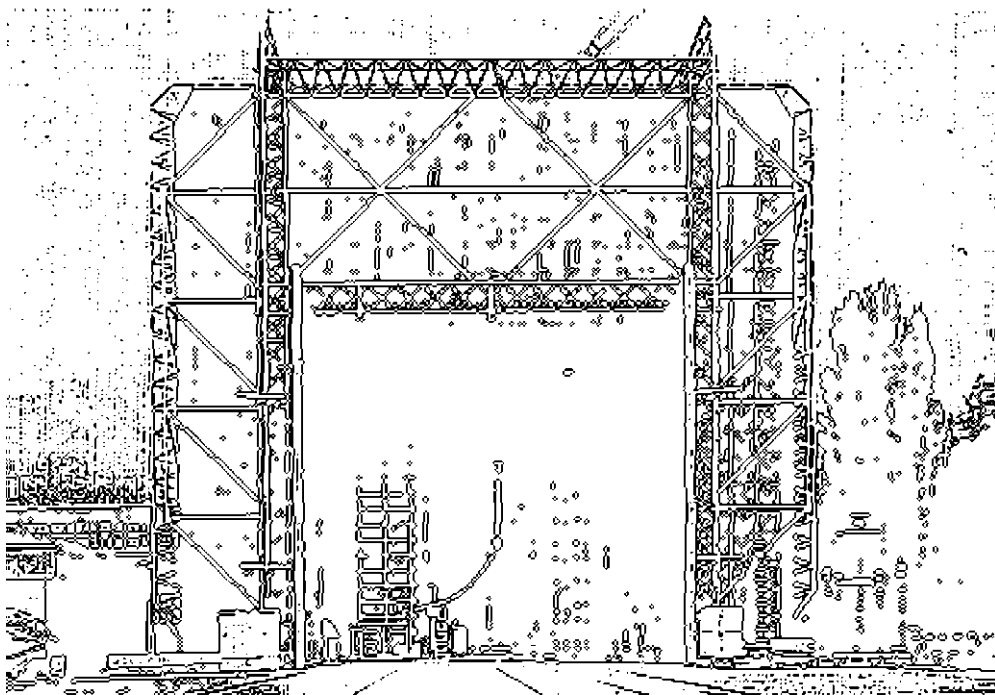


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

MASTERARBEIT

Schantl Mattias
Juni 2014



INSTITUT FÜR
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND SYSTEMMANAGEMENT
UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER

ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN AN ALTERNATIVEN ISOLIERFLÜSSIGKEITEN MIT EINER SPINNING DISC

Masterarbeit

durchgeführt an der



Technischen Universität Graz

am



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Graz, im Juni 2014

Verfasser: **Mattias Schantl, BSc**
Betreuer: Dipl.-Ing. Julia Podesser
Begutachter: Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr. h.c. Michael Muhr

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Helfern bedanken, die mir durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung diese Masterarbeit ermöglichten.

Für die Begutachtung möchte mich bei Herrn Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr. h.c. Muhr bedanken, ohne dessen Hilfe diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Mein Dank gilt Frau Dipl.-Ing. Podesser, die mir diese Diplomarbeit bereitgestellt hat und mich im Rahmen dieser Arbeit durch ihr Fachwissen und ihre Hilfsbereitschaft unterstützte. Für die Unterstützung möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Zlodnjak bedanken.

Weiteres möchte ich mich bei Frau Wieser und Herrn Heine bedanken, die mich im Öl-Labor bei Problemen stets unterstützten. Für die mechanischen Umbauarbeiten und die Hilfe möchte ich mich bei Herrn Schriebl besonders bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir mein Studium ermöglichte und mich bei meinen Entscheidungen unterstützte.

Am Schluss möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich moralisch und mit anregenden Diskussionen durch das Studium begleiteten.

Ich erteile hiermit meiner Betreuerin Dipl.-Ing. Julia Podesser die Erlaubnis die in dieser Masterarbeit erarbeiteten Inhalte und Bilder für ihre Dissertation zu verwenden.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, den 16.Juni 2014

Schantl Mattias

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.

Graz June 16th, 2014

Schantl Mattias

KURZFASSUNG

In der heutigen Zeit sind Leistungstransformatoren für die Energieübertragung unverzichtbar geworden. Diese können durch ihre Bauform unterschieden werden. Entweder sind sie in Trockenbauform (Gießharztransformatoren) ausgeführt oder sie sind mit Isolierflüssigkeit gefüllt. Die Isolierflüssigkeit dient nicht nur gemeinsam mit Zellulose als Isolationssystem, sondern kühlt die Windungen des Transformators. Durch die Umwälzung der Isolierflüssigkeit kann es zu einer elektrostatischen Aufladung zwischen dem festen und flüssigen Isolierstoff kommen. Diese Aufladung kann im ungünstigsten Fall zu einem elektrischen Durchschlag führen. Heutzutage wird versucht das üblicherweise eingesetzte Mineralöl durch neue Isolierflüssigkeiten zu ersetzen. Diese Isolierflüssigkeiten sollten biologisch abbaubar und nachhaltig sein und ähnliche Eigenschaften wie das Mineralöl aufweisen. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt besteht darin, diese alternativen Isolierflüssigkeiten auf ihre Aufladungsneigung hin zu untersuchen. Ziel dieser Masterarbeit war es die elektrostatische Aufladung verschiedener alternativer Isolierflüssigkeiten zu untersuchen und mit jener von Mineralöl zu vergleichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Literaturrecherche zu den bereits durchgeführten Aufladungsuntersuchungen mit alternativen Isolierflüssigkeiten erarbeitet. Weiters wurde der Messaufbau der *spinning disc* verwendet, um die elektrostatische Aufladung bei unterschiedlichen festen und flüssigen Materialien zu untersuchen. Der Schwerpunkt lag dabei auf dem Vergleich des Aufladungsverhaltens alternativer Isolierflüssigkeiten zu jenem von Mineralöl in Kombination mit verschiedenen festen Isolierstoffen. Es wurden die Ableitströme von Mineralöl, natürlichem Ester und synthetischem Ester mit Nomex® und Transformerboard gemessen. Die Messergebnisse wurden hinsichtlich des Einflusses der Ölsorte und der Art des Feststoffes auf die elektrostatische Aufladungsneigung hin analysiert.

Schlüsselworte: spinning disc, elektrostatische Aufladung, ECT, Mineralöl, natürlicher Ester, synthetischer Ester

ABSTRACT

Power transformers are essential today for the transfer of electrical energy. They differ in their design and type according to their intended use. They can be realized as encapsulated-winding dry-type transformers or liquid-filled transformers. In liquid filled transformers the insulating fluid act together with cellulose as insulation system. The fluid is also used to cool the transformer windings. Because of the fluid flow a static electrification between the solid and the liquid insulating materials takes place. This can lead to a breakdown. Nowadays, it is tried to replace the commonly used mineral oil with alternative insulating liquids based on biodegradable and sustainable substances. Current research is focussing on these attempts as well as on investigating the electrostatic charging tendency of different alternative insulating liquids.

For this master thesis a broad literature research was conducted about research activity concerning the electrostatic charging tendency of alternative insulating liquids. Moreover a spinning disc setup was used to measure the electrostatic charging of solid and liquid insulating materials. Focus was given to the charging tendency of alternative insulating liquids in comparison to that of mineral oil in combination with different solid insulating materials. The leakage current of mineral oil, natural and synthetic ester with Nomex® and Transformerboard was measured. The results were analysed relating to the type of insulating liquid and solid concerning electrostatic charging tendency.

Keywords: spinning disc, electrostatic charging tendency, ECT, mineral oil, natural ester, synthetic ester

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	DAS AUFLADUNGSPHÄNOMEN IN LEISTUNGSTRANSFORMATOREN	2
2.1	Problemstellung	2
2.2	Aufladungsprozess	3
2.2.1	Ladungserzeugung: Doppelschicht nach Stern	3
2.2.2	Ladungstransport, -anhäufung, -ableitung.....	4
2.3	Strömungsformen.....	5
2.3.1	Laminare Strömung.....	5
2.3.2	Turbulente Strömung.....	6
2.4	Isolierstoffe im Transformator	8
2.4.1	Transformerboard.....	9
2.4.2	Nomex®	10
2.4.3	Mineralöl	10
2.4.4	Askarele.....	11
2.4.5	Silikonflüssigkeiten	12
2.4.6	Alternative, biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten: Esterflüssigkeiten.....	12
3	PRÜFAUFBAUTEN ZUR BESTIMMUNG DER AUFLADUNGSNEIGUNG VON FLÜSSIG – FESTEN ISOLIERSYSTEMEN	14
3.1	Allgemeines	14
3.2	Prüfaufbauten mit ebener Strömung	14
3.3	Prüfaufbauten mit rotierender Strömung	16
3.3.1	Couette charger – CC	16
3.3.2	Spinning disc charger	16
3.4	Prüfaufbauten unter Anwendung der Filtermethode.....	18
3.4.1	Mini-static charge tester	18
3.5	Prüfaufbauten unter Anwendung der Injektionsmethode.....	18
3.6	Vergleich der Methoden.....	19
4	LITERATURRECHERCHE: AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN MIT ALTERNATIVEN ISOLIERFLÜSSIGKEITEN.....	20
4.1	Allgemeines	20
4.2	Untersuchungen mit ebener Strömung.....	22
4.2.1	Kanalmodellanlage an der Universität Poitiers	22
4.2.2	Strömungsmodellanlage der TU Graz	27
4.3	Untersuchungen nach der Filtermethode	27
4.3.1	Filtermethode an der Universität Denki: Untersuchungen 1	27
4.3.2	Filtermethode an der Universität Denki: Untersuchungen 2	29
4.3.3	Filtermethode an der Universität von Nagoya.....	33
4.3.4	Untersuchungen mittels mini-static charge testers: Untersuchungen 1 von Perrier	38

4.3.5	Untersuchungen mittels mini-static charge testers: Untersuchungen 2 von Perrier	39
4.3.6	Untersuchungen mittels mini-static charge testers an der Universität Poitiers	41
4.3.7	Untersuchungen mittels mini-static charge testers an der Universität von Bangalore	42
4.4	Untersuchungen mit rotierender Strömung	44
4.4.1	Untersuchungen mittels spinning disc an der Universität von Quebec	44
4.5	Weitere Untersuchungsmethoden	49
4.5.1	Untersuchungen an der Universität Inha	49
4.6	Ergebnisse der Literaturrecherche.....	52
5	AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN MIT EINER SPINNING DISC	53
5.1	Prüfaufbau.....	53
5.1.1	Funktionsprinzip.....	53
5.1.2	Detaillierter Aufbau der Prüfzelle	55
5.1.3	Messkreis der spinning disc	57
5.1.4	Steuereinheit der spinning disc.....	58
5.1.5	Umbauarbeiten	58
5.2	Vorversuche	61
5.3	Versuchsvorbereitungen.....	63
5.3.1	Konditionierung der Isolierstoffe	63
5.3.2	Zusammenbau der spinning disc	64
5.4	Versuchsdurchführung	68
5.4.1	Messzyklus	68
5.4.2	Bestimmung der Parameter der Isolierflüssigkeiten.....	68
5.5	Auswertung der Ergebnisse.....	69
6	ERGEBNISSE DER AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN	70
6.1	Ausgewertete Ableitströme.....	70
6.1.1	Ableitstrom für Mineralöl	70
6.1.2	Ableitstrom für synthetischen Ester	71
6.1.3	Ableitstrom für natürlichen Ester	71
6.2	Vergleich der Aufladungsneigung verschiedener Isolierflüssigkeiten.....	72
6.2.1	Einfluss der Isolierflüssigkeit in Kombination mit Nomex® 993 auf die elektrostatische Aufladung.....	72
6.2.2	Einfluss der Isolierflüssigkeit in Kombination mit Transformerboard B 3.1A auf die elektrostatische Aufladung	74
6.2.3	Diskussion	76
6.3	Vergleich der Aufladungsneigung verschiedener fester Isolierstoffe	76
6.3.1	Einfluss verschiedener Feststoffe mit synthetischem Ester.....	76
6.3.2	Einfluss verschiedener Feststoffe mit natürlichem Ester	78
6.3.3	Einfluss verschiedener Feststoffe mit Mineralöl	80
6.3.4	Diskussion	82

7	RESÜMEE	83
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	84
9	LITERATURVERZEICHNIS	86
	ANHANG	90
	Anhang A Parameter der untersuchten Isolierflüssigkeiten	i
	Anhang B Temperatur bei Versuchsreihen	vii

1 EINLEITUNG

Als die Erfinder des Transformators gelten 1885 Károly Zipernowsky, Miksa Déri und Ottó Titusz Bláthy. Damals wurde er jedoch als „Sekundär-Generator“ bezeichnet. Zugeordnet wird der Transformator zu den elektrischen Maschinen. Um 1890 wurden von Michail Dolivo-Dobrowolski die ersten dreiphasigen Transformatoren entwickelt. Der Transformator wurde ein Jahr später zur Energieübertragung für eine Strecke von 175 km zwischen Lauffen am Neckar und Frankfurt am Main genutzt. Leistungstransformatoren können entweder in Trockenbauform oder mit Isolierflüssigkeit gefüllt ausgeführt werden [Tra14]. Die Isolierflüssigkeit übernimmt dabei zwei Aufgaben, einerseits wird sie zur Kühlung der Windungen eingesetzt und andererseits dient sie als Isoliermaterial. Um die Wärme von den Windungen abzutransportieren, wird die Isolierflüssigkeit durch den Transformator gepumpt und in einen Wärmetauscher geführt. Durch die Zirkulation kam es bei einigen Leistungstransformatoren zu ungewollten Fehlern. Diese Fehler wurden durch die elektrostatische Aufladung zwischen festen und flüssigen Isolierstoffen im Transformator verursacht.

Diese Masterarbeit befasst sich mit der elektrostatischen Aufladung bei unterschiedlichen festen und flüssigen Materialien. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Vergleich des Aufladungsverhaltens alternativer Isolierflüssigkeiten zu jenem von Mineralöl in Kombination mit verschiedenen festen Isolierstoffen. Neben einer Literaturrecherche wurden im Rahmen dieser Arbeit auch praktische Untersuchungen durchgeführt. Dafür wurde der Messaufbau der *spinning disc* von Dipl.-Ing. Andreas Zlodnjak verwendet, siehe [Zlo12]. Diese Untersuchungen wurden nach den Aufladungsmessungen mit der Strömungsmodellanlage der TU Graz durchgeführt, die im Rahmen eines Projektes und der Dissertation von Dipl.-Ing. Julia Podesser stattfanden. Die Ergebnisse der Messungen mit der *spinning disc* werden als Vergleichswerte für die Untersuchungen mit der Strömungsmodellanlage verwendet, bei denen die gleichen Materialien untersucht wurden. In dieser Arbeit wird nicht auf die unterschiedliche Rauigkeit der beiden untersuchten Feststoffmaterialien eingegangen.

Am Anfang dieser Arbeit wird auf das Aufladungsphänomen in Leistungstransformatoren eingegangen. In diesem Kapitel wird der Aufladungsprozess genauer beschrieben. Danach werden die unterschiedlichen Prüfaufbauten zur Bestimmung der Aufladungsneigung dargestellt. Es wurde eine Literaturrecherche über die elektrostatischen Aufladungsuntersuchungen von alternativen Isolierstoffen durchgeführt. Diese Literaturrecherche wurde bis zum September 2013 auf den aktuellen Stand gebracht. Am Schluss werden der verwendete Messaufbau, die praktischen Untersuchungen und die Messergebnisse genau beschrieben.

2 DAS AUFLADUNGSPHÄNOMEN IN LEISTUNGSTRANSFORMATOREN

In diesem Kapitel wird auf den elektrostatischen Aufladungsprozess eingegangen, der in Leistungstransformatoren auftreten kann. Dieser findet zwischen festen und flüssigen Isolierstoffen statt und kann mit der Doppelschicht nach Stern beschrieben werden. Um ein Verständnis zu erhalten, wie sich die Fluide im Transformator durch die Umwälzung verhalten, werden die Strömungsformen in diesem Kapitel beschrieben. Am Schluss werden die in Transformatoren verwendeten Isolierstoffe erklärt, wie Transformerboard, Nomex®, Mineralöl und alternative Isolierflüssigkeiten.

2.1 PROBLEMSTELLUNG

Es wurden zahlreiche Fehler in zwangsumlaufgekühlten Hochspannungstransformatoren verzeichnet, deren Ursache in der elektrostatischen Aufladung zwischen festen und flüssigen Isolierstoffen liegt. Die Isolierflüssigkeit in den Hochspannungstransformatoren dient nicht nur zur elektrischen Isolation, sondern wird zur Kühlung verwendet, um die Transformatoren in einem höheren Leistungsniveau sicher zu betreiben. In der **Abbildung 2-1** ist schematisch dargestellt, wie die Isolierflüssigkeit im Transformator zirkuliert und somit die Kühlung bewirkt. Die Isolierflüssigkeit wird durch die Wicklungsstruktur (Kupferleiter, Feststoffisolation) geführt, nimmt die Wärme auf und transportiert sie zum Wärmetauscher, wo die Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Durch die relative Bewegung zwischen dem flüssigen und dem festen Isolierstoff kommt es zur elektrostatischen Aufladung, die zur Entladung führen kann. Der sichere Betrieb eines Transformators ist bei Auftreten elektrischer Entladungen nicht gewährleistet. Deren Folgen sind Zusammenbrüche in der Verteilung elektrischer Energie, sowie die finanziellen Schäden für das Verteilungsunternehmen. Untersuchungen haben gezeigt, dass es auch in spannungslosen Transformatoren zu Entladungen kommt. Das zeigt, dass einige Entladungen in den Transformatoren nicht durch die angelegte Spannung verursacht werden [EPR95:10].

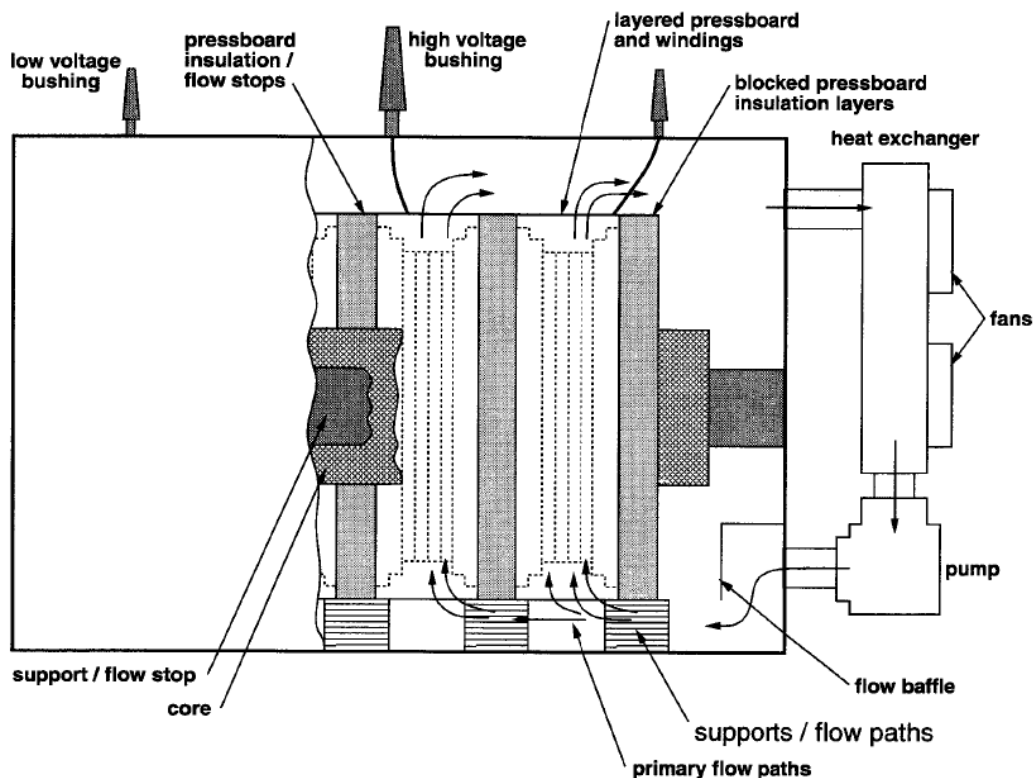


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Ölflusses in Hochleistungstransformatoren [EPR95:11]

2.2 AUFLADUNGSPROZESS

In diesem Kapitel wird auf den Aufladungsprozess im Transformator eingegangen. Dieser entsteht an der Kontaktfläche zwischen festen und flüssigen Materialien. Wichtig für die Elektrifizierung sind vier Schritte:

- Ladungserzeugung
- Ladungstransport
- Ladungsanhäufung
- Ladungsableitung

Diese vier Schritte werden im Folgenden beschrieben [EPR95:7].

2.2.1 Ladungserzeugung: Doppelschicht nach Stern

Falls nicht anders vermerkt, wurden die Informationen in diesem Kapitel von [Lem96:8-10] und [Ele13] entnommen. Durch einen physikalisch-chemischen Prozess kommt es zur Bildung einer Doppelschicht an der Grenzfläche zwischen einem flüssigen und festen Isolierstoff. Für die Erklärung dieses Prozesse gibt es verschiedene Modelle, die noch immer untersucht werden, siehe [EIA10]. Die Doppelschicht nach Stern ist am weitesten verbreitet für die Beschreibung der Aufladungsphänomene in Transformatoren. Diese wird wie folgt beschrieben:

Die Doppelschicht besteht aus Ladungen einer Polarität im Feststoff und Ladungen der entgegengesetzten Polarität in der Flüssigkeit, siehe **Abbildung 2-2 a.)** [EIA10:1593]. In der Flüssigkeit können zwei Bereiche der Ladungsverteilung unterschieden werden. Diese sind die starre und die diffuse Schicht. In der starren Schicht (Helmholtz-Schicht) haften die Ionen an der Grenzfläche zum Feststoff. Diese können nicht durch eine Flüssigkeitsströmung entfernt werden. Der Durchmesser der angesammelten Ionen gibt die Dichte der starren Schicht vor. Bei der diffusen Schicht (Gouy-Chapman-Schicht) können sich die Ladungen frei bewegen. Die Überschussladungsdichte kann mit der **Formel F. 2-1** beschrieben werden, siehe auch **Abbildung 2-2 b.)**.

$$\rho_{\ddot{u}} = \rho_S * e^{-\frac{x}{\delta}} \tag{F. 2-1}$$

$\rho_{\ddot{u}}$	Überschussladungsdichte in $\frac{As}{m^{-3}}$	ρ_S	hypothetische Überschussladungsdichte an der Grenzfläche (ohne starre Schicht) in $\frac{As}{m^{-3}}$
δ	Debye-Länge (Doppelschichtdicke) in m	x	Länge in m

Die Debye-Länge δ ist ein Maß dafür wie weit die Ladungstrennung in die Flüssigkeit reicht. Sie ist abhängig von der Diffusionskonstante und der Relaxationszeitkonstante der Flüssigkeit.

$$\delta = \sqrt{D * \tau} \tag{F. 2-2}$$

D	Diffusionskonstante in $\frac{m^2}{s}$	τ	Relaxationszeitkonstante in s
-----	--	--------	---------------------------------

Die Relaxationszeitkonstante τ kann mit der **Formel F. 2-3** berechnet werden.

$$\tau = \frac{\epsilon}{\kappa} \tag{F. 2-3}$$

ϵ	Dielektrizitätszahl der Flüssigkeit ($\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r$, ϵ_r liegt bei technischen Isolierstoffen bei 1...10) in $\frac{As}{Vm}$	κ	elektrische Leitfähigkeit der Flüssigkeit liegt im Bereich von $10^{-8} \dots 10^{-15} \frac{S}{m}$
------------	---	----------	---

Diese Zeitkonstante gibt an, in welcher Zeit die Überschussladungsdichte den Wert $\frac{\rho_{\ddot{u}}}{e}$ erreicht.

Die Diffusionskonstante D kann mit der Nerst-Einstein-Relation bestimmt werden.

$$D = \frac{\mu * k * T}{e * z}$$

F. 2-4

- | | |
|--|---|
| <p>μ Ionenbeweglichkeit in $\frac{m^2}{sV}$; ist abhängig von der Zähigkeit der Flüssigkeit, der Größe und Valenz der Ionen</p> <p>k Boltzmann-Konstante in $\frac{J}{K}$</p> <p>z Ionenwertigkeit; liegt bei Kohlenwasserstoffen im Bereich von eins</p> | <p>T absolute Temperatur in K</p> <p>e Elementarladung in C</p> |
|--|---|

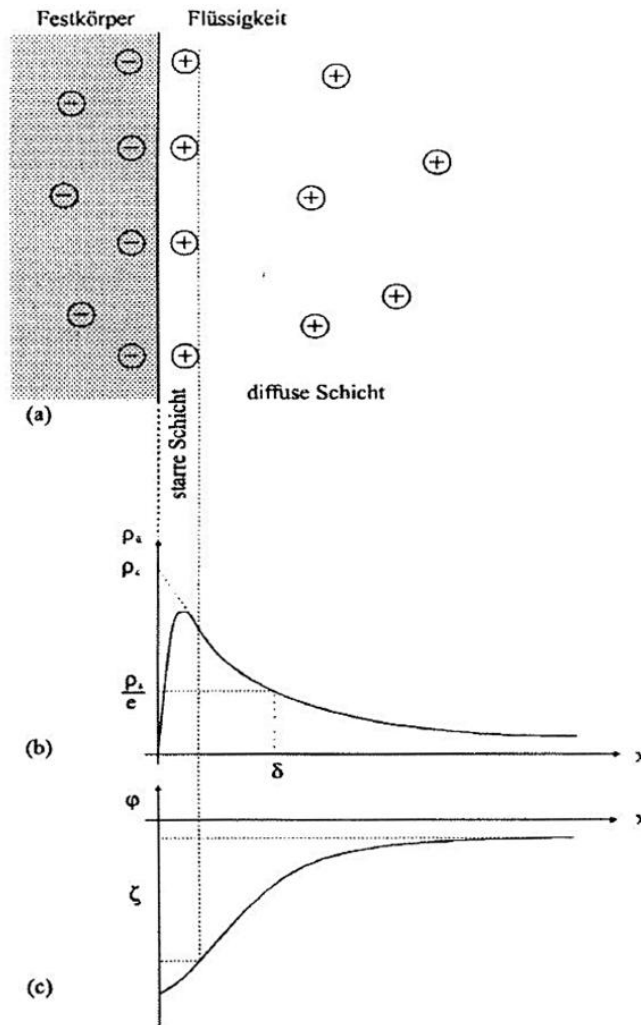


Abbildung 2-2: Doppelschicht nach Stern (a) Schematische Darstellung der Grenzschicht, (b) Verteilung der Überschussladungen, (c) Potentialverlauf [Lem96:9]

Als elektrochemisches Potential oder Zeta-Potential wird die Potentialdifferenz ζ bezeichnet siehe **Abbildung 2-2 c.**). Sie wird als Maß herangezogen, um die Dichte der bewegbaren Überschussladungsträger zu beschreiben.

2.2.2 Ladungstransport, -anhäufung, -ableitung

Entlang einer Pressboardoberfläche wird durch den Ölfluss eine Ladungstrennung bewirkt. Dies führt zu einer Aufladung der Oberfläche, während sich die entgegengesetzten Ladungen in der Flüssigkeit ansammeln. Das elektrische Potenzial vom Pressboard kann so hohe Werte erreichen, dass es zu elektrostatischen Entladungen und elektrischen Beeinflussungen der Flüssigkeit kommt [Zell1:1]. Das elektrische Potenzial vom Pressboard wird durch den Ableitwiderstand begrenzt, wenn es zu keiner elektrostatischen Entladung kommt [EIA10:1593].

2.3 STRÖMUNGSFORMEN

Da die Strömungsform einen hohen Einfluss auf die Aufladung besitzt, werden in diesem Kapitel einige Grundlagen der Strömungslehre dargestellt.

Die Strömungslehre befasst sich mit dem Verhalten von Fluiden, die unter Einfluss von Scherkräften verformt werden. Bei flüssigen Körpern gehen die notwendigen Scherkräfte für die Verformung gegen Null, wenn die Verformungsgeschwindigkeit gegen Null geht. Diese Eigenschaft dient als Definition von Fluiden und wird verursacht durch ihre Zähigkeit (Viskosität). Im Gegensatz dazu gehen bei den festen Körpern die zu einer bestimmten Verformung notwendigen Kräfte gegen Null, wenn die Verformung gegen Null geht [Spu06:1].

Der Physiker Osborn Reynolds charakterisierte mit Hilfe eines Farbfadenversuches die unterschiedlichen Strömungsformen und beschrieb diese mit der dimensionslosen Reynolds-Zahl Re [Bre132:136].

$$Re = \frac{v * d}{\nu} = \frac{\rho * v * d}{\eta} \quad F. 2-5$$

Re	Reynolds-Zahl zur Bewertung der Strömungsart	d	Rohrdurchmesser in m
v	mittlere Strömungsgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$	ν	kinematische Viskosität der Flüssigkeit in $\frac{m^2}{s}$
ρ	Dichte der Flüssigkeit in $\frac{kg}{m^3}$	η	dynamische Viskosität in $\frac{kg}{s * m}$

Es gibt zwei Strömungsformen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird:

- Laminare Strömung
- Turbulente Strömung

2.3.1 Laminare Strömung

Die laminare Strömung ist eine Schichtströmung, in der keine regellosen Querbewegungen auftreten. Die Teilchen bewegen sich in parallelen Bahnen, siehe **Abbildung 2-3**. Das obere Teilchen kollidiert nicht mit dem Teilchen in der unteren Schicht [Bre132:113].

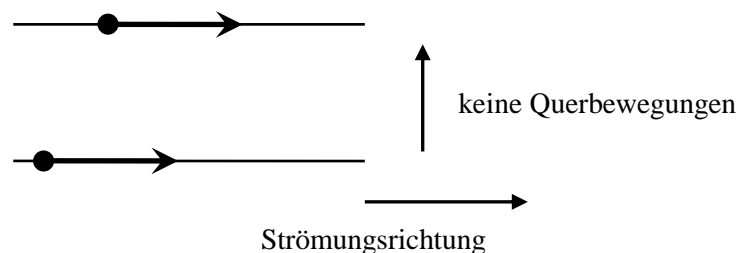


Abbildung 2-3: Laminare Strömung [Bre132:113]

In **Abbildung 2-4** wird das Geschwindigkeitsprofil bei laminarer Strömung in einer Rohrleitung dargestellt. Die Rauigkeit der Rohrleitung kann den Übergang von laminar zu turbulent beeinflussen. Es gilt für die Rohrreibungszahl $\lambda = \frac{64}{Re}$ [Gro11:B50].

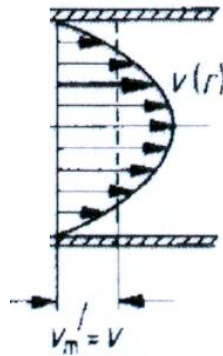


Abbildung 2-4: Geschwindigkeitsprofil laminarer Rohrströmung [Gro11:B48]

Für laminare Strömungsverhältnisse in einem Rohr oder Kanal gilt für die Reynolds-Zahl $Re < 2320$ [Gro11:B50]. Wie aus der Gleichung **F. 2-5** zur Bestimmung der Reynolds-Zahl Re hervorgeht, nimmt der Wert mit kleiner werdendem Rohrdurchmesser ab. Das zeigt, dass keine turbulenten Strömungen in dünnen Röhren, Kapillaren oder Filterporen auftreten. Um dennoch turbulente Strömungen bei einer Porengröße von $20 \mu\text{m}$ zu erhalten, müsste die mittlere Strömungsgeschwindigkeit bei einem Isolieröl mit der Viskosität von $\nu \approx 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf mehr als $2300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erhöht werden. Deshalb werden bei solchen Verhältnissen für die Bewertung der elektrostatischen Aufladung nur laminare Strömungsbedingungen herangezogen [Lem96:23].

2.3.2 Turbulente Strömung

Die turbulente Strömung ist durch Geschwindigkeitsschwankungen und Druckveränderungen gekennzeichnet. Leonardo da Vinci skizzierte die Wirbelstruktur von turbulenten Wasserströmungen und das Auftreten von Turbulenzballen. Erst 1883 wurde von Osborn Reynolds die laminare und turbulente Strömung mittels Farbfadenversuch nachgewiesen, siehe **Abbildung 2-5** [Bre132:136].

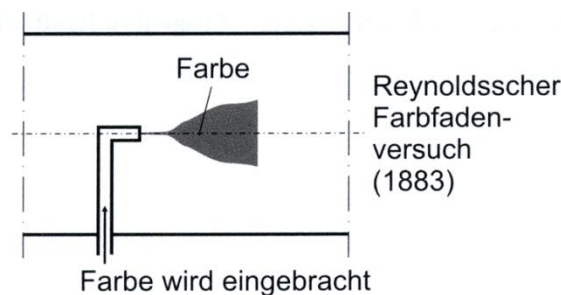


Abbildung 2-5: Reynoldsscher Farbfadenversuch [Bre132:136]

Zur Darstellung der laminaren Strömung, wird beim Reynoldsschen Farbfadenversuch der Hahn, der die Wassergeschwindigkeit im Rohr verändert soweit geöffnet, bis sich eine langsame laminare Strömung einstellt. Über ein zweites Ventil wird die Farbe ins Wasser gelassen. Solange laminare Strömung vorherrscht, stellt sich ein gleichmäßiger gerader Farbfaden ein, siehe **Abbildung 2-6**.

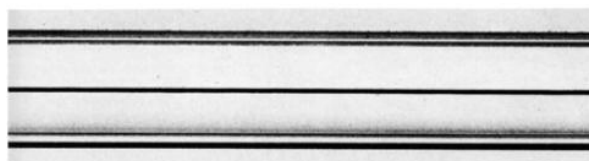


Abbildung 2-6: Reynoldsscher Farbfadenversuch zur Darstellung laminarer Strömung [Uni13:249]

Bei Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit stellt sich eine turbulente Strömung ein. Bei dieser Strömung bleibt der Farbfaden nicht erhalten und beginnt sich im Rohr zu verteilen, siehe **Abbildung 2-7** [Uni13:249].

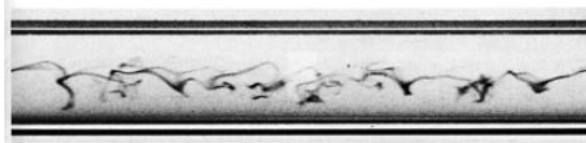


Abbildung 2-7: Reynoldscher Farbfadenversuch zur Darstellung turbulenter Strömung [Uni13:249]

Der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung wird bei einer Reynolds-Zahl von $Re > 2320$ erreicht [Gro11:B50]. In **Abbildung 2-8** ist der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung dargestellt.

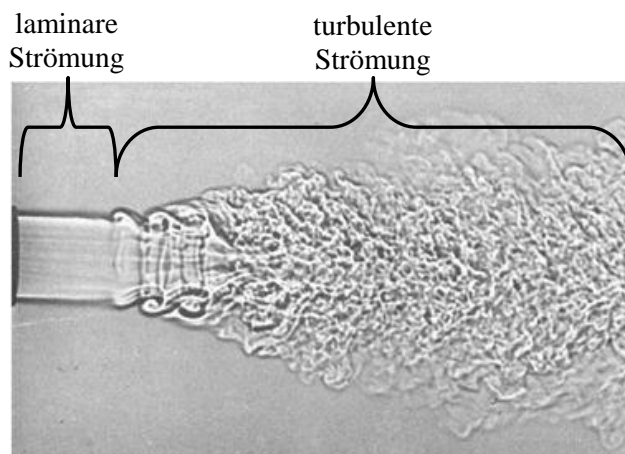


Abbildung 2-8: Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung [Zar13]

In **Abbildung 2-9** ist das Geschwindigkeitsprofil für eine turbulente Rohrströmung abgebildet. Im Vergleich zur laminaren Rohrströmung ist das Geschwindigkeitsprofil wesentlich flacher [Gro11:B50].

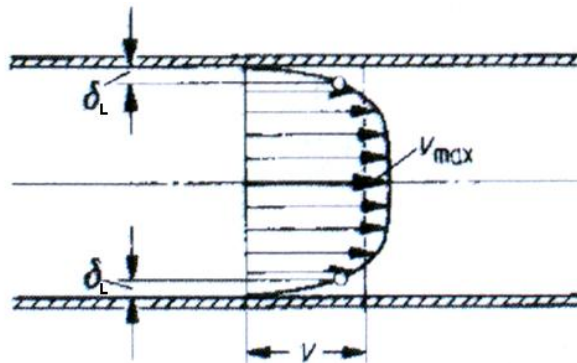


Abbildung 2-9: Geschwindigkeitsprofil turbulenter Rohrströmung [Gro11:B48]

Für weitere Informationen wird auf die einschlägige Fachliteratur [Gro11] und [Lem96] verwiesen.

Laminare Unterschicht δ_L

Die laminare Unterschicht entsteht bei turbulenter Rohrströmung an der Wand des Rohres, siehe δ_L in **Abbildung 2-9**. Wenn die Dicke der laminaren Unterschicht δ_L viel größer als die Debye-Länge δ_D (Doppelschichtdicke) ist ($\delta_L \gg \delta_D$), dann befinden sich nahezu alle Überschussladungen in der laminaren Unterschicht, siehe **Abbildung 2-10**. Die Überschussladungen werden praktisch nicht von der Querkomponente der turbulenten Strömung beeinflusst, wodurch der Aufladestrom (bewegte Ionen im Flüssigkeitsstrom) überwiegend im laminaren Strömungsbereich entsteht. Die Debye-Länge δ_D beträgt bei Isolierölen einige μm bis hin zu einigen $10 \mu\text{m}$. In größeren Rohren liegt die laminare Unterschicht δ_L im Bereich von

einigen mm. Das bedeutet, dass bei turbulentströmenden Isolierflüssigkeiten immer $\delta_L > \delta_D$ angenommen werden kann. Die höheren Aufladeströme sind trotzdem bei turbulenter Strömung zu erwarten, da sie eine höhere mittlere relevante Strömungsgeschwindigkeit (...“Geschwindigkeit, mit der Überschussladungen im Mittel in axialer Richtung transportiert werden.“ [Lem96:13]) besitzt [Lem96:15-17].

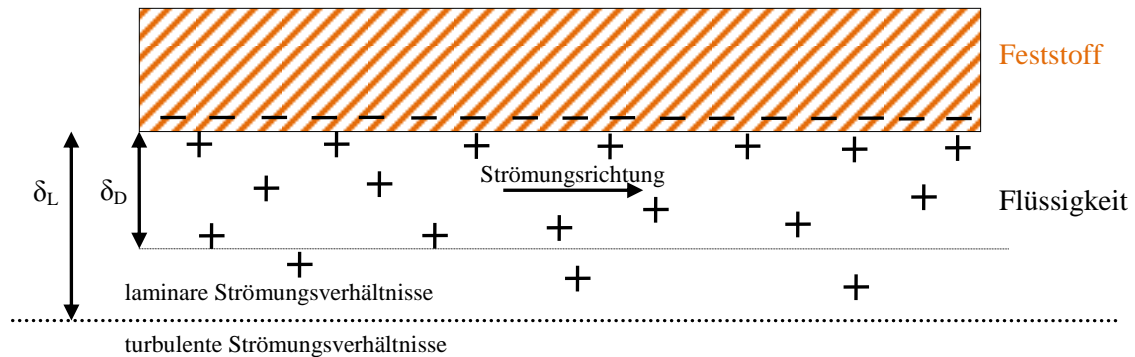


Abbildung 2-10: Laminare Unterschicht δ_L ist viel größer als die Debye-Länge δ_D ($\delta_L \gg \delta_D$)

Wenn die Dicke der laminaren Unterschicht δ_L viel kleiner als die Debye-Länge δ_D ist ($\delta_L \ll \delta_D$), dann befinden sich die Überschussladungen auch im turbulenten Strömungsbereich, siehe **Abbildung 2-11**. Die Überschussladungen im turbulenten Strömungsbereich werden durch die radiale Geschwindigkeitskomponente zur Rohrmitte transportiert. Der Aufladestrom steigt an. Dass die laminare Unterschicht δ_L viel kleiner als die Debye-Länge δ_D ist, kann bei Ein- und Ausströmvorgängen in Rohren, bei Oberflächenrauigkeiten an der Rohrinneenseite oder nicht ausgebildeten Strömungsverhältnissen auftreten [Lem96:17-18].

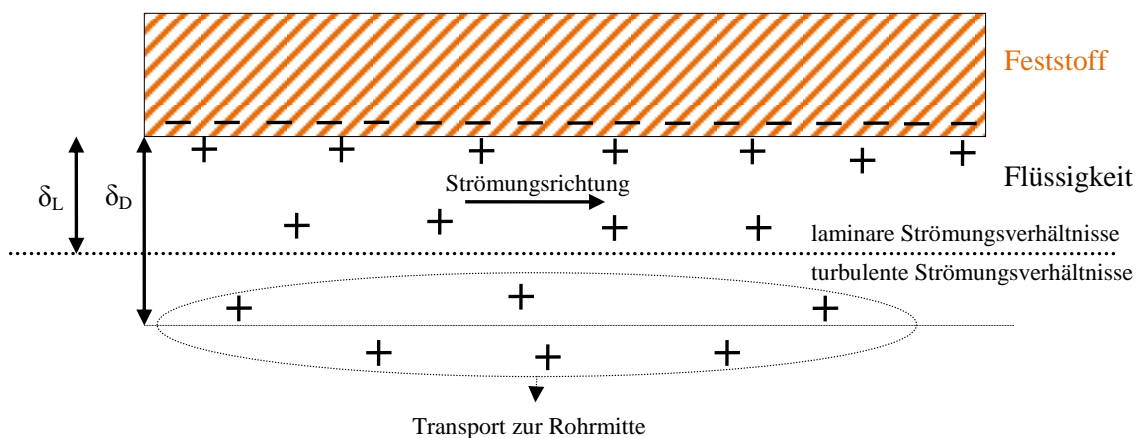


Abbildung 2-11: Laminare Unterschicht δ_L ist viel kleiner als die Debye-Länge δ_D ($\delta_L \ll \delta_D$)

2.4 ISOLIERSTOFFE IM TRANSFORMATOR

Transformatoren sind ein wichtiges Element in der Energieübertragung und in der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Um die Energieversorgung aufrecht zu erhalten müssen diese Elemente einwandfrei funktionieren. Um dies zu ermöglichen müssen bei der Fertigung Materialien verwendet werden, die dies auch gewährleisten. In diesem Kapitel wird auf die wichtigsten festen und flüssigen Isolierstoffe eingegangen, die in Transformatoren zu finden sind.

2.4.1 Transformerboard

Eines der in Transformatoren eingesetzten festen Isoliermaterialien ist Papier bzw. Transformerboard. Diese wird aus ungebleichter Sulfatzellulose hergestellt. Zellstoffe, die aus den Nadelhölzern von Skandinavien und Kanada gewonnen werden, sind besonders gut geeignet für Transformerboard, das im Betrieb hohen mechanischen Beanspruchungen standhalten muss. In **Abbildung 2-12** ist die Herstellung von Transformerboard dargestellt. Sulfatzellstoff wird in Wasser aufgelöst und in Büetten (großes Gefäß von runder oder ovaler Form) zwischengelagert. Beim Entstippen wird das Material in Einzelfasern zerlegt. Anschließend erfolgt eine Mahlung in Kegelmühlen, die die Bindekräfte zwischen den Fasern beeinflusst und dadurch die Festigkeit des Papierses bzw. Transformerboards bestimmt. In **Abbildung 2-13** sind die Zellulose-Fasern nach der Verarbeitung in den Kegelmühlen dargestellt. Danach werden die aufgeschlossenen Fasern in Mischbüetten mit Wasser verdünnt und danach gereinigt. Das Zellulose-Wassergemisch wird einem Siebzylinder zugeführt. Das Wasser wird abgeführt und die Zellulose-Fasern bilden eine Schicht Papier auf der Sieboberfläche. In diesem Beispiel werden drei Lagen des Papierses zur Formwalze transportiert. Je dünner die einzelnen Lagen sind und je höher ihre Anzahl ist, desto hochwertiger ist das Papier. Transformerboard besteht aus 35 Lagen zu 30 µ Dicke pro Millimeter [Mos79:21-25].

