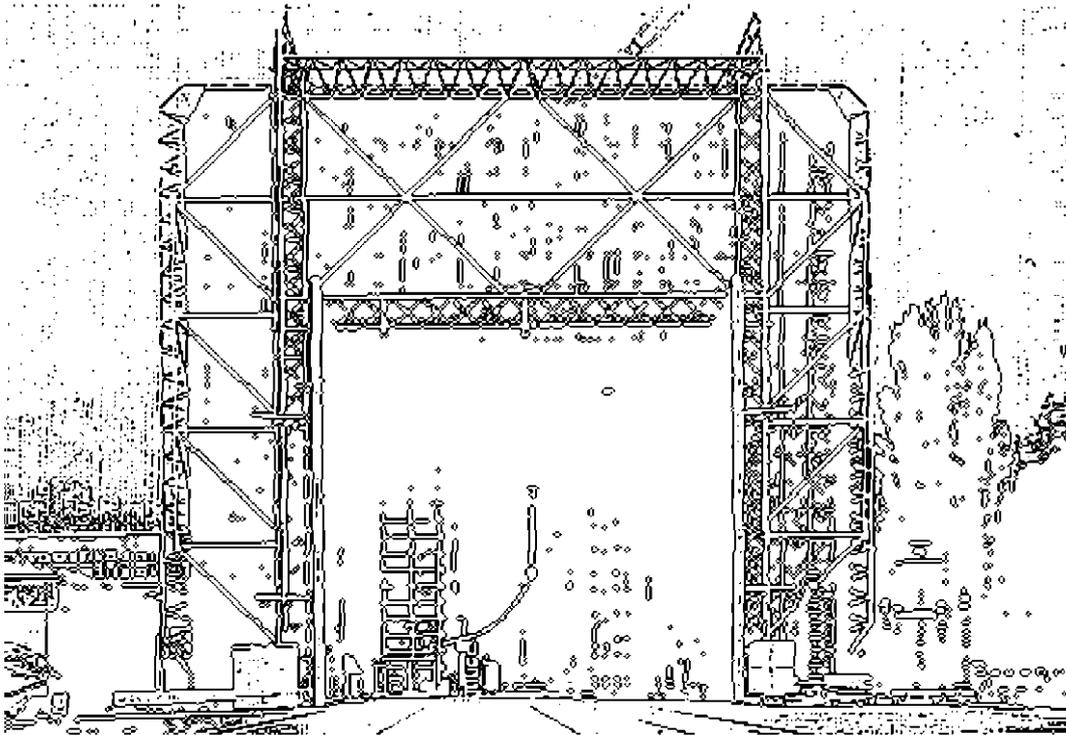


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

DIPLOMARBEIT



Institut für Hochspannungstechnik
und Systemmanagement

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölimprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

Diplomarbeit

Durchgeführt am

Institut für

**Hochspannungstechnik
und Systemmanagement**

an der

Technischen Universität Graz

Vorgelegt von

Christian Bonini

Graz, November 2011

Institutsvorstand:

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

Begutachter:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz

Betreuer:

Dipl.-Ing. Thomas Judendorfer

Danksagung

Diese Diplomarbeit entstand im Laufe meiner Projektstätigkeit an der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik GmbH der Technischen Universität Graz.

Für die Ermöglichung dieses Arbeitsverhältnisses, in der ich wertvolle Erfahrungen sammeln durfte, danke ich dem Leiter der Versuchsanstalt, Herrn Vizerektor O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Michael Muhr und meinem direkten Vorgesetzten, Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz. Weiters darf ich meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Thomas Judendorfer, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand, und meinen ArbeitskollegInnen danken.

Weiters möchte ich mich bei meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben, meiner Schwester Nicole und Freunden danken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Katrin für ihre Geduld und Hilfe.

EIDESSTÄTLICHE 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

Eine der wichtigsten Isoliermedien in der Hochspannungstechnik ist die Öl-Zellulose-isolierung. Diese besitzt hervorragende elektrische Isoliereigenschaften und wird beispielsweise in Kabeln, Transformatoren und Wandlern eingesetzt.

Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen werden immer mehr Hochspannungsnetze zusammengeschlossen. Um große Entfernungen zu überbrücken bietet die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) wirtschaftliche und technische Vorteile gegenüber der herkömmlichen Hochspannungs-Wechselstrom-Übertragung. Einige Vorteile der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung sind [26]:

- Nur 2 Leiter werden für die Übertragung benötigt
- Energieübertragung über große Entfernungen ist verlustarm möglich
- Kuppeln von asynchronen Netzen ist möglich

In dieser Diplomarbeit wird die Leitfähigkeit des ölimprägnierten Pressspanns mit unterschiedlichen Feuchtigkeiten untersucht. Diese Untersuchung ist ein Bestandteil zur Dimensionierung von Öl-Pressspan-Isolierungen für Gleichspannungsanwendungen.

Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit einem selbst konstruierten, ölfüllten Messkessel bestimmt. In diesem Messkessel wird ein Strom, der sich auf Grund des angelegten, elektrischen Gleichfeldes einstellt, erfasst. Dieser Strom setzt sich aus dem Polarisationsstrom und dem Isolationsstrom zusammen. Der Polarisationsstrom sinkt nach einer Exponential-Funktion ab. Nach etwa einem Tag sind die Polarisationsvorgänge abgeschlossen und somit ist dieser Polarisationsstrom abgeklungen. Mit diesem Isolationsstrom kann die elektrische Leitfähigkeit berechnet werden. Messungen wurden für ölimprägnierten Pressspan mit einem Feuchtegehalt von 0,2% bis etwa 5,5% durchgeführt. Abschließend werden die Messergebnisse mittels Matlab und Excel aufbereitet und diskutiert.

Abstract

One of the most important insulation systems in the high voltage technology is the oil-paper-insulation. Because of its good electrical properties, this insulation system is used in cables and transformers for example. Due to economic and technical advantages, high voltage networks are joined together. The high voltage direct current transmission shows considerable advantages compared to the high voltage alternating current transmission for energy transport over long distances.

Some of these advantages are:

- Only two conductors are needed
- Energy transport over long distances with low losses is possible
- Asynchronous electrical networks can be interconnected

In this diploma thesis the electrical conductivity of oil impregnated pressboards with different moisture content (0,2% to 5,5%) is measured. This research is part of design for oil cellulose insulation boards for high voltage direct current.

For measuring the electrical conductivity, the oil impregnated pressboards were measured in a customized, mineral oil filled, test vessel. The electrical conductivity is governed by a current which is caused by an electrical direct current field. This current contains the insulation current and the polarisation current. In about 23 hours the polarisation current decreases exponentially. After one day are the polarisation effects completed. The oil impregnated pressboard contains a moisture of 0,2% to 5,5%. The electrical conductivity was computed using the insulation current. The results of the measurement are prepared by Matlab and Excel.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Allgemeines.....	1
1.2	Problemstellung.....	1
1.3	Ziele der Diplomarbeit.....	2
2	Das Öl-Zellulose-Isoliersystem.....	3
2.1	Allgemeines.....	3
2.2	Zellulose.....	3
2.2.1	Eigenschaften.....	3
2.2.2	Herstellung der Zellulose.....	4
2.2.3	Aufbereitung.....	5
2.3	Isolieröl.....	7
2.3.1	Eigenschaften.....	7
2.3.2	Herstellung.....	8
2.3.3	Aufbereitung.....	8
2.4	Alternative Isolierflüssigkeiten.....	9
2.5	Elektrische Parameter.....	10
2.5.1	Permittivität ϵ	10
2.5.2	Die elektrische Leitfähigkeit.....	11
2.5.3	Polarisations-Mechanismen und –Vorgänge.....	11
2.6	Alterungsvorgänge.....	13
2.7	Feuchtigkeitsanalysen in Betriebsmitteln.....	16
2.7.1	Feuchtigkeitsanalyse des Isolieröls.....	16
2.7.2	Feuchtigkeitsanalyse der Zellulose.....	18
3	Elektrische Leitfähigkeit.....	21
3.1	Grundlagen.....	21
3.2	Messung der elektrischen Leitfähigkeit.....	22
3.2.1	Strom-Spannungs-Messung.....	23
3.2.2	Polarisations- Depolarisationsstrom-Messung (PDC).....	24
3.2.3	Ladungs-Differenz-Methode (CDM).....	25
3.2.4	Vergleich der Messmethoden.....	26
3.3	Ergebnisse der Literatur.....	27
4	Messaufbau und Versuchsdurchführung.....	31
4.1	Bestimmung der Feuchtigkeit.....	31
4.1.1	Feuchtigkeitsbestimmung des Isolieröls.....	31
4.1.2	Feuchtigkeitsbestimmung der Pressspan-Proben.....	31
4.2	Pressspan-Proben Vorbereitung, Aufbereitung, Verfeuchtung und Gruppeneinteilung 34	
4.2.1	Pressspan-Proben-Vorbereitung.....	34
4.2.2	Verfeuchtung der Pressspan-Proben.....	35
4.2.3	Gruppeneinteilung der Pressspan-Proben.....	37
4.3	Leitfähigkeitsmessungen der Pressspan-Proben.....	38
4.3.1	Allgemeine Anforderungen.....	38
4.3.2	Messanordnung.....	38
4.3.3	Messablauf.....	42
5	Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen.....	44
5.1	Auswertung der Ergebnisse.....	44
5.2	Messergebnisse der Pressspan-Proben mit 0,2% Feuchtigkeitsgehalt.....	46
5.2.1	Messergebnisse.....	46
5.2.2	Diskussion der Messung der Gruppe mit 0,2% Feuchtigkeitsgehalt.....	47
5.3	Messergebnisse der Pressspan-Proben mit 1,5% Feuchtigkeitsgehalt.....	48

5.3.1	Messergebnisse.....	48
5.3.2	Diskussion der Messung der Gruppe mit 1,5% Feuchtigkeitsgehalt	49
5.4	Messung der Pressspan-Proben mit 2,5% Feuchtigkeitsgehalt	51
5.4.1	Messergebnisse.....	51
5.4.2	Diskussion der Messung der Gruppe mit 2,5% Feuchtigkeitsgehalt	52
5.5	Messergebnisse der Pressspan-Proben mit 3,6% Feuchtigkeitsgehalt	53
5.5.1	Messergebnisse.....	53
5.5.2	Diskussion der Messung der Gruppe mit 3,6% Feuchtigkeitsgehalt	54
5.6	Messung der Pressspan-Proben mit 5,5% Feuchtigkeitsgehalt	55
5.6.1	Messergebnisse.....	55
5.6.2	Diskussion der Messung der Gruppe mit 5,5% Feuchtigkeitsgehalt	56
5.7	Zusammenfassung aller Messungen.....	58
5.8	Diskussion der Messergebnisse	61
6	Schlussfolgerungen.....	66
6.1	Verbesserungsvorschläge für zukünftige Messungen	67
6.2	Weiterführende Untersuchungen.....	67
7	Zusammenfassung.....	68
	Literaturverzeichnis	70
	Anhang.....	74

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Eines der wichtigsten Isoliersysteme für die Hochspannungstechnik ist die Öl-Zelluloseisolierung. Diese besitzt hervorragende elektrische Isoliereigenschaften und wird beispielsweise in Transformatoren, Kabeln, Wandlern und Durchführungen eingesetzt. Aufgrund der wirtschaftlichen Voraussetzungen werden die Betriebsmittel immer mehr an ihre Leistungsgrenzen getrieben. Die Lebensdauer der Betriebsmittel wird sehr oft durch den Zustand des Dielektrikums bestimmt. Um die Betriebsmittel über Jahre und Jahrzehnte sicher zu betreiben, wird das Betriebsmittel beziehungsweise Dielektrikum mit aufwendigen Diagnosemethoden überwacht und gewartet bzw. instand gesetzt. Diese Analysen geben Aufschluss über den Zustand des Betriebsmittels und dessen Ausfallsrisikos. Die Zelluloseisolierung kann nur sehr schwer bis gar nicht erneuert werden.

1.2 Problemstellung

Um den hohen Lebensstandard und das Wirtschaftswachstum zu gewährleisten, ist eine ausreichende Energieversorgung notwendig. Eine der wichtigsten Energieformen ist die elektrische Energie. Diese Energie wird mit Kraftwerken gewonnen. Die elektrische Energie wird in Form von Strom und Spannung in Netze eingespeist. Die Netze bestehen unter anderem aus Kabeln, Freileitungen und Transformatoren. Transformatoren sind eine der wichtigsten Bindeglieder zwischen den verschiedenen Netzebenen, Netzen, Kraftwerken und Verbrauchern. Um die Netze zu stabilisieren und Strom zu exportieren, werden immer mehr Netze zusammengeschlossen. Um große Entfernungen zu überbrücken bietet die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) wirtschaftliche und technische Vorteile gegenüber der herkömmlichen Hochspannungs-Wechselstrom-Übertragung. Einige Vorteile der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung sind [26]:

- Nur 2 Leiter werden für die Übertragung benötigt
- Energieübertragung über große Entfernungen ist verlustarm möglich
- Keine Stromverdrängung (Skin-Effekt)
- Kuppeln von asynchronen Netzen ist möglich

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölimprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

Um die HGÜ zu optimieren, sollten die Betriebsmittel (z.B. Kabel) technisch sowie wirtschaftlich weiterentwickelt werden. Dazu ist es notwendig detaillierte Erkenntnisse über die einzelnen Komponenten der Betriebsmittel, zum Beispiel über die Isolierung, zu erforschen. Das Thema dieser Diplomarbeit über die Leitfähigkeitsmessungen von ölimprägniertem Pressspan leiste somit einen Beitrag für die Dimensionierung der Zelluloseisolierung.

1.3 Ziele der Diplomarbeit

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des ölimprägnierten Pressspans mit verschiedenen Feuchtigkeitswerten. Diese Untersuchung ist ein Bestandteil zur Dimensionierung der Öl-Pressspan-Isolierung für Gleichspannungsanwendungen. Für die Untersuchung werden die vorbereiteten Pressspan-Proben in Gruppen eingeteilt. Die Einteilung erfolgt durch die Feuchtigkeitswerte der Pressspan-Proben, die anhand der Karl-Fischer-Titration bestimmt werden. In dieser Untersuchung wird die elektrische Leitfähigkeit speziell bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 0,2%, 1,5%, 3,5% und 5,5% gemessen. Die elektrische Leitfähigkeit wurde in einem selbst konstruierten, ölfüllten Messkessel bestimmt. In diesem Messkessel wird ein Strom, der sich auf Grund des angelegten, elektrischen Gleichfeldes einstellt, erfasst. Dieser besteht aus dem Polarisationsstrom und dem Isolationsstrom. Der Polarisationsstrom klingt nach einer Exponentialfunktion ab. Nach etwa einem Tag ist der Polarisationsstrom abgeklungen. Mit dem Isolationsstrom kann die elektrische Leitfähigkeit berechnet werden. Die Elektrodenanordnung entspricht der Norm [19]. Abschließend werden die Messergebnisse mittels Matlab und Excel aufbereitet und diskutiert, um genauere Aussagen über die Leitfähigkeit von Öl imprägnierten Pressspan ableiten zu können.

2 Das Öl-Zellulose-Isoliersystem

2.1 Allgemeines

Das Öl-Zellulose-Isoliersystem ist ein bewährtes Dielektrikum. Dieses besitzt hervorragende elektrische Isoliereigenschaften. Meistens wird Mineralöl in Kombination mit Zellulose verwendet. Aufgrund des Umweltschutzes und technischen Vorteilen werden immer häufiger Alternativen zum Mineralöl wie beispielsweise Silikonöl und Esterflüssigkeiten verwendet. Theoretisch könnten auch Isoliergase anstatt der Isolierflüssigkeiten verwendet werden, dies kommt jedoch in der Praxis nicht zum Einsatz. Das Öl-Zellulose-Isoliersystem wird hauptsächlich in Transformatoren, Kabeln und Durchführungen eingesetzt. Leistungstransformatoren sind eines der wichtigsten Betriebsmittel in den elektrischen Netzen. Da diese Leistungstransformatoren sehr kostspielig sind, werden diese mit aufwendigen Diagnosesystemen gewartet und gegebenenfalls instand gesetzt. Da der Zustand der Isolierung eines Leistungstransformators die Lebensdauer und die Leistungsgrenze bestimmt, stehen dielektrische Diagnoseverfahren wie zum Beispiel $\tan(\delta)$ im Vordergrund.

2.2 Zellulose

2.2.1 Eigenschaften

Die Zellulose besteht aus Makromolekülen, siehe Abbildung 1. Dieses Makromolekül ist aus vielen Moleküleinheiten aufgebaut. Die Struktur ähnelt einem Polymer. Die mittlere Anzahl der Moleküleinheiten wird Polymerisationsgrad (DP-Wert) genannt. Bei neuwertiger beziehungsweise ungealterter Zellulose beträgt der Polymerisationsgrad etwa 1000 bis 1400. Dieser DP-Wert ist ein Maß für die Qualität und des Alterungszustandes der Zellulose. Je geringer der Polymerisationsgrad ist, desto schlechter sind die Eigenschaften der Zellulose wie zum Beispiel die mechanische Festigkeit. Ist der Polymerisationsgrad auf etwa 150 bis 200 abgesunken, muss die Zellulose ersetzt werden. Aufgrund der Alterungseinflüsse wie beispielsweise Temperatur oder elektrische Entladungen brechen Moleküle beziehungsweise Atomgruppen auf. Zusätzlich wird die Zellulose von chemischen Verbindungen im Öl geschädigt wie zum Beispiel durch Säuren. Zusätzlich ist die Zellulose stets bestrebt, einen Feuchtigkeitsausgleich mit ihrer Umgebung herzustellen. Dieser Effekt wird

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt Hygroskopie genannt. Die Feuchtigkeit beeinflusst die Eigenschaften der Zellulose erheblich, wie zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit. Die Feuchtigkeitsaufnahme hängt von der Temperatur ab. Die Sättigungfeuchte für Papier bzw. Pressspan an der Luft ist circa $10 \div 15\%$, bei ölprägniertem Papier bzw. Pressspan an der Luft beträgt die Sättigungfeuchte circa $5 \div 8\%$ [1, 2 und 12].

Durch Verpressen und/oder Verkleben von einzelnen Zelluloselagen kann die Dicke des Pressspans und des Papiers praktisch beliebig groß sein. Pressspan ist mechanisch sehr stabil, sodass Formteile für Transformatoren, Gewindestangen und vieles mehr aus ihnen produziert wird. Um die mechanische Festigkeit oder die Temperaturbeständigkeit noch weiter zu erhöhen, können synthetische Fasern wie zum Beispiel Aramide eingearbeitet werden [1].

2.2.2 Herstellung der Zellulose

Zellulose wird aus Holz und Pflanzen gewonnen. Je länger die Makromoleküle, siehe Abbildung 1, sind desto besser ist die Qualität des Papiers. Die mittlere Länge des Makromoleküls ist der sogenannte Polymerisationsgrad DP.

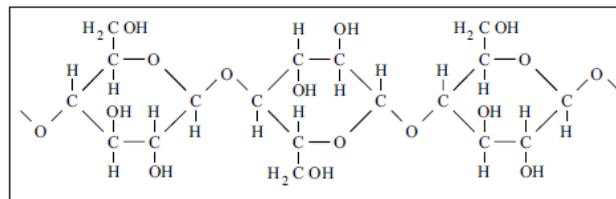


Abb.:1 Chemische Struktur der Zellulose aus [33]

Die Herstellung von Papier und Pressspan erfolgt im ersten Schritt durch die Trennung der Zellulose von anderen Holzbestandteilen, wie zum Beispiel Lignin und Harz. Anschließend kommt die Zellulose in einen Zellstoffkocher, in dem ein saurer oder ein alkalischer Aufschluss erfolgt. Wenn die Zellulose für elektrotechnische Anwendungen verwendet werden soll, muss die Säure beziehungsweise die Base sorgfältig heraus gewaschen werden. In einem weiteren Schritt wird die Zellulose in Wasser gelöst und gemahlen. Im weiteren Verlauf kommt das Wasser-Zellulosegemisch in die Papiermaschine, dort wird das Papier auf Rollen gewickelt. Im Kalandrieren wird das Papier noch mechanisch verdichtet, damit sich die elektrischen Eigenschaften noch weiter verbessern, wie zum Beispiel die Durchschlagsfestigkeit. Die theoretische Dichte des Papiers beträgt $1,55 \text{ g/cm}^3$. Diese Dichte wird wegen des Porenvolumens von $20 \div 60$ Volumenprozent in der Praxis nicht erreicht (maschinen-

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölimprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt
glattes Papier hat $0,65 \text{ g/cm}^3$, hochsatiniertes Papier $1,15 \text{ g/cm}^3$, und Pressspan erreicht $1,3 \text{ g/cm}^3$).

Pressspan entsteht durch nasses Verpressen vieler dünner Schichten ohne Bindemittel. Pro 1 mm werden ca. 35 Lagen mit jeweils $30 \mu\text{m}$ verbunden. Hartpapier entsteht durch Verpressen von Papierlagen, die mit Epoxydharz oder Phenolharz getränkt werden [1, 2, und 20].

Bevor das Papier beziehungsweise der Pressspan verwendet werden kann, müssen diese noch getrocknet und imprägniert werden.

2.2.3 Aufbereitung

Da chemische und physikalische Eigenschaften des Papiers/Pressspans vom Wassergehalt bestimmt werden, sollte dieser so gering als möglich gehalten werden. Die Feuchtigkeitswerte, die nach der Trocknung erreicht werden, bewegen sich im Bereich von 0,3 bis 1 Massenprozent. Das Erlangen eines Wassergehalts von weniger als 0,1% ist technisch nicht realisierbar.

Die Trocknung erfolgt in mehreren Schritten, die im Folgenden Abschnitt beschrieben werden.

In Abbildung 2 wird oben links ein Beispiel eines Vakuumofens, mit dem man Papier imprägnieren kann, gezeigt.

Rechts oben in Abbildung 2 wird eine Kurve dargestellt, die zur Beurteilung des Trocknungszustandes herangezogen werden. Diese beschreibt den Druckanstieg nach dem Abschalten der Vakuumpumpe. Im unteren Diagramm wird der zeitliche Druck-, $\tan(\delta)$ - und Temperaturverlauf während der Aufbereitung des Papiers beschrieben [1].

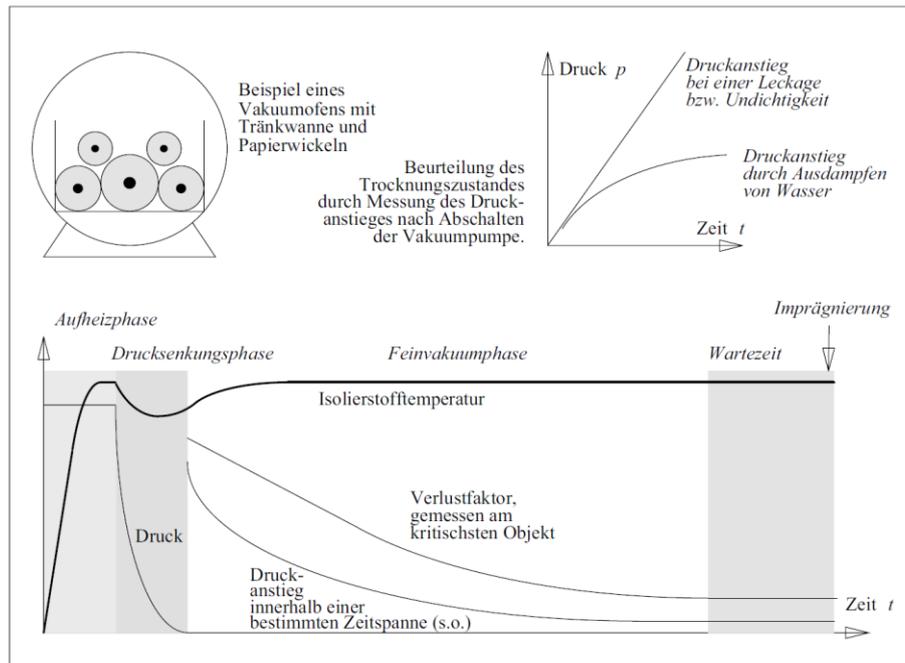


Abb.:2 Aufbereitungsverfahren von Papier [1]

Das Papier beziehungsweise der Pressspan ist nach der Herstellung sehr nass, da die Poren und die Zwischenräume mit Wasser gefüllt sind. Auch die Oberfläche ist mit einem Wasserfilm überzogen. Um die Trocknung zu beschleunigen wird das Papier auf $100 \div 130^\circ\text{C}$ langsam erhitzt. Um das Papier beziehungsweise den Pressspan zu schonen, wird die Temperatur um 10°C pro Stunde gesteigert.

