werden. Als Messapparatur diente das von der Firma Omicron electronics GmbH entwickelte FDS- und PDC-Messgerät DIRANA. Anzumerken ist, dass bei dieser Messreihe nur die FDS-Funktionalität des Messgerätes genutzt wurde. Zur Ermittlung der gemessenen Werte wurde die Mess- und Analysesoftware „DIRANA 1.5“, welche zum Lieferumfang des Messgerätes dazugehört, verwendet.

**Tabelle 6.2-2: Eingestellte und gemessene Werte für die FDS-Messmethode bei Messtemperaturen von 20°C, 50°C und 90°C (Messgerät: Omicron DIRANA)**

Messgerät: DIRANA		Versuchsanordnung 3							
Mess.Nr.:	M02	M05	M09	M11	M12	M14	M16		
Messtemperatur:	20°C			50°C		90°C			
Gefäß:	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl		
Art des Prüfobjektes:	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum		
Zusätzliche Schirmung der Leitungen:	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
Messmethode:	FDS	FDS	FDS	FDS	FDS	FDS	FDS		
Messdauer (hh:mm:ss):	17:36:06	17:36:06	17:36:06	17:36:06	17:36:06	17:36:06	17:36:06		
Abtastpunkte pro Dekade:	10	10	10	10	10	10	10		
Max. Ausgangsspg. in V:	200	200	200	200	200	200	200		
Rauschunterdrückung:	Verbessert	Verbessert	Verbessert	Verbessert	Verbessert	Verbessert	Verbessert		
Frequenzbereich in Hz:	5k – 100µ	5k – 100µ	5k – 100µ	5k – 100µ	5k – 100µ	5k – 100µ	5k – 100µ		
gemessen	Zellulosefeuchtigkeit in %:	0,8	1,2	1,2	1,1	1,0	0,4	0,4	
	Ölleitfähigkeit in fS/m:	260	240	280	< 10	2.300	8.000	9.500	
	Kapazität bei 50Hz in pF:	149,4671	146,7840	171,3193	244,2844	241,1259	244,3943	243,1572	
	Verlustfaktor bei 50Hz:	0,001909	0,001989	0,002148	0,006196	0,005886	0,006913	0,006952	
Verlauf dargestellt in Abbildung:	6.2-4	6.2-4	6.2-4	6.2-5	6.2-5	6.2-6	6.2-6		
	6.2-7							6.2-7	6.2-7

In den nachfolgenden Abbildungen wird der Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz bei unterschiedlichen Messtemperaturen dargestellt. Zu beachten ist, dass sowohl die Ordinate als auch die Abszisse im logarithmischen Maßstab skaliert ist. Aufgrund der Übersichtlichkeit in den Diagrammen werden maximal drei Messverläufe eingezeichnet.

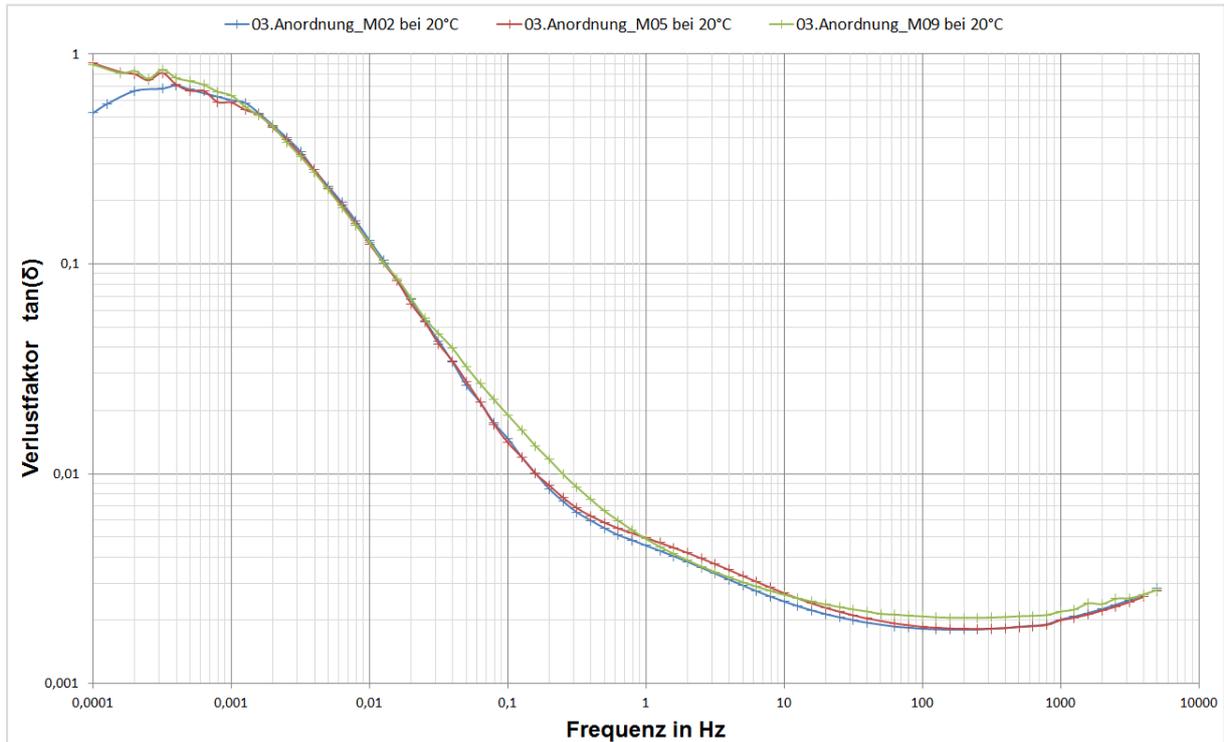


Abbildung 6.2-4: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz bei 20°C mittels FDS-Methode (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]

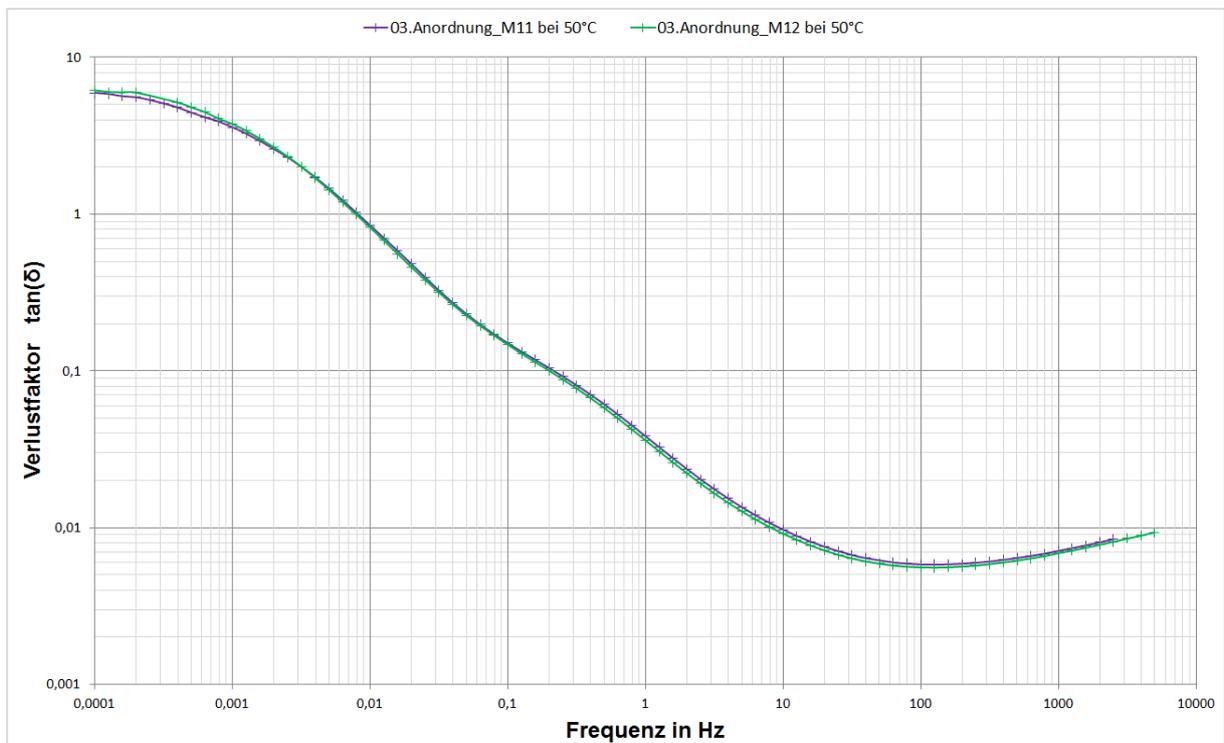


Abbildung 6.2-5: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz bei 50°C mittels FDS-Methode (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]

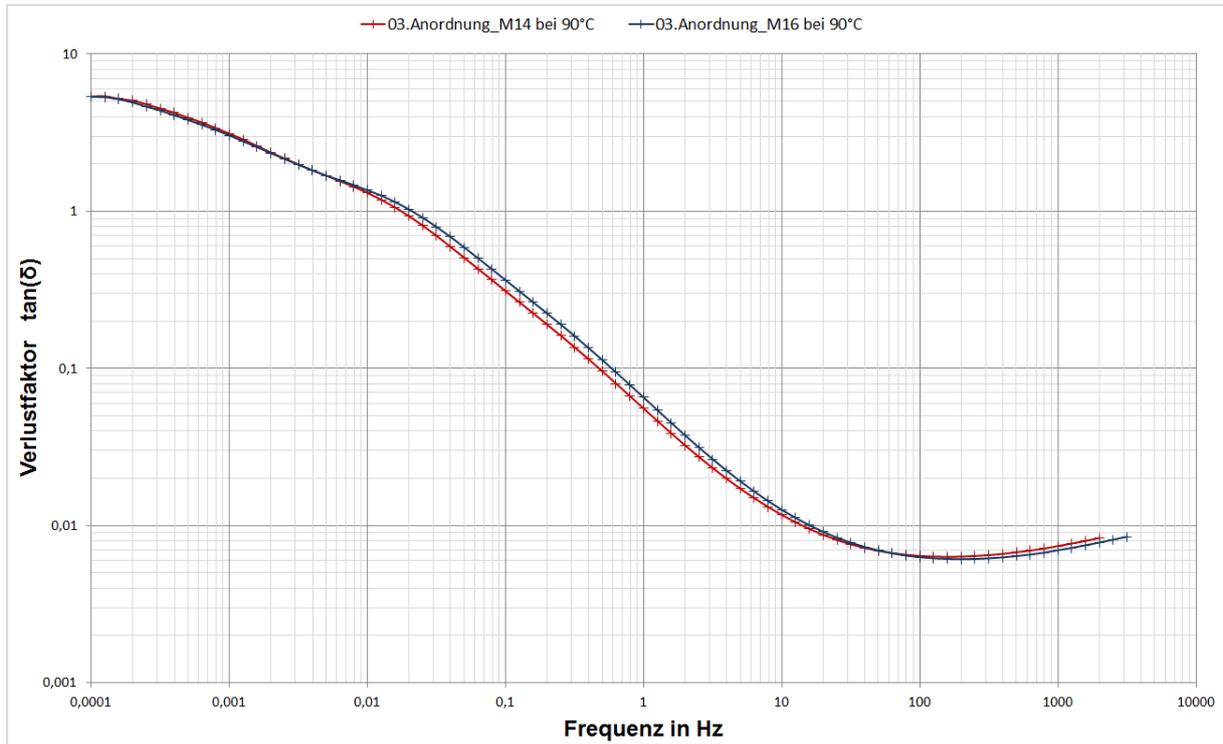


Abbildung 6.2-6: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz bei 90°C mittels FDS-Methode (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]

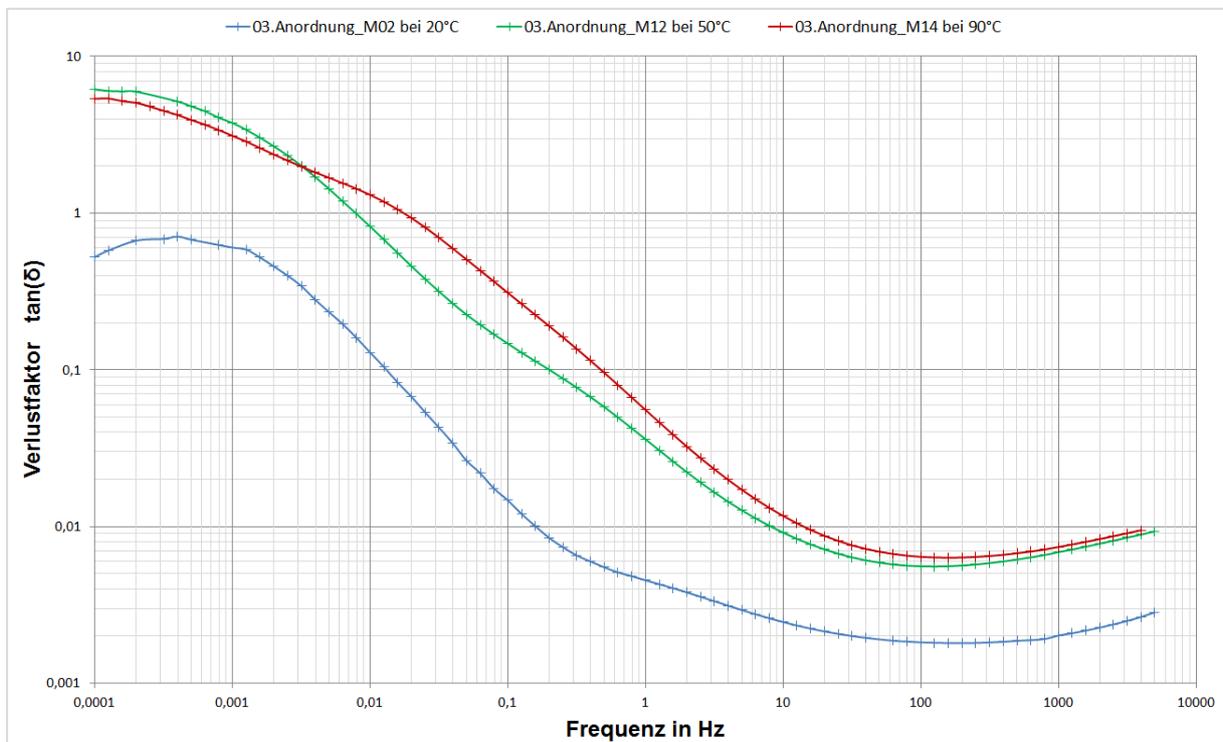


Abbildung 6.2-7: Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz bei 20°C, 50°C und 90°C mittels FDS-Methode (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]

### 6.2.3 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung

In den nachfolgenden Tabellen werden für die PDC-Messmethode die eingestellten Messparameter und die ermittelten Messwerte angeführt. Als Messgerät kam sowohl das Messgerät DIRANA (Tabelle 6.2-3) von der Firma Omicron electronics GmbH, als auch das Messgerät PDC-Analyser-1MOD (Tabelle 6.2-4 und Tabelle 6.2-5) von der Firma ALFF engineering zum Einsatz. Anzumerken ist, dass beim Messgerät DIRANA nur die PDC-Funktionalität genutzt wurde.

Im Anschluss an die drei Tabellen werden die Verläufe für den Polarisations-/ Depolarisationsstrom in Abhängigkeit der Zeit für unterschiedliche Messtemperaturen und Messgeräte dargestellt. Die mit dem Messgerät DIRANA gemessenen Stromwerte wurden bei allen Messverläufen für einen Zeitbereich von jeweils 50 Sekunden arithmetisch gemittelt. Der Grund dafür war, dass die Verläufe teilweise einen großen Streubereich aufwiesen und somit schlecht abzulesen wären (siehe Verlauf M03 in Abbildung 6.2-8). Zu beachten ist, dass sowohl die Ordinate, als auch die Abszisse wiederum im logarithmischen Maßstab skaliert sind und dass, aufgrund der Übersichtlichkeit, abermals maximal drei Messverläufe in einer Abbildung dargestellt werden.

Zur Ermittlung der gemessenen Werte wurde für alle drei nachfolgenden Tabellen die Mess- und Analysesoftware „DIRANA 1.5“ verwendet. Zusätzlich wurde in der Tabelle 6.2-4 und Tabelle 6.2-5 die Analysesoftware „PDC-Evaluation“ von der Firma ALFF engineering für die Bestimmung der Feuchtigkeit in der Zellulose genutzt. Wie man die etwaigen Messwerte mit Hilfe von „Kurven-Fittings“ bzw. Modellkurven ermittelt, wird im Kapitel 5.3 ab Seite 82 erläutert.

Zur Bestimmung der Kapazität bei 50Hz wurde in der Tabelle 6.2 4 und Tabelle 6.2 5 die mitgelieferte Software des PDC-Analyser-1MOD verwendet bzw. wurde dieser Wert am Ende der Messung am Computerbildschirm angezeigt. Der Grund dafür ist, dass die Software „DIRANA 1.5“ diesen Wert nicht ermitteln kann.

**Tabelle 6.2-3: Eingestellte und gemessene Werte für die PDC-Messmethode bei Messtemperaturen von 20°C und 50°C (Messgerät: Omicron DIRANA)**

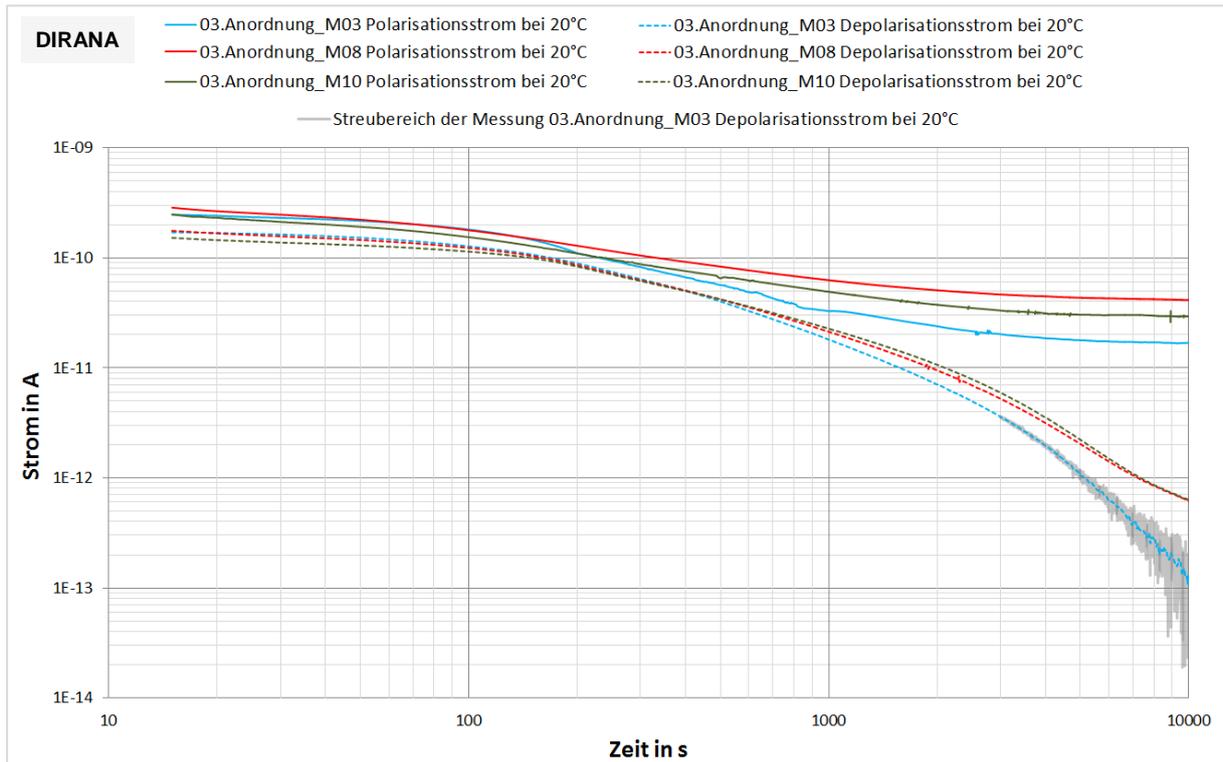
Messgerät: DIRANA		Versuchsanordnung 3				
Mess.Nr.:	M03	M06	M08	M10	M13	
Messtemperatur:	20°C				50°C	
Gefäß:	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	
Art des Prüfobjektes:	Allgemeines Dielektrikum					
Zusätzliche Schirmung der Leitungen:	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	
Messmethode:	PDC	PDC	PDC	PDC	PDC	
Max. Ausgangsspg. in V:	200	200	200	200	200	
Frequenzbereich in Hz:	99m – 50µ					
Polarisationszeit in s:	20.000	20.000	20.000	20.000	10.000	
Depolarisationszeit in s:	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	
<b>Software: DIRANA 1.5</b>						
Zellulosefeuchtigkeit in %:	0,8	0,9	1,2	0,9	0,5	
Ölleitfähigkeit in fS/m:	280	350	240	220	4.000	
Kapazität bei 50Hz in pF:	-	-	-	-	-	
Verlustfaktor bei 50Hz:	-	-	-	-	-	
Verlauf dargestellt in Abbildung:	6.2-8		6.2-8	6.2-8 6.2-9 6.2-14	6.2-9	

**Tabelle 6.2-4: Eingestellte und gemessene Werte für die PDC-Messmethode bei einer Messtemperatur von 20°C (Messgerät: ALFF PDC-Analyser-1MOD)**