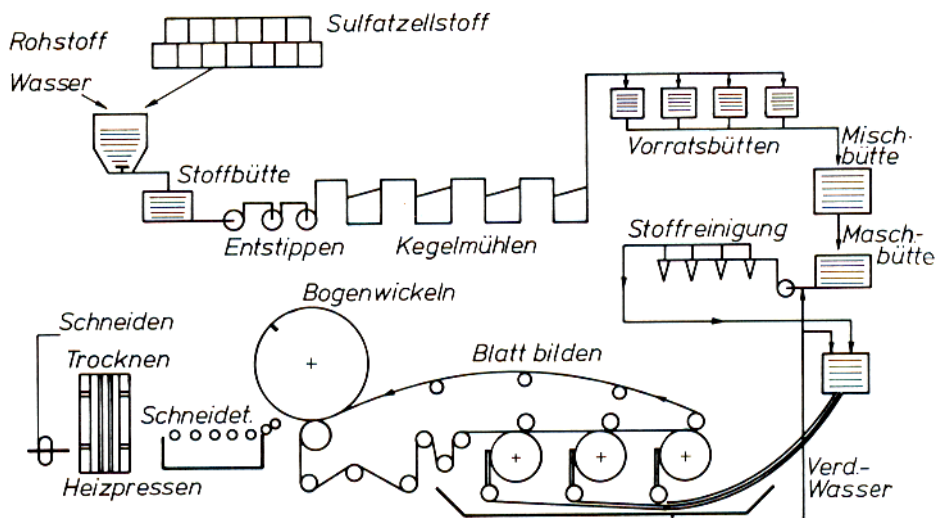


Abbildung 2-12: Herstellungsschema von Transformerboard [Mos79:23]



Abbildung 2-13: Zellulose-Fasern nach der Verarbeitung in den Kegelmühlen [Mos79:24]

Eine wichtige Eigenschaft des Transformerboards ist die niedrige Dielektrizitätskonstante. Außerdem bietet es den Vorteil, dass es leicht zu trocknen und zu imprägnieren ist. Die Herstellungskosten sind gering und es besitzt gute mechanische Eigenschaften. Es wird mit verschiedenen Dichten hergestellt [Mos79:18].

In **Abbildung 2-14** ist ein Transformerboard vom Typ B 3.1A abgebildet. Man erkennt bei dieser Type die Siebstruktur.

2.4.2 Nomex®

Nomex® ist ein synthetisches aromatisches Polyamidpolymer und zeichnet sich durch seine stabile Molekülstruktur aus. Dadurch besitzt es hervorragende dielektrische, thermische, chemische und mechanische Eigenschaften. Diese sind:

- Schwer entflammbar
- Selbst verlöschend
- Nicht schmelzend
- Hohe Durchschlagfestigkeit
- Gute Materialbeständigkeit bei niedrigen Temperaturen
- Gute Beständigkeit gegen Säuren und Laugen
- Kompatibel mit allen Arten von Lacken, Klebern, Transformatorflüssigkeiten, Schmierölen und Kühlmitteln
- Hohe mechanische Stabilität
 - Zugfestigkeit
 - Steifigkeit
 - Einreiß- und Weiterreißfestigkeit
 - Biegestabilität

Nomex® wird in Form von Papier und Pressboard in Transformatoren, Motoren, Generatoren und sonstigen elektrischen Geräten angewandt. Hergestellt wird das Nomex®-Papier aus zwei Formen des Aramid-Polymers, Bindepartikel, die aus Fibrillen bestehen, und Flocken, die aus der Papierherstellung geliefert werden [Mül13].

In **Abbildung 2-15** ist Nomex® 994 abgebildet.



Abbildung 2-14: Transformerboard B 3.1A



Abbildung 2-15: Nomex® 994

2.4.3 Mineralöl

Mineralöl ist die am meisten verwendete Isolierflüssigkeit in Transformatoren, da es ausgezeichnete elektrische und dielektrische Eigenschaften sowie eine gute Wärmeübertragungsfähigkeit besitzt. Es setzt sich vor allem aus Kohlenstoff und Wasserstoff in unterschiedlichen Molekularstrukturen zusammen. Hergestellt wird das Transformatoröl aus Erdöl. Je nach Förderstätte variiert der chemische Aufbau der Ausgangssubstanz. In **Abbildung 2-16** ist die typische Zusammensetzung des Rohöls dargestellt [Puk08:4-5].

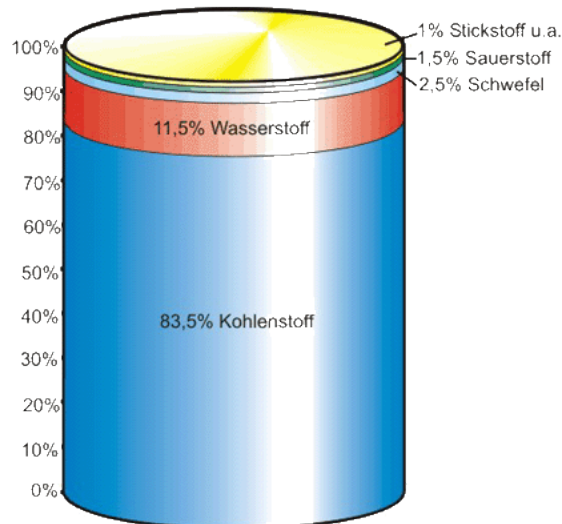


Abbildung 2-16: Zusammensetzung eines typischen Rohöls [Che13]

Aus dem Rohöl werden durch diverse Separationsmethoden Erdölgas, Wasser, Sand und Salze entfernt. Aus diesem Ausgangsmaterial werden durch Destillation bei Normaldruck Benzin, Petroleum, Dieselkraftstoff und leichtes Spindelöl gewonnen [Puk08:4-5].

Das leichte Spindelöl ist der Ausgangsstoff für die Erzeugung von Isolieröl. Der Siedepunkt, Flammpunkt und die Viskosität können bei der Destillation eingestellt werden. Weitere Möglichkeiten das Öl zu optimieren sind [Puk08:4-5]:

- Schwefelsäureraffination
- Bleicherdebehandlung
- Entparaffinierung
- Hydrierung
- Lösungsmittelextraktion
- Beifügung von Metallpassivatoren und Oxidationsinhibitoren

Additive

Additive sind Zusatzstoffe, die Isolierölen beigegeben werden. Durch den Zusatz werden bestimmte Eigenschaften vom Isolieröl verbessert. Um beispielsweise den Alterungsprozess zu verzögern, können synthetische Zusätze, wie phenolische oder aminische Verbindungen verwendet werden. Diese dienen als Oxidationsinhibitoren und blockieren reaktionsfähige Radikale. Eine katalytische Ölalterung wird durch Metalle hervorgerufen. Durch den Zusatz von Metallpassivatoren kann diese gehemmt werden. Um die Fließfähigkeit vom Öl bei geringerer Temperatur zu verbessern, werden Stockpunktserniedriger bzw. Pourpoint-Verbesserer beigegeben. Diese vermindern das Ausflocken und Zusammenwachsen von den Paraffinkristallen. Die elektrostatische Aufladung von Isolierölen kann durch Beimengung von Benzotriazolen (BTA) vermindert werden [Puk08:7].

2.4.4 Askarele

Askarele zeichnen sich im Gegensatz zu Mineralöl durch ihren höheren Flammpunkt aus. Sie sind Gemische von polychlorierten Biphenylen (PCBs) oder Gemische von PCBs mit polychloriertem Benzol [Ask13]. Die allgemeine chemische Summenformel ist $C_{12}H_{10-n}Cl_n$. Askarele sind meist farblos oder sie können gelblich gefärbt sein. Die Viskosität kann durch den Chlorgehalt variiert werden.

Weitere Eigenschaften:

- Siedepunkt zwischen 270 °C und 425 °C
- Hohe thermische Stabilität

- Hohe chemische Stabilität
- Hoher spezifischer Widerstand

Eingesetzt wurde dieser Isolierstoff in Kondensatoren und in Transformatoren als Kühl- und Isoliermittel. Andere Einsatzmöglichkeiten wären als Weichmacher, in Dichtungsmassen, Klebemitteln, Anstrichstoffen und als Hydrauliköl in Hebevorrichtung im Untertagebergbau. Ein Nachteil von PCB sind die schweren Schäden, die sie Organismen zuführen können. Ihr Toxizitätsgrad richtet sich nach dem Chlorierungsgrad. Forschungen haben gezeigt, dass diese Verbindungen krebserregend sind. Seit 1993 wurde die Verwendung von PCB in Österreich nicht mehr erlaubt [Puk08:7-8].

2.4.5 Silikonflüssigkeiten

Ein alternatives Isolieröl zu den Askarelen sind spezielle Silikonflüssigkeiten wie beispielsweise das Polydimethylsiloxan. Besondere Vorzüge des Isolieröles gegenüber Mineralöl sind:

- Hohe Sauerstoffbeständigkeit
- Wärmestabilität
- Hohe chemische Beständigkeit
- Gute physiologische Verträglichkeit
- Bei der Verbrennung entstehen keine toxischen Nebenprodukte
- Thermische Alterung kann bis zu einer Betriebstemperatur von 150 °C vernachlässigt werden
- Hoher Flammpunkt (> 300 °C)
- Hoher Brennpunkt (> 335 °C)

Nachteilig im Vergleich zum Mineralöl ist die geringere Durchschlagfestigkeit. Der Wärmeübertragungskoeffizient ist kleiner, was sich negativ auf den Abtransport der Wärmeverluste auswirkt. Bei der Verwendung von Silikonölen muss berücksichtigt werden, dass sie einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen. Die höheren Anschaffungskosten machen die Silikonöle nicht so lukrativ und durch die Bildung von Faserbrücken ist der Einsatz in Hochspannungstransformatoren problematisch [Puk08:8] [Küc05:292-293].

2.4.6 Alternative, biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten: Esterflüssigkeiten

Ester wird hergestellt durch eine chemische Reaktion von Alkohol mit organischen und anorganischen Säuren. Dies wird Veresterung genannt. Manche Ester zerfallen wieder durch den Einfluss von Wasser in eine Alkohol- und Säurekomponente. Diese Rücktransformation wird als Verseifung bezeichnet. Eingeteilt wird der Ester in natürliche und synthetische. In höherer Konzentration als Mineralöl enthalten Isolierflüssigkeiten aus Ester Oxidationsinhibitoren und Metallpassivatoren.

Synthetischer Ester

In elektrischen Betriebsmitteln werden immer mehr Pentaerythritester eingesetzt. Ihre Vorteile gegenüber Mineralöl sind:

- Hoher Flammpunkt
- Hoher Brennpunkt
- Niedriger Pourpoint
- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Gute dielektrische Eigenschaften
- Gute Schmierfähigkeit

Pentaerythritester zeichnet sich dadurch aus, dass es vollständig biologisch abbaubar und nicht umweltschädigend ist.

Natürlicher Ester

Aus Pflanzen und Tieren werden Fette und Öle gewonnen, die zu dem natürlichen Ester gezählt werden. Je nach Gewinnungsmethode enthalten diese Rohöle Zusatzstoffe, die über Raffination herausgefiltert werden müssen. Diese Naturprodukte sind qualitativ unterschiedlich und nicht alle als Isolierflüssigkeit geeignet. Mittels Gentechnik können Rohöle gewonnen werden, die diese Anforderung erfüllen [Puk08:10-11].

In der **Abbildung 2-17** sind einige ausgewählte Isolierflüssigkeiten abgebildet. Es ist ein eindeutiger Farbunterschied zwischen den Isolierflüssigkeiten erkennbar.

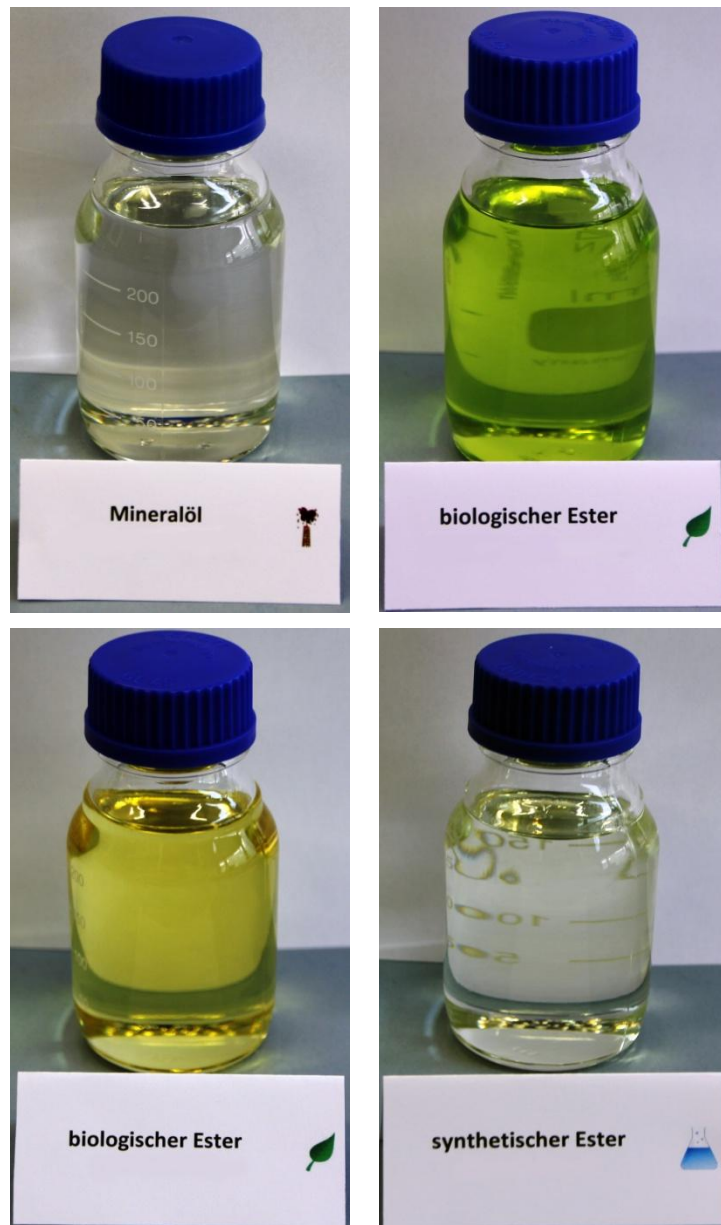


Abbildung 2-17: Farbunterschied von Mineralöl, natürlichem und synthetischem Ester

3 PRÜFAUFBAUTEN ZUR BESTIMMUNG DER AUFLADUNGSNEIGUNG VON FLÜSSIG – FESTEN ISOLIERSYSTEMEN

3.1 ALLGEMEINES

Weltweit wurden unterschiedlichste Methoden entwickelt, um die elektrostatische Aufladungserscheinung von isolierenden Flüssigkeiten zu untersuchen. Dabei werden grundsätzlich zwei Methoden unterschieden.

- *screening of design*

Diese Methoden ermöglichen die Bewertung der ECT (*Electrostatic Charging Tendency*) unter Nachbildung der Verhältnisse im realen Transformator. Die Versuchsanordnungen sind sehr aufwendig, da sie die Wicklungsanordnung und die Strömungsverhältnisse im realen Transformator nachbilden.

- *screening of material*

Diese Methoden ermöglichen die Bewertung der ECT der einzelner Komponenten vom Transformator (Isolierflüssigkeit, Pressboard, Papierisolierung)

Bei dem *screening of material* können vier Gruppen von Prüfanordnungen unterschieden werden.

1. Anordnung mit ebener Strömung: *tube models, large size duct models*
2. Anordnung mit rotierender Strömung: *spinning disc charger, couette charger*
3. Anordnung für Filtermethoden: *mini-static charge tester, recirculating tester*
4. Anordnung für Injektionsmethoden

Bei der ebenen Strömung sind die Strömungsverhältnisse auf den zweidimensionalen Fall beschränkt, da die Geschwindigkeitskomponenten nur von zwei räumlichen Koordinaten abhängen.

In der Anordnung mit rotierender Strömung können die Flüssigkeiten entweder um eine reale oder fiktive Achse rotieren. Diese besitzen meistens eine rotationssymmetrische und ausgeprägte dreidimensionale Strömung [Lem96: 27].

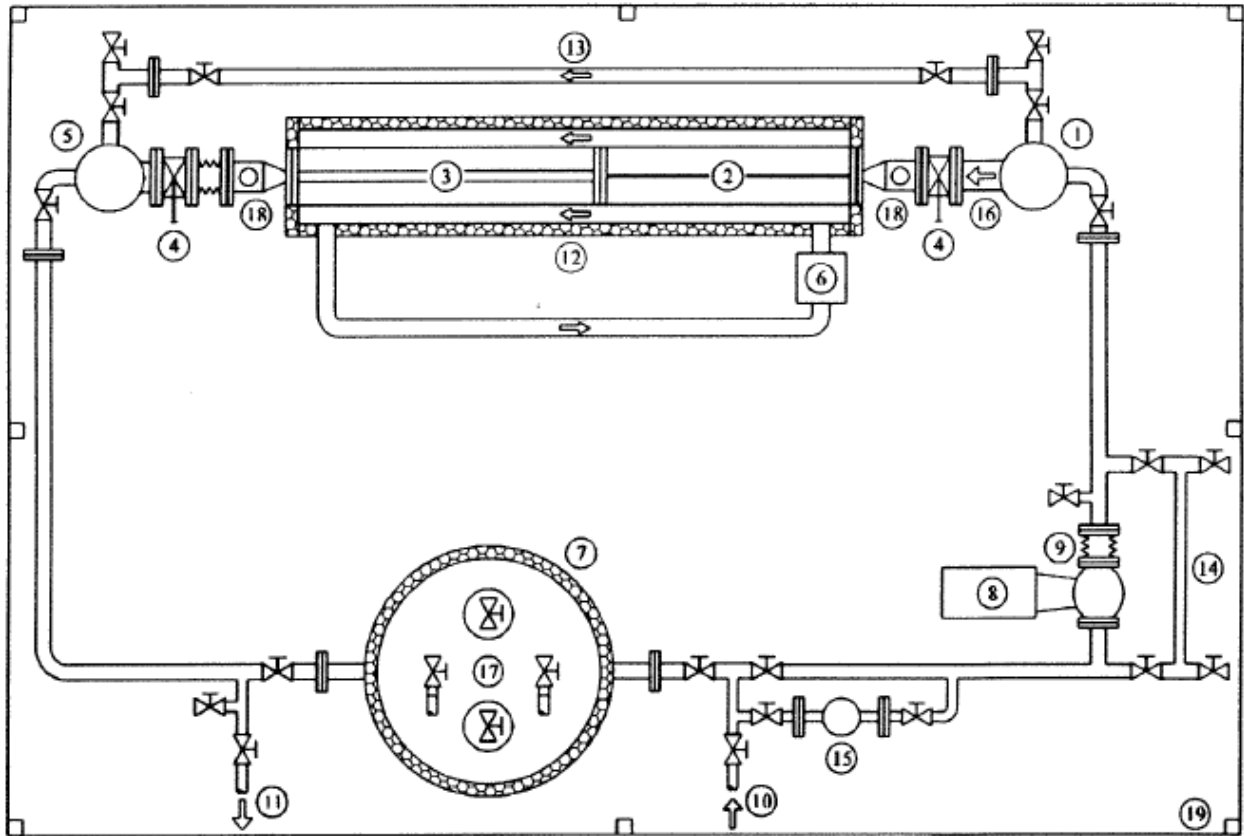
3.2 PRÜFAUFBAUTEN MIT EBENER STRÖMUNG

Darunter versteht man Kanalmodelle, welche die Kühlkanäle von zwangsgekühlten Leistungstransformatoren originalgetreu nachbilden. Dadurch kommt man den realen Strömungsverhältnissen nahe. Für die Bewertung des elektrostatischen Aufladungsverhaltes können zwei Größen herangezogen werden:

- *leakage current*
- *streaming current*

Beim *leakage current* wird der Ableitstrom durch den Feststoff messtechnisch ermittelt. Die andere Möglichkeit ist der *streaming current*, der direkt die bewegten Ladungen im Flüssigkeitsstrom darstellt.

In der **Abbildung 3-1** ist eine Versuchsanlage mit einem Kanalmodell prinzipiell dargestellt.



1	Ladungsabscheider 1	8	Umwälzpumpe	15	Durchflußzähler
2	Beruhigungsstrecke	9	Dehnungsausgleich	16	Zulauf Kanalmodell
3	Kanalmodell	10	Zulauf Ölaufbereitung	17	Ölkühlung
4	Absperrventile	11	Ablauf Ölaufbereitung	18	Anschluß für CDM
5	Ladungsabscheider 2	12	Thermische Isolation	19	Sicherheitsumzäunung
6	Umluftheizung	13	Bypass Kanalmodell		
7	Ölkessel	14	Bypass Pumpe		

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Kanalmodellanlage am Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität in Graz [Lem96:28]

Die wichtigsten Komponenten neben dem Kanalmodell (3) sind die Ladungsabscheider (1 und 5), die Umluftheizung (6), der Ölkessel (7) und die Umwälzpumpe (8). Der Ladungsabscheider 1 (1) soll sicherstellen, dass die ins Modell einströmende Isolierflüssigkeit elektrisch neutral ist. Die Umluftheizung (6) soll ein zu starkes Auskühlen der Isolierflüssigkeit verhindern. Dies ist besonders bei hohen Temperaturen und geringer Strömungsgeschwindigkeit wichtig. An der Außenfläche vom Modell (3) wird mittels anliegender Elektroden der *leakage current* gemessen, der den Ableitstrom durch das Pressboard repräsentiert.

Ein wesentlicher Vorteil der Kanalmodellanlage liegt darin, dass sie für die quantitative Beurteilung der ECT zwischen festen und flüssigen Isolierstoffen gut geeignet ist. Dabei muss in Kauf genommen werden, dass der Aufwand für die manuelle Anfertigung der Modelle sehr hoch ist und dadurch kostenintensiv. Außerdem benötigt diese Anlage eine große Menge an Isolierflüssigkeit. Die Versuche sind sehr zeitaufwendig. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Platzbedarf [Lem96:28-32].

3.3 PRÜFAUFBAUTEN MIT ROTIERENDER STRÖMUNG

3.3.1 Couette charger – CC

Zu Anordnungen mit rotierender Strömung gehört der *couette charger* (CC), der vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt worden ist. Er besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Metallzylindern. An der Innenwand des Außenzylinders und der Außenwand des Innenzylinders können Proben aus Papier oder Pressboard mittels Epoxidharz angebracht werden. Grundsätzlich kann für die Untersuchungen entweder der innere Zylinder rotieren, während der äußere stillsteht oder umgekehrt (bei dem vom MIT gebauten *couette charger* rotiert der innere Zylinder). Das ermöglicht laminare als auch turbulente Strömungsverhältnisse. Für weitere ECT-Untersuchungen kann unter anderem die Feuchtigkeit der Isolierflüssigkeit und die Temperatur von 15-140 °C verändert werden.

Durch die Rotation des inneren Zylinders kommt es zu einer Ladungstrennung, welche einen Stromfluss bewirkt und über die beiden Metallzylinder als *leakage current* bestimmt werden kann. Die Raumladungsdichte in der Isolierflüssigkeit kann über die Ein- und Auslassöffnung beurteilt werden, indem elektrisch neutrale Isolierflüssigkeit hineinströmt und geladene Flüssigkeit wieder heraus kommt. Mittels Strommessung und Berücksichtigung des Ausflussvolumens ergibt sich die Raumladungsdichte [Lem96:32-33].

3.3.2 Spinning disc charger

Zu Versuchsanordnungen mit rotierender Strömung gehört der *spinning disc charger*. Eine schematische Darstellung ist in **Abbildung 3-3** zu sehen. In einem mit Isolierflüssigkeit gefüllten Metallgefäß rotiert eine Scheibe, auf der der zu untersuchende feste Isolierstoff angebracht wird. Durch die Rotation kommt es zu einer Ladungstrennung und die geladenen Ölteilchen werden an die Gefäßwand gedrängt. Dieser Transport stellt einen Stromfluss dar und kann von außen mit einem Elektrometer zwischen Metallgehäuse und Erdpotential gemessen werden. Dieser sogenannte *leakage current* dient zur Beurteilung der ECT. Bei der in **Abbildung 3-3** dargestellten offenen Bauform kommt allerdings durch die Umgebungsluft Feuchtigkeit in die Isolierflüssigkeit [Lem96:33-34].

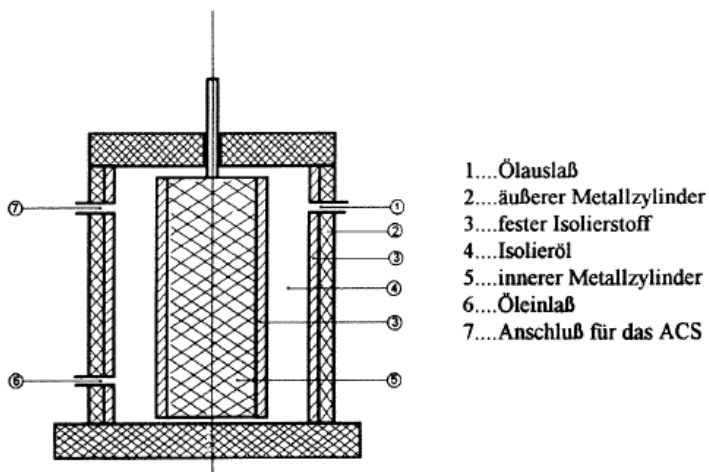


Abbildung 3-2: Aufbau eines couette chargers mit rotierenden Innenzylinder [Lem96:32]

- 1...Ölauslaß
- 2...äußerer Metallzylinder
- 3...fester Isolierstoff
- 4...Isolieröl
- 5...innerer Metallzylinder
- 6...Öleinlaß
- 7...Anschluß für das ACS

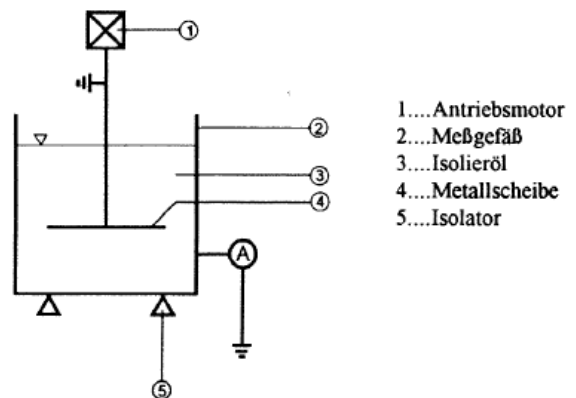


Abbildung 3-3: Schematischer Aufbau des spinning disc chargers [Lem96:34]

- 1...Antriebsmotor
- 2...Meßgefäß
- 3...Isolieröl
- 4...Metallscheibe
- 5...Isolator

Übersicht der bis dato angewendeten spinning disc Systeme

In der **Tabelle 3-1** sind die durchgeführten Arbeiten mittels einer *spinning disc* aufgeführt. Diese Tabelle soll einen groben Überblick geben und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

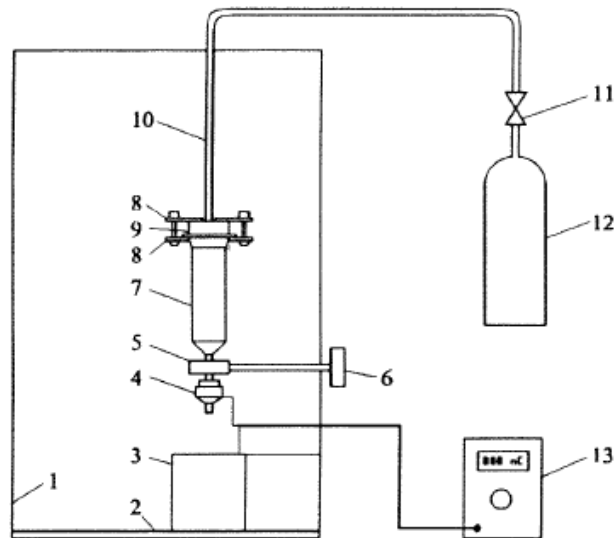
Autoren	Jahr	Referenziert	Durchmesser der Scheibe in mm	Durchmesser des Messkessels in mm	Isolierflüssigkeit	Flüssigkeitsvolumen	fester Isolierstoff	Temperatur in °C	Rotationsgeschwindigkeit in rpm	leakage current in pA
Kedzia, J. Wilner, B.	1989	[Ked89]	40 bis 135	150	Transformatoröl	keine Angabe	keine Angabe	20 - 80	100 - 500	3...1100
Radwan, R.M. El-Dewieny, R. M. Metwally, I.A.	1992	[Rad92]	60 80	110 160	Transformatoröl (Diala-B)	keine Angabe	Pressboard, Stahl, Perspex, Teflon, Aluminium, Messing	20 - 80	400 - 1100	-170...3300
Jagadish, R. Poovamma, P. K. Dwarakanath, K.	1993	[Jag93]	75	keine Angabe	paraffinisches Öl	keine Angabe	PTFE, XLPE (cross- linked polyethylene), LDPE (low-density polyethylene) silicone rubber, EVA, EPR, Pressboard	27 - 60	250 - 2000	0,03...12
Kedzia, J. Wilner, B.	1994	[Ked94]	keine Angabe	keine Angabe	Mineralöl	keine Angabe	Aluminium	20 - 80	150 - 450	60...1000
Qinxue Yu Hengkun Xie Ningjuan Hao	1998	[Qin98]	keine Angabe	keine Angabe	Transformatoröl	keine Angabe	Pressboard	110	130 - 500	-900...75
Qinxue Yu; Wene Ren; Hengkun Xie	2001	[Qin01]	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	2 Liter	PE, PTFE, PVC, Epoxitharz, Eisen, Aluminium, Kupfer	110	130 - 500	-650...212
Zmarzly, D.O.	2005	[Zma05]	keine Angabe	keine Angabe	Transformatoröl	keine Angabe		keine Angabe	100-500	1000...-1000
Poovamma, P. K. Jagadish, R. Dwarakanath, K.	2005	[Poo05]	77	140	Transformatoröl	1 Liter	Pressboard	27 - 70	250 - 2000	0,25...4500
Zdanowski, M. Wohny, S. Zmarzly, D. Kedzia, J.	2007	[Zda07]	40, 60, 80, 100, 135, 150	150, 200	Transformatoröl	0.5, 2 Liter	Aluminium	20	150 - 450	10...480
Zdanowski, M.	2008	[Zda082]	60	100	Hexan und Cyclohexan Mischungen	0.5 Liter	Aluminium	20	100 - 400	10...250
Zdanowski, M.	2008	[Zda08]	60		Hexan und Toluol Mischungen	keine Angabe	keine Angabe	20	100 - 400	0,07...4
Zmarzly, D. Aksamit, P.	2009	[Zma09]	keine Angabe	keine Angabe	Transformatoröl	keine Angabe	Metall	20	0 - 400	-6,5 ... 11
Aksamit, P. Zmarzly, D.	2009	[Aks09]	keine Angabe	keine Angabe	Mineralöl	0.6 Liter	keine Angabe	keine Angabe	0 - 400	0,01...11
Bouslimi, Y. Fofana, I. Hemmatjou, H. Volat, C.	2010	[Bou10]	40 bis 80	keine Angabe	Transformatoröl	keine Angabe	Zellulose Papier	20 - 80	100 - 600	-50...1300
Aksamit, P. Zmarzly, D. Boczar, T.	2011	[Aks11]	keine Angabe	125	Mineralöl	keine Angabe	keine Angabe	75, 110	0 - 150	0...23
Vihacencu, M. Dumitran, L.-M. Notingher, P.V.	2011	[Vih11]	80, 100	150	Mineralöl	keine Angabe	Pressboard	keine Angabe	200 - 600	200...-3200
Vihacencu, M.S. Ciuruc, A. Dumitran, L.-M. Notingher, P.V.	2012	[Vih12]	100	150	Mineralöl	keine Angabe	Pressboard	keine Angabe	600	600...-100
Talhi, M. Fofana, I. Flazi, S.,	2013	[Tal13]	40	keine Angabe	natürlicher Ester synthetischer Ester paraffinisches Mineralöl	keine Angabe	Kraftpapier	20 ± 0,1	100 - 600	17 ... 90

Tabelle 3-1: Durchgeführte Arbeiten mittels spinning disc

3.4 PRÜFAUFBAUTEN UNTER ANWENDUNG DER FILTERMETHODE

3.4.1 Mini-static charge tester

Zu den Filtermethoden kann der *mini-static charge tester* gezählt werden, siehe **Abbildung 3-4**. Die Isolierflüssigkeit muss durch einen Zellulosefilter gepresst werden, wodurch diese elektrostatisch aufgeladen wird. Die ECT-Beurteilung erfolgt über die Ladungsmenge, die von der Isolierflüssigkeit abgeführt wird. Diese wird gemessen an der metallischen Siebplatte (4), auf welcher der Zellulosefilter aufliegt oder an dem isoliert aufgestellten Auffanggefäß (3) aus Metall. Äußere Störeinflüssen werden durch den Faradayschen Käfig (1) abgeschirmt [Lem96:35-36].



1	Faraday'scher Käfig	6	Drehknopf	11	Druckminderer
2	Teflonplatte	7	Kunststoffspritze	12	Druckbehälter
3	Metallbecher	8	Befestigungsklemmen	13	Elektrometer
4	Filterhalter	9	Silikonstopfen		
5	Ventil	10	Druckschlauch		

Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des mini-static testers [Lem96:35]

3.5 PRÜFAUFBAUTEN UNTER ANWENDUNG DER INJEKTIONSMETHODE

Die Versuchsanordnung nach der Injektionsmethode basiert auf dem Prinzip eines geschlossenen Kreislaufes. In **Abbildung 3-5** ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Mit Hilfe einer Umwälzpumpe wird die Referenz-Isolierflüssigkeit durch einen Papierwickel gepresst und elektrostatisch aufgeladen. Gemessen wird der *leakage current* im Papierwickel und der *streaming current* im Relaxationsbehälter. Über ein Ventil wird die zu untersuchende Isolierflüssigkeit in die Referenz-Isolierflüssigkeit injiziert und die Veränderungen werden beim *leakage current* gemessen. Aus dem zeitlichen Verlauf kann auf das Aufladungsverhalten der Isolierflüssigkeit geschlossen werden.

Nachteil bei diesem Prüfaufbau ist die Veränderung der Eigenschaften der Referenz-Isolierflüssigkeit. Außerdem wird bei diesem Prüfaufbau als Voraussetzung angenommen, dass das Aufladungsverhalten der Mischung der Isolierflüssigkeiten ähnlich sein soll wie das Verhältnis der Aufladungsneigung der einzelnen Flüssigkeiten. Der verwendete Papierwickel ist auch nicht repräsentativ für Barrieren und Kühlkanäle der Hauptisolierung (Pressboard, Aramid) von Hochspannungstransformatoren [Lem96:36].

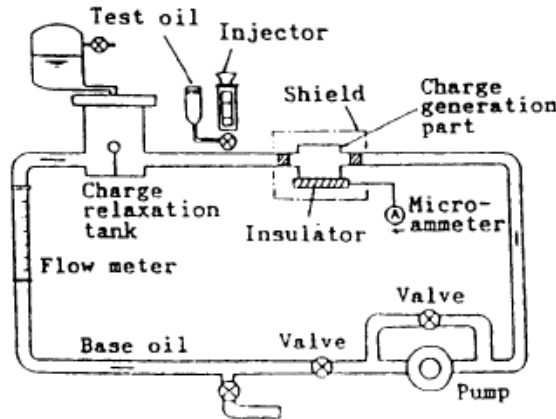


Abbildung 3-5: Schematischer Aufbau für die Injektionsmethode [Sie94:847]

3.6 VERGLEICH DER METHODEN

In der *Tabelle 3-2* sind die unterschiedlichen Prüfaufbauten zur Bestimmung der Aufladungsneigung miteinander verglichen worden. Dabei zeichnen sich Prüfaufbauten mit ebener Strömung durch die Übertragbarkeit der Strömungsverhältnisse zwischen festen und flüssigen Isolierstoffen auf den realen Transformator aus. Falls nicht genügend Platz für den meist großen Aufbau zur Verfügung steht, kann die Filtermethode oder ein Aufbau mit rotierende Strömung verwendet werden. Für die Versuchsdurchführung wird auch weniger Isolierflüssigkeiten und Feststoff benötigt, aber die Messergebnisse sind dafür nicht so repräsentativ wie bei der ebenen Strömung. Daher muss bei der Auswahl des Prüfaufbaues abgewägt werden, welche Kriterien für die ECT-Bestimmung erfüllt werden sollen [Pra98:1-5].

Kriterium	Ebene Strömung	Rotierende Strömung	Filtermethoden
Übertragbarkeit der Strömungsverhältnisse	↑ ebene Strömung (laminar, turbulent)	↓ 3-dim. rot. Stömung (CTC) ¹⁾ ↓ Couette-Strömung (CC) ²⁾	↓ laminar
Untersuchte Isolierungskomponente(n)	↑ Öl-Board	↑ Öl-Board (CTC, CC), ↓ Öl-(Metall-Scheibe)	↓ Öl
Referenzkomponente	↑ keine	↑ keine (CTC, CC) ↓ Metall- oder Teflon-Scheibe	↘ Papier ↓ Stahl, Gold
Form der Feststoffkomponente	↑ plattenförmig ⇒ rohrförmig	↑ plattenförmig (CTC), ⇒ rohrförmig (CC)	↓ Filter
Probenherstellung	↓ schwierig (Kanal) ↓ sehr schwierig (Rohr)	↓ schwierig (CTC), ↓ schwierig (CC)	↑ einfach
Probenvolumen der flüssigen Komponente	↓ hoch	↗ niedrig (mittel)	↑ niedrig
Probenvolumen der festen Komponente	↓ hoch	↑ niedrig	↑ niedrig
Vorbereitung und Konditionierung	↓ hoch	⇒ mittel (CTC, CC) ↑ niedrig (Metall-Scheibe)	↗ Papier ↑ Metall
Reproduzierbarkeit	↘ mittel (niedrig)	↘ mittel (niedrig)	↑ hoch
Übertragbarkeit auf HS-Transformatoren	↑ hoch	⇒ mittel	↘ niedrig
Normierungsfähigkeit	↓ nicht geeignet	↘ wenig geeignet	↑ geeignet

¹⁾ CTC (Cigre Test Cell), ²⁾ CC (Couette Charger)

↑ Kriterium sehr gut erfüllt, ⇒ Kriterium erfüllt, ↓ Kriterium sehr schlecht erfüllt

Tabelle 3-2: Vergleich der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der ECT von festen/flüssigen Isolierkomponenten [Pra98:5]

4 LITERATURRECHERCHE:

AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN MIT ALTERNATIVEN ISOLIERFLÜSSIGKEITEN

4.1 ALLGEMEINES

Dieses Kapitel befasst sich mit der Aufladungsneigung von alternativen Isolierflüssigkeiten als Funktion verschiedener Einflussgrößen. In der *Tabelle 4-1* und *Tabelle 4-2* sind ECT-Untersuchungen aufgelistet, die sich mit alternativen Isolierflüssigkeiten befassen.

Untersuchungsmethode	Index	Autoren	Jahr	Referenziert	Isolierflüssigkeiten	fester Isolierstoff	Temperatur in °C	Durchflussgeschwindigkeit
ebene Strömung	1	Paillat, T. Zelu, Y. Morin, G. Perrier, C.	2012	[Pai12]	drei natürliche Ester ein synthetischer Ester fünf Mineralöle	Pressboard	10 - 80	40 - 95 cm/s
Filtermethode	2	Perrier, C. Beroual, A. Bessedé, J.-L.	2006	[Per06]	ein Mineralöl zwei synthetische Ester ein Silikonöl	Papierfilter (Whatman 541)		
	3	Perrier, C. Beroual, A.	2009	[Per09]	drei Pflanzenöle ein synthetischer Ester ein Silikonöl ein inhibiertes und nicht inhibiertes Mineralöl	Papierfilter (Whatman 541)		
	4	Arazoe, S.; Saruhashi, D.; Sato, Y.; Yanabu, S.; Ueta, G.; Okabe, S.	2011	[Ara11]	ein Silikonöl ein natürlicher Ester ein synthetischer Ester ein Mineralöl	Polytetrafluoräthylen (PTFE)	30 - 135	2,5 l/min
	5	Yasuda, K.; Arazoe, S.; Igarashi, T.; Yanabu, S.; Ueta, G.; Okabe, S.	2011	[Yas11]	ein Silikonöl ein natürlicher Ester	Aufladung an PTFE-Filter; Messung der Ladungsansammlung an: Nomex Kraftpapier	30 - 130	2,5 l/min
	6	Poovamma, P. K.; Pattanshetti, V. V.; Ahmed, T.R.A.; Sudhindra, A.	2011	[Poo11]	ein synthetischer Ester ein Silikonöl ein naphthenisches und ein isoparaffinisches Mineralöl	Papierfilter (Whatman 541)	~ 20 - 80	
	7	Saito, H.; Okubo, H.; Kojima, H.; Hayakawa, N.; Kato, K.; Kawanishi, K.; Koide, H.	2011	[Sai11]	ein PFAE ein gealtertes Mineralöl	Aufladung an Ölfilter; Messung in Pressboard-Kanal und an Ölfilter	Raumtemperatur	233 cm ³ /s
	8	Paillat, T.; Zelu, Y.; Morin, G.; Perrier, C.	2012	[Pai12]	drei natürliche Ester ein synthetischer Ester fünf Mineralöle	Papierfilter (Whatman 541)		100 ml/min
	rotierende Strömung	9	Talhi, M.; Fofana, I.; Flazi, S.	2013	[Tal13]	zwei natürliche Ester zwei synthetische Ester ein Mineralöl	Kraftpapier	20 ± 0,1
nicht eindeutig zuordenbar	10	Sun Ho Choi*; Joong Il Jung; Chang Su Huh	2011	[Cho11]	ein Pflanzenöl ein Mineralöl	Isolationspapier DPP (diamond-pattern insulating paper)	20 - 80	

Tabelle 4-1: Auflistung von ECT-Untersuchungen von alternativen Isolierflüssigkeiten, Teil 1

In den beiden Tabellen sind unter anderem die untersuchten Isolierflüssigkeiten, der verwendete feste Isolierstoff und das Untersuchungsziel angegeben. Diese Tabellen sollen einen Überblick über die Forschungstätigkeit im Bereich der Aufladungsuntersuchungen mit alternativen Flüssigkeiten geben. Sie stellen jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Index	Untersuchungsziel	Messgröße	Aufladungshöhe	Bemerkung
1	Untersuchungen von unterschiedlichen Esterflüssigkeiten bei steigender Temperatur und Durchflussgeschwindigkeit; Vergleich mit Mineralöl	leakage current; streaming current; accumulation current	Angesammelte Ladung: Esterflüssigkeit zwischen ~ 200 nC und 1 nC Mineralöle zwischen ~ 40 nC und 0,03 nC	Die Ladungsansammlung wird als wichtiger Indikator für die Bewertung des Risikos durch elektrostatische Aufladung betrachtet. Bei den Untersuchungen haben manche Esterflüssigkeiten eine geringere Ladungsansammlung als die untersuchten Mineralöle.
2	Untersuchung des Aufladungsverhaltens der Isolierstoffe beim Vermischen mit Mineralöl	leakage current; Berechnung der Ladungsdichte	Ladungsdichte: Mineralöl A zwischen ~ 10 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 20 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ Esteröl B zwischen ~ 8000 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 11000 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ Silikonöl D zwischen ~ 3 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 20 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 80 % A + 20 % B zwischen ~ 100 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 200 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 80 % A + 20 % D zwischen ~ 10 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 20 $\mu\text{C}/\text{m}^3$	Der Feuchtigkeitsgehalt im Öl wurde reduziert. Dies hat eine Erhöhung der elektrostatischen Aufladung bewirkt.
3	ECT Untersuchungen von verschiedenen Ölen	leakage current; Berechnung der Ladungsdichte	Ladungsdichte: Pflanzenöle zwischen ~ 800 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 10000 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ synthetischer Esterflüssigkeiten ~ 4000 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ Silikonöl ~ 5 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ Mineralöl zwischen ~ 2 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 4 $\mu\text{C}/\text{m}^3$	Eine hohe Viskosität ist kein Indikator für eine hohe ECT, da Silikonöl trotz hoher Viskosität eine geringe ECT besitzt.
4	Aufladungsverhalten von verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit steigender Temperatur	Potential an Elektrode; Berechnung der Ladungsdichte	Mineralöl zwischen ~ 300 pC/ml und 600 pC/ml Esteröle zwischen ~ 30 pC/ml und 0 pC/ml Silikonöl zwischen ~ -18 pC/ml und -45 pC/ml	Ester und das Silikonöl weisen eine geringere Ladungsdichte als das untersuchte Mineralöl bei einer Aufladung an PTFE auf. Das Silikonöl besitzt eine negative Ladungsdichte.
5	Aufladungsverhalten von umweltfreundlichen Isolierflüssigkeiten und Ladungsansammlung auf Kraftpapier und Nomex	Potential an Elektrode; Berechnung der Ladungsdichte	Angesammelte Ladungsdichte am Nomex mit: Silikonöl zwischen -9,9 pC/ml und 3 pC/ml Esteröl zwischen -2,51 pC/ml und 0 pC/ml Angesammelte Ladungsdichte am Kraftpapier mit: Silikonöl zwischen -10,4 pC/ml und 3,2 pC/ml Esteröl zwischen -4,18 pC/ml und 0 pC/ml	Nomex® und Kraftpapier besitzen das gleiche Temperaturverhalten bei gleicher Isolierflüssigkeit.
6	Untersuchung der Aufladungsneigung von Mineralöl, Silikonöl, Ester und Mischungen von Mineralöl und Ester	leakage current; streaming current	synthetischer Ester zwischen ~ 10 pA und 80 pA Silikonöl zwischen ~ 8 pA und 60 pA naphthenisches und isoparaffinisches Mineralöl zwischen ~ 5 pA und 9 pA	Esteröl besitzt die höhere Aufladung im Vergleich zu Mineralöl. Ihre Mischungen sind niedriger aufladend als die reinen Isolieröle.
7	Untersuchungen von PFAE im Vergleich zu Mineralöl	leakage current; Berechnung der Ladungsdichte; elektrisches Feld in Strömungskanal	maximale Ladungsdichte: PFAE ~ 1,4 pC/mm ³ Mineralöl ~ 0,9 pC/mm ³	Das elektrische Feld im PFAE ist geringer als im Mineralöl. Jedoch ist die Ladungsdichte im PFAE dafür größer. Das Ladungsverhalten der beiden Isolierstoffe ist ähnlich.
8	Vergleichsmessungen für das Kanalmodell	streaming current; leakage current; Berechnung der Ladungsdichte	Ladungsdichte: Ester zwischen ~ 2000 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 10000 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ Mineralöle zwischen ~ 2 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ und 100 $\mu\text{C}/\text{m}^3$	Die hohe elektrostatische Aufladung wird auf die molekulare Struktur des Esters zurückgeführt.
9	Vergleich des Aufladungsverhaltens einiger alternativer Isolierflüssigkeiten zu Mineralöl	streaming current	Mineralöl zwischen ~ 17 pA und -20 pA Esteröle zwischen ~ 90 pA und -20 pA	Die höhere Aufladung beim Ester wird aufgrund der hohen Viskosität vermutet.
10	Untersuchung von neuen und alten Isolierflüssigkeiten, Zusatz von BTA mit 5, 10, 30, 50 ppm	leakage current; streaming current	neue und gealterte Isolierflüssigkeiten: Mineralöl zwischen ~ 1 pA und 0,5 pA Pflanzenöl zwischen ~ 2 pA und 0,2 pA	Durch den Zusatz von BTA ändert der Aufladestrom sein Vorzeichen mit steigender Temperatur.