Sobald die Zellulose oberflächlich getrocknet ist, beginnt die zweite Phase der Trocknung. Hier verlangsamt sich die Trocknung drastisch, weil das Wasser sich auf Grund der Diffusion durch das Papier beziehungsweise den Pressspan zwängen muss. Um die Trocknung zu beschleunigen, wird Vakuum angelegt. Dadurch wird der Wasserdampfpartialdruck im Inneren des Papiers beziehungsweise des Pressspans erhöht und die Feuchtigkeit kann besser entweichen. In dieser zweiten Phase sinkt die Temperatur des Papiers beziehungsweise des Pressspans wieder ab.

Sobald der Wassergehalt auf sein kritisches Niveau sinkt, treten die hygroskopischen Eigenschaften des Papiers beziehungsweise des Pressspans in Erscheinung. Damit beginnt der letzte Schritt der Trocknung. In dieser Phase wird die Temperatur wieder gesteigert, wobei das Vakuum bestehen bleibt [1, 2 und 22].

Wenn das Papier nach der konventionellen Trocknung ungleichmäßig getrocknet wurde, kann das Papier nachgetrocknet werden. Für diese Nachtrocknung können verschiedene elektromagnetische Strahlungen wie Infrarotstrahlung, Mikrowellen und

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt Radiowellen mit 13 MHz, verwendet werden. Dabei müssen die feuchten Stellen der Zellulose detektiert werden. Diese Flächen können gezielt mit der elektromagnetischen Strahlung getrocknet werden [21].

Abschließend nach der Trocknung wird das Papier bzw. der Pressspan mit einer geeigneten Isolierflüssigkeit - meistens Mineralöl - imprägniert. Durch das Imprägnieren erreicht das Papier bzw. der Pressspan die geforderten Eigenschaften. Im Folgenden Kapitel werden die Herstellung und die Aufbereitung von Mineralöl beschrieben.

2.3 Isolieröl

2.3.1 Eigenschaften

Neuwertiges Isolieröl hat eine Durchschlagsfeldstärke von etwa $50 \div 60$ kV pro 2,5 mm (oder mehr), bei Schlagweiten in mm-Bereich. Wenn die Ölschichten noch dünner werden, erhöhen sich die Durchschlagsfeldstärken drastisch. Für dünne Schichten wurden 100 kV/mm und mehr gemessen. Bei dünnen Filmen im Bereich von wenigen μm kann die Durchschlagsfeldstärke durchaus 300 kV/mm betragen. Dieses Phänomen wird bei der Öl-Papierisolierung genutzt.

Im Papier und im Pressspan sind Poren und Spalte vorhanden. Die Poren haben einen Durchmesser von etwa $1 \div 3$ μm bei hoch verdichteten dünnen Papieren. Die Porengröße bei dickem, weniger stark verdichtetem Papier beträgt $10 \div 30$ μm . Aus diesem Grund wird das Papier und der Pressspan mit einem geeigneten Isoliermittel meist Mineralöl imprägniert. Je kleiner die Spalte und Poren sind, die mit der Isolierflüssigkeit gefüllt sind, desto höher ist die Einsatzfeldstärke für Entladungen [1 und 2].

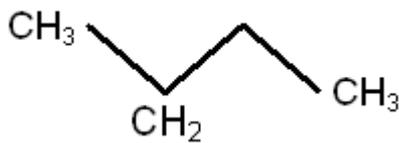
Im Gegensatz zu Zellulose kann Isolieröl bei Lichtbögen und Durchschlägen die Isolationsfestigkeit wieder herstellen. Der hohe Wasserstoffanteil, der bei einem Lichtbogen entsteht, kühlt den Lichtbogen solange bis dieser verlischt. Danach wird die Isolationsfestigkeit wieder hergestellt.

Isolieröl kann sich auch durch energiereiche Teilentladungen verfestigen, die sogenannte X-Wachsbildung. Dies geschieht meist an scharfkantigen Elektroden, bei denen starke Teilentladungen auftreten. Dadurch verliert das Isolieröl seine guten dielektrischen Eigenschaften [2].

2.3.2 Herstellung

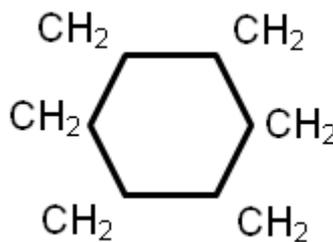
Nach der Förderung des Erdöls wird dieses zuerst entgast, entsalzt und entwässert. Zur Gewinnung von Isolieröl muss das Erdöl fraktionell destilliert werden. Hauptsächlich werden gesättigte Kohlenwasserstoffe verwendet, die eine naphthenische oder paraffinische Molekülstruktur besitzen. Diese Kohlenwasserstoffe sind chemisch beständiger als ungesättigte aromatische Kohlenwasserstoffe. Ausgewählte Beispiele für Kohlenwasserstoffe:

Propan (paraffinisch):

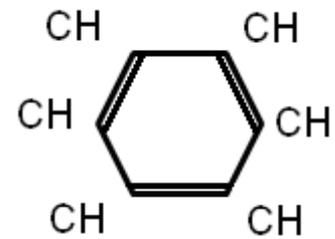


Cyclohexan

(naphthenisch):



Benzol (aromatisch):



Um die unerwünschten aromatischen Bestandteile zu entfernen, wird das Isolieröl nach der Destillation raffiniert.

2.3.3 Aufbereitung

Bevor das Isolieröl als Isolationsmedium verwendet werden kann, muss dieses noch aufbereitet werden. Bei der Aufbereitung wird das Isolieröl entgast, getrocknet und Partikel werden herausgefiltert. Dieser Vorgang ist nötig, um die geforderten elektrischen Eigenschaften zu erreichen. Um das Isolieröl zu trocknen und zu entgasen wird das Verfahren der sogenannten Oberflächenentgasung angewendet. Dabei wird ein dünner Film mit großer Oberfläche erzeugt, der auf eine Temperatur von $50^{\circ}\text{C} \div 60^{\circ}\text{C}$ aufgeheizt wird. Zusätzlich wird ein Vakuum von etwa 10^{-2} mbar angelegt, um den Vorgang zu beschleunigen [2].

2.4 Alternative Isolierflüssigkeiten

Heutzutage werden Alternativen für Mineralöle auf Grund des Umweltschutzes und der chemischen und physikalischen Vorteile immer wichtiger. Diese Isolierstoffe besitzen meist höhere Flamm- und Brennpunkte als Mineralöle. Teilweise sind diese Isolierstoffe auch chemisch stabiler. Im Folgenden Kapitel werden ausgewählte Beispiele beschrieben.

Silikonöle

Synthetisch hergestellte Isolierflüssigkeiten wie zum Beispiel das Silikonöl haben im Gegensatz zum Mineralöl eine andere chemische Struktur. Sie unterscheidet sich im Makromolekül. Dieses Molekül hat ein anorganisches Skelett aus Silizium und Sauerstoff, siehe Abbildung 3.

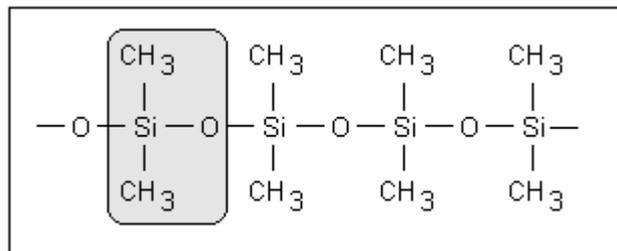


Abb.:3 Chemische Struktur eines Silikonöls (Polydimethylsiloxan) aus [1]

Der Vorteil dieses Skelettes ist, dass keine Kohlenstoffverbindungen enthalten sind. Die Flüssigkeit zeichnet sich im Gegensatz zum Mineralöl durch einen hohen Flammpunkt ($> 300^\circ\text{C}$) und einen hohen Brennpunkt ($> 335^\circ\text{C}$) aus. Diese Werte sind in etwa doppelt so hoch wie bei herkömmlichen Mineralölen. Die relative Permittivität ϵ_r ist ein wenig höher als bei Mineralölen. Der Verlustfaktor $\tan(\delta)$ ist mit $1 \div 2 \cdot 10^{-4}$ sehr klein. Dieser Verlustfaktor $\tan(\delta)$ ist über große Temperatur- und Frequenzbereiche konstant.

Ein weiterer Vorteil dieser Flüssigkeiten besteht in deren chemischen Beständigkeit. Daher sind solche Silikonflüssigkeiten alterungsbeständiger als Mineralöle. Die elektrische Festigkeit bei großen Durchschlagsstrecken ist geringer als bei Mineralölen. Die Feuchtigkeitsaufnahme bei Silikonöl wirkt sich ähnlich senkend auf die elektrische Durchschlagsfestigkeit aus wie bei Mineralöl [1].

Esterflüssigkeiten

Die Vorteile der Esterflüssigkeiten sind ähnlich jener der Silikonöle: hoher Flammpunkt ($> 250^{\circ}\text{C}$) sowie ein hoher Brennpunkt ($> 300^{\circ}\text{C}$). Der Verlustfaktor $\tan(\delta)$ ist $< 10^{-3}$ und die relative Permittivität ϵ_r ist $2,2 \div 3,3$. Diese Werte sind etwas höher als bei Mineralölen. Eine Eigenschaft der Esterflüssigkeiten ist die hohe Feuchtigkeitsaufnahme. Sie können sehr viel mehr Feuchtigkeit aufnehmen als Mineralöl. Die Sättigung für Wasser beträgt bei Esterflüssigkeiten etwa 2700 ppm bei Raumtemperatur. Die elektrische Festigkeit der Ester ist vergleichbar mit Mineralölen, aber bei einer Verfeuchtung bis zu 500 ppm nimmt die Feuchtigkeit wenig Einfluss auf die elektrische Festigkeit [1].

2.5 Elektrische Parameter

2.5.1 Permittivität ϵ

Die Polarisierbarkeit von Materialien wird mit der Permittivität ϵ beschrieben. Diese Größe beschreibt die Wechselwirkung zwischen Ladungen im elektrischen Feld. Die Permittivität ϵ setzt sich aus der relativen Permittivität ϵ_r und der Vakuum-Permittivität ϵ_0 zusammen, siehe Gleichung 1.

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \quad (2)$$

Die relative Permittivität ϵ_r ist dimensionslos, sie gibt das Verhältnis an um wie viel die Permittivität ϵ größer ist als die Vakuum-Permittivität ϵ_0 .

Die Permittivität ϵ der Zellulose ist abhängig von deren Verdichtung und der Isolierflüssigkeit, die aufgenommen wurde. Je stärker das Isolierpapier verdichtet wird, desto weniger Hohlräume sind im Material vorhanden und desto weniger Isolierflüssigkeit kann aufgenommen werden. Meistens wird zum Imprägnieren von Zellulose Mineralöl verwendet. Die relative Permittivität ϵ_r von Mineralöl beträgt ca. 2,2 (je nach Ölsorte), bei der Zellulosefaser ist die relative Permittivität ϵ_r $5,1 \div 6,1$. Das Mischdielektrikum besitzt eine relative Permittivität ϵ_r von $3,7 \div 4,5$.

2.5.2 Die elektrische Leitfähigkeit

Die Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit und die Messmethoden um diese zu bestimmen, sind in Kapitel 3 beschrieben.

2.5.3 Polarisations-Mechanismen und –Vorgänge

Aufgrund der Materialeigenschaften des Isolierstoffs können sich die Ladungen nicht frei bewegen. Ortsfeste, gebundene (positive und negative) Ladungsträger werden im Isolierstoff durch die Kraftwirkung des elektrischen Feldes verschoben. Dieser Vorgang im Isolierstoff wird Polarisation genannt. Dabei gibt es verschiedene Polarisationsmechanismen, die in Abbildung 4 dargestellt sind [1].

Elektronenpolarisation (Deformationspolarisation):

Bei dieser Art der Polarisation wird der positive Atomkern gegen die negative Elektronenhülle gedrückt.

Atompolarisation (Deformationspolarisation)

Die Atompolarisation entsteht dann, wenn Atome, die eine unterschiedliche Ladung haben, verschoben werden. Daraus resultiert eine Verformung des Moleküls.

Gitterpolarisation

Die sogenannte Gitterpolarisation entsteht durch das Verschieben unterschiedlich geladener Gitterbausteine eines Kristallgitters.

Orientierungspolarisation

Orientierungspolarisation entsteht dann, wenn elektrische Dipole von Molekülen oder Molekülgruppen entlang des elektrischen Feldes ausgerichtet werden.

Grenzflächenpolarisation

Grenzflächenpolarisation entsteht, wenn Ladungsträger sich an den makroskopischen oder mikroskopischen Grenzflächen mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten stauen [1].

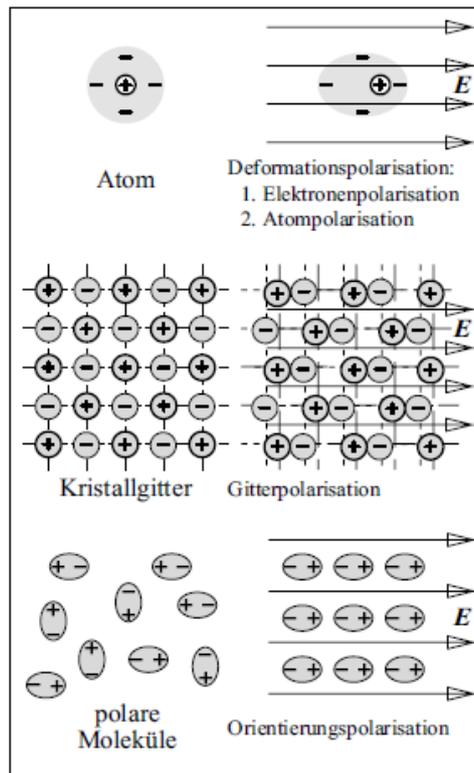


Abb.:4 Polarisationsmechanismen [1]

Durch das Ausrichten der Elektronen beziehungsweise der Dipole entsteht im Inneren der Isolierung ein zusätzliches elektrisches Feld, welches dem äußeren elektrischen Feld entgegengerichtet ist. Das daraus resultierende elektrische Feld ergibt sich aus der Überlagerung der beiden elektrischen Felder, siehe Gleichung 3. Der Polarisationsstrom fließt solange, bis die elektrische Feldstärke E gleich der angelegten elektrischen Feldstärke E_0 ist, siehe Gleichung 4. Diese Forderung ist nur dann erfüllt, wenn die elektrische Feldstärke von einer konstanten Spannungsquelle erzeugt wird.

$$E = E_0 + E_{Dip} \quad (3)$$

$$E = \frac{E_0}{\epsilon_r} \quad (4)$$

E = gesamtes elektrisches Feld (V/m)

E_0 = elektrisches Feld ohne Isolierstoff (V/m)

E_{Dip} = elektrisches Feld der verschobenen Ladungen (V/m)

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

Ein Isoliermaterial, das eine relative Permittivität $\epsilon_r > 1$ besitzt, bewirkt durch die Polarisation eine Verschiebungsdichte D (siehe Gleichung 5). Die Verschiebungsdichte errechnet sich aus der elektrischen Feldstärke E und von der Permittivität ϵ (siehe Gleichung 6).

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (5)$$

$$\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0 \quad (6)$$

$D = \text{Verschiebungsdichte (As/m}^2\text{)}$

Auf Grund der Verschiebungsdichte D wird die Ladung auf den Elektroden gebunden, diese muss die Spannungsquelle in Form eines Stromes zur Verfügung stellen. Der daraus resultierende Strom wird als Polarisationsstrom bezeichnet [1, 11].

2.6 Alterungsvorgänge

Pyrolyse

Unter Pyrolyse versteht man das thermische Auseinanderbrechen von Molekülen. Die Moleküle können dabei Molekülgruppen beziehungsweise Atome abspalten. Diese Atome und/oder Molekülgruppen verbinden sich unter Umständen zu neuen Molekülen, wie zum Beispiel zu Wasser. Die Pyrolyse entsteht beispielsweise bei Lichtbögen, energiereichen Entladungen und Teilentladungen in Betriebsmitteln. Der Lichtbogen zersetzt einen Teil des Isolieröles. Dabei entstehen circa 60% Wasserstoff, circa 15% andere Gase und circa 25% gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe [2].

Ab einer Temperatur von ca. 90°C beginnen die Atome der Zellulose beziehungsweise die Atomgruppen des Makromoleküls zu schwingen. Die Schwingungen konzentrieren sich besonders auf bestimmte Atomverbindungen, wie C-H, C-C und C-O. Durch die Schwingung können diese Verbindungen aufbrechen und reagieren mit anderen Atomen bzw. Substanzen im Isolieröl. Dabei entstehen unter anderem Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasser, Wasserstoff, Methan, Ölschlamm, Säuren und viele weitere Verbindungen. Einige dieser gebildeten Stoffe können sowohl das Isolieröl als auch die Zellulose weiter schädigen und somit die Alterung beschleunigen [6].

Neben der Pyrolyse sind die Oxidation und die Hydrolyse die wichtigsten Alterungsfaktoren.

Hydrolyse

Das Papier bzw. der Pressspan kann die Feuchtigkeit über das umliegende Isoliermittel oder über die Luft aufnehmen. Zusätzlich kann Wasser bei der Alterung von Isolierflüssigkeiten und Zellulose entstehen. Die Sättigungfeuchte für Papier bzw. Pressspan an der Luft ist circa $10 \div 15\%$, bei ölprägniertem Papier bzw. Pressspan an der Luft beträgt die Sättigungfeuchte circa $5 \div 8\%$.

Die Verfeuchtung beeinflusst stark die elektrische Leitfähigkeit des Papiers bzw. des Pressspans. Sie ist abhängig von der Art der Verfeuchtung (oberflächliche, gleichmäßige Feuchte, Feuchte im Volumen, ...).

Das Papier ist sehr hygroskopisch. Durch diese Eigenschaft nimmt die Zellulose Wasser auf und das Wasser sammelt sich zwischen den Zellulose-Verbindungen an. Durch das Zusammenspiel von Temperatur und Wasser kann das Makromolekül der Zellulose aufbrechen, dieser Vorgang wird auch als Degradation bezeichnet. Durch den Alterungsprozess wird der Polymerisationsgrad verringert, dadurch verschlechtern sich nicht nur die elektrischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Leitfähigkeit, sondern auch die mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise die mechanische Zugfestigkeit.

Bei dieser Art der Alterung der Zellulose entstehen verschiedene Stoffe wie Wasser und Furane, dadurch wird die Alterung zusätzlich beschleunigt. Auch verschiedene Abbauprodukte der umliegenden Isolierflüssigkeit, wie zum Beispiel Säuren, können die Zellulose langsam zerstören.

Durch den Furan Gehalt im Isolieröl kann die Alterung des Papiers bzw. des Pressspans abgeschätzt werden [1, 6, 17].

Oxidation

Dieser Alterungsprozess wird durch Oxidationsmechanismen, die in Anwesenheit von Sauerstoff, Wärme, Strahlung und Teilentladungen stattfinden. Bei der Oxidation werden die Doppelbindungen der Ölmoleküle aufgebrochen und eine polare OH-Gruppe eingebaut. Durch diese Umstrukturierung steigt der Verlustfaktor $\tan(\delta)$ irreversibel an. Durch den chemischen Verfall des Isolieröls entstehen Säuren, unlöslicher Schlamm und Wasser.

Durch die Vernetzung von Ölmolekülen über Sauerstoffbrückenbindung verharzt das Isolieröl. Wenn hohe elektrische Wechselfelder oder Teilentladungen vorhanden sind, kann die sogenannte X-Wachsbildung auftreten. Es entsteht ein unlösliches Wachs. Zusätzlich zur X-Wachsbildung entsteht Wasserstoffgas, welches gasförmig

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt ausgeschieden wird. Das Wasserstoffgas reduziert die elektrische Festigkeit des Isolieröls weiter. X-Wachs wird zum Beispiel in älteren Ölkabeln, an den Belagsrändern von Wechselspannungs- und Stoßkondensatoren, in delaminierten Hartpapierdurchführungen mit eingedrunenem Isolieröl sowie in unvollständig imprägnierten Isolierungen beobachtet.

Manche Zersetzungsprodukte beschleunigen die Alterung und greifen die Zellulose an. Um diese zu neutralisieren werden dem Isolieröl Inhibitoren beigelegt.

Um zu bestimmen, ob das Isolieröl gealtert ist gibt es verschiedene Indizien, wie zum Beispiel erhöhter Verlustfaktor $\tan(\delta)$, erhöhte Säurezahl und verringerte Durchschlagsspannung [1].

Die Tabelle 1 beschreibt die verschiedenen Mechanismen die das Öl altern lassen und deren Folgen. Es werden ebenfalls die Gegenmaßnahmen dargestellt, die man zum Teil nur mit einer verbesserten Konstruktion erreichen kann.

Tabelle 1 Oxidationsmechanismen des Öls [1]

Mechanismus	Folgen	Maßnahmen
Aufbrechen von Doppelbindungen und Anlagerung polarer Gruppen	Der Verlustfaktor steigt durch Polarisationsverlust irreversibel an Vernetzung und Verharzung	Einsatz von Ölen mit geringem Anteil ungesättigter Kohlenwasserstoffe
Oxidation von Ölmolekülen durch TE-, UV-, oder Lichteinwirkung	Der Verlustfaktor steigt durch Polarisationsverluste an. Zersetzungsprodukte, Säuren, Schlamm	Regenerierung durch Bleicherde-Behandlung ist nur bedingt möglich
Oxidation und Polykondensation durch TE-, UV-, oder Lichteinwirkung	Durch Wasserabspaltung sinkt die Durchschlagfeldstärke, Leitfähigkeit und Verlustfaktor steigen an. Die Vernetzung führt zur Bildung von Schlamm und zur Verharzung	Durch Trocknung können Durchschlagfestigkeit, Leitfähigkeit und Verlustfaktor (teilweise) regeneriert werden
X-Wachsbildung durch hohe Wechselfeldstärken, TE-Einwirkung 1. Bindung von Sauerstoff durch Oxidation 2. Anschließende Vernetzung	Irreversibler Anstieg der Polarisationsverluste durch Oxidation. Verharzung, X-Wachsbildung, Volumenverringern und Gasbildung (Wasserstoff) durch Verharzung	Teilentladungsfreie Konstruktionen. Hohlraumfreie Imprägnierung. Einsatz gasfester Öle.

2.7 Feuchtigkeitsanalysen in Betriebsmitteln

Die Öl-Pressspan-Isolierung ist eine der wichtigsten Isoliersysteme der Hochspannungstechnik. Diese wird in vielen Betriebsmitteln wie zum Beispiel Kabeln, Kondensatoren, Transformatoren und Durchführungen, aufgrund ihrer hervorragenden Isoliereigenschaften eingesetzt. Diese Betriebsmittel dienen vorwiegend zur Energieübertragung und zur Energieversorgung. Aus diesem Grund müssen diese Betriebsmittel über Jahrzehnte äußerst zuverlässig sein. Um dies zu gewährleisten müssen diese Betriebsmittel mit aufwendigen Diagnosemethoden überwacht werden. Im Folgenden Kapitel wird die Feuchtigkeitsanalyse für Öl und Zellulose beschrieben.