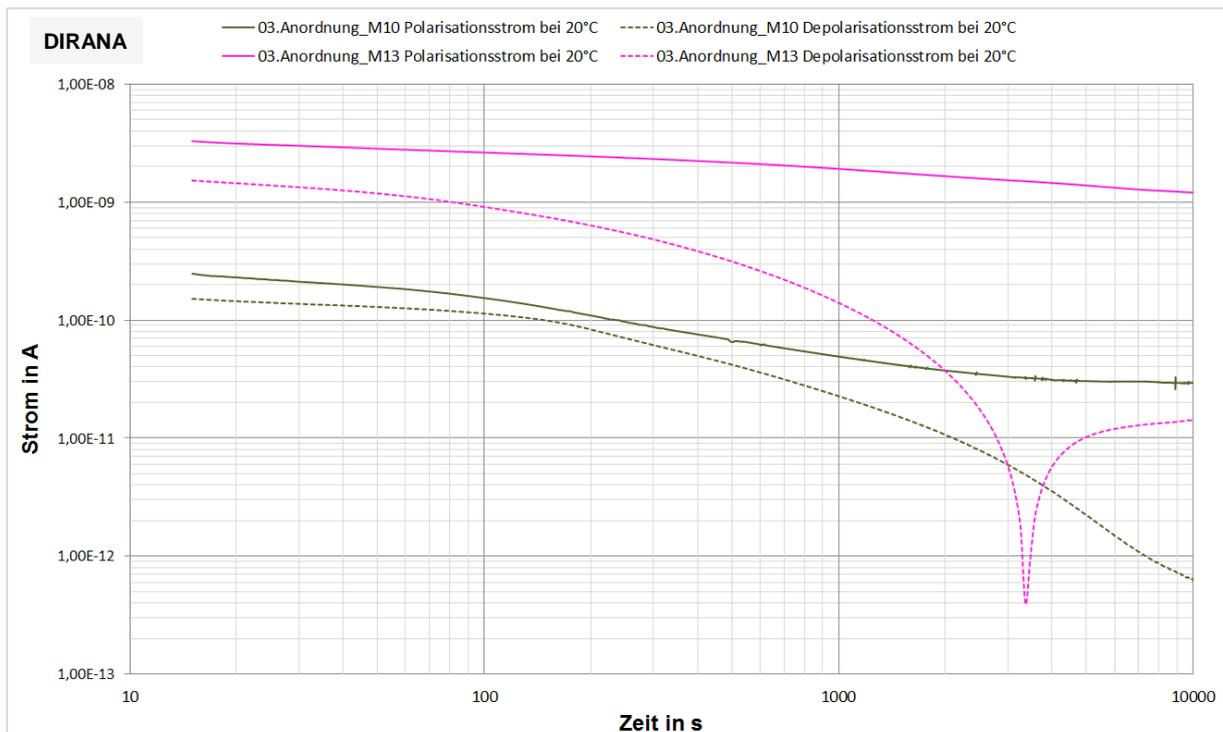
Messgerät: PDC-Analyser-1MOD		Versuchsanordnung 3							
Mess.Nr.:	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	
Messtemperatur:	20°C								
Gefäß:	Edelstahl								
Art des Prüfobjektes:	Allgemeines Dielektrikum								
Zusätzliche Schirmung der Leitungen:	Nein								
Messmethode:	PDC								
Max. Ausgangsspg. in V:	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400	
Polarisationszeit in s:	3.600	10.000	10.000	10.000	10.000	25.000	25.000	50.000	
Depolarisationszeit in s:	3.600	10.000	10.000	10.000	10.000	25.000	25.000	50.000	
<b>Software: DIRANA 1.5</b>									
Zellulosefeuchtigkeit in %:	1,2	0,7	0,7	0,6	0,3	0,3	0,5	0,4	
Ölleitfähigkeit in fS/m:	< 10	< 10	< 10	190	120	120	360	77	
Kapazität bei 50Hz in pF:	137	140	138	138	137	143	138	139	
Verlustfaktor bei 50Hz:	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Software: PDC-Evaluation</b>									
Zellulosefeuchtigkeit in %:	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	
Verlauf dargestellt in Abbildung:						6.2-10	6.2-10	6.2-10 6.2-13 6.2-14	

**Tabelle 6.2-5: Eingestellte und gemessene Werte für die PDC-Messmethode bei Messtemperaturen von 50°C und 90°C (Messgerät: ALFF PDC-Analyser-1MOD)**

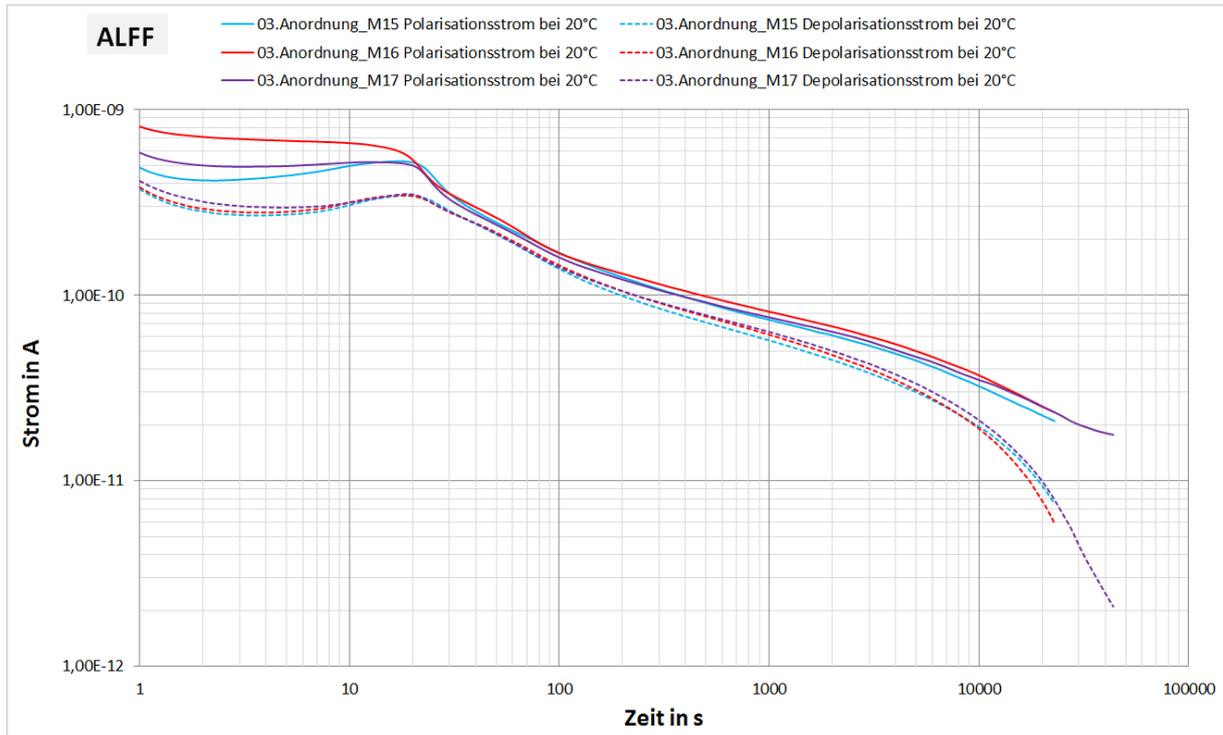
<b>Messgerät: PDC-Analyser-1MOD</b>		<b>Versuchsanordnung 3</b>				
Mess.Nr.:		M07	M08	M09	M05	M06
<b>eingestellt</b>	Messtemperatur:	<b>50°C</b>			<b>90°C</b>	
	Gefäß:	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl
	Art des Prüfobjektes:	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum	Allgemeines Dielektrikum
	Zusätzliche Schirmung der Leitungen:	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Messmethode:	PDC	PDC	PDC	PDC	PDC
	Max. Ausgangsspg. in V:	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400
	Polarisationszeit in s:	3.600	10.000	3.600	3.600	3.600
	Depolarisationszeit in s:	3.600	10.000	3.600	3.600	3.600
<b>gemessen</b>	<b>Software: DIRANA 1.5</b>					
	Zellulosefeuchtigkeit in %:	0,6	0,4	0,7	0,2	0,2
	Ölleitfähigkeit in fS/m:	520	640	310	4.700	4.000
	Kapazität bei 50Hz in pF:	136	145	137	145	137
	Verlustfaktor bei 50Hz:	-	-	-	-	-
	<b>Software: PDC-Evaluation</b>					
	Zellulosefeuchtigkeit in %:	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5
Verlauf dargestellt in Abbildung:	6.2-11	6.2-11 6.2-13	6.2-11	6.2-12	6.2-12 6.2-13	



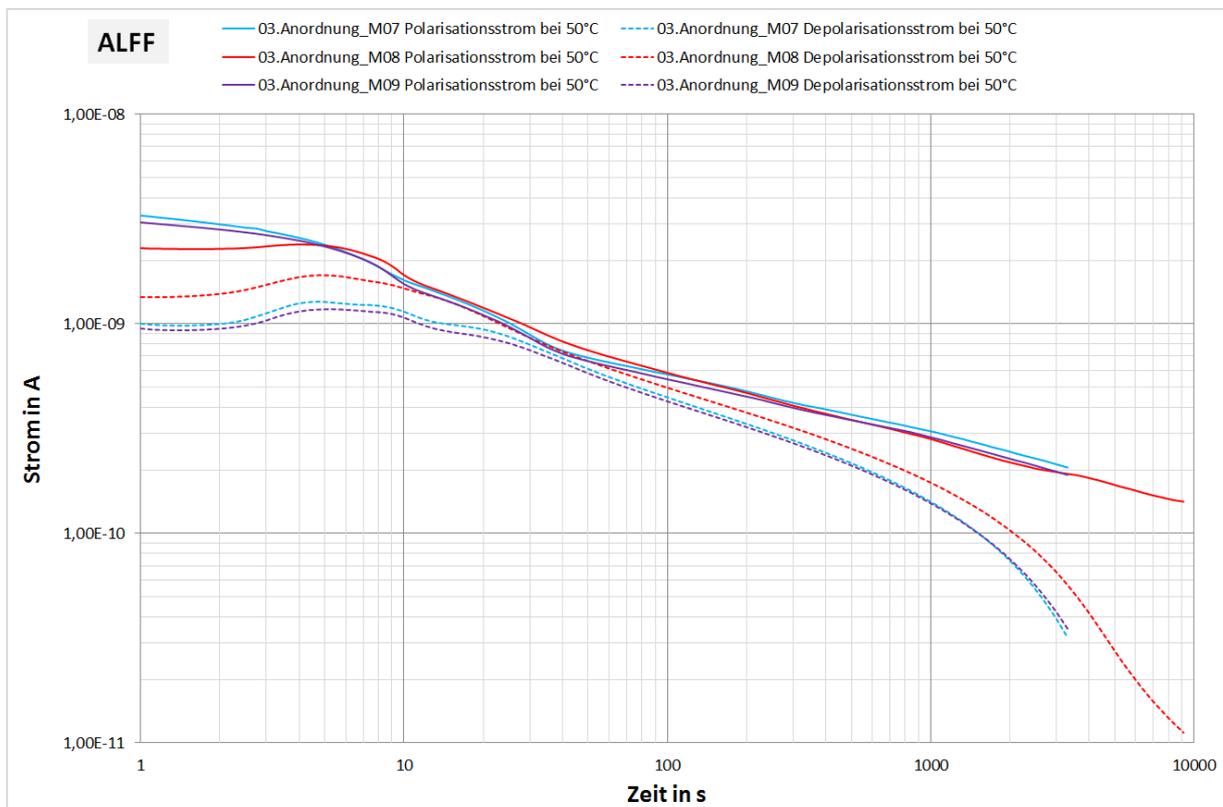
**Abbildung 6.2-8: Polarisations-/Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Zeit bei 20°C mittels PDC-Methode, (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]**



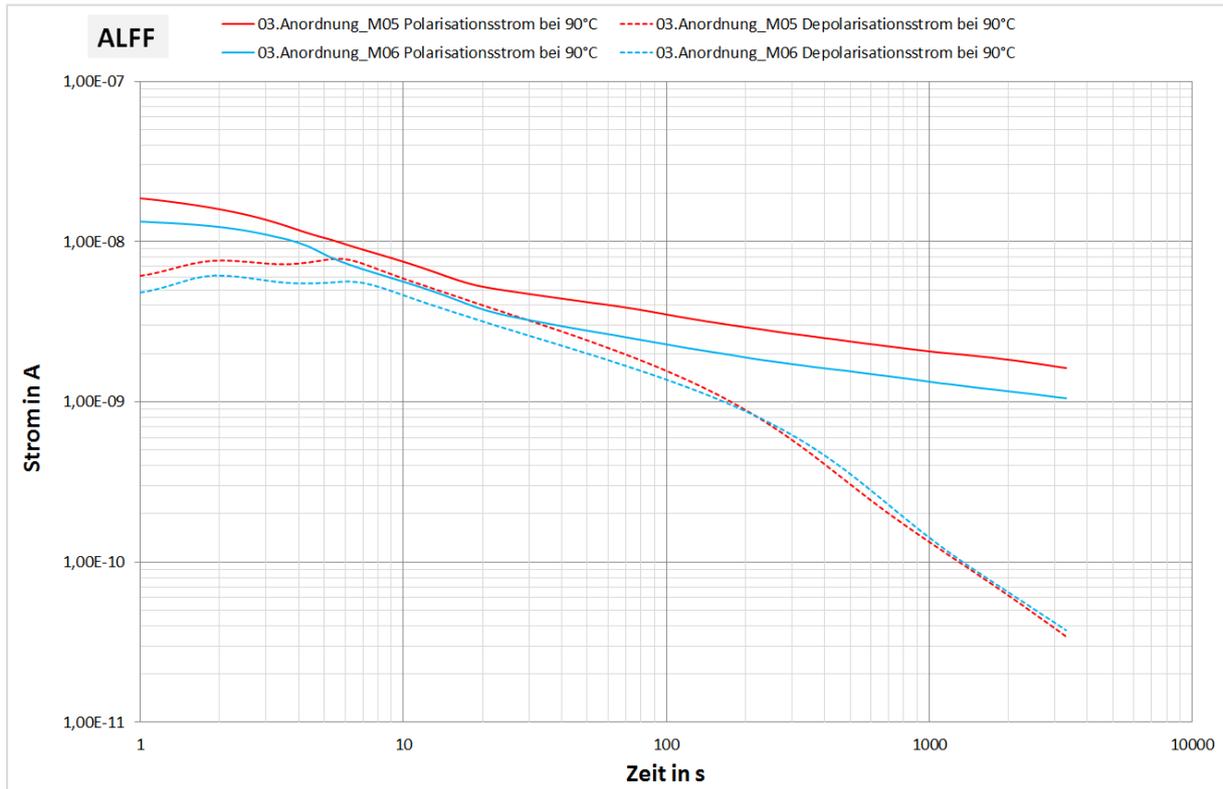
**Abbildung 6.2-9: Polarisations-/Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Zeit bei 20°C und 50°C mittels PDC-Methode (Messgerät: Omicron DIRANA) [eigene Darstellung]**



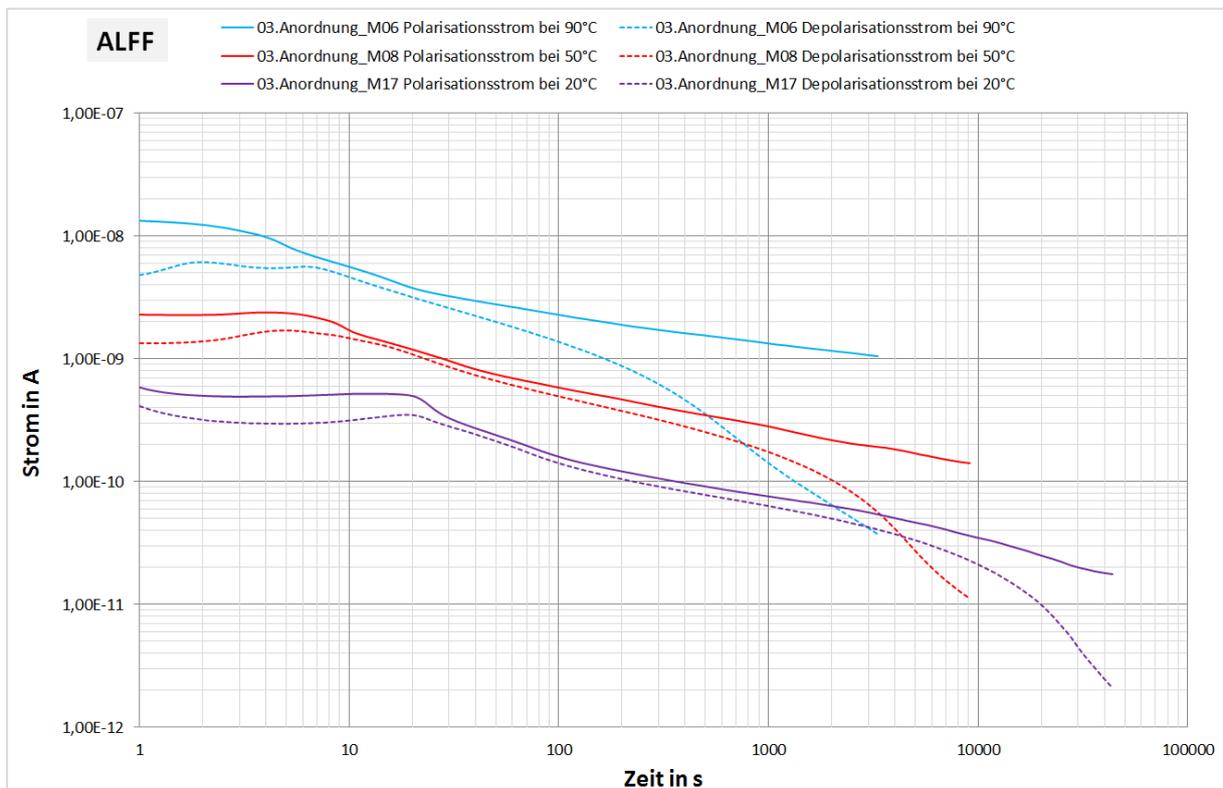
**Abbildung 6.2-10: Polarisations-/Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Zeit bei 20°C mittels PDC-Methode (Messgerät: ALFF PDC-Analyser-1MOD) [eigene Darstellung]**



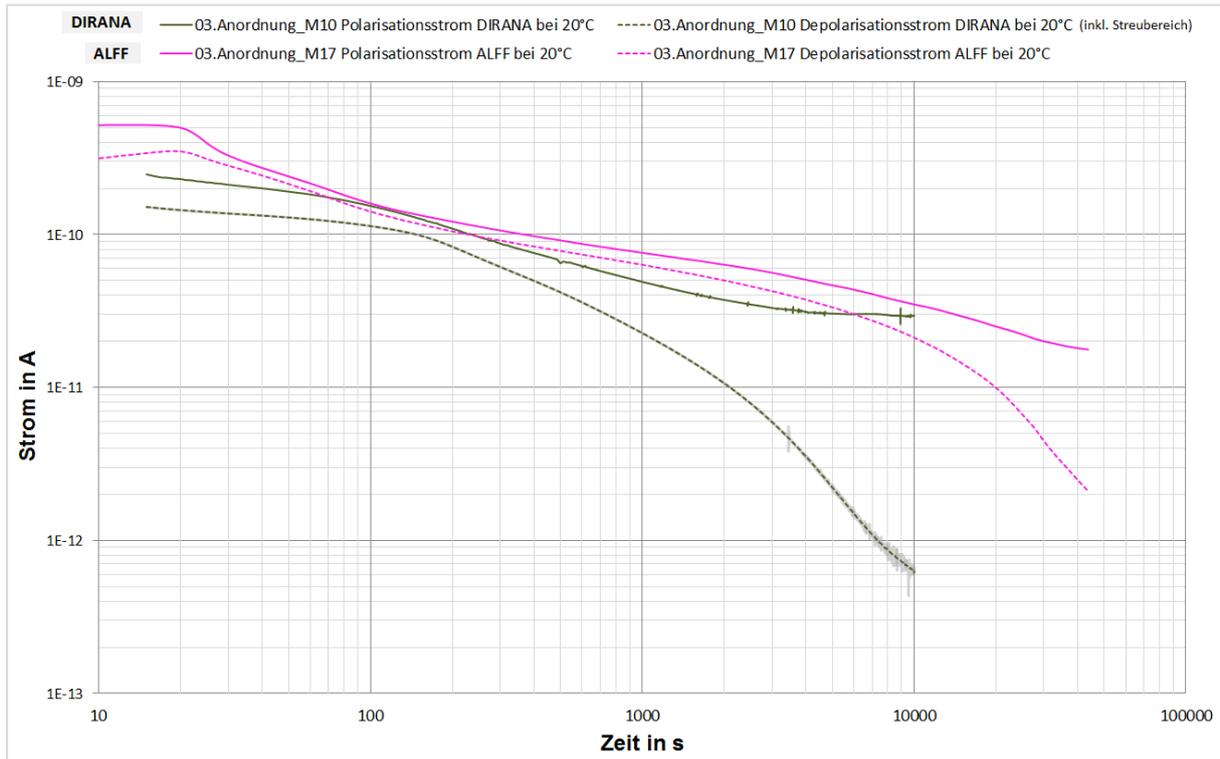
**Abbildung 6.2-11: Polarisations-/Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Zeit bei 50°C mittels PDC-Methode (Messgerät: ALFF PDC-Analyser-1MOD) [eigene Darstellung]**



**Abbildung 6.2-12: Polarisations-/Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Zeit bei 90°C mittels PDC-Methode (Messgerät: ALFF PDC-Analyser-1MOD) [eigene Darstellung]**



**Abbildung 6.2-13: Polarisations-/Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Zeit bei 20°C, 50°C und 90°C mittels PDC-Methode (Messgerät: ALFF PDC-Analyser-1MOD) [eigene Darstellung]**



**Abbildung 6.2-14: Polarisations-/Depolarisationsströme in Abhängigkeit der Zeit bei 20°C mittels PDC-Methode (Messgeräte: DIRANA & PDC-Analyser-1MOD) [eigene Darstellung]**

#### 6.2.4 Karl-Fischer-Titration

Mit Hilfe der Karl-Fischer-Titration wurde der Wassergehalt im Mineralöl Nynas Nytro 4000X und im Feststoff Transformerboard TIV ermittelt. Neben Messungen während der Messvorbereitung war es Hauptbestandteil der Arbeit den Wassergehalt im Mineralöl und im Feststoff bei den Temperaturen 20°C, 50°C und 90°C zu bestimmen.

In Tabelle 6.2-6 wurde der Wassergehalt im Mineralöl vor dem Imprägniervorgang bestimmt. Die Feststoffbestimmung funktionierte zu diesem Zeitpunkt noch nicht. Das Mineralöl wurde aus zwei Kanistern mit jeweils 20 Liter entnommen, da für die Versuchsanordnung knapp mehr als 20 Liter benötigt wurden. Im linken Teil der Tabelle stehen die Messergebnisse vor der Stickstoffanreicherung des Mineralöls, im rechten Teil werden die Messwerte nach der Anreicherung angeführt. Die Zeitdauer für die Stickstoffanreicherung betrug rund 10 Minuten. Nach den Messungen wurde der Prüfling im Vakuumschrank mit dem angereicherten Mineralöl imprägniert.