Tabelle 4-2: Auflistung der untersuchten Isolierflüssigkeiten auf ihre ECT, Teil 2

4.2 UNTERSUCHUNGEN MIT EBENER STRÖMUNG

4.2.1 Kanalmodellanlage an der Universität Poitiers

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Pai12] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Natürliche Ester (3)
- Synthetischer Ester (1)
- Mineralöle (5)

Die genaue Beschreibung der einzelnen Isolierflüssigkeiten kann aus der **Tabelle 4-3** entnommen werden. Alle untersuchten Flüssigkeiten befanden sich beim Test im neuwertigen Zustand.

	Type	Kinematic Viscosity 40°C (ISO 3104)	Tan δ 90°C (IEC 60247)	Flash point (ISO 2719)
Natural Ester A	Blend of mono & tri-esters	18 mm ² /sec	≤0.04	175°C
Natural Ester R	Tri-ester	34 mm ² /sec	≤0.04	> 300°C
Natural Ester N	Tri-ester	37 mm ² /sec	≤0.04	> 300°C
Synthetic Ester Oil	Tetra-ester	28 mm ² /sec	≤0.03	> 250°C
Mineral oil A	Paraffinic	7 mm ² /sec	0.0006	142 °C
Mineral oil B	Paraffinic	9 mm ² /sec	0.0016	146°C
Mineral oil C	Naphtenic	8 mm ² /sec	0.0026	160 °C
Mineral oil E	Naphtenic	9 mm ² /sec	0.0003	147 °C
Mineral oil D	Naphtenic (high grade)	9 mm ² /sec	0.0003	147 °C

Tabelle 4-3: Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten laut Datenblatt [Pai12:1538]

Prüfaufbau:

An der Universität Poitiers wurde ein Kreislauf aufgebaut, der den Fluss der Isolierflüssigkeit in einem Hochspannungstransformator nachbilden soll, siehe **Abbildung 4-1**.

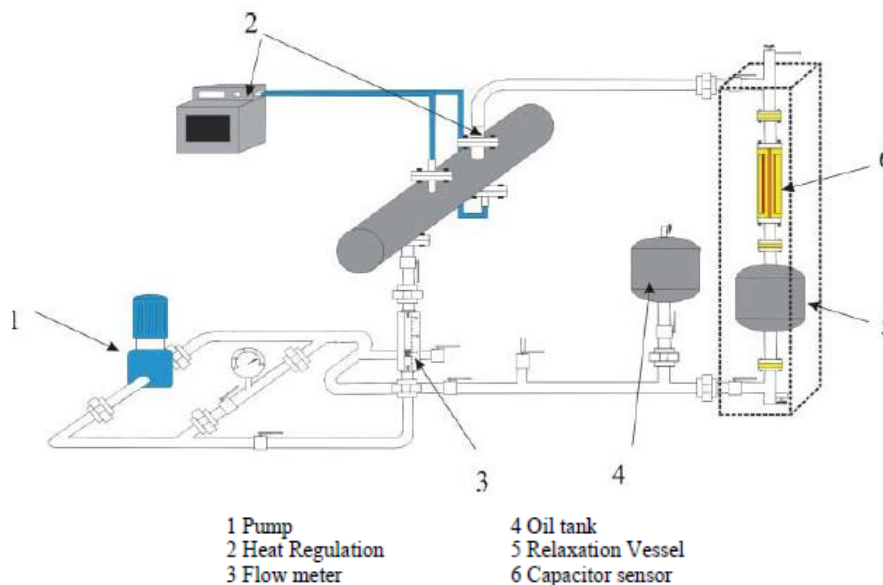


Abbildung 4-1: Testkreislauf an der Universität Poitiers zur Nachbildung des Ölflusses durch die Kühlkanäle eines Transformators [Pai12:1539]

Im Kreislauf können die Temperatur (2) und die Durchflussmenge (3) geregelt werden. Die Isolierflüssigkeit fließt durch eine Sensoreinheit (6) zur Bestimmung der Erzeugung und Anhäufung von Ladungen. Der Aufbau des Sensors ist in **Abbildung 4-2** dargestellt. Der Sensor besteht aus einem rechteckigen, von der Isolierflüssigkeit durchströmten Pressboardkanal, der innerhalb eines PTFE-Rahmes angeordnet ist. Auf dem PTFE-Rahmen sind zwei Plattenelektroden angebracht, die mit einem Picoamperemeter (7) verbunden sind. Mit Picoamperemetern werden neben dem *accumulation current* von den beiden Plattenelektroden auch der *upstream* und *downstream leakage current* und der *streaming current* gemessen, siehe **Abbildung 4-2**. An der Grenzschicht vom festen und flüssigen Isolierstoff sammeln sich im Ruhezustand der Isolierflüssigkeit Ladungen an, die positiven in der Flüssigkeit und die negativen im Pressboard. Wird nun die Isolierflüssigkeit umgewälzt, werden die positiven Ladungen von der Strömung mitgerissen und die negativen verbleiben an der Pressboardoberfläche. Die angesammelten Ladungen können als *accumulation current* an den zwei Plattenelektroden gemessen werden. Die Messung beruht auf dem Prinzip der Spiegelladung. Der *upstream* und *downstream leakage current* werden von den ein- und auslassseitigen metallischen Kopplungsstücken des Pressboardkanals gegen Erdpotenzial gemessen. Die Ladungen, die von der Isolierflüssigkeit abtransportiert werden, fließen im Relaxationskessel (5) gegen Erde ab. Der Strom, der an diesem Kessel gegen Erdpotenzial gemessen wird, entspricht dem *streaming current* bzw. in der Veröffentlichung bezeichnet als *generating current* (10).

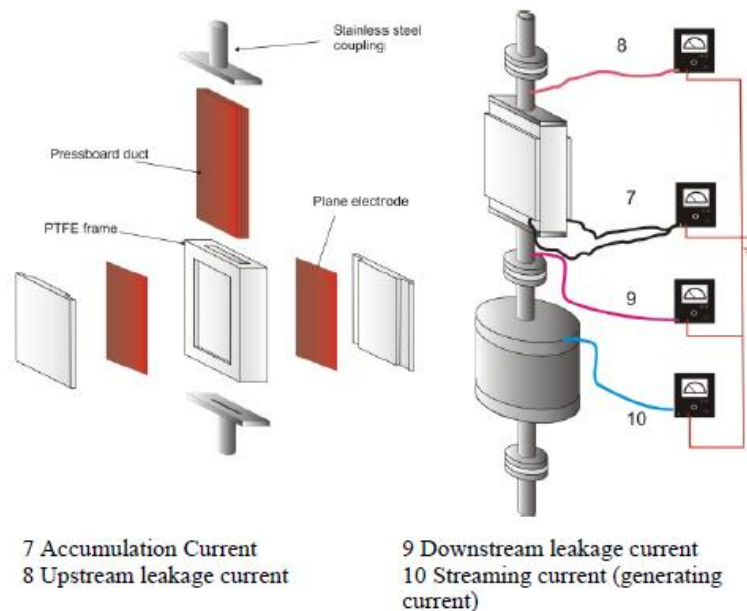


Abbildung 4-2: Kapazitiver Sensor und Strommessung [Pai12:1539]

In **Abbildung 4-3** ist ein äquivalentes elektrisches Ersatzschaltbild zur Veranschaulichung des Messprinzips dargestellt. Durch ein physikalisch-chemisches Phänomen werden Ladungen an der Grenzfläche zwischen dem festen und flüssigen Isolierstoff generiert. Dieser Vorgang wird im Ersatzschaltbild durch Stromquellen an der Grenzfläche veranschaulicht. Das Potenzial der Feststoffoberfläche ist direkt von den angesammelten Ladungen abhängig. Die Widerstände stehen in Beziehung zum Ladungsabfluss zu den ein- und auslassseitigen metallischen Kopplungsstück. Die Kapazitäten werden durch die Permittivität der festen (Pressboard, PTFE und Plattenelektrode) und flüssigen Materialien bestimmt.

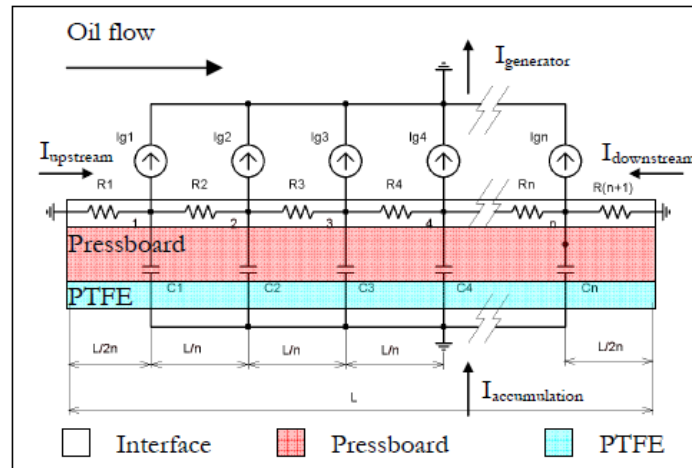


Abbildung 4-3: Äquivalentes elektrisches Ersatzschaltbild [Pai12:1540]

In **Abbildung 4-4** ist eine typische Strommessung mit Mineralöl dargestellt. Die Ladungserzeugung an der Grenzfläche setzt durch den Fluss der Isolierflüssigkeit ein. Die Ladungen in der Flüssigkeit werden durch die Strömung abtransportiert wodurch der *streaming current* ansteigt und nach einiger Zeit seinen stationären Zustand erreicht. Die Gegenladungen verbleiben im Pressboard. Der *accumulation current* steigt an bis er sein Maximum erreicht und geht dann gegen Null. Das Oberflächenpotenzial steigt an bis der stationäre Zustand vom *upstream* und *downstream leakage current* erreicht wird. Der Kurvenverlauf vom *streaming current* und der Maximalwert vom *accumulation current* hängen vom verwendeten festen und flüssigen Isolierstoff ab.

Die Ergebnisswerte einer Messung sind der stationäre Zustand vom *generator current* und die angesammelte Ladung Q (aus dem *accumulation current* berechnet). Diese werden für den Vergleich der unterschiedlichen Isolierflüssigkeit herangezogen. Die Testtemperaturen für die Untersuchungen waren 10, 20, 40, 60 und 80 °C. Die Durchflussgeschwindigkeit wurde von 40 bis 95 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ eingestellt, um drei laminare Strömungsgeschwindigkeit zu vermessen.

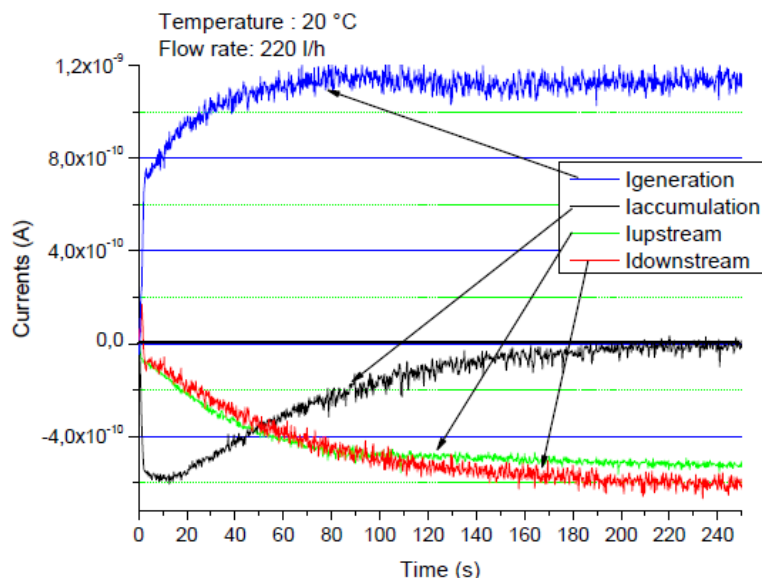


Abbildung 4-4: Typische Messung mit Mineralöl bei einer Temperatur von 20 °C [Pai12:1539]

Um eine Reproduzierbarkeit und eine Vergleichbarkeit der Messdaten zu erreichen, wurden die Versuchsvorbereitungen immer in gleicher Weise durchgeführt. Dabei wurde der Testkreislauf mittels Stickstoff getrocknet und für 24 Stunden unter Vakuum gesetzt. Danach wurde die Anlage unter Vakuum aus handelsüb-

lichen Behältern mit Isolierflüssigkeit gefüllt. Zur Imprägnierung des Pressboardkanals zirkuliert das Öl unter einem Druck von 0,02 MPa (0,2 bar) für zwei Stunden. Am Schluss wurde eine 24 stündige Relaxationszeit abgewartet, bevor die Messungen durchgeführt wurden.

Ergebnisse:

Bei den untersuchten Isolierflüssigkeit ergab sich für den *generating current* ein positiver Verlauf, hingegen beim *accumulation current* und den *leakage currents* ein negativer. Der Verlauf des *generating current* und des *accumulation current* war bei den Esterflüssigkeit gleich wie bei Mineralöl (vergleiche **Abbildung 4-4** mit **Abbildung 4-5** und **Abbildung 4-6**). Der Kurvenverlauf der Ströme ist bei den unterschiedlichen Esterflüssigkeiten gleich. Sie besitzen ein anderes dynamisches Verhalten als Mineralöl.

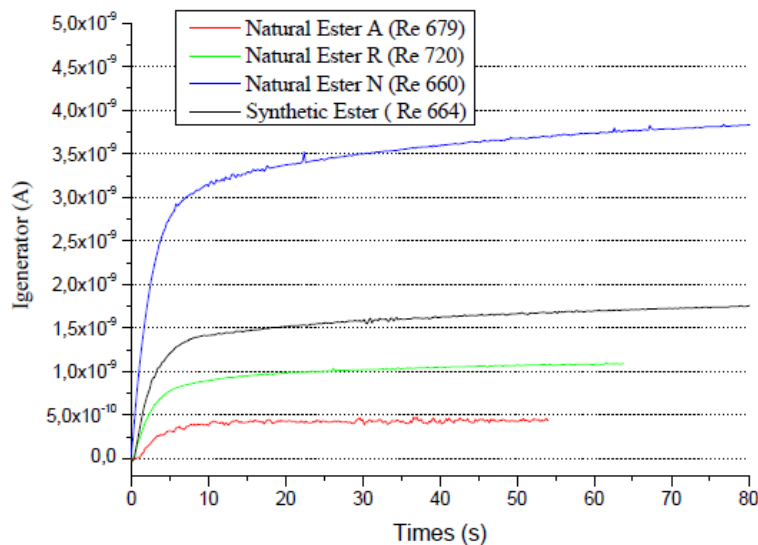


Abbildung 4-5: Generating current der verschiedenen Esterflüssigkeiten in Abhängigkeit der Zeit bei einer Temperatur von 60 °C [Pai12:1541]

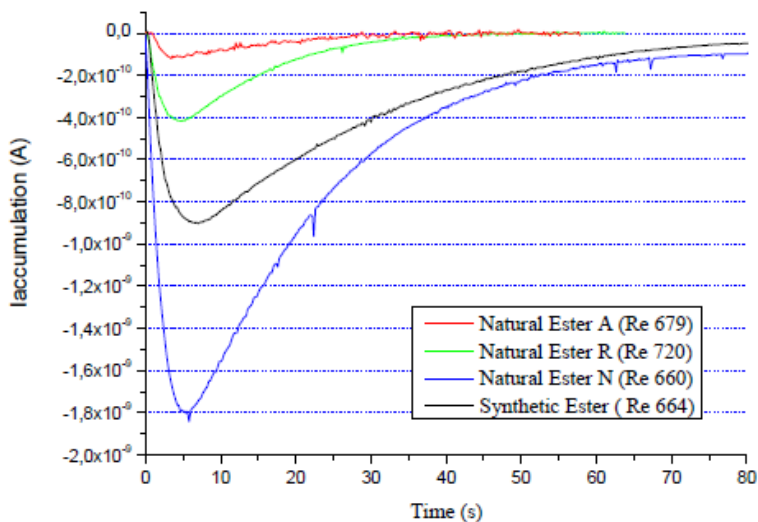


Abbildung 4-6: Accumulation current in Abhängigkeit der Zeit bei einer Temperatur von 60 °C [Pai12:1541]

In **Abbildung 4-7** ist der stationäre *generating current* in Abhängigkeit der Durchflussgeschwindigkeit dargestellt. In **Abbildung 4-8** ist der stationäre *generating current* als Funktion der Temperatur dargestellt. Die ermittelten Werte wurden mit Mineralöl verglichen, welches in großen Hochspannungstransformatoren zum Einsatz kommt. Die Esterflüssigkeiten besitzen einen größeren stationären *generating current* als die untersuchten Mineralöle.

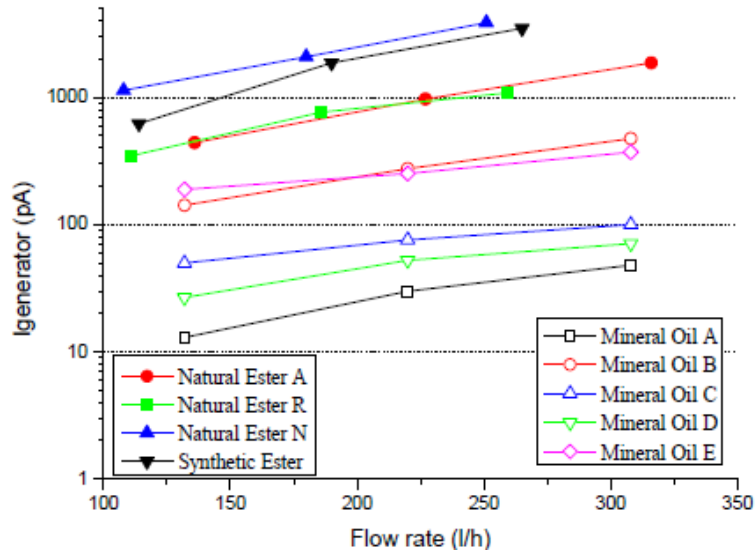


Abbildung 4-7: Generating current in Abhängigkeit der Durchflussgeschwindigkeit [Pai12:1541]

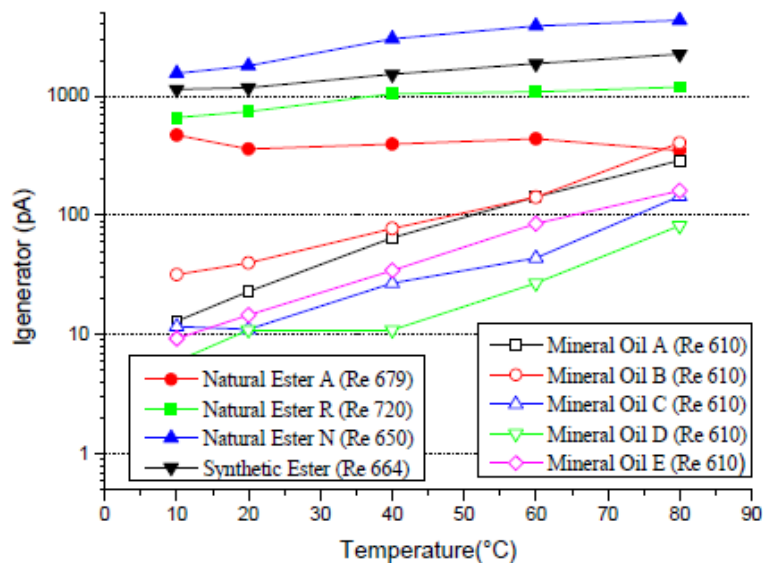


Abbildung 4-8: Generating current in Abhängigkeit der Temperatur [Pai12:1541]

Für die Bewertung des Risikos durch elektrostatische Aufladung ist die angesammelte Ladung ein wichtiger Indikator. In **Abbildung 4-9** ist ersichtlich, dass diese für die Esterflüssigkeiten nicht so kritisch ist. Die Höhe der angesammelten Ladung vom natürlichen Ester R ist ziemlich ähnlich wie von einigen mineralischen Ölen. Die höchsten Werte liefern der synthetische Ester und natürliche Ester N.

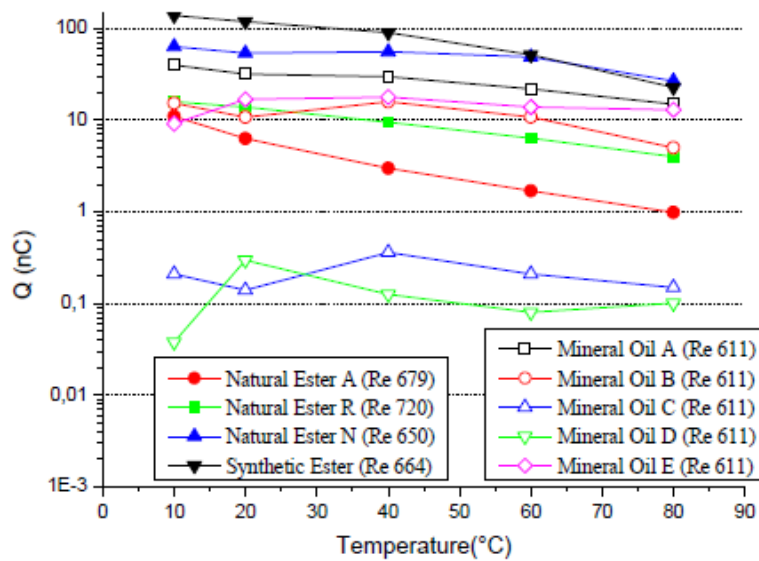


Abbildung 4-9: Angesammelte Ladung der unterschiedlichen Isolierstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur [Pai12:1542]

4.2.2 Strömungsmodellanlage der TU Graz

Die Strömungsmodellanlage der TU Graz wurde nach dem Vorbild der Kanalmodellanlage in **Abbildung 3-1** aufgebaut. Für nähere Informationen wird auf die Veröffentlichungen [Pod13] und [Pod132] verwiesen. Messungen, die mit alternativen Isolierflüssigkeiten durchgeführt worden sind, werden zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht und werden deshalb in dieser Arbeit nicht behandelt.

4.3 UNTERSUCHUNGEN NACH DER FILTERMETHODE

4.3.1 Filtermethode an der Universität Denki: Untersuchungen 1

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Ara11] entnommen.

Diese Untersuchungsmethode wird zu den Filtermethoden gezählt, da die Aufladung über einen Filter erfolgt.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Mineralöl
- Silikonöl (*Shin-Etsu Co., Kf96-20*)
- Natürlicher Ester (*Cooper Power Systems, Envirotemp FR-3[®]*)
- Synthetischer Ester (*M&I Materials, Midel[®] 7131*)

Diese Isolierflüssigkeiten wurden hinsichtlich ihrer Durchschlagspannung, elektrostatischen Aufladung und Verbrennungseigenschaften untersucht. Für diese Arbeit sind die Untersuchungen bezüglich der elektrostatischen Aufladung interessant und deshalb werden die anderen Untersuchungen nicht behandelt.

In der nachfolgenden **Tabelle 4-4** sind charakteristische Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten aufgelistet.

	Silicone oil	Natural ester oil	Synthetic ester oil	Mineral oil
Material	Silicon	Soybean	Synthetic	Petroleum
Specific gravity	0.95	0.92	0.97 ^a	0.869 ^a
Kinematic viscosity [mm ² /s]	20	33 ^b	70 ^a	7.75 ^b
Flash point [°C]	>240	316	260	148
Fluid point [°C]	<-60	-21	-60	-32.5
Relative permittivity	2.7	3.2	3.2 ^a	2.2

^aValue at 20°C; ^bvalue at 40°C.

Tabelle 4-4: Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten bei 25 °C [Ara11:507]

Prüfaufbau:

Das Testequipment, welches für die Untersuchungen verwendet worden ist, ist in der **Abbildung 4-10** schematisch dargestellt.

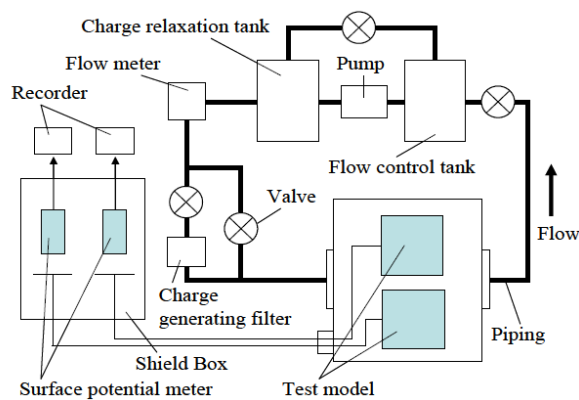


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues an der Universität Denki zur Bestimmung der elektrostatischen Aufladung [Ara11:509]

Über eine Pumpe zirkuliert das Öl in einem geschlossenen Kreislauf. Durch das Passieren eines Aufladungsfilters (*charge-generating filter*) wird das Öl elektrostatisch aufgeladen. Von dort fließt das aufgeladene Öl zur Testkammer, siehe **Abbildung 4-11**. Sie besteht aus zwei Elektrodenanordnungen zu je drei Plattenelektroden, die in einem rostfreien Stahlbehälter platziert sind. Eine Elektrodenanordnung besteht aus einer geerdeten Elektrode an der Ober- und Unterseite. Dazwischen ist eine innere Elektrode mit PTFE-Stäben isoliert aufgestellt. Beide Anordnungen wurden verwendet, um das Potenzial durch die Aufladung der Isolierflüssigkeit zu messen. Dieses wurde über die inneren Elektroden mittels Oberflächen-Elektrometers bestimmt. Das Ergebnis wurde verwendet, um die Ladungsdichte zu berechnen.

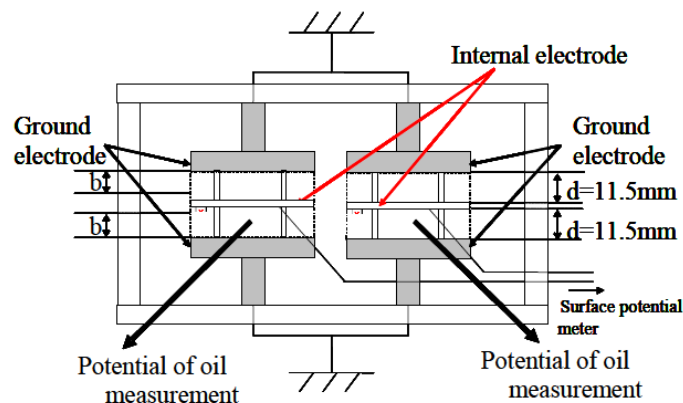


Abbildung 4-11: Aufbau der Testkammer[Ara11:509]

Die Durchflussmenge wurde auf 2,5 l/min eingestellt, was einer Flussgeschwindigkeit von 300 mm/s entsprach. Bei 500-kV-Transformatoren bewegt sich die Flussgeschwindigkeit zwischen 200-500 mm/s. Die Testtemperaturen für die Untersuchungen waren 30, 50, 70, 100 und 130 ± 5 °C. Dabei wurde jeder Test fünf Mal oder öfter wiederholt. Die Versuchszeit wurde auf 30 Minuten eingestellt, damit sich ein stabiler Messwert innerhalb dieser Zeit einstellen konnte. Der Aufladungsfilter besteht aus PTFE, weil die Aufladung größer bei diesem Material ist.

Ergebnisse:

In der **Abbildung 4-12** ist das Temperaturverhalten der Ladungsdichte der untersuchten Isolierflüssigkeiten dargestellt.

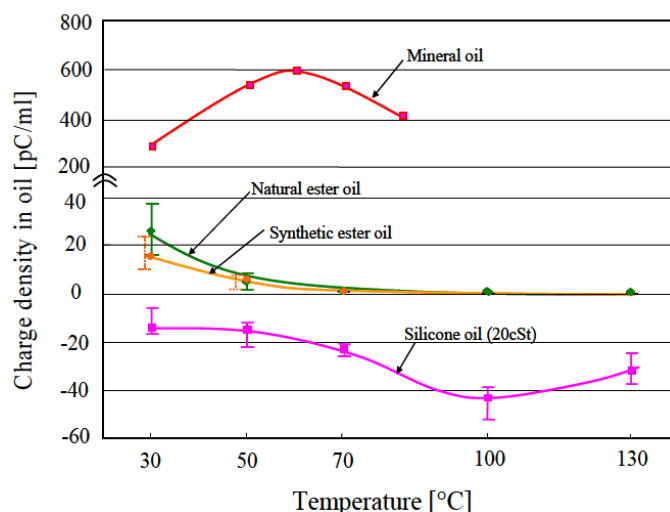


Abbildung 4-12: Temperaturverhalten der Ladungsdichte [Ara11:510]

Es hat sich gezeigt, dass beim Verwenden eines PTFE-Aufladungsfilters die Ladungsdichte bei Mineralöl und Ester positiv und bei Silikonöl negativ ist. Die Aufladung des Mineralöles ist größer als bei den anderen Isolierflüssigkeiten. Bei steigender Temperatur verhält sich der natürliche wie der synthetische Ester. Mit steigender Temperatur nimmt die Ladungsdichte ab und ein Maximum tritt bei ≤ 30 °C auf. Bei Mineralöl steigt die Aufladung als Funktion der Temperatur zuerst zwischen 30 und 70 °C an und fällt danach wieder ab. Das Verhalten des Esters ist günstiger bezüglich der elektrostatischen Aufladung als Funktion der Temperatur. Eine Abnahme der elektrostatischen Aufladung mit steigender Temperatur ist bei Isolierflüssigkeiten wünschenswert, da bei erhöhter Last die Öltemperatur im Transformator steigt.

4.3.2 Filtermethode an der Universität Denki: Untersuchungen 2

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Yas11] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Silikonöl (*Shin-Etsu Co., KF96-20*)
- Natürlicher Ester (*Cooper Power Systems, Envirotemp FR-3®*)

In der **Tabelle 4-5** sind die Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten aufgelistet. Zum Vergleich sind auch die Eigenschaften des konventionell verwendeten Mineralöles dargestellt.

Property	Unit	Silicone oil KF96-20	Ester oil Envirotemp FR-3	Mineral oil
Specific gravity	-	0.950	0.92	0.849
Kinematic viscosity	cSt	19.71	33 (40 °C)	5.883
Flash point (open cup)	°C	>240	316	152
Fluid point	°C	-60	-21	-40
Relative permittivity	-	2.7	3.2	2.2
Tan δ	-	< 0.0001	0.05	0.001

Tabelle 4-5: Physikalische Eigenschaften der untersuchten Isolieröle bei 25 °C [Yas11:792]

Als festes Isoliermaterial wurden Nomex ® und Kraftpapier, das üblicherweise in Leistungstransformatoren eingesetzt wird, untersucht. In **Tabelle 4-6** sind die Eigenschaften der untersuchten festen Isolierstoffe aufgelistet.

Insulator	Thickness (mm)	Relative permittivity (At silicone oil impregnation)	Relative permittivity (At ester oil impregnation)	Volume resistivity (Ω -cm)
Nomex®	0.52	3.3	3.6	10^{17}
Kraft paper	0.50	3.9	4.2	10^{13}

Tabelle 4-6: Eigenschaften der untersuchten festen Isolierstoffe bei 25 °C [Yas11:792]

Prüfaufbau:

Es wurde der gleiche Versuchsaufbau wie in **Abbildung 4-10** verwendet. Die Versuchskammer ist wie in **Abbildung 4-13** aufgebaut

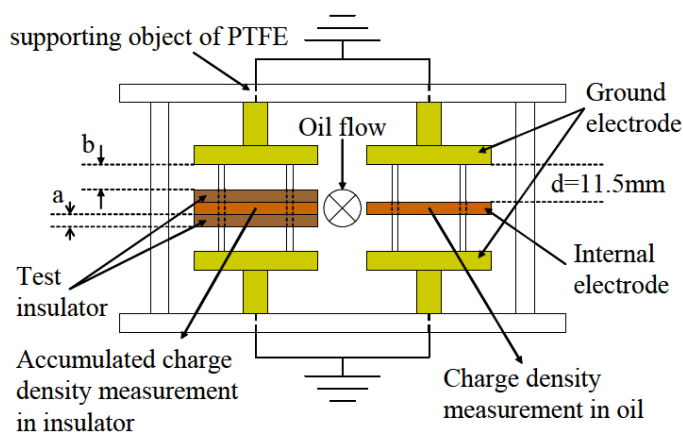


Abbildung 4-13: Testkammer [Yas11:792]

Die Funktion des Versuchsaufbaues wurde bereits in **Kapitel 4.3.1** erklärt. Die einzige Änderung gegenüber dem Aufbau in **Kapitel 4.3.1** besteht darin, dass nicht mehr beide Elektrodenanordnungen verwendet werden, um das Potenzial durch die aufgeladene Isolierflüssigkeit zu messen, siehe **Abbildung 4-11**, sondern nun ergänzend auch das Potenzial eines festen Isolierstoffes erfasst wird, vergleiche **Abbildung 4-13**. Die rechte Elektrodenanordnung wird verwendet, um das generierte Potenzial von der aufgeladenen Isolierflüssigkeit zu messen. Die linke Elektrodenanordnung misst das Potenzial am festen Isolierstoff.

Die Durchflussmenge wurde auf 2,5 l/min eingestellt. Die relative Umgebungsfeuchtigkeit betrug $\leq 60\%$ und die Feuchte der Isolierflüssigkeit war ≤ 10 ppm. Die Temperatur wurde schrittweise erhöht zwischen 30, 50, 70, 100 und 130 °C. Mindestens fünf Messungen wurden bei jeder Temperaturstufe durchgeführt. Eine Messung dauerte 30 Minuten. Das Potenzial der inneren Elektroden wurde mit einem Oberflächen-

Elektrometer ermittelt und mit Hilfe von Berechnungsformeln wurde die Ladungsdichte in der Isolierflüssigkeit sowie die angesammelte Ladungsdichte im festen Isolierstoff berechnet.

Die Berechnung für die Ladungsdichte in der Isolierflüssigkeit erfolgte über die **Formel F. 4-1**:

$$\rho_{oil} = \frac{2\varepsilon_{oil}}{d^2} * V_{oil} \quad F. 4-1$$

ρ_{oil} Ladungsdichte V_{oil} Potenzial der inneren Elektrode
 d Abstand zwischen der inneren und geerdeten Elektrode ε_{oil} relative Permittivität der Isolierflüssigkeit

Die Berechnung für die angesammelte Ladungsdichte im festen Isolierstoff erfolgte über die Formeln **F. 4-2** und **F. 4-3**:

$$\rho_S = \frac{V_S}{k_S} - \frac{k_{oil}}{k_S} * \rho_{oil} \quad F. 4-2$$

$$k_S = \frac{a^2}{2\varepsilon_S} + \frac{a(b-a)}{\varepsilon_{oil}}, k_{oil} = \frac{(b-a)^2}{2\varepsilon_{oil}} \quad F. 4-3$$

ρ_S angesammelte Ladungsdichte V_S Potential der inneren Elektrode
 a Dicke des getesteten festen Isolierstoffes b Abstand vom festen Isolierstoffes zur geerdeten Elektrode
 ε_S relative Permittivität des festen Isolierstoffes

Ergebnisse:

Für das getestete Silikonöl und den Ester wurden die Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte der ermittelten Ladungsdichte in **Tabelle 4-7** zusammengefasst.

Temperature (°C)	Charge density (pC/ml)					
	Silicone oil			Ester oil		
	min	ave	max	min	ave	max
30	-0.6	-1.3	-1.5	1.41	2.22	3.32
50	-1.0	-1.4	-1.9	0.10	0.40	0.76
70	-1.8	-2.1	-2.3	0.06	0.08	0.12
100	-3.4	-3.8	-4.5	0.00	0.01	0.04
130	-2.1	-2.8	-3.3	0.00	0.00	0.00

Tabelle 4-7: Ladungsdichte von Silikonöl und Ester [Yas11:793]

Die Ladungsdichte der getesteten Flüssigkeit in Abhängigkeit der Temperatur wurde in der **Abbildung 4-14** dargestellt.

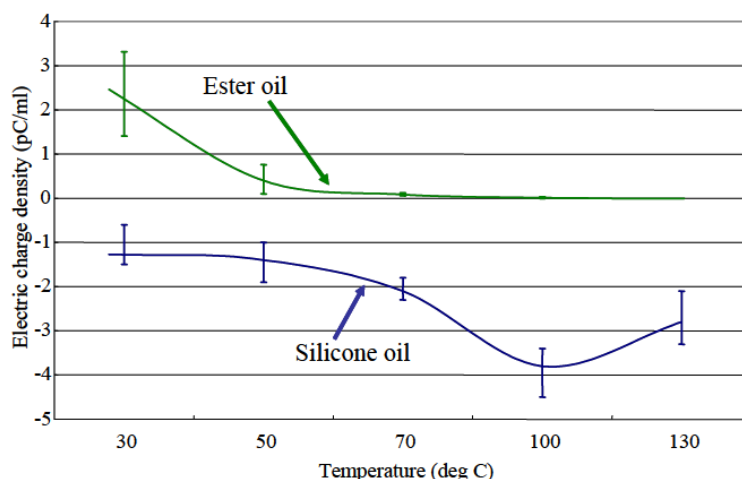


Abbildung 4-14: Ladungsdichte von Ester und Silikonöl in Abhängigkeit der Temperatur [Yas11:793]

Zusammenfassend wurde herausgefunden, dass die Ladungsdichte bei allen Temperaturen bei Silikonöl negativ und bei Ester positiv ist. Die maximale Ladungsdichte wurde bei Silikonöl bei einer Temperatur von 100 °C gemessen. Bei Ester geht die Ladungsdichte bei steigender Temperatur gegen Null. Ausgehend von den maximalen aufgetretenen Durchschnittswerten sind beide Werte von Silikonöl mit -3,8 pC/ml und Esteröl mit 2,22 pC/ml ziemlich niedrig auch wenn die Temperatur unterschiedlich war.

In der **Tabelle 4-8** ist die angesammelte Ladungsdichte für die Isoliermaterialien Nomex® und Kraftpapier in Silikonöl aufgelistet.

Temperature (°C)	Accumulated charge density (pC/ml)					
	Nomex®			Kraft paper		
	min	ave	max	min	ave	max
30	1.7	2.6	3.0	2.5	3.0	3.2
50	-0.5	-1.1	-1.7	-0.4	-1.0	-1.7
70	-3.9	-4.0	-4.4	-3.9	-4.2	-4.5
100	-5.9	-7.2	-9.9	-6.5	-8.4	-10.4
130	-2.7	-4.9	-6.0	-3.1	-6.0	-7.3

Tabelle 4-8: Angesammelte Ladungsdichte auf festen Isoliermaterialien in Silikonöl [Yas11:793]

In der **Tabelle 4-9** ist die angesammelte Ladungsdichte für die Isoliermaterialien Nomex® und Kraftpapier in Ester aufgelistet.

Temperature (°C)	Accumulated charge density (pC/ml)					
	Nomex®			Kraft paper		
	min	ave	max	min	ave	max
30	-0.54	-1.33	-2.51	-2.31	-3.53	-4.18
50	-0.24	-0.52	-1.69	-0.48	-0.81	-0.98
70	-0.04	-0.14	-0.54	-0.27	-0.32	-0.40
100	0.00	-0.11	-0.20	-0.17	-0.27	-0.39
130	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.09

Tabelle 4-9: Angesammelte Ladungsdichte auf festen Isoliermaterialien in Ester [Yas11:793]

Vergleicht man nun diese ermittelten Werte, erkennt man, dass Nomex[®] tendenziell eine geringere angesammelte Ladungsdichte in beiden Isolierflüssigkeiten besitzt als Kraftpapier. Das Temperaturverhalten der festen Isolierstoffe bezüglich der angesammelten Ladungsdichte ist bei gleicher Flüssigkeit gleich. Die Ladungsdichte ist im Silikonöl für beide festen Isolierstoffe maximal bei einer Temperatur von 100 °C.

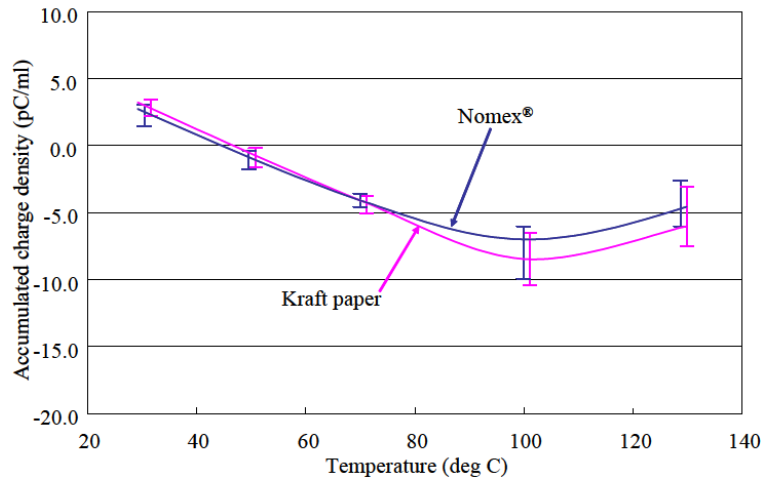


Abbildung 4-15: Angesammelte Ladungsdichte auf festen Isoliermaterialien in Silikonöl [Yas11:794]

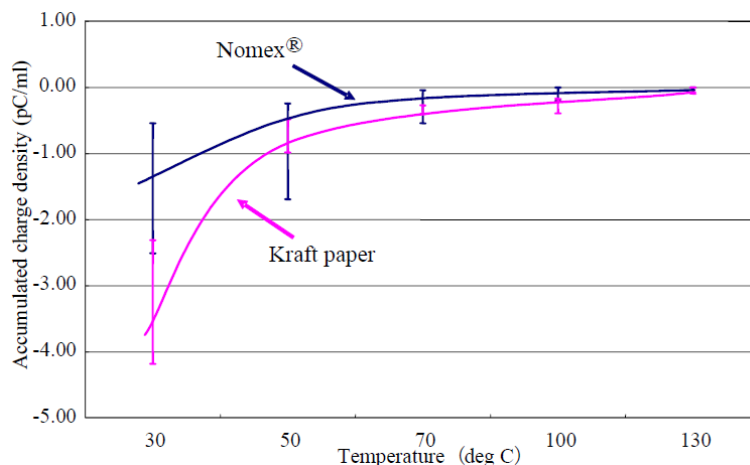


Abbildung 4-16: Angesammelte Ladungsdichte auf festen Isoliermaterialien in Ester [Yas11:794]

4.3.3 Filtermethode an der Universität von Nagoya

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Sai11] entnommen.

Da die Aufladung über einen Filter erfolgt, wird dieser Versuchsaufbau zu den Filtermethoden gezählt.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- PFAE (Palm Fatty Acid Ester Oil)
- Gealtes Mineralöl

In der **Tabelle 4-10** sind einige Eigenschaften der getesteten Isolierflüssigkeiten aufgelistet. Es wurde gealtes Mineralöl verwendet, da dieses eine höhere Ladungsdichte aufweist als neues Öl.