Die Feuchtigkeit wird entweder von der Umgebung (zum Beispiel Luft) aufgenommen, oder diese entsteht unter anderem bei Alterungsprozessen von Öl und Zellulose.

2.7.1 Feuchtigkeitsanalyse des Isolieröls

Zur Feuchtigkeitsanalyse von Isolieröl gibt es mehrere Messverfahren.

- Bei der Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskopie wird eine Ölprobe (circa 1 ml), untersucht. Das Öl wird mit einem gebündelten Infrarotlicht bestrahlt. Die Moleküle dieser Probe werden dadurch in Schwingung versetzt. Ein Detektor zeichnet das veränderte Infrarotspektrum auf. Mit diesem Spektrum können Verunreinigungen wie Wasser, Ruß, Oxidation und vieles mehr nachgewiesen werden. Jede Verunreinigung hat einen spezifischen „Fingerabdruck“ im Spektrum, somit können viele Stoffe identifiziert werden [15].
- Mit der Karl-Fischer-Titrations-Methode kann ein bekannter, gelöster Stoff, wie zum Beispiel Wasser und Säure nachgewiesen werden. Dieses Verfahren kann die Konzentration beziehungsweise die Menge des gelösten Stoffes bestimmen. Dazu wird der zu bestimmende Stoff in eine Reagenzlösung mit bekannten chemischen Eigenschaften gegeben. Dadurch wird eine chemische Reaktion ausgelöst, das heißt die zwei Stoffe reagieren miteinander. Das geschieht solange bis der zu bestimmende Stoff „verbraucht“ ist, dadurch kommt die chemische Reaktion zum Stillstand. Die Menge der Reagenz-

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

lösung, die dabei verbraucht wurde, ist ein Maß für die Konzentration des gesuchten Stoffes [4], siehe Gleichung 7 [23].

$$m = \frac{M * Q}{z * F} \quad (7)$$

m = Masse des umgesetzten Stoffes (g)

M = Molare Masse (g/mol)

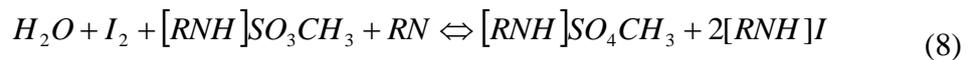
Q = gemessene Ladungsmenge (As)

z = Zahl der ausgetauschten Elektronen

F = elektrochemisches Äquivalent (As/mol)

In dieser Diplomarbeit wird die coulometrischen Karl-Fischer-Titration verwendet. Es wurde die Feuchtigkeit in Mineralöl Nytro 4000X und die Feuchtigkeit von Pressspan bestimmt.

Die Feuchtigkeit in der chemischen Lösung (Jod, Schwefeloxid und einer Base) startet die chemische Reaktion, siehe Gleichung 8 [23].



Das produzierte Jod, das auf elektrochemischem Wege erzeugt wird, stammt aus der chemischen Lösung. Zwischen dem erzeugten Jod und der Ladungsmenge besteht ein streng quantitativer Zusammenhang. Das Ende der chemischen Reaktion wird voltametrisch festgestellt. Zwischen den beiden Elektroden in der Messzelle fließt ein konstanter Strom. Dadurch entsteht eine Spannungsdifferenz. Diese Spannungsdifferenz nimmt drastisch ab, sobald freies Jod vorhanden ist. Somit kann der Feuchtigkeitsgehalt ermittelt werden.

Mit dieser coulometrischen Karl-Fischer-Titration können sehr geringe Feuchtigkeitswerte nachgewiesen werden. In Abbildung 5 und 6 werden die Messzelle und das Karl-Fischer Coulometer dargestellt [23]. In Abbildung 7, ist ein Driftverlauf einer Karl-Fischer-Titration dargestellt.

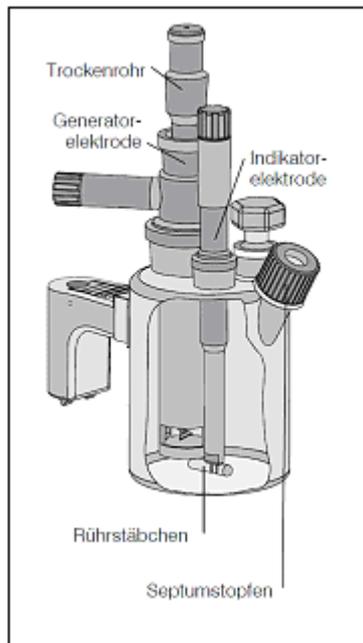


Abb.:5 Titriergefäß [23]



Abb.:6 KF Coulometer 831 [16]

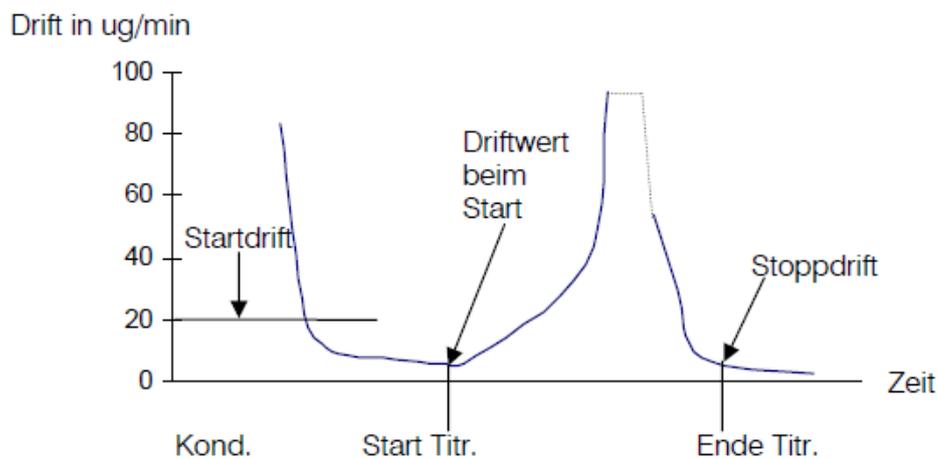


Abb.:7 Driftverlauf einer Karl-Fischer-Titration [23]

2.7.2 Feuchtigkeitsanalyse der Zellulose

Um abschätzen zu können wie viel Feuchtigkeit in der Zellulose vorhanden ist, gibt es mehrere Methoden.

- Nach der Herstellung kann nach Abschalten der Vakuumpumpe der Druckanstieg innerhalb einer definierten Zeit gemessen werden. Nach dieser Zeit stellt sich der Gleichgewichtszustand des Wasserdampf-partialdruckes ein, das heißt der Druck außerhalb der Zellulose steigt

an, siehe Abbildung 2. Mit diesem Druckanstieg kann die Feuchtigkeit in der Zellulose festgestellt werden [2].

- Ein weiteres Verfahren besteht darin, den Verlauf des Verlustfaktors $\tan(\delta)$ während der Trocknung oder des Betriebes zu protokollieren. Dabei ist erforderlich, dass an der Stelle der Zellulose mit der längsten Diffusionsstrecke gemessen wird, siehe Abbildung 2. Je höher der $\tan(\delta)$ ist, desto feuchter ist die Zellulose. Diese Methode erfasst nicht die gesamte Zellulose, sondern nur einen kleinen Teil davon [2].
- Eine andere Methode wird mittels Gleichgewichtsdiagrammen durchgeführt, siehe Abbildung 8. Nach einer bestimmten Zeit stellt sich ein Gleichgewichtszustand des Wassers zwischen dem Isolieröl und der Zelluloseisolierung ein. Damit kann aus dem Wassergehalt des Isolieröls auf die Feuchtigkeit in der Zellulose zurück geschlossen werden [13].

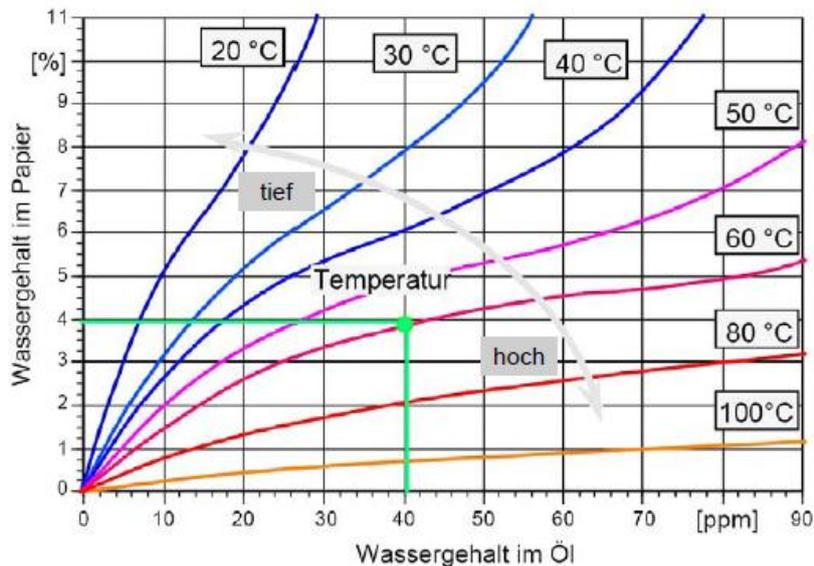


Abb.:8 Feuchtigkeitsgleichgewichts-Diagramm Isolieröl - Papier [2]

Die beschriebenen Verfahren, außer die $\tan(\delta)$ Methode, sind integrale Methoden. Diese Methoden liefern eine Abschätzung der gesamten Feuchtigkeit in der Zellulose. Jedoch können keine Aussagen über etwaige Feuchtigkeitsnester getroffen werden. Mit Gleichung 9 [1] kann die Leitfähigkeit κ einer neuwertigen Zellulose mit verschiedenen Feuchtigkeitswerten bei Raumtemperatur abgeschätzt werden [1].

$$\kappa_B(\infty) \approx \frac{\kappa_{\ddot{o}}(\infty)}{K_1} + K_2 \cdot e^{\frac{w}{K_3}} \quad (9)$$

$$K_1 = 300$$

$$K_2 = 0,0001 \text{ (pS)}$$

$$K_3 = 0,714\%$$

$\kappa_{\ddot{o}}$ = Leitfähigkeit des Öls (S)

κ_B = Leitfähigkeit der Zellulose(S)

w = Wassergehalt der Zellulose (Massenprozent)

3 Elektrische Leitfähigkeit

3.1 Grundlagen

In jedem festen und flüssigen Stoff befindet sich eine Anzahl von positiven und negativen freien Ladungen. Diese Stoffe sind nach außen hin elektrisch neutral. Denn die Raumladungsdichten ρ_+ und ρ_- , sind bis auf ihr Vorzeichen gleich groß, daher heben sich die Ladungen in Summe auf. Die Leitfähigkeit ist umso besser, je mehr freie Ladungsträger im Material vorhanden sind, und je beweglicher die Ladungen sind.

Das Valenzelektron ist das schwächste gebundene Elektron, welches noch zum Atom gehört. Überlappen sich das Valenzband und das Leitfähigkeitsband so ist keine weitere Energie notwendig um das Elektron in das Leitfähigkeitsband zu heben. Somit können diese Elektronen sich frei bewegen und zur Stromleitung beitragen. Dies ist bei metallischen Leitern wie zum Beispiel Aluminium und Stahl der Fall. Muss eine Energie $> 3 \text{ eV}$ ($= 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) aufgebracht werden um Elektronen in das Leitfähigkeitsband anzuheben, so wird das Material Isolator genannt wie zum Beispiel Keramik oder Glas, siehe Abbildung 9.

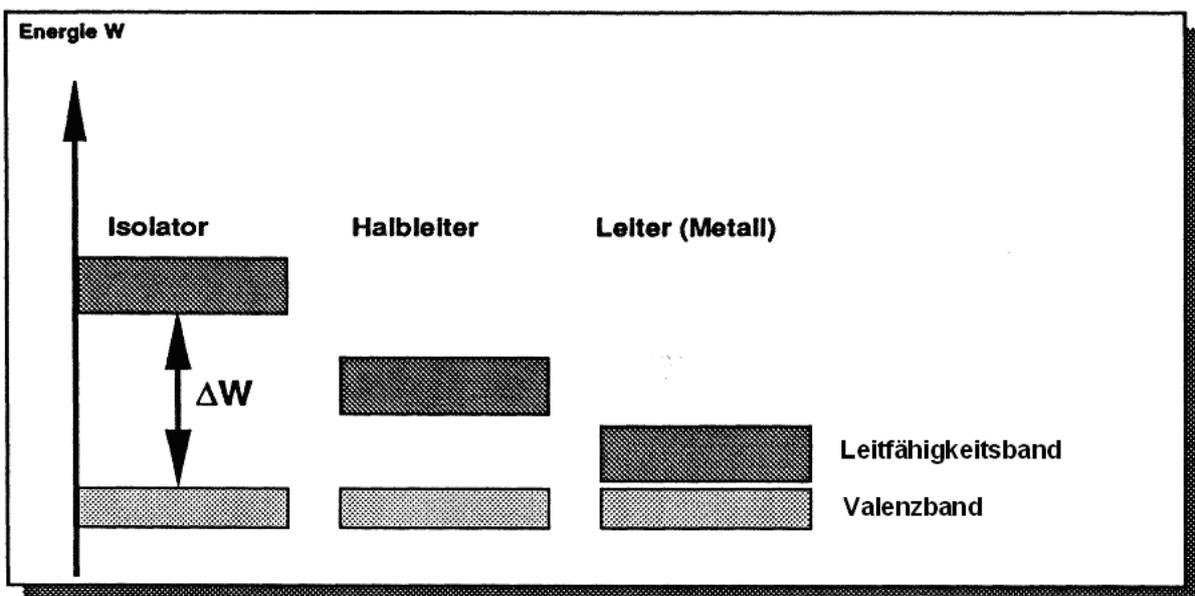


Abb.:9 Valenzband und erstes Leitfähigkeitsband für einen Isolator, Halbleiter und Leiter [25]

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

Die Leitfähigkeit ist das Verhältnis zwischen der Stromdichte J und der elektrischen Feldstärke E (siehe Gleichung 10) [24, 25]. Dies ist nur dann gültig wenn ein linearer Zusammenhang zwischen Strom, Spannung und Widerstand gilt. Diese Linearität gilt beispielsweise nicht bei Polarisierung und Raumladungen in Isoliermedien.

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (10)$$

$\sigma = \text{Leitfähigkeit (S/m)}$

$E = \text{elektrische Feldstärke (V/m)}$

$J = \text{Stromdichte (A/m}^2\text{)}$

3.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Generell gibt es mehrere Messmethoden um die Leitfähigkeit einer Isolation zu ermitteln. Grundsätzlich sind die elektrische Feldstärke und die Temperatur die entscheidenden Größen. Daher sollten diese beiden Größen während der Messung so konstant wie möglich gehalten werden. Die Messgenauigkeit hängt weiters von der Genauigkeit des Amperemeters ab.

Da jede Isolation im Grunde eine verlustbehaftete Kapazität darstellt, kann ein Ersatzschaltbild angefertigt werden (siehe Abbildung 10). In diesem Ersatzschaltbild werden nicht nur die Kapazität und der Durchgangswiderstand, sondern auch die Polarisationserscheinungen (weitere RC-Glieder) berücksichtigt.

Die obere Darstellung in Abbildung 10 zeigt das Polarisationsersatzschaltbild eines Isolierstoffes und im unteren Teil wird das vereinfachte Polarisationsersatzschaltbild eines Isolierstoffes abgebildet.

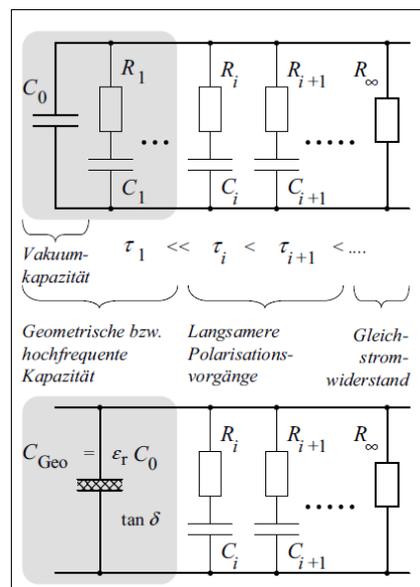


Abb.:10 Ersatzschaltbild einer Isolation [1]

3.2.1 Strom-Spannungs-Messung

Eine Messmethode um die elektrische Leitfähigkeit einer Isolation zu bestimmen ist die Strom-Spannungs-Messung. Bei dieser Methode wird ein Strom gemessen, welcher sich aus einem Polarisationsstrom und einem Isolationsstrom - der durch den Widerstand R_{∞} der Isolation fließt - zusammensetzt. Diese Ströme werden durch das elektrische Feld hervorgerufen. Dieser Polarisationsstrom klingt nach einer Exponential-Funktion ab. Das Abklingen des Polarisationsstromes hängt hauptsächlich vom Widerstand bzw. Leitfähigkeit des Materials ab. Die Polarisierungseffekte können in wenigen Minuten, Stunden oder erst in Wochen abgeschlossen sein.

Bei der Messung der Leitfähigkeit ist darauf zu achten, dass keine Ströme gemessen werden die von Oberflächeneffekten stammen, wie zum Beispiel Kriechströme. Um dies zu verhindern muss eine Elektrodenanordnung mit Schutzelektrode gewählt werden (siehe Abbildung 17).

Die Norm [19] empfiehlt, den Abstand zwischen Schutzelektrode und Messelektrode so gering wie möglich zu halten, aber nicht kleiner als 1 mm. Der Abstand zwischen Schutz- und Messelektrode sollte möglichst gleichmäßig sein. Der Durchmesser der Messelektrode sollte mindestens 25-mal so groß sein wie die Dicke des Messobjektes. Aus praktischen Gründen sollte diese Messelektrode im Durchmesser nicht kleiner als 25 mm sein [19].

Die Berechnung des spezifischen Widerstandes und der spezifischen Leitfähigkeit ist mit den Gleichungen 11, 12 und 13 beschrieben [19].

Wirksame Messfläche A in m^2 :

$$A = \frac{\pi(d + g)^2}{4} \quad (11)$$

Spezifischer Leitwert σ in S/m:

$$\sigma = \frac{k * i}{U * A} \quad (12)$$

Spezifischer Widerstand R in Ωm :

$$R = \frac{1}{\sigma} \quad (13)$$

A = Fläche der Messelektrode (m^2)

d = Durchmesser der Messelektrode (m)

g = Abstand zwischen Schutzelektrode und Messelektrode (m)

k = Probendick (m)

$i = \text{Messwert des Stroms (A)}$

$U = \text{Quellenspannung (V)}$

$R = \text{spezifische Widerstand } (\Omega\text{m})$

$\sigma = \text{spezifische Leitfähigkeit (S/m)}$

3.2.2 Polarisations- Depolarisationsstrom-Messung (PDC)

Bei der Polarisations-Depolarisationsstrom-Messung (PDC) wird durch Anlegen eines Spannungssprunges die dielektrische Sprungantwort in Form eines Polarisationsstromes erhalten. Nach einer definierten Zeit t_0 wird die Gleichspannungsquelle abgeschaltet und der Prüfling kurz (ca. 1 Sekunde) geerdet. Dadurch wird die Kapazität C_0 (siehe Abbildung 10) entladen. Anschließend wird der Depolarisationsstrom gemessen. Mit den gemessenen Strömen (Polarisations- und Depolarisationsstrom) können wichtige Parameter wie zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit, Kapazitäten, Wassergehalt und der Verlustfaktor der Isolierung berechnet werden [27].

Mit den Gleichungen 14 bis 17 können die erwähnten Parameter bestimmt und mittels Kurvenfitting graphisch dargestellt werden [27].

$$I_{pol}(t) = \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} + f(t) \right] * C_0 * U \quad (14)$$

für $0 < t < t_0$

$$I_{Depol}(t) = -[f(t) - f(t + t_0)] * C_0 * U \quad (15)$$

für $0 < t < \infty$

Nach dem Abklingen der Depolarisationsvorgänge können die Gleichungen umgeformt werden:

$$f(t) = \frac{I_{Depol}(t)}{C_0 * U} \quad (16)$$

$$\sigma = -\frac{\varepsilon_0}{C_0 * U} [I_{pol}(t) + I_{Depol}(t)] \quad (17)$$

$I_{pol} = \text{Ladestrom (A)}$

$I_{Depol} = \text{Depolarisationsstrom (A)}$

$C_0 = \text{Kapazität der Anordnung (F)}$

$U = \text{Messspannung (V)}$

$f(t) = \text{monoton fallende Funktion (dielectric response function)}$

$\sigma = \text{Leitfähigkeit (S/m)}$

$\varepsilon_0 = 8,8 * 10^{-12} \text{ (As/Vm)}$

3.2.3 Ladungs-Differenz-Methode (CDM)

Eine weitere Methode, um die Leitfähigkeit des Papiers bzw. Pressspans zu bestimmen, ist die Ladungs-Differenz-Methode (CDM). Diese Methode ist der PDC Messung ähnlich, diese Methode unterscheidet sich durch die Messdauer und der Auswertung des Ergebnisses.

Es werden der Polarisationsstrom und der Depolarisationsstrom gemessen. Nach dem Polarisieren, wird der Prüfling für ca. 1 Sekunde kurzgeschlossen, dadurch wird die Kapazität teilweise entladen. Anschließend wird der Depolarisationsstrom gemessen.

Der Isolationstrom wird durch Addition des Polarisationsstroms und des Depolarisationsstroms berechnet, siehe Gleichung 18. Anschließend werden die zuvor genannten Ströme über die Zeit integriert, siehe Gleichung 19. Durch die Integration werden die Kurven geglättet. Der Anstieg der Differenzladungskurve (Integration des Isolationstromes) ist indirekt proportional der elektrischen Leitfähigkeit, siehe Abbildung 11.

$$i = i_{Pol} + i_{Depo} \quad (18)$$

$$q = \int_{t_0}^{t_1} i dt \quad (19)$$

i = Isolationstrom

i_{Pol} = Ladestrom

i_{Depol} = Depolarisationsstrom

q = Ladung

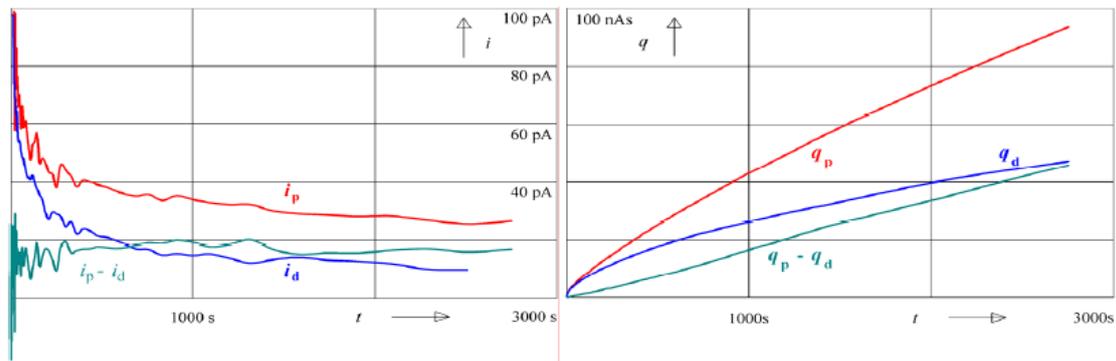


Abb.:11 Links: Zeitliche Stromverläufe aus einer CDM-Messung (i_p = Polarisationsstrom, i_d = Depolarisationsstrom, $i_p - i_d$ = Isolationsstrom - Differenz der beiden vorher genannten Ströme -)
 Rechts: Bildung der Ladung durch Integration der Ströme über die Zeit (q_p = Ladung des Polarisationsstromes, q_d = Ladung des Depolarisationsstromes, $q_p - q_d$ = Ladung des Isolationsstroms) [28]

Die Addition des Polarisationsstromes und des Depolarisationsstromes entspricht dem Isolationsstrom. Somit kann die Leitfähigkeit des Isolierstoffes berechnet werden. Die Messanordnung ist dieselbe wie bei der Strom-Spannungsmessung. Der Nachteil dieser Messmethode ist, dass keine Informationen über den zeitlichen Verlauf der Ströme vorhanden sind, weil der Polarisationsvorgang nicht abgewartet wird.