**Tabelle 6.2-6: Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Bestimmung des Wassergehaltes des Mineralöls Nynas Nytro 4000X (Messung vor dem Imprägniervorgang)**

KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) vor dem Imprägniervorgang							
Vor der Stickstoffanreicherung				Nach der Stickstoffanreicherung			
Kanister: 1	Ent.Temp: 17°C	Messtemp: 25°C		Kanister: 1	Ent.Temp: 17°C	Messtemp: 25°C	
	Drift	Menge	Feuchte		Drift	Menge	Feuchte
	µg/min	g	ppm		µg/min	g	ppm
Probe1	0,5	0,9850	6,2	Probe1	0,5	0,9246	4,5
Probe2	0,6	0,8227	6,0	Probe2	0,6	0,9148	4,2
Probe3	0,4	0,8255	5,8	Probe3	0,6	0,7819	4,0
Probe4	0,6	0,8822	6,0	Probe4	0,7	0,8336	4,1
Probe5	0,5	0,8360	6,2	Probe5	0,6	0,9014	4,2
Probe6	0,6	0,8720	5,6	Probe6	-	-	-
Mittelwert	-	-	<b>5,97</b>	Mittelwert	-	-	<b>4,2</b>

Kanister: 2	Ent.Temp: 16°C	Messtemp: 25°C		Kanister: 2	Ent.Temp: 19°C	Messtemp: 25°C	
	Drift	Menge	Feuchte		Drift	Menge	Feuchte
	µg/min	g	ppm		µg/min	g	ppm
Probe1	0,6	0,8147	5,8	Probe1	0,4	0,9445	4,2
Probe2	0,6	0,8500	5,5	Probe2	0,6	0,8464	4,4
Probe3	0,6	0,8795	5,2	Probe3	0,6	0,8190	4,2
Probe4	0,7	0,8424	5,1	Probe4	0,7	0,8587	4,3
Probe5	0,7	0,8725	5,3	Probe5	0,5	0,8452	4,3
Probe6	-	-	-	Probe6	0,7	0,8916	4,0
Mittelwert	-	-	<b>5,38</b>	Mittelwert	-	-	<b>4,23</b>

In Tabelle 6.2-7 wurde wiederum der Wassergehalt des Mineralöles bestimmt. Die Messung erfolgt nach der Messvorbereitung. Um die Luftdichtheit des Metall-Gefäßes zu überprüfen wurde im Abstand von 16 Tagen die Messung wiederholt. Bei der zweiten Messung (rechte Tabellenhälfte) wurde keine Erhöhung des Wassergehaltes im Mineralöl festgestellt.

**Tabelle 6.2-7: Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Bestimmung des Wassergehaltes des Mineralöls Nynas Nytro 4000X (Messung nach der Messvorbereitung)**

KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) nach der Messvorbereitung							
18.12.2010	Ent.Temp: 31°C	Messtemp: 25°C		03.01.2011	Ent.Temp: 20°C	Messtemp: 25°C	
	Drift	Menge	Feuchte		Drift	Menge	Feuchte
	µg/min	g	ppm		µg/min	g	ppm
Probe1	0,6	0,8468	0,4	Probe1	0,9	0,9418	0,3
Probe2	0,8	0,8641	0,6	Probe2	1,0	0,8513	0,2
Probe3	0,8	0,8166	0,6	Probe3	1,0	0,8405	0,2
Probe4	0,9	0,8561	0,7	Probe4	1,0	0,8386	0,6
Probe5	0,9	0,8485	0,8	Probe5	1,2	0,8435	0,1
Probe6	-	-	-	Probe6	1,2	0,8598	0,7
Mittelwert	-	-	<b>0,62</b>	Mittelwert	-	-	<b>0,35</b>

In der nachfolgenden Tabelle werden die Messergebnisse für die Bestimmung des Wassergehaltes im Mineralöl und im Feststoff angegeben. Die Messungen wurden für die Entnahmetemperaturen von 20°C, 50°C und 90°C durchgeführt. Im Anschluss an die Tabelle werden die verwendeten Berechnungsformeln aus dieser Tabelle angeführt.

**Tabelle 6.2-8: Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Bestimmung des Wassergehaltes im Mineralöl Nynas Nytro 4000X und im Feststoff Transformerboard TIV, bei 20°C, 50°C und 90°C**

KARL-FISCHER-TITRATION (bei verschiedenen Temperaturen)												
FLÜSSIG				FESTSTOFF								
Ent.Temp: 20°C Messtemp: 25°C				Ent.Temp: 20°C Ofen 1h45 vorgeheizt bei 180°C (8l/h Stickstoffstrom)								
gemessen			gemessen				berechnet					
Drift	Menge	Feuchte	Drift	m <sub>1</sub> = m <sub>BÖF</sub>	m <sub>2</sub> = m <sub>BÖ</sub>	m <sub>3</sub> = m <sub>B</sub>	Feuchte	Δm <sub>1-2</sub> = m <sub>F</sub>	Δm <sub>2-3</sub> = m <sub>Ö</sub>	Feuchte		
μg/min	g	ppm	μg/min	g	g	g	ppm	g	g	%		
Probe1	0,8	0,6770	0,7	Probe1	14	0,1300	0,1120	0,1064	3714,6	0,0180	0,0056	0,37146
Probe2	1,2	0,9138	0,9	Probe2	14	0,1229	0,1099	0,1024	4220,1	0,0130	0,0075	0,42201
Probe3	1,1	0,8825	0,5	Probe3	14	0,2238	0,2024	0,1933	4034,7	0,0214	0,0091	0,40347
Probe4	0,9	0,8242	0,7	Probe4	-	-	-	-	-	-	-	-
Probe5	1,1	0,8485	0,7	Probe5	-	-	-	-	-	-	-	-
Probe6	0,9	0,8700	0,5	Probe6	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittelwert	-	-	<b>0,67</b>	Mittelwert	-	<b>0,1589</b>	<b>0,1414</b>	<b>0,1340</b>	<b>3989,8</b>	<b>0,0175</b>	<b>0,0074</b>	<b>0,39898</b>
Ent.Temp: 50°C Messtemp: 25°C				Ent.Temp: 50°C Ofen 5h vorgeheizt bei 180°C (8l/h Stickstoffstrom)								
gemessen			gemessen				berechnet					
Drift	Menge	Feuchte	Drift	m <sub>1</sub> = m <sub>BÖF</sub>	m <sub>2</sub> = m <sub>BÖ</sub>	m <sub>3</sub> = m <sub>B</sub>	Feuchte	Δm <sub>1-2</sub> = m <sub>F</sub>	Δm <sub>2-3</sub> = m <sub>Ö</sub>	Feuchte		
μg/min	g	ppm	μg/min	g	g	g	ppm	g	g	%		
Probe1	5,7	0,7982	0,9	Probe1	37	0,1061	0,0971	0,0933	1842,6	0,0090	0,0038	0,18426
Probe2	5,6	0,8710	0,7	Probe2	33	0,2233	0,2051	0,1992	1474,2	0,0182	0,0059	0,14742
Probe3	5,6	0,8325	1,1	Probe3	36	0,1295	0,1163	0,1073	2287,3	0,0132	0,0090	0,22873
Probe4	6,0	0,7885	1,3	Probe4	-	-	-	-	-	-	-	-
Probe5	5,7	0,9150	0,9	Probe5	-	-	-	-	-	-	-	-
Probe6	5,8	0,8567	1,0	Probe6	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittelwert	-	-	<b>0,98</b>	Mittelwert	-	<b>0,1530</b>	<b>0,1412</b>	<b>0,1359</b>	<b>1868,03</b>	<b>0,0118</b>	<b>0,0053</b>	<b>0,186803</b>
Ent.Temp: 90°C Messtemp: 25°C				Ent.Temp: 90°C Ofen 1h45 vorgeheizt bei 180°C (8l/h Stickstoffstrom)								
gemessen			gemessen				berechnet					
Drift	Menge	Feuchte	Drift	m <sub>1</sub> = m <sub>BÖF</sub>	m <sub>2</sub> = m <sub>BÖ</sub>	m <sub>3</sub> = m <sub>B</sub>	Feuchte	Δm <sub>1-2</sub> = m <sub>F</sub>	Δm <sub>2-3</sub> = m <sub>Ö</sub>	Feuchte		
μg/min	g	ppm	μg/min	g	g	g	ppm	g	g	%		
Probe1	1,8	0,8515	3,9	Probe1	35	0,1989	0,1877	0,1804	2068,5	0,0112	0,0073	0,20685
Probe2	1,6	0,8419	3,1	Probe2	34	0,1364	0,1198	0,1114	2478,0	0,0166	0,0084	0,24780
Probe3	2,1	0,8009	3,5	Probe3	37	0,1323	0,1221	0,1194	1963,0	0,0102	0,0027	0,19630
Probe4	2,1	0,9170	3,7	Probe4	35	0,1446	0,1238	0,1193	2997,2	0,0208	0,0045	0,29972
Probe5	1,6	0,8637	3,9	Probe5	-	-	-	-	-	-	-	-
Probe6	1,9	0,8855	3,7	Probe6	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittelwert	-	-	<b>3,63</b>	Mittelwert	-	<b>0,1531</b>	<b>0,1384</b>	<b>0,1326</b>	<b>2376,68</b>	<b>0,0147</b>	<b>0,0057</b>	<b>0,237668</b>

m<sub>BÖF</sub>... Masse Board-Öl-Wasser  
m<sub>BÖ</sub>... Masse Board-Öl

m<sub>B</sub>... Masse Board  
m<sub>F</sub>... Masse Wasser

m<sub>Ö</sub>... Masse Öl

$$\text{Masse Board-Öl-Wasser: } m_{B\ddot{O}F} = m_1 \quad 6.2-1$$

$$\text{Masse Board-Öl: } m_{B\ddot{O}} = m_2 \quad 6.2-2$$

$$\text{Masse Board: } m_B = m_3 \quad 6.2-3$$

$$\text{Masse des Wassers: } m_F = \Delta m_{1-2} = m_1 - m_2 = m_{B\ddot{O}F} - m_{B\ddot{O}} \quad 6.2-4$$

$$\text{Masse des Isolieröls: } m_{\ddot{O}} = \Delta m_{2-3} = m_2 - m_3 = m_{B\ddot{O}} - m_B \quad 6.2-5$$

$$\text{Feuchte in \%: } \text{Feuchte [\%]} = \frac{\text{Feuchte [ppm]}}{10.000} \quad 6.2-6$$

$m_{B\ddot{O}F}$ .... Masse Board-Öl-Wasser [g]	$m_F$ .... Masse des Wassers [g]
$m_{B\ddot{O}}$ .... Masse Board-Öl [g]	$m_{\ddot{O}}$ .... Masse des Isolieröls [g]
$m_B$ .... Masse Board [g]	Feuchte.... Wassergehalt in der Probe

Im Kapitel 4.2.4 auf Seite 71 wird Gleichung (Gl. 4.2-2) nach Myers für die Bestimmung der Feuchtigkeit in einer Zellulose mit Hilfe der Ölprobenfeuchtigkeit angegeben. Außerdem ist es möglich, mittels den sogenannten Gleichgewichtskurven, wie z. B. von Oommen, ebenfalls aus der Ölprobenfeuchtigkeit die Zellulosefeuchtigkeit zu bestimmen (siehe Abbildung 6.2-19 auf Seite 127). Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten Werte für die Feuchtigkeit in der Zellulose mit Zuhilfenahme der genannten Gleichung, sowie die ermittelte Zellulosefeuchtigkeit aus den Gleichgewichtskurven.

**Tabelle 6.2-9: Berechnete Feuchtigkeit in der Zellulose (Transformerboard TIV) mittels der gemessenen Ölfeuchtigkeit aus Tabelle 6.2-8**

<b>KARL-FISCHER-TITRATION</b> (Berechnung der Feststofffeuchtigkeit aus der Ölmessung)			
Messung mit der Entnahmetemperatur von	gemessen	berechnet	
	Feuchtigkeit im Öl	Feuchtigkeit in der Zellulose	
		nach Gleichung 4.2-2 (Myers)	aus der Gleichgewichtskurve nach Oommen (Abb. 6.2-19)
ppm	%	%	
20°C	0,67	1,18438	0,78
50°C	0,98	0,49267	0,31
90°C	3,63	0,25953	0,22

### 6.2.5 Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Messmethoden

Für eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Ergebnisse werden in diesem Unterabschnitt diese entsprechend gegenübergestellt. In den nachfolgenden drei Abbildungen (6.2-15 bis 6.2-17) werden unter anderem die Ergebnisse für die Zellulosefeuchtigkeit der angewendeten Messmethoden für die Versuchsanordnung 3 dargestellt. Die Einteilung der drei Abbildungen erfolgt nach den unterschiedlichen Messtemperaturen (20°C, 50°C und 90°C). Eine Erläuterung zu den Messwerten „KFT, Oommen“ ist in Abbildung 6.2-19 ersichtlich. In Abbildung 6.2-18 erfolgt die Darstellung der unterschiedlichen Ergebnisse für die Zellulosefeuchtigkeit der jeweiligen verwendeten Methoden in Abhängigkeit der Messtemperatur. Dargestellt werden die arithmetisch gemittelten Ergebnisse für die jeweilige Methode und Messtemperatur. Anzumerken ist, dass diese berechneten Werte auf die zweite Kommastelle gerundet wurden. Die nachfolgende Gleichung zeigt exemplarisch die Formel für die Mittelwertberechnung.

$$\text{Arithmetischer Mittelwert: } \bar{w}_M(\text{Temp, Methode}) = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{6.2-7}$$

n... Anzahl der Werte (bei der entsprechenden Temperatur und Methode)  
 $x_i$ ... Messergebnis der i-ten Einzelmessung  
 $\bar{w}_M$ ... Wassergehalt für die Messreihe (für die entsprechenden Temperatur und Methode)

Anhand der nachfolgenden mathematischen Berechnung wird die Ermittlung des arithmetischen Mittelwerts anhand eines Beispiels erläutert. Für die Berechnung wurden die Messwerte aus Tabelle 6.2-4 entnommen. Bei der Tabelle handelt es sich um die Messreihe für die PDC-Analyse bei 20°C mit dem Messgerät PDC-Analyser-1MOD. Die genauen Wertetabellen für die nachfolgenden Abbildungen können im Anhang ab Seite 161 aus dem Abschnitt E.1 entnommen werden.

*Beispiel für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts (für Abbildung 6.2-15):*

$$\begin{aligned} \bar{w}_M(20^\circ\text{C}, \text{PDC}_{\text{Analyser-1MOD}}) &= \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{8} * \sum_{i=1}^8 x_i = \\ &= \frac{1}{8} * \sum_{i=1}^8 (1,2 + 0,7 + 0,7 + 0,6 + 0,3 + 0,3 + 0,5 + 0,4) = \\ &= \frac{1}{8} * 4,7 = 0,5875 \cong 0,59 \end{aligned}$$

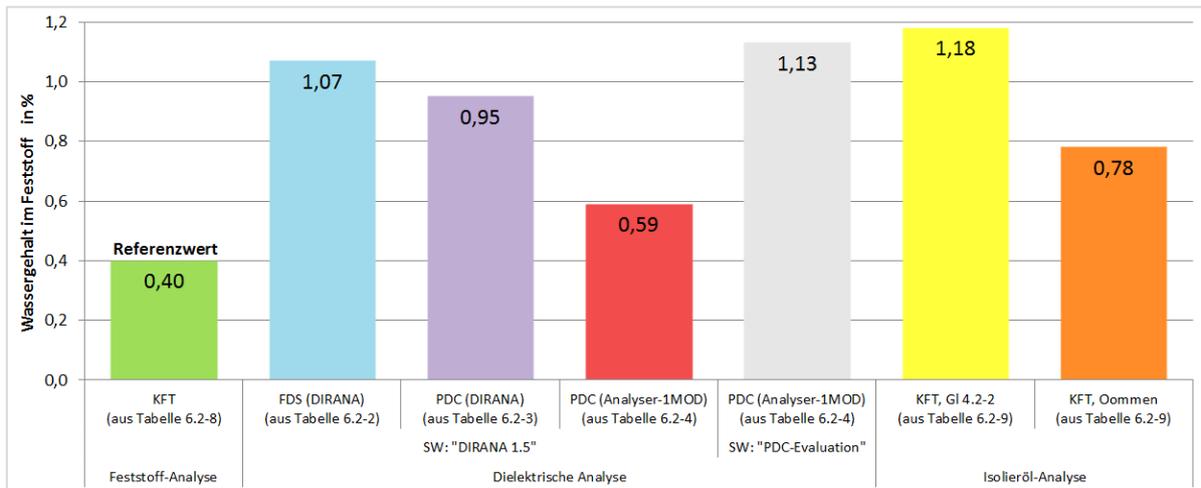


Abbildung 6.2-15: Vergleich der verschiedenen Messmethodenergebnisse für den Wassergehalt in der Zellulose bei einer Messtemperatur von 20°C [eigene Darstellung]

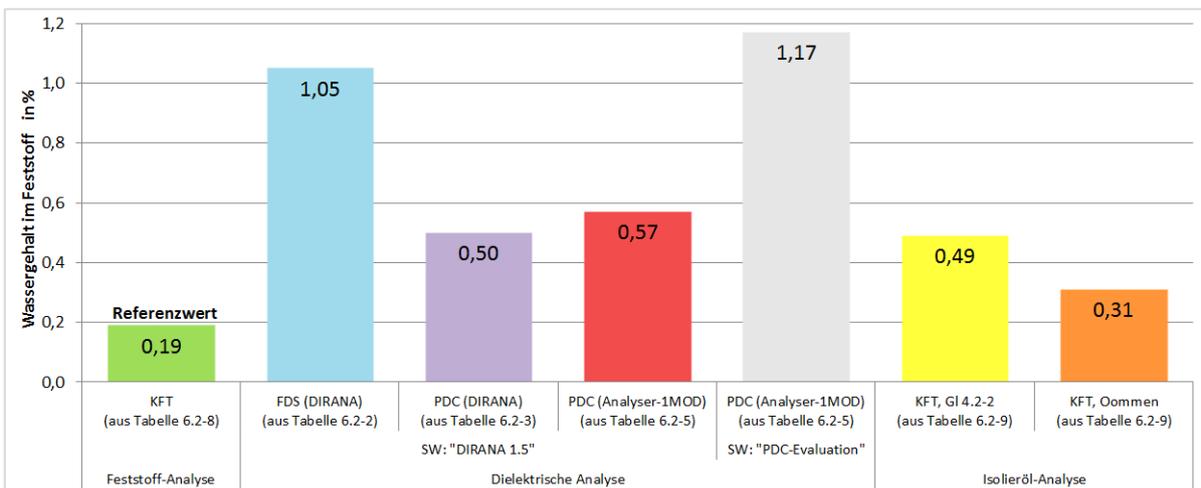


Abbildung 6.2-16: Vergleich der verschiedenen Messmethodenergebnisse für den Wassergehalt in der Zellulose bei einer Messtemperatur von 50°C [eigene Darstellung]

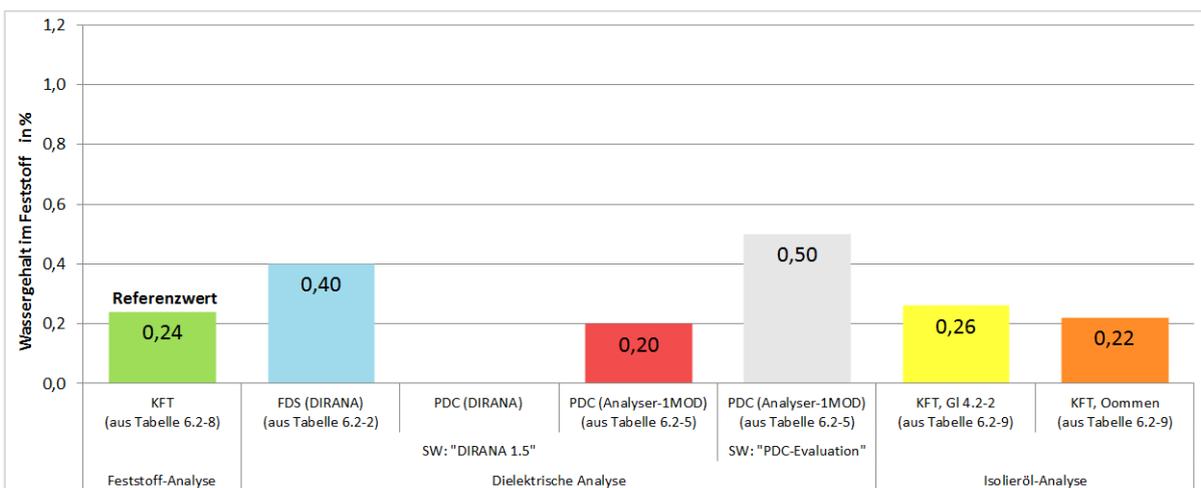


Abbildung 6.2-17: Vergleich der verschiedenen Messmethodenergebnisse für den Wassergehalt in der Zellulose bei einer Messtemperatur von 90°C [eigene Darstellung]

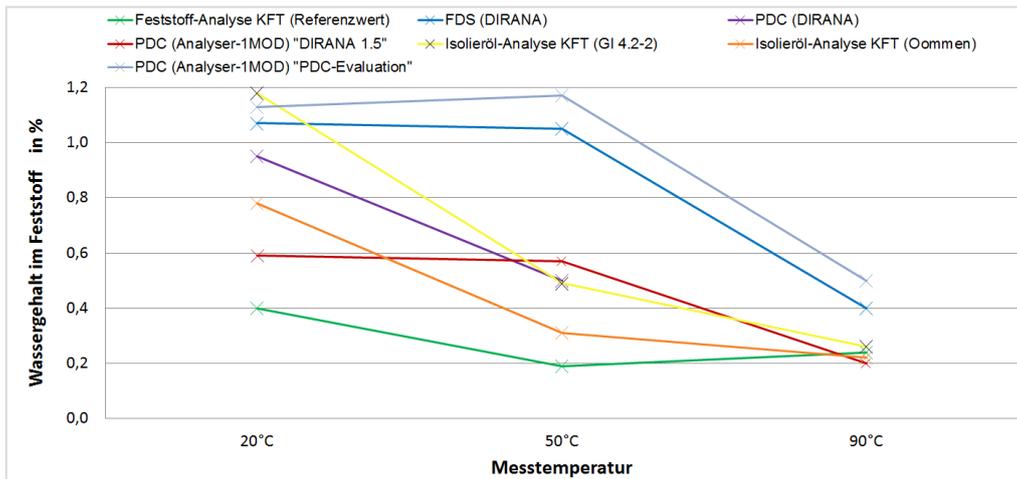


Abbildung 6.2-18: Vergleich des Wassergehaltes bei verschiedenen Messtemperaturen durch Bestimmung von unterschiedlichen Messmethoden [eigene Darstellung]

Abbildung 6.2-19 zeigt die Gleichgewichtskurven nach Oommen für die Temperaturen 20°C, 50°C und 90°C. Außerdem sind in dieser Abbildung die mittels der KFT gemessenen Werte für die Ölfeuchtigkeit (bei 20°C und 50°C) eingezeichnet. Weiters sind zu diesen Ölfeuchtigkeitswerten die daraus berechneten Zellulosefeuchtigkeitswerte (nach Gl. 4.2-2), sowie die aus den Gleichgewichtskurven ermittelten Werte eingetragen. Die entsprechenden Mess- und Berechnungswerte können aus Tabelle 6.2-8 bzw. Tabelle 6.2-9 ab Seite 123 entnommen werden. Die Gleichgewichtskurven nach Oommen basieren auf den Erläuterungen und Berechnungsformeln in [87].