	PFAE	Mineral oil (degraded oil)
Specific gravity [g/cm ³] at 15°C	0.86	0.88
Kinematic viscosity [mm ² /s] at 40°C	5.06	8.1
Relative permittivity	2.95	2.2
Volume resistivity [Ω·cm] at 25°C	>10 × 10 ¹²	4.4 × 10 ¹²
Charge relaxation time [s]	>2.61	0.837
Kerr constant [m/V ²]	9.1 × 10 ⁻¹⁷	1.97 × 10 ⁻¹⁵

Tabelle 4-10: Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten [Sai11:2]

Prüfaufbau:

In **Abbildung 4-17** ist der Testkreislauf dargestellt, der an der Universität Nagoya aufgebaut worden ist. Dieser besteht aus einem Messtank, einer Pumpe, einem Aufladungsfilter und zwei Behältern. Einer dient als Relaxationsbehälter und der andere als Zwischenspeicher.

Für die Messung wurde eine Durchflussgeschwindigkeit von $233 \frac{cm^3}{s}$ eingestellt und alle Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Isolierflüssigkeit wurde beim Durchfließen des Aufladungsfilters aufgeladen. Dabei absorbierte der Filter die negativen Ladungen und lud die Isolierflüssigkeiten positiv auf. Mittels eines Amperemeters wurde die generierte Ladungsdichte gemessen.

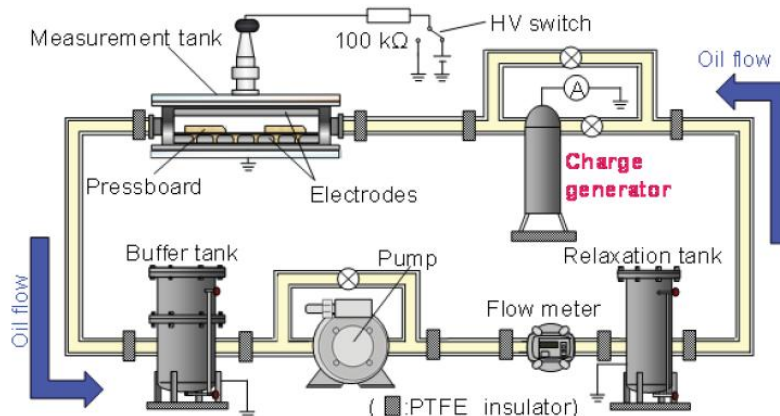


Abbildung 4-17: Schematische Darstellung des Testkreislaufes an der Universität Nagoya [Sai11:2]

In **Abbildung 4-18** ist der Aufbau zur Simulation eines Kühlkanales in einem Hochspannungstransformator dargestellt. Dabei sind Pressboardplatten an der unteren Elektrode so angeordnet worden, dass ein typischer Fluss der Isolierflüssigkeit nachgebildet wird. Die obere Elektrode wurde bei den Versuchen an einem Hochspannungsgenerator oder an Erde angeschlossen. Diese Versuchsanordnung dient zur Untersuchung der elektrischen Feldstärke im flüssige/festen Isolationssystem.

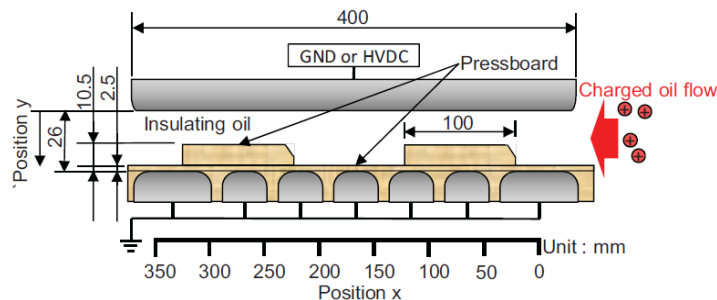


Abbildung 4-18: Aufbau des Messtanks zur Nachbildung des Kühlkanales eines Hochspannungstransformators [Sai11:2]

Die Messung der elektrischen Feldstärke im Messtank erfolgt unter Anwendung des Kerrs- Effektes. Es wird ein He-Ne Laserstrahl polarisiert, durch die elektrisch beanspruchte Isolierflüssigkeit geleitet und mittels Photodiode gemessen. Dadurch ist eine direkte Messung der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Zeit möglich. Die Genauigkeit liegt beim PFAE bei $0,1 \frac{kV}{mm}$ und beim Mineralöl bei $0,01 \frac{kV}{mm}$.

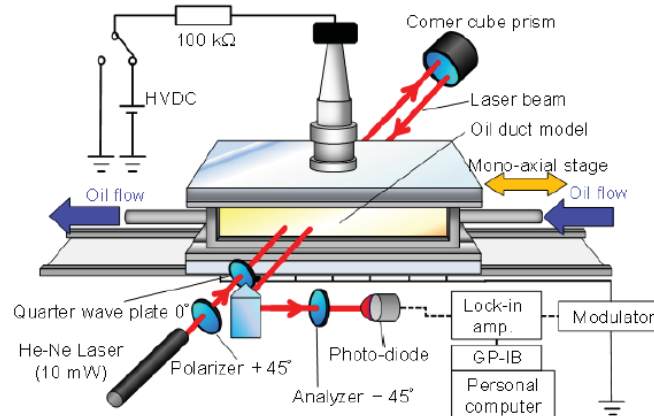


Abbildung 4-19: Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke unter Ausnutzung des Kerr Effektes [Sai11:2]

Ergebnisse:

In **Abbildung 4-20** ist die Ladungsdichte der Isolierstoffe in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Diese wurde direkt beim Aufladungsfilter gemessen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Aufladung vom PFAE höher ist als vom Mineralöl. Bei der dargestellten Messung begann die Isolierflüssigkeit bei $t=0$ zu fließen.

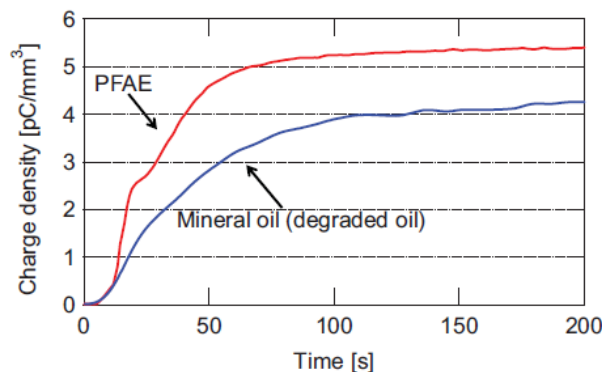


Abbildung 4-20: Ladungsdichte von PFAE und Mineralöl in Abhängigkeit der Zeit beim Aufladungsfilter [Sai11:2]

Abbildung 4-21 und **Abbildung 4-22** zeigen die elektrische Feldstärke im Messtank als Funktion der Zeit an der Position x (siehe **Abbildung 4-18**), die mittels Kerr-Effekt gemessen wurde. Die obere und untere Elektrode waren geerdet. Es ist anzumerken, dass ein aufwärts gerichtetes elektrisches Feld hier als negativ definiert ist. Aus der gemessenen Feldstärke kann mit folgendem Zusammenhang auf die Ladungsdichte in der Isolierflüssigkeit geschlossen werden:

$$E_{oil} = -\frac{q_s}{\epsilon_{oil}}(d_{oil} - y) - \frac{q_a - \epsilon_{PB}E_{PB}}{\epsilon_{oil}} \quad F. 4-4$$

$\epsilon_{oil}, \epsilon_{PB}$	Permittivität von Isolierflüssigkeit und Pressboard	q_s	Raumladungsdichte in der Isolierflüssigkeit
q_a	angesammelte Ladungsdichte am Pressboard	d_{oil}	Spaltlänge in Isolierflüssigkeit
E_{PB}	elektrisches Feld im Pressboard	y	Distanz von der oberen Elektrode

Die Raumladungsdichte in den beiden Isolierflüssigkeiten ist in **Abbildung 4-23** dargestellt.

Es hat sich herausgestellt, dass das elektrische Feld im PFAE geringer ist als im Mineralöl. Jedoch ist die Ladungsdichte im PFAE dafür größer. Dies wird mit der größeren Permittivität vom PFAE ($\epsilon_{PFAE} = 2.95$ und $\epsilon_{mineral} = 2,2$) begründet. Jedoch ist das Ladungsverhalten der beiden Isolierstoffe ähnlich.

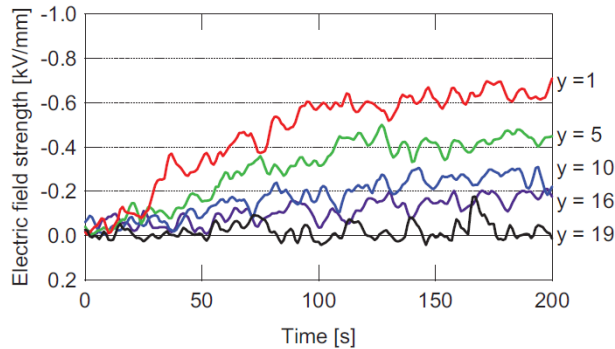


Abbildung 4-21: Elektrische Feldstärke in PFAE bei $x=150\text{ mm}$ [Sai11:3]

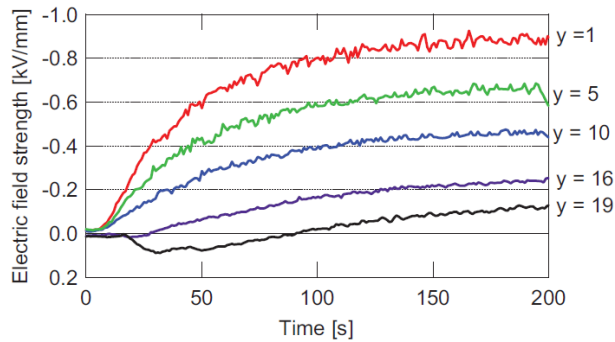


Abbildung 4-22: Elektrische Feldstärke in Mineralöl bei $x=0\text{ mm}$ [Sai11:3]

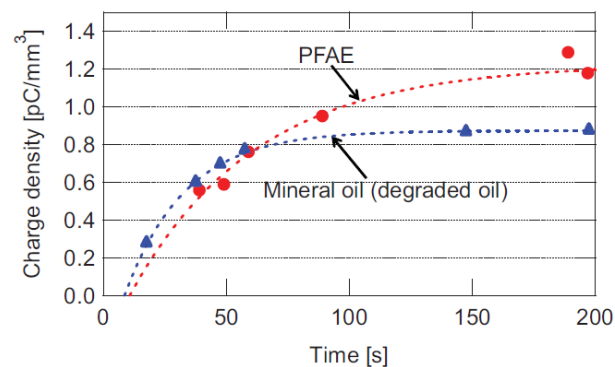


Abbildung 4-23: Raumladungsdichte der Isolierstoffe PFAE und Mineralöl in Abhängigkeit der Zeit [Sai11:3]

In der **Abbildung 4-24** und **Abbildung 4-25** wurde die elektrische Feldstärke in der Versuchskammer im eingeschwungenen Zustand dargestellt. Dabei waren wieder die obere und untere Elektrode an Erde angeschlossen. Aus den ermittelten Messwerten wurde die Verteilung der Raumladungsdichte mit der **Formel F. 4-4** berechnet, siehe **Abbildung 4-26**. Beide Isolierflüssigkeiten zeigen einen Abfall der elektrischen Feldstärke vom Einlass bis zum Auslass der Versuchskammer. Durch das negative elektrische Feld wanderten die Ladungen zur oberen Elektrode und verschwanden dort. Dadurch wird am Ende des Messtanks ein geringeres elektrisches Feld als am Anfang gemessen. Es hat sich gezeigt, dass der Ladungsverfall im PFAE geringer ist als im Mineralöl. Dies wird durch die geringe Ladungsrelaxationszeit vom Mineralöl erklärt.

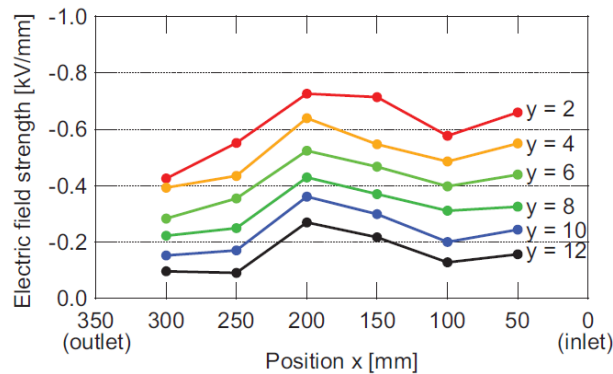


Abbildung 4-24: Elektrische Feldverteilung in der Versuchskammer mit PFAE [Sai11:3]

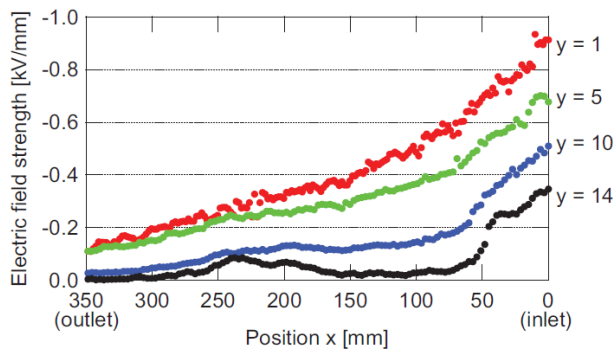


Abbildung 4-25: Elektrische Feldverteilung in der Versuchskammer mit Mineralöl [Sai11:3]

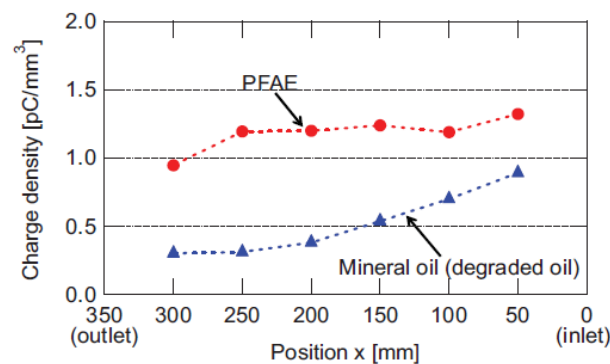


Abbildung 4-26: Verteilung der Raumladungsdichte von PFAE und Mineralöl [Sai11:3]

4.3.4 Untersuchungen mittels mini-static charge testers: Untersuchungen 1 von Perrier

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Per06] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Naphtenisches Mineralöl (1)
- Synthetische Ester (2)
- Silikonöl (1)

Bei dieser Untersuchung wurde versucht die Eigenschaften des Mineralöles zu verbessern, indem es mit anderen Isolierflüssigkeiten vermischt wird. Unter anderem wurde das ECT-Verhalten der reinen Isolierflüssigkeiten und von Mischungen von Mineralöl mit den anderen Isolierflüssigkeit bei zwei unterschiedlichen Feuchten untersucht.

In der **Tabelle 4-11** sind die Eigenschaften der getesteten Flüssigkeiten aufgelistet.

Properties (IEC)	Type of Oil			
	Naphtenic Mineral oil (A)	Synthetic Ester oil (B)	Synthetic Ester oil (C)	Silicon Oil (D)
Density (20°C) g/cm ³	0.89	0.97	0.99	0.96
Viscosity (40°C) mm ² /s	8.9	30	33	35
Pour point °C	-57	-48	-51	-50
Thermal conductivity (20°C) W/m.K	0.13	0.16	0.14	0.15
Flash point °C (PM method)	148	257	> 250	305
Dissipation factor (90°C)	<0.001	0.004	0.02	<0.001
Dielectric constant (20°C)	2.2	3.2	3.3	2.7
Breakdown voltage – kV	>70	>75	>75	>50
Max. water solubility (25°C) ppm	70	2500	2500	200

Tabelle 4-11: Eigenschaften der getesteten Isolierflüssigkeiten laut Datenblatt [Per06:557]

Prüfaufbau:

Die Untersuchungen wurden mittels *mini-static charge testers* durchgeführt. Bei dieser Untersuchungsmethode wird die Isolierflüssigkeit durch einen Zellulosefilter gepresst und dabei elektrostatisch aufgeladen. Die Strommessung erfolgt auf dem Papierfilter (Whatman 541) mit einem Elektrometer. Zur Beschreibung der ECT wird die Ladungsdichte herangezogen, die über **Formel F. 4-5** errechnet werden kann:

$$\rho = i * t * \frac{10^{12}}{V} \quad F. 4-5$$

ρ Ladungsdichte in $\frac{\mu C}{m^3}$

t Zeit in s

i Strom in A

V Flüssigkeitsvolumen in ml

Ergebnisse:

In der **Abbildung 4-27** ist erkennbar, dass die Ladungsdichte bei den Estern viel höher ist als beim Mineral- und Silikonöl. Die ECT der gemischten Flüssigkeiten liegen zwischen jener der reinen Isolierstoffe, was eine Verbesserung gegenüber dem Ester alleine zeigt. Außerdem ist die ECT der Isolierflüssigkeiten geringer bevor sie aufbereitet worden sind. Das ist am besten beim Silikonöl erkennbar. In **Abbildung 4-28** ist der Zusammenhang zwischen der Ladungsdichte und dem spezifischen Widerstand der Isolierstoffe dargestellt. Bei steigendem spezifischem Widerstand fällt die Ladungsdichte.

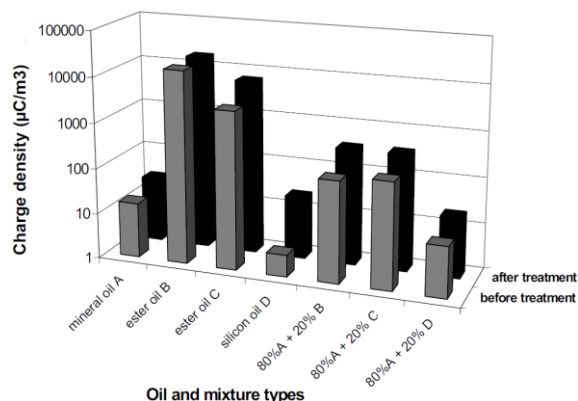


Abbildung 4-27: Ladungsdichte der reinen und gemischten Isolierflüssigkeiten, vor und nach einer Aufbereitung [Per06:562]

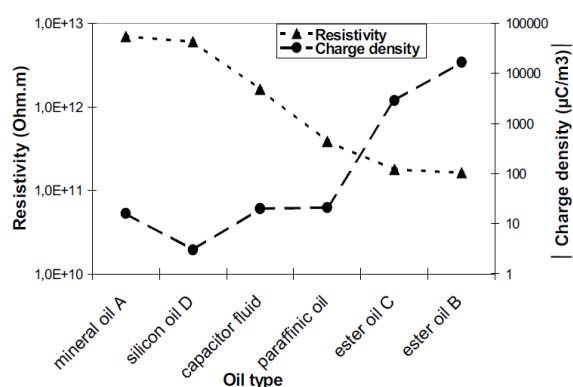


Abbildung 4-28: Zusammenhang zwischen ECT und spezifischem Widerstand [Per06:562]

4.3.5 Untersuchungen mittels mini-static charge testers: Untersuchungen 2 von Perrier

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Per09] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Pflanzenöle (3)
- Synthetischer Ester (Tetra-Ester) (1)
- Silikonöl (1)
- Inhibitiertes und nicht inhibitiertes naphthenisches Mineralöl (je 1)

In der **Tabelle 4-12** steht eine Beschreibung der im Paper behandelten Isolierflüssigkeiten. Diese wurden auf verschiedene Parameter hin untersucht. Die Mineralöle 1, 2, 5, 7, 8 wurden bezüglich der ECT nicht untersucht.

Name	Description	IEC standard
Vegetable oil 1	blend of mono- and tri-ester without additive	/
Vegetable oil 2, 3	Tri-ester	/
Synthetic ester	Tetra-ester	61099 ed. 1
Mineral oil 1, 2, 3, 6	Naphtenic, noninhibited	60296 ed. 3
Mineral oil 4, 7, 8	Naphtenic, inhibited	
Mineral oil 5	Paraffinic, noninhibited	
Silicone oil	Polydimethylsiloxane	60836 Ed. 2

Tabelle 4-12: Übersicht der untersuchten Isolierflüssigkeiten [Per09:7]

Prüfaufbau:

Es wurde der gleiche Prüfaufbau wie in **Kapitel 4.3.4** verwendet. Die Tests wurden an nicht aufbereiteten, neuen Isolierflüssigkeiten mit erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt durchgeführt. Der Feuchtigkeitsgehalt ist in der **Tabelle 4-13** angegeben.

Oil	Water content at 20°C (ppm)	Water content at 20°C (% RH)
Naph. MO4	17	~31
Naph. MO3	18	~33
Silicone	73	~36
Synth. Ester	102	~4
Veg. oil 3	115	~10
Veg. oil 2	168	~15
Veg. oil 1	180	~25

Tabelle 4-13: Feuchtigkeitsgehalt der getesteten Isolierflüssigkeiten [Per09:11]

Ergebnisse:

In der **Abbildung 4-29** ist erkennbar, dass Ester eine größere Ladungsdichte aufweisen als Mineralöle und Silikonöle. Eine Verbindung zwischen der Ladungsdichte und der Viskosität kann nicht bestätigt werden, da das Silikonöl trotz hoher Viskosität nur wenig Ladung generiert.

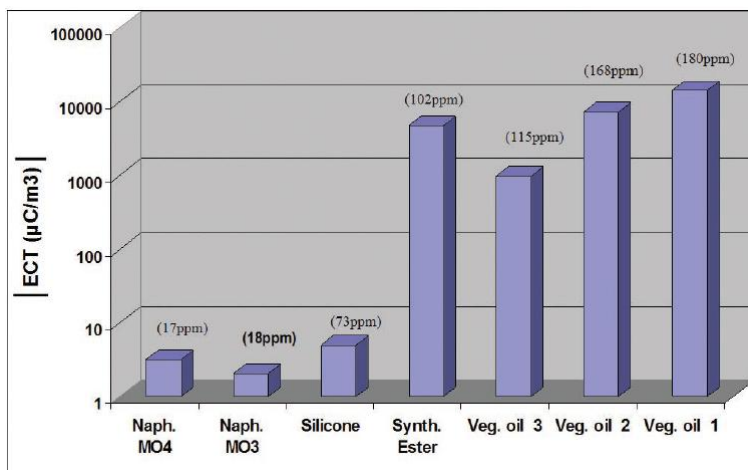


Abbildung 4-29: Ladungsdichte der unterschiedlichen untersuchten Isolierflüssigkeiten [Per09:11]

4.3.6 Untersuchungen mittels mini-static charge testers an der Universität Poitiers

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Pai12] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Natürliche Ester (3)
- Synthetischer Ester (1)
- Mineralöle (5)

Die genaue Beschreibung der einzelnen Isolierflüssigkeiten kann aus der **Tabelle 4-3** entnommen werden. Alle untersuchten Isolierflüssigkeiten befanden sich beim Test im neuwertigen Zustand.

Prüfaufbau:

Der Prüfaufbau funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie jene, die bereits in **Kapitel 4.3.4** und **Kapitel 4.3.5** beschrieben wurden. Der hier beschriebene Aufbau wurde jedoch verbessert, um eine höhere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu erreichen. In **Abbildung 4-30** ist eine Prinzipschaltung des Versuchsaufbaues dargestellt.

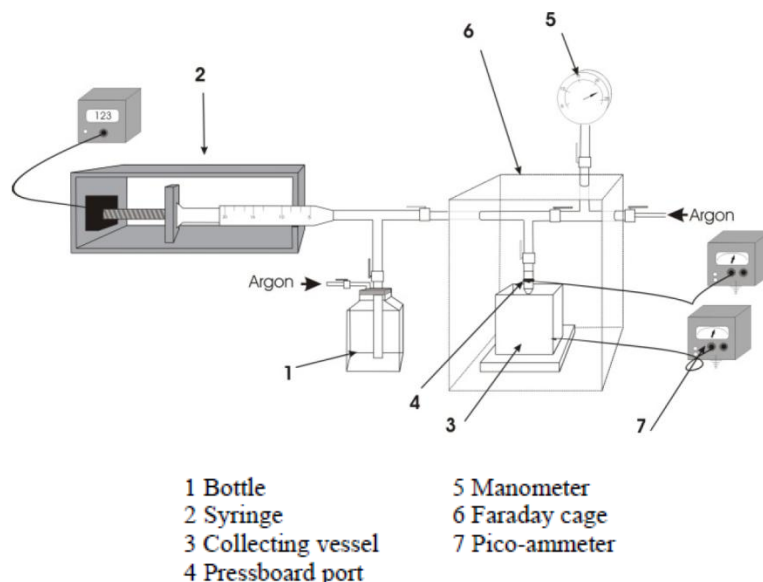


Abbildung 4-30: Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der ECT [Pai12:1538]

Während der Messung werden aus einer Flasche (1) 50 ml einer Isolierflüssigkeit in eine Spritze (2) gefüllt. Dann wird die Isolierflüssigkeit durch den Papierfilter (Whatman 541) mit einer Flussgeschwindigkeit von 100 ml/min gespritzt und in ein Auffanggefäß (3) geleitet. Mittels Manometers (5) wird der Druck während der Messung überwacht. Äußere Störeinflüsse werden mittels Faradayschen Käfigs (6) abgeschirmt. Die Strommessung erfolgt über zwei Picoamperemeter (7). Eines ist mit dem Auffanggefäß (3) verbunden und das andere mit dem Filteranschluss (4).

Ergebnisse:

In der **Abbildung 4-31** ist erkennbar, dass der synthetische und natürliche Ester eine sehr hohe ECT im Vergleich zum Mineralöl besitzen. Die hohe elektrostatische Aufladung wird vermutlich auf die molekulare Struktur des Esters zurückzuführen sein.

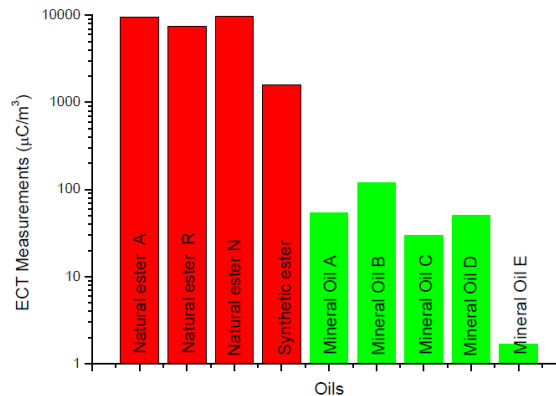


Abbildung 4-31: ECT-Messungen der verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit einem mini-static charge tester [Pai12:1540]

4.3.7 Untersuchungen mittels mini-static charge testers an der Universität von Bangalore

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Poo11] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Synthetischer Ester
- Silikonöl
- Napthenisches Mineralöl
- Isoparaffinisches Mineralöl

Es wurden die Isolierflüssigkeiten im reinen Zustand und die Mischungen von napthenischem Mineralöl mit 0,5 %, 1 %, 2,5 % und 5 % synthetischem Ester sowie isoparaffinischem Mineralöl mit 0,5 %, 1 %, 2,5 % und 5 % synthetischem Ester bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladung untersucht.

Prüfaufbau:

Die Untersuchungen wurden mit einem *mini-static charge tester* durchgeführt. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wird bei dieser Untersuchungsmethode die Isolierflüssigkeit durch einen Zellulosefilter (Whatman 541) gepresst und dabei elektrostatisch aufgeladen. Mittels Stickstoff wird das Isolieröl durch den Filter gepresst und der Gasdruck wird so eingestellt, dass die gewünschte Durchflussgeschwindigkeit erreicht wird. Die austropfende Isolierflüssigkeit wird in einem rostfreien Stahlbehälter gesammelt. Der gesamte Aufbau ist in einem Faradayschen Käfig untergebracht um Störeinflüsse von außen zu vermeiden. Nach Stabilisierung der Testbedingungen wird der Strom entweder an der Filteranordnung oder am Gehäuse des rostfreien Stahlbehälters gegen Erde mittels programmierbarem Elektrometers (Keithley 617) gemessen. Der Strom wird im Sekundentakt automatisch erfasst. Dabei ergibt sich bei der Messung am Stahlbehälter gegen Erde ein positiver und bei der Filteranordnung gegen Erde ein negativer Strom. Jeder Messpunkt repräsentiert den Durchschnittswert von mehr als 600 aufgenommen Messwerten. Dabei beträgt die Streuung der Messwerte weniger als 6 %. Um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wurden die Versuche mehrfach wiederholt. Nach jeder Messung wurde der Versuchsaufbau gereinigt und ein neuer Zellulosefilter eingesetzt. Die Versuche wurden bei unterschiedlichen Temperaturen bis hin zu 80 °C durchgeführt.

Ergebnisse:

In der **Abbildung 4-32** ist das elektrostatische Aufladungsverhalten der einzelnen Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Ester und Silikonöl besitzen die größte Aufladungsneigung. Der Anstieg der elektrostatischen Aufladung mit steigender Temperatur ist für Ester und Silikonöl auch höher als für Mineralöl.

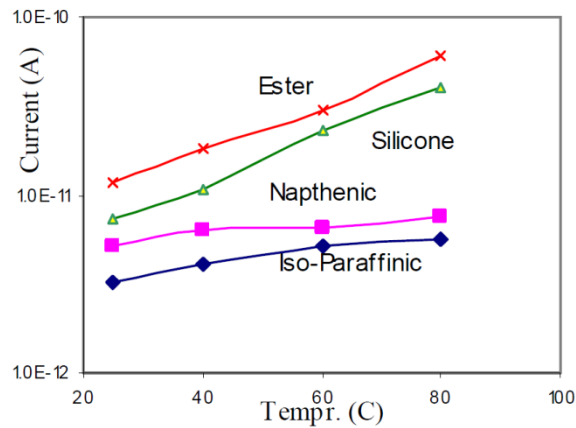


Abbildung 4-32: Elektrostatische Aufladungsneigung der unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten [Poo11:2]

In **Abbildung 4-33** ist das elektrostatische Aufladungsverhalten von synthetischem Ester, isoparaffinischem Mineralöl und deren Mischungen dargestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass die reinen Isolierstoffe eine höhere Aufladungsneigung besitzen als deren Mischungen. Bei allen Flüssigkeiten ist ein Anstieg der Aufladungsneigung bei steigender Temperatur erkennbar. Je höher der Anteil an Ester in der Mischung ist, desto geringer ist die Amplitude der Messströme bei niedrigerer Temperatur. Bei 80 °C sind die ermittelten Werte für die vermischten Isolierflüssigkeiten fast identisch.

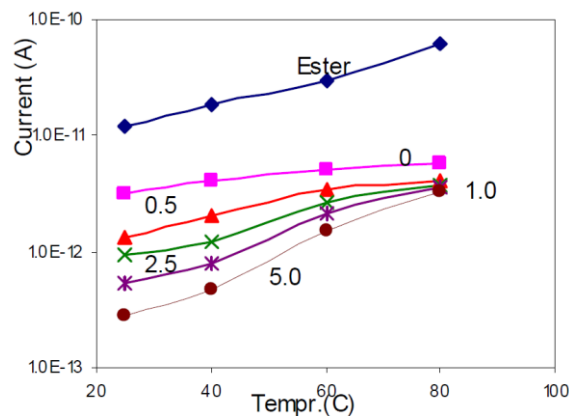


Abbildung 4-33: Elektrostatische Aufladungsneigung von synthetischem Ester, isoparaffinisches Mineralöl und Mischungen von isoparaffinischem Mineralöl mit 0,5 %, 1 %, 2,5 % und 5 % synthetischem Ester [Poo11:4]

In **Abbildung 4-34** ist das elektrostatische Aufladungsverhalten von synthetischem Ester, naphtenischen Mineralöl und deren Mischungen dargestellt. Auch hier hat sich gezeigt, dass die reinen Isolierstoffe eine höhere Aufladung besitzen als deren Mischungen. Die Amplitude der Ströme nimmt mit steigender Konzentration von synthetischem Estern in den Mischungen ab. Naphtenisches Mineralöl und seine Mischungen besitzen eine höhere Aufladung als isoparaffinisches Mineralöl und seine Mischungen.

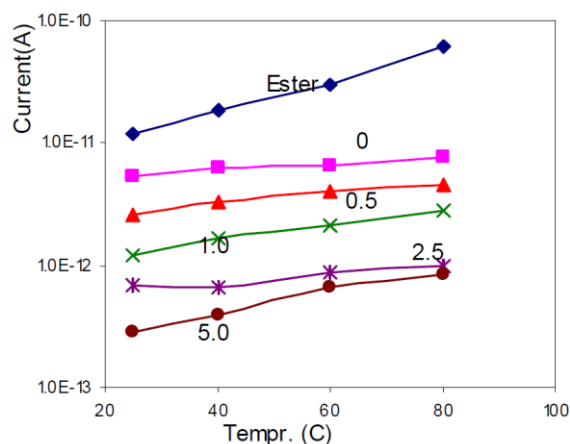


Abbildung 4-34: Elektrostatische Aufladungsneigung von synthetischem Ester, naphthenischem Mineralöl und Mischungen von naphthenischem Mineralöl mit 0,5 %, 1 %, 2,5 % und 5 % synthetischem Ester [Poo11:4]

4.4 UNTERSUCHUNGEN MIT ROTIERENDER STRÖMUNG

4.4.1 Untersuchungen mittels spinning disc an der Universität von Quebec

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Tal13] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

- Natürliche Ester (2)
- Synthetische Ester (2)
- Paraffinisches Mineralöl (1)

Die Eigenschaften der einzelnen Isolierflüssigkeiten können aus der **Tabelle 4-14** und **Tabelle 4-15** entnommen werden.

TEST	OIL	SE1	SE2	NE1	NE2
Dissipation factor @ 60Hz, 100°C, D924 100°C, D924 @ 50Hz, 90°C, IEC60247	0.001			≤ 4	003
Breakdown voltage (kV) @ 60Hz, D 877 D 1816 IEC 60156	55	< 75	≥ 45	≥ 35	> 75
Gassing tendency (µL/min) D 2300	-10	-	-	≤ 0	-
Water content D6304 (ppm) D 1533 (ppm) D 1533 (mg/kg) IEC 60814 (mg/Kg)	< 25	50		≤ 200	50
Interfacial Tension (dynes/cm @ 25°C), D 971	48	-	-	-	-
Acidity (mgKOH/g) IEC 610999.11 D974 IEC 62021or IEC 62021 IEC 62021	< 0.01	max 2.0		≤ 0.06	< 0.03
Viscosity (cSt @ 40°C), D 445 40°C, ISO 3104	9.2	28	≤ 35	≤ 50	37
Color D 1500 ISO 2211	< 0.5	125	≤ 200	≤ 1.0	-
Flash point (°C), D 92 ISO 2592 ISO 2719	170	260	≥ 250	≥ 275	327
Pour point (°C), D 97 D5950 ISO 3016	-60	-60	≤ -45	≤ -10	-31

Tabelle 4-14: Technische Daten der untersuchen Isolierflüssigkeiten [Tal13:379]

	OIL	SE1	SE2	NE1	NE2
Turbidity (NTU)	0.1	0.47	0.16	0.37	0.35
DDP (u.a.)	0.05	5.1	1.52	20.92	22.03
IFT (dynes/cm)	47	23.5	24	27	23
Water content (ppm)	23	107.1	107.2	90.7	186

Tabelle 4-15: Physikalische chemische Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten bei einer Temperatur von 20 °C [Tal13:380]: paraffinisches Mineralöl (OIL), synthetischer Ester 1 (SE1), synthetischer Ester 2 (SE2), natürlicher Ester 1 (NE1), natürlicher Ester 2 (NE2)

Prüfaufbau:

An der Universität von Quebec wurde eine *spinning disc* aufgebaut, mit der die Isolierflüssigkeiten untersucht wurden, siehe **Abbildung 4-35**.

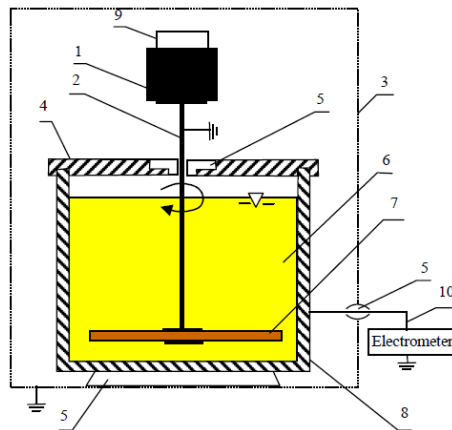


Abbildung 4-35: Darstellung des Messsystems mit einer *spinning disc* auf der Universität von Quebec [Tal13:379]: Gleichstrommotor (1); rotierende Welle (2); Faradayscher Käfig (3); Deckel (4); Isolierung (5); Isolierflüssigkeit (6); rotierende Aluminiumscheibe mit Feststoffprobe (7); Behälter (8); Drehzahlüberwachung (9); Koaxialkabel (10)

Das Prinzip der elektrostatischen Aufladung der *spinning disc* kann unter dem **Kapitel 3.3.2** nachgelesen werden. Bei den Untersuchungen wurden runde Feststoffproben mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Stärke von 5 mm verwendet (7). Als fester Isolierstoff wurde Kraftpapier verwendet und an der rotierende Scheibe beidseitig befestigt. Der gesamte Aufbau befand sich in einem Faradayschen Käfig (3) um Störeinflüsse zu vermeiden. Die Scheibe mit den Feststoffproben wurde über einen Gleichstrommotor (1) angetrieben, der mittels PI-Regler gesteuert wird. Für die Versuche wurde die Drehzahl zwischen 100 und $600 \frac{U}{min}$ variiert. Der mit Isolierflüssigkeit gefüllte Behälter (8) sowie die rotierende Scheibe wurden aus Aluminium gefertigt. Mittels Heizsystem wurde die Temperatur der Isolierflüssigkeit auf $20 \pm 0,1$ °C eingestellt. Mit einer geeigneten Software wurden die Drehzahl und der Aufladestrom gemessen und in eine Excel-Datei für weitere Analysen gespeichert. Der *streaming current* in der Isolierflüssigkeit wurde mittels eines programmierbaren Elektrometers (Keithley 6514) zwischen Behälter und Erde gemessen. An der *spinning disc* wurde das feste Isoliermaterial mittels Stahlmuttern befestigt, siehe **Abbildung 4-36**. Zwischen den einzelnen Untersuchungen wurden alle Komponenten entsprechend gereinigt, um Beeinflussungen zu vermeiden.

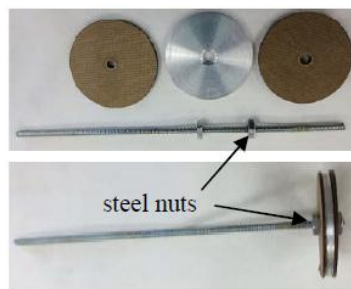


Abbildung 4-36: Aufbau der rotierenden Scheibe [Tal13:379]

Der typische Kurvenverlauf der Messströme ist in **Abbildung 4-37** dargestellt. Dabei kann der Verlauf in vier Bereiche unterschieden werden. Der Bereich (A) beschreibt den Teil der Kurve, bevor die Scheibe zu rotieren beginnt. Im zweiten Teil der Kurve (B) beginnt die Scheibe zu rotieren, wodurch die Aufladung einsetzt und sich zuerst ein transienter Strom (C) einstellt. Dieser geht anschließend in einen stationären Strom (D) über.

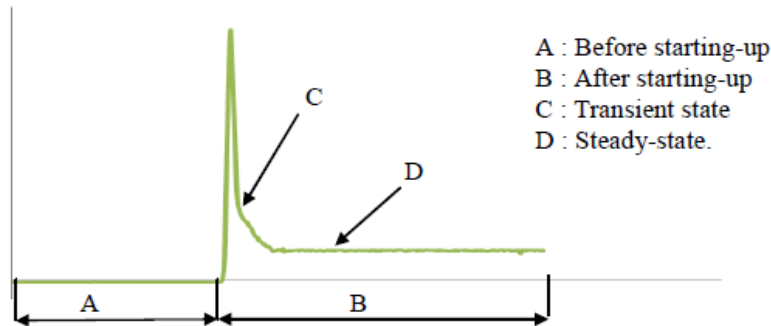


Abbildung 4-37: Typischer Verlauf des Aufladungsstromes [Tal13:380]

Ergebnisse:

Die elektrostatische Aufladung wurde als Funktion der Zeit gemessen. Dabei wurden unterschiedliche alternative Isolierflüssigkeiten mit Mineralöl verglichen. In der **Abbildung 4-38** ist die elektrostatische Aufladung von Mineralöl dargestellt. In den **Abbildung 4-39** bis **Abbildung 4-42** sind die Aufladungsneigungen der alternativen Isolierflüssigkeiten bei unterschiedlichen Drehzahlen dargestellt. Aus den Ergebnissen kann erkannt werden, dass die Geschwindigkeit der drehenden Scheibe die Aufladung beeinflusst. Je größer die Geschwindigkeit desto größer ist der Aufladestrom. Es konnte auch beobachtet werden, dass sich das Vorzeichen des gemessene Strom es verändert. In **Abbildung 4-43** bis **Abbildung 4-45** werden die Aufladeströme der fünf untersuchten Isolierflüssigkeiten als Funktion der Messzeit für verschiedene Rotationsgeschwindigkeiten verglichen. Der synthetische Ester zeigt eine höhere Aufladung als das Mineralöl. Laut den Autoren des vorliegenden Papers könnte dies mit der höheren Viskosität erklärt werden.

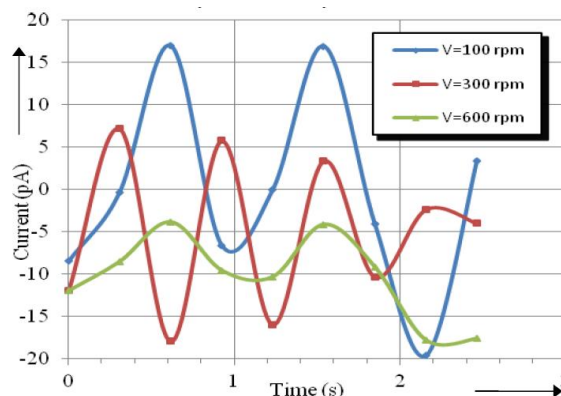


Abbildung 4-38: Elektrostatische Aufladung von Mineralöl bei unterschiedlichen Drehzahlen und einer Umgebungstemperatur von 20 °C [Tal13:380]

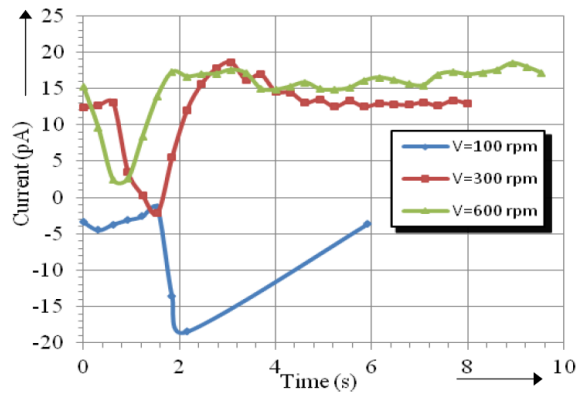


Abbildung 4-39: Elektrostatische Aufladung von synthetischem Ester SE1 bei unterschiedlichen Drehzahlen und einer Umgebungstemperatur von 20 °C [Tal13:380]

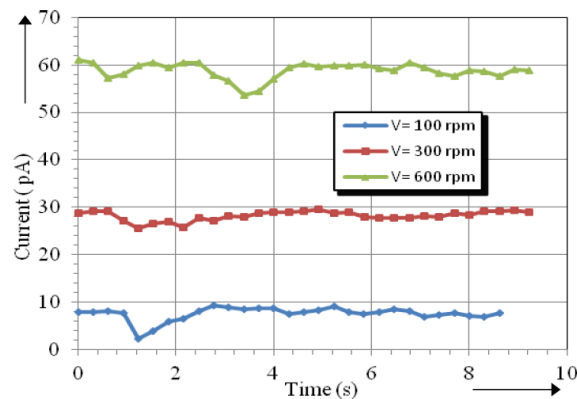


Abbildung 4-40: Elektrostatische Aufladung von synthetischem Ester SE2 bei unterschiedlichen Drehzahlen und einer Umgebungstemperatur von 20 °C [Tal13:380]

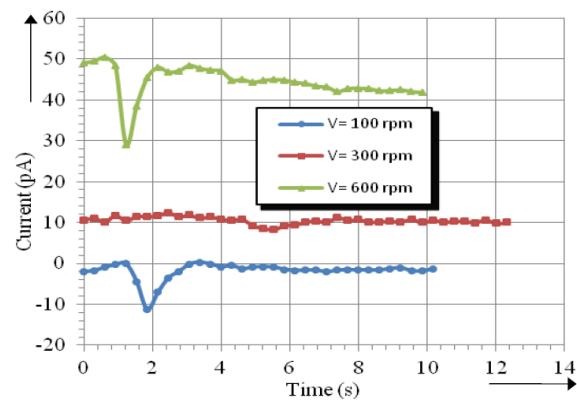


Abbildung 4-41: Elektrostatische Aufladung von natürlichem Ester NE1 bei unterschiedlichen Drehzahlen und einer Umgebungstemperatur von 20 °C [Tal13:381]

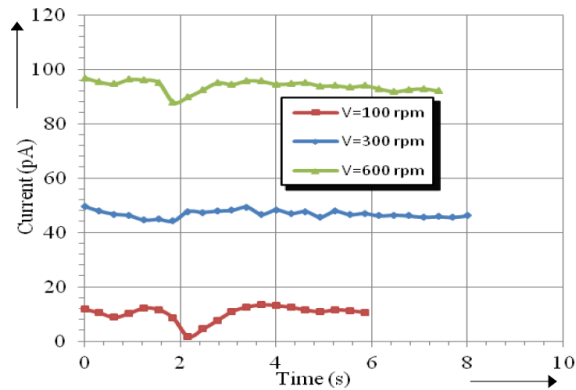


Abbildung 4-42: Elektrostatische Aufladung von natürlichem Ester NE2 bei unterschiedlichen Drehzahlen und einer Umgebungstemperatur von 20 °C [Tal13:381]

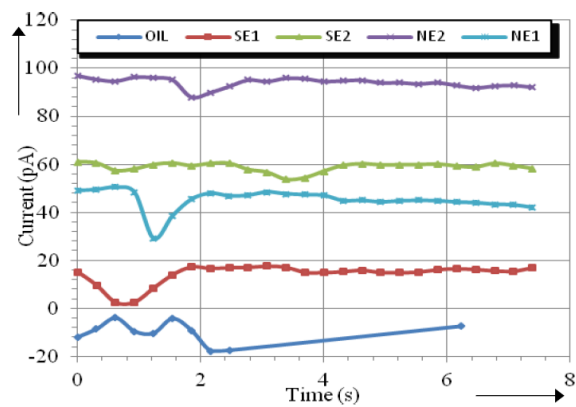


Abbildung 4-43: Zeitliche Entwicklung des Aufladestromes bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und einer Rotationsgeschwindigkeit von 600 rpm [Tal13:381]

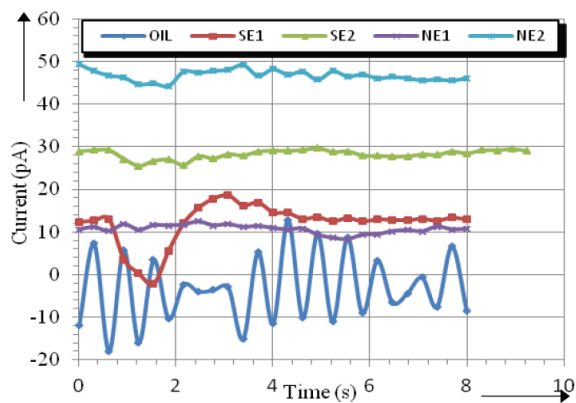


Abbildung 4-44: Zeitliche Entwicklung des Aufladestromes bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und einer Rotationsgeschwindigkeit von 300 rpm [Tal13:381]

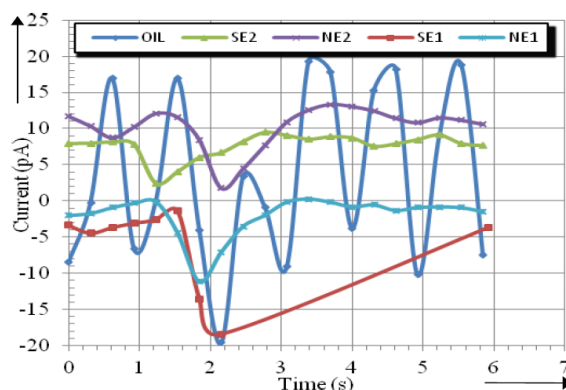


Abbildung 4-45: Zeitliche Entwicklung des Aufladestromes bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und einer Rotationsgeschwindigkeit von 100 rpm [Tal13:381]

4.5 WEITERE UNTERSUCHUNGSMETHODEN

4.5.1 Untersuchungen an der Universität Inha

Alle Informationen, Bilder und Tabellen in diesem Kapitel wurden aus der Veröffentlichung [Cho11] entnommen.