Der Vorteil dieser Messmethode ist, dass nach wenigen Stunden ein Messergebnis vorhanden ist. Das Messergebnis ist jedoch nur eine Abschätzung.

3.2.4 Vergleich der Messmethoden

Die CDM und die Strom-Spannungsmethode bestimmen den Isolationsstrom eines Isoliermaterials. Die PDC-Messung bestimmt den Polarisations- und den Depolarisationsstrom. Durch diese Messung können wichtige Parameter des Isolierstoffes berechnet werden wie zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit. Die Messmethoden unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Messzeit und die Auswertung der Messdaten.

Die CDM benötigt für ein Ergebnis die kürzeste Zeit (ca. 2 ÷ 3 Stunden). Durch die Integration der Polarisations- und Depolarisationsströme gehen wichtige Informationen verloren wie zum Beispiel der zeitliche Verlauf der Polarisations- und

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölimprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt
Depolarisationsströme. Zudem wird der Isolationsstrom nur mathematisch bestimmt. Diese Methode ist hervorragend geeignet, um die elektrische Leitfähigkeit oder die Feuchtigkeit in der Isolierung in kurzer Zeit abzuschätzen.

Die PDC-Methode benötigt wesentlich mehr Zeit als die CDM. Durch die Stromverläufe und die längere Messzeit können wichtige Parameter wie zum Beispiel elektrische Leitfähigkeit, Kapazität und Feuchtigkeit der Isolierung bestimmt werden.

In dieser Diplomarbeit wird die Strom-Spannungs-Messung gewählt. Mit dieser Methode wird der Isolationsstrom messtechnisch ermittelt, somit eignet sich diese Methode am Besten zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit. Gemessen wird die Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Feuchtigkeiten des Pressspans bei Raumtemperatur. Die erwarteten Werte sind im Bereich von $10^{-13} \div 10^{-16}$ S/m je nach Feuchtigkeitsgehalt der Pressspan-Probe [2, 28 und 29].

Im Folgenden Kapitel werden typische Messbereiche sowie ausgewählte Einflussfaktoren, die die Leitfähigkeit beeinflussen, beschrieben und dargestellt.

3.3 Ergebnisse der Literatur

In der Literatur wird eine elektrische Leitfähigkeit von $10^{-13} \div 10^{-16}$ S/m je nach Material, Feuchtigkeit und Temperatur, von ölimprägniertem Papier bzw. Pressspan angegeben [2, 28, 29]. Die Leitfähigkeit erhöht sich beispielsweise durch Temperatur und Feuchtigkeit. In diesem Kapitel werden Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit für ölimprägniertes Papier bzw. Pressspan mit unterschiedlichen Parametern dargestellt.

Feuchtigkeit

In der Literatur wird eine Leitfähigkeitszunahme von 1 Zehnerpotenz pro 1 \div 1,5% Feuchtigkeit bei ölimprägniertem Papier angegeben [2].

Die Messwerte (gemessen mit der Ladungs-Differenz-Methode) der Literaturquelle [28] zeigen einen geringeren elektrischen Leitfähigkeitsanstieg mit steigender Feuchtigkeit im ölimprägnierten Papier, siehe Abbildung 12.

Beide Literaturquellen [2, 28] zeigen eine starke Steigung der elektrischen Leitfähigkeit mit steigender Feuchtigkeit.

Temperatur

Mit steigender Temperatur des Isoliersystems nimmt die elektrische Leitfähigkeit stark zu, siehe Abbildung 12. Die Literaturquellen [28, 29] zeigen bei 50°C einen Leitfähigkeitsanstieg um den Faktor 10 ÷ 15. Steigt die Temperatur auf 90°C an, steigt die elektrische Leitfähigkeit ca. um den Faktor 1000 gegenüber den Messwerten bei Raumtemperatur, an.

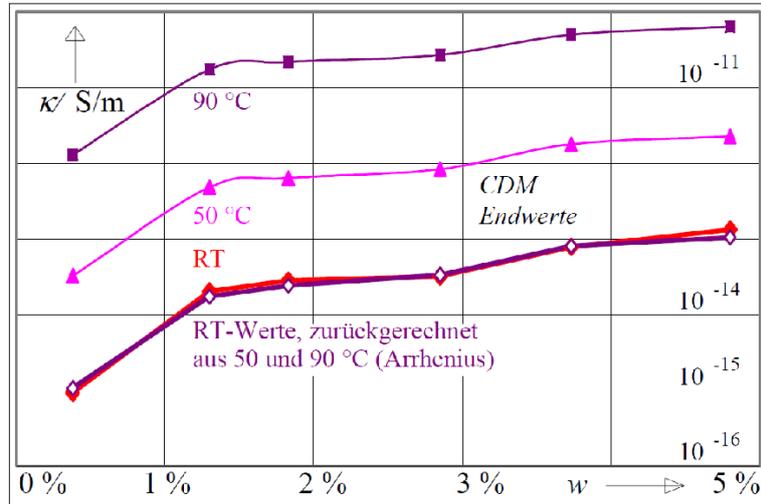


Abb.:12 Leitfähigkeitsanstieg in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt des ölprägnierten Papiers [28].

Elektrische Feldstärke

Die elektrische Feldstärke beeinflusst die elektrische Leitfähigkeit des ölprägnierten Papiers/Pressspan nur geringfügig, siehe Abbildung 13. In den Literaturquellen [6, 29, 31] werden ähnlichen Ergebnis angegeben.

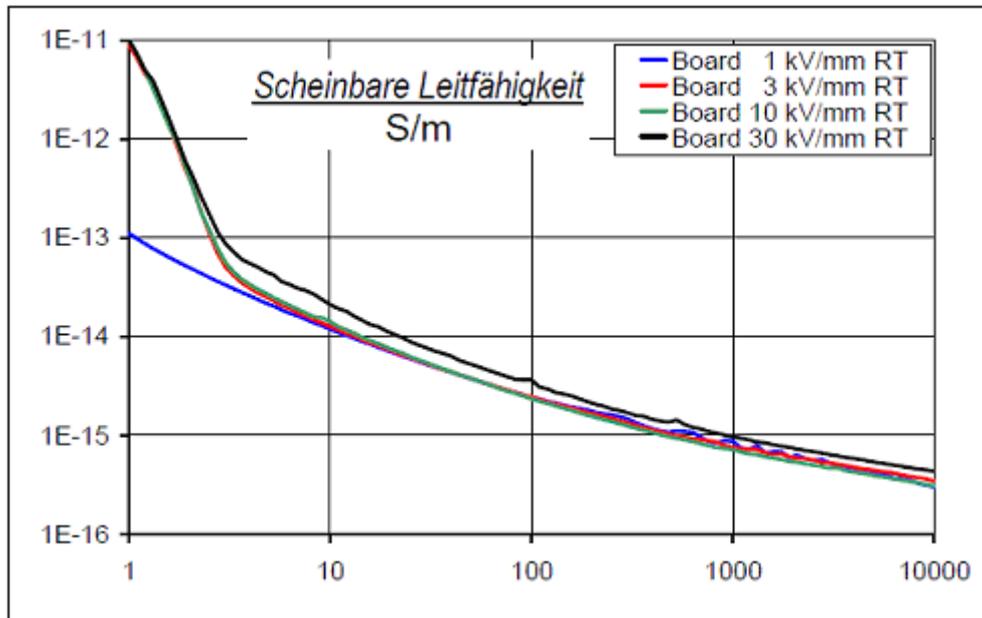


Abb.:13 Scheinbare Leitfähigkeitsverlauf (y-Achse in S/m) über die Zeit (x-Achse in Sekunden) des Boards bei verschiedenen elektrischen Feldstärken [29]

Zusammenfassung

Einige Parameter wie zum Beispiel die elektrische Feldstärke beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit nur geringfügig [29]. Andere beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit sehr stark wie beispielsweise Temperatur und Feuchtigkeit. Der Leitfähigkeitsanstieg mit steigender Feuchtigkeit ist sehr variabel. Im Bereich bis 1,5% Feuchtigkeitsgehalt steigt die elektrische Leitfähigkeit bei einem Feuchtigkeitsanstieg um 1% um eine Zehnerpotenz an. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt zwischen 1,5% und etwa 5% steigt die elektrische Leitfähigkeit nur mehr um eine Zehnerpotenz bei Erhöhung der Feuchte um etwa den Faktor 3 (Feuchte steigt von 1,5 auf 5%) an [28].

Die Temperatur wirkt sich ähnlich auf die elektrische Leitfähigkeit aus wie die Feuchtigkeit. Bei einer Temperatur von 50°C erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit um den Faktor 10 ÷ 15 gegenüber der Raumtemperatur. Steigt diese auf 90°C an

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölimprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt erhöht sich die Leitfähigkeit um ca. das Tausendfache gegenüber bei Raumtemperatur [28, 29].

4 Messaufbau und Versuchsdurchführung

4.1 Bestimmung der Feuchtigkeit

4.1.1 Feuchtigkeitsbestimmung des Isolieröls

Die Feuchtigkeitsbestimmung des Öls wurde mit der Karl-Fischer-Titration durchgeführt. Die Methode ist eine coulometrische Titration.

Um die Messung nicht zu beeinflussen, muss die Spritze mit demselben Öl gespült werden, dadurch werden Verunreinigungen der Spritze eliminiert. Es wird circa 1 ml Öl in die Messzelle mit Diaphragma gespritzt, dabei muss das Öl eine Temperatur von $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ besitzen. Die Messungen wurden 3 ÷ 4 Mal durchgeführt und das arithmetische Mittel bestimmt.

Geräteliste:

Metrohm Karl-Fischer-Coulometer 831

Metrohm Messzelle mit Diaphragma

4.1.2 Feuchtigkeitsbestimmung der Pressspan-Proben

Messaufbau

Der Stickstoffstrom wurde durch zwei Gaswaschflaschen, welche mit einem Molekularsieb (Porenweite 0,3 nm) gefüllt sind, geleitet. Dadurch wurde der Stickstoffstrom getrocknet bevor dieser in den Karl-Fischer-Ofen geführt wurde. Der Gasstrom hatte die Aufgabe die verdampfte Feuchtigkeit der Probe, welche sich in dem Ofen befand, in die Messzelle (ohne Diaphragma) zu transportieren.

Der Messaufbau des Systems wird in Abbildung 14 dargestellt.



Abb.:14 Karl-Fischer-Messaufbau mit Karl-Fischer-Ofen

Geräteliste:

Metrohm Karl-Fischer-Coulometer 831

Metrohm Karl-Fischer-Ofen 688

Metrohm Messzelle ohne Diaphragma

Messablauf

Bevor die Feuchtigkeitsmessung der Pressspan-Proben beginnen kann, muss der Karl-Fischer-Ofen etwa 4 Stunden auf 180°C aufgeheizt werden. Zudem muss das Messsystem ausreichend mit Stickstoff gespült werden (ca. 1 Stunde mit einem Stickstofffluss von etwa 25 l/h). Danach konnte der Stickstoffstrom auf 6 ÷ 10 Liter pro Stunde reduziert werden. Sobald eine konstante Drift < 30 µg/min erreicht war, konnten die Messungen beginnen.

Zuerst muss eine kleine Probe ca. 0,1 ÷ 0,2 g aus der Pressspan-Probe entnommen werden. Diese Probe wird gewogen und anschließend in ein Metallschiffchen gelegt. Das Metallschiffchen muss in einem Wärmeschrank oder in einem Exsikkator

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt getrocknet werden. Dies ist notwendig um keine zusätzliche Feuchtigkeit einzubringen und somit die Messung zu verfälschen.

Um das Verdampfen der Feuchtigkeit in der Probe zu vereinfachen, kann die Probe in dünne Streifen geschnitten werden. Nach der Messung wurde diese 15 Minuten in Hexan eingelegt. Das Hexan löste das restliche Imprägnieröl heraus, anschließend wurde die Probe in einem Wärmeschrank mit 100°C gegeben, damit das Hexan verdampfen kann. Nach dem Ausdampfen des Hexans wurde die Probe ein weiteres Mal gewogen. Danach konnte die Feuchtigkeit des Pressspans berechnet werden, siehe Gleichung 20.

$$W = \frac{\text{Gewicht}_{ges} \times W_{gem}}{\text{Gewicht}_{Zellu.} + \frac{(\text{Gewicht}_{ges} * W_{gem})}{10^6}} \quad (20)$$

W = Wassergehalt der Zellulose (ppm)

Gewicht_{ges} = Gewicht der Probe mit Öl und Wasser (g)

W_{gem} = der gemessene Wassergehalt der Probe mit Öl und Wasser (ppm)

$\text{Gewicht}_{Zellu.}$ = gemessenes Gewicht der Probe ohne Öl ohne Wasser (g)

4.2 Pressspan-Proben Vorbereitung, Aufbereitung, Verfeuchtung und Gruppeneinteilung

4.2.1 Pressspan-Proben-Vorbereitung

In dieser Untersuchung wurden Pressspan-Proben verwendet, welche einen Durchmesser von 190 mm hatten, siehe Abbildung 15. Die Dicke der Proben betrug 1 mm. Um die Pressspan-Proben nach dem Aufbereiten zu lagern, wurden diese in eine Folie eingeschweißt. Auf diese Art und Weise konnten die Pressspan-Proben wochenlang gelagert werden, ohne den Feuchtigkeitsgehalt zu beeinflussen.

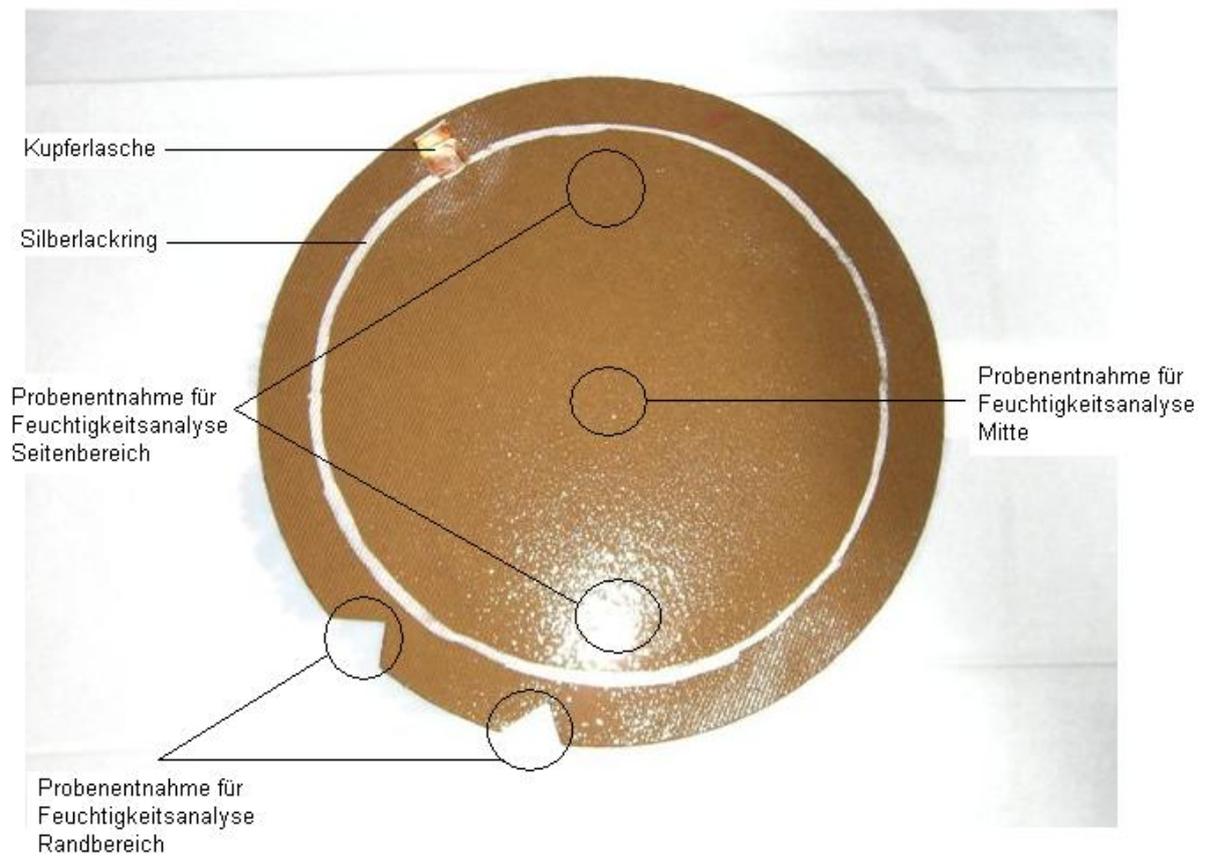


Abb.:15 Pressspan-Probe

In Abbildung 15 wurden die drei unterschiedlichen Bereiche der Probenentnahmen für die verschiedenen Feuchtigkeitsanalysen markiert.

Für die Feuchtigkeitsbestimmung vor der Leitfähigkeitsmessung musste die Probenentnahme am Randbereich erfolgen. Nach der Leitfähigkeitsmessung wurde die Probenentnahme für die Feuchtigkeitsbestimmung am Randbereich und in der Mitte der Pressspan-Probe entnommen, somit wurde die Pressspan-Probe zerstört.

Für die Feuchtigkeitsverteilung in der Pressspan-Probe wurden die Proben für die Feuchtigkeitsbestimmung in der Mitte und im Seitenbereich entnommen.

Auftragen des Silberlackes und Befestigen der Kupferlasche

Bevor die Pressspan-Proben aufbereitet wurden, musste ein Ring aus leitfähigem Silberlack mit einem Durchmesser von 153 mm und einer Breite von 5 ÷ 8 mm aufgetragen werden. Nach ca. 15 Minuten konnte eine Kupferlasche, welche mit einem elektrisch leitenden Zweikomponentenkleber (Elecolit A+B), befestigt werden.

Trocknung des Imprägnieröls

Bevor die Aufbereitung der Pressspan-Proben beginnen konnte, musste das Imprägnieröl (Nynas Nytro 4000X) getrocknet werden. Dazu wurde das Isolieröl in einem Vakuumschrank auf 60°C 12 Stunden erhitzt. Nach dieser Aufwärmphase wurde der Schrank bei 60°C für 48 Stunden bei $4 \cdot 10^{-1}$ mbar evakuiert. Danach wurde das Isolieröl luftdicht in einem Metallzylinder aufbewahrt. Das getrocknete Isolieröl Nytro 4000X besitzt eine Restfeuchtigkeit von ca. 3 ppm.

Aufbereitung der Pressspan-Proben:

Zuerst müssen die Pressspan-Proben getrocknet werden. Dazu werden diese in einem Vakuumschrank auf 105°C 12 Stunden lang erhitzt. Nach dieser Aufwärmphase wird der Schrank für 48 Stunden bei einem Druck von $4 \cdot 10^{-1}$ mbar evakuiert. Anschließend wurde die Temperatur auf 90°C gesenkt, und das Imprägnieren mit dem getrockneten Imprägnieröl kann beginnen. Während dieses Vorgangs wurde das Imprägnieröl unter Vakuum in den Ofen gezogen, sodass alle Pressspan-Proben bedeckt werden. Nach der Aufbereitung werden die Pressspan-Proben in eine Folie eingeschweißt. Die Restfeuchtigkeit der Pressspan-Proben beträgt ca. 0,2%.

4.2.2 Verfeuchtung der Pressspan-Proben

Nach dem Aufbereiten wurden 13 der 16 Pressspan-Proben verfeuchtet. Dazu wurden die aufbereiteten Pressspan-Proben in einen Klimaschrank gezielt bei einer Temperatur von 40°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70% verfeuchtet.

Experimentell wird nachgewiesen, dass die Proben gleichmäßig verfeuchtet wurden.

Nachweis der gleichmäßigen Verfeuchtung:

Es wurden jeweils zwei Pressspan-Proben an verschiedene Positionen im Klimaschrank positioniert. Die ersten Beiden waren parallel zur Rückwand des Klimaschranks angeordnet. Dort befand sich das Gebläse, welches die Aufgabe hatte die warme und feuchte Luft im Klimaschrank einzuleiten und zu verteilen.

Das zweite Mal wurden die Pressspan-Proben parallel zur Seitenwand des Klimaschranks ausgerichtet.

Nach dem Verfeuchten wurden die Pressspan-Proben auf die Feuchtigkeitsverteilung untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Pressspan-Proben in zwei Hälften geschnitten. Anschließend wurde entlang der Schnittkante jeweils in der Mitte und an zwei gegenüberliegenden Seiten der Pressspan-Proben eine Messprobe entnommen und gemessen, siehe Abbildung 15. Durch das Vergleichen der Messergebnisse kann auf eine gleichmäßige Verteilung geschlossen werden, siehe Tabelle 2 und 3.

Messzeitpunkt: 12.1.11

Einstellungen KF-Ofen: 6 l/h Gasfluss, 130°C

Einstellungen Klimaschrank: 40°C, 70% Luftfeuchtigkeit

Tabelle 2 Feuchtigkeitsmesswerte der Pressspan-Proben parallel zur Rückwand des Klimaschranks

Trockene Proben			Feuchte Proben			
Gewicht in g	Feuchtigkeit in ppm	Messdauer in Min.	Gewicht in g	Feuchtigkeit in ppm	Messdauer in Min.	Position der Entnahme
Probe 1; 30 Minuten im Klimaschrank						
0,3181	1889	20	0,1613	5505	20	Mitte
0,2630	1786	20	0,1507	6163	20	Seite
		20	0,1473	6926 ¹	20	Seite
Probe 2; 2 Stunden im Klimaschrank						
0,1566	1750	20	0,1401	10008	20	Mitte
0,2442	1656	20	0,1381	9522	20	Seite
		20	0,1658	10307	20	Seite

¹ diese Pressspan-Probe war lange an der Luft

Messzeitpunkt: 14.1.11

Einstellungen KF-Ofen: 6 l/h Gasfluss, 130°C

Einstellungen Klimaschrank: 40°C, 70% Luftfeuchtigkeit

Tabelle 3 Feuchtigkeitsmesswerte der Pressspan-Proben parallel zur Seitenwand des Klimaschranks

Trockene Proben			Feuchte Proben			
Gewicht in g	Feuchtigkeit in ppm	Messdauer in Min.	Gewicht in g	Feuchtigkeit in ppm	Messdauer in Min.	Position der Entnahme
Probe 3; 40 Minuten im Klimaschrank; vorne						
0,1749	579	10	0,1757	4673	10	Mitte
0,2159	604	10	0,1884	4733	10	Seite
0,3013	619	10	0,1722	5186	10	Seite
Probe 4; 100 Minuten im Klimaschrank; hinten						
0,1548	540	10	0,1577	8061	10	Mitte
0,1346	658	10	0,1233	7625	10	Seite
		10	0,1422	8429	10	Seite

Die Position im Klimaschrank hatte demnach keinen Einfluss auf die Verteilung der Feuchtigkeit in den Pressspan-Proben.

4.2.3 Gruppeneinteilung der Pressspan-Proben

Die Gruppeneinteilung der Pressspan-Proben erfolgte nach der Leitfähigkeitsmessung durch die Feuchtigkeitswerte aus der Mitte der Pressspan-Proben, siehe Tabelle 9.