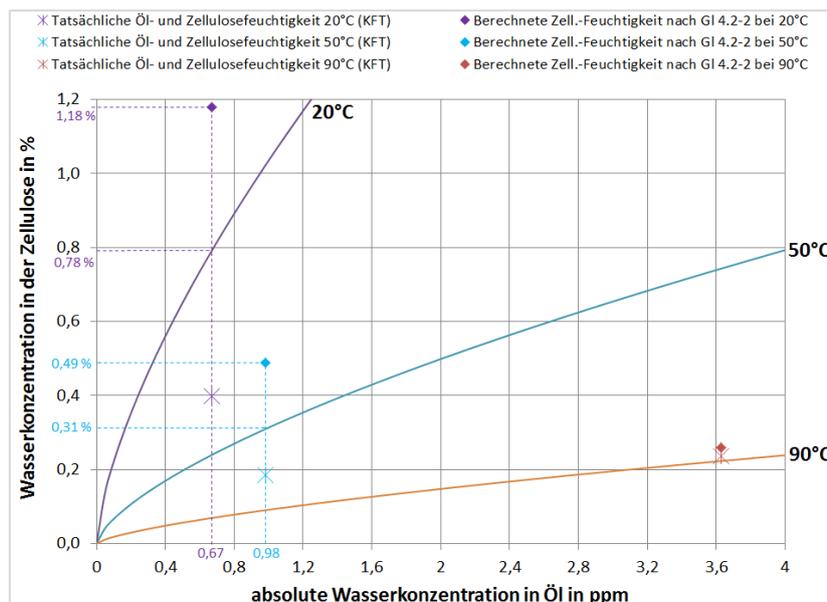
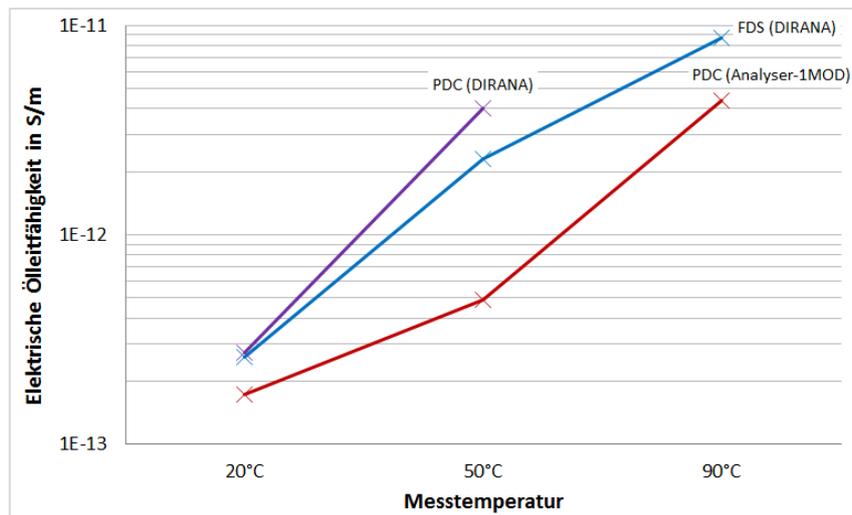


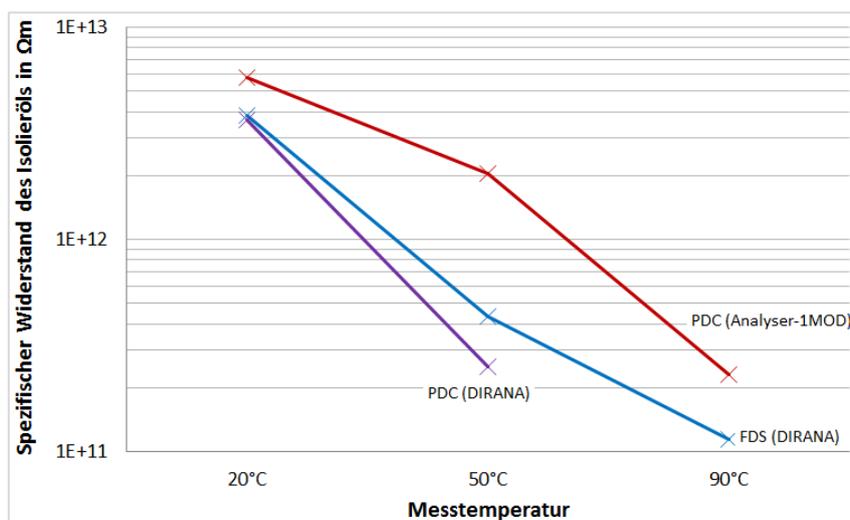
Abbildung 6.2-19: Gleichgewichtskurven nach Oommen für 20°C, 50°C und 90°C, sowie eingezeichnete Messwerte aus der KFT für die Isolieröl- und Feststoffanalyse [eigene Darstellung]

In der nachfolgenden Abbildung wird die elektrische Ölleitfähigkeit in Abhängigkeit der Messtemperatur dargestellt. Die Werte wurden mit Hilfe der elektrischen Messmethoden ermittelt und können aus Tabelle 6.2-2 bis Tabelle 6.2-5 entnommen werden. In dieser Abbildung wurden wiederum die Werte über die arithmetische Mittelwertbildung aus den jeweiligen Messreihen bestimmt.



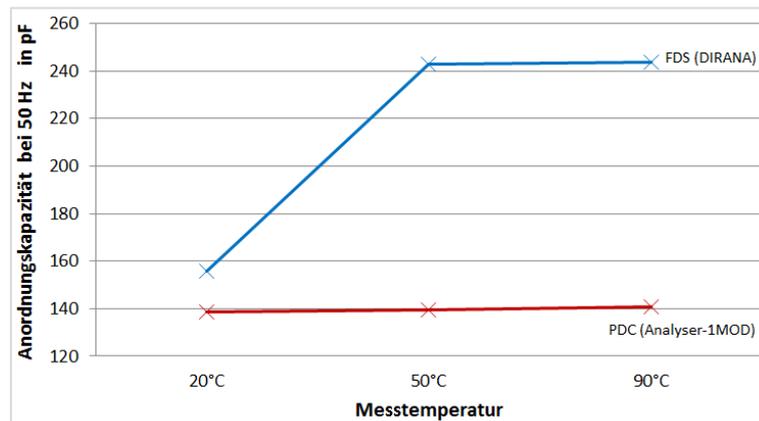
**Abbildung 6.2-20: Vergleich der elektrischen Ölleitfähigkeit bei verschiedenen Messtemperaturen durch Bestimmung von unterschiedlichen Messmethoden [eigene Darstellung]**

Abbildung 6.2-21 zeigt den spezifische Widerstand des Isolieröls in Abhängigkeit der Messtemperatur. Grundsätzlich gilt, dass der spezifische Widerstand der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit ist (siehe diesbezüglich Gleichung 3.1-1 auf Seite 33).



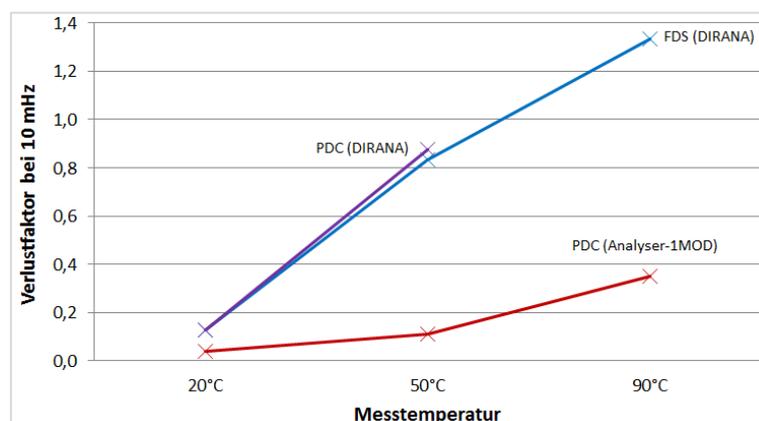
**Abbildung 6.2-21: Vergleich des spezifischen Widerstandes des Isolieröls bei verschiedenen Messtemp. durch Bestimmung von unterschiedlichen Messmethoden [eigene Darstellung]**

In der nachfolgenden Abbildung wird die gemessene Anordnungskapazität bei 50 Hz für die unterschiedlichen Messtemperaturen dargestellt. Anzumerken ist, dass für die PDC-Messung mit dem Messgerät DIRANA kein Kapazitätswert bei 50 Hz ermittelt werden konnte. Die eingetragenen Werte sind ganzzahlig gerundete arithmetische Mittelwerte der jeweiligen Messreihe.

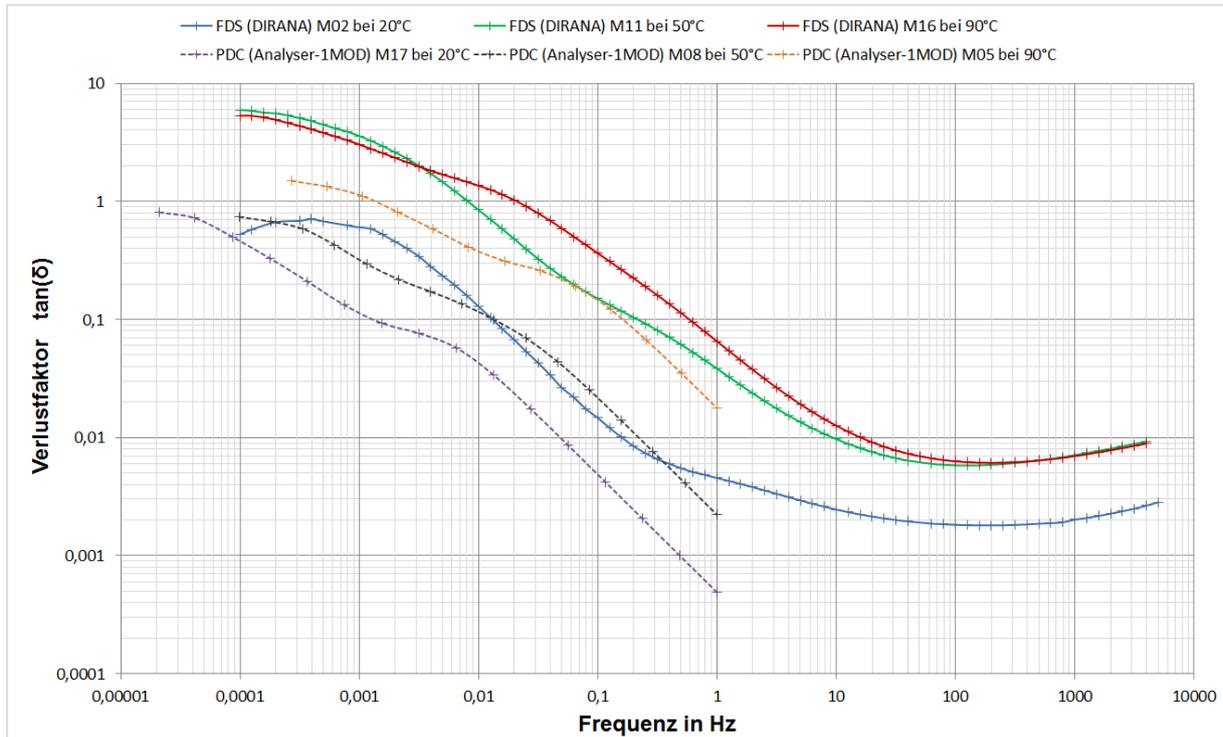


**Abbildung 6.2-22: Vergleich der Anordnungskapazität bei verschiedenen Messtemperaturen durch Bestimmung von unterschiedlichen Messmethoden [eigene Darstellung]**

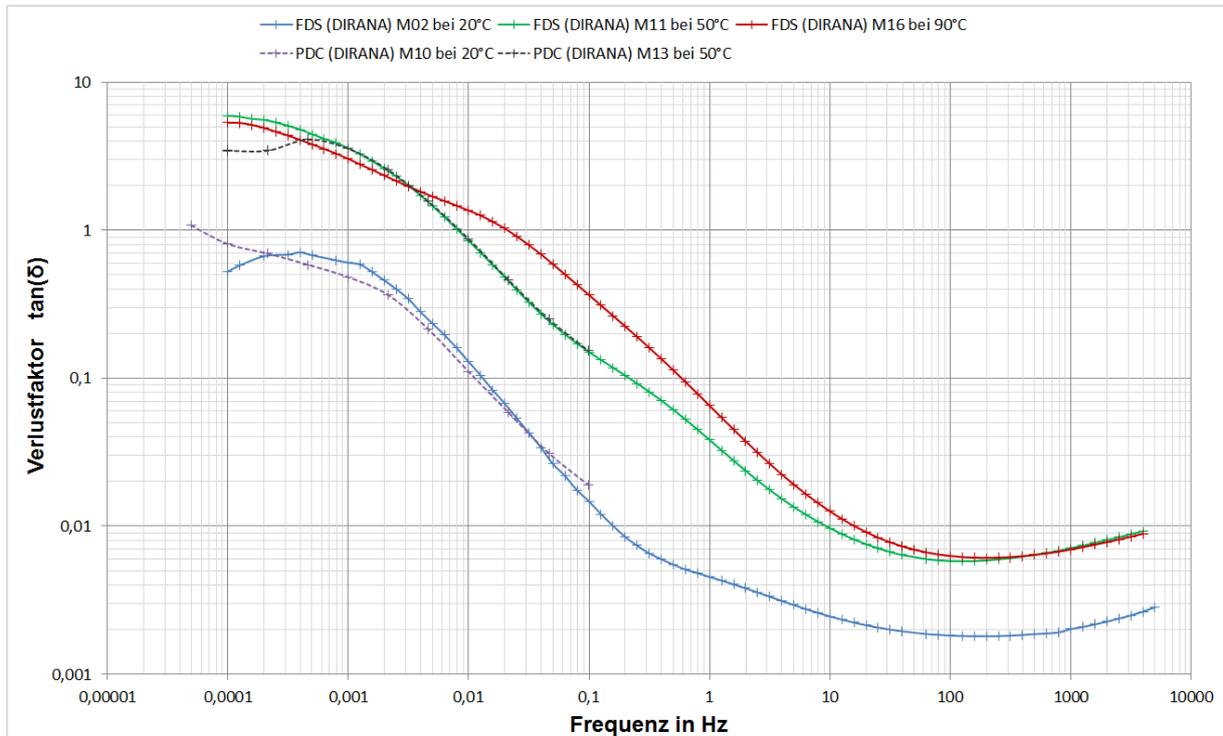
In Abbildung 6.2-23 wird der Verlustfaktor bei einer Frequenz von 10 mHz bei den verschiedenen Messtemperaturen, sowie für die unterschiedlichen elektrischen Messmethoden dargestellt. Die Werte wurden wiederum mit Hilfe von arithmetischen Mittelwertbildungen bestimmt. Der Grund für die Wahl der 10 mHz liegt darin, dass bei der PDC-Analyse durch die Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich nur Frequenzen kleiner 1 Hz ermittelt werden. Dies ist unter anderem auch in Abbildung 6.2-24 und Abbildung 6.2-25 ersichtlich.



**Abbildung 6.2-23: Vergleich des Verlustfaktors bei einer Frequenz von 10 mHz bei verschiedenen Messtemp. durch Bestimmung von unterschiedlichen Messmethoden [eigene Darstellung]**



**Abbildung 6.2-24: Vergleich der Verlustfaktorverläufe für verschiedene Messtemperaturen ermittelt mit den Messgeräten „Omicron DIRANA“ (durchgezogene Linien) und „ALFF PDC-Analyser-1MOD“ (unterbrochene Linien) [eigene Darstellung]**



**Abbildung 6.2-25: Vergleich der Verlustfaktorverläufe für verschiedene Messtemperaturen ermittelt mit dem Messgerät „Omicron DIRANA“, FDS - durchgezogene Linien, PDC - unterbrochene Linien [eigene Darstellung]**

### **6.3 Diskussion der Vorversuche (Anordnung 1 & 2)**

Wie bereits im Kapitel 6.1 eingangs erwähnt, dienten die Vorversuche (Versuchsanordnung 1 und 2) vor allem zur Überprüfung, ob mit dem Prüfling bzw. dem ganzen Versuchsaufbau die zu erwartenden Ergebnisse und Messverläufe ermittelt werden können. Außerdem dienten die Vorversuche dazu, um sich mit den verwendeten Geräten (Messapparaturen, Vakuumschrank, usw.) vertraut zu machen.

Mit Hilfe des ersten Prüflings und des ersten Prüfgefäßes konnten einige Schwachstellen dieser Konstruktionen festgestellt und in weiterer Folge verbessert werden. So sieht man beispielsweise in Abbildung 6.1-3 und Abbildung 6.1-4 auf Seite 103, dass rund 1,5 cm der Feststoffisolierung nicht vom Isolieröl umschlossen sind, obwohl das Prüfgefäß im Vakuumschrank fast zur Gänze mit Isolieröl gefüllt wurde. Die Gründe für den Abfall des Ölspiegels waren zum Einen die Wärmeausdehnung des Öls (warmes Öl besitzt ein größeres Volumen) und zum Anderen nahm die Feststoffisolierung (Transformerboard TIV) durch den Imprägniervorgang Öl auf. Weiters war das erste Prüfgefäß für längere Messdauern ungeeignet, da es keinen Deckel besaß, und außerdem keine Abschirmung, beispielsweise gegenüber elektromagnetischen Einflüssen, hatte. In Bezug auf den ersten Prüfling wurden dessen Nachteile bzw. mögliche Fehlerquellen im Kapitel 4.1 erläutert. In weiterer Folge wurden beispielsweise die Größe der Messelektrode, sowie die Ausführung der Anschlussbuchsen überarbeitet.

In Abbildung 6.1-5 und Abbildung 6.1-6 auf Seite 106 kann man eine mögliche Auswirkung der Anschlussbuchsen des ersten Prüflings sehen. In diesen beiden Abbildungen sieht man, dass beispielsweise für die Messungen „01.Anordnungen\_M02“ und „01.Anordnungen\_M05“ negative Werte für den Verlustfaktor gemessen wurden. Daraufhin wurden nach der Messung „01.Anordnung\_M05“ die Anschlusskontakte (Buchsen und Stecker) sorgfältig mit Aceton gereinigt und eine neue Messung „01.Anordnung\_M06“ gestartet, welche den erwarteten Verlauf brachte. Weiters wurden ab der Messung „01.Anordnung\_M02“ die Elektroden nach der Messung solange geerdet wie die Messung gedauert hatte,

damit Restladungen abfließen können und somit die Messergebnisse nicht verfälscht werden. Diese und noch andere potentielle Fehlerquellen werden z. B. im Kapitel 5.4 näher erläutert.

In Bezug auf die ermittelte Feuchtigkeit in der Feststoffisolierung mittels der FDS-Analyse zeigt die nachfolgende Tabelle die Ergebnisse für die Versuchsanordnungen 1 und 2. Als Analysesoftware kam das Programm „DIRANA 1.5“ der Firma Omicron electronics GmbH zum Einsatz. Zusätzlich ist in der Tabelle die Beurteilung des Feuchtigkeitszustandes nach IEC 60422 eingetragen. Bei einer alleinigen Betrachtung der Ergebnisse für die Feuchtigkeit in der Zellulose, führten alle durchgeführten Messungen zu der Schlussfolgerung, dass die Zellulose trocken ist. Allerdings zeigen die ermittelten Ergebnisse eine Abweichung von rund 1%-Punkt (vgl. M01 und M04 der Versuchsanordnung 2). Weiters kann mit den Ergebnissen für diese beiden Anordnungen keine Aussage über den Einfluss der Messtemperatur getroffen werden. Dazu kommt, dass die Prüfanordnungen in keinem Wärmeschrank standen und somit bei keiner konstanten Temperatur gemessen wurden. Die Temperatur wurde daher beim Messstart mit Hilfe eines Infrarot-Thermometers gemessen. So wurde beispielsweise bei Anordnung 1 die maximale Feuchtigkeit bei einer Temperatur von 55°C gemessen. Zum Vergleich, bei Anordnung 2 wurde die maximale Feuchtigkeit bei einer Messtemperatur von 24°C ermittelt.

**Tabelle 6.3-1: Gemessene Zellulosefeuchtigkeit (mittels FDS) inkl. der Klassifizierung nach IEC 60422 für die Versuchsanordnung 1 und 2**

Messgerät: DIRANA							Versuchsanordnung 1									
Mess.Nr.	M01	M02	M03	M04	M05	M06										
Messtemperatur in °C	55	34	29	29	23	23										
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in %	1,0	0,9	-	-	0,3	0,3										
Feuchtigkeitszustand nach IEC 60422	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken										
Messgerät: DIRANA							Versuchsanordnung 2									
Mess.Nr.	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07									
Messtemperatur in °C	56	32	25	24	22	22	21									
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in %	0,2	0,4	0,3	1,2	-	-	0,3									
Feuchtigkeitszustand nach IEC 60422	Trocken															

Die Bestimmung der Ölfeuchtigkeit wurde erst bei der Versuchsanordnung 2 mit Hilfe der Karl-Fischer-Titration für flüssige Proben umfassend durchgeführt. Tabelle 6.1-6 auf Seite 107 zeigt unter anderem die Messergebnisse der einzelnen Messproben. Beispielsweise wurde das Isolieröl, bevor es in den Vakuumschrank für den Imprägniervorgang eingeleitet wurde, näher untersucht. Zusätzlich wurde bei dieser Untersuchung das Isolieröl vor und nach einer Stickstoffanreicherung vermessen (siehe nachfolgende Tabelle). Das Ergebnis dieser Untersuchung war, dass aufgrund der Stickstoffanreicherung der gemessene Wassergehalt im Isolieröl geringer wurde.