Untersuchte Isolierflüssigkeiten:

Untersuchungen an der Universität Inha in Korea bezüglich der elektrostatischen Aufladungsneigung wurden an folgenden Isolierflüssigkeiten durchgeführt:

- Pflanzenöl (Biotran-35)
- Mineralöl

In der **Tabelle 4-16** sind die wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten aufgelistet.

CHARACTERISTICS		Vegetable oil	Mineral oil
Viscosity	40[°C] cSt	35.94	9.94
	100[°C]cSt	8.27	2.71
Total Acid value (mg KOH/g)		0.07	0.01
Dielectric Strength (kV)		56.7	54.9
Water Content (ppm)		20.7	15.0
Dissipation factor (% , 60Hz, 80°C)		0.45	0.081
Volume content ($\Omega \cdot \text{cm}$, 80°C)		3.0×10^{12}	2.2×10^{14}
Pour Point (°C)		-21	-50

Tabelle 4-16: Eigenschaften der untersuchten Isolierflüssigkeiten [Cho11:1]

Die Aufladung wurde als Funktion der Temperatur untersucht. Weiters wurde auch der Einfluss des Alterungszustandes und der Konzentration an BTA betrachtet.

Prüfaufbau:

In der **Abbildung 4-46** ist ein Prinzipschaltbild des Aufbaus zur Messung der elektrostatischen Aufladung dargestellt. Dieser Aufbau ermöglicht es den Aufladestrom vom Isolationspapier und vom Isolieröl zu messen. Um eine chemische Beeinflussung zu vermeiden wird die Durchflussgeschwindigkeit mittels Stickstoff gesteuert. Für einen Test wird ein Liter Isolierflüssigkeit verwendet, der im Versuchsbehälter 1 auf eine Temperatur zwischen 20 °C und 80 °C gebracht wird. Im Versuchsbehälter 2 befindet sich das Isolierpapier

vom Typ *diamond pattern insulating paper*. Die Größe vom Isolationspapier ist 10 x 10 cm und die Stärke beträgt 0,2 mm. Dieses ist spiralförmig in dem Versuchsbehälter 2 untergebracht, siehe **Abbildung 4-47**. Mittels Faradayschen Käfigs und eines Picoamperemeters wird der Aufladestrom gegen Erde gemessen.

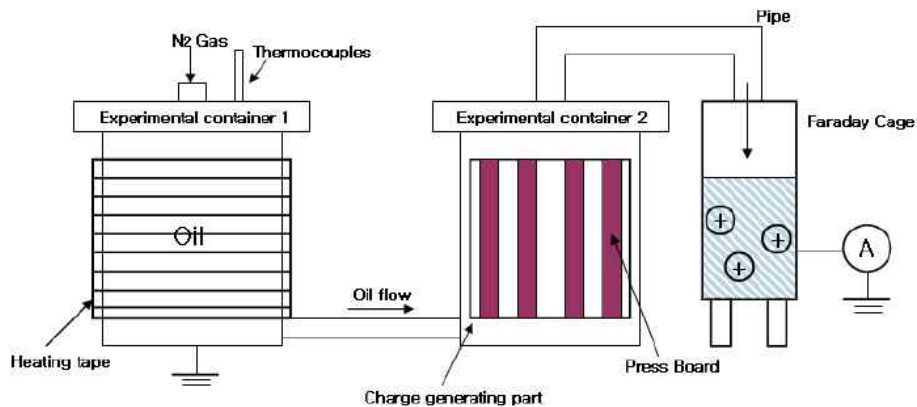


Abbildung 4-46: Messaufbau zur Bestimmung der elektrostatischen Aufladungsneigung an der Universität Inha [Cho11: 2]

Für die Untersuchung des Einflusses der Alterung der Isolierflüssigkeit wurde diese künstlich bei 140 °C für 500, 1000, 1500 und 2000 Stunden gealtert. Die elektrostatische Aufladung wurde für Temperaturen von 20 °C bis 80 °C gemessen. Für die Untersuchung des Einflusses der BTA-Konzentration wurde Benzotrizol (BTA) mit 5, 10, 30 und 50 ppm beigegeben.



Abbildung 4-47: Spiralförmige Anordnung des Isolierpapierees in Versuchsbehälter 2 [Cho11: 2]

Ergebnisse:

In **Abbildung 4-48** und **Abbildung 4-49** ist die Aufladungsneigung unterschiedlich lang gealterter Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur verglichen. Dabei ist erkennbar, dass ein Maximum der elektrostatischen Aufladung für Mineralöl bei einer Temperatur von 40 °C auftritt, siehe **Abbildung 4-48**. Hingegen ist beim Pflanzenöl ein Maximum erst bei einer Temperatur von 60 °C erkennbar, siehe **Abbildung 4-49**.

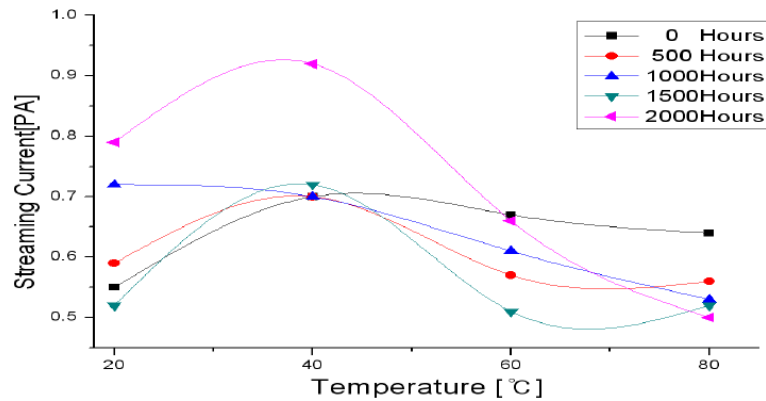


Abbildung 4-48: Auswirkungen der Temperatur und Alterung auf die elektrostatische Aufladung von Mineralöl [Cho11: 3]

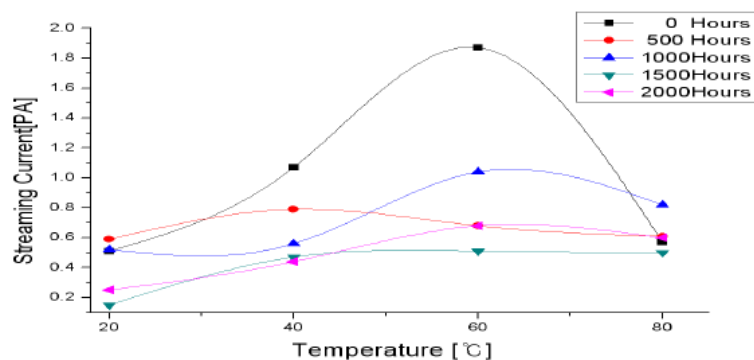


Abbildung 4-49: Auswirkungen der Temperatur und Alterung auf die elektrostatische Aufladungsfähigkeit von Pflanzenöl [Cho11: 3]

In **Abbildung 4-50** ist die Aufladungsneigung von Mineralöl für verschiedene BTA-Konzentrationen bei einer Temperatur von 20 °C dargestellt. Die BTA-Konzentration wurde von 5 bis 50 ppm verändert. Es hat sich gezeigt, dass sich die Polarität des gemessenen Stromes bei Mineralöl im Bereich von 5 bis 30 ppm umkehrt. Beim Pflanzenöl wird dies schon bei einem Wert von 5 ppm erreicht, siehe **Abbildung 4-51**.

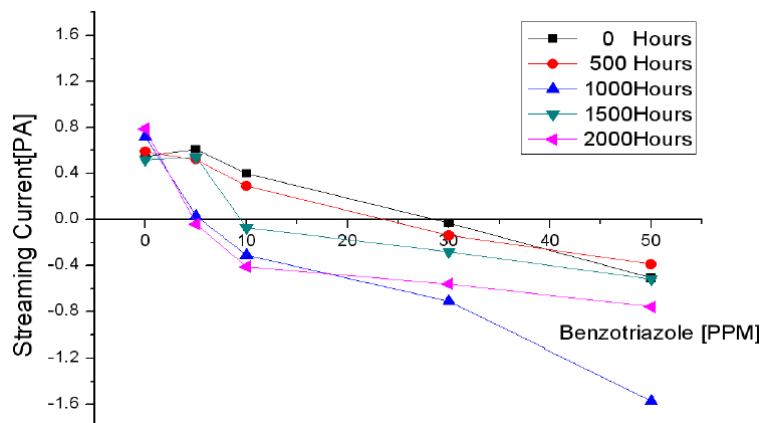


Abbildung 4-50: Auswirkung auf die elektrostatische Aufladungsneigung durch die Beigabe von BTA in Mineralöl bei einer Temperatur von 20 °C [Cho11: 3]

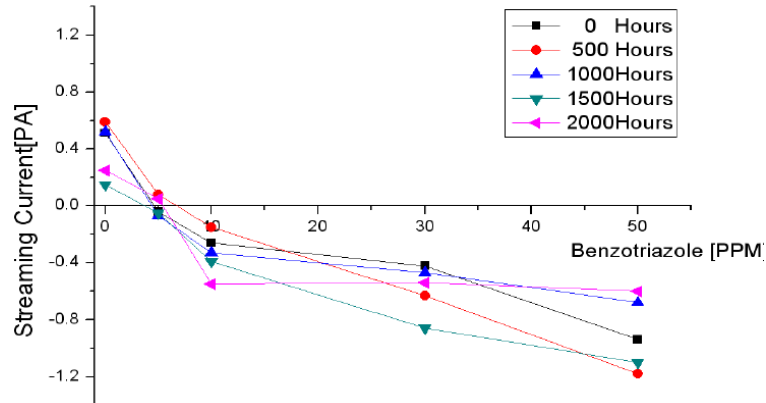


Abbildung 4-51: Auswirkung auf die elektrostatische Aufladungsneigung unter Beigabe von BTA in Pflanzenöl bei einer Temperatur von 20 °C [Cho11: 3]

4.6 ERGEBNISSE DER LITERATURRECHERCHE

Im Rahmen der vorliegenden Literaturrecherche wurde der Vergleich der elektrostatischen Aufladungsneigung verschiedener Isolierflüssigkeiten herausgearbeitet. Für die Bestimmung der Aufladungsneigung alternativer Isolierflüssigkeiten wurde meistens ein Prüfaufbau nach der Filtermethode verwendet. Seltener wurden Prüfaufbauten mit rotierender und ebener Strömung eingesetzt. Zusammengefasst wurde bei der Literaturrecherche herausgefunden, dass bei einer Gegenüberstellung von Mineralöl, Silikonöl und Esterflüssigkeiten in Kombination mit Zellulose die höchste Aufladungsneigung (= Ladungserzeugung) beim Ester gemessen worden ist.

In einer Veröffentlichung wurden neben der Ladungserzeugung auch die Ladungsansammlung an Zellulose bestimmt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die angesammelte Ladung für einige Ester nicht so kritisch ist und ähnlich hohe Werte wie bei mineralischen Ölen besitzt. Aus der Literaturrecherche kann die grundsätzliche Tendenz erkannt werden, dass mit steigender Temperatur und Durchflussgeschwindigkeit die elektrostatische Aufladung zunimmt.

Weiters wurde die Aufladungsneigung von Mischungen der alternativen Isolierflüssigkeiten mit Mineralöl vermessen und in zwei Veröffentlichungen dokumentiert. In einer der beiden Veröffentlichungen wird berichtet, dass die elektrostatische Aufladungsneigung der gemischten Isolierflüssigkeiten zwischen jener der reinen Isolierstoffe liegt, was eine Verbesserung gegenüber dem Ester alleine zeigt. In der zweiten Veröffentlichung wird beschrieben, dass die reinen Isolierflüssigkeiten die höchste Aufladungsneigung besitzen und mit steigendem Anteil des Esters im Mineralöl die Aufladungsneigung sinkt. Außerdem ist die elektrostatische Aufladungsneigung der Isolierflüssigkeiten geringer nach einer Aufbereitung. Beim Silikonöl ist das am besten erkennbar. Die Aufladungsneigung kann auch durch den Zusatz von BTA beeinflusst werden, siehe **Kapitel 4.5.1**. Es wurde festgestellt, dass bei Mineralöl und Pflanzenöl durch den Zusatz von BTA der Aufladestrom sein Vorzeichen mit steigender Temperatur ändert.

Einige Veröffentlichungen behandelten auch die Aufladung von Isolierflüssigkeiten in Kombination mit PTFE. Dabei wies Mineralöl die höchste Ladungsdichte auf.

5 AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN MIT EINER SPINNING DISC

In diesem Kapitel wird der für die praktischen Untersuchungen in dieser Arbeit eingesetzte Prüfaufbau erklärt. Dabei wird auf die Funktionsweise, den Aufbau der Prü fzelle, den Mess- und Steuerkreis eingegangen. Weiters werden Umbauarbeiten, die am ursprünglichen Aufbau durchgeführt worden sind dargestellt. Das beinhaltet unter anderem einen aktuellen Verdrahtungsplan der Steuereinheit für die *spinning disc*. Es werden die Voruntersuchungen beschrieben, die mit dem Messsystem durchgeführt worden sind und die Ergebnisse erklärt. Weiters wird auf die Versuchsvorbereitungen eingegangen. Es befindet sich eine detaillierte Anleitung in diesem Kapitel, in der der Zusammenbau der *spinning disc* beschrieben wird. Es wird schrittweise erklärt, wie die Messproben für den Versuch vorbereitet worden sind und wie der Messzyklus der Messungen ausgesehen hat.

5.1 PRÜFAUFBAU

5.1.1 Funktionsprinzip

Wie schon in **Kapitel 3.3.2** erklärt worden ist, kommt es durch Rotation einer mit dem festen Isolierstoff umgebenen Metallscheibe in einem mit der Isolierflüssigkeit gefüllten Behälter an der Grenzfläche zwischen dem festen und flüssigen Isolierstoff zur Trennung der Ladungsträger. Die Metallscheibe wird über einen Gleichstrommotor angetrieben. Die Drehzahl des Motors ist variabel und kann für die Untersuchungen verändert werden. Die rotierende metallische Scheibe ist aus Aluminium gefertigt. Das feste Isoliermaterial wird auf der Aluminiumscheibe angeschraubt. Es ist auch möglich den festen Isolierstoff auf die Aluminiumscheibe zu kleben, jedoch ist dieser Vorgang zeitintensiver. Montiert wird die Aluminiumscheibe an der Welle des Gleichstrommotors. Durch Rotation der Aluminiumscheibe, wird das Isolieröl in Bewegung versetzt und in weiterer Folge kommt es zur elektrostatischen Aufladung. Die Ladungen in der Isolierflüssigkeit werden durch die Rotationsbewegung von den Pressboardscheiben zum geerdeten Gehäuse verdrängt. Die Gegenladungen verbleiben auf der Oberfläche vom festen Isolierstoff und diffundieren zur leitenden Oberfläche von der Aluminiumscheibe, die über ein Elektrometer mit Erde verbunden ist. Die Ladungen rekombinieren über Erde. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde der Ladungsfluss von der Aluminiumscheibe zur Erde über ein Elektrometer gemessen. Dieser Stromfluss wird in der Fachliteratur als *leakage current* bezeichnet und dient als Beurteilungskriterium für die elektrostatische Aufladungsneigung der Isoliermaterialien [Zlo12:27-28]. In **Abbildung 5-1** ist ein Prinzipschaltbild der *spinning disc* dargestellt.

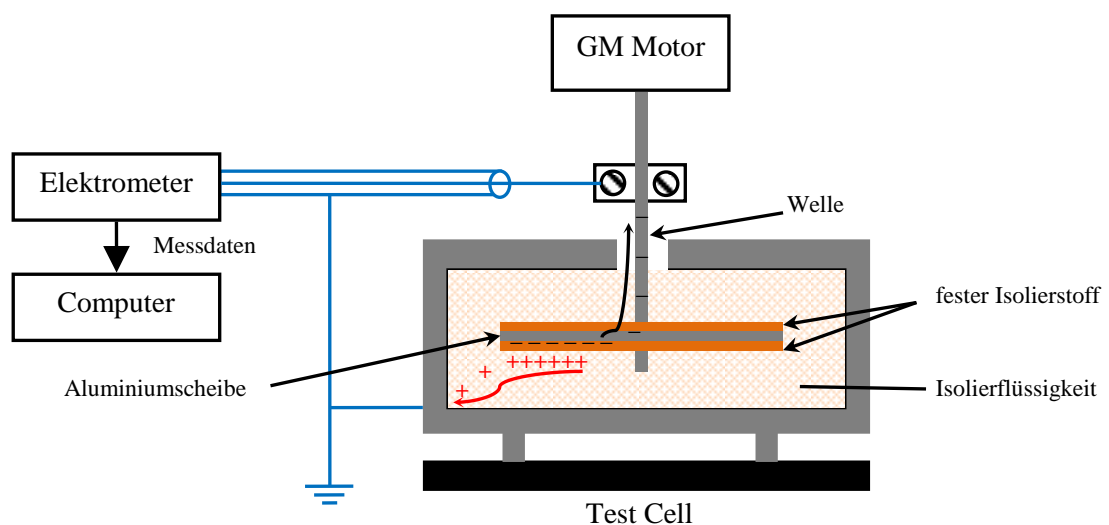


Abbildung 5-1: Prinzipschaltbild von der spinning disc, entsprechend [Zlo12:28]

In **Abbildung 5-2** ist ein CAD-Modell von der Prüfzelle dargestellt, welches auf dem Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement gebaut wurde und für die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen verwendet wurde. In **Abbildung 5-3** ist eine fotografische Aufnahme von der *spinning disc* dargestellt.

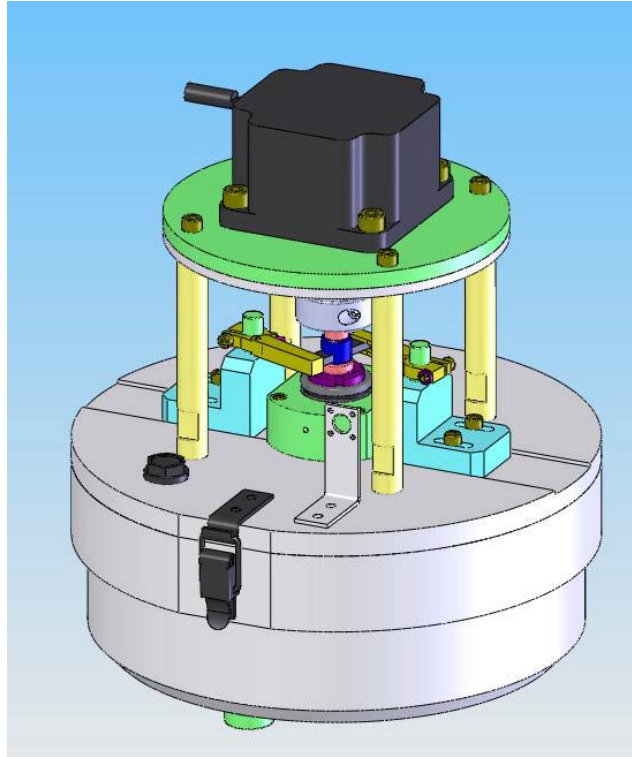


Abbildung 5-2: CAD-Modell von der spinning disc [Zlo12:29]

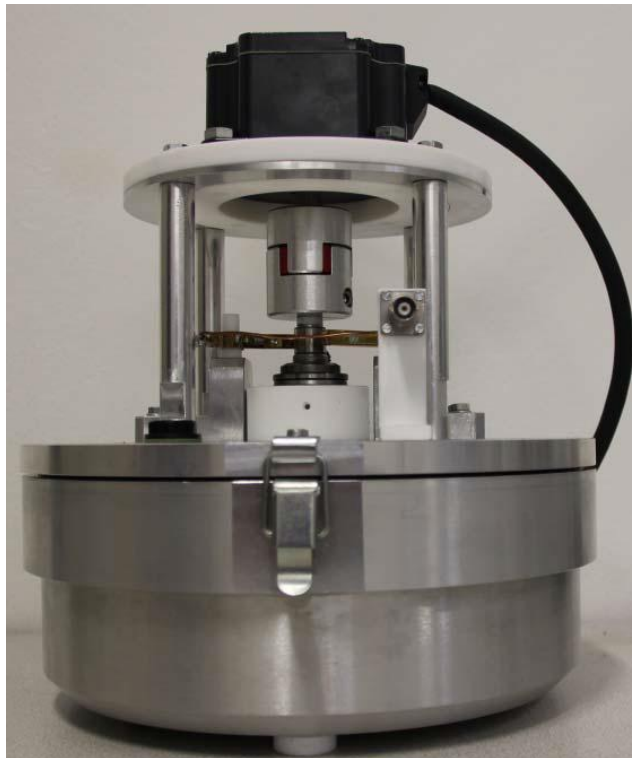


Abbildung 5-3: Fotografische Aufnahme von der spinning disc [Zlo12:30]

5.1.2 Detaillierter Aufbau der Prüfwelle

In einer vorangegangenen Bachelor- und Masterarbeit wurde der Versuchsaufbau erstellt und genauestens beschrieben. Darum wird in dieser Arbeit nur ein kleiner Auszug davon behandelt. Für genauere Informationen wird auf die Arbeiten [Zlo11] und [Zlo12] verwiesen.

In **Abbildung 5-4** ist eine Schnittansicht von der *spinning disc* dargestellt, bei der alle wichtigen Komponenten beschriftet sind.

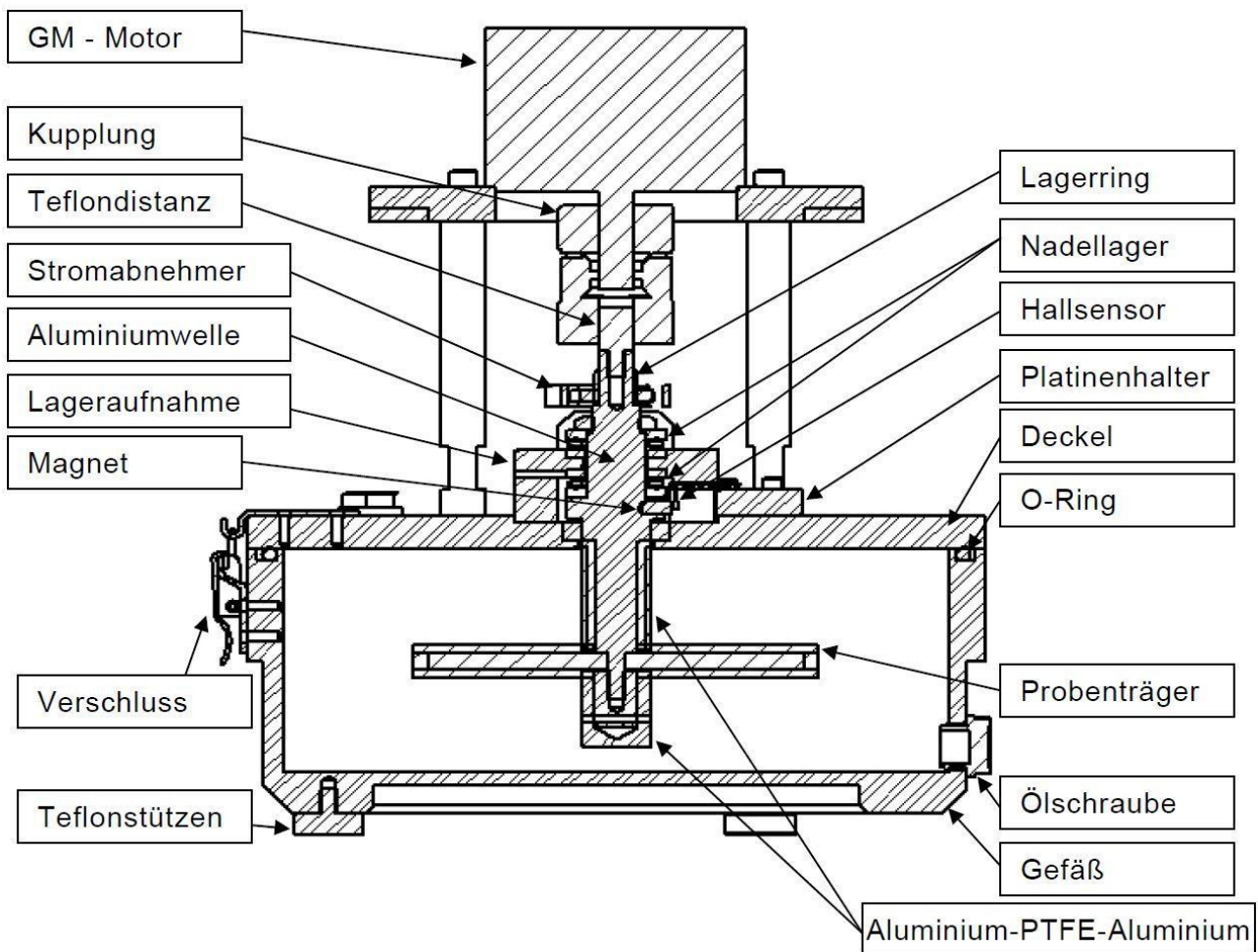


Abbildung 5-4: Schnittansicht der spinning disc [Zlo12:31]

Der Innendurchmesser des Prüfkessels beträgt 230 mm. Der Kessel hat eine Höhe von 80 mm und kann ein Füllvolumen von 3,3 Litern fassen. Die Aluminiumwelle wurde von der Isolierflüssigkeit mit einer PTFE-Hülse isoliert, siehe **Abbildung 5-5**. Damit soll gewährleistet werden, dass die Ladungsträger nur über Erde rekombinieren. Somit kann eine Rekombination der Ladungsträger an der Welle mit der Isolierflüssigkeit ausgeschlossen werden. Um einer unerwünschten elektrostatischen Aufladung entgegen zu wirken, wurde eine zusätzliche Aluminiumhülse über der PTFE-Hülse aufgebracht [Zlo12:32].

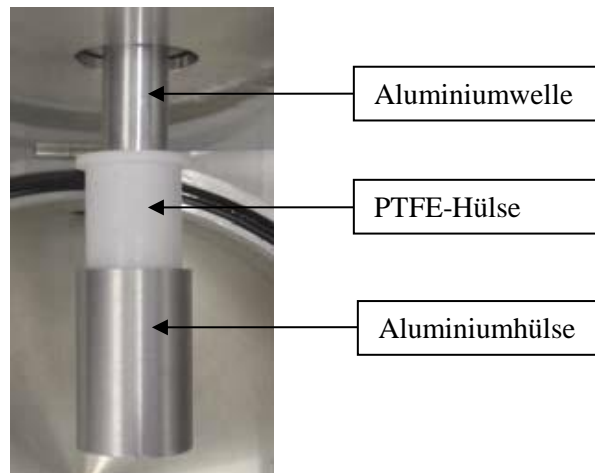


Abbildung 5-5: Isolierung von der Aluminiumwelle bestehend aus einer PTFE-Hülse [Zlo13:32]

Der zu messende *leakage current* wird von der Aluminiumwelle mittels Kohlebürsten abgenommen. Die Kohlebürsten sind in **Abbildung 5-6** im ausgebauten Zustand fotografiert worden.



Abbildung 5-6: Kohlebürsten zur Stromabnahme an der Welle [Zlo:44]

In **Abbildung 5-7** sind die Kohlebürsten bereits eingebaut worden. Der Gleichstrommotor ist über ein Verbindungsstück aus Teflon elektrisch isoliert mit der anzutreibenden Welle gekoppelt. Diese Realisierung ermöglicht es Fehlströme auszuschließen, die vom Gleichstrommotor hervorgerufen werden können [Zlo12:33].

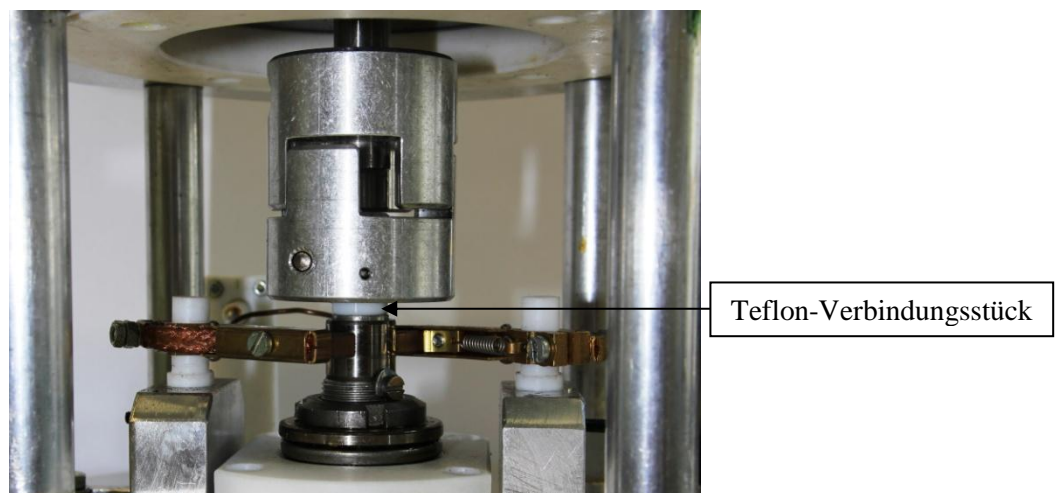


Abbildung 5-7: Elektrisch isolierte Kupplung vom Gleichstrommotor

Der gesamte Prüfaufbau befindet sich aufgrund der notwendigen Schirmung in einem geerdeten Metallbehälter, der in einem Ofen aufgestellt ist.

5.1.3 Messkreis der spinning disc

In **Abbildung 5-8** ist eine schematische Darstellung des Messkreises der *spinning disc* abgebildet. Der Faradaysche Käfig (1) soll die Messung von äußeren Störeinflüssen abschirmen. Die Teflonstützen (2) isolieren den Prüfkessel (6), in dem die Aluminiumscheibe (7) mit dem festen Isolierstoff rotiert. Der Prüfkessel ist denfinit über die Leitung (9) geerdet. Würde hier ein Elektrometer angeschlossen werden, könnte die Ladung aus der Isolierflüssigkeit gemessen werden. Von der Aluminiumwelle (8) werden die Ladungen aus dem Feststoff über die Kohlebürsten (3) abgenommen und über eine Messleitung einem Elektrometer zugeführt. Die Messleitung wird über eine Schirmhülle (5) von äußeren Störungen abgeschirmt. Um das Messgerät vor Überspannungen zu schützen, wird eine Schutzbeschaltung (10) verwendet.

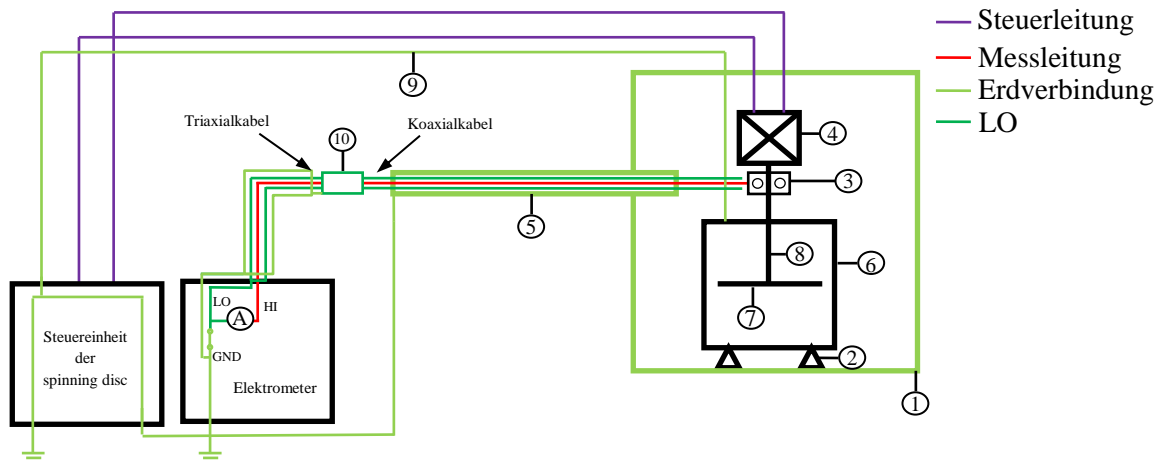


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Messkreises der *spinning disc*: Faradayscher Käfig (1), Teflonstützen (2), Kohlebürsten (3), Gleichstrommotor (4), Schirmhülle (5), Prüfkessel (6), Aluminiumscheibe (7), Aluminiumwelle (8), Erdung des Prüfkessels (9), Schutzbeschaltung (10)

In **Abbildung 5-9** ist eine schematische Darstellung der Schutzbeschaltung dargestellt. Diese ist in der Messleitung integriert. Die Schutzbeschaltung dient auch als Koax – Triax Konverter, da das Elektrometer (Keithley 617) einen Triaxanschluss hat. Die Funkenstrecke (1) dient als Begrenzung gegen Überspannungen. Falls der Überspannungsschutz (1) versagt, begrenzt der 1 M Ω Widerstand (2) den Strom. Damit der begrenzte Fehlerstrom unabhängig von der Polarität fließen kann, sind zwei Dioden gegengleich parallel geschaltet (3). Durch den Stromfluss über eine Diode entsteht ein Spannungsabfall von 0,6 V. Der dadurch auftretende Strom wird durch den 100 Ω Widerstand (4) begrenzt.

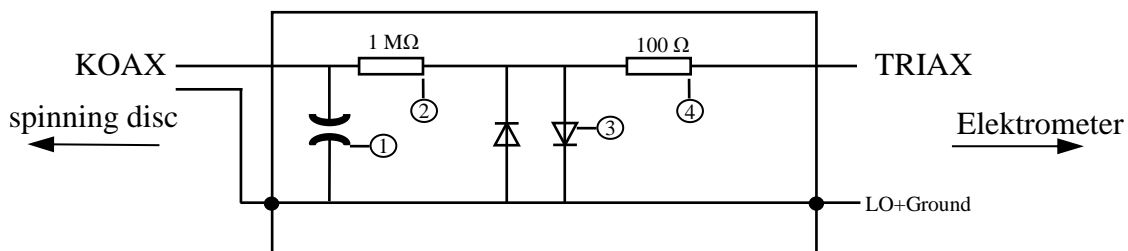


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung der Schutzbeschaltung: Funkenstrecke (1), 1 M Ω Widerstand (2), gegengleich parallel geschaltete Dioden (3), 100 Ω Widerstand (4)



Abbildung 5-10: Fotografische Aufnahme der Schutzbeschaltung: Funkenstrecke (1), 1 MΩ Widerstand (2), gegen-
gleich parallel geschaltete Dioden (3), 100 Ω Widerstand (4)

5.1.4 Steuereinheit der spinning disc

In **Abbildung 5-8** ist auch die Steuereinheit der *spinning disc* eingezeichnet. Diese versorgt den Motor elektrisch und ermöglicht die Drehzahlregelung für den Benutzer. Auf die Steuereinheit wird in **Kapitel 5.1.5** näher eingegangen

5.1.5 Umbauarbeiten

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der ursprüngliche Prüfaufbau aus [Zlo12] und [Zlo13] weiterentwickelt und um zusätzliche Funktionen erweitert. In diesem Kapitel wird auf die durchgeführten Umbauarbeiten eingegangen.

Erneuerung des Teflonverbindungsstückes zwischen Motor und Aluminiumwelle

Der Gleichstrommotor und die Aluminiumwelle sind über ein Verbindungsstück aus Teflon von einander elektrisch isoliert, siehe **Abbildung 5-11** und **Abbildung 5-12**. Da Teflon ein weiches Material ist, brach dieses Verbindungsstück bei den Voruntersuchungen mehrmals bei Rotation der Welle. Um dem Bruch entgegenzuwirken wurde das Verbindungsstück neu konzipiert. Es wurde ein größerer Querschnitt gewählt, damit das Verbindungsstück den mechanischen Belastungen besser standhält. Ein weiteres Problem, das bei den Vorversuchen beobachtet werden konnte war, dass das Verbindungsstück nach längerer Betriebszeit in der Kupplung durchrutschte. Somit konnte nicht davon ausgegangen werden, dass die Aluminiumscheibe mit der Feststoffprobe mit der Drehzahl konstant rotiert, die für den Motor eingestellt wurde. Das Durchrutschen kann dadurch erklärt werden, dass Teflon seine Haftreibung bei zu hohem mechanischem Druck verringert. Damit dieser Fehler nicht mehr auftreten kann, wurde ein Splint durch das Verbindungsstück und die Kupplung gebracht, siehe **Abbildung 5-11** und **Abbildung 5-12**. Um die mechanische Belastung auf das Verbindungsstück mit Splint beim Anlaufen des Motors zu verringern, muss die Drehzahl mittels Reglers langsam von Null auf die gewünschte Drehzahl gebracht werden. Dadurch kann ein mechanischer Bruch des Teflonstückes vermieden werden.

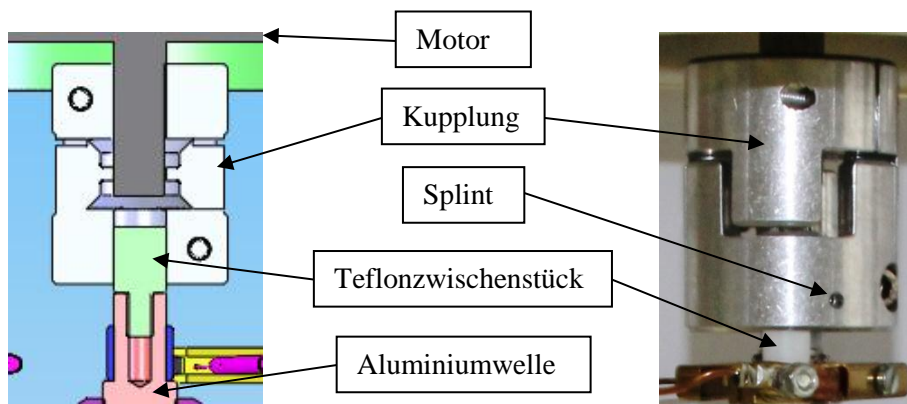


Abbildung 5-11: Kopplung vom Antriebsstrang zur Welle [Zlo12:33]

Abbildung 5-12: Splint, der das Teflonstück befestigt

Integration eines Temperatursensors

Zur Temperaturüberwachung wurde ein Temperaturfühler in das Messsystem integriert. Dieser dient zur Überprüfung der Temperatur der Isolierflüssigkeit während des Messvorganges, sowie bei der Aufheiz- und Abkühlphase. Der Temperaturfühler wurde so platziert, dass er das Strömungsverhalten der Flüssigkeit nicht beeinflusst. Zu diesem Zweck wurde ein Einschraubfühler mit einem M8x10 Gewinde seitlich in den Prüfkessel eingebracht. Der Sensor kann bis zu einer Betriebstemperatur von 200 °C verwendet werden, siehe **Abbildung 5-13** . Die Temperatur wird über eine elektronische Temperaturanzeige dargestellt, siehe **Abbildung 5-14**. Eingebaut wurde die Anzeige bei der Steuereinheit von der spinning disc.

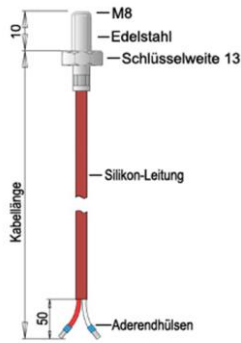


Abbildung 5-13: Einschraubfühler mit einem M8x10 Gewinde [Sen14]



Abbildung 5-14: Elektronische Temperaturanzeige [Sen14]

Umbau der Steuereinheit

Aufgrund eines Schadens in der Steuereinheit musste diese neu konzipiert werden. Die frühere Steuereinheit ist in [Zlo12:39] dargestellt. Hier wurde die Versorgungsspannung für den Motor über einen Kleintransformator von 230 V auf 24 V herabgesetzt und anschließend durch einen Vollweggleichrichter mit Glättungskondensator gleichgerichtet. Die 24 V Gleichspannung wurden der BLHD100K Treiberkarte für den BLHM5100KC-A Motor zugeführt. Im Rahmen der Umbauarbeiten wurde die Spannungsversorgung durch ein Netzteil 230VAC/24VDC, das direkt die Treiberkarte BLHD100K versorgt, ersetzt. Weiters wurde auch die Drehzahlmessung erneuert. Die Drehzahlmessplatine und die LED-Anzeige wurden entfernt. In **Abbildung 5-15** ist die Innenansicht der neuen Steuereinheit fotografiert.