- Gruppe mit 0,2% (Pressspan-Proben 1.2, 2.2, 3.2, 3.2WH)
- Gruppe mit 1,5% (Pressspan-Proben 1.1, 2.1, 2.1WH, 3.1, 4.1, 9.1)
- Gruppe mit 2,5% (Pressspan-Probe 2.3)
- Gruppe mit 3,6% (Pressspan-Proben 1.3, 4.3, 6.3, 8.2)
- Gruppe mit 5,5% (Pressspan-Proben 3.3, 7.3, 8.3)

4.3 Leitfähigkeitsmessungen der Pressspan-Proben

4.3.1 Allgemeine Anforderungen

Da sehr kleine Ströme gemessen werden und empfindliche Messgeräte verwendet werden, müssen einige Anforderungen erfüllt werden.

Die Spannungsquelle muss stabilisiert sein. Der Stabilisierungsgrad muss so sein, dass eine Spannungsänderung den gemessenen Strom nicht beeinflusst.

Die Genauigkeit der Messung hängt von der Genauigkeit des Strommessgerätes ab [19].

Um die Einflüsse der Umgebung so gering wie möglich zu halten wurde die Messanordnung in einer elektrisch geschirmten Zelle aufgebaut.

4.3.2 Messanordnung

Die Versuchsanordnung bestand aus einem Trenntransformator, Mess-PC, Voltmeter, Elektrometer, Spannungsquelle und einem Messkessel, siehe Abbildung 16.

Die Stromversorgung der Messgeräte und des Mess-PCs erfolgte über einen Trenntransformator, dieser wurde benötigt um Erdschleifen aufzutrennen. Alle Erdverbindungen wurden an die Erde der geschirmten Messzelle angeschlossen.

Das Messkessel (Durchmesser 250 mm, Höhe 500 mm) war mit 20 l Nynas Nitro 4000X Mineralöl gefüllt, siehe Abbildung 18 und 19. In diesem befand sich die Elektrodenanordnung.

Elektrodenanordnung besteht aus einer Hochspannungs-, einer Mess- und einer Schirmelektrode, siehe Abbildung 17. Die Schirmelektrode wird benötigt um Kriechströme, die auf der Oberfläche der Pressspan-Probe sind, gegen Erde abzuleiten. Die Norm [19] empfiehlt, den Abstand zwischen Schutz- und Messelektrode so gering wie möglich zu halten, aber nicht kleiner als 1 mm. Der Abstand zwischen Schutz- und Messelektrode sollte möglichst gleichmäßig sein. Der Durchmesser der Messelektrode sollte mindestens 25-mal so groß sein wie die Dicke des Messobjektes. Aus praktischen Gründen sollte diese Messelektrode im Durchmesser nicht kleiner als 25 mm sein [19].

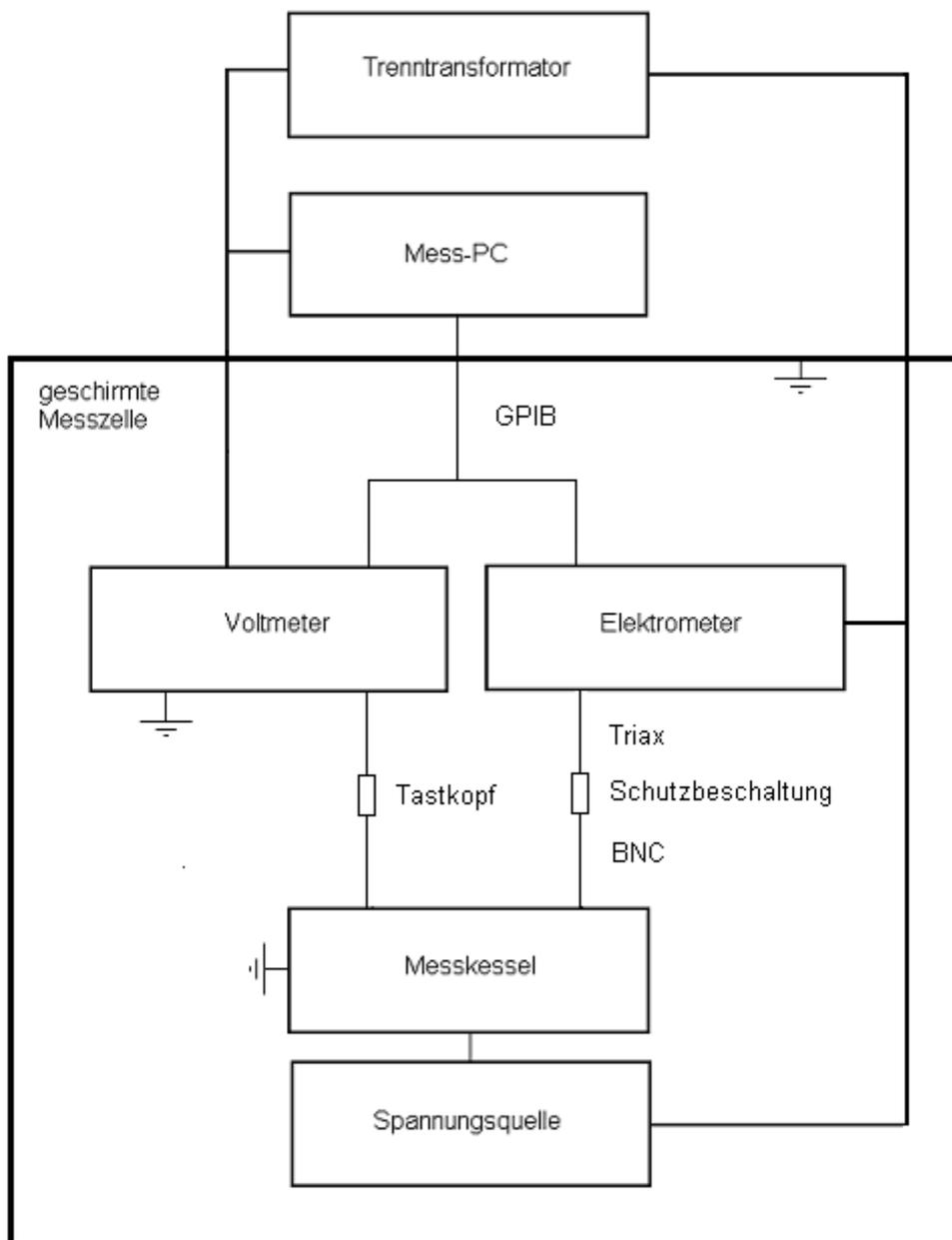


Abb.:16 Messanordnung zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Papier/Pressspan

Geräteliste für die elektrische Leitfähigkeitsmessung:

Spannungsquelle: Heinzinger HNCs 30000-4 pos.

Prema 5017 Digital Multimeter

Keithly 6514 System Elektrometer

Mess-PC

Messanordnung der Elektroden und der Pressspan-Proben, siehe Abbildung 17:

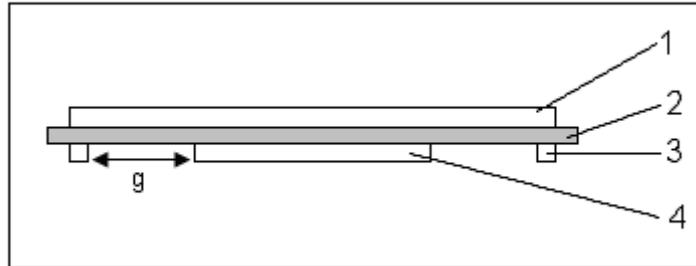


Abb.:17 Messanordnung der Elektroden für die Leitfähigkeitsbestimmung von Öl imprägniertem Papier/Pressspan aus [19]

1: Hochspannungs-Elektrode (170 mm)

2: Pressspan-Probe (190 mm Durchmesser, 1mm Dicke)

3: Schirmring (150 mm)

4: Messelektrode (147 mm)

g: Abstand zwischen Schirmzylinder und Messelektrode (1,5 mm)



Abb.:18 Messkessel Gesamtansicht

- 1 Messleitung
- 2 Schirmzylinder
- 3 Kontaktierung des Schirmzylinders mit der Probe
- 4 Hochspannungsdurchführung
- 5 Erdverbindung
- 6 Ölablassventil

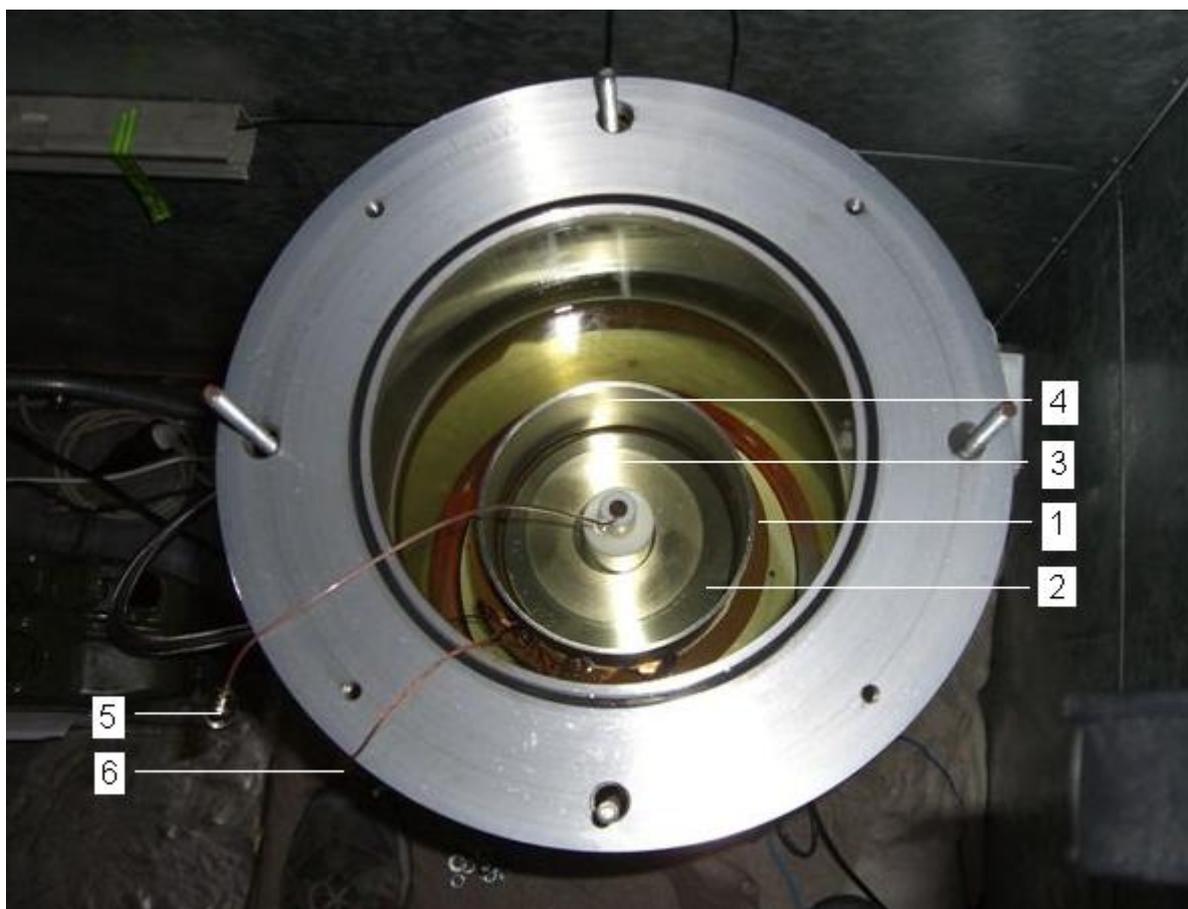


Abb.:19 Messkessel- Deckel entfernt

- 1 Probe
- 2 Messelektrode
- 3 Gewicht für definierten Anpressdruck (1,4 kg)
- 4 Schirmzylinder
- 5 Messleitung
- 6 Erdverbindung für den Schirmzylinder

4.3.3 Messablauf

Die vorbereiteten Pressspan-Proben wurden in den Messkessel eingebaut. Anschließend wurde die Messung gestartet und die Gleichspannung eingeschaltet. Die elektrische Feldstärke an der Pressspan-Probe betrug 3,1kV/mm. Gemessen wurde der Strom mindestens 23 Stunden lang.

Um die Ölfeuchtigkeit im Messkessel einigermaßen konstant zu halten wurde jeweils nach der Leitfähigkeitsmessung ein Teil des feuchten Öls entnommen und durch getrocknetes Öl ersetzt.

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölimprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt
Anschließend, nach der Leitfähigkeitsmessung, wurde die Pressspan-Probe wieder in die Folie eingeschweißt und aufbewahrt, um eventuell eine Wiederholungsmessung durchführen zu können.

5 Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen

Die Messergebnisse der spezifischen Leitfähigkeit und des gemessenen Stromes wurden mit Matlab ausgewertet und dargestellt. Die Abbildungen 22 ÷ 33 zeigen die ausgewerteten Messergebnisse. In den Tabellen 4 ÷ 8 sind die Messergebnisse der einzelnen Pressspan-Proben aufgelistet.

5.1 Auswertung der Ergebnisse

Die Rohdaten aller Messungen wurden mit Matlab ausgewertet. Zuerst wurden die Messausreißer eliminiert, danach wurde mittels einer Matlabfunktion (smooth) die Kurve geglättet. Die Glättung erfolgte mittels einer gleitenden arithmetischen Mittelwertbildung mit einer Fensterbreite von 20 Werten. Anschließend wurde eine Regressionskurve über die bearbeiteten Messdaten gelegt, die verwendete Matlabfunktion war polyfit. Diese Funktion verwendete die Methode der kleinsten quadratischen Abweichung, um die Kurve zu berechnen.

In Abbildung 20 ist exemplarisch ein Stromverlauf mit Rohdaten dargestellt; in Abbildung 21 ist der ausgewertete Stromverlauf dargestellt.

Die Stromwerte in den Tabellen 4 ÷ 9 sind gerundete arithmetisch gemittelte Messwerte. Die Mittelung erfolgte über 20 Messwerte.

Die angegebene Spannung in den Tabellen 4 ÷ 8 ist die mittlere Spannung über den gesamten Messzeitraum.

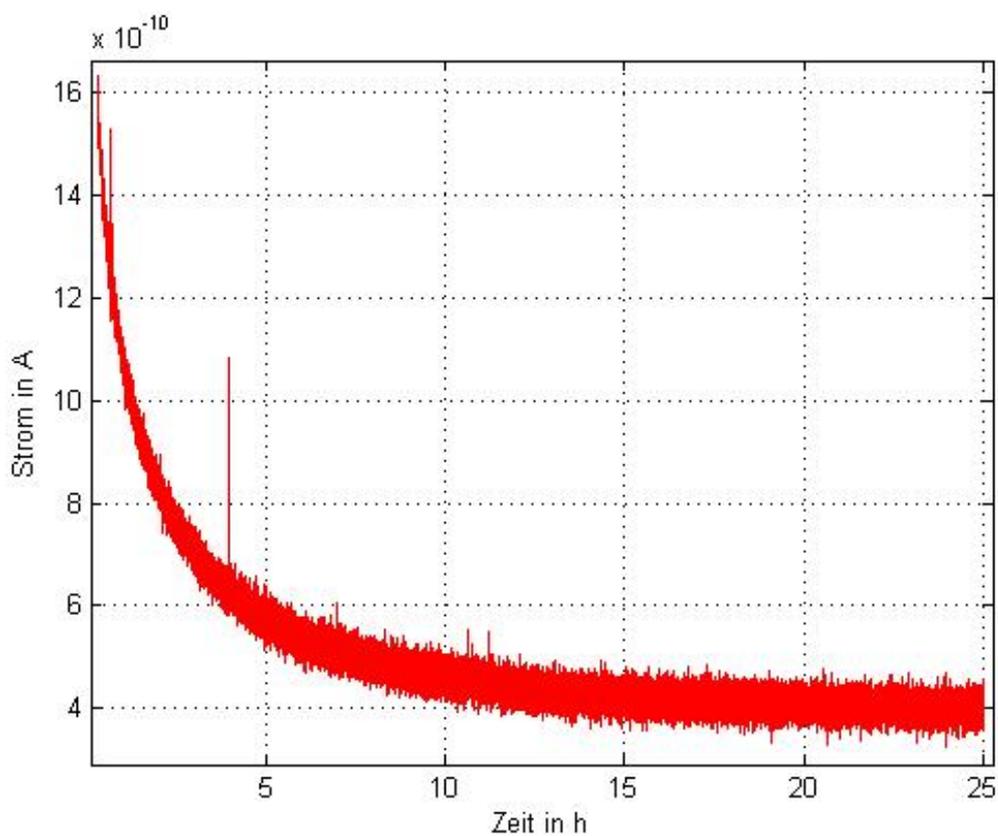


Abb.:20 Gemessener Stromverlauf der Pressspan-Probe 4.1

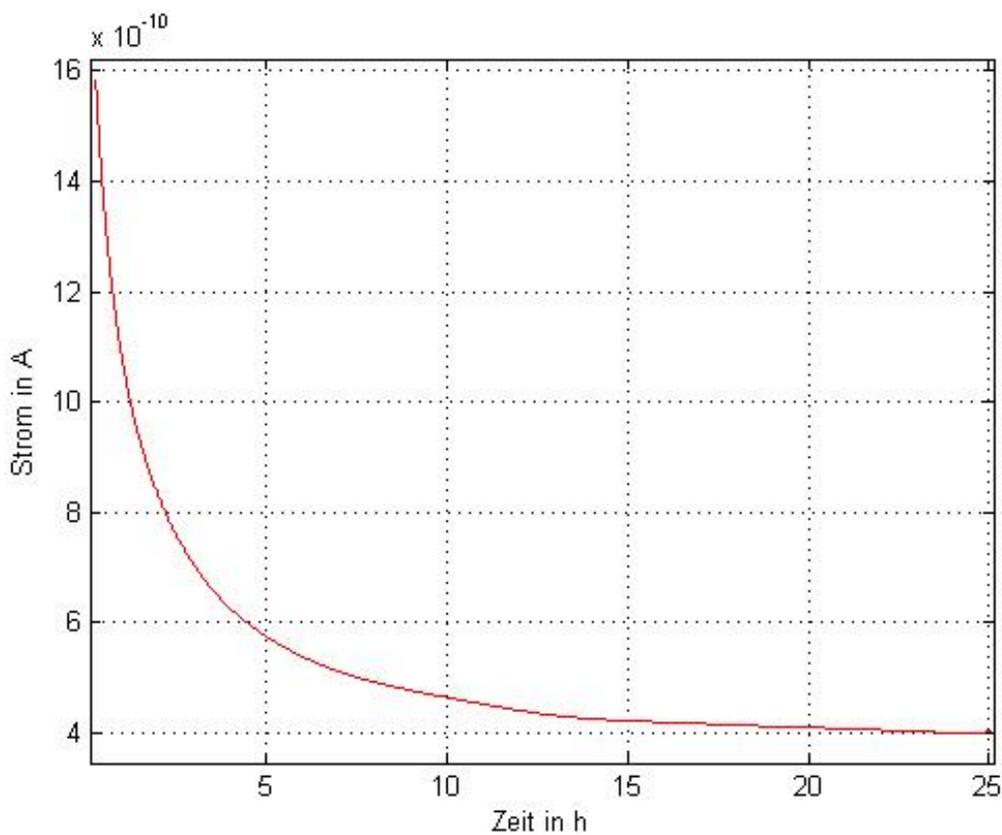


Abb.:21 Ausgewerteter Stromverlauf der Pressspan-Probe 4.1

5.2 Messergebnisse der Pressspan-Proben mit 0,2% Feuchtigkeitsgehalt

5.2.1 Messergebnisse

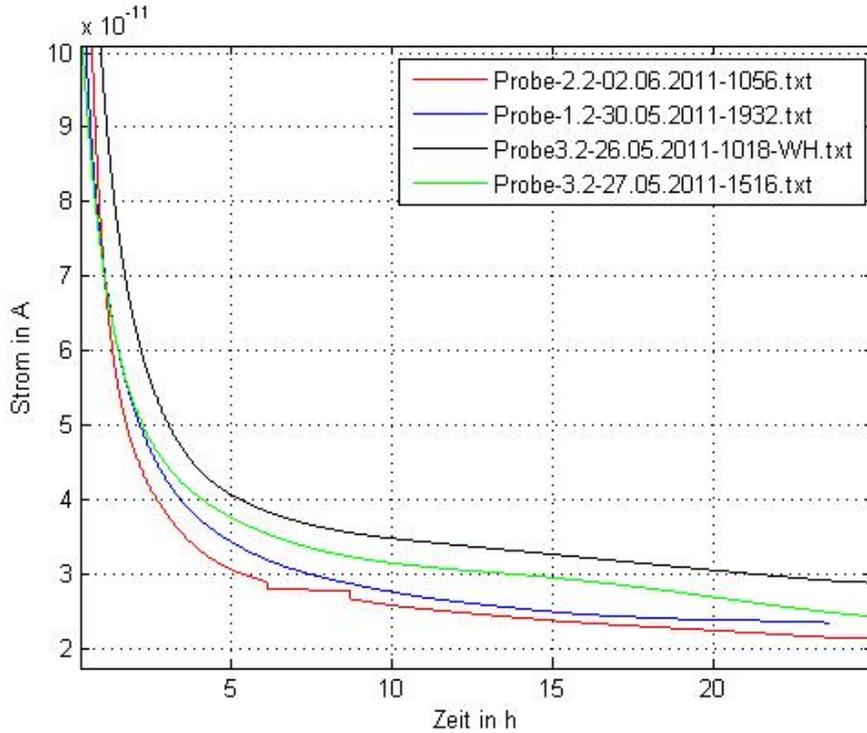


Abb.:22 Stromverläufe für die Pressspan-Proben 1.2, 2.2, 3.2, 3.2WH mit einer Feuchtigkeit von ca. 0,2%

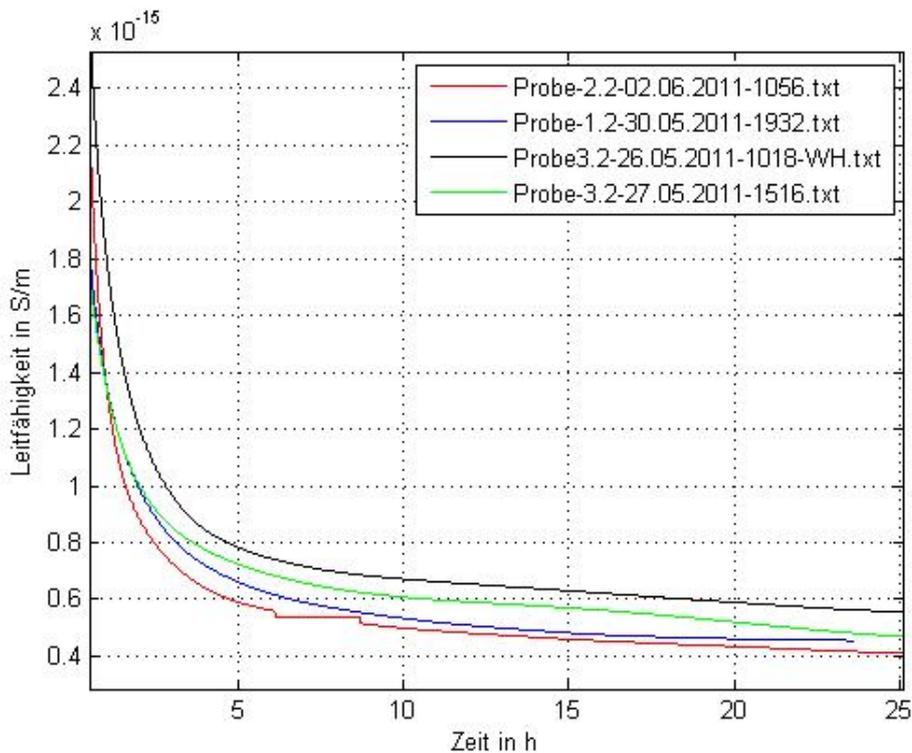


Abb.:23 Leitfähigkeitsverläufe für die Pressspan-Proben 1.2, 2.2, 3.2, 3.2 WH mit einer Feuchtigkeit von ca. 0,2%

Tabelle 4 Messwerte Gruppe mit 0,2% Feuchtigkeitsgehalt

Probennr./Datum	1.2/30.05.11	2.2/02.06.11	3.2/27.05.11	3.2WH/26.05.11
Probenfeuchtigkeit	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Mittlere Spannung	3127 V	3127 V	3127 V	3126 V
Ölfeuchtigkeit Anf.	10,5 ppm	10,5 ppm	8,3 ppm	10,6 ppm
Ölfeuchtigkeit Ende	10,8 ppm	11,2 ppm	10,5 ppm	12,0 ppm
Strom 23 h	2,36E-11 A	2,18E-11 A	2,52E-11 A	2,94E-11 A
Leitfähigkeit 23 h	4,32E-16 S/m	3,97E-16 S/m	4,59E-16 S/m	5,36E-16 S/m

5.2.2 Diskussion der Messung der Gruppe mit 0,2% Feuchtigkeitsgehalt

Nach einer Stunde erreichten die gemessenen Ströme der Gruppe mit 0,2% Feuchtigkeit in etwa gleich hohe Stromwerte.