**Tabelle 6.3-2: Messergebnisse (Mittelwerte der Messreihen) für die Bestimmung des Wassergehaltes des Isolieröls vor und nach einer Stickstoffanreicherung (Anordnung 2)**

<b>KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) vor dem Imprägniervorgang</b>			
Vor der Stickstoffanreicherung		Nach der Stickstoffanreicherung	
Entnahmetemp.: 23°C	Feuchte in ppm	Entnahmetemp.: 21°C	Feuchte in ppm
Mittelwert der Messreihe	7,9	Mittelwert der Messreihe	5,45

In Tabelle 6.1-7 auf Seite 108 werden Messwerte der Karl-Fischer-Titration für die Bestimmung des Wassergehaltes bei unterschiedlichen Entnahmetemperaturen des Isolieröls angeführt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Mittelwerte der gemachten Messreihenergebnisse. Man sieht sehr deutlich, dass es einen Einfluss der Temperatur auf den Wassergehalt im Isolieröl gibt. Aufgrund der Messgenauigkeit des verwendeten KFT-Coulometers 831 von  $\pm 3$  ppm in diesem Messbereich für diese Messwerte (siehe Tabelle 6.4-1 auf Seite 135) erfolgt für diese Messwertgrößen keine weitere Diskussion.

**Tabelle 6.3-3: Messergebnisse (Mittelwerte der Messreihen) für die Bestimmung des Wassergehaltes des Isolieröls für verschieden Entnahmetemperaturen**

<b>KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) nach der Messvorbereitung</b>			
17.11.2010 13 Uhr	Ent.Temp: 40°C Messtemp: 32°C	17.11.2010 17 Uhr	Ent.Temp: 28°C Messtemp: 28°C
	Feuchte in ppm		Feuchte in ppm
Mittelwert der Messreihe	2,48	Mittelwert der Messreihe	3,67
18.11.2010 8 Uhr 30	Ent.Temp: 21°C Messtemp: 21°C	25.11.2010 19 Uhr 20	Ent.Temp: 21°C Messtemp: 21°C
	Feuchte in ppm		Feuchte in ppm
Mittelwert der Messreihe	4,63	Mittelwert der Messreihe	4,07

Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten Ergebnisse für die Zellulosefeuchtigkeit nach dem mathematischen Modell von Myers für eine Interpretation von Gleichgewichtskurven (Abbildung 4.2-8 auf Seite 70 bzw. Gleichung 4.2-2 auf Seite 71). Die umfassendere Messwerttabelle ist auf Seite 108 zu finden. Obwohl diese berechneten Ergebnissen auf den gerade diskutierten Werten für die Ölfeuchtigkeit basieren, ergeben sich für die Zellulosefeuchtigkeit zwar relativ hohe Werte (bis zu 4% Wassergehalt), allerdings können anhand dieser Werte die Temperatureinflüsse auf den Wassergehalt in der Zellulose beobachtet werden. So erkennt man beispielsweise, dass mit sinkender Temperatur die Zellulose mehr Wasser speichert, was dem Verlauf in den Gleichgewichtskurven entspricht.

**Tabelle 6.3-4: Berechnete Feststofffeuchtigkeit aus Isolierölmessungen bei verschiedenen Entnahmetemperaturen**

<b>KARL-FISCHER-TITRATION</b> (Berechnung der Feststofffeuchtigkeit aus der Ölmessung)		
<b>gemessen</b>	<b>berechnet</b>	
<b>Entnahmetemp.</b>	<b>Feuchtigkeit in der Zellulose</b>	
°C	ppm	%
40	13.224,8	1,32248
28	26.877,6	2,68876
21	40.749,9	4,07499
21	37.432,6	3,74326

### 6.4 Diskussion des Hauptversuches (Anordnung 3)

Der Hauptversuch (Versuchsordnung 3) besteht wie im Kapitel 6.2 eingangs erwähnt aus dem zweiten Prüfling und dem zweiten Prüfgefäß. Mit Hilfe des zweiten Prüfgefäßes konnten unter anderem Messungen über längere Zeiträume bei annähernd konstanten Bedingungen durchgeführt werden. Genauere Information und Erläuterungen über den Prüfling bzw. das Prüfgefäß können im Kapitel 4 nachgelesen werden.

Bei der Versuchsordnung 3 wurde die ganze Bandbreite der geforderten Messmethoden angewendet (FDS, PDC und KFT). Die Ergebnisse der einzelnen Messmethoden werden in den nachfolgenden Unterabschnitten näher diskutiert. Außerdem erfolgt im Kapitel 6.4.4 eine Diskussion der Messergebnisse, welche vergleichend gegenübergestellt wurden. Für etwaige Diskussionen wird in der nachfolgenden Tabelle die vom jeweiligen Hersteller angegebene Messgenauigkeit für den jeweiligen Messbereich der verwendeten Messapparaturen angeführt.

**Tabelle 6.4-1: Messgenauigkeit der verwendeten Messgeräte**

Messgerät	Messgröße	Messbereich	Messgenauigkeit	Quelle
Metrohm KF-Coulometer 831	Wasser	10 µg – 1.000 µg H <sub>2</sub> O	± 3,0 µg	[21, S.127]
		> 1.000 µg H <sub>2</sub> O	0,3 %	
Omicron DIRANA	Verlustfaktor	1 mHz > f > 100 Hz	1 % + 3 * 10 <sup>-4</sup>	[51, S.10]
		f < 1 mHz	2 % + 5 * 10 <sup>-4</sup>	
	f > 100 Hz	2 % + 5 * 10 <sup>-4</sup>		
	Strom	± 20 mA	0,5 % ± 1 pA	
	Kapazität	10 pF – 100 µF	0,5 % + 1 pF	
ALFF PDC-Analyser-1MOD	Strom	± 1 mA	0,5 %, ± 1 pA nach 1h	[86, S.2]
	Kapazität	bei 2 kV	± 2 % ± 5 pF	
			bei 1 kV	± 2 % ± 10 pF

### 6.4.1 Frequenzbereichsspektroskopie

In der nachfolgenden Tabelle werden die ermittelte Zellulosefeuchtigkeit und die Anordnungskapazität bei 50 Hz aus der FDS-Analyse, sowie die Feuchtigkeitskategorisierung nach IEC 60422 angeführt. Die Analyse erfolgte mit der Mess- und Analysesoftware „DIRANA 1.5“. Ausführliche Informationen zu den einzelnen Messungen können aus Tabelle 6.2-2 auf Seite 112 entnommen werden.

**Tabelle 6.4-2: Zellulosefeuchtigkeit inkl. der Klassifizierung nach IEC 60422, sowie die Anordnungskapazität bei 50 Hz für die Versuchsanordnung 3 (FDS-Analyse)**

Messgerät: DIRANA				Versuchsanordnung 3			
Mess.Nr.	M02	M05	M09	M11	M12	M14	M16
Messtemperatur in °C	20	20	20	50	50	90	90
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in %	0,8	1,2	1,2	1,1	1,0	0,4	0,4
Feuchtigkeitszustand nach IEC 60422	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken
Anordnungskapazität bei 50 Hz in pF	149	147	171	244	241	244	243

Wie man in Tabelle 6.4-2 sehen kann, nimmt die Zellulosefeuchtigkeit mit steigender Temperatur ab. Ein solcher Zusammenhang für Öl-Zellulose-Isolationssysteme wird unter anderem auch mit den sogenannten Gleichgewichtskurven, wie z. B. von Oommen, beschrieben. Auffällig in der Tabelle sind die Werte für die Anordnungskapazität, da die Kapazität prinzipiell nur von der Anordnungsgeometrie abhängig ist. Allgemeine Erläuterungen und Berechnungsformeln bezüglich einer Kapazität können im Kapitel 3.1.2 ab Seite 36 nachgelesen werden. Wie im Speziellen das Messgerät DIRANA die Kapazität bestimmt, konnte leider nicht herausgefunden werden.

Abbildung 6.2-4 bis Abbildung 6.2-6 ab Seite 113 zeigen die Verlustfaktorverläufe für unterschiedliche Messtemperaturen. Wie man in den Abbildungen sehen kann, decken sich die einzelnen Messverläufe für die gleichen Messtemperaturen sehr gut. Mit Hilfe dieser Feststellung kann angenommen werden, dass der Versuchsaufbau für die Messungen annähernd gleiche Messbedingungen besitzt. Ein direkter Vergleich der Verlustfaktorverläufe bei den Messtemperaturen 20°C, 50°C und 90°C kann aus Abbildung 6.2-7 auf Seite 114 entnommen werden. In diesem direkten

Vergleich fällt auf, dass der maximale auftretende Verlustfaktor bei 90°C etwas geringer ist als der maximale auftretende Verlustfaktor bei 50°C.

#### 6.4.2 Polarisations- und Depolarisationsstrommessung

In der nachfolgenden Tabelle werden die ermittelte Zellulosefeuchtigkeit und die Anordnungskapazität bei 50 Hz aus der PDC-Analyse, sowie die Feuchtigkeitskategorisierung nach IEC 60422 angeführt. Die Messungen erfolgten mit den beiden Messgeräten „Omicron DIRANA“ und „ALFF PDC-Analyser-1MOD“. Ausführliche Informationen zu den einzelnen Messungen können aus Tabelle 6.2-3 bis Tabelle 6.2-5 ab Seite 116 entnommen werden.

**Tabelle 6.4-3: Zellulosefeuchtigkeit inkl. der Klassifizierung nach IEC 60422, sowie die Anordnungskapazität bei 50 Hz für die Versuchsanordnung 3 (PDC-Analyse)**

Messgerät: DIRANA						Versuchsanordnung 3		
Mess.Nr.	M03	M06	M08	M10	M13			
Messtemperatur in °C	20	20	20	20	50			
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in %	0,8	0,9	1,2	0,9	0,5			
Feuchtigkeitszustand nach IEC 60422	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken			
Anordnungskapazität bei 50 Hz in pF	-	-	-	-	-			
Messgerät: PDC-Analyser-1MOD						Versuchsanordnung 3		
Mess.Nr.	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Messtemperatur in °C	20	20	20	20	20	20	20	20
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in % (Software: DIRANA 1.5)	1,2	0,7	0,7	0,6	0,3	0,3	0,5	0,4
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in % (Software: PDC-Evaluation)	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0
Feuchtigkeitszustand nach IEC 60422	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken
Anordnungskapazität bei 50 Hz in pF	137	140	138	138	137	143	138	139
Messgerät: DIRANA				Versuchsanordnung 3				
Mess.Nr.	M07	M08	M09	M05	M06			
Messtemperatur in °C	50	50	50	90	90			
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in % (Software: DIRANA 1.5)	0,6	0,4	0,7	0,2	0,2			
Gemessene Feuchtigkeit in der Zellulose in % (Software: PDC-Evaluation)	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5			
Feuchtigkeitszustand nach IEC 60422	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken			
Anordnungskapazität bei 50 Hz in pF	136	145	137	145	137			

Wie man in Tabelle 6.4-3 sehen kann, ergibt sich für die Zellulosefeuchtigkeit der gleiche Temperaturzusammenhang wie bei der FDS-Analyse (vorheriger Unterabschnitt). Die Zellulosefeuchtigkeit nimmt demzufolge mit einer steigenden Temperatur des Betriebsmittels ab.

Die Anordnungskapazität wurde bei der PDC-Analyse mit dem Messgerät PDC-Analyser-1MOD am Ende jeder einzelnen Messung am Computerbildschirm angezeigt. Man erkennt, dass bei diesen Messungen der Kapazität kein Temperaturzusammenhang besteht. Anzumerken ist, dass mit dem Messgerät DIRANA bzw. auch mit der Analysesoftware „DIRANA 1.5“ keine Kapazität für 50 Hz bestimmt werden konnte, da bei der Transformation der Messergebnisse vom Zeit- in den Frequenzbereich die kleinste Frequenz 1 Hz betrug.

In Abbildung 6.2-9 auf Seite 118 kann für den Depolarisationsstrom bei einer Messtemperatur von 50°C („03.Anordnung\_M13“) eine sogenannte zweifache Polaritätsumkehr beobachtet werden. Ein ähnlicher Verlauf, sowie Erläuterungen zur Polaritätsumkehr bei der PDC-Messung können beispielsweise in [88] nachgelesen werden.

Wie man in Tabelle 6.4-3 auf der vorherigen Seite erkennt, wurden mit dem Messgerät DIRANA keine PDC-Messungen für Messtemperaturen von 90°C durchgeführt. Ein Grund dafür war, dass die maximal einzustellende Ausgangsspannung 200 Volt beträgt und es wahrscheinlich deswegen bei den aufgenommenen Messreihen vermehrt zu Störeinflüssen kam. Im Gegensatz dazu konnte man mit dem Messgerät PDC-Analyser-1MOD eine maximale Ausgangsspannung von 2.000 Volt realisieren und somit eine geringere Störanfälligkeit erzielen. Die geringere Störanfälligkeit des PDC-Analyser-1MOD ist beispielsweise in Abbildung 6.2-10 auf Seite 119 ersichtlich, da die Messverläufe ein geringeres Rauschen aufweisen. Anzumerken ist allerdings, dass es sein kann, dass der PDC-Analyser-1MOD über einen gewissen Zeitbereich die Messergebnisse arithmetisch mittelt und somit die Einflüsse von Störungen minimiert.

Abbildung 6.2-14 auf Seite 121 zeigt einen Messergebnisvergleich der Messgeräte DIRANA und PDC-Analyser-1MOD. Wie man in dieser Abbildung erkennt, ergeben sich besonders beim Polarisationsstrom erhebliche Abweichungen der jeweiligen Messkurvenverläufe. Anzumerken ist, dass die ermittelten Messverläufe vom PDC-Analyser-1MOD in die Software „DIRANA 1.5“ importiert wurden. Es scheint, als ob der Polarisationsstrom vom DIRANA bei hohen Zeiten einen Wendepunkt besitzt. Eine genauere Analyse von möglichen Fehlerursachen für die abweichenden Kurvenverläufe wurde allerdings nicht durchgeführt.

### 6.4.3 Karl-Fischer-Titration

Bevor das Isolieröl für den Imprägniervorgang in den Vakuumschrank eingeleitet wurde, wurde, wie auch schon bei der Versuchsanordnung 2, der Wassergehalt des Isolieröls vor und nach einer Stickstoffanreicherung mittels der KFT für flüssige Proben durch direkte Injektion gemessen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Messreihen. Tabelle 6.2-6 auf Seite 122 zeigt unter anderem die Messergebnisse der einzelnen Messproben. Das Ergebnis dieser Untersuchung war, wie auch schon bei der Versuchsanordnung 2, dass aufgrund der Stickstoffanreicherung der gemessene Wassergehalt im Isolieröl geringer wurde.

**Tabelle 6.4-4: Messergebnisse für die Bestimmung des Wassergehaltes des Isolieröls vor und nach einer Stickstoffanreicherung (Anordnung 3)**

<b>KARL-FISCHER-TITRATION (FLÜSSIG) vor dem Imprägniervorgang</b>			
Ölkanister 1			
Vor der Stickstoffanreicherung		Nach der Stickstoffanreicherung	
Entnahmetemp.: 17°C	<b>Feuchte</b> in ppm	Entnahmetemp.: 17°C	<b>Feuchte</b> in ppm
Mittelwert der Messreihe	<b>5,97</b>	Mittelwert der Messreihe	<b>4,2</b>
Ölkanister 2			
Vor der Stickstoffanreicherung		Nach der Stickstoffanreicherung	
Entnahmetemp.: 16°C	<b>Feuchte</b> in ppm	Entnahmetemp.: 19°C	<b>Feuchte</b> in ppm
Mittelwert der Messreihe	<b>5,38</b>	Mittelwert der Messreihe	<b>4,23</b>

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse aus der Karl-Fischer-Titration für das Mineralöl Nynas Nytro 4000X und des Feststoffes Transformerboard TIV angeführt. Wie man in der Tabelle sieht, wird der Wassergehalt im Isolieröl bei

steigender Temperatur größer. Für den Feststoff gilt Umgekehrtes, d.h., dass mit steigender Temperatur die Zellulose Wasser an das Isolieröl abgibt. Allerdings wurde bei der Feststoffanalyse bei 90°C im direkten Vergleich zu dem Wert bei 50°C ein zu hoher Wassergehalt gemessen. Ein möglicher Grund für den geringeren Messwert bei 50°C könnte bei der Messapparatur liegen, da es bei einigen Probemessungen im Verbindungsrohr bzw. Transferschlauch (siehe nachfolgende Abbildung 6.4-1) vom Ofen zur Titrierzelle zur Bildung von Wassertröpfchen kam. Weiters wäre es möglich, dass bei der Vermessung der Feststoffprobe bei 50°C nicht das ganze Wasser in der Probe verdampft wurde.

**Tabelle 6.4-5: Messergebnisse für die Bestimmung des Wassergehaltes des Isolieröls und der Zellulose für verschieden Entnahmetemperaturen (Anordnung 3)**

KARL-FISCHER-TITRATION				
FLÜSSIG		FESTSTOFF		
	gemessen		gemessen	berechnet
Ent.Temp: <b>20°C</b>	Feuchte in ppm	Ent.Temp: <b>20°C</b>	Feuchte in ppm	Feuchte in %
Mittelwert der Messreihe	0,67	Mittelwert der Messreihe	3989,8	0,39898
Ent.Temp: <b>50°C</b>	Feuchte in ppm	Ent.Temp: <b>50°C</b>	Feuchte in ppm	Feuchte in %
Mittelwert der Messreihe	0,98	Mittelwert der Messreihe	1868,0	0,186803
Ent.Temp: <b>90°C</b>	Feuchte in ppm	Ent.Temp: <b>90°C</b>	Feuchte in ppm	Feuchte in %
Mittelwert der Messreihe	3,63	Mittelwert der Messreihe	2376,7	0,237668



**Abbildung 6.4-1: Photo von der Ausleitung aus dem Ofen in das Titriergefäß für die Karl-Fischer-Titration für Feststoffe [eigenes Photo]**

#### 6.4.4 Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Messmethoden

Abbildung 6.2-15 bis Abbildung 6.2-18 ab Seite 126 zeigen einen Vergleich der verschiedenen Messmethodenergebnisse für den Wassergehalt in der Zellulose für die Messtemperaturen 20°C, 50°C und 90°C. Die Werte für die „Feststoff-Analyse KFT“ können als Referenzwerte angenommen werden, da dieses Verfahren in der Regel sehr genau ist. Im Vergleich zu den anderen elektrischen Diagnosemethoden (PDC-Messung mit den Messgeräten DIRANA und PDC-Analyser-1MOD) ergibt sich für die PDC-Messung mit dem PDC-Analyser-1MOD, bei Verwendung der Analysesoftware „PDC-Evaluation“, für die gesamten Messtemperaturen der höchste Wert. Ein Grund dafür ist, dass bei der Analysesoftware für die Bestimmung der Zellulosefeuchtigkeit nur Intervallschritte bzw. Annäherungsschritte von 0,5 Prozent möglich sind. Außerdem erfolgt die Messwertermittlung mittels einer, vom Benutzer durchgeführten, graphischen Annäherung der Modellkurve, durch Variation diverser Parameter, an den ermittelten Messverlauf. Durchwegs die besten Ergebnisse lieferte die PDC-Messung mit dem PDC-Analyser-1MOD und der Analysesoftware „DIRANA 1.5“. Die Messergebnisse für die Zellulosefeuchtigkeit aus der Isolieröl-Analyse mittels der Karl-Fischer-Titration können am besten mit den Gleichgewichtskurven anhand der Abbildung 6.2-19 auf Seite 127 diskutiert werden. Im nachfolgenden Absatz wird auf die Interpretation der Ergebnisse aus den Gleichgewichtskurven näher eingegangen. Anzumerken ist, dass viele unterschiedliche Autoren von Gleichgewichtskurven, sowie von mathematischen Beziehungen existieren (siehe dazu Seite 70) und es somit zu einer Vielzahl von unterschiedlichen Ergebnissen kommen kann.

Die Gleichgewichtskurven nach Oommen in Abbildung 6.2-19 auf Seite 127 wurden für die entsprechenden Messtemperaturen selber berechnet und basieren auf den Erläuterungen und Berechnungsformeln in [87]. Wie man in der Abbildung sieht, weist der Kurvenverlauf für 20°C über den abgebildeten Bereich die größte Steigung auf. Eine Folgerung daraus ist, dass bereits kleine Messabweichungen eine relativ große Differenz der Werte ergeben können. So wurde beispielsweise bei einer Messtemperatur von 20°C eine Ölfeuchtigkeit von rund 0,7 ppm und eine tatsächliche Zellulosefeuchtigkeit von rund 0,4 Prozent gemessen. Bei alleiniger Kenntnis der Ölfeuchte und Nutzung der Gleichgewichtskurve nach Oommen würde man für die Zellulosefeuchtigkeit rund 0,8 Prozent ermitteln und dies würde

bedeuten, dass dieser Wert doppelt so hoch wäre, als der gemessene. Allerdings wurde mit einem, in der Literatur angegeben, mathematischen Modell (Gleichung 4.2-2 auf Seite 71) eine noch höhere Zellulosefeuchtigkeit (rund 1,2 Prozent) berechnet. Weiters kann beobachtet werden, dass sich bei höheren Messtemperaturen, wie z. B. bei 90°C, eine Messabweichung nicht mehr so stark auswirkt, da die entsprechende Steigung der Gleichgewichtskurve geringer wird, wie man in Abbildung 6.2-19 sehen kann.

Im Kapitel 3.1.1 auf Seite 33 wird unter anderem auf die elektrische Leitfähigkeit bzw. den spezifischen Widerstand von Isolierstoffen näher eingegangen. Abbildung 6.2-20 und Abbildung 6.2-21 auf Seite 128 zeigen die ermittelten Ergebnisse bei verschiedenen Messtemperaturen durch Bestimmung von unterschiedlichen Messmethoden für diese beiden Größen. Für die Ermittlung der Ergebnisse diente wiederum die Mess- und Analysesoftware „DIRANA 1.5“. Bei den ermittelten Messergebnissen bzw. Verläufen zeigt sich prinzipiell keine zu diskutierende Abweichung im Vergleich zur Theorie.

Wie bereits in den beiden ersten Unterabschnitten (6.4.1 und 6.4.2) diskutiert, ergibt sich für die Anordnungskapazität bei der FDS-Messung mit dem Messgerät DIRANA ein wahrscheinlicher Zusammenhang mit der Messtemperatur (siehe Abbildung 6.2-22 auf Seite 129). Hingegen liefert das Messgerät PDC-Analyser-1MOD über den gesamten Messtemperaturbereich annähernd gleiche Kapazitätswerte.