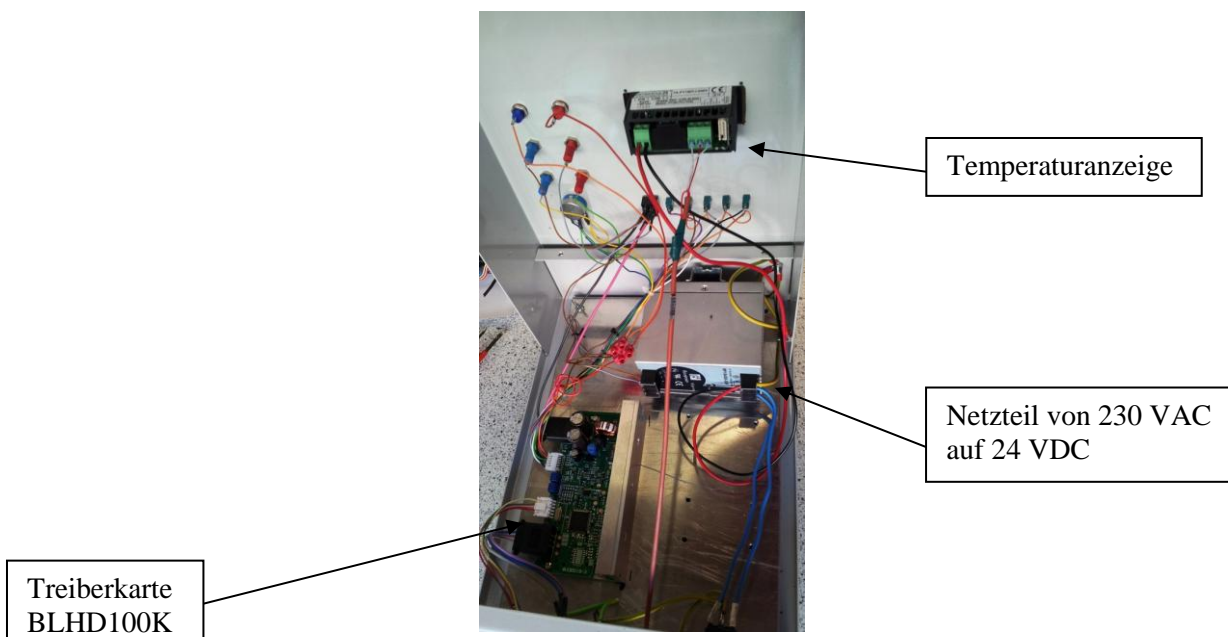


Abbildung 5-15: Innenansicht der Steuereinheit der spinning disc

Die gesamte Verdrahtung wurde erneuert. In **Abbildung 5-16** ist der Verdrahtungsplan für die Steuereinheit dargestellt.

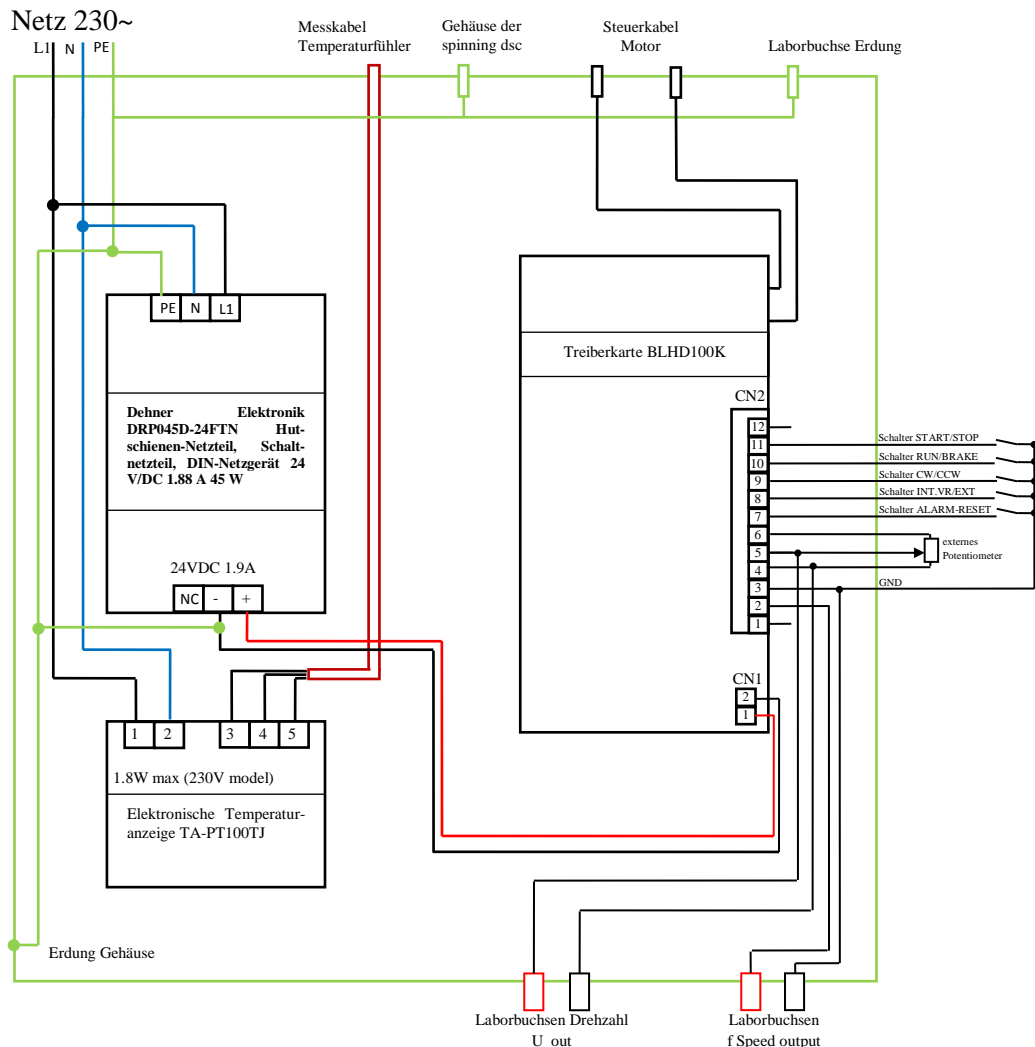


Abbildung 5-16: Verdrahtungsplan der Steuereinheit für die spinning disc

Um die Drehzahl während des Versuches zu überwachen, wird nun die Frequenz $f_{\text{Speed Output}}$ von der Treiberkarte ausgelesen. Über die Laborbuchse „f Speed Output“, siehe **Abbildung 5-16**, kann diese Frequenz gemessen werden. Mit der **Formel F. 5-1** kann die momentane Drehzahl der rotierenden Scheibe aus der gemessenen Frequenz berechnet werden. Diese Formel wurde aus dem Datenblatt für den Treiber entnommen.

$$n_{\text{Motor}} = \frac{f_{\text{Speed Output}} * 60}{30} = f_{\text{Speed Output}} * 2 \quad \text{F. 5-1}$$

n_{Motor} Drehzahl vom Motor in $\frac{U}{min}$

$f_{\text{Speed Output}}$ Frequenz von Speed Output in Hz

Modifikation der Stromabnahme

Für einen besseren Kontakt der Kohlebürsten mit der Welle musste ihre Befestigung neu gestaltet werden. Dazu wurden die Kohlebürsten auf den Durchmesser der Welle zugeschleift, um die Auflagefläche zu vergrößern. Die Kohlebürsten sind auf Teflonzylindern montiert, die in metallischen Halterungen angebracht sind. Die metallischen Halterungen sind mit dem Prüfgefäß fest verschraubt. Um einen konstanten Druck der Kohlebürsten auf die Welle zu gewährleisten, wurden die Teflonzylinder sowohl mit den Kohlebürsten als auch mit den metallischen Halterungen über eine Schraube fixiert. Eine Bewegung der Zylinder und somit

ein Abheben der Bürsten von der Welle wird verhindert. Diese Modifikation ist in **Abbildung 5-17** dargestellt.

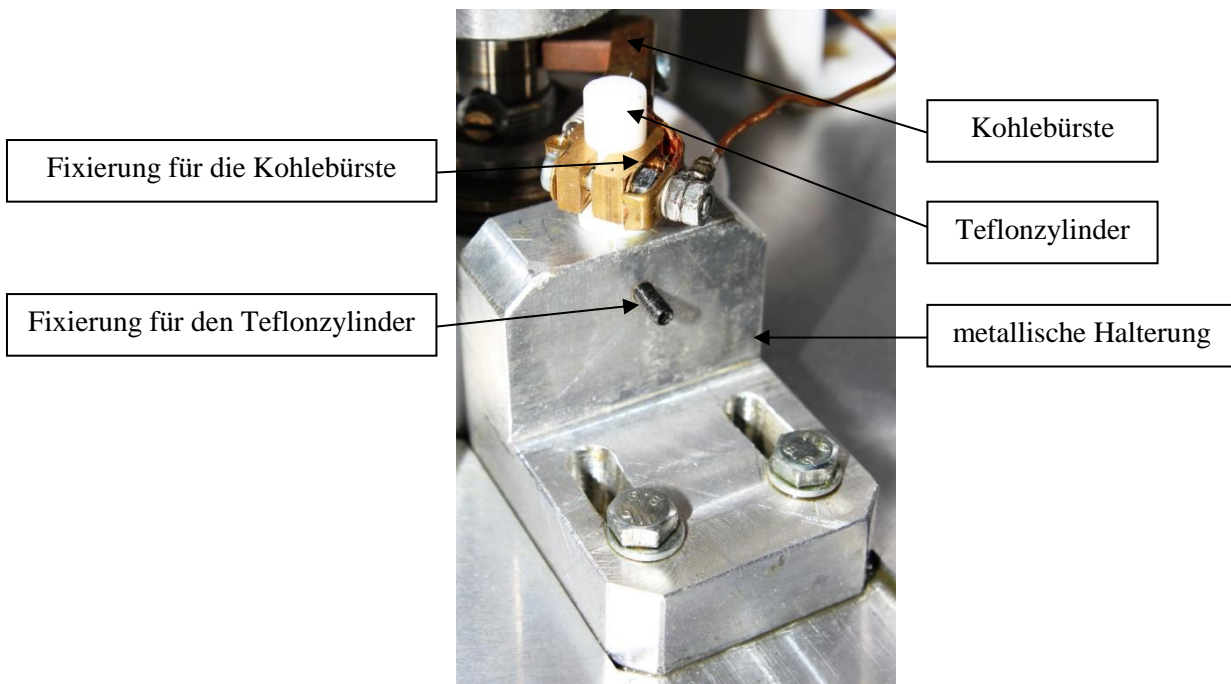


Abbildung 5-17: Zusätzliche Fixierung der Kohlebürsten

5.2 VORVERSUCHE

Es wurden einige Vorversuche unternommen, um etwaige Fehler im Messsystem auszuschließen. Es wurde die Beeinflussung der Drehzahl der Aluminiumscheibe auf das Messsystem untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass durch erhöhte Vibrationen der Scheibe bei steigender Drehzahl die Messwerte stärker zu schwanken beginnen. Für die Untersuchungen wurden deshalb Drehzahlen unter 400 rpm gewählt. Das Messsystem ist von äußeren Einflüssen geschützt und konnte auch nicht durch den Betrieb der Steuereinheit beeinflusst werden. Bei der Veränderung der Füllhöhe konnte beobachtet werden, dass es zu einer Abweichung der Messergebnisse kam. Deshalb wurden für jeden Versuch 3 Liter Isolierflüssigkeit in den Prüfkessel gefüllt. Für die Feuchtigkeitsmessung nach Versuchen wurde nur eine kleine Menge an Isolierflüssigkeit (3-10 ml) entnommen, um eine Beeinflussung zu minimieren. Die elektrostatische Aufladung hängt von der verwendeten Plattenstärke der Feststoffprobe ab. Die Vorversuche ergaben, dass die gemessenen Aufladeströme mit größerer Plattenstärke zunehmen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden nur Materialien mit einer Plattenstärke von 1 mm miteinander verglichen.

Bei den Versuchen wurde die Drehzahl der rotierenden Scheibe über ein externes Potentiometer, siehe **Abbildung 5-16**, eingestellt. Der eingestellte Spannungswert U_{out} wurde über ein externes Multimeter an den Laborbuchsen gemessen. Der Zusammenhang zwischen U_{out} und der Drehzahl wurde ermittelt. Gemessen wurde die Drehzahl zum einen direkt an der Welle mittels eines Tachometers, siehe **Abbildung 5-18**. Zusätzlich wurde die Drehzahl über die Frequenz berechnet, die die Treiberkarte des Motos über die Laborbuchsen $f_{speed\ out}$ an der Steuereinheit ausgibt. Diese Drehzahl kann mittels der **Formel F. 5-1** berechnet werden.



Abbildung 5-18: Pocket Tachometer Model 3631

In der **Tabelle 5-1** sind die gemessenen und berechneten Drehzahlwerte für den Gleichstrommotor der Serie BLHM5100KC-A aufgelistet. Man erkennt aus der Tabelle, dass die mittels Tachometer gemessenen und über die Frequenzausgabe berechneten Drehzahlen gut übereinstimmen

Drehzahl für BLHM5100KC-A			
Eingestellt	Gemessen		Berechnet
U_{Out}	$f_{Treiberkarte}$	Tachometer	$n_{Treiberkarte}$
mV	Hz	rpm	rpm
170,8	53,0	106,4	106,0
192,0	60,0	120,0	120,0
280,9	89,0	177,9	178,0
317,0	100,0	200,0	200,0
410,9	130,0	260,5	260,0
550,8	175,0	350,4	350,0
630,0	200,0	400,0	400,0

Tabelle 5-1: Die gemessenen und berechneten Drehzahlwerte für den Gleichstrommotor der Serie BLHM5100KC-A

In **Abbildung 5-19** ist die gemessene Spannungs-Drehzahlkennlinie dargestellt.

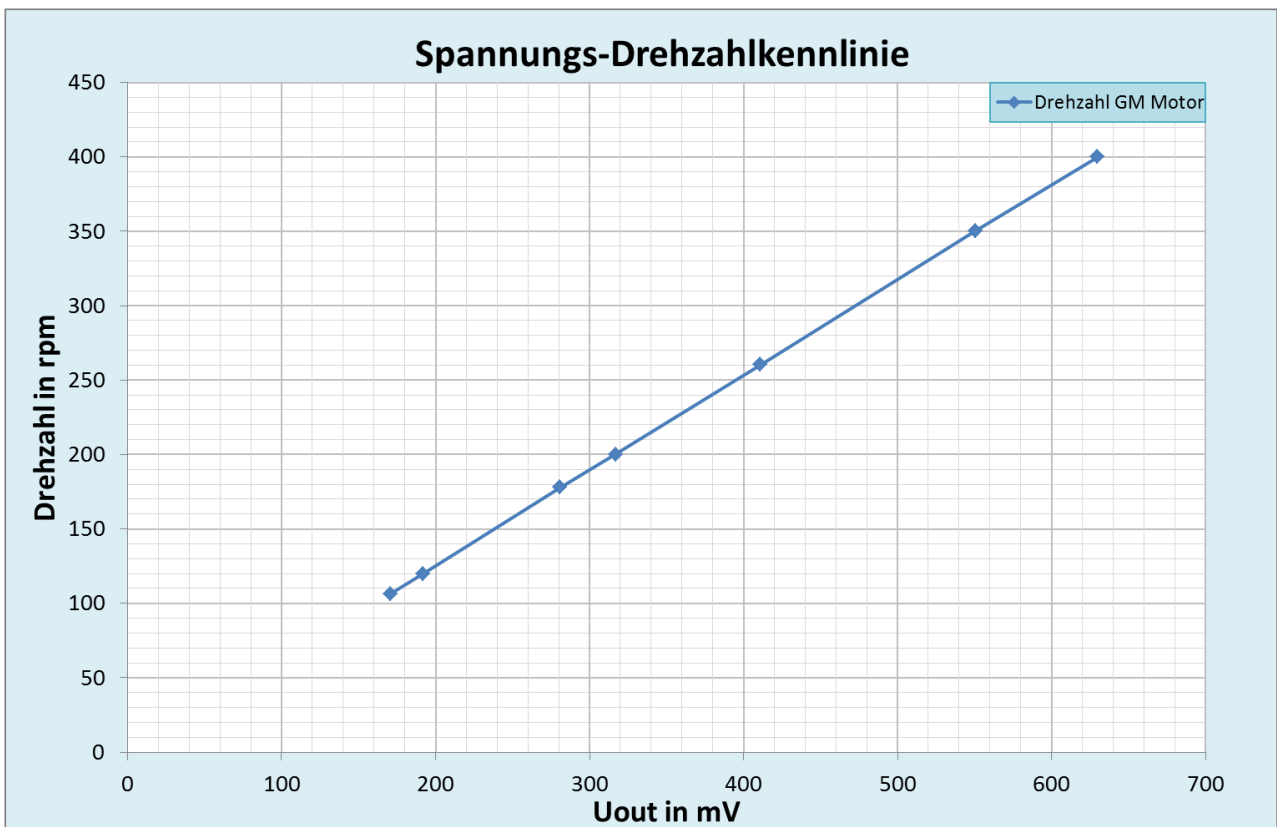


Abbildung 5-19: Drehzahlkennlinie für den Gleichstrommotor der Serie BLHM5100KC-A

5.3 VERSUCHSVORBEREITUNGEN

5.3.1 Konditionierung der Isolierstoffe

Feststoffproben:

Für die Untersuchungen wurden Scheiben mit einer Stärke von 1 mm und mit einem Durchmesser von 140 mm verwendet. Folgende Materialien wurden untersucht:

- Transformerboard B 3.1A
- Nomex® 993

Isolierflüssigkeiten:

Für die Untersuchungen wurden drei Isolierflüssigkeiten verwendet:

- Mineralöl
- natürlicher Ester
- synthetischer Ester

Trocknung und Imprägnierung:

Für den Trocknungs- und Imprägnierprozess wurde wie folgt vorgegangen:

1. Der feste Isolierstoff wird im Ofen unter Vakuum gesetzt und bei einer Temperatur von 105 °C für 96 Stunden getrocknet. Zum Abschätzen dieser Zeit wurde für den Trocknungsprozess der Feststoffproben die **Abbildung 5-20** verwendet. Ein Feuchtigkeitsgehalt von 0,1 % bei 105 °C wird nach einer Zeit von ungefähr 90 Stunden erreicht. Es ist anzumerken, dass dies für eine Probe mit 100 mm gilt. Somit sind 96 Stunden in jedem Fall ausreichend.

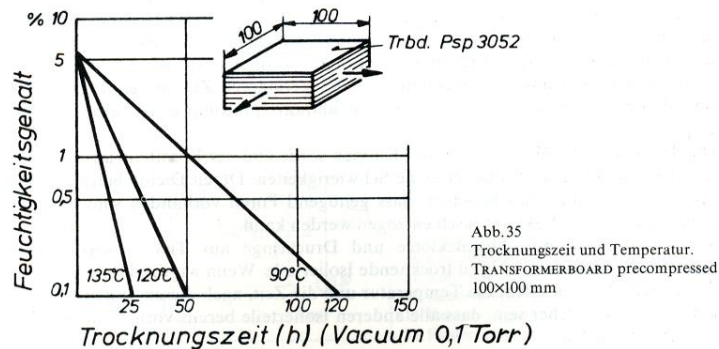


Abbildung 5-20: Trocknungszeit von festen Isolierstoffen [Mos79:38]

2. Die Isolierflüssigkeit wird mittels Ölaufbereitungsanlage bei 60 °C unter Vakuum für zwei Stunden aufbereitet. Danach wird die Isolierflüssigkeit in zwei 5 Liter Glasflaschen abgefüllt und auf Raumtemperatur abgekühlt.
3. Nach der Trocknungszeit des Feststoffes wird die Isolierflüssigkeit in den Probenbehälter mit den Feststoffproben im Vakuumofen hineingezogen und mit dem Feststoff bei 105 °C für zwei Stunden unter Vakuum gelassen. Danach wird das Vakuum über eine Silikagelvorlage gebrochen und trockene Luft hineingelassen. Die Temperatur kann nach zwei Stunden abgeschaltet werden. Für die Ermittlung einer geeigneten Imprägnierzeit wurde die **Abbildung 5-21** verwendet. Die Plattenstärke beträgt für die Versuche 1 mm. Durch die geringe Plattenstärke und die hohe Temperatur sind 2 Stunden für die Imprägnierung ausreichend.

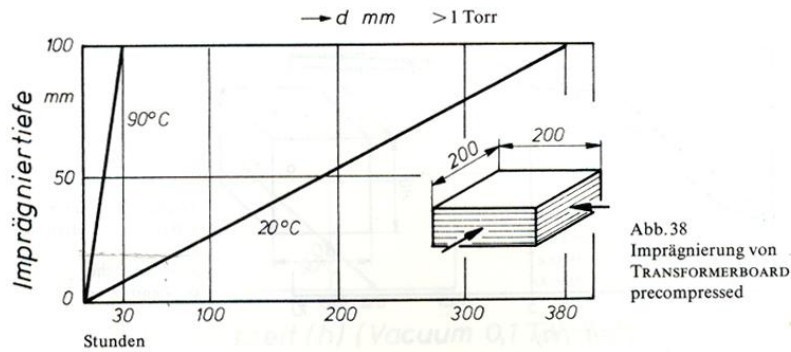


Abbildung 5-21: Imprägniertiefe in Abhängigkeit der Zeit [Mos79:40]

- Nach 24 Stunden kann der Versuch aufgebaut werden. Für die Imprägnierung wurde so viel Isolierflüssigkeit in den Probenbehälter gefüllt, dass dieses auch für die Versuche in der *spinning disc* eingesetzt werden konnte.

5.3.2 Zusammenbau der spinning disc

In diesem Kapitel wird der Zusammenbau der *spinning disc* schrittweise erklärt. Wichtig für die Versuchsdurchführung ist, dass alle Teile, die mit Öl in Kontakt kommen, gereinigt werden. Alle Bestandteile müssen zuerst mit Aceton und dann mit Isopropanol gereinigt werden. Am Schluss wird mit destilliertem Wasser gespült.

Zuerst müssen die Teflonstützen in den Gefäßboden geschraubt werden, siehe **Abbildung 5-22**.



Abbildung 5-22: Montieren der Teflonstützen in den Gefäßboden

Der Temperatursensor wird über ein Zwischenstück in die Seitenwand des Prüfgefäßes geschraubt. Vorher muss auf das Gewinde des Zwischenstückes und des Temperatursensors ein Teflonband aufgebracht werden, siehe **Abbildung 5-23** und **Abbildung 5-24**. Diese können dann in den Gefäßboden geschraubt werden, siehe **Abbildung 5-25**.



Abbildung 5-23: Teflonband auf das Gewinde des Zwischenstückes aufbringen



Abbildung 5-24: Teflonband auf den Temperatursensors aufbringen

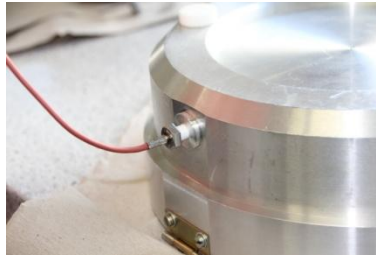


Abbildung 5-25: Zwischenstück und Temperatursensor in die Gefäßwand schrauben

Das Prüfgefäß kann nun umgedreht werden und der O-Ring in die dafür vorgesehene Fuge gedrückt werden, siehe **Abbildung 5-26**.



Abbildung 5-26: O-Ring in die Fuge drücken

Die rotierende Scheibe wird nun aus drei Bestandteilen zusammengefügt. Diese sind eine Metallscheibe, ein Teflonring und ein Metallring, siehe **Abbildung 5-27**.

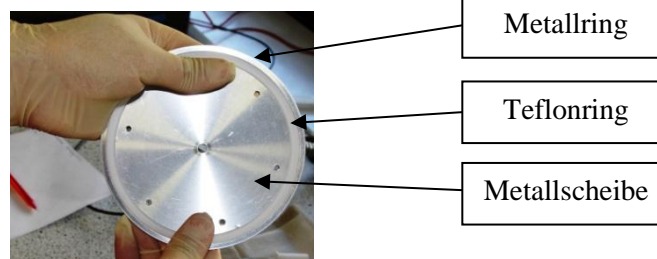


Abbildung 5-27: Einzelteile der Disc zusammendrücken

Die Isolierung der Welle wird wie in **Abbildung 5-28** aufgebracht.



Abbildung 5-28: Isolation der Welle

Bevor die rotierende Scheibe montiert wird, muss sie mit der zu untersuchenden Isolierflüssigkeit gespült werden, siehe **Abbildung 5-29**.



Abbildung 5-29: Spülen der Aluminiumscheibe mit aufbereiteter Isolierflüssigkeit

Danach kann der feste Isolierstoff auf beiden Seiten der Scheibe mit Schrauben befestigt werden, siehe *Abbildung 5-30*.



Abbildung 5-30: Befestigen des festen Isolierstoffes

Am Ende der Welle wird das Endstück aus Aluminium-PTFE verschraubt um die Aluminiumscheibe zu befestigen, siehe *Abbildung 5-31*.



Abbildung 5-31: Aluminium-PTFE Endstück an die Welle schrauben

Der Deckel wird mit einem mit Isolierflüssigkeit getränkten fusselfreien Tuch abgewischt, siehe *Abbildung 5-32*.



Abbildung 5-32: Deckel mit einem fusselfreien Tuch und der Isolierflüssigkeit abwischen

Bevor das Prüfgefäß befüllt werden kann, muss es mit der Isolierflüssigkeit gespült werden, siehe *Abbildung 5-33*.



Abbildung 5-33: Spülen des Gefäßes mit aufbereiteter Isolierflüssigkeit

Mittels des Messbechers kann das Gefäß mit 3 Litern der zu untersuchenden Isolierflüssigkeit befüllt werden, siehe **Abbildung 5-34**.



Abbildung 5-34: Befüllen des Gefäßes

Der Deckel kann dann auf das Gefäß geschraubt werden, siehe **Abbildung 5-35**.



Abbildung 5-35: Deckel an das Gefäß schrauben

Der ganze Messaufbau wird in den Faradayschen Käfig gestellt und mit den Mess- und Steuerkabeln verbunden, siehe **Abbildung 5-36**. Der Messaufbau ist nun fertig zusammengebaut und die Messung kann nach einer Ruhezeit von 30 bis 40 Minuten gestartet werden.



Abbildung 5-36: Mess- und Steuerkabel anschließen

5.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

In diesem Kapitel wird der Ablauf eines Messzykluses erklärt. Weiters wird die Bestimmung der Flüssigkeitsparameter beschrieben.

5.4.1 Messzyklus

Wie bereits beschrieben wurden zwei Feststoffe und drei Isolierflüssigkeiten untersucht. Dabei wurde die Aufladungsneigung jedes Feststoffes mit allen drei Isolierflüssigkeiten getestet. Daraus ergaben sich insgesamt sechs Versuchsreihen:

- *Versuchsreihe 1:* Mineralöl-Transformerboard B 3.1A
- *Versuchsreihe 2:* Mineralöl-Nomex® 993
- *Versuchsreihe 3:* natürlicher Ester-Transformerboard B 3.1A
- *Versuchsreihe 4:* natürlicher Ester-Nomex® 993
- *Versuchsreihe 5:* synthetischer Ester-Transformerboard B 3.1A
- *Versuchsreihe 6:* synthetischer Ester-Nomex® 993

Im Rahmen einer Versuchsreihe wurden vier Messungen an vier aufeinander folgenden Tagen durchgeführt. Die erste fand bei 20 °C, die zweite bei 60 °C, die dritte bei 90 °C und die vierte Messung wieder bei 20 °C statt.

Der Messablauf bei einer Temperaturstufe ist in **Abbildung 5-37** schematisch dargestellt. Die drei Rotationsgeschwindigkeiten 120 rpm, 200 rpm und 400 rpm wurden in aufsteigender Reihenfolge eingestellt. Am Ende wurde die niedrigste Rotationsgeschwindigkeit noch einmal vermessen. Zwischen zwei unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten wurde eine Messpause eingehalten. Aus **Abbildung 5-37** ist der Zeitplan einer Messung ersichtlich. Das Ziel einer Messung war es den stationären Ableitstrom bei einer Rotationsgeschwindigkeit zu ermitteln. Wenn sich der stationäre Zustand nach der in **Abbildung 5-37** dargestellten Rotationszeit noch nicht eingestellt hatte, wurde die Rotationszeit verlängert.

Der beschriebene Messzyklus wurde an jenen der Strömungsmodellanlage angepasst, siehe [Pod13] und [Pod132].

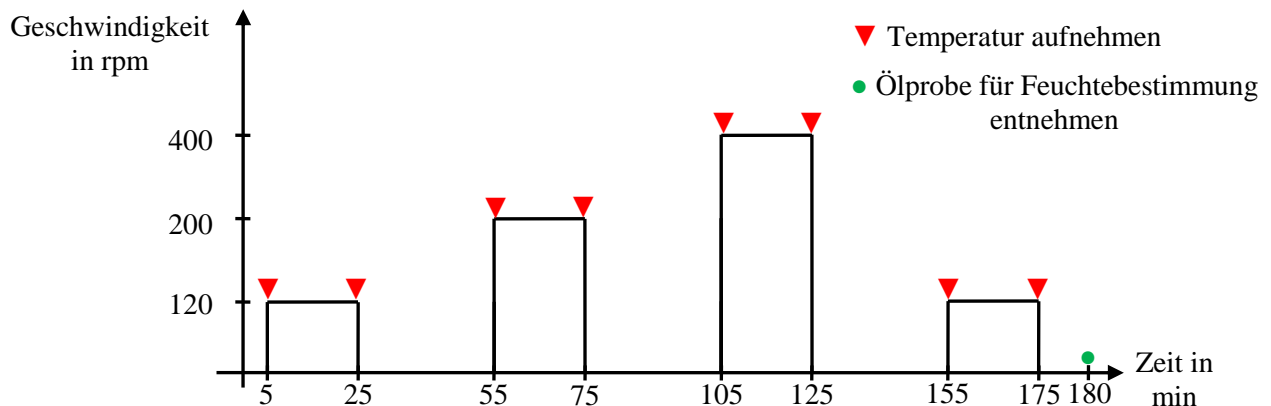


Abbildung 5-37: Schematische Darstellung des Ablaufes einer Messung

Zu Beginn und am Ende einer Rotationsgeschwindigkeit wurde die aktuelle Flüssigkeitstemperatur notiert. Am Ende der Messung wurde eine Probe der Isolierflüssigkeit zur Feuchtemessung entnommen und die Temperatur beim Ofen für die Messung am nächsten Tag verändert.

5.4.2 Bestimmung der Parameter der Isolierflüssigkeiten

Die Parameter Durchschlagspannung, Verlustfaktor und spezifischer Widerstand wurden vor einer Versuchsreihe und nach Abschluss der Versuchsreihe untersucht. Die absolute Feuchte wurde zusätzlich nach jeder Messung, siehe **Abbildung 5-37**, bestimmt.

Im **Anhang A** sind die Parameter der Isolierflüssigkeiten der einzelnen Messungen aufgelistet. Die Durchschlagspannung wurde gemäß der IEC 60156 untersucht. Der Verlustfaktor die Dielektrizitätszahl und der spezifische Widerstand wurden gemäß der IEC 60247 untersucht.

Der Feuchtegehalt in der Isolierflüssigkeit wurde mittels Karl-Fischer-Titration gemessen. Dabei wurde eine Probe der Isolierflüssigkeit mit einer sterilen Spritze entnommen. Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes muss die Isolierflüssigkeit die Raumtemperatur erreichen, um das Messergebnis nicht zu verfälschen. Wenn die Probe nicht bei Raumtemperatur entnommen wurde, wurde diese in einem 10 ml Glasfläschchen aufbewahrt, siehe **Abbildung 5-38**. Dieses Glasfläschchen wurde luftdicht verschlossen und nach Erreichen der Raumtemperatur wurde die Isolierflüssigkeit vermessen.



Abbildung 5-38: 10 ml Glasfläschchen für die Aufbewahrung der Flüssigkeitsproben

Zur Feuchtemessung wurden ca. 3-4 ml der Probe in die Titrierzelle mittels einer sterilen Spritze gegeben. Dabei wurde darauf geachtet die Isolierflüssigkeit in das Titriermittel zu injizieren ohne die Gefäßwände zu berühren. Dann wurde das Gewicht der injizierten Ölprobe in das 831 KF Coulometer eingegeben, siehe **Abbildung 5-39**.

Um den Wassergehalt der Ölprobe zu bestimmen, wird beim KF Coulometer auf elektrochemischem Wege Iod erzeugt. Das Iod reagiert mit dem Wasser in der Ölprobe. Durch die elektrische Ladungsmenge, die benötigt worden ist, um das Iod zu erzeugen, kann der Feuchtegehalt bestimmt werden [Met:4].



Abbildung 5-39: 831 KF Coulometer zur Bestimmung des Feuchtegehaltes Isolierflüssigkeiten

5.5 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

Die Auswertung wurde an jene der Strömungsmodellanlage angepasst. Alle Messergebnisse wurden nach dem gleichen Prinzip ausgewertet. Der stationäre Zustand des Ableitstromes wurde mittels Matlab ermittelt. Dafür wurde der Medianwert aus den Messwerten der letzten 5 Minuten bei der Rotation mit einer Geschwindigkeit berechnet und die Ergebnisse wurden tabellarisch dargestellt.

6 ERGEBNISSE DER AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Aufladungsuntersuchungen mit der *spinning disc* behandelt. Alle Ergebnisse sind in Tabellen aufgelistet. Es wird der Einfluss verschiedener Isolierflüssigkeiten sowie unterschiedlicher fester Isolierstoffe auf die elektrostatische Aufladung veranschaulicht.

6.1 AUSGEWERTETE ABLEITSTRÖME

Im Folgenden ist die elektrostatische Aufladungsneigung der untersuchten flüssigen-festen Isolierungssysteme über die Höhe des stationären Ableitstromes angegeben.

6.1.1 Ableitstrom für Mineralöl

In der **Tabelle 6-1** sind die Messergebnisse für Mineralöl und Nomex® 993 aufgelistet. Man erkennt, dass nur ein geringer Ableitstrom bei Raumtemperatur gemessen worden ist. Die Wiederholungsmessung bei Raumtemperatur zeigt einen eindeutigen Anstieg des Ableitstromes. Weiters ist erkennbar, dass die Aufladung mit höherer Temperatur zunimmt. Es kommt zu einer Polaritätsumkehr zwischen 60 °C und 90 °C. Bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C ist der stationäre Zustand für 120 rpm und 200 rpm ungefähr gleich groß. Bei 90 °C ist der Ableitstrom bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 200 rpm und 400 rpm ungefähr gleich groß. Grundsätzlich erkennt man jedoch vor allem bei den höheren Temperaturen, dass die Aufladung mit höherer Rotationsgeschwindigkeit zunimmt.

Ableitstrom für Mineralöl				
Nomex® 993				
Drehzahl	I_{RT}	$I_{60^{\circ}C}$	$I_{90^{\circ}C}$	I_{RT_WH}
rpm	pA	pA	pA	pA
120	0,8	-4,7	7,1	11,4
200	0,7	-4,8	24,8	14,1
400	-0,2	-8,6	23,3	18,9
120 _{WH}	0,2	-0,4	13,9	8,2

Tabelle 6-1: Ableitstrom für Mineralöl und Nomex® 993

In **Tabelle 6-2** sind die Messergebnisse für Mineralöl und Transformerboard B 3.1A aufgelistet. Es wurde nur ein geringer Ableitstrom bei Raumtemperatur gemessen. Die Wiederholungsmessung bei Raumtemperatur ergab Werte im gleichen Bereich wie die erste Messung bei Raumtemperatur. Mit steigender Temperatur nimmt der Ableitstrom zu. Die größten Ableitströme wurden bei einer Temperatur von 90 °C gemessen. Man erkennt wieder die Zunahme der Aufladungsneigung mit höherer Rotationsgeschwindigkeit.

Ableitstrom für Mineralöl				
Transformerboard B 3.1A				
Drehzahl	I_{RT}	$I_{60^{\circ}C}$	$I_{90^{\circ}C}$	I_{RT_WH}
rpm	pA	pA	pA	pA
120	-0,5	-11,4	-38,7	0,7
200	-1,3	-20,2	-73,8	-0,6
400	-1,3	-27,6	-139,3	-0,5
120 _{WH}	-0,5	-9,5	X	0,6

Tabelle 6-2: Ableitstrom für Mineralöl und Transformerboard B 3.1A

6.1.2 Ableitstrom für synthetischen Ester

In **Tabelle 6-3** sind die Messergebnisse für synthetischen Ester und Nomex® 993 aufgelistet. In **Tabelle 6-4** sind die Messergebnisse für synthetischen Ester und Transformerboard B 3.1A dargestellt. Die Wiederholungsmessung bei Raumtemperatur ergab bei Nomex® 993 Werte im gleichen Bereich wie die erste Messung bei Raumtemperatur. Bei Transformerboard B 3.1A ergaben sich deutlich höhere Werte bei der Wiederholungsmessung. Man erkennt für beide Feststoffe, dass die Messwerte mit steigender Temperatur zunehmen. Die größten Ableitströme wurden bei einer Temperatur von 90 °C gemessen. Auch hier ist die Zunahme der Ableitströme mit steigender Rotationsgeschwindigkeit erkennbar.

Ableitstrom für synthetischen Ester				
Nomex® 993				
Drehzahl	I_{RT}	$I_{60^{\circ}C}$	$I_{90^{\circ}C}$	I_{RT_WH}
rpm	pA	pA	pA	pA
120	-185,7	-380,6	-478,2	-185,1
200	-459,5	-1170,7	-1623,7	-430,7
400	-904,4	-3718,6	-5943,2	-813,5
120 _{WH}	-224,9	-332,5	-380,9	-189,4

Tabelle 6-3: Ableitstrom für synthetischen Ester und Nomex® 993

Ableitstrom für synthetischen Ester				
Transformerboard B 3.1A				
Drehzahl	I_{RT}	$I_{60^{\circ}C}$	$I_{90^{\circ}C}$	I_{RT_WH}
rpm	pA	pA	pA	pA
120	-5,6	-46,7	-174,4	-53,0
200	-36,0	-168,4	-722,8	-130,1
400	-129,9	-529,8	-3339,7	-319,8
120 _{WH}	-11,0	-61,3	-180,2	-48,9

Tabelle 6-4: Ableitstrom für synthetischen Ester und Transformerboard B 3.1A

6.1.3 Ableitstrom für natürlichen Ester

In **Tabelle 6-5** sind die Messergebnisse für natürlichen Ester und Nomex® 993 aufgelistet. In **Tabelle 6-6** sind die Messergebnisse für natürlichen Ester und Transformerboard B 3.1A dargestellt.

Ableitstrom für natürlichen Ester				
Nomex® 993				
Drehzahl	I_{RT}	$I_{60^{\circ}C}$	$I_{90^{\circ}C}$	I_{RT_WH}
rpm	pA	pA	pA	pA
120	-417,8	-399,4	-947,1	-337,1
200	-849,6	-1477,0	-3597,0	-727,9
400	-1655,9	-4615,6	-12792,0	-1416,7
120 _{WH}	-381,3	-223,4	-812,8	-303,1

Tabelle 6-5: Ableitstrom für natürlichen Ester und Nomex® 993

Ableitstrom für natürlichen Ester				
Transformerboard B 3.1A				
Drehzahl	I_{RT}	$I_{60^{\circ}C}$	$I_{90^{\circ}C}$	I_{RT_WH}
rpm	pA	pA	pA	pA
120	-229,1	-213,2	-830,7	-194,0
200	-563,1	-1087,4	-2707,7	-492,9
400	-1219,7	-3016,7	-10802,0	-1095,1
120 _{WH}	-191,9	-179,7	-633,2	-184,6

Tabelle 6-6: Ableitstrom für natürlichen Ester und Transformerboard B 3.1A

Die Wiederholungsmessung bei Raumtemperatur ergab Werte im gleichen Bereich wie die erste Messung bei Raumtemperatur. Bei einer Temperatur von 60 °C ist der Ableitstrom bei einer Drehzahl von 120 rpm geringer als bei Raumtemperatur. Grundsätzlich kann jedoch die Tendenz herausgelesen werden, dass die Aufladung mit höherer Temperatur zunimmt. Weiters erkennt man auch hier die Aufladungszunahme mit steigender Rotationsgeschwindigkeit.

Die wiederholte 120 rpm-Messung wies bei den sechs Versuchsreihen meist Unterschiede zur ersten 120 rpm-Messung auf. Dies könnte dadurch begründet werden, dass sich die Feuchte von Isolierflüssigkeit und Board während der Messung eventuell verändert hat. Es könnte auch eine längere Wartezeit für eine vollständige Entladung vor der Wiederholungsmessung notwendig sein, um eine bessere Reproduzierbarkeit zu erreichen.

6.2 VERGLEICH DER AUFLADUNGSNEIGUNG VERSCHIEDENER ISOLIERFLÜSSIGKEITEN

6.2.1 Einfluss der Isolierflüssigkeit in Kombination mit Nomex® 993 auf die elektrostatische Aufladung

In *Abbildung 6-1* ist der Ableitstrom der unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 993 bei Raumtemperatur dargestellt. Man erkennt, dass das Mineralöl den geringsten und natürlicher Ester den größten Ableitstrom über alle Geschwindigkeitsbereiche besitzt. Bei steigender Umdrehungszahl nimmt der Ableitstrom vom Mineralöl im Vergleich zu den anderen Isolierflüssigkeiten nicht stark zu und bewegt sich im Bereich zwischen 0,5 pA und 1,3 pA. Das Verhalten des Ableitstromes ist beim natürlichen und synthetischen Ester ähnlich. Bei steigender Geschwindigkeit steigt der Strom an.

In *Abbildung 6-2* ist der Ableitstrom der unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 993 bei einer Temperatur von 60 °C dargestellt. Man erkennt, dass wieder das Mineralöl den geringsten und der natürliche Ester den größten Ableitstrom über alle Geschwindigkeitsbereiche besitzt. Bei einer Geschwindigkeit von 120 rpm ist der Ableitstrom vom natürlichen und synthetischen Ester ungefähr gleich groß. Bei steigender Geschwindigkeit nimmt der Ableitstrom bei allen Isolierflüssigkeiten zu.