Die Isolationsströme liegen im Bereich von $20 \div 30 \text{ pA}$, dies entspricht einer Leitfähigkeit von $4 \div 4,5 \cdot 10^{-16} \text{ S/m}$.

Anmerkung:

Bei der Pressspan-Probe 2.2 brach die Spannung nach 6,75 Stunden um 500 V ein. Nach etwa 15 Minuten erreichte die Spannung erneut 3127 V. Daher wurden die Messwerte in diesem Zeitraum nicht verwendet. Trotz des Spannungseinbruchs konnte der Polarisationsstrom vollständig abklingen.

5.3 Messergebnisse der Pressspan-Proben mit 1,5% Feuchtigkeitsgehalt

5.3.1 Messergebnisse

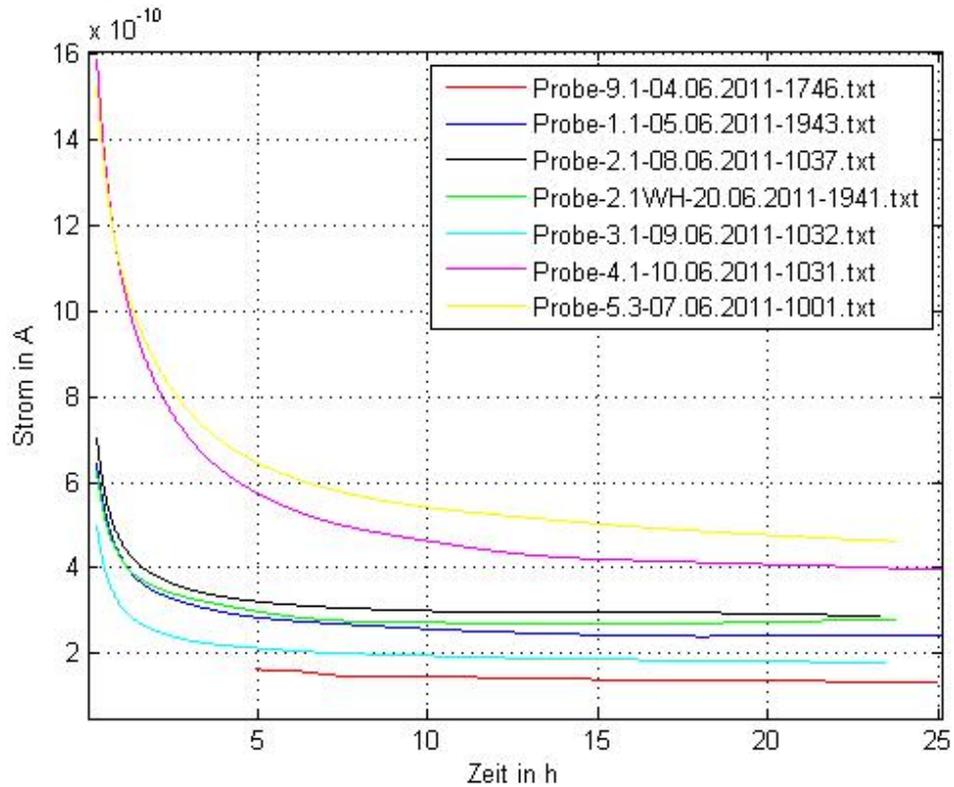


Abb.:24 Stromverläufe für die Pressspan-Proben 1.1, 5.3, 9.1, 3.1, 2.1, 2.1 WH, 4.1 mit einer Feuchtigkeit von ca. 1,5%

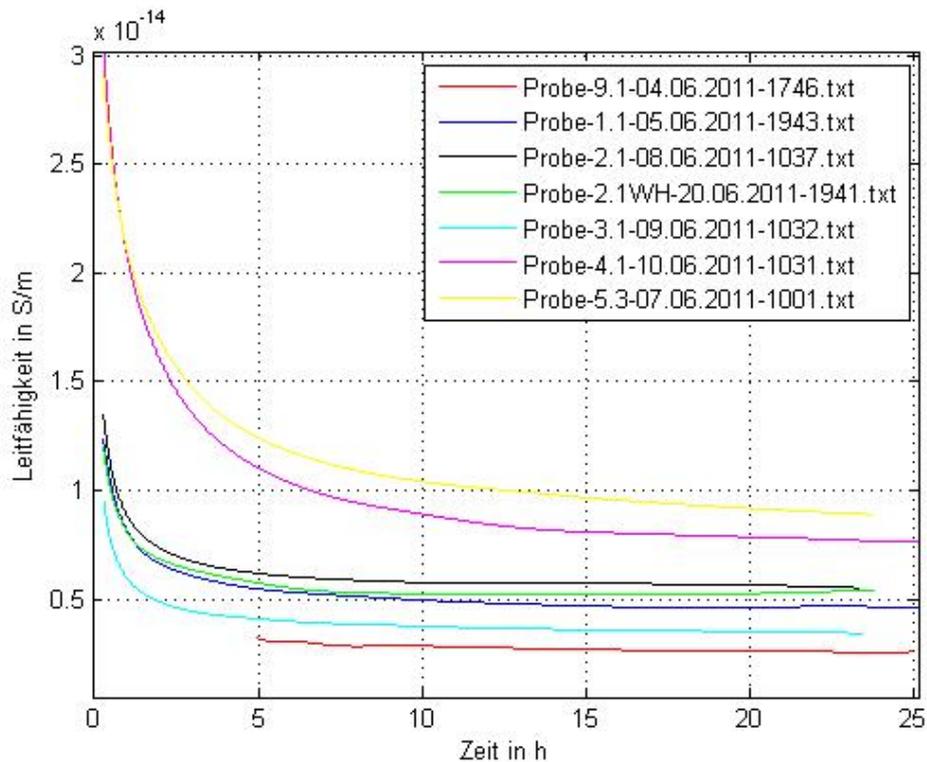


Abb.:25 Leitfähigkeitsverläufe für die Pressspan-Proben 1.1, 5.3, 9.1, 3.1, 2.1, 2.1 WH, 4.1 mit einer Feuchtigkeit von ca. 1,5%

Tabelle 5 Messwerte der Pressspan-Proben mit 1,5% Feuchtigkeitsgehalt

Probennr./Datum	1.1/05.06.11	5.3/07.06.11	9.1/04.06.11	3.1/09.06.11
Probenfeuchtigkeit	1,4 %	1,6 %	1,7 %	1,7 %
Mittlere Spannung	3127 V	3127 V	3111 V	3126 V
Ölfeuchtigkeit Anf.	12,6 ppm	12,0 ppm	12,6 ppm	13,0 ppm
Ölfeuchtigkeit Ende	14,4 ppm	14,4 ppm	12,8 ppm	13,8 ppm
Strom 23 h	2,47E-10 A	4,67E-10 A	1,35E-10 A	1,79E-10 A
Leitfähigkeit 23 h	4,5E-15 S/m	8,51E-15 S/m	2,46E-15 S/m	3,26E-15 S/m

Probennr./Datum	2.1/ 08.06.11	2.1WH/02.06.11	4.1/27.05.11
Probenfeuchtigkeit	1,8 %	1,8%	1,8 %
Mittlere Spannung	3127 V	3127 V	3127 V
Ölfeuchtigkeit Anf.	12,2 ppm	14,6 ppm	11,1 ppm
Ölfeuchtigkeit Ende	13,7 ppm	17,0 ppm	13,3 ppm
Strom 23 h	2,90E-10 A	2,81E-10 A	4,0E-10 A
Leitfähigkeit 23 h	5,29E-15 S/m	5,12E-15 S/m	7,29E-15 S/m

5.3.2 Diskussion der Messung der Gruppe mit 1,5% Feuchtigkeitsgehalt

Die Ströme der Pressspan-Proben 1.1, 2.1, 2.1WH, 3.1 lagen nach einer Stunde im Bereich von $300 \div 460$ pA. Die Ströme erreichten nach einem Tag einen Wert von $180 \div 290$ pA, das entspricht einer Leitfähigkeit von $3,2 \cdot 10^{-15} \div 5,2 \cdot 10^{-15}$ S/m. Die Pressspan-Proben 1.1, 2.1, 2.1WH, 3.1 weisen alle einen ähnlichen Kurvenverlauf auf.

Die Ströme der Pressspan-Proben 4.1 und 5.3 lagen nach einer Stunde im Bereich von 1,1 nA, diese Werte sind ca. dreimal so hoch wie die bereits oben genannten. Am Ende der Messungen wiesen diese ca. doppelt so hohe Werte ($400 \div 470$ pA, das entspricht einer Leitfähigkeit von $7 \cdot 10^{-15} \div 8,5 \cdot 10^{-15}$ S/m) auf. Der Polarisationsprozess war zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht vollständig abgeschlossen. Die Tangente der Kurve von den Pressspan-Proben 5.3 und 4.1 zeigten nach 24 Stunden immer noch eine negative Steigung.

Bei der Pressspan-Probe 9.1 konnte der Strom der ersten 3,15 Stunden, aufgrund eines Messgerätfehlers, nicht gemessen werden.

Wie bei der zuvor genannten Gruppe sank der Strom bei allen Messungen nach 12 Stunden um nur wenige Prozentpunkte.

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

Die Pressspan-Probe 1.1 mit 1,4% Feuchtigkeit weist einen Isolationsstrom von 241 pA auf. Dieser Messwert ist im Bereich der Messwerte (282 pA) der Pressspan-Probe 2.1 mit 1,8% Feuchtigkeit.

Die Pressspan-Proben 9.1 und 3.1 mit jeweils 1,7% Feuchtigkeit weisen einen Stromwert von 134 und 178 pA auf.

In Einzelfällen kann es jedoch vorkommen, dass bei geringen Feuchtigkeitsunterschieden ($\leq 0,3$ Prozentpunkte) die Leitfähigkeit um den Faktor 3 abweicht. Dies wird jedoch auch aufgrund der Streuung durch den Messaufbau bzw. Messablauf bestimmt; das heist diese Abweichungen liegen innerhalb der Messgenauigkeit bzw. –reproduzierbarkeit.

5.4 Messung der Pressspan-Proben mit 2,5% Feuchtigkeitsgehalt

5.4.1 Messergebnisse

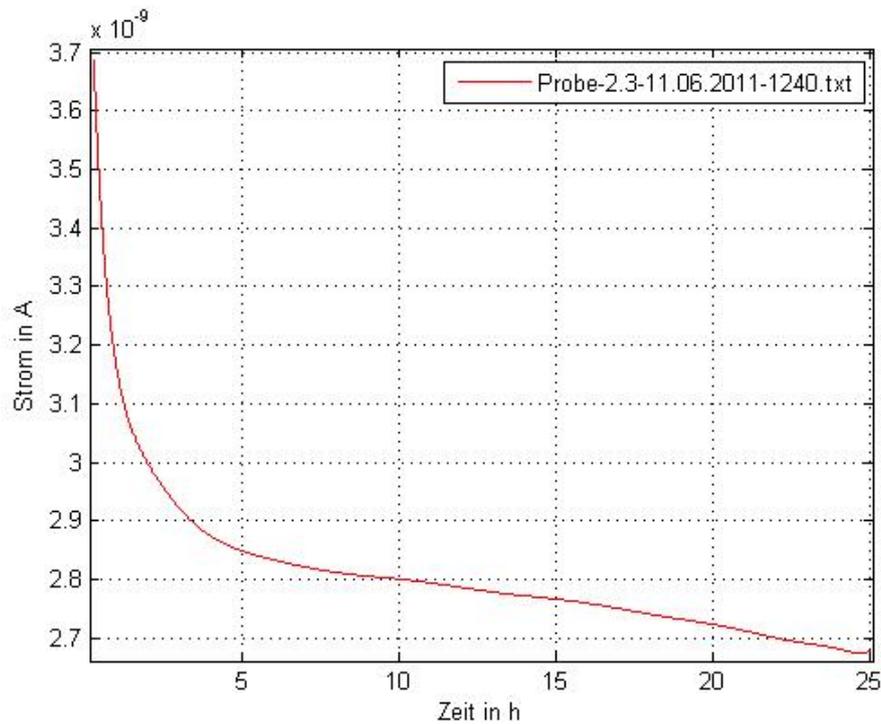


Abb.:26 Stromverläufe für die Pressspan-Proben 2.3 mit einer Feuchtigkeit von 2,5%

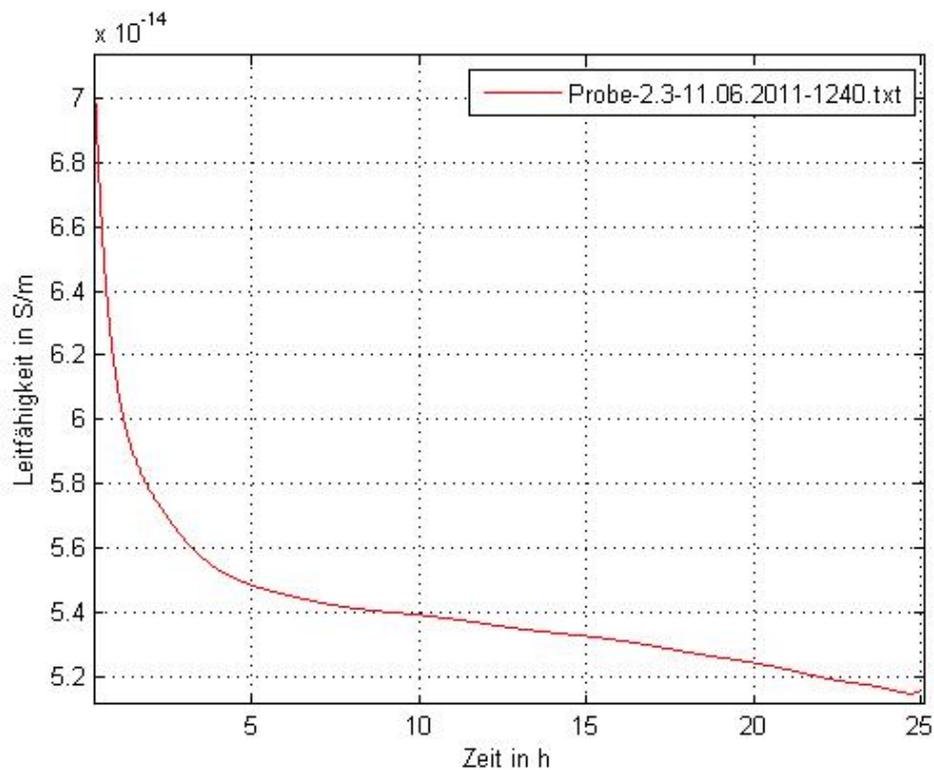


Abb.:27 Leitfähigkeitsverläufe für die Pressspan-Proben 2.3 mit einer Feuchtigkeit von 2,5%

Tabelle 6 Messwerte der Pressspan-Probe mit 2,5% Feuchtigkeitsgehalt:

Probennr./Datum	2.3/ 11.06.11
Probenfeuchtigkeit	2,5%
Mittlere Spannung	3127 V
Ölfeuchtigkeit Anf.	11,4 ppm
Ölfeuchtigkeit Ende	13,3 ppm
Strom 23 h	2,69E-9 A
Leitfähigkeit 23 h	4,9E-14 S/m

5.4.2 Diskussion der Messung der Gruppe mit 2,5% Feuchtigkeitsgehalt

Die Tangente der Kurve von Pressspan-Probe 2.3 zeigte nach 24 Stunden immer noch eine negative Steigung. Das bedeutet, dass die Polarisationsvorgänge noch nicht abgeschlossen waren. Der Endwert (Isolationsstrom) der Messung, welcher bei ca. 2,7 nA liegt, war noch nicht erreicht. Dieser Wert entspricht einer Leitfähigkeit von ca. $5 \cdot 10^{-15}$ S/m.

5.5 Messergebnisse der Pressspan-Proben mit 3,6% Feuchtigkeitsgehalt

5.5.1 Messergebnisse

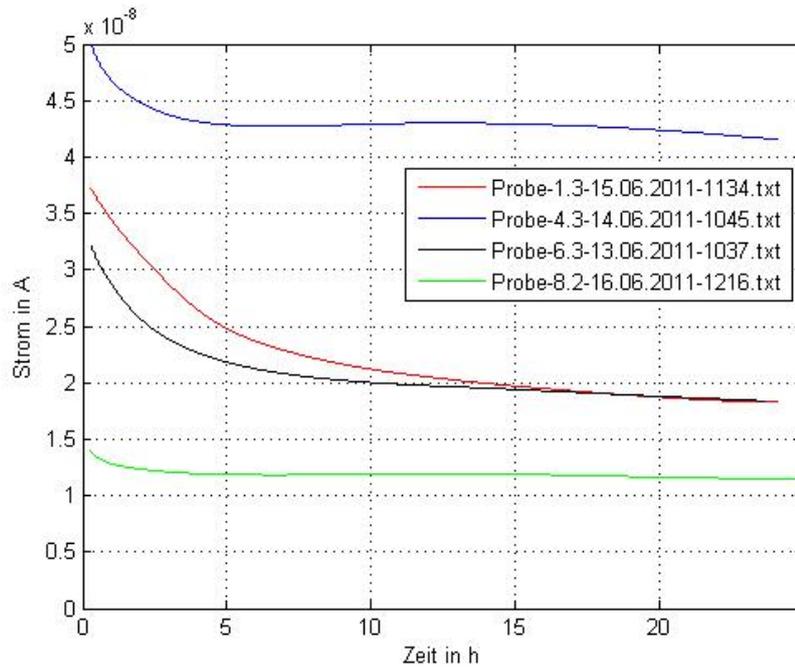


Abb.:28 Stromverläufe für die Pressspan-Proben 1.3, 4.3, 6.3, 8.2 mit einer Feuchtigkeit von ca. 3,6%

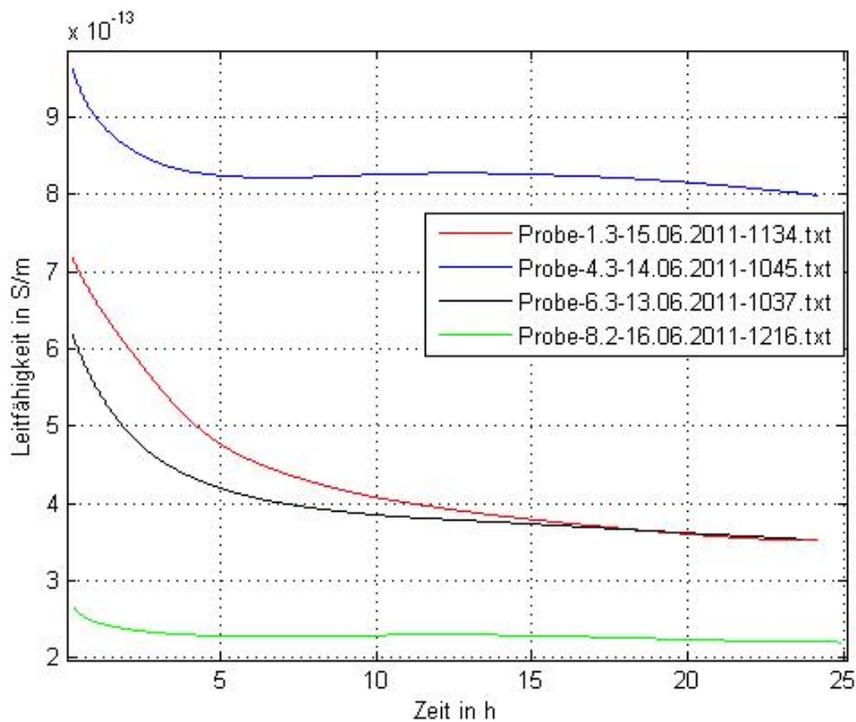


Abb.:29 Leitfähigkeitsverläufe für die Pressspan-Proben 1.3, 4.3, 6.3, 8.2 mit einer Feuchtigkeit von ca. 3,6%

Tabelle 7 Messwerte der Pressspan-Probe mit 3,6% Feuchtigkeitsgehalt:

Probennr./Datum	1.3/ 11.06.11	4.3/14.06.11	6.3/13.06.11	8.2/ 16.06.11
Probenfeuchtigkeit	3,5%	3,6%	3,7%	3,7%
Mittlere Spannung	3128 V	3128 V	-----	-----
Ölfeuchtigkeit Anf.	13,7 ppm	14,3 ppm	12,8 ppm	13,7 ppm
Ölfeuchtigkeit Ende	15,6 ppm	16,3 ppm	14,3 ppm	15,9 ppm
Strom 23 h	1,84E-8 A	4,19E-8 A	1,84E-8 A	1,15E-8 A
Leitfähigkeit 23 h	3,35E-13 S/m	7,64E-13 S/m	3,35E-13 S/m	2,10E-13 S/m

5.5.2 Diskussion der Messung der Gruppe mit 3,6% Feuchtigkeitsgehalt

Die Stromwerte dieser Gruppe streuten nach einer Stunde stark. Die Pressspan-Probe 8.2 mit 3,7% Feuchtigkeit besitzt einen niedrigeren Strom (11 nA) als die Pressspan-Probe 1.3 mit 3,5% Feuchtigkeit.

Die Polarisierungseffekte der Pressspan-Proben 4.3, 6.3 und 1.3 waren nach 24 Stunden noch nicht vollständig abgeklungen. Die Kurvenformen innerhalb dieser Gruppe unterscheiden sich stark voneinander. Der Strom der Pressspan-Probe 8.2 erreichte den stationären Endwert (Isolationsstrom) mit einer sehr flachen Kurve, während die anderen Kurven wesentlich steiler absanken. Zudem erreichten diese den stationären Endwert nicht.

Die Endwerte (Isolationsstrom) der Pressspan-Proben 1.3, 6.3 und 8.2 liegen im Bereich von 12 nA und 18 nA (entspricht einer Leitfähigkeit von $2,1 \cdot 10^{-13}$ bis $3,3 \cdot 10^{-13}$ S/m).