Die Verlustfaktorverläufe für unterschiedliche Messtemperaturen, welche mit den Messgeräten DIRANA und PDC-Analyser-1MOD ermittelt wurden, werden in Abbildung 6.2-24 und Abbildung 6.2-25 auf Seite 130 dargestellt. Die gemessenen PDC-Verläufe wurden mittels der Software „DIRANA 1.5“ vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert. Wie man in der zweiten Abbildung sehen kann, stimmen die Verlustfaktorverläufe aus der FDS- und PDC-Messung vom Messgerät DIRANA sehr gut überein. Entgegengesetzt dazu gibt es zwischen den FDS-Verläufen vom Messgerät DIRANA und den transformierten PDC-Verläufen vom Messgerät PDC-Analyser-1MOD große Abweichungen. Diese Abweichung lässt sich auch anhand der Abbildung 6.2-14 auf Seite 121 erkennen, da die gemessenen Verläufe für die Polarisations- und Depolarisationsströme der beiden Messgeräte schon im Zeitbereich voneinander abweichen.

## 7 Schlussfolgerungen

Die Zustandsbewertung von Transformatoren ist heutzutage unumgänglich, da beispielsweise die Elektrizitätsunternehmen mit der Elektrizitätsversorgungsrichtlinie 2005/89/EG aufgefordert wurden die Versorgungsqualität und Netzsicherheit zu gewährleisten. Der Zustand des Isolationssystems von Transformatoren, welches oftmals aus Isolieröl und Feststoffen, wie z. B. Papier, besteht, ist zudem maßgebend für die Lebensdauer des Betriebsmittels. Außerdem wurde seit der Liberalisierung des europäischen Elektrizitätsmarktes im Jahr 2004 der Kostendruck auf die Elektrizitätsunternehmen immer größer. Eine Folge davon ist somit, dass der Trend weg von der zeitabhängigen und hin zur zustandsbasierten Instandhaltung geht [5] [91].

In Hinblick auf den Entscheidungsfaktor Kosten ist eine Forcierung der Untersuchung von möglichen dielektrischen Analysemethoden zweckmäßig. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden dafür elektrische Diagnosemethoden, wie z. B. die Frequenzbereichsspektroskopie (FDS) oder die Polarisations-/Depolarisationsstrommessung (PDC), und chemische Diagnosemethoden, wie z. B. die Karl-Fischer-Titration (KFT), durchgeführt und unter anderem miteinander verglichen. Als einer der wichtigsten Parameter gilt beispielsweise der Wassergehalt im Isolationssystem. Die Gründe für einen erhöhten Wassergehalt im Isolationssystem sind vielfältig. So kann z. B. Feuchtigkeit infolge eines undichten Gehäuses, aufgrund der Transformatorbauweise, etwa als freiatmender Transformator mit verbrauchter oder undichter Trockenvorlage, oder durch Alterungsmechanismen der Feststoffisolierung im Isolationssystem entstehen.

Die Bestimmung des Wassergehaltes anhand eines repräsentativen Versuchsaufbaus mit einem Isolationssystem, bestehend aus dem Mineralöl Nynas Nytro 4000X und der Feststoffisolierung Transformerboard TIV (Pressspan), zeigte unter anderem, dass es bei den Messergebnissen bis zu 1%-Punkt Messunterschied gab. Bei einer absoluten Betrachtung der Messergebnisse bedeutet dies, dass bei Nutzung der Karl-Fischer-Titration für Feststoffanalysen nach dem Ausheizverfahren als Referenzwertmessung eine Abweichung der Ergebnisse für die Zellulosefeuchtigkeit bis zum 6-fachen Wert festgestellt wurde. Als Messverfahren kamen die

FDS-, PDC- und KFT-Methode zum Einsatz. Weiters wurde die Zellulosefeuchtigkeit mit Hilfe der Gleichgewichtskurven nach Oommen, sowie durch Anwendung eines mathematischen Berechnungsmodells einer Gleichgewichtskurve nach Myers ermittelt. Auch bei durchgeführten Untersuchungen an realen Transformatoren unter der Mitwirkung des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz kam man zu dem Schluss, dass zwischen der FDS- und PDC-Analyse zur Bestimmung des Wassergehaltes in der Zellulose bis zu 1%-Punkt Messunterschied existiert [93]. Außerdem wurde bei dieser Untersuchung an realen Transformatoren festgestellt, dass vor allem die FDS-Messung im Vergleich zur PDC-Messung geringere Zellulosefeuchtigkeitswerte liefert. Die Messungen erfolgten, wie bereits erwähnt, an realen Transformatoren bei annähernd gleichen Bedingungen. Der mögliche Messwertunterschied von einem 1%-Punkt ist allerdings zu relativieren, da in Rahmen dieser Diplomarbeit, selbst bei Messwiederholungen, mit demselben Messgerät, bis zu 1%-Punkt Messunterschiede ermittelt wurden. Demzufolge ist eine prinzipielle Bewertung nach entsprechenden Kategorien, wie z. B. nach der IEC 60422, sinnvoll, mit einer entsprechenden Anzahl von Messwiederholungen, um mögliche Messausreißer bzw. Messfehler zu minimieren. Außerdem ist es ratsam, wenn möglich, mehrere Mess- bzw. Analysemethoden durchzuführen, um sich nicht auf ein Verfahren verlassen zu müssen, da diese, wie erwähnt, teilweise unterschiedliche Messergebnisse liefern können.

In [95] ab Seite 18 werden mögliche Parameter, wie z. B. die Dichte der Feststoffisolierung, die Ölqualität oder der Säuregehalt, welche einen Einfluss auf das Ergebnis des „Kurven-Fittings“ zur Ermittlung der Zellulosefeuchtigkeit besitzen, angeführt. Die Einflüsse wurden mit Hilfe der FDS-Messung ermittelt. Außerdem werden Werte für die maximalen durchschnittlichen Abweichungen angegeben. Die größten Einflüsse, mit rund 0,5 bis 0,7 Prozent, sind demzufolge die Dichte der Feststoffisolierung, sowie eine ungenaue Isolationsgeometrie.

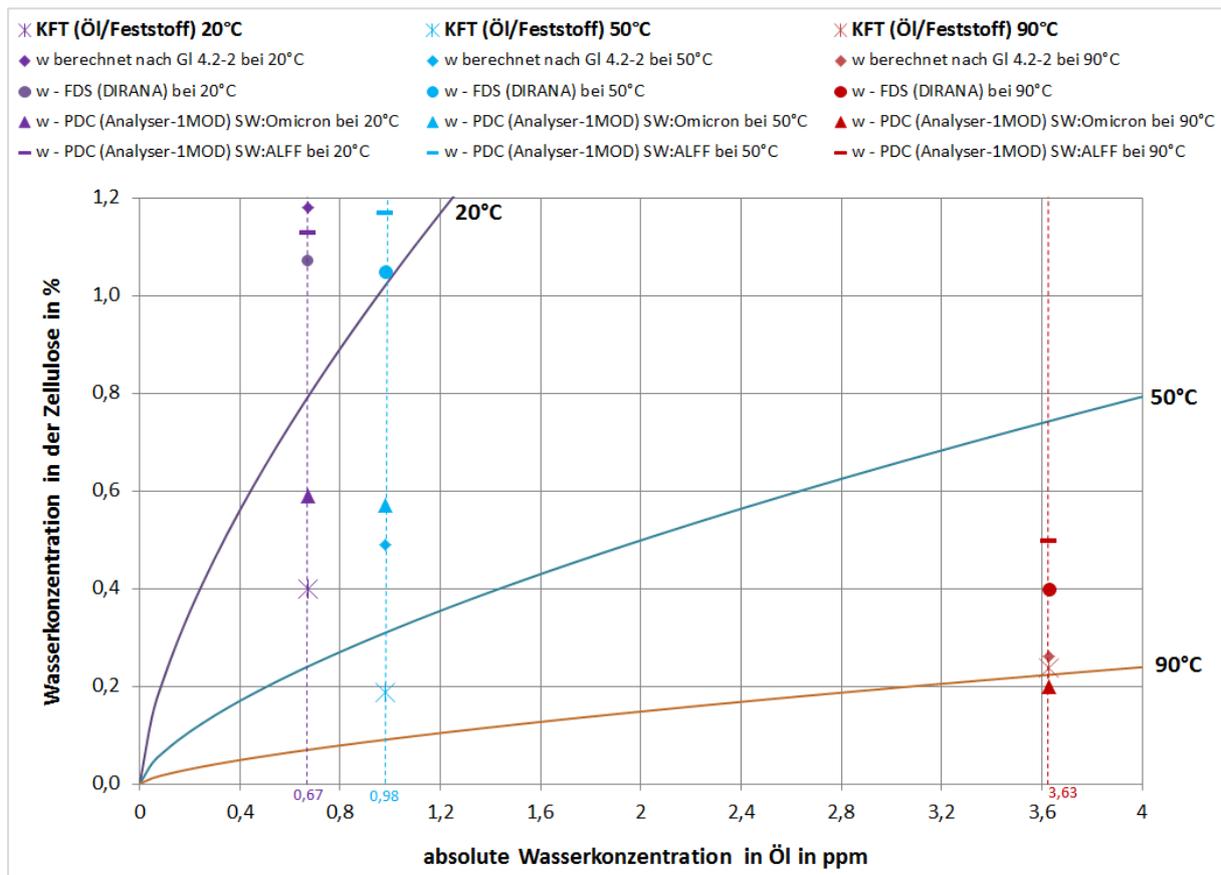
Der Einfluss der Betriebstemperatur bzw. der Messtemperatur in Bezug auf den Wassergehalt in den einzelnen Isolationsmedien wurde ebenfalls im Rahmen dieser Diplomarbeit näher untersucht. Die Messungen wurden jeweils bei den Temperaturen 20°C, 50°C und 90°C durchgeführt. Bei allen angewendeten

Messmethoden wurde festgestellt, dass mit steigender Betriebstemperatur die Zellulose trockener wird, das bedeutet, dass die Zellulose Wasser an das Isolieröl abgibt und sich somit mehr Wasser im Isolieröl befindet. Umgekehrt bedeutet dies, dass das Isolieröl mit sinkender Betriebstemperatur trockener wird. Dies deckt sich mit dem Stand der Technik bzw. mit den in der Literatur angeführten Beobachtungen. Der Zusammenhang der Probenentnahmetemperatur bzw. der Messtemperatur muss demzufolge für etwaige Zustandsbewertungen berücksichtigt werden, damit die gemessenen Ergebnisse aussagekräftig sind bzw. richtig interpretiert werden können.

Des Weiteren muss bei der Probenentnahme, z. B. für die Isolierölanalyse, folglich das Temperaturprofil des Transformators beachtet werden, da in der Regel die Öltemperatur im oberen Bereich des Transformators größer ist als im unteren Bereich. Falls es möglich ist, ist es daher ratsam, aus unterschiedlichen Bereichen (i.d.R. oben, mittig, unten) im Transformator die Proben zu entnehmen.

Bei der Anwendung von Gleichgewichtskurven zur Bestimmung des Wassergehaltes in der Zellulose durch Messung der Ölfeuchtigkeit wurde festgestellt, dass der wahrscheinliche Messfehler bei höheren Öltemperaturen (ist gleich Probenentnahmetemperaturen) geringer ist. Der Grund hierfür sind die Verläufe der Gleichgewichtskurven, da die Steigung der Kurven bei geringeren Messtemperaturen größer ist (großer Temperaturgradient) als bei höheren Messtemperaturen (kleiner Temperaturgradient). Diese Beobachtung kann unter anderem mit Hilfe von Abbildung 7.0-1 auf der nächsten Seite nachvollzogen werden. Die in der Abbildung dargestellten Verläufe sind wiederum von Ausgleichsprozessen und in weiterer Folge vom Gleichgewichtsendzustand abhängig. Grundsätzlich findet bei den Ausgleichsprozessen eine Wechselwirkung zwischen verschiedenen Teilen des Systems statt, welche unterschiedliche Dichte, Drücke, Temperaturen, Diffusionsgeschwindigkeiten oder verschiedene chemische Zusammensetzungen haben [94, S. 22]. Für die in der Abbildung dargestellten Verläufe heißt dies in Bezug auf die Temperatur, dass der stattfindende Ausgleichsprozess für eine geringere Öltemperatur länger dauert als für höhere Öltemperaturen und sich die dementsprechenden abgebildeten Verläufe ergeben.

Neben den bisher erwähnten Beobachtungen, sieht man in Abbildung 7.0-1 sehr deutlich wie sich die Messtemperatur auf die Streuung der Ergebnisse auswirken kann. Bei einer näheren Betrachtung der einzelnen Ergebnisse für die jeweilige Messtemperatur, kommt man zu dem Schluss, dass Messungen erst ab einer gewissen Temperaturgrenze an Aussagekraft bezüglich der Zellulosefeuchtigkeit gewinnen. Diese Aussage kann sehr deutlich beim Vergleich der Ergebnisse für die Messtemperaturen 20°C und 90°C nachvollzogen werden, da die Streuung der Ergebnisse bei 90°C geringer ist als bei 20°C. Weiters kommt hinzu, dass besonders bei niedrigen Messtemperaturen die Ergebnisse bis zu 1%-Punkt auseinander liegen können. Bei Nutzung der Feuchtigkeitskategorisierung nach IEC 60422 könnte es daher bei niedrigen Messtemperaturen vorkommen, dass aufgrund des 1%-Punktes eine beispielsweise trockene Zellulose als mäßig feucht eingestuft wird. Um möglichen Fehlinterpretationen entgegenzuwirken, ist es daher sinnvoll einen Mix von Messmethoden anzuwenden, sowie mehrere Messungen mit Bildung des Messreihenmittelwertes durchzuführen.



**Abbildung 7.0-1: Gleichgewichtskurve mit eingezeichneten Ergebnissen aus den unterschiedlichen Mess-/Bestimmungsmethoden (w für Wassergehalt) [eigene Darstellung]**

Im direkten Vergleich der ermittelten Messergebnisse für die Bestimmung des Wassergehaltes in der Zellulose, brachte das Messgerät PDC-Analyser-1MOD von der Firma ALFF engineering in Verbindung mit der Mess- und Analysesoftware „DIRANA 1.5“ von der Firma Omicron electronics GmbH durchwegs die besten Ergebnisse. Diese Tendenz ist somit entgegengesetzt zu dem Ergebnis aus der vorher genannten Untersuchung an realen Transformatoren. Anzumerken ist allerdings, dass im Rahmen dieser Untersuchung die Analysesoftware des jeweiligen Messgeräte-herstellers verwendet wurde. Bei der Messergebnisbetrachtung dieser Konstellationen, also dem Messgerät DIRANA mit der Mess-/Analysesoftware „DIRANA 1.5“ und dem Messgerät PDC-Analyser-1MOD mit der Analysesoftware „PDC-Evaluation“, können allerdings die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigt werden. Mögliche Gründe dafür sind in der Analysesoftware „PDC-Evaluation“ zu finden, da das „Kurven-Fitting“ manuell über eine graphische Approximation der Modellkurve an die Messkurve erfolgen muss, sowie die Einstellung des Parameters „Zellulosefeuchtigkeit“ nur in 0,5 Prozent Schritten möglich ist.

Beim direkten Vergleich der Messergebnisse der einzelnen verwendeten Messmethoden wurde die Karl-Fischer-Titration für Feststoffproben (nach dem Ausheizverfahren) als Referenzwertmessung angenommen, da es möglich war eine Zelluloseprobe aus dem Versuchsaufbau zu entnehmen und dieses Verfahren in der Regel auch sehr genaue Messwerte liefert.

Aufgrund der Feststellung, dass es unterschiedliche Ergebnisse bei der Bestimmung der Zellulosefeuchtigkeit unter Verwendung des Messgerätes PDC-Analyser-1MOD und der beiden Analysesoftwaren „DIRANA 1.5“ und „PDC-Evaluation“ gibt, ist die Genauigkeit der Ergebnisse aus dem „Kurven-Fitting“ zu hinterfragen, da die Ergebnisse für die Zellulosefeuchtigkeit bis zum 2-fachen Wert abweichen.

Die Temperatur besitzt neben dem Wassergehalt ebenso einen Einfluss auf die Messverläufe bei der Frequenzbereichsspektroskopie und Polarisations-/Depolarisationsstrommessung. Mit Hilfe von aufgenommen Kurvenverläufen, wie z. B. dem Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz, können mit einer entsprechenden Analysesoftware durch das sogenannte „Kurven-Fitting“ Aussagen

über den Wassergehalt in der Zellulose, die Ölleitfähigkeit und die Isolationsgeometrie des Prüfobjektes gemacht werden. Besonders in Hinsicht auf Vergleichsmessungen zu früheren Zeitpunkten oder für Trendanalysen sind die Messverläufe ein sehr hilfreiches Instrument für Zustandsbewertungen. In Anbetracht der Messverläufe in Abbildung 6.2-24 auf Seite 130 stellt sich generell die Frage, wie vergleichbar die Messverläufe von unterschiedlichen Messgeräten sind. Wie man in dieser Abbildung sieht, ergeben sich für gleiche Messtemperaturen erhebliche Unterschiede in den Kurvenverläufen. Anzumerken ist allerdings, dass die Ergebnisse vom Messgerät PDC-Analyser-1MOD für die Vergleichbarkeit der Verläufe in die Software „DIRANA 1.5“ importiert wurden.

Weiters ist für eine umfassende Zustandsbewertung eine Datenhistorie, sowie die Verwendung von verschiedenen Diagnostikverfahren sehr wichtig und hilfreich. Einen Überblick über mögliche Diagnostikverfahren für Transformatoren, wie z. B. die Teilentladungsmessung oder die Gas-in-Öl-Analyse, sowie andere elektrische Analysemethoden, werden in Abbildung 3.0-1 auf Seite 32 gegeben.

Abschließend ist noch anzumerken, dass man mit allen verwendeten Methoden, also mit dem FDS-, PDC- und KFT-Verfahren, zu dem Schluss kam, dass die Zellulose trocken ist und somit keine Wartungsmaßnahmen für das Isolationssystem notwendig wären.

## 8 Zusammenfassung

Die Versorgungsqualität und Netzsicherheit sind für private Haushalte (als Konsumenten), wie auch für die Industriebetriebe (Produzenten) sehr wichtig. Denn bei einem Netz- bzw. Versorgungsausfall, beispielsweise aufgrund eines Versorgungsengpasses, käme es ansonsten durch mögliche Produktionsausfälle zu Ertragseinbußen bzw. zu einem geringeren privaten Konsum. In der Energieversorgungskette zählen Transformatoren oft zu den wichtigsten und teuersten Bestandteilen, da sie beispielsweise bei Kraftwerken, in Übertragungs-/Verteilungnetzen und in großen Industrieanlagen zu finden sind. Gründe für die Ausfälle liegen meistens in einer mangelhaften Instandhaltung, falscher Bedienung, unzureichendem Schutz, unerkannten Fehlern, Blitzschlag oder Kurzschlüssen. Mit Hilfe einer Zustandsbewertung des Transformators erfolgt in der Regel weiters eine Risikobeurteilung um somit das Ausfallrisiko mit einer gewissen Ausfallwahrscheinlichkeit beurteilen zu können [92].

Der Zustand des Isolationssystems von Transformatoren, welches oft aus einem Isolieröl und einem Feststoff besteht, ist maßgebend für die Lebensdauer des Betriebsmittels. Die Zustandsbewertung kann mit Hilfe von unterschiedlichen Methoden aus den Bereichen der elektrischen, optischen, mechanischen, thermischen und chemischen Diagnostik durchgeführt werden, wobei für diese Diplomarbeit Messmethoden aus der elektrischen und chemischen Diagnostik verwendet wurden. Im Speziellen wurden die Frequenzbereichsspektroskopie (FDS), Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC), sowie die Karl-Fischer-Titration (KFT) für Flüssigkeiten und Feststoffe angewendet. Außerdem wurde mit Hilfe der Ergebnisse aus der Isolierölanalyse mittels der KFT auf die sogenannten Gleichgewichtskurven nach Oommen, sowie auf das mathematische Berechnungsmodell einer Gleichgewichtskurven nach Myers näher eingegangen.

In dieser Diplomarbeit wurde der Fokus auf das dielektrische Verhalten des Mischdielektrikums, bestehend aus Mineralöl (Nynas Nytro 4000X) und Pressspan (Transformerbaord TIV), gelegt, wobei zuerst der Stand des Wissens in Form einer Literaturrecherche erhoben und danach an einem selbst entworfenen Isolierstoff-

modell bzw. Transformatormodell die Aussagekraft und praktische Anwendbarkeit dieser dielektrischen Methoden getestet wurde. Mit Hilfe dieses Versuchsaufbaues wurden dielektrische Vergleichsmessungen bei den Messtemperaturen 20°C, 50°C und 90°C durchgeführt und diskutiert. Bei den Messungen wurde ein besonderes Interesse auf den Wassergehalt in der Zellulose und im Isolieröl, auf den Verlustfaktor, sowie auf die elektrische Leitfähigkeit des Isolieröls gelegt.

Neben der Literaturrecherche bezüglich des Standes des Wissens wurden unter anderem die gemessenen Kenngrößen, die verwendeten Messverfahren, der Prüfaufbau mit seinen Komponenten Prüfling und Prüfgefäß, sowie die Messabläufe näher erklärt. Insgesamt wurden zwei verschiedene Versionen vom Prüfling und vom Prüfgefäß konstruiert, da bei den Vorversuchen festgestellt wurde, dass die ersten Versionen Verbesserungspotentiale besaßen. Weiters dienten die Vorversuche dazu, um mit den zu verwendenden Geräten, Einrichtungen und den (Mess-)Abläufen, wie z. B. der Messvorbereitung, vertraut zu werden.

Bei allen angewendeten Messmethoden wurde festgestellt, dass die Zellulose entsprechend der Feuchtigkeitskategorisierung nach IEC 60422 trocken ist. Außerdem wurde beobachtet, dass mit steigender Betriebstemperatur die Zellulose trockener wird, was bedeutet, dass die Zellulose Wasser an das Isolieröl abgibt und sich somit mehr Wasser im Isolieröl befindet. Umgekehrt bedeutet dies, dass das Isolieröl mit sinkender Betriebstemperatur trockener wird. Dies deckt sich mit dem Stand der Technik bzw. mit den in der Literatur angeführten Beobachtungen. Aufgrund dieser Feststellung ist bei der Probenentnahme das Temperaturprofil des Transformators entsprechend zu berücksichtigen.

Die Schlussfolgerungen basieren hauptsächlich auf den Ergebnissen aus dem Hauptversuch mit dem verbesserten Prüfling und Prüfgefäß. Einer der wesentlichsten Punkte, welcher beobachtet wurde, ist, dass die Messergebnisse für die Zellulosefeuchtigkeit bis zu 1%-Punkt Messunterschied besitzen können. Anzumerken ist, dass die Karl-Fischer-Titration für die Feststoffanalyse nach dem

Ausheizverfahren als Referenzwertmessung verwendet wurde, da dieses Verfahren in der Regel sehr genaue Messwerte liefert.