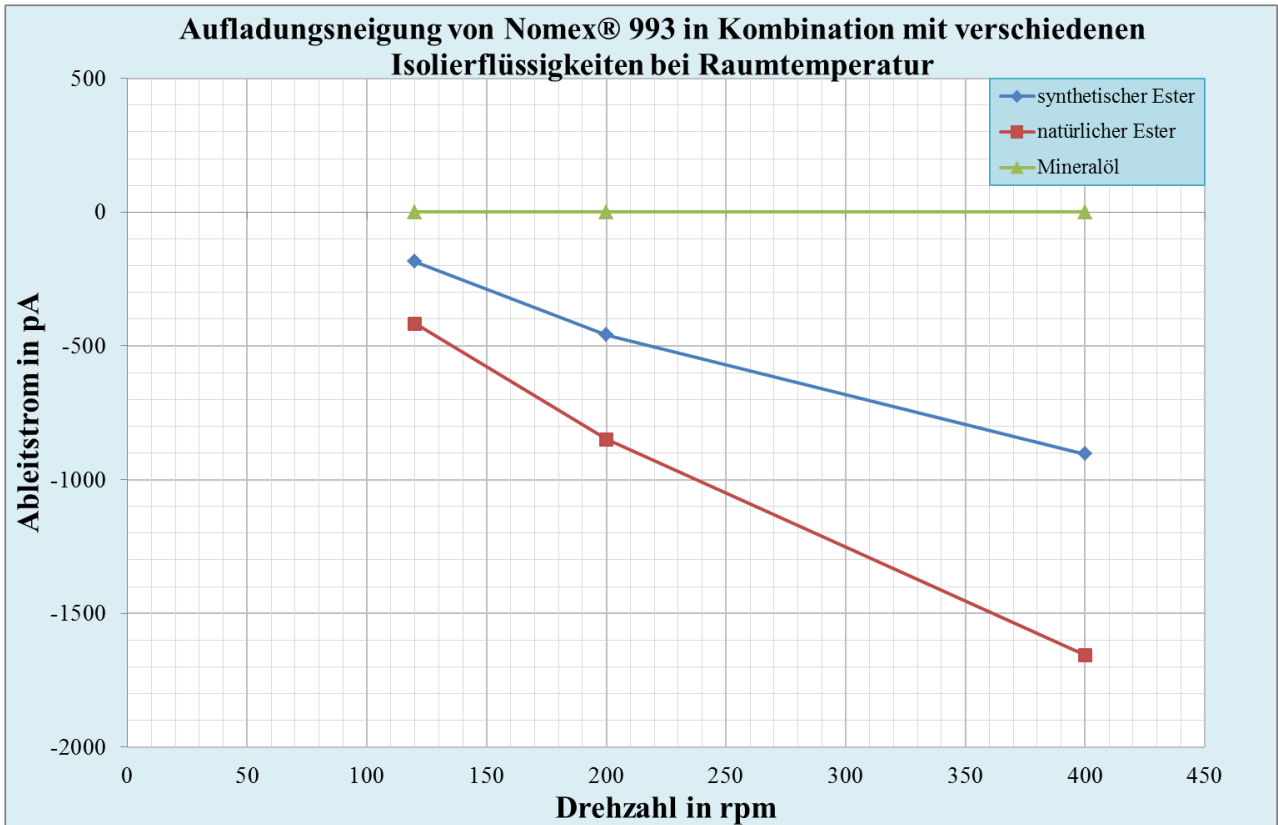


Abbildung 6-1: Ableitstrom der verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 993 bei Raumtemperatur

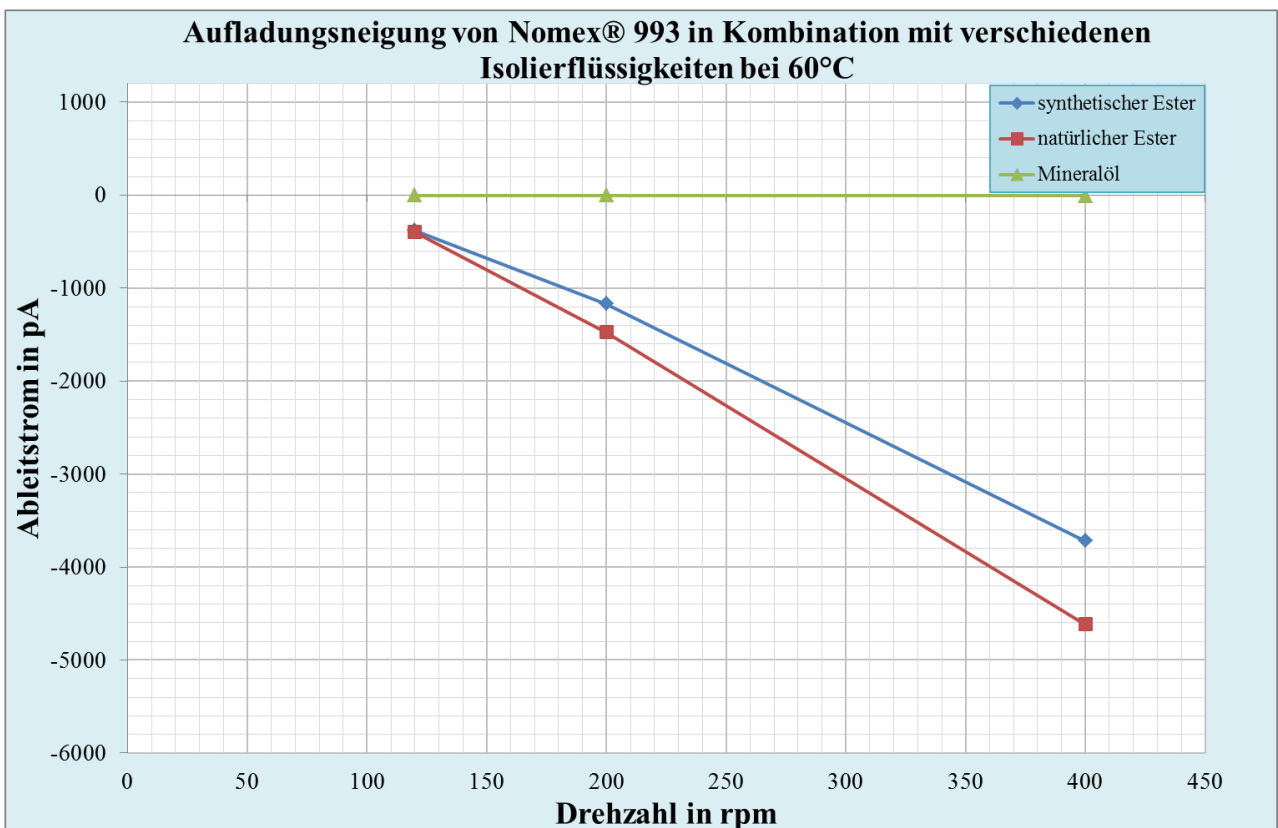


Abbildung 6-2: Ableitstrom der verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 993 bei einer Temperatur von 60 °C

In **Abbildung 6-3** ist der Ableitstrom der unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 993 bei einer Temperatur von 90 °C dargestellt. Man erkennt wie bereits bei Raumtemperatur und 60 °C, dass das Mineralöl den geringsten und der natürliche Ester den größten Ableitstrom über alle Geschwindigkeitsbereiche besitzt. Beim Mineralöl wurde über alle Geschwindigkeitsstufen ein positiver Ableitstrom gemessen. Für natürlichen und synthetischen Ester ergaben sich negative Ableitströme. Bei steigender Geschwindigkeit nimmt der Ableitstrom bei allen Isolierflüssigkeiten zu.

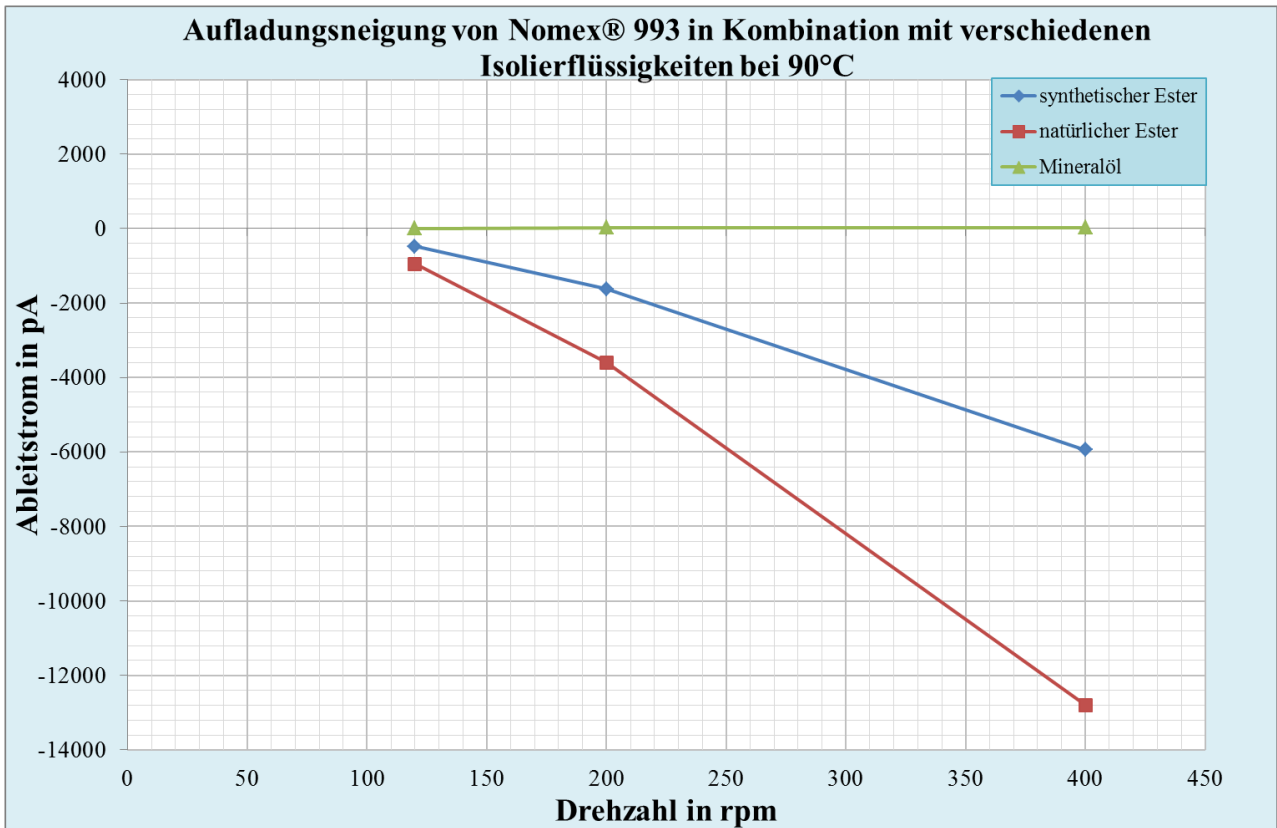


Abbildung 6-3: Ableitstrom der verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 993 bei einer Temperatur von 90 °C

6.2.2 Einfluss der Isolierflüssigkeit in Kombination mit Transformerboard B 3.1A auf die elektrostatische Aufladung

In **Abbildung 6-4** ist der Ableitstrom der unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten mit Transformerboard B 3.1A bei Raumtemperatur dargestellt. Man erkennt, dass das Mineralöl den geringsten und der natürliche Ester den größten Ableitstrom über alle Geschwindigkeitsbereiche besitzt. Bei steigender Geschwindigkeit nimmt der Ableitstrom zu. Die gleichen Tendenzen gelten auch bei 60 °C, siehe **Abbildung 6-5**, und bei 90 °C, siehe **Abbildung 6-6**.

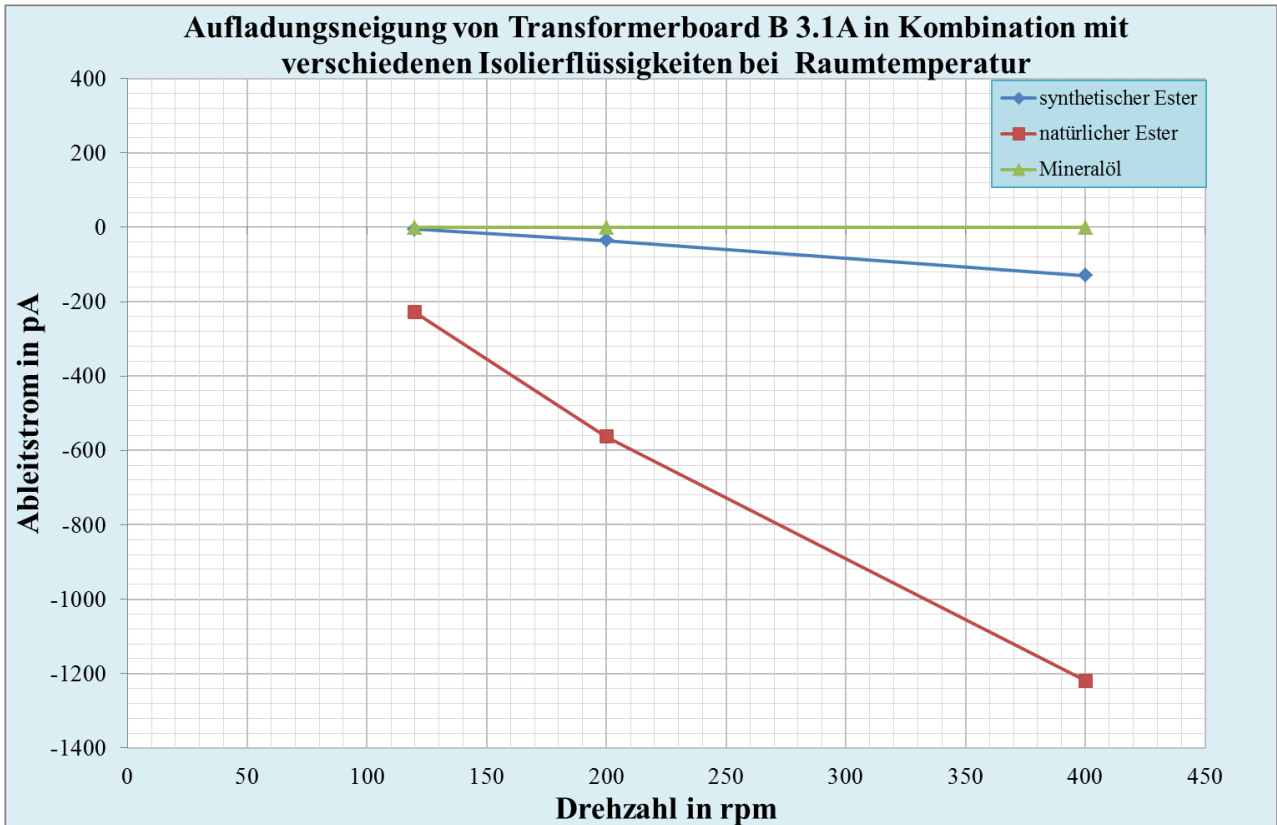


Abbildung 6-4: Ableitstrom der verschiedenen Isolierflüssigkeit mit Transformerboard B 3.1A bei Raumtemperatur

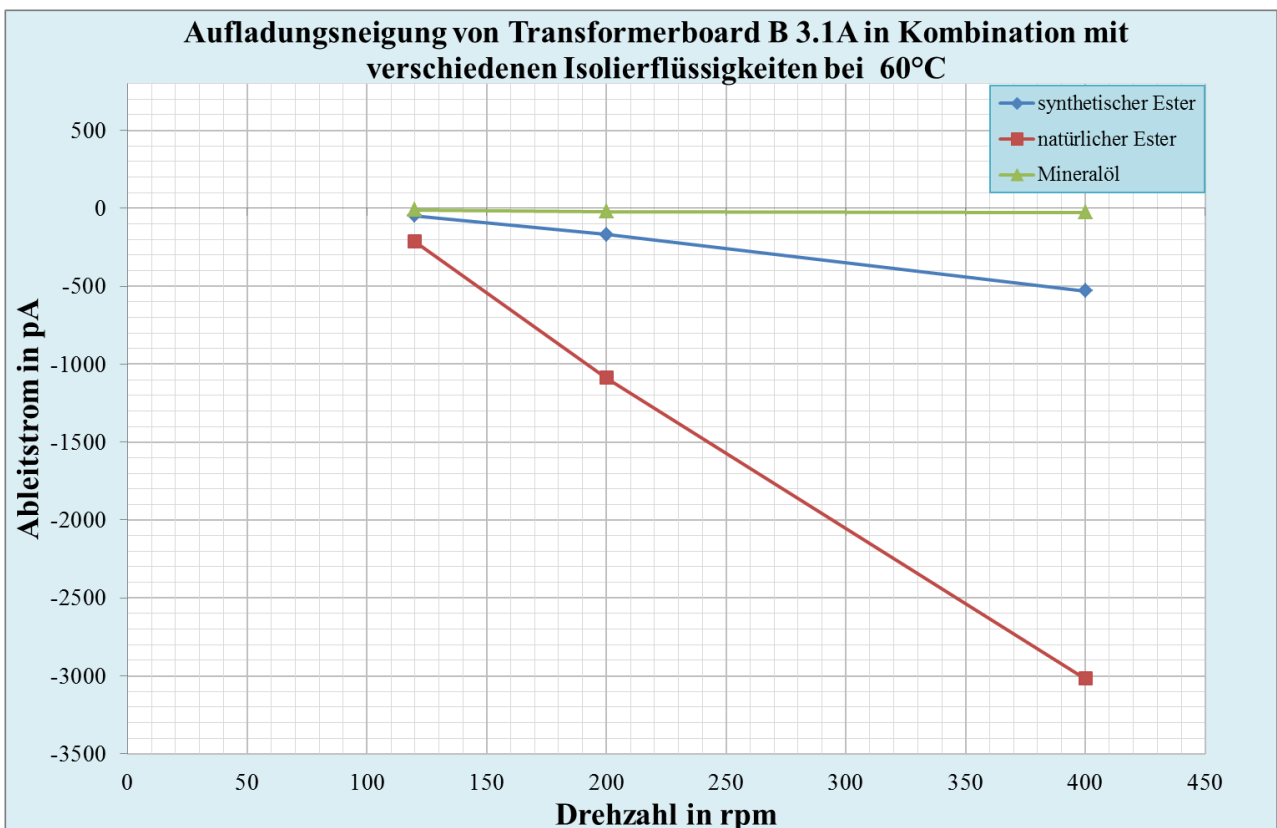


Abbildung 6-5: Ableitstrom der verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit Transformerboard B 3.1A bei einer Temperatur von 60 °C

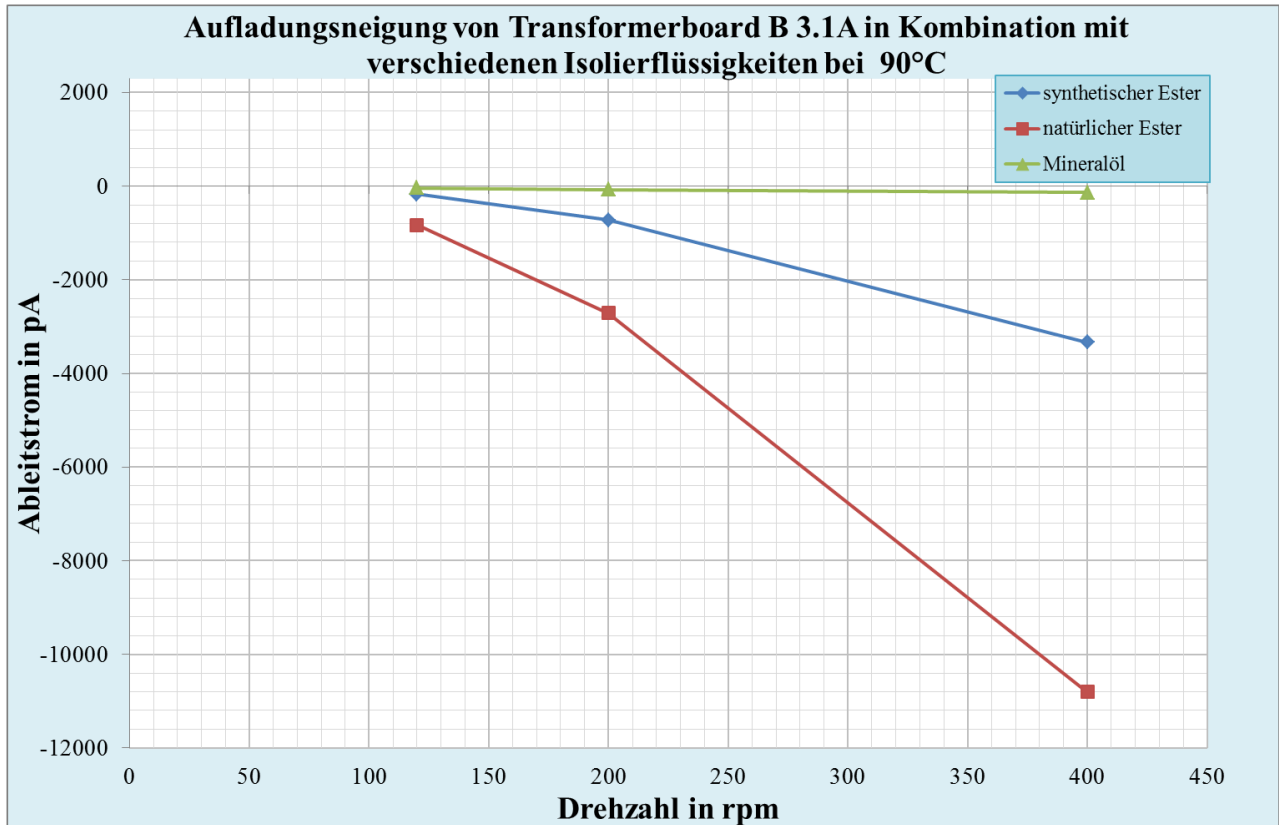


Abbildung 6-6: Ableitstrom der verschiedenen Isolierflüssigkeiten mit Transformerboard B 3.1A bei einer Temperatur von 90 °C

6.2.3 Diskussion

Zusammenfassend ist erkennbar, dass der Ableitstrom mit steigender Geschwindigkeit zunimmt. Für Raumtemperatur, 60 °C und 90 °C gilt, dass der Ableitstrom beim Ester größer ist als beim Mineralöl. Die Aufladungsneigung vom natürlichen Ester ist größer als beim synthetischen Ester. Dass der Ester eine höhere Aufladungsneigung als Mineralöl besitzt, wurde bereits in der Literaturrecherche im **Kapitel 4** beschrieben siehe z.B. **Abbildung 4-7**.

6.3 VERGLEICH DER AUFLADUNGSNEIGUNG VERSCHIEDENER FESTER ISOLIERSTOFFE

6.3.1 Einfluss verschiedener Feststoffe mit synthetischem Ester

In **Abbildung 6-7** ist der Einfluss des Feststoffes mit synthetischem Ester bei Raumtemperatur dargestellt. Transformerboard B 3.1A hat im Vergleich zu Nomex® 993 eine viel geringere elektrostatische Aufladung. Nomex® 993 hat den größten Ableitstrom über alle Geschwindigkeitsbereiche. Mit steigender Umdrehungszahl nimmt der Ableitstrom zu. Die gleichen Tendenzen gelten auch bei 60 °C, siehe **Abbildung 6-8**, und bei 90 °C, siehe **Abbildung 6-9**. Der Kurvenverlauf der Ableitströme von den beiden Feststoffen ist besonders bei 90 °C mit steigender Drehzahl ähnlich.

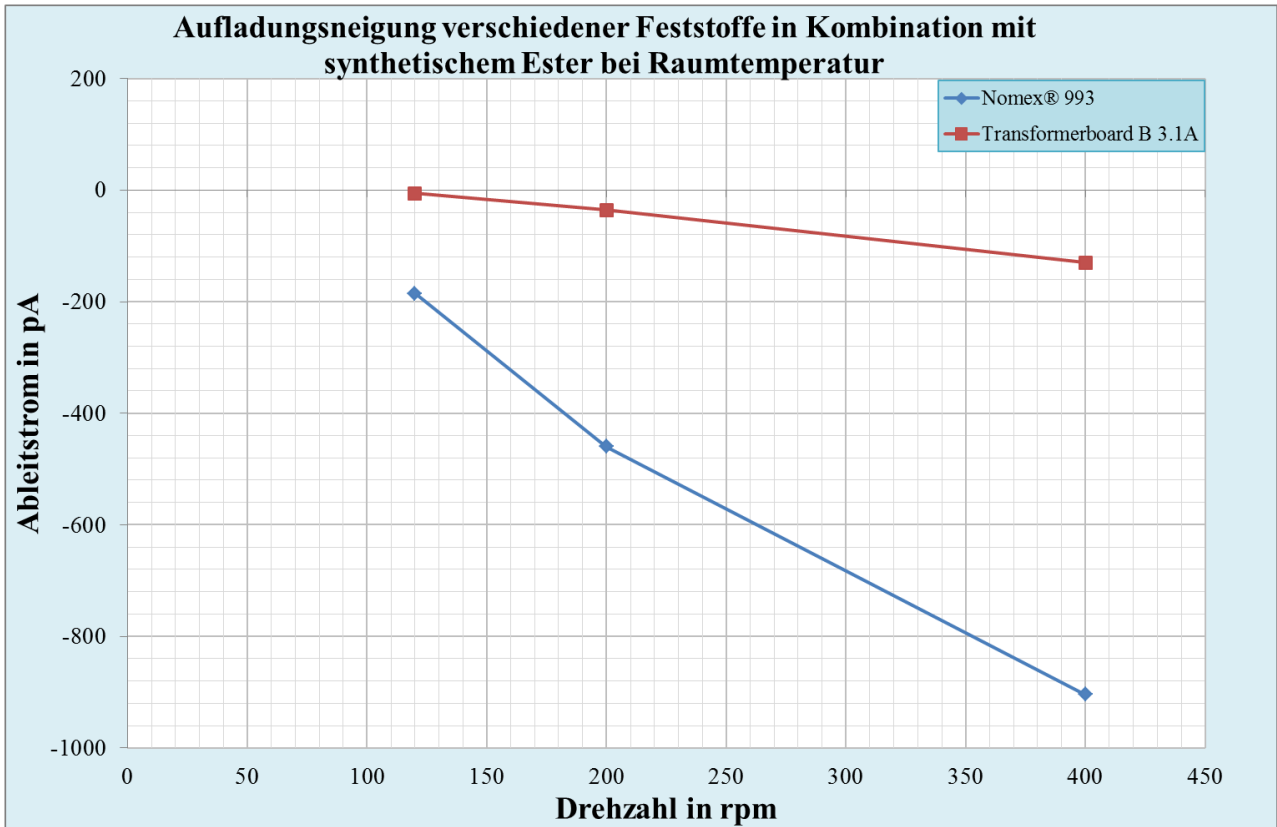


Abbildung 6-7: Ableitstrom von synthetischem Ester mit unterschiedlichen Feststoffen bei Raumtemperatur

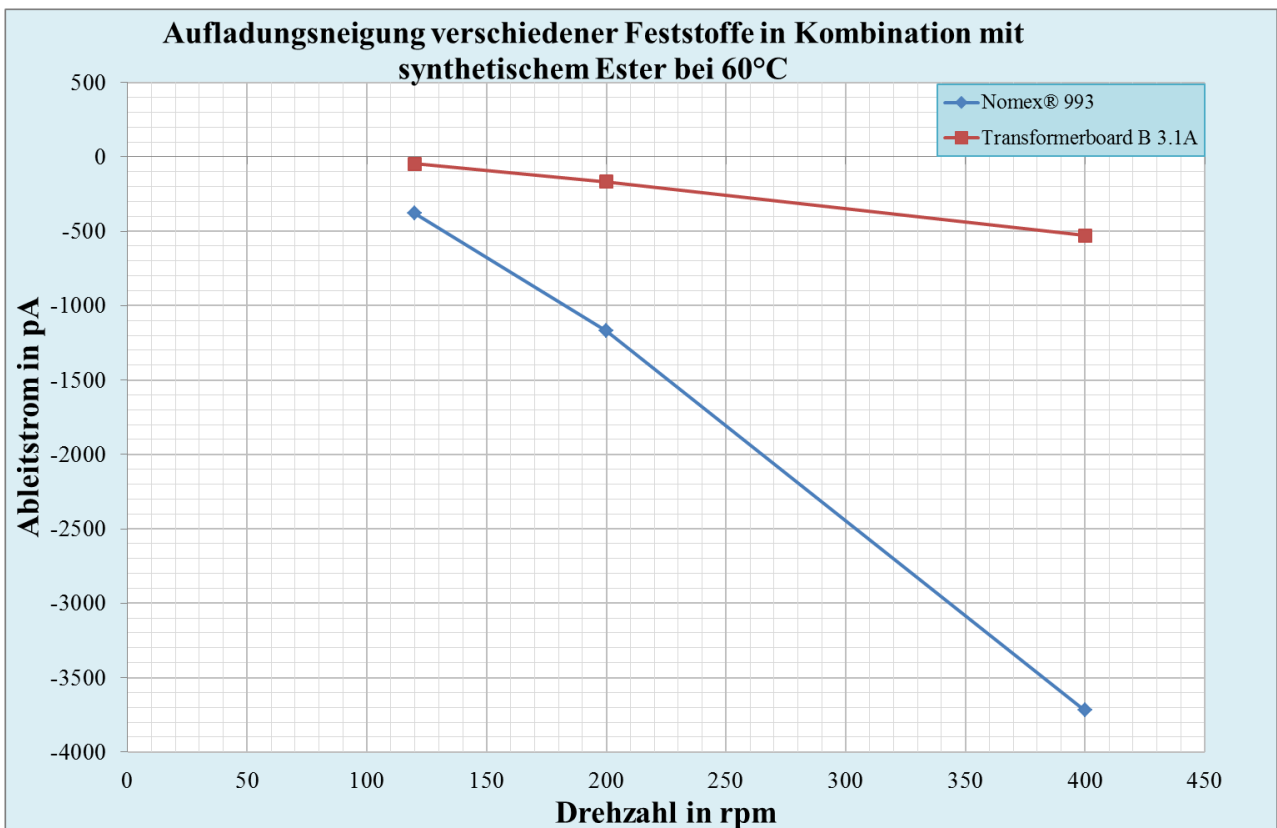


Abbildung 6-8: Ableitstrom von synthetischem Ester mit unterschiedlichen Feststoffen bei einer Temperatur von 60 °C

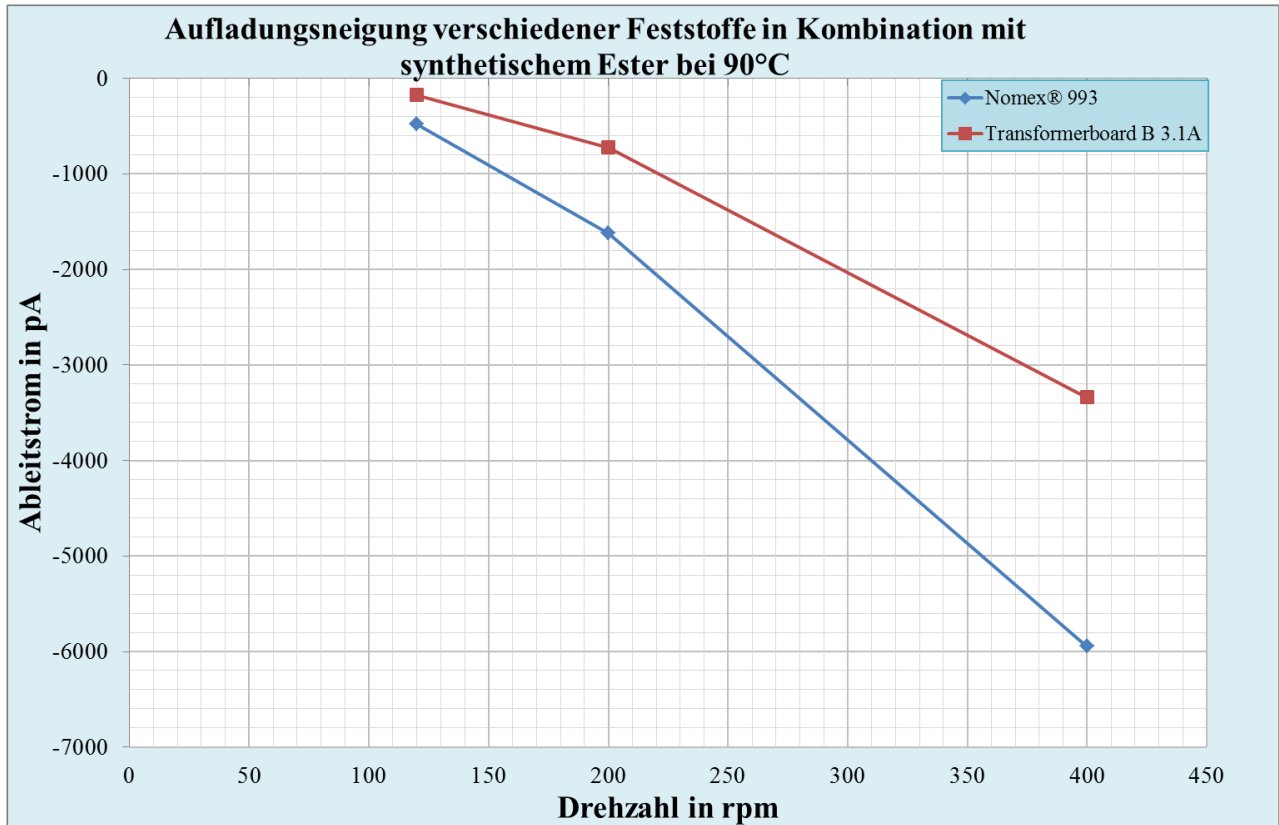


Abbildung 6-9: Ableitstrom von synthetischem Ester mit unterschiedlichen Feststoffen bei einer Temperatur von 90 °C

6.3.2 Einfluss verschiedener Feststoffe mit natürlichem Ester

In **Abbildung 6-10** ist der Einfluss des Feststoffes mit natürlichem Ester bei Raumtemperatur dargestellt. Transformerboard B 3.1A hat im Vergleich zu Nomex® 993 eine geringere Aufladungsneigung. Nomex® 993 hat den größten Ableitstrom über alle Geschwindigkeitsbereiche. Mit steigender Umdrehungszahl nimmt der Ableitstrom zu. Der Kurvenverlauf der Ableitströme als Funktion der Drehzahl ist für beide Feststoffe ähnlich. Die gleichen Tendenzen können auch bei 60 °C, siehe **Abbildung 6-11**, und bei 90 °C, siehe **Abbildung 6-12**, beobachtet werden. Bei 90 °C treten bei beiden Feststoffen bei 120 rpm ungefähr gleich große Ableitströme auf.

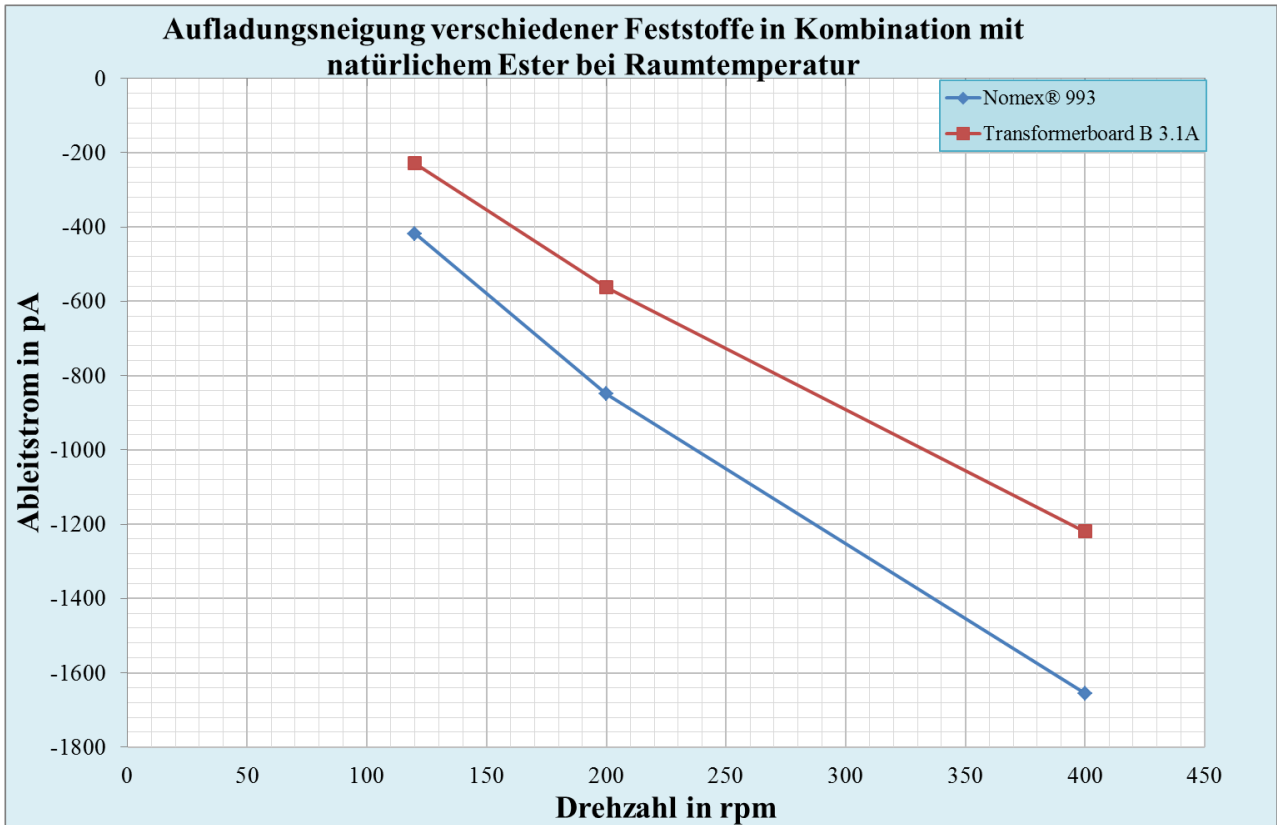


Abbildung 6-10: Ableitstrom vom natürlichen Ester mit unterschiedlichen Feststoffen bei Raumtemperatur

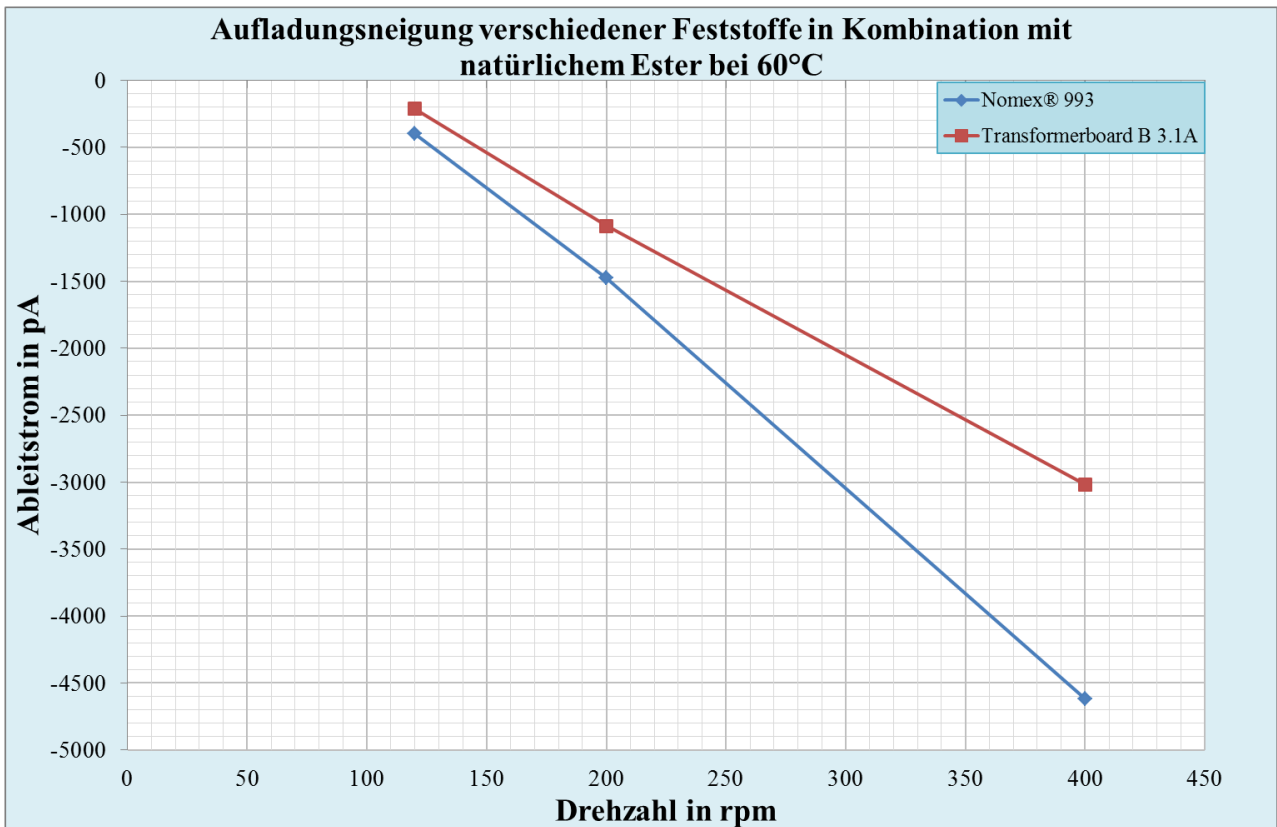


Abbildung 6-11: Ableitstrom vom natürlichen Ester mit unterschiedlichen Feststoffen bei einer Temperatur von 60 °C

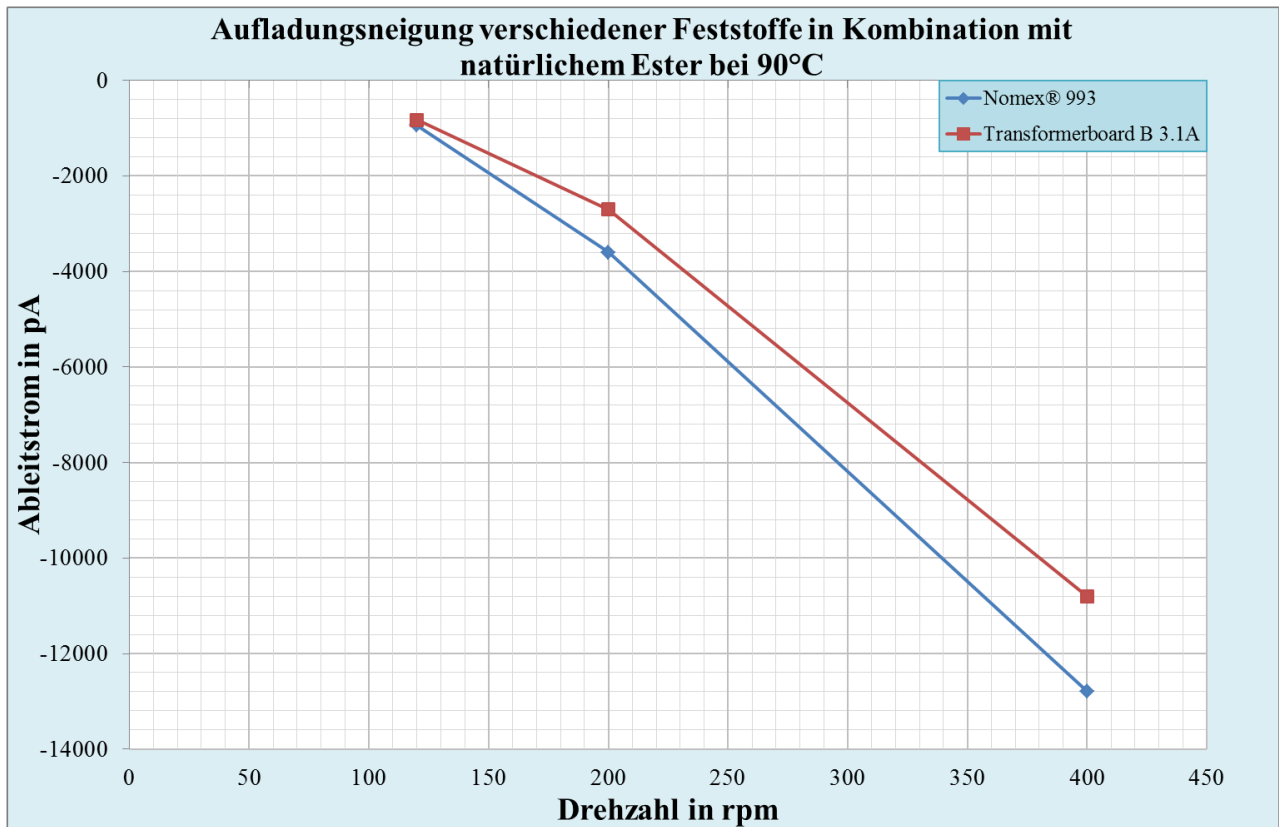


Abbildung 6-12: Ableitstrom vom natürlichen Ester mit unterschiedlichen Feststoffen bei einer Temperatur von 90 °C

6.3.3 Einfluss verschiedener Feststoffe mit Mineralöl

In **Abbildung 6-13** ist der Einfluss des Feststoffes mit Mineralöl bei Raumtemperatur dargestellt. Bei Nomex® ist der Ableitstrom bei 120 rpm und 200 rpm positiv. Zwischen 200 rpm und 400 rpm kommt es zu einer Polaritätsumkehr. Beim Transformerboard B 3.1A ist der Ableitstrom negativ und ist bei 200 rpm und 400 rpm ungefähr gleich groß. Transformerboard B 3.1A hat die größte Aufladung bei 200 rpm und 400 rpm und die geringste bei 120 rpm. Bei 120 rpm ist die Aufladungsneigung beim Nomex® 993 größer als beim Transformerboard B 3.1A und bei 200 rpm und 400 rpm kleiner.

In **Abbildung 6-14** ist der Einfluss des Feststoffes mit Mineralöl bei einer Temperatur von 60 °C dargestellt. Bei Nomex® 993 bleibt der Ableitstrom bei 120 rpm und 200 rpm ungefähr gleich groß. Über alle Geschwindigkeitsbereiche besitzt Transformerboard B 3.1A eine höhere Aufladungsneigung als Nomex® 993.