5.6 Messung der Pressspan-Proben mit 5,5% Feuchtigkeitsgehalt

5.6.1 Messergebnisse

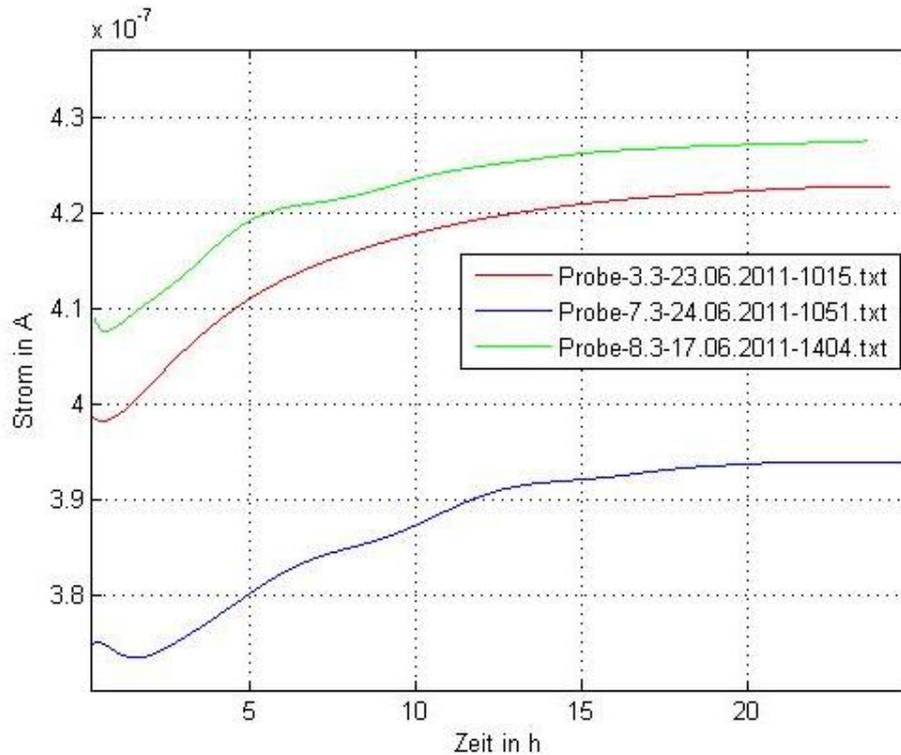


Abb.:30 Stromverläufe für die Pressspan-Proben 8.3, 7.3, 3.3 mit einer Feuchtigkeit von ca. 5,5%

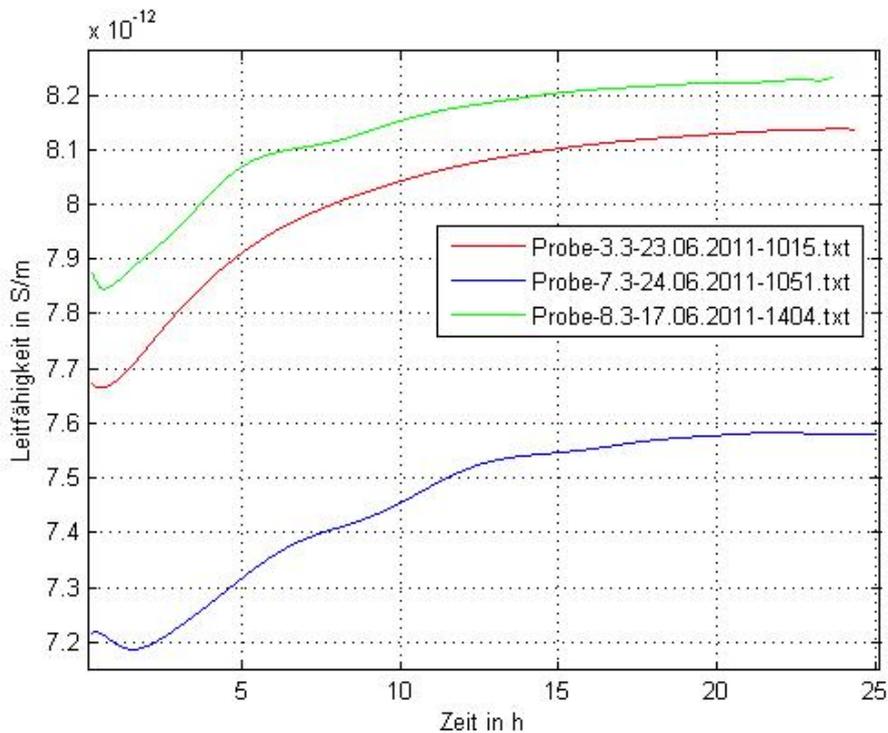


Abb.:31 Leitfähigkeitsverläufe für die Pressspan-Proben 8.3, 7.3, 3.3 mit einer Feuchtigkeit von ca. 5,5%

Tabelle 8 Messwerte der Pressspan-Probe mit 5,5% Feuchtigkeitsgehalt:

Probennr./Datum	8.3/ 17.06.11	7.3/24.06.11	3.3/23.06.11
Probenfeuchtigkeit	5,3%	5,4%	5,7%
Mittlere Spannung	3126 V	3128 V	3126 V
Ölfeuchtigkeit Anf.	12,7 ppm	12,9 ppm	12,3 ppm
Ölfeuchtigkeit Ende	14,6 ppm	14,7 ppm	14,0 ppm
Strom 23 h	4,27E-7 A	3,94E-7 A	4,32E-7 A
Leitfähigkeit 23 h	7,78E-12 S/m	7,18E-12 S/m	7,71E-12 S/m

5.6.2 Diskussion der Messung der Gruppe mit 5,5% Feuchtigkeitsgehalt

Bei den Pressspan-Proben 8.3, 7.3 und 3.3 stiegen widererwarten alle Kurven an. Diese erreichten die stationären Endwerte (Isolationsstrom) im Bereich von 400 nA (entspricht einer elektrischen Leitfähigkeit von ca. 7,2 pS/m). Die Kurven sind ähnlich im Verlauf sowie in den Anfangs- und Endwerten.

Die Pressspan-Proben 8.3 mit dem Feuchtigkeitsgehalt von 5,3% und die Pressspan-Probe 3.3 mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 5,7% weisen einen Isolationsstrom von ca. 0,43 μ A auf.

Der Anstieg der Kurven der Gruppe mit 5,5% Feuchtigkeit wurde vermutlich durch den hohen Feuchtigkeitsgehalt der Pressspan-Proben verursacht. Eine Möglichkeit wäre dass die Dipole der Wassermoleküle durch die elektrische Feldstärke ausgerichtet werden. Diese könnten sich aneinander reihen, und somit einen „Pfad“ für den Strom bilden, der eine höhere Leitfähigkeit besitzt.

Um eine Erwärmung des Pressspans durch den Strom auszuschließen wurde die Temperaturerhöhung berechnet, siehe Gleichung 21 [32].

Berechnung der Temperaturerhöhung durch den Strom

Annahmen für die Berechnung der Temperaturerhöhung der Pressspan-Probe 3.3:

- Pressspan-Probe Gewicht: 0,031 kg ohne Imprägnieröl (190 mm Durchmesser und 1 mm Dicke, 1,1 g/cm³ Dichte)
- Angelegte Messspannung: + 3127 V DC
- Angenommene Wärmekapazität für Papier [30] = 1200 J/kg*K
- Strom: 376 nA (angenommene konstante Stromstärke für die Berechnungen, entnommen aus Abbildung 30)
- Zeit: 2 Stunden (Zeitdauer bis zum Anstieg der Strommesskurve)

$$\frac{\text{Spannung} * \text{Strom} * \text{Zeit}}{1200 * \text{Gewicht}} = 0,23K \quad (21)$$

Eine Erwärmung des Pressspans um 0,23K reicht nicht aus um die elektrische Leitfähigkeit derart zu erhöhen [6].

5.7 Zusammenfassung aller Messungen

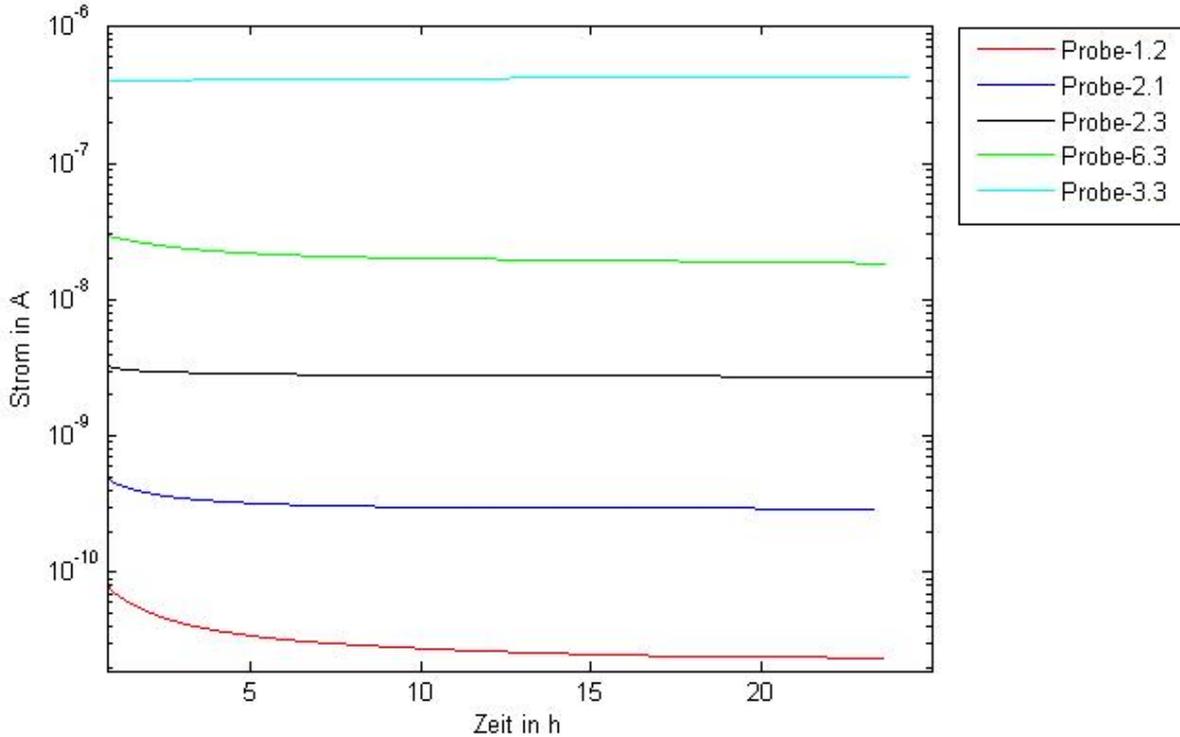


Abb.:32 Stromverläufe für die Pressspan-Proben 1.2 (0,2% Feuchtigkeit), 2.1 (1,8% Feuchtigkeit), 2.3 (2,5% Feuchtigkeit), 6.3 (3,7% Feuchtigkeit) und 3.3 (5,7% Feuchtigkeit) im halblogarithmischen Maßstab

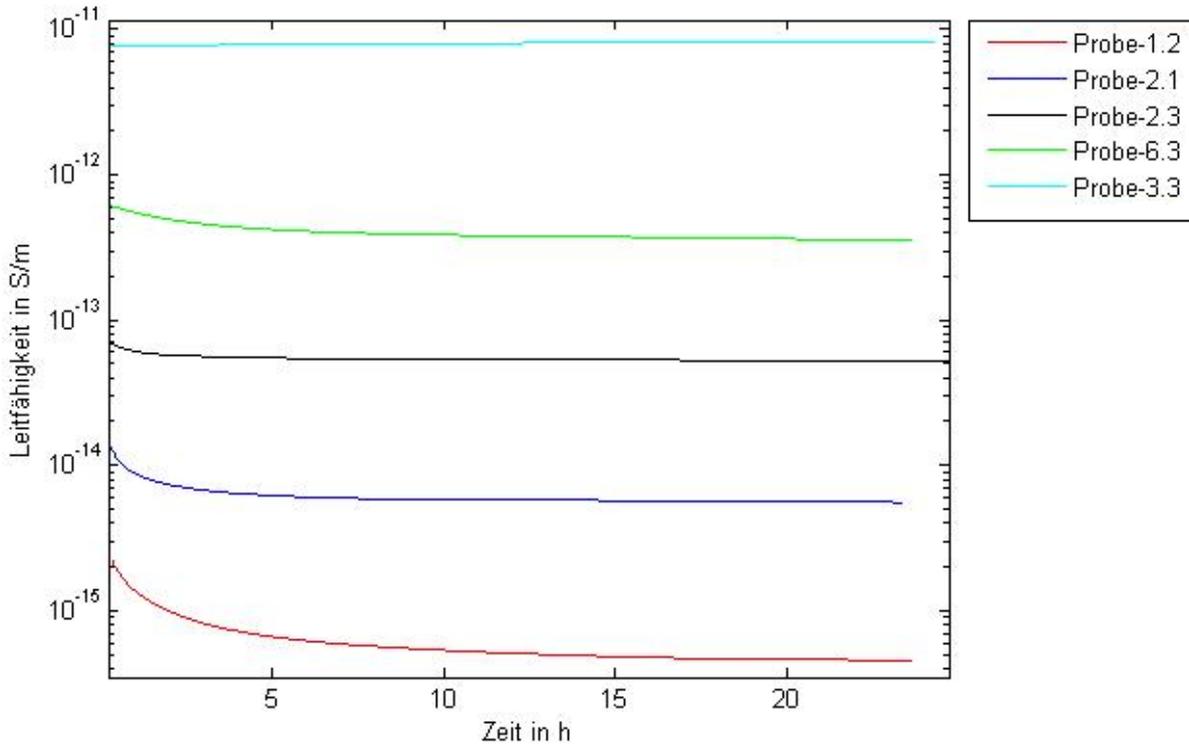


Abb.:33 Leitfähigkeitsverläufe für die Pressspan-Proben 1.2 (0,2% Feuchtigkeit), 2.1 (1,8% Feuchtigkeit), 2.3 (2,5% Feuchtigkeit), 6.3 (3,7% Feuchtigkeit) und 3.3 (5,7% Feuchtigkeit) im halblogarithmischen Maßstab

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

In den Diagrammen 33 und 34 sind die Kurvenverläufe von Strom und Leitfähigkeit dargestellt. Von jeder Gruppe ist eine repräsentative Messung dargestellt. In diesen Diagrammen sind die Veränderungen der Leitfähigkeit zwischen den einzelnen Gruppen abgebildet.

Die Leitfähigkeit steigt stark an, jeweils um den Faktor 10 pro $1 \div 1,5\%$ Feuchtigkeitszunahme. Dieser Zusammenhang ist in den unteren Feuchtigkeitsbereichen zu beobachten.

In Tabelle 9 sind die wichtigsten Ergebnisse der spezifischen Leitfähigkeitsmessungen aller Proben zusammengefasst. In dieser Tabelle 9 sind die gemessenen Stromwerte, Feuchtigkeitswerte der Pressspan-Proben und die berechneten Leitfähigkeitswerte aller Pressspan-Proben dargestellt.

Fußnote 1: zwei Pressspan-Proben (2.1 und 3.2) wurden zweimal gemessen, daher fehlen bei den ersten Messungen die Feuchtigkeitswerte aus der Mitte der Pressspan-Proben.

Fußnote 2: Aufgrund einer Fehlfunktion des Elektrometers konnte in diesem Zeitraum der Strom nicht gemessen werden.

Tabelle 9 Strommessdaten (I) und elektrische Leitfähigkeitswerte (σ)

Proben-Nummer und Gruppe		Nach 1 Stunde		Nach 12 Stunden		Nach 23 Stunden		Feuchtigkeit Rand vor der Messung in %	Feuchtigkeit nach der Messung in %		Differenz der Feuchtigkeit zwischen Mitte u. Rand	Mittlere Abweichung zwischen Mitte u. Rand
		I in A	σ in S/m	I in A	σ in S/m	I in A	σ in S/m		Rand	Mitte		
1,2	0,2%	7,18E-11	1,31E-15	2,49E-11	4,54E-16	2,36E-11	4,30E-16	0,2	0,2	0,2	0,0	0
2,2		7,08E-11	1,29E-15	2,51E-11	4,57E-16	2,18E-11	3,97E-16	0,2	0,2	0,2	0,0	
3,2		7,05E-11	1,28E-15	3,02E-11	5,50E-16	2,52E-11	4,59E-16	0,2	0,2	0,2	0,0	
3,2WH		9,68E-11	1,76E-15	3,41E-11	6,61E-16	2,94E-11	5,36E-16	0,2	0,2	0,2	0,0	
1,1	1,5%	4,25E-10	7,75E-15	2,52E-10	4,59E-15	2,47E-10	4,50E-15	1,4	1,8	1,4	0,4	0,3
5,3		1,10E-09	2,00E-14	5,21E-09	9,50E-14	4,67E-10	8,51E-15	1,5	2,0	1,6	0,4	
9,1		²	²	1,45E-10	2,64E-15	1,35E-10	2,46E-15	1,5	2,1	1,7	0,4	
3,1		3,09E-10	5,63E-15	1,91E-10	3,48E-15	1,79E-10	3,26E-15	1,9	1,8	1,7	0,1	
2,1WH		4,05E-10	7,38E-15	2,54E-10	4,63E-15	2,81E-10	5,12E-15	1,7	2,0	1,8	0,2	
2,1		4,59E-10	8,37E-15	2,95E-10	5,38E-15	2,90E-10	5,29E-15	1,7	2,0	1,8	0,2	
4,1	1,08E-09	1,97E-14	4,23E-10	7,71E-15	4,00E-10	7,29E-15	2,0	2,0	1,8	0,2		
2,3	2,5%	3,17E-09	5,78E-14	2,78E-09	5,07E-14	2,69E-09	4,90E-14	2,4	3,0	2,5	0,5	0,5
1,3	3,6%	3,45E-08	6,29E-13	2,05E-08	3,74E-13	1,84E-08	3,35E-13	3,7	3,7	3,6	0,1	0,2
4,3		4,42E-08	8,06E-13	4,31E-08	7,85E-13	4,19E-08	7,64E-13	3,5	3,7	3,6	0,1	
6,3		2,87E-08	5,23E-13	1,97E-08	3,59E-13	1,84E-08	3,35E-13	3,4	4,0	3,7	0,3	
8,2		1,29E-08	2,35E-13	1,20E-08	2,19E-13	1,15E-08	2,10E-13	3,7	3,5	3,7	0,2	
8,3	5,5%	4,08E-07	7,44E-12	4,25E-07	7,75E-12	4,27E-07	7,78E-12	5,0	5,7	5,3	0,4	0,2
7,3		3,57E-07	6,51E-12	3,87E-07	7,05E-12	3,94E-07	7,18E-12	5,4	5,4	5,4	0,0	
3,3		3,99E-07	7,27E-12	4,19E-07	7,64E-12	4,23E-07	7,71E-12	5,4	5,5	5,7	0,2	

¹ nur am Rand gemessen

² Keine brauchbaren Messwerte vorhanden; Fehlfunktion des Elektrometers

5.8 Diskussion der Messergebnisse

Es wurde festgestellt, dass trockene Pressspan-Proben mit 0,2% Feuchtigkeit einen gemessenen Isolationsstrom von $20 \div 30 \text{ pA}$ aufweisen. Das entspricht einer Leitfähigkeit von $4 \div 4,5 \cdot 10^{-16} \text{ S/m}$. Bei den feuchten Pressspan-Proben mit 5,5% Feuchtigkeit wurde ein Strom von $0,4 \text{ }\mu\text{A}$ gemessen, dies entspricht einer Leitfähigkeit von $7 \div 8 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$. Die Leitfähigkeit der Pressspan-Proben nimmt im Bereich von 0,2% bis 5,5% Feuchtegehalt um den Faktor 10^4 zu.

Die Untersuchung ergab einen starken Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit und der Feuchtigkeit in den Pressspan-Proben. Die Leitfähigkeit steigt, jeweils um den Faktor 10 pro $1 \div 1,5\%$ Feuchtigkeitszunahme, an. Dieser Zusammenhang ist bis zu der Gruppe von 3,5% Feuchtigkeitsgehalt zu beobachten.

In Einzelfällen kann es jedoch vorkommen, dass bei geringen Feuchtigkeitsunterschieden ($\leq 0,3$ Prozentpunkte) die Leitfähigkeit um den Faktor 3 abweicht. Dies wird jedoch auch aufgrund der Streuung durch den Messaufbau bzw. Messablauf bestimmt; das heist diese Abweichungen liegen innerhalb der Messgenauigkeit bzw. –reproduzierbarkeit.

Es konnte beobachtet werden, dass die Stromwerte nach 12 Stunden nur mehr um < 9 Prozentpunkte sanken (Strommesswerte nach 1 Stunde = 100%), das entspricht einer gemittelten Abweichung von 3,3 Prozentpunkten über alle untersuchten Proben. Somit kann nach 12 Stunden Messzeit der Isolationsstrom abgeschätzt werden.

Für die Messungen dieser Diplomarbeit wurde angenommen dass die Dauer, bis der Polarisationsstrom abgeklungen ist, in etwa 23 Stunden beträgt. Deshalb wurden die Messungen nach knapp 23 Stunden abgebrochen. Es konnte jedoch während der Auswertung der Messergebnisse festgestellt werden, dass diese Dauer für die Pressspan-Proben 1.3, 2.3, 4.1, 4.3, 5.3 und 6.3 nicht ausreichend war. Diese Pressspan-Proben weisen eine negative Steigung der Tangente der Stromkurve auf. Die negative Steigung der Tangente deutet darauf hin, dass der Polarisationsprozess der zuvor genannten Proben nach 23 Stunden noch nicht abgeschlossen war.

Ölfeuchtigkeitsanstieg

Die Pressspan-Proben wurden etwa 23 Stunden lang gemessen. Während dieser Zeit stieg die Ölfeuchtigkeit um bis zu 4 ppm an. Die Feuchtigkeit wurde von der Umgebungsluft und der Zellulose an das Öl abgegeben. Der Feuchtigkeitsausgleich zwischen Öl und Zellulose beeinflusste die Leitfähigkeitsmessung nicht.

Dies hatte mehrere Gründe. Die Messung unterlag nur einer geringen Temperaturschwankung von wenigen Grad Celsius, somit erfolgte nur ein geringer Feuchtigkeitsaustausch zwischen dem Öl und der Pressspan-Probe. Die Feuchtigkeitsdifferenz zwischen Anfang und Ende der Leitfähigkeitsmessung betrug im Mittel 0,12 Prozentpunkte.

Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

Anhand der trockenen Pressspan-Proben mit ca. 0,2% Feuchtigkeit wurde die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse überprüft.

Die Messwerte dieser Pressspan-Proben mit ca. 0,2% Feuchtigkeit liegen im Bereich von 20 ÷ 30 pA, siehe Abbildung 22 und Tabelle 4. Die Kurvenverläufe der Pressspan-Proben sind ähnlich.

Zusätzlich wurden zwei Messungen wiederholt um die Reproduzierbarkeit nachzuweisen. Bei diesen Messungen wurde die Pressspan-Probe 3.2 und 2.1 ein weiteres Mal gemessen. Die erneuten Messungen dieser Proben stimmten mit den vorherigen Messungen überein.

Gruppeneinteilung und Feuchtigkeitsmessung der Pressspan-Proben

Es wurde eine Gruppeneinteilung der Pressspan-Proben nach der Verfeuchtung im Klimaschrank vorgenommen. Diese Messung konnte nur am Rand der Pressspan-Proben vorgenommen werden, damit die Pressspan-Proben nicht beschädigt werden.

Die Feuchtigkeitsbestimmung vor der Leitfähigkeitsmessung an den Rändern der Pressspan-Proben wich, - bis zu 0,3 Prozentpunkte, siehe Tabelle 9 - von der Feuchtigkeitsbestimmung in der Mitte der Pressspan-Proben nach der Leitfähigkeitsmessung, ab.

- 6 Pressspan-Proben wichen nicht ab
- 5 Pressspan-Proben wichen um 0,1 Prozentpunkte ab
- 3 Pressspan-Proben wichen um 0,2 Prozentpunkte ab

- 3 Pressspan-Proben wichen um 0,3 Prozentpunkte ab

Die mittlere Messabweichung beträgt rund 0,1 Prozentpunkte.

Nach der Leitfähigkeitsmessung der Pressspan-Proben wurde nochmals die Feuchtigkeit gemessen. Die Messungen werden am Rand und in der Mitte der Pressspan-Proben vorgenommen. Diese neuen Messwerte unterschieden sich teilweise von den vorhergehenden Messwerten.