Weiters wurde beobachtet, dass Messunterschiede bis zu 1%-Punkt vor allem bei geringen Mess- bzw. Öltemperaturen auftreten, da unter anderem die Ausgleichsprozesse im Mischdielektrikum für die Erreichung des Gleichgewichtszustandes bei geringen Temperaturen mehr Zeit als bei höheren Temperaturen benötigen und diese Wartezeit in der Praxis kaum abgewartet werden kann. An dieser Stelle wäre es empfehlenswert eine Mindesttemperatur für die Durchführung der Messungen, z. B. größer 60°C, einzuführen. Grundlage für diese Empfehlung ist, dass bei Vergleich der Ergebnisse für die Messtemperatur von 20°C und 90°C, die Streuung der Ergebnisse aller verwendeten Methoden bei 90°C geringer ist als bei 20°C. In Bezug auf die verwendeten Messgeräte für die elektrische Diagnostik, stellt sich die Frage, wie gut die Temperaturkompensation bzw. generell die Kompensation von etwaigen Einflussparametern (z. B. Dichte der Feststoffisolierung, Ölqualität, Isolationsgeometrie) bei der softwarebasierten Erstellung der Modellkurve für das „Kurven-Fitting“ funktioniert und wie die Auswertungen mit Hilfe der Analysesoftware verbessert werden könnte. In [95] ab Seite 18 werden diesbezüglich Ergebnisse für die Auswirkungen dieser Einflussparameter auf die Zellulosefeuchtigkeit angeführt. Bei Nutzung der Feuchtigkeitskategorisierung nach IEC 60422 könnte es daher vor allem bei niedrigen Messtemperaturen vorkommen, dass aufgrund des 1%-Punktes eine beispielsweise trockene Zellulose als mäßig feucht eingestuft wird.

Der mögliche Messwertunterschied von einen 1%-Punkt ist allerdings zu relativieren, da im Rahmen dieser Diplomarbeit, selbst bei Messwiederholungen, mit demselben Messgerät bis zu 1%-Punkt Messunterschiede ermittelt wurden. Demzufolge ist eine prinzipielle Bewertung nach entsprechenden Kategorien, wie z. B. nach der IEC 60422, sinnvoll, mit einer entsprechenden Anzahl von Messwiederholungen, um mögliche Messausreißer bzw. Messfehler zu minimieren. Außerdem ist es ratsam, wenn möglich, mehrere Mess- bzw. Analysemethoden durchzuführen, um sich nicht auf ein Verfahren verlassen zu müssen, da diese teilweise unterschiedliche Messergebnisse liefern können.

Die Temperatur besitzt ebenso einen Einfluss auf die Messverläufe bei der FDS- und PDC-Messung. Mit den in dieser Diplomarbeit aufgenommenen Messverläufen mit den Messgeräten DIRANA und PDC-Analyser-1MOD stellt sich generell die Frage, wie vergleichbar die Messverläufe untereinander sind. So wurde festgestellt, dass sich für gleiche Messtemperaturen erhebliche Unterschiede in den Kurvenverläufen ergeben, sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich. Anzumerken ist allerdings, dass die Ergebnisse vom Messgerät PDC-Analyser-1MOD für die Vergleichbarkeit der Verläufe in die Software „DIRANA 1.5“ importiert wurden und es möglicherweise zu Importierungsfehlern kam.

Neben den durchgeführten Messungen an dem Isolierstoffmodell mit „neuen“ (trockenen) Materialien für das Dielektrikum, wurden ebenso Messungen an gealterten Materialien mit hohen Feuchtigkeitswerten in Betracht gezogen, allerdings konnten aufgrund der relativ langen Alterungsdauern diese im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht mehr durchgeführt werden. Weiters wäre es denkbar die Problematik bezüglich der Anwendung der Gleichgewichtskurven, der mathematischen Modelle dieser Kurven, sowie der Analysesoftwaren, welche für diese Diplomarbeit verwendet wurden, näher zu untersuchen. Die Auswirkungen bei einer Änderung der Anordnungs- bzw. Isolationsgeometrie könnte ebenfalls, durch entsprechende Platzierung von Feststoffisolierungen und Abstandshaltern, Gegenstand von zukünftigen Untersuchungen sein.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] KÜchler A.: „Hochspannungstechnik“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-78412-8
  
- [2] Krikava F., Ruhswurm H., Seiser J.: „Grundlagen der Elektrotechnik Band 1“, R. Oldenbourg GesmbH Wien, 1996, ISBN 3-7029-0707-6
  
- [3] OMICRON electronics GmbH: „DIRANA Benutzerhandbuch GE.2 - 2008“, <<http://www.omicron.at>>, 03.02.2011
  
- [4] OMICRON electronics GmbH: „DIRANA Anwendungshandbuch GE.2 – November 2008“, <<http://www.omicron.at>>, 03.02.2011
  
- [5] Gockenbach E.: „Grundlagen für die Diagnostik“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, 2004
  
- [6] Moser H.P.: „Transformerboard“, H. Weidmann AG, Rapperswil, 1979
  
- [7] Moser H.P., Dahinden V.: „Transformerboard II“, H. Weidmann AG, Rapperswil, 1987
  
- [8] Nynas AB: „Base oil handbook“, <<http://www.nynas.com>>, 03.02.2011
  
- [9] Nynas AB: „Nytro 4000X (IEC 60296/03) – Product data sheet“, <<http://www.nynas.com>>, 03.02.2011
  
- [10] Ostermann F.: „Anwendungstechnologie Aluminium“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-71196-4
  
- [11] Rösler J., Harders H., Bäker M.: „Mechanisches Verhalten der Werkstoffe“, B.G. Teubner GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006, ISBN 978-3-8351-9041-2
  
- [12] Ilschner B., Singer R.F.: „Werkstoffeigenschaften und Fertigungstechnik“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-642-01734-6
  
- [13] Moeller E.: „Handbuch Konstruktionswerkstoffe“, Carl Hanser Verlag München, 2008, ISBN 978-446-40170-9

- [14] Frühauf J.: „Werkstoffe der Mikrotechnik“, Carl Hanser Verlag München, 2005, ISBN 3-446-22557-9
- [15] Nölle G.: „Technik der Glasherstellung“, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 1997, ISBN 3-342-00539-4
- [16] Sumereder C.: „Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik“, Österreichischer Verband für Elektrotechnik Wien, 2010, ISBN 978-3-85133-058-8
- [17] Gerstl A., et al.: „Power Transformers technology review and assessments“, CICRE SC A2.4, Electra 23 – No. 236, February 2008
- [18] Rösner M, Tenbohlen S.: „Online-Feuchtigkeitsüberwachung der festen Isolierstoffe in Leistungstransformatoren“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, 2004
- [19] Matissek R, Steiner G. Fischer M.: „Lebensmittelanalytik“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-540-92205-6
- [20] „Vorlesungsskriptum Uni Jena“, Institut für Physikalische Chemie, <<http://www.ipc.uni-jena.de>>, 04.02.2011
- [21] Metrohm AG: „Gebrauchsanweisung 756/831 KF Coulometer 04.2003“, <<http://produkte.metrohm.com>>, 05.02.2011
- [22] Thiem M.: „Die Leistungsfähigkeit des Baustoffes Holz am Beispiel des EXPO-Daches anlässlich der Weltausstellung 2000 in Hannover“, GRIN Verlag, 2005, ISBN 978-3-640-72899-2
- [23] Erler K.: „ Holz im Außenbereich“, Birkhäuser Verlag Schweiz, 2002, ISBN 3-7643-6537-4
- [24] Küpfmüller K., Mathis W., Reibiger A.: „Theoretische Elektrotechnik“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-78589-7
- [25] Zastrow D.: „Elektrotechnik“, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH Wiesbaden, 2000, ISBN 3-528-44034-1
- [26] Lick W.: „Vorlesungsskriptum Analyseverfahren der Isolierstoffe – Teil 3“, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement TU Graz, WS10/11

- [27] Lindner H., Siebke W., Simon G., Wuttke W.: „Physik für Ingenieure“, Carl Hanser Verlag München Wien, 2006, ISBN 978-3-446-40609-4
- [28] Koch M., Krüger M., Tenbohlen S.: „Feuchte im Transformator vor Ort bestimmen“, Bulletin SEV/AES, 13/2008
- [29] Koch M., Tenbohlen S.: „Wasser in Leistungstransformatoren – Richtig messen und den Zustand beurteilen“, Stuttgarter Hochspannungs-Symposium, Leinfelden, 2006
- [30] Kleboth-Lugova O., Buerschaper B., Leibfried T.: „Feuchtebestimmung in Isoliermedien – ein Erfahrungsbericht“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, 2004
- [31] Leibfried T., Stach M.: „Dielektrische Analyseverfahren: Algorithmen zur Überführung der Ergebnisse eines Verfahrens in andere Verfahren“, ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau, 2005
- [32] Kuchler A., Hüllmandel F., Böhm K., Koch N., Brupbacher P., Krause C.: "Das dielektrische Verhalten von Öl-Papier-Isolationen unter der Wirkung von Grenzflächen-, Material- und Prüfparametern", ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau, 2005
- [33] Koch M., Rätzke S., Tenbohlen S.: "Die Leitfähigkeit von Isolierflüssigkeiten bei niedrigen Frequenzen und Gleichspannung", ETG-Fachtagung Isoliersysteme, Köln, 2010
- [34] Jaya M., Herbst B., Leibfried T.: „FDS-Messungen an Leistungstransformatoren bei höheren Frequenzen – ausschließlich dielektrisches Verhalten?“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Düsseldorf, 2009
- [35] Cooper Industries: „Dielectric Fluids Envirotemp FR3 Fluid (900-20)“, <<http://www.cooperindustries.com>>, 22.02.2011
- [36] Deutsches Krebsforschungszentrum: „Asbest“, <<http://www.krebsinformationsdienst.de>>, 22.02.2011
- [37] MR Maschinenfabrik Reinhausen GmbH: „Umweltschonend: Vacutap® - Mit Isolierflüssigkeiten aus nachwachsenden Rohstoffen“, <<http://www.reinhausen.com>>, 22.02.2011
- [38] Gebauer & Griller: „Wickeldrähte“, <<http://www.griller.at>>, 22.02.2011

- [39] Lucas J.: „Historical Development of the Transformer“, University of Moratuwa – Department of Electrical Engineering, <<http://samanala.elect.mrt.ac.lk>>, 22.02.2010
- [40] Kappas M.: „Klimatologie“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-8274-1827-2
- [41] Paul S., Paul R.: „Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-540-69076-4
- [42] Hering E., Martin R., Stohrer M.: „Physik für Ingenieure“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-71855-0
- [43] Fasching G.: „Werkstoffe für die Elektrotechnik“, Springer-Verlag Wien, 2005, ISBN 3-211-22133-6
- [44] Weißgerber W.: „Elektrotechnik für Ingenieure 1“, Vieweg & Teubner GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0473-0
- [45] Krikava F., Ruhswurm H., Seiser J.: „Grundlagen der Elektrotechnik Band 2“, R. Oldenbourg GesmbH Wien, 1995, ISBN 3-7029-0705-X
- [46] Kotte R.: „Untersuchung zur elektrotechnischen Nutzung hochwärmebeständiger Reaktionsharzformstoffe“, Cuvillier Verlag Göttingen, 2005, ISBN 3-86537-669-X
- [47] Welsch A.: „Skriptum für das Praktikum Hochspannungstechnik vom 24.10.2006 – Versuch 1-Teil1: Verlustfaktor und Kapazitätsmessung mit 50 Hz“, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik Fachhochschule Regensburg, 28.2.2011
- [48] Naidu M., Kamaraju V.: „High voltage engineering“, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2009, ISBN 978-0-07-066928-4
- [49] Daemisch G.: „Trocknung von Transformatoren“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, 2004
- [50] Siemens AG: „Aus Regeneration wird Anlagensicherheit“, <<http://www.energy.siemens.com>>, 01.03.2011
- [51] OMICRON electronics GmbH: „DIRANA Brochure - September 2010“, <<http://www.omicron.at>>, 01.03.2011

- [52] Alff J.-J., Der Houhanessian V., Zaengl W. S., Kachler A.: „A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus“, Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim (CA USA), 2000
- [53] Zaengl W. S.: „Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment“, Symposium on High Voltage Engineering – ISH 2001, Bangalore (India), 2001
- [54] Pukel G. J., Muhr M., Lick W.: “Transformer diagnostics: Common used and new methods”, International Conference on condition Monitoring and Diagnosis - CMD 2006, Changwon (Korea), April 2006
- [55] Scholz E.: „Karl-Fischer-Titration“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984, ISBN 3-540-12846-8
- [56] Wieland G.: „Wasserbestimmung durch Karl-Fischer-Titration“, GIT Verlag Darmstadt, 1985, ISBN 978-3-92-195651-9
- [57] Weißgerber W.: „Elektrotechnik für Ingenieure 2“, Vieweg & Teubner GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0474-7
- [58] Abedian B., Baker K.N.: „Temperature effects on the electrical conductivity of dielectric liquids“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Juni 2008
- [59] Saha T.K., Purkait P.: „Investigations of Temperature Effects on the Dielectric Response Measurements of Transformer Oil-Paper Insulation System“, IEEE Transactions on Power Delivery, Jänner 2008
- [60] Iwasawa T., Sekine T., Sone M., Mitsui H.: „Effect of bound water cluster in liquid dielectrics on conductivity“, Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 1996
- [61] Van Basshuysen R., Schäfer F.: „Handbuch Verbrennungsmotor“, Vieweg & Teubner GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010, ISBN 978-3-8348-0699-4
- [62] Ganesan V.: „Internal Combustion Engines“, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi (Indien), 2007, ISBN 978-0-07-064817-3

- [63] Heathcote M.: „J & P Transformer Book“, Elseviere Ltd Burlington (England), 2007, ISBN 978-0-7506-8164-3
- [64] Pahlavanpour B., Eklund M.: „Study of Moisture Equilibrium in Oil-Paper System with Temperature Variation“, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, IEEE, 2003
- [65] Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Mashev A.V., Lindgren S.R.: "Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems", Electrical Insulation Magazine, IEEE, 1999
- [66] Koch M., Tenbohlen S., Stirl T.: „Diagnostic Application of Moisture Equilibrium for Power Transformers“, IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, 2010
- [67] Giselbrecht D.: „Dielektrische Modellierung von Öl-Papier-Isolationssysteme im Frequenzbereich zur Diagnose von Leistungstransformatoren“, Cuvillier Verlag Göttingen, 2008, ISBN 978-3-86727-705-1
- [68] Kuchler A., Liebschner M., Reumann A., Fritsche R., Rösner M., Schenk M., Heinrich B., Krause C., Langens A., Titze J.: „Bestimmung von Leitfähigkeiten und dielektrischen Eigenschaften hoch beanspruchter HGÜ-Isolierwerkstoffe“, ETG-Fachtagung Isoliersysteme, Köln, 2010
- [69] Giselbrecht D., Leibfried T.: „Modelling of Oil-Paper Insulation Layers in the Frequency Domain with Cole-Cole-Functions“, Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE, 2006
- [70] Koch M., Feser K.: „Vergleichende Untersuchungen an dielektrischen Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, 2004
- [71] Koch M., Tenbohlen S.: „Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum (Folien der Präsentation)“, Präsentationsunterlagen für die ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau, 2005
- [72] Kuchler A., Hüllmandel F., Böhm K., Koch N., Krause C., Neumann C., Loppach K., Alff J.-J.: „Condition assessment of aged transformer bushing insulations“, Session Papers A2-104 of Study Committee A2, CICRÉ A2, 2006
- [73] Breitenbauch B., Kuchler A., Leibfried T., Zaengl W. S.: „Insulation diagnosis by polarization and depolarization current measurements“, 13. International Symposium on High Voltage Engineering, Delft (Niederland), 2003

- [74] Leibfried T.: „Bestimmung des Wassergehaltes im Isolationssystem von Leistungstransformatoren“, MICAFIL-Symposium, Stuttgart, 2004
- [75] KÜchler A., Hüllmandel F., Böhm K., Krause C., Heinrich B.: „Dielektrische Eigenschaften von Öl-Board- und Öl-Papier-Isolierungen als Kenngröße für die Diagnose von Transformatoren und Durchführungen“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, 2006
- [76] Buerschaper B., Leibfried T.: „Physik des Feuchteaustauschs in einem Öl-Zellulose Isoliersystem unter Beachtung des Grenzschichtverhaltens“, ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau, 2005
- [77] Koch M., Tenbohlen S., Blenow J., Hoehlein I.: „Reliability and Improvements of Water Titration by the Karl Fischer Technique“, 15th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Ljubljana (Slowenien), 2007
- [78] Koch M., Tenbohlen S.: „Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum“, ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau, 2005
- [79] Leibfried T., Kachler A.J., Zaengl W.S., Der Houhanessian V., KÜchler A., Breitenbach B.: „Ageing and Moisture Analysis of Power Transformer Insulation System“, CIGRÉ Session Paper 12-101, Paris, 2002
- [80] ALFF Engineering, <<http://www.alf-engineering.ch>>, 17.04.2011
- [81] Edelstahlwerke Südwestfalen GmbH, <[http://www.isoarc.com/info\\_Datenbank/pdfs/w\\_4301.pdf](http://www.isoarc.com/info_Datenbank/pdfs/w_4301.pdf)>, 19.04.2011
- [82] Siemens AG: „Aus Trocknung wird Lebensdauer“, Siemens AG Energy Sector, Erlangen, 2010
- [83] OMICRON electronics GmbH, <<http://www.omicron.at>>, 23.04.2011
- [84] Metrohm AG, <<http://www.metrohm.com>>, 23.04.2011
- [85] Neuhold Elektronik: „Informationen über die Silikon-Schaltlitze mit der Bezeichnung SIF050RT010“, <<http://2ww.neuhold-elektronik.at>>, 29.04.2011
- [86] ALFF Engineering: „Data Sheet PDC-Analyser-1MOD“, <<http://www.alf-engineering.ch>>, 02.05.2011

- [87] Musai F.: „Sensorbasierte Wassergehaltsbestimmung im Transformatorisolationssystem“, Diplomarbeit an TU Graz am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2009
- [88] Kückler A., Hüllmandel F., Appold M., Liebschner M., Krump R., Titze J.: „Diagnose von Hochspannungsdurchführungen durch PDC-Analyse“, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, 2006
- [89] Bursi C.: „Energiebinnenmarkt“, <<http://www.europarl.europa.eu>>, September 2009
- [90] Winders J.: „Power Transformers – Principles and Applications“, Marcel Dekker Inc., New York, 2002, ISBN 0-8247-0766-4
- [91] Abel P., Damjanovic D., Holoubek M., Holzinger K.: „Möglichkeiten einer Verankerung der energiepolitischen Zielsetzung „Versorgungssicherheit“ im österreichischen Elektrizitätsrecht“, Journal für Rechtspolitik (JRP) Springer-Verlag Wien, 2008, ISSN 1613-754X
- [92] Westman T., Lorin P., Ammann P.A.: „Fit mit 50“, ABB Asean Brown Boveri Ltd, 2010
- [93] Diskussion mit Sumereder C., TU Graz, 17.05.2011
- [94] Baehr H.D.: „Thermodynamik“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005, ISBN 3-540-23870-0
- [95] CIGRÉ Working Group D1.01 (TF 14): „Dielectric Response Diagnoses For Transformer Windings“, CIGRÉ Brochure 414, April 2010, ISBN 978-2-85873-101-5
- [96] Koch M.: „Reliable Moisture Determination In Power Transformers“, CIGRÉ Scientific Papers Electra No. 255, April 2011

# 10 Anhang

## A.1 Messdatenblatt

**Messdatenblatt**

Vortrocknung im Wärmeschrank:

- Was wird vortrocknet:
- Start/Ende/Temp.:

Start der Trocknung (Datum/Uhrzeit):

- Eingestellte Temperatur: **105 °C**

Start Vakuumziehen (Datum/Uhrzeit):

- Eingestellte Temperatur: **105 °C**
- Druck: **mbar**

Start Imprägnieren (Datum/Uhrzeit):

- Öl-Typ:
- Start/Ende N-Anreicherung (K1): ( min), soll: mindestens 60min
- Start/Ende N-Anreicherung (K2): ( min), soll: mindestens 60min
- Druck: **mbar**

Start Vakuum-Brechen (Datum/Uhrzeit):

ENDE des Ofenprozesses (Datum/Uhrzeit):

**NR:**

Skizze des Aufbaues (Dimension)

**VOR DEM OFENPROZESS**

KARL-FISCHER (FLÜSSIG)			
Vor der Stickstoffanreicherung		Nach der Stickstoffanreicherung	
Kanister:	Ent. Temp. $\mu\text{g/min}$	Messtemp. $\mu\text{g/min}$	Messtemp. $\mu\text{g/min}$
	Drift	Menge	Feuchte
		g	ppm
Probe1			
Probe2			
Probe3			
Probe4			
Probe5			
Probe6			
Mittelwert			
Kanister:			
Probe1			
Probe2			
Probe3			
Probe4			
Probe5			
Probe6			
Mittelwert			

**NACH DEM OFENPROZESS**

KARL-FISCHER (FLÜSSIG)			
Ent. Temp. <b>20°C</b>		Ent. Temp. <b>50°C</b>	
Drift	Menge	Drift	Menge
$\mu\text{g/min}$	g	$\mu\text{g/min}$	g
Mittelwert		Mittelwert	
Probe1			
Probe2			
Probe3			
Probe4			
Probe5			
Probe6			
Mittelwert			

**VOR DEM OFENPROZESS**

KARL-FISCHER (FESTSTOFF)			
Ent. Temp. $\mu\text{g/min}$		Messtemp. $\mu\text{g/min}$	
Drift	Menge	Drift	Feuchte
	g		ppm
Mittelwert		Mittelwert	
Probe1			
Probe2			
Probe3			
Probe4			
Probe5			
Probe6			
Mittelwert			

**NACH DEM OFENPROZESS**

KARL-FISCHER (FESTSTOFF)			
Ent. Temp. <b>20°C</b>		Ent. Temp. <b>50°C</b>	
Drift	Menge	Drift	Menge
$\mu\text{g/min}$	g	$\mu\text{g/min}$	g
Mittelwert		Mittelwert	
Probe1			
Probe2			
Probe3			
Probe4			
Probe5			
Probe6			
Mittelwert			

**ANMERKUNGEN für die auf dieser Seite durchgeführten Arbeiten/Messungen**

Version: V6

ENDE

Abbildung A.1-1: Entwurf des Messdatenblatts (Vorder- und Rückseite)