Die Feuchtigkeitsbestimmung am Rand der Pressspan-Proben nach den Leitfähigkeitsmessungen wich um bis zu 0,5 Prozentpunkte von den Feuchtigkeitsbestimmungen in der Mitte der Pressspan-Proben nach der Leitfähigkeitsmessung ab, siehe Tabelle 9.

- 4 Pressspan-Proben wichen nicht ab
- 3 Pressspan-Proben wichen um 0,1 Prozentpunkte ab
- 4 Pressspan-Proben wichen um 0,2 Prozentpunkte ab
- 1 Pressspan-Proben wich um 0,3 Prozentpunkte ab
- 4 Pressspan-Proben wichen um 0,4 Prozentpunkte ab
- 1 Pressspan-Proben wich um 0,5 Prozentpunkte ab

Die mittlere Messabweichung beträgt rund 0,2 Prozentpunkte.

Die Feuchtigkeitsbestimmung nach der Leitfähigkeitsmessung am Rand ist zu ungenau. Es hat ein Feuchtigkeitsausgleich zwischen Isolieröl und dem Rand der Pressspan-Proben stattgefunden. Daher können die Feuchtigkeitswerte zwischen dem Rand und der Mitte der Pressspan-Proben verschieden hoch sein.

Die Gruppeneinteilung erfolgte durch gemittelte Messwerte aus der Mitte der Pressspan-Proben.

Beeinflussung und Vergleich der Messergebnisse

Die Messwerte der Literatur [2, 28, 29] geben eine elektrische Leitfähigkeit von $10^{-13} \div 10^{-16}$ S/m, je nach Material, Feuchtigkeit und Temperatur an. Im Folgenden werden die einzelnen Ergebnisse näher erläutert.

Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit [28]

Mit steigender Temperatur und Feuchtigkeit steigt die elektrische Leitfähigkeit des Isoliermediums exponentiell an. Bei 50°C erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit um den Faktor 10 ÷ 15. Steigt die Temperatur auf 90°C nimmt die elektrische Leitfähigkeit ca. den tausendfachen Wert, gegenüber den Messwerten bei Raumtemperatur an.

Einfluss der Feuchtigkeit auf die elektrische Leitfähigkeit

Nimmt die Feuchtigkeit der Isolierung zu, steigt die Leitfähigkeit. Bei der Steigung der elektrischen Leitfähigkeit sind die Angaben der Literatur unterschiedlich. In einer Literaturangabe [2] wird diese mit einem Anstieg um den Faktor 10 pro 1 ÷ 1,5% Feuchtigkeit angegeben, in einer anderen Quelle [28] wird diese mit einem Anstieg um den Faktor 10 zwischen trockenen (1% Feuchtigkeit) und feuchten (4% Feuchtigkeit) Proben publiziert.

Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Feldstärke (in der Größenordnung von einigen kV/mm) beeinflusst die elektrische Leitfähigkeit nur geringfügig und ist für die Vergleiche somit zu vernachlässigen [6, 29, 31].

Vergleich der Messergebnisse zwischen den Leitfähigkeitsmessung der Diplomarbeit und der Literatur

Da in der Literatur zwar verschiedene Messmethoden (CDM, PDC) verwendet wurden aber immer wieder ähnliche Messergebnisse erzielt wurden, können die Ergebnisse mit den gemessenen Ergebnissen dieser Diplomarbeit verglichen werden.

Die Ergebnisse der Literatur [28] unterscheiden sich ca. um den Faktor 3, jedoch ist der Leitfähigkeitsanstieg geringer (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10 Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit zwischen der Literatur und der Leitfähigkeitsmessungen der Diplomarbeit

Feuchtigkeit in %	Leitfähigkeit in S/m Eigene Messung	Feuchtigkeit in %	Leitfähigkeit in S/m Literatur [28]	Abweichung (Faktor)
0,2	$4 \cdot 10^{-16}$ bis $5,4 \cdot 10^{-16}$	0,4	10^{-15}	2
1,5	$2,5 \cdot 10^{-15}$ bis $8,5 \cdot 10^{-15}$	1,3	$2 \cdot 10^{-14}$	3 bis 10
2,5	$4,9 \cdot 10^{-14}$	1,8-2,8	$3 \cdot 10^{-14}$	1,5
3,5	$2,1 \cdot 10^{-13}$ bis $7,7 \cdot 10^{-13}$	3,7-4,8	$8 \cdot 10^{-14}$	2 bis 3
5,5	$7,2 \cdot 10^{-12}$ bis $7,8 \cdot 10^{-12}$			

6 Schlussfolgerungen

Die Messungen zeigten einen starken Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit des Pressspans und der Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit stieg jeweils um den Faktor 10 pro 1 ÷ 1,5% Feuchtigkeit an.

Der oben genannte Zusammenhang gilt zwischen den Gruppen. Innerhalb der Gruppen können trockenere Pressspan-Proben jedoch einen gleich hohen oder höheren Isolationsstrom aufweisen als feuchtere Pressspan-Proben.

Es konnte beobachtet werden, dass die Stromwerte nach 12 Stunden nur mehr um wenige Prozentpunkte sanken (Strommesswerte nach 1 Stunde = 100%), das entspricht einer mittleren Abweichung von 3,3 Prozentpunkten. Somit kann nach 12 Stunden Messzeit der Isolationsstrom abgeschätzt werden.

Die Ölfeuchtigkeit beeinflusste die Messergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit nicht. Dies hatte mehrere Gründe. Die Messung unterlag nur einer geringen Temperaturschwankung von wenigen Grad Celsius, somit erfolgte nur ein geringer Feuchtigkeitsaustausch zwischen dem Öl und der Pressspan-Probe. Die Feuchtigkeitsdifferenz zwischen Anfang und Ende der Leitfähigkeitsmessung betrug im Mittel 0,1 Prozentpunkte.

Im Allgemeinen klangen die Polarisierungseffekte nach etwa einem Tag – bei diesen Versuchen – ab. Jedoch reichte die Messzeit nicht bei allen Proben aus. Deshalb wurde bei diesen nicht nur der Isolationsstrom sondern auch ein erhöhter Anteil des Polarisationsstroms gemessen.

Da aus den Rohdaten noch nicht ersichtlich war ob der Polarisationsstrom abgeklungen ist oder nicht, wurde die Messung nach etwa 23 Stunden beendet.

6.1 Verbesserungsvorschläge für zukünftige Messungen

Um zukünftige Messungen effektiver zu gestalten, sollten folgende Erkenntnisse berücksichtigt werden:

Da die Messwerte der Feuchtigkeitsbestimmung mit der Karl-Fischer-Titration von Pressspan-Proben streuten, sollte mindestens dreimal gemessen werden. Die Messwerte sollten anschließend arithmetisch gemittelt werden.

Die Probenentnahme zur Bestimmung der Feuchtigkeit kann nach dem Aufbereiten und Verfeuchten am Rand der Pressspan-Probe erfolgen. Wird die Feuchtigkeit nach der Leitfähigkeitsmessung durchgeführt, sollte die Probenentnahme in der Mitte der Pressspan-Probe erfolgen, da zwischen dem Rand der Pressspan-Probe ein Feuchtigkeitsausgleich mit dem umliegenden Öl stattfindet.

Anstatt der Verwendung der Karl-Fischer-Methode, zur Feuchtigkeitsbestimmung der Pressspan-Proben, könnte das Gewicht der getrockneten und mit ölimprägnierten Pressspan-Proben bestimmt werden. Die Restfeuchtigkeit der getrockneten Pressspan-Proben beträgt ca. 0,2%.

Nach der Verfeuchtung muss das Gewicht ein weiteres Mal gemessen werden, durch die Differenz der beiden Messungen kann die aufgenommene Feuchtigkeit berechnet werden. Diese Methode ist wesentlich schneller als die Karl-Fischer-Methode mit Ofen.

6.2 Weiterführende Untersuchungen

In dieser Diplomarbeit wurde die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan bei verschiedenen Feuchtigkeitswerten bei Raumtemperatur gemessen. Da die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit besitzt, sollte in weiteren Untersuchungen der Einfluss der Feuchtigkeit bei erhöhter Temperatur gemessen werden.

7 Zusammenfassung

Eine der wichtigsten Isoliermedien in der Hochspannungstechnik ist die Öl-Zelluloseisolierung. Diese besitzt hervorragende elektrische Isoliereigenschaften und wird beispielsweise in Kabeln, Transformatoren und Wandlern eingesetzt.

Um große Entfernungen zu überbrücken wird die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung verwendet. Diese bietet Vorteile gegenüber der herkömmlichen Hochspannungs-Wechselstrom-Übertragung.

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen werden die Betriebsmittel und deren Komponenten wie zum Beispiel Isolierungen immer weiter entwickelt. Um die Weiterentwicklung voran zu treiben müssen diese erforscht werden.

Daher wurde in dieser Diplomarbeit die elektrische Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan mit verschiedenen Feuchtigkeiten untersucht. Diese Diplomarbeit leistet somit einen Beitrag zur Dimensionierung der Öl-Pressspan-Isolierung für Gleichspannungs-Anwendungen.

Bevor die Messungen beginnen konnten, mussten die Pressspan-Proben vorbereitet werden. Die Vorbereitung bestand aus dem Auftragen des Silberlackringes und dem Ankleben der Kupferlasche. Anschließend wurden die Pressspan-Proben getrocknet, imprägniert und verfeuchtet.

Die Feuchtigkeit von Pressspan wurde mit der Karl-Fischer-Titration gemessen, die Pressspan-Proben wurden anschließend in Gruppen eingeteilt. Die Leitfähigkeit wurde mit einem selbst konstruierten, mineralölgefüllten Messkessel gemessen. Die verwendete Elektrodenanordnung entspricht der Norm [19], welche aus einem Schirmzylinder, einer Hochspannungs- und einer Messelektrode bestand.

Gemessen wurde ein Strom, der aufgrund der elektrischen Feldstärke hervorgerufen wurde. Dieser setzte sich aus dem Isolationsstrom und dem Polarisationsstrom zusammen. Der Polarisationsstrom klang nach einer Exponentialfunktion ab, dies dauerte in dieser Untersuchung etwa einen Tag. Mit dem Isolationsstrom konnte die spezifische Leitfähigkeit berechnet werden.

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt
Die spezifische Leitfähigkeit reichte von $4 \cdot 10^{-16}$ S/m bei trockenen Pressspan-Proben bis zu $8 \cdot 10^{-12}$ S/m bei feuchten Pressspan-Proben mit 5,5% Feuchtigkeit, siehe Tabelle 9.

Die Leitfähigkeit stieg jeweils um den Faktor 10 pro 1 ÷ 1,5% Feuchtigkeit an. Dieser Zusammenhang ist bis zu der Gruppe von 3,5% Feuchtigkeit zu beobachten. Die Leitfähigkeit steigt stark mit der Feuchtigkeit an.

Der oben genannte Zusammenhang gilt zwischen den Gruppen. Innerhalb der Gruppen können trockenere Pressspan-Proben jedoch einen gleich hohen oder höheren Isolationsstrom aufweisen als feuchtere Pressspan-Proben.

Es konnte beobachtet werden, dass die Stromwerte nach 12 Stunden nur mehr um wenige Prozentpunkte sinken (Strommesswerte nach 1 Stunde = 100%). Somit kann nach 12 Stunden Messzeit der Isolationsstrom abgeschätzt werden

Die Leitfähigkeit hängt nicht nur von der Feuchtigkeit sondern auch von der Temperatur ab. Bei diesen Versuchen wurde bei Raumtemperatur gemessen, daher konnte keine Aussage getroffen werden, wie sich die Feuchtigkeit auf die Leitfähigkeit bei höheren Temperaturen auswirkt.

Das Öl-Pressspan Isoliersystem sollte so gut wie möglich getrocknet werden. Die Feuchtigkeits- und die Temperatureinflüsse müssen bei der Dimensionierung der Isolierung berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Andreas Küchler, „Hochspannungstechnik Grundlagen - Technologie – Anwendungen“. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2. Auflage 2005, ISBN 3-540-21411-9.
- [2] Werner Lick, "Analyseverfahren der Isolierstoffe" Vorlesungsunterlagen TU Graz 2005.
- [3] Kir, "Bestimmung des Wassergehaltes von 8 Boardproben nach Karl-Fischer," 2008. Laborbericht Weidmann AG
- [4] Hans Peter Latscha, Helmut Alfons Klein, Anorganische Chemie, Chemie Basiswissen 1. Berlin Heidelberg New York: Springer, 9. Auflage 2007, ISBN 978-3-540-69863-0 .
- [5] M. F. Reinhard Keller, "Potentiometrische Bestimmung der Säurezahl von Ölen und Fetten," LABO Fachbeitrag S. 48+ 53 April, 2009.
- [6] V. Dahinden, H.P. Moser, Transformerboard II. 2. Auflage 1999.
- [7] Stephan Pack, Robert Schwarz, "Hochspannungsmess- und Prüftechnik" Vorlesungsunterlagen TU Graz 2007.
- [8] W. Götz, "Betriebsanleitung DC Widerstandsmessanlage bis 25 kV," 2007 Fa. Weidmann AG.
- [9] Thomas Mühl, Einführung in Die Elektrische Messtechnik, Grundlagen, Messverfahren, Geräte. Teubner, 2. Auflage 2006, ISBN 3-8351-0094-7.
- [10] Reinhard Lerch, "Elektrische Messtechnik Analoge, Digitale Und Computergestützte Verfahren," Berlin Heidelberg New York: Springer, 4. Auflage ISBN 978-3-540-73610-3 .

- [11] D. S. Wilfried Plaßmann, "Handbuch Elektrotechnik, Grundlagen Und Anwendungen Für Elektrotechniker," Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 5. Auflage 2009, ISBN 978-3-8348-0470-9.
- [12] Thomas Leibfried, Christian Homagk, Dietmar Giselbrecht, Jens Paetzold, Manfred Stach, Klaus Etz Korn, "Isolierstoffuntersuchungen an gealterten Maschinentransformatoren und Vergleich der Ergebnisse mit diagnostischen Kenngrößen" ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, September 2006, Kassel
- [13] Maik Koch, Michael Krüger, Stefan Tenbohlen, "Feuchte im Transformator vor Ort bestimmen," Bulletin SEV/AES, 13/2008.
- [14] Fa. Omicron "Neue Methode zur Feuchtigkeitsanalyse in der Papierisolierung von Leistungstransformatoren," TestShotNews Jahrgang 12 Ausgabe 2, 2007,.
- [15] Hackländer, "Mit der FT-Infrarot-Spektroskopie der Oxidation auf der Spur Wearcheck-Schmierstoffanalysen noch schneller und präziser mit dem neuen FT-IR-Gerät" Öl Checker Frühjahr, 2000.
- [16] <http://produkte.metrohm.com/prod-28310010.aspx>, Abgerufen am 3.8.2011 um 11:15 Uhr
- [17] M. Muhr, C. Sumereder, "Moisture Determination and Degradation of Solid Insulation System of Power Transformers," aus Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium, Seiten 1-4.
- [18] M.Darveniza, T.K.Saha, D.J.T. Hill, T.T.Le, James Cook, "Studies of the Condition of Thermally Aged Transformerboard Insulation by Electrical and Chemical Techniques," Roceeding, of the 4th international Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 3-8.1994. Brisbane Australia
- [19] DIN VDE 0303: "Prüfverfahren für Elektroisolerstoffe- Spezifischer Durchgangswiderstand und Spezifischer Oberflächenwiderstand von festen, flüssigen elektrisch isolierenden Werkstoffen", Teil 30, Dezember 1993
- [20] Andreas Kalweit, Christof Paul, Dr. Sascha Peters, Reiner Wallbaum, „Handbuch Für Technisches Produktdesign Material Und Fertigung Entscheidungs-

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt
grundlagen Für Designer Und Ingenieure“. Berlin, Heidelberg, NewYork: Springer,
2006, ISBN 978-3-540-21416-8.

[21] Peter L. Jones, "Electromagnetic heating for drying and finishing," The Electricity
Council Research Centre, Capenhurst, Chester, CH1 6 ES.

[22] T. V. Oommen, "Moisture equilibrium charts for transformer insulation drying
practise," Vol. PAS-103 NR.10, 1984.

[23] Metrohm „Columbmetrischen Wasserbestimmung nach Karl Fischer“, Application
Bulletin 137/3 d

[24] Peter Kurzweil, Paul Scheipers „Chemie, Grundlagen, Aufbauwissen,
Anwendungen und Experimente“, Vieweg + Teubner, 8. Auflage 2010, ISBN 978-3-
8348-0341-2

[25] R. Woschitz „Hochspannungsverfahren in Industrie und Umwelt“
Vorlesungsunterlagen TU-Graz, 2011

[26] Valentin Carsten „Elektrische Energieversorgung 1“, . Berlin, Heidelberg, New-
York: Springer, 2. Auflage, ISBN 978-3-540-69439-7

[27] C. Ekanayake, D. Allan “Application of Polarization Based Measurement
Techniques for Diagnosis of Field Transformers” Power and Energy Society General
Meeting, 2010 IEEE

[28] A. Küchler „Charakterisierung von Isolierstoffen und Isolierstoffsystemen“ 1.
Burghauser Isolierstoff Kolloquium, 14.-15. Juni 2007

[29] A. Küchler „Bestimmung von Leitfähigkeiten und dielektrischen Eigenschaften
hoch beanspruchter HGÜ-Anwendungen“ Isoliersysteme, 27. – 28.09.2010 in Köln,
Paper 5.3

[30] http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2_wkapazitaet_sonstiges.htm am
14.10.2011 um 11:53

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit an ölprägniertem Pressspan mit unterschiedlichem Feuchtegehalt

[31] A. Küchler „Dielektrische Eigenschaften von Öl-Board- und Öl-Papier-Isolierungen als Kenngrößen für die Diagnose von Transformatoren und Durchführungen.“ Aus ETG Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, Kassel, 19.-20.09.2006

[32] U. Harten „Physik, Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler“ Berlin Heidelberg Springer, 4. Auflage 2009, ISBN 978-3-540-89100-0

[33] E. Breitmaier, G. Jung „Organische Chemie Grundlagen, Verbindungsklassen, Reaktionen, Konzepte, Molekülstruktur, Naturstoffe“ Thieme Verlag, 6. Auflage 2009, ISBN 978-3-13-541506-2

Anhang

Ergebnisse der Feuchtigkeitsbestimmung der Pressspan-Proben

In den folgenden Tabellen A1 ÷ A4 wurden die Rohdaten der Feuchtigkeitsbestimmung der Pressspan-Proben dargestellt. In Tabelle 9 sind die Ausgewerteten daten dargestellt.

Tabelle A1 Pressspan-Proben, Messwerte der Feuchtigkeit vor der Leitfähigkeitsmessung

Feuchtigkeit von ölprägnierten Pressspan-Proben					
Datum	Probe	Gewicht in g	Gewicht in g ohne Öl	gemessene Feuchtigkeit in ppm	berechnete Feuchtigkeit in ppm
28.3.2011	1.2.	0,1030	0,0927	1414	1568
28.3.2011	7.2.	0,1150	0,0995	1379	1591
28.3.2011	3.2.	0,1605	0,1473	1636	1779
19.1.2011	1.1.	0,1562	0,1395	12542	13849
24.3.2011	5.3.	0,1068	0,0969	13347	14497
24.3.2011	9.1.	0,1655	0,1491	13990	15291
19.1.2011	2.1.	0,1801	0,1601	15322	16944
19.1.2011	3.1.	0,1752	0,1535	16584	18577
19.1.2011	4.1.	0,1685	0,1494	18026	19925
24.3.2011	2.3.	0,0864	0,0766	22184	24411
28.3.2011	6.3.	0,1162	0,1074	32960	34433
28.3.2011	4.3.	0,0538	0,0488	32977	35080
28.3.2011	1.3.	0,1306	0,1105	32084	36535
24.3.2011	1.3.	0,1294	0,1104	34768	39156
31.1.2011	4.2.	0,1256	0,1048	35404	40704
24.3.2011	4.3.	0,1462	0,1263	37495	41597
24.3.2011	8.3.	0,1285	0,1104	45972	50791
28.3.2011	7.3.	0,0989	0,0801	45925	53661
24.3.2011	3.3.	0,1079	0,0929	49306	54165

Tabelle A2 Pressspan-Proben, Messwerte der Feuchtigkeit nach der Messung (vom Rand der Pressspan-Proben)

Probe	Entnahme im Randbereich			
	Gewicht in g	Gewicht trocken in g	Feuchtigkeit in ppm	berechnete Feuchtigkeit in ppm
3,2	0,1084	0,0884	1676	2051
3,2WH	0,1093	0,0919	1804	2141
2,2	0,1162	0,0911	1798	2288
1,2	0,0936	0,0743	1831	2301
3,1	0,1633	0,1371	14990	17541
1,1	0,0921	0,0785	15366	17709
2,1 WH	0,1140	0,0978	17310	19778
5,3	0,1271	0,1008	16067	19857
2,1	0,1290	0,1066	16812	19939
4,1	0,2211	0,1814	16758	20017
9,1	0,0838	0,0672	17135	20921
2,3	0,1482	0,1186	25043	30344
8,2	0,1610	0,1327	29766	34855
1,3	0,1241	0,0984	30271	36773
4,3	0,1195	0,0947	30682	37274
6,3	0,1276	0,1043	34118	40067
7,3	0,1524	0,1232	46250	54116
3,3	0,1635	0,1310	47070	55488
8,3	0,2081	0,1639	47803	57221

Tabelle A3 Pressspan-Proben, Messwerte der Feuchtigkeit nach der Messung (von der Mitte der Pressspan-Proben)

Probe	Entnahme in Probenmitte			
	Gewicht in g	Gewicht trocken in g	Feuchtigkeit in ppm	berechnete Feuchtigkeit in ppm
2,2	0,1378	0,1210	1552	1764
1,2	0,1442	0,1246	1844	2130
3,2	0,1356	0,1129	1903	2280
1,1	0,0886	0,0723	11530	13933
5,3	0,2084	0,1617	12425	15762
9,1	0,1577	0,1252	13295	16470
3,1	0,0974	0,0791	14550	17601
2,1	0,0953	0,0829	15625	17645
4,1	0,1258	0,1054	15377	18022
2,3	0,1123	0,0975	22316	25059
1,3	0,1421	0,1161	29852	35249
4,3	0,0934	0,0750	29845	35835
8,2	0,1076	0,0899	31797	36662
6,3	0,1214	0,0975	31030	37199
8,3	0,1193	0,0975	39822	46462
7,3	0,0926	0,0743	45656	53838
3,3	0,1103	0,0875	48299	57390

Tabelle A4 Pressspan-Proben, Messwerte der Feuchtigkeit nach der Messung (von der Mitte der Pressspan-Proben)

Probe	Entnahme in Probenmitte			
	Gewicht in g	Gewicht trocken in g	Feuchtigkeit in ppm	berechnete Feuchtigkeit in ppm
1,2	0,1378	0,1210	1552	1764
2,2	0,1582	0,1414	1673	1868
3,2	0,1258	0,1041	1763	2126
1,1	0,0886	0,0723	11530	13933
5,3	0,2280	0,1536	11530	16828
9,1	0,2059	0,1726	14441	16935
3,1	0,0967	0,0815	14741	17190
4,1	0,1558	0,1300	15494	18230
2,1	0,1027	0,0885	16273	18534
2,3	0,2460	0,1794	19120	25548
1,3	0,0832	0,0662	29816	36119
8,2	0,1099	0,0921	31511	36238
6,3	0,1973	0,1682	32085	36271
4,3	0,1275	0,1032	30730	36577
7,3	0,1322	0,1063	46595	54774
3,3	0,1317	0,1048	47800	56665
8,3	0,1048	0,0855	51386	59253