## B.1 Konstruktionsskizzen 1. Prüfling

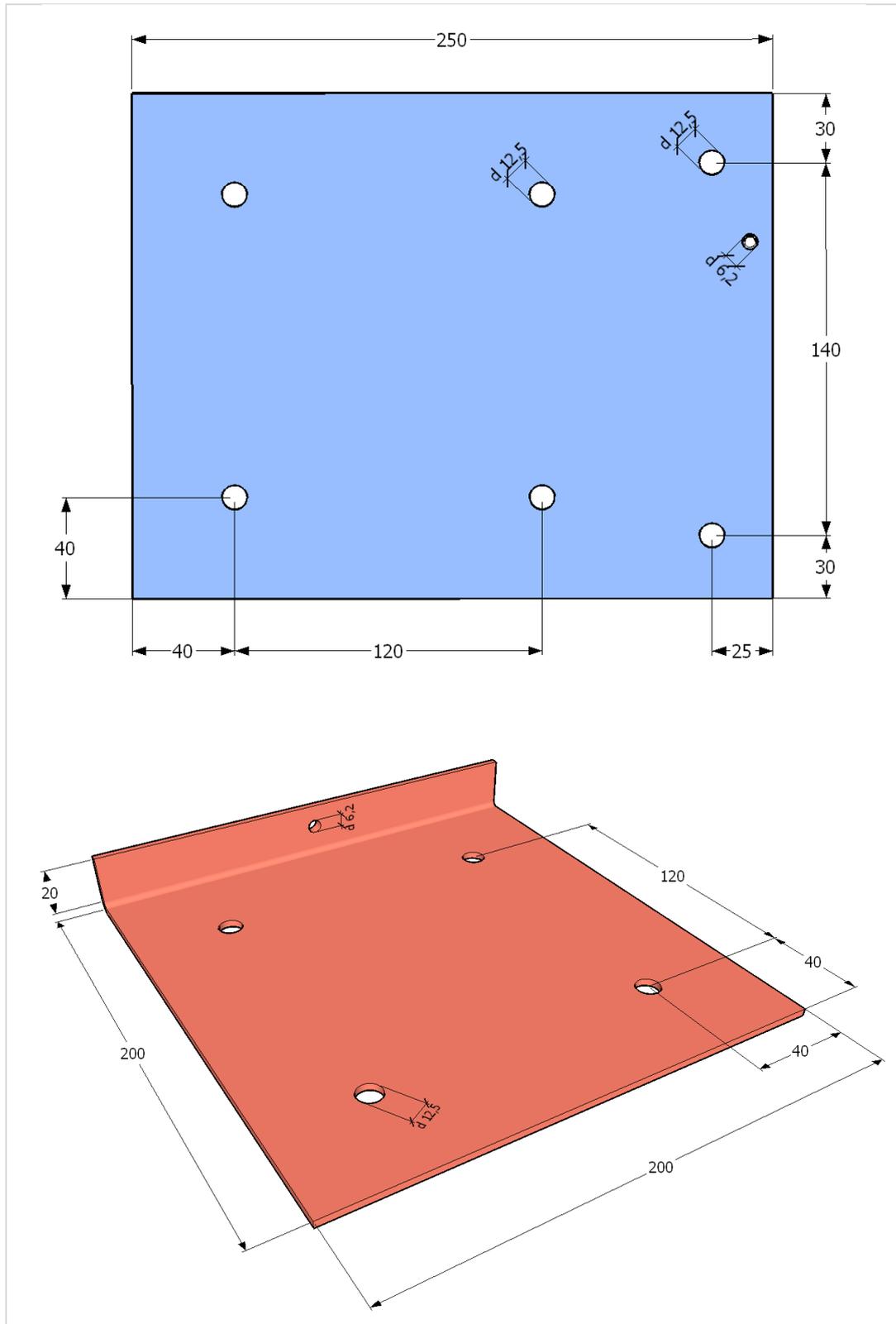


Abbildung B.1-1: Konstruktionsskizzen erster Prüfling (inkl. Abmessungen in mm), Aluminiumblechdicke: 3 mm, oben: Messelektrode, unten: spannungsführende Elektrode [eigene Darstellung]

### C.1 Konstruktionsskizzen 2. Prüfling

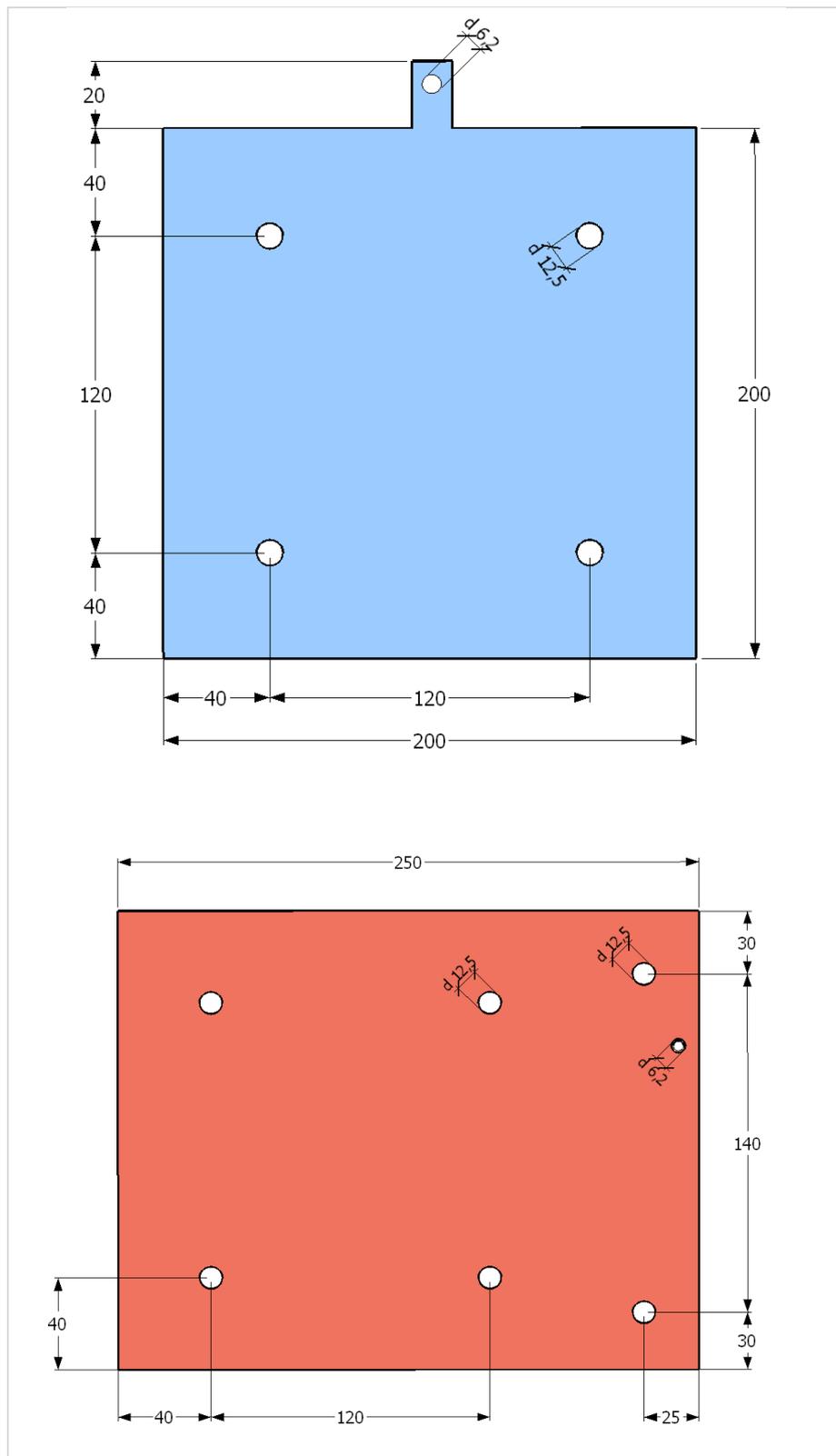


Abbildung C.1-1: Konstruktionsskizzen zweiter Prüfling (inkl. Abmessungen in mm), Aluminiumblechdicke: 3 mm, oben: Messelektrode, unten: spannungsführende Elektrode [eigene Darstellung]

## D.1 Konstruktionsskizzen 2. Prüfgefäß

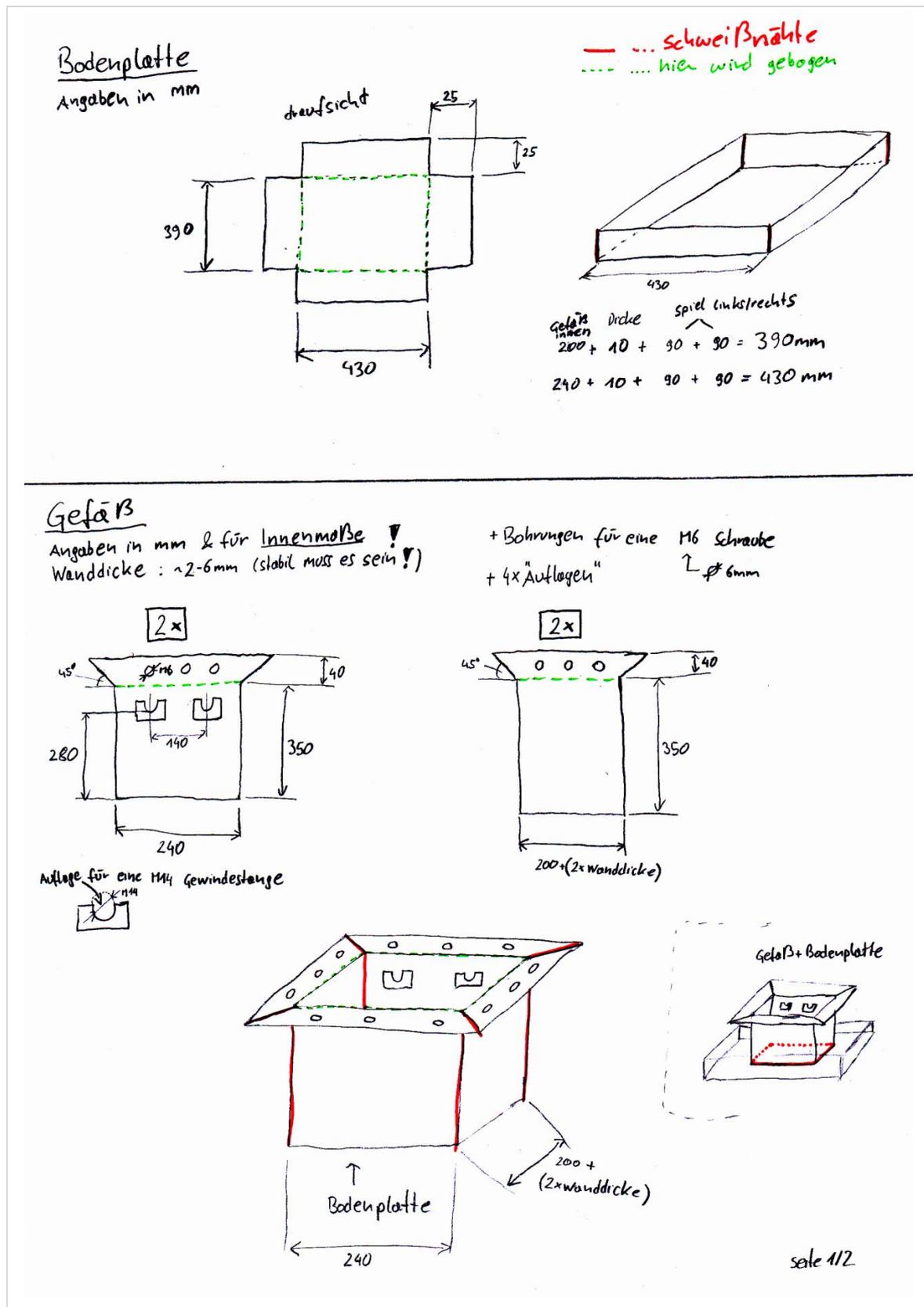


Abbildung D.1-1: Konstruktionsskizzen für das zweite Prüfgefäß (Seite 1/2) [eigene Darstellung]

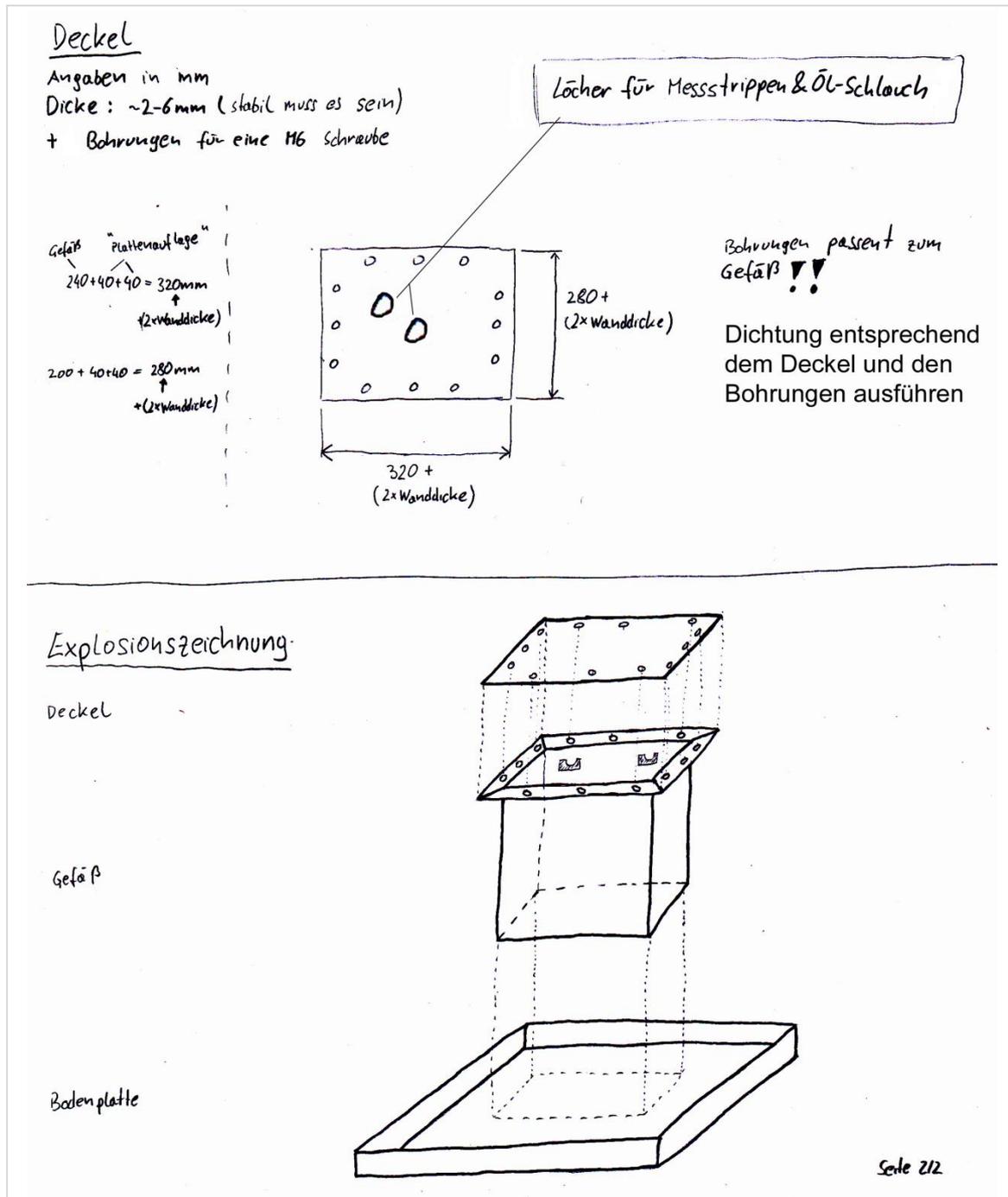


Abbildung D.1-2: Konstruktionsskizzen für das zweite Prüfgefäß (Seite 2/2) [eigene Darstellung]

Wie bereits auf Seite 72 erwähnt, kam es zwischen dem realen Prüfgefäß und den Konstruktionsskizzen zu ein paar Abweichungen, welche allerdings auf die Funktion des Gefäßes keinen Einfluss hatten und daher auch nicht detaillierter angeführt werden. So wurden beispielsweise alle vier Seitenteile gleich groß gefertigt, sowie einige Abmessungen zu Gunsten der entstehenden Kosten geändert.

## E.1 Wertetabellen für die Abbildungen aus Kapitel 6.2.5

**Tabelle E.1-1: Wertetabelle für Abbildung 6.2-15**

Messtemperatur	Wassergehalt im Feststoff in %						
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse				Isolieröl-Analyse	
		Analysesoftware: DIRANA 1.5			SW: PDC-Evaluation		
	KFT (aus Tab. 6.2-8)	FDS (DIRANA) (aus Tab. 6.2-2)	PDC (DIRANA) (aus Tab. 6.2-3)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-4)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-4)	KFT, Gl. 4.2-2 (aus Tabelle 6.2-9)	KFT, Oommen (aus Tabelle 6.2-9)
20°C	0,40	1,07	0,95	0,59	1,13	1,18	0,78

**Tabelle E.1-2: Wertetabelle für Abbildung 6.2-16**

Messtemperatur	Wassergehalt im Feststoff in %						
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse				Isolieröl-Analyse	
		Analysesoftware: DIRANA 1.5			SW: PDC-Evaluation		
	KFT (aus Tab. 6.2-8)	FDS (DIRANA) (aus Tab. 6.2-2)	PDC (DIRANA) (aus Tab. 6.2-3)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-5)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-5)	KFT, Gl. 4.2-2 (aus Tabelle 6.2-9)	KFT, Oommen (aus Tabelle 6.2-9)
50°C	0,19	1,05	0,50	0,57	1,17	0,49	0,31

**Tabelle E.1-3: Wertetabelle für Abbildung 6.2-17**

Messtemperatur	Wassergehalt im Feststoff in %						
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse				Isolieröl-Analyse	
		Analysesoftware: DIRANA 1.5			SW: PDC-Evaluation		
	KFT (aus Tab. 6.2-8)	FDS (DIRANA) (aus Tab. 6.2-2)	PDC (DIRANA) (aus Tab. 6.2-3)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-5)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-5)	KFT, Gl. 4.2-2 (aus Tabelle 6.2-9)	KFT, Oommen (aus Tabelle 6.2-9)
90°C	0,24	0,40	-	0,20	0,50	0,26	0,22

**Tabelle E.1-4: Wertetabelle für Abbildung 6.2-18**

Messtemperatur	Wassergehalt im Feststoff in %						
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse				Isolieröl-Analyse	
		Analysesoftware: DIRANA 1.5			SW: PDC-Evaluation		
	KFT (aus Tab. 6.2-8)	FDS (DIRANA) (aus Tab. 6.2-2)	PDC (DIRANA) (aus Tab. 6.2-3)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-4 und Tabelle 6.2-5)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-4 und Tabelle 6.2-5)	KFT, Gl. 4.2-2 (aus Tabelle 6.2-9)	KFT, Oommen (aus Tabelle 6.2-9)
20°C	0,40	1,07	0,95	0,59	1,13	1,18	0,78
50°C	0,19	1,05	0,50	0,57	1,17	0,49	0,31
90°C	0,24	0,40	-	0,20	0,50	0,26	0,22

**Tabelle E.1-5: Wertetabelle für Abbildung 6.2-20**

Messtemperatur	Elektrische Ölleitfähigkeit in S/m				
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse			Isolieröl-Analyse
	KFT	FDS (DIRANA) (aus Tabelle 6.2-2)	PDC (DIRANA) (aus Tabelle 6.2-3)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-4 und 6.2-5)	KFT
20°C	-	2,60 E-13	2,73 E-13	1,73 E-13	-
50°C	-	2,30 E-12	4,00 E-12	4,90 E-13	-
90°C	-	8,75 E-12	-	4,35 E-12	-

**Tabelle E.1-6: Wertetabelle für Abbildung 6.2-21**

Messtemperatur	Spezifischer Widerstand des Isolieröls in $\Omega\text{m}$				
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse			Isolieröl-Analyse
	KFT	FDS (DIRANA)	PDC (DIRANA)	PDC (Analyser-1MOD)	KFT
20°C	-	3,85 E+12	3,66 E+12	5,78 E+12	-
50°C	-	4,35 E+11	2,50 E+11	2,04 E+12	-
90°C	-	1,14 E+11	-	2,30 E+11	-

**Tabelle E.1-7: Wertetabelle für Abbildung 6.2-22**

Messtemperatur	Anordnungskapazität bei 50 Hz in pF				
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse			Isolieröl-Analyse
	KFT	FDS (DIRANA) (aus Tabelle 6.2-2)	PDC (DIRANA)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Tabelle 6.2-4 und 6.2-5)	KFT
20°C	-	159	-	139	-
50°C	-	243	-	139	-
90°C	-	244	-	141	-

**Tabelle E.1-8: Wertetabelle für Abbildung 6.2-23**

Messtemperatur	Verlustfaktor bei einer Frequenz von 10 mHz				
	Feststoff-Analyse	Dielektrische Analyse			Isolieröl-Analyse
	KFT	FDS (DIRANA) (aus Messverlauf)	PDC (DIRANA) (aus Messverlauf)	PDC (Analyser-1MOD) (aus Messverlauf)	KFT
20°C	-	0,13	0,13	0,04	-
50°C	-	0,84	0,87	0,11	-
90°C	-	1,33	-	0,35	-

---

## 11 Abkürzungen

bzw.	beziehungsweise
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
d.h.	das heißt
DP	Polymerisationsgrad = (durchschnittliche) Kettenlänge von Zellulose-Molekülen (engl. Degree of polymerisation)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
Ent.Temp	Entnahmetemperatur (des Probenmaterials)
FDS	Frequenzbereichsspektroskopie (engl. Frequency Domain Spectroscopy)
Gl.	Gleichung
HPLC	Hochdruck-Flüssigkeitschromatographie (engl. high pressure/performance liquid chromatography)
i.d.R.	in der Regel
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	The Institute of Electric and Electronic Engineers
inkl.	inklusive
KFT	Karl-Fischer-Titration
konst.	konstant
Messtemp.	Messtemperatur (des Probenmaterials)
OIP	ölimprägnierte Papiere
PCB	polychlorierte Biphenyle
PDC	Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (engl. Polarization and Depolarization Current)
PEEK	Polyetheretherketon
ppm	parts per million
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
SW	Software
Temp.	Temperatur
usw.	und so weiter
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
vgl.	vergleiche
VPE	vernetztes Polyethylen
z. B.	zum Beispiel