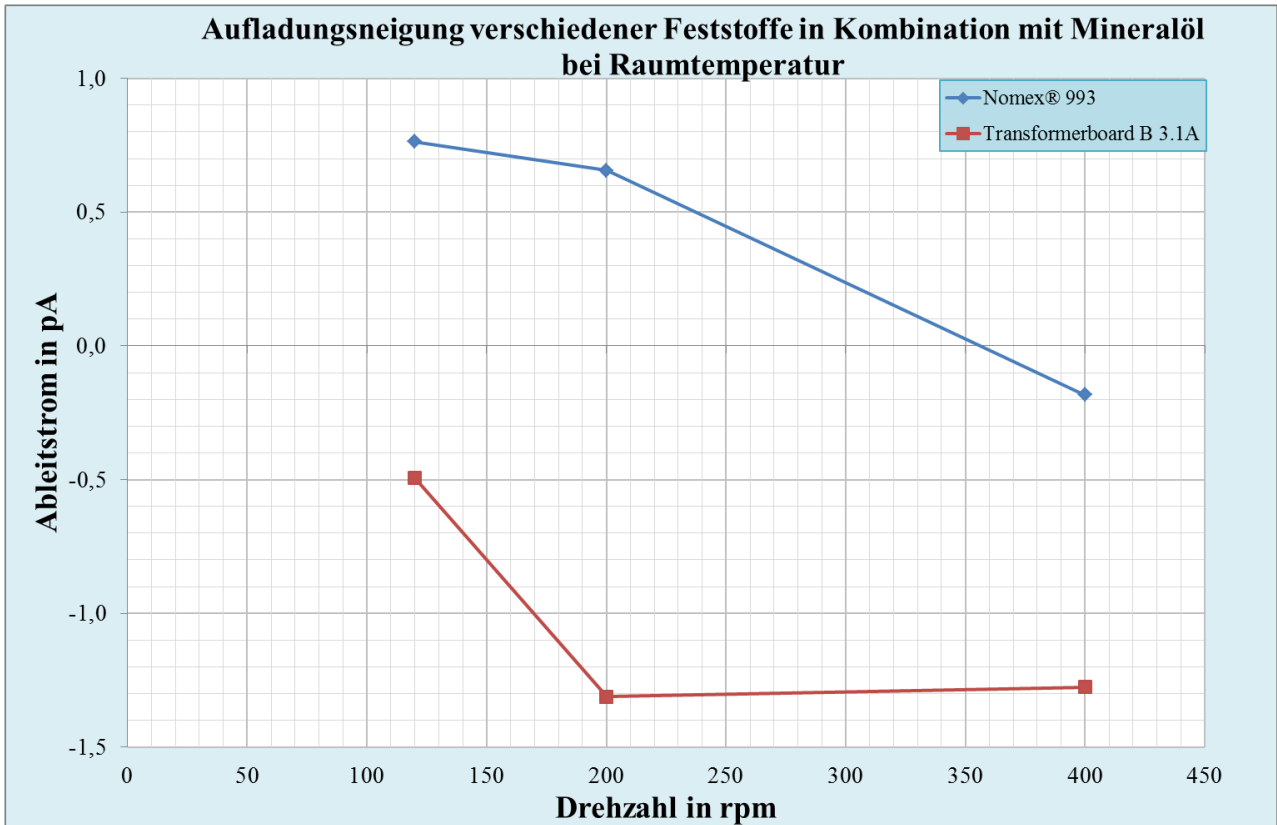


Abbildung 6-13: Ableitstrom von Mineralöl mit unterschiedlichen Feststoffen bei Raumtemperatur

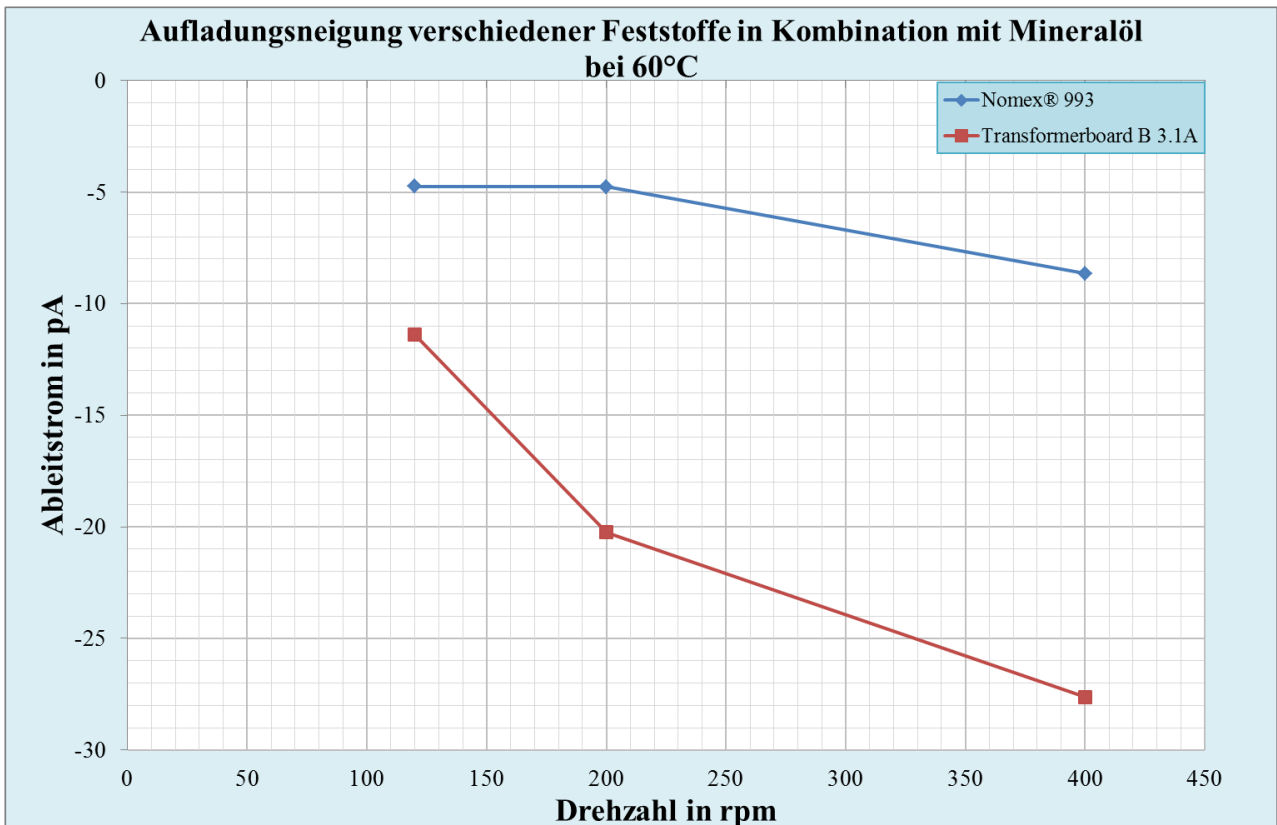


Abbildung 6-14: Ableitstrom von Mineralöl mit unterschiedlichen Feststoffen bei einer Temperatur von 60 °C

In **Abbildung 6-15** ist der Einfluss des Feststoffes mit Mineralöl bei einer Temperatur von 90 °C dargestellt. Bei Nomex® 993 bleibt der Ableitstrom bei 200 rpm und 400 rpm ungefähr gleich groß. Nomex® 993 hat einen positiven Ableitstrom für alle Geschwindigkeitsbereiche. Der Ableitstrom steigt bei Transformerboard B 3.1A mit zunehmender Geschwindigkeit annähernd linear an. Der Ableitstrom ist bei Transformerboard B 3.1A für alle Geschwindigkeitsbereiche negativ. Über alle Geschwindigkeitsbereiche besitzt Transformerboard B 3.1A eine höhere Aufladungsneigung als Nomex® 993.

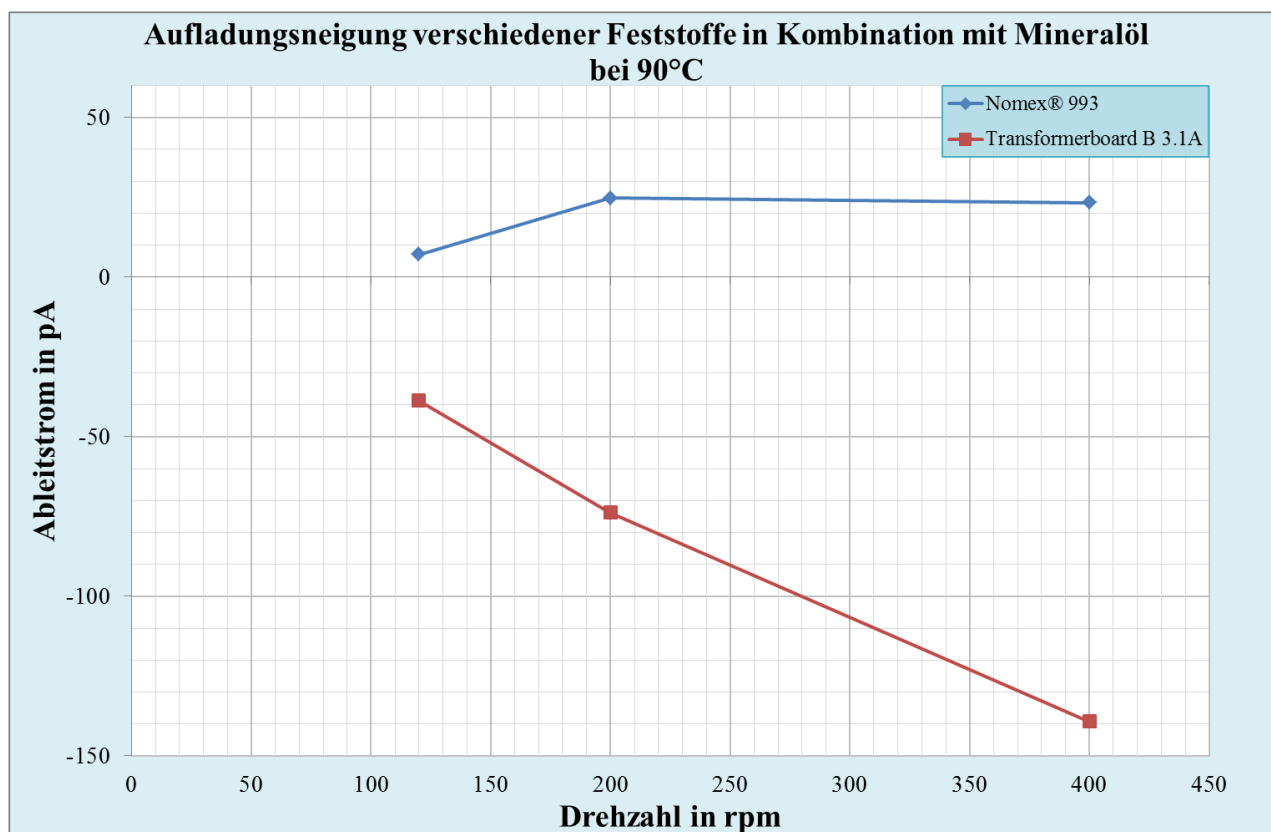


Abbildung 6-15: Ableitstrom von Mineralöl mit unterschiedlichen Feststoffen bei einer Temperatur von 90 °C

6.3.4 Diskussion

Beim synthetischen und natürlichen Ester besitzt Nomex® 993 eine höhere Aufladung als Transformerboard B 3.1A. Bei Mineralöl besitzt Transformerboard B 3.1A eine höhere Aufladung, ausgenommen bei 20 °C und 120 rpm.

7 RESÜMEE

In diesem Kapitel wird ein Resümee über die Erkenntnisse gegeben, die diese Masterarbeit hervorgebracht hat.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zuerst eine umfassende Literaturrecherche über elektrostatische Aufladungsuntersuchungen an alternativen Isolierflüssigkeiten durchgeführt. Für die Bestimmung der Aufladungsneigung alternativer Isolierflüssigkeiten wurde meistens ein Prüfaufbau nach der Filtermethode verwendet. Seltener wurden Prüfaufbauten mit rotierender und ebener Strömung eingesetzt. Zusammengefasst wurde bei der Literaturrecherche herausgefunden, dass bei einer Gegenüberstellung von Mineralöl, Silikonöl und Esterflüssigkeiten in Kombination mit Zellulose die höchste Aufladungsneigung (Ladungserzeugung) beim Ester gemessen worden ist. In einer Veröffentlichung wurde neben der Ladungserzeugung auch die Ladungsansammlung an Zellulose bestimmt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die angesammelte Ladung für einige Ester nicht so kritisch ist und ähnlich hohe Werte wie bei mineralischen Ölen besitzt. Aus der Literaturrecherche kann die grundsätzliche Tendenz erkannt werden, dass mit steigender Temperatur und Durchflussgeschwindigkeit die elektrostatische Aufladung zunimmt. Weiters wurde die Aufladungsneigung von Mischungen der alternativen Isolierflüssigkeiten mit Mineralöl vermessen und in zwei Veröffentlichungen dokumentiert. In einer der beiden Veröffentlichungen wird berichtet, dass die elektrostatische Aufladungsneigung der gemischten Isolierflüssigkeiten zwischen jener der reinen Isolierstoffe liegt, was eine Verbesserung gegenüber dem Ester alleine zeigt. In der zweiten Veröffentlichung wird beschrieben, dass die reinen Isolierflüssigkeiten die höchste Aufladungsneigung besitzen und mit steigendem Anteil des Esters im Mineralöl die Aufladungsneigung sinkt. Außerdem ist die elektrostatische Aufladungsneigung der Isolierflüssigkeiten geringer nach einer Aufbereitung. Beim Silikonöl ist das am besten erkennbar. Die Aufladungsneigung kann auch durch den Zusatz von BTA beeinflusst werden. Es wurde festgestellt, dass bei Mineralöl und Pflanzenöl durch den Zusatz von BTA der Aufladestrom sein Vorzeichen mit steigender Temperatur ändert. Einige Veröffentlichungen behandelten auch die Aufladung von Isolierflüssigkeiten in Kombination mit PTFE. Dabei wies Mineralöl die höchste Ladungsdichte auf.

Nach der Literaturrecherche wurden praktische Untersuchungen mit einer *spinning disc* durchgeführt. Dabei wurden Mineralöl, ein natürlicher und ein synthetischer Ester in Kombination mit Nomex® 993 und Transformerboard B 3.1A bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung untersucht. Für die Esterflüssigkeiten ergaben sich negative Ableitströme. Bei Mineralöl traten zum Teil, vor allem in Kombination mit Nomex® 993, auch positive Ableitströme auf. Sowohl bei Mineralöl als auch bei den Esterflüssigkeiten nimmt die Aufladung mit der Temperatur und der Drehzahl der rotierenden Scheibe zu. Die Esterflüssigkeiten besaßen eine höhere Aufladungsneigung als Mineralöl. In Kombination mit den Esterflüssigkeiten wies Nomex® 993 eine höhere Aufladungsneigung auf als Transformerboard B 3.1A. Mit Mineralöl ergab sich grundsätzlich der umgekehrte Fall.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Allgemein kann eine elektrostatische Aufladung durch unterschiedliche Kontaktvorgänge entstehen zum Beispiel: durch das Trennen von Feststoffen oder das Durchströmen von Flüssigkeiten durch Rohre. Bei diesen Vorgängen kommt es im Bereich der Kontaktfläche zu einem Austausch der elektrischen Ladungen [Lem96:7]. Bei den zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformatoren kommt es durch die Zirkulation der Isolierflüssigkeit zwischen dem festen und flüssigen Isolierstoff zu einer elektrostatischen Aufladung. Deshalb traten bei einigen Leistungstransformatoren ungewollte Fehler auf. In der Vergangenheit gab es viele Untersuchungen mit Mineralöl und Zellulose. Heutzutage wird versucht das üblicherweise eingesetzte Mineralöl durch neue Isolierflüssigkeiten zu ersetzen. Diese Isolierflüssigkeiten sollten biologisch abbaubar und nachhaltig sein und ähnliche Eigenschaften wie das Mineralöl aufweisen. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt besteht daher darin, diese alternativen Isolierflüssigkeiten auf ihre Aufladungsneigung hin zu untersuchen. Ziel dieser Masterarbeit war es die elektrostatische Aufladung verschiedener alternativer Isolierflüssigkeiten zu untersuchen und mit jener von Mineralöl zu vergleichen. Weiters wurde eine Literaturrecherche über elektrostatische Aufladungsuntersuchungen an alternativen Isolierflüssigkeiten durchgeführt.

Die elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren kann in vier Schritte unterteilt werden: Ladungserzeugung, Ladungstransport, Ladungsanhäufung und Ladungsableitung. Durch einen physikalisch-chemischen Prozess kommt es zur Ladungserzeugung an der Grenzfläche zwischen einem flüssigen und festen Isolierstoff. Entlang der Oberfläche des festen Isolierstoffes wird durch den Fluss der Isolierflüssigkeit eine Ladungstrennung bewirkt. Dies führt zu einer Aufladung der Oberfläche, während sich die entgegengesetzten Ladungen in der Flüssigkeit ansammeln. Das elektrische Potenzial vom Pressboard kann so hohe Werte erreichen, dass es zu elektrostatischen Entladungen und elektrischen Beeinflussungen der Flüssigkeit kommt. Das elektrische Potenzial vom Pressboard wird durch den Ableitwiderstand begrenzt [Zel11:1]. Die Strömungsform besitzt einen großen Einfluss auf die elektrostatische Aufladung. Grundsätzlich können zwei unterschiedliche Strömungsformen auftreten: laminare und turbulente Strömung. Die laminare Strömung ist eine Schichtströmung, in der keine regellosen Querbewegungen auftreten. Die turbulente Strömung ist durch Geschwindigkeitsschwankungen und Druckveränderungen gekennzeichnet.

Zur Bestimmung der Aufladungsneigung von festen und flüssigen Isolierstoffen können grundsätzlich zwei Methoden unterschieden werden. Diese sind *screening of design* und *screening of material*. Beim *screening of design* erfolgt die Bewertung der elektrostatischen Aufladungsneigung unter Nachbildung der Verhältnisse im realen Transformator. Hingegen werden beim *screening of material* nur die einzelnen Komponenten vom Transformator auf ihr elektrostatische Aufladungsneigung bewertet. In dieser Arbeit werden die gängigsten Methoden zur Bestimmung der elektrostatischen Aufladungsneigung erklärt. Diese können unterschieden werden in Prüfaufbauten mit ebener Strömung, mit rotierender Strömung und Filtermethoden.

Bei der Literaturrecherche über Aufladungsuntersuchungen an alternativen Isolierflüssigkeiten wurde festgestellt, dass die meisten Untersuchungen mit der Filtermethode durchgeführt worden sind. Vergleicht man Mineralöl, Silikonöl und Esterflüssigkeiten, so wurde die größte Aufladungsneigung bei den Esterflüssigkeiten gemessen. Durch Vermischen der alternativen Isolierflüssigkeiten mit Mineralöl kann die Aufladungsneigung verändert werden. In einer Veröffentlichung wird beschrieben, dass die Aufladungsneigung der vermischten Isolierflüssigkeiten zwischen jener der reinen Isolierflüssigkeiten liegt. In einer anderen Veröffentlichung wird berichtet, dass die reinen Isolierflüssigkeiten die höchste Aufladungsneigung besitzen und die Aufladungsneigung der vermischten Isolierflüssigkeiten mit steigendem Anteil des Esters im Mineralöl abfällt. Weiters kann die Aufladungsneigung durch den Zusatz von Benzotriazolen (BTA) beeinflusst werden. Außerdem ist die elektrostatische Aufladungsneigung der Isolierflüssigkeiten nach einer Aufbereitung geringer.

Bei den praktischen Untersuchungen mit einer *spinning disc* wurden drei flüssige (Mineralöl, synthetischer und natürlicher Ester) und zwei feste Isolierstoffe (Nomex® 993 und Transformerboard B 3.1A) bei unterschiedlichen Temperaturen auf ihre Aufladungsneigung hin untersucht. Als Bewertungskriterium für die elektrostatische Aufladung wurde der Ableitstrom herangezogen. Durch die Messungen wurde festgestellt, dass der Ableitstrom beim Ester größer ist als beim Mineralöl. In Kombination mit Esterflüssigkeiten hat

Transformerboard B 3.1A im Vergleich zu Nomex® 993 eine geringere Aufladungsneigung. In Kombination mit Mineralöl besitzt Transformerboard B 3.1A eine höhere Aufladungsneigung als Nomex® 993.

Um die elektrostatische Aufladungsneigung der neueren Isolierstoffe besser zu beurteilen, sind noch weitere Untersuchungen notwendig. Es sollten weitere feste und flüssige Isolierstoffe untersucht werden. Um Untersuchungen mit unterschiedlichen Ölfeuchtigkeiten durchzuführen, muss der Messaufbau in einem Vakuumofen untergebracht werden. Dadurch könnte die Ölfeuchtigkeit über die gesamte Messung konstant gehalten werden.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- [Aks09] Aksamit, P.; Zmarzy, D., "Dielectric properties of fullerene-doped insulation liquids", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '09), Virginia Beach, VA, pp. 212-215, 18-21 October 2009
- [Aks11] Aksamit, P.; Zmarzy, D.; Boczar, T., "Electrostatic properties of aged fullerene-doped mineral oil", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 5, pp. 1459-1462, October 2011
- [Ara11] Arazoe, S.; Saruhashi, D.; Sato, Y.; Yanabu, S.; Ueta, G.; Okabe, S., "Electrical characteristics of natural and synthetic insulating fluids", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 2, pp. 506-512, April 2011
- [Ask13] Wikipedia, "Askarele", Internet: <https://de.wikipedia.org/wiki/Askarele>, abgerufen am 5.4.2013
- [Bou10] Bouslimi, Y.; Fofana, I.; Hemmatjou, H.; Volat, C., "Static electrification assessment of transformer oils in the spinning disc system", 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), New Orleans, LA, pp. 337-340, 11-14 October 2010
- [Bre13] Brenner H., "Erdöl", Internet: http://www.planet-wissen.de/natur_technik/energie/erdoel/index.jsp, abgerufen am 22.3.2013
- [Bre132] Brenn, G.; Meile, W., Vorlesungsskriptum: "Strömungslehre und Wärmeübertragung I", korrigierte Auflage 2013, TU Graz, 2013
- [Cab07] Cabaleiro, J. M., "Etude du developpement de la double couche electrique lors de la mise en ecoulement d'un liquide dielectrique dans une conduite isolante", Dissertation, Université de Poitiers, 11 décembre 2007
- [Che13] Chemgapedia, "Zusammensetzung und Qualität", Internet: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/erdoel/rohoel/rohoel.vlu/Page/vsc/de/ch/10/erdoel/rohoel/zusammensetzung/zusammensetzung.vscml.html>, abgerufen am 22.3.2013
- [Cho11] Choi, S. H., Jung J. I., Huh C. S., "Analysis on streaming electrification of vegetable oil exposed to accelerated aging", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 22-26 August 2011
- [Ebe11] Eberhardt, R., "Elektrische Eigenschaften und Gasungsverhalten von biologischen synthetischen Estern in Hochspannungs-Isolationssystemen unter Kälteeinfluss", Dissertation, TU Graz, 2011
- [EIA10] El-Adawy, M.; Paillat, T.; Bertrand, Y.; Moreau, O.; Touchard, G., "Physicochemical Analysis at the Interface Between Conductive Solid and Dielectric Liquid for Flow Electrification Phenomenon", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 4, pp. 1593-1600, July-August. 2010
- [Ele13] Wikipedia, "Elektrochemische Doppelschicht", Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz-Doppelschicht>, abgerufen am 31.7.2013
- [EPR95] EPRI, "Flow induced electrification of liquid insulated electrical equipment", TR104973, Chapter 2: Background, May 1995
- [Gro11] Grote, K. H.; Feldhusen, J., "Taschenbuch für den Maschinenbau", 23. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011
- [Jag93] Jagadish, R.; Poovamma, P. K.; Dwarakanath, K., "Effects of polymeric materials and contaminants on streaming electrification", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report, Pocono Manor, PA, pp. 62-67, 17-20 October 1993
- [Joi00] Joint Working Group 12/15.13, "Static Electrification in Power Transformers", cigre, 2000

- [Joi10] Joint Working Group A2.35, "Experiences in Service with New Insulating Liquids", cigre, October 2010
- [Ked89] Kedzia, J., "Investigation of transformer oil electrification in a spinning disk system", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 24, no. 1, pp. 59-65, February 1989
- [Ked94] Kedzia, J., Willner, B., "Electrification current in the spinning disk system", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, no. 1, pp. 58-62, February 1994
- [Küc05] Küchler, A., Hochspannungstechnik: Grundlagen, Technologie, Anwendungen, 2. Auflage Springer-Verlag Berlin, 2005
- [Lem96] Lemesch, G., "Methoden zur Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung von flüssig/festen Isolierungssystemen", Dissertation, TU Graz, 1996
- [McS06] McShane, C.P.; Corkran, J.; Rapp, K.; Luksich, J., "Natural Ester Dielectric Fluid Development", Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, Dallas, TX, pp. 18-22, 21-24 May 2006
- [Met] Bedienungsanleitung 831 KF Coulometer
- [Mor03] Moreau, O., Paillat, T., Touchard, G., "Flow Electrification in Transformers: Sensor Prototype for Electrostatic Hazard", Inst. Phys. Conf. Ser. No 178: Section 1, 2003
- [Mos79] Moser, H. P.; Dahinder, V.; Friederich, H.; Künast, H.; Lennarz, K.; Leukens, U.; Potočnik, O., "Transformerboard", Sonderdruck der Zeitschrift Scientia Electrica Weidmann AG, Basel, 1979
- [Mül13] Dr. D. Müller Ahlhorn, "Nomex®", Internet: <http://www.mueller-ahlhorn.com/produkte-materialien/material/flexible-elektroisolerstoffe/nomex/>, abgerufen am 26.3.2013
- [Oom84] Oommen, T. V.; Petrie, E. M., "Electrostatic Charging Tendency of Transformer Oils", Power Engineering Review, IEEE, vol. PER-4, no. 7, pp. 70, July 1984
- [Pai09] Paillat, T.; Cabaleiro, J. M.; El-Adawy, M.; Moreau, O.; Touchard, G., "High Power Transformers Failures due to Flow Electrification: Tools for Understanding the Electrostatic Hazard", Electrostatic Joint Conference Boston University Conference Presentation-Session 1 Paper 5; 16-18 June 2009
- [Pai12] Paillat, T.; Zelu, Y.; Morin, G.; Perrier, C., "Ester oils and flow electrification hazards in power transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 5, pp. 1537-1543, October 2012
- [Per06] Perrier, C.; Beroual, A.; Bessede, J.-L., "Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 3, pp. 556-564, June 2006
- [Per09] Perrier, C.; Beroual, A., "Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: Mineral, ester, and silicone oils", IEEE, Electrical Insulation Magazine, vol. 25, no. 6, pp. 6-13, November-December 2009
- [Pod13] Podesser, J.; Schwarz, R.; Pukel, G.; Wieser, B.; Muhr, M., "Flow electrification in the cooling channels of a power transformer-presentation of the streaming model test setup", Electrostatics 2013, Budapest, Hungary, April 2013
- [Pod132] Podesser, J.; Schwarz, R.; Pukel, G.; Wieser, B.; Muhr, M., "Investigation of the static electrification phenomenon in power transformers with the streaming model test setup", 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, South Korea, August 2013
- [Poo05] Poovamma, P. K.; Jagadish, R.; Dwarakanath, K., "Charging tendency in transformer oil", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report, Victoria, BC, pp. 262-267, 18-21 October 1992

- [Poo11] Poovamma, P. K.; Pattanshetti, V. V.; Ahmed, T.R.A.; Sudhindra, A., "Charging tendency of mineral oils and synthetic ester mixtures", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Trondheim, pp. 1-4, 26-30 June 2011
- [Pra98] Praxl, G.; Lemesch, G., "Methoden zur Messung der elektrostatischen Aufladungsneigung von fest/flüssigen Isolierungssystemen in Hochspannungstransformatoren", 43rd International Scientific Colloquium Technical University of Ilmenau, 21-24 September 1998
- [Puk08] Pukel, G. J., "Elektrische Festigkeit von Isolieröl", Dissertation, TU Graz; 2008
- [Qin01] Yu, Q.; Ren, W.; Xie, H., "Study on relationship between the current of oil flow electrification and characteristics of solid materials", Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials, (ISEIM 2001), pp. 857-859, 2001
- [Qin98] Yu, Q.; Xie, H.; Hao, N., "Study on the mechanism of static electrification in transformer oil", Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, pp. 779-781, 27-30 September 1998
- [Rad92] Radwan, R. M.; El-Dewieny, R. M.; Metwally, I.A., "Investigation of static electrification phenomenon due to transformer oil flow in electric power apparatus", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 27, no. 2, pp. 278-286, April 1992
- [Rey13] Wikipedia, "Reynolds-Zahl", Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Reynolds-Zahl>, abgerufen am 3.4.2013
- [Sai11] Saito, H.; Okubo, H.; Kojima, H.; Hayakawa, N.; Kato, K.; Kawanishi, K.; Koide, H., "Charge behavior in Palm Fatty Acid Ester Oil (PFAE) / Pressboard composite insulation system with charged oil flow", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Trondheim, pp. 1-4, 26-30 June 2011
- [Sen14] Sensorshop 24, "Temperaturfühler", Internet: <http://www.sensorshop24.de/en/Temperature-Sensors/Screw-In-with-Cable/Einschraubfuehler-mit-einem-M8x10-Gewinde/Einschraubfuehler-bis-200-C-oxid/EF7S-W.html>, abgerufen 3.1.2014
- [Sie94] Sierota, A.; Rungis, J., "Electrostatic charging in transformer oils. Testing and assessment", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, no. 5, pp. 840-870, October 1994
- [Spu06] Spurk, J. H.; Aksel, N., "Strömungslehre", 6. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006
- [Tal13] Talhi, M.; Fofana, I.; Flazi, S., "The electrostatic charging tendency of some environmentally friendly insulating fluids", IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Ottawa, ON, pp. 378-382, 2-5 June 2013
- [Tra14] Wikipedia, "Transformator", Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Transformator>, abgerufen am 3.4.2014
- [Uni13] Uni Frankfurt, "Übergang von laminarer Strömung zur Turbulenz bei Rohrströmungen", Internet: <http://user.uni-frankfurt.de/~korneck/Unterrichtsreihe/3ROH.pdf>, abgerufen 10.9.2013
- [Ver13] Wikipedia, "Veresterung", Internet: <https://de.wikipedia.org/wiki/Veresterung>, abgerufen am 7.4.2013
- [Vih11] Vihacencu, M.; Dumitran, L.-M.; Notingher, P.V., "Transformer mineral oil electrification", 7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, pp. 1-6, 12-14 May 2011
- [Vih12] Vihacencu, M.S.; Ciuriuc, A.; Dumitran, L.-M.; Notingher, P.V., "Correlation between ageing condition and flow electrification charge in transformer mineral oil", 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, pp. 118-123, 24-26 May 2012

- [Yas11] Yasuda, K.; Arazoe, S.; Igarashi, T.; Yanabu, S.; Ueta, G.; Okabe, S., "Comparison of the insulation characteristics of environmentally-friendly oils", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 3, pp. 791-798, June 2010
- [Zar13] Zarzalis, N.; Eiberger, F., "Theorie turbulenter Strömungen ohne und mit überlagerter Verbrennung", Internet: http://www.vbt.uni-karlsruhe.de/index.pl/Haupt_Menu_Info-Material/vorles_ansicht/SS22514, Karlsruhe Institute of Technology, abgerufen am 4.4.2013
- [Zda07] Zdanowski, M.; Wolny, S.; Zmarzly, D.; Kedzia, J., "The analysis and selection of the spinning disk system parameters for the measurement of static electrification of insulation oils", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 2, pp. 480-486, April 2007
- [Zda08] Zdanowski, M., "Influence of Composition of Dielectric Liquid Mixtures on Electrostatic Charge Tendency and Physicochemical Parameters", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 2, pp. 527-532, April 2008
- [Zda082] Zdanowski, M., "Static electrification properties of hexane and cyclohexane mixtures", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Futuroscope-Chasseneuil, pp. 1-4, June 30 2008-July 3 2008
- [Zel11] Zelu, Y.; Paillat, T.; Morin, G.; Perrier, C.; Saravolac, M., "Study on flow electrification hazards with ester oils", Dielectric Liquids (ICDL), 2011 IEEE International Conference on, Trondheim, pp. 1-4, 26-30 June 2011
- [Zlo11] Zlodnjak, A., "Prüfaufbau zur Bestimmung der Electrostatic Charging Tendency (ECT) von Öl-Board-Anordnungen mittels CIGRE Spinning Disc Verfahren", Bachelorarbeit, TU Graz, 2011
- [Zlo12] Zlodnjak, A., "Prüfaufbau zur Bestimmung der Electrostatic Charging Tendency (ECT) von Öl-Board-Anordnungen mittels CIGRE Spinning Disc Verfahren", Masterarbeit, TU Graz, 2012
- [Zma05] Zmarzly, D.O., "1/f noise in streaming electrification", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 103-106, 26 June-1 July 2005
- [Zma09] Zmarzly, D., Aksamit, P., "Polarity reversal in streaming electrification measurements", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '09), Virginia Beach, VA, pp. 208-211, 18-21 October 2009
- [Zma12] Zmarzly, D., "Streaming electrification measurements in swinging cylinder system", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 5, pp. 1665-1672, October 2012

ANHANG

ANHANG A	PARAMETER DER UNTERSUCHTEN ISOLIERFLÜSSIGKEITEN.....	I
ANHANG B	TEMPERATUR BEI VERSUCHSREIHEN	VII

Anhang A Parameter der untersuchten Isolierflüssigkeiten

Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR1 (Mineralöl - Transformerboard B 3.1A)			
		vor VR	nach VR
U_d	kV	83,50	70,20
σU_d	%	9,4	1,9
σU_d	kV	7,8	1,3
$\tan \delta_{30^\circ C}$	l	0,00004	0,00004
$\epsilon r_{30^\circ C}$	l	2,17	2,18
$-p_{30^\circ C}$	Ωm	2,00E+13	1,61E+13
$+p_{30^\circ C}$	Ωm	6,60E+12	6,10E+12
$\tan \delta_{90^\circ C}$	l	0,00099	
$\epsilon r_{90^\circ C}$	l	2,1	
$-p_{90^\circ C}$	Ωm	4,09E+11	
$+p_{90^\circ C}$	Ωm	2,10E+11	

Tabelle 9-1: Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR1: Versuchsreihe VR

Feuchte der Isolierflüssigkeit bei VR1 (Mineralöl - Transformerboard B 3.1A)				
Entnahmezeitpunkt	Datum	T_{ent}	absolute Feuchte	rel. Feuchte
	<i>dd:mm:yy</i>	$^\circ C$	<i>ppm</i>	%
nach Aufbereitung	02.10.2013	23,00	6,5	10,4
Vakuumofen	08.10.2013	22,50	2,13	3,5
vor VR	09.10.2013	22,00	3,65	6,1
MS20	08.10.2013	22,40	5,7	9,3
MS60	09.10.2013	60,00	10	4,1
MS90	10.10.2013	90,70	11,3	1,9
MS20 _{WH}	11.10.2013	23,20	10,5	16,6
nach VR	11.10.2013	23,00	10,9	17,4

Tabelle 9-2: Feuchtegehalt der Isolierflüssigkeit bei VR1: Versuchsreihe VR, Messserie MS

Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR2 (Mineralöl - Nomex® 993)			
		vor VR	nach VR
U_d	<i>kV</i>	86,70	77,40
σU_d	%	8,2	12,6
σU_d	<i>kV</i>	7,1	9,7
$\tan \delta_{30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>		0,00014
$\epsilon r_{30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>		2,17
$-\rho_{30^\circ\text{C}}$	Ωm		2,00E+13
$+\rho_{30^\circ\text{C}}$	Ωm		1,49E+13
$\tan \delta_{90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	0,00067	0,00126
$\epsilon r_{90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	2,11	2,11
$-\rho_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	8,31E+11	8,19E+11
$+\rho_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	5,12E+11	5,24E+11

Tabelle 9-3: Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR2: VR Versuchsreihe

Feuchte der Isolierflüssigkeit bei VR2 (Mineralöl - Nomex® 993)				
Entnahmezeitpunkt	Datum	T_{ent}	absolute Feuchte	rel. Feuchte
	<i>dd:mm:yy</i>	$^\circ\text{C}$	<i>ppm</i>	%
nach Aufbereitung	28.10.2013	22,00	7,5	12,5
Vakuumofen	29.10.2013	23,00	2,2	3,5
vor VR	29.10.2013	23,00	5,1	8,1
MS20	29.10.2013	22,00	4,78	7,9
MS60	30.10.2013	59,80	9	3,7
MS90	31.10.2013	90,60	13,4	2,2
MS20 _{WH}	01.11.2013	25,20	5,93	8,6
nach VR	05.11.2013	23,00	7,5	12,0

Tabelle 9-4: Feuchtegehalt der Isolierflüssigkeit bei VR2: Versuchsreihe VR, Messserie MS

Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR3 (natürlicher Ester - Transformerboard B 3.1A)			
		vor VR	nach VR
U_d	<i>kV</i>	89,30	59,20
σU_d	%	14,2	16,6
σU_d	<i>kV</i>	12,7	9,8
$\tan \delta_{30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	0,0014	0,00187
$\epsilon r_{30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	3,12	3,13
$-p_{30^\circ\text{C}}$	Ωm	1,02E+11	7,71E+10
$+p_{30^\circ\text{C}}$	Ωm	1,10E+11	7,70E+10
$\tan \delta_{90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	0,00126	0,00182
$\epsilon r_{90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	3,13	3,13
$-p_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	9,90E+09	7,50E+09
$+p_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	9,60E+09	7,20E+09

Tabelle 9-5: Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR3: Versuchsreihe VR

Feuchte der Isolierflüssigkeit bei VR3 (natürlicher Ester - Transformerboard B 3.1A)				
Entnahmezeitpunkt	Datum	T_{ent}	absolute Feuchte	rel. Feuchte
	<i>dd:mm:yy</i>	$^\circ\text{C}$	<i>ppm</i>	%
nach Aufbereitung	03.02.2014	23,00	33,3	3,2
Vakuumofen	04.02.2014	23,00	38,4	3,7
vor VR	05.02.2014	23,00	41,3	3,9
MS20	04.02.2014	23,20	40,4	3,8
MS60	05.02.2014	59,80	42,1	2,2
MS90	06.02.2014	89,80	50,1	1,8
MS20 _{WH}	07.02.2014	24,50	51,5	4,8
nach VR	12.02.2014	23,00	59,4	5,6

Tabelle 9-6: Feuchtegehalt der Isolierflüssigkeit bei VR3: Versuchsreihe VR, Messserie MS

Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR4 (natürlicher Ester - Nomex® 993)			
		vor VR	nach VR
U_d	<i>kV</i>	88,50	55,90
σU_d	%	5,8	9,4
σU_d	<i>kV</i>	5,2	5,2
$\tan \delta_{30^\circ C}$	<i>l</i>	0,00119	0,00187
$\epsilon r_{30^\circ C}$	<i>l</i>	3,13	3,13
$-p_{30^\circ C}$	Ωm	1,13E+11	7,75E+10
$+p_{30^\circ C}$	Ωm	1,15E+11	7,79E+10
$\tan \delta_{90^\circ C}$	<i>l</i>	0,01650	0,00180
$\epsilon r_{90^\circ C}$	<i>l</i>	2,88	3,13
$-p_{90^\circ C}$	Ωm	1,03E+10	8,10E+09
$+p_{90^\circ C}$	Ωm	9,90E+09	7,50E+09

Tabelle 9-7: Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR4: VR Versuchsreihe

Feuchte der Isolierflüssigkeit bei VR4 (natürlicher Ester - Nomex® 993)				
Entnahmezeitpunkt	Datum	T_{ent}	absolute Feuchte	rel. Feuchte
	<i>dd:mm:yy</i>	$^\circ C$	<i>ppm</i>	%
nach Aufbereitung	10.02.2014	24,00	46,9	4,4
Vakuumofen	11.02.2014	27,50	41,4	3,6
vor VR	11.02.2014	23,00	43,43	4,1
MS20	11.02.2014	22,10	44,6	4,3
MS60	12.02.2014	60,00	46,9	2,5
MS90	13.02.2014	90,30	52,16	1,9
MS20 _{WH}	14.02.2014	25,10	50,4	4,6
nach VR	19.02.2014	24,00	55,9	5,2

Tabelle 9-8: Feuchtegehalt der Isolierflüssigkeit bei VR4: Versuchsreihe VR, Messserie MS

Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR5 (synthetischer Ester - Transformerboard B)			
		vor VR	nach VR
U_d	<i>kV</i>	67,00	70,90
σU_d	%	14,5	10,8
σU_d	<i>kV</i>	9,7	7,6
$\tan \delta_{30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	0,00081	0,00291
$\epsilon_{r30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	3,2	3,2
$-\rho_{30^\circ\text{C}}$	Ωm	1,77E+11	5,54E+10
$+\rho_{30^\circ\text{C}}$	Ωm	1,85E+11	5,53E+10
$\tan \delta_{90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	0,01960	0,04051
$\epsilon_{r90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	3,02	3,02
$-\rho_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	1,12E+10	6,00E+09
$+\rho_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	9,80E+09	4,80E+09

Tabelle 9-9: Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR5: Versuchsreihe VR

Feuchte der Isolierflüssigkeit bei VR5 (synthetischer Ester - Transformerboard B 3.1A)				
Entnahmezeitpunkt	Datum	T_{ent}	absolute Feuchte	rel. Feuchte
	<i>dd:mm:yy</i>	$^\circ\text{C}$	<i>ppm</i>	%
nach Aufbereitung	17.02.2014	23,00	36,7	1,8
Vakuumofen	18.02.2014	28,00	60,8	2,8
vor VR	18.02.2014	26,00	60,8	2,9
MS20	18.02.2014	24,20	66,1	3,2
MS60	19.02.2014	59,80	71	2,0
MS90	20.02.2014	89,80	70,6	1,3
MS20 _{WH}	21.02.2014	25,10	69	3,3
nach VR	26.02.2014	23,00	77,2	3,9

Tabelle 9-10: Feuchtegehalt der Isolierflüssigkeit bei VR5: Versuchsreihe VR, Messserie MS

Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR6 (synthetischer Ester - Nomex® 993)			
		vor VR	nach VR
U_d	<i>kV</i>	72,80	63,60
σU_d	%	6,9	5,7
σU_d	<i>kV</i>	5	3,6
$\tan \delta_{30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	0,0013	0,00345
$\epsilon_{r30^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	3,2	3,21
$-\rho_{30^\circ\text{C}}$	Ωm	1,24E+11	4,67E+10
$+\rho_{30^\circ\text{C}}$	Ωm	1,27E+11	4,72E+10
$\tan \delta_{90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	0,02720	0,05190
$\epsilon_{r90^\circ\text{C}}$	<i>l</i>	3,03	3,02
$-\rho_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	1,07E+10	5,30E+09
$+\rho_{90^\circ\text{C}}$	Ωm	8,80E+09	4,00E+09

Tabelle 9-11: Parameter der Isolierflüssigkeit bei VR6: VR Versuchsreihe

Feuchte der Isolierflüssigkeit bei VR6 (synthetischer Ester - Nomex® 993)				
Entnahmezeitpunkt	Datum	T_{ent}	absolute Feuchte	rel. Feuchte
	<i>dd:mm:yy</i>	$^\circ\text{C}$	<i>ppm</i>	%
nach Aufbereitung	24.02.2014	23,00	30,7	1,5
Vakuumofen	25.02.2014	27,50	49,4	2,3
vor VR	25.02.2014	24,00	56,76	2,8
MS20	25.02.2014	22,40	56,4	2,8
MS60	26.02.2014	60,00	57,3	1,6
MS90	27.02.2014	90,40	59,7	1,1
MS20 _{WH}	28.02.2014	25,10	54,4	2,6
nach VR	03.03.2014	23,00	63	3,1

Tabelle 9-12: Feuchtegehalt der Isolierflüssigkeit bei VR6: Versuchsreihe VR, Messserie MS

Anhang B Temperatur bei Versuchsreihen

VR1: Temperaturverlauf für Mineralöl								
Transformierboard B 3.1A								
Messtemperatur	RT		60 °C		90 °C		WH_RT	
Drehzahl	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}
rpm	°C							
120	22,5	22,9	59,9	60,1	90,6	90,7	23,4	23,2
200	22,8	22,7	60,1	60,2	90,7	90,7	23,2	23,1
400	22,5	22,4	60,1	60,1	90,7	90,8	23,0	23,0
120 _{WH}	22,2	22,1	60,0	60,0	X	X	23,1	23,1

Tabelle 9-13: Temperaturverlauf bei VR1: Versuchsreihe VR, Raumtemperatur RT, Wiederholung WH

VR2: Temperaturverlauf für Mineralöl								
Nomex® 993								
Messtemperatur	RT		60 °C		90 °C		WH_RT	
Drehzahl	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}
rpm	°C							
120	22,4	22,8	59,8	60,3	89,8	90,5	25,2	25,4
200	22,4	22,4	60,2	60,3	90,4	90,4	25,1	25,2
400	22,1	22,3	60,2	60,8	90,4	90,4	25,1	25,2
120 _{WH}	22,2	22,0	60,5	60,5	90,5	90,7	25,1	24,8

Tabelle 9-14: Temperaturverlauf bei VR2: Versuchsreihe VR, Raumtemperatur RT, Wiederholung WH

VR3: Temperaturverlauf für natürlichen Ester								
Transformierboard B 3.1A								
Messtemperatur	RT		60 °C		90 °C		WH_RT	
Drehzahl	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}
rpm	°C							
120	23,7	23,7	59,8	59,8	90,7	90,7	25,4	25,4
200	23,4	23,4	59,8	59,8	90,2	89,7	24,8	24,8
400	23,2	23,2	59,8	59,8	89,5	89,6	24,5	24,6
120 _{WH}	23,2	23,2	59,8	59,8	89,8	89,8	24,5	24,5

Tabelle 9-15: Temperaturverlauf bei VR3: Versuchsreihe VR, Raumtemperatur RT, Wiederholung WH

VR4: Temperaturverlauf für natürlichen Ester								
Nomex® 993								
Messtemperatur	RT		60 °C		90 °C		WH_RT	
Drehzahl	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}
rpm	°C							
120	22,2	22,2	59,9	59,9	90,5	90,2	26,4	25,7
200	22,1	22,1	59,9	59,9	90,1	90,1	25,5	25,5
400	22,1	22,1	59,9	60,0	90,2	90,3	25,2	25,3
120 _{WH}	22,1	22,1	60,0	60,0	90,3	90,3	25,3	25,2

Tabelle 9-16: Temperaturverlauf bei VR4: Versuchsreihe VR, Raumtemperatur RT, Wiederholung WH

VR5: Temperaturverlauf für synthetischen Ester								
Transformerboard B 3.1A								
Messtemperatur	RT		60 °C		90 °C		WH_RT	
Drehzahl	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}
rpm	°C							
120	24,8	24,5	60,1	59,7	90,4	89,7	25,4	25,4
200	24,4	24,4	59,7	59,7	89,7	89,7	25,1	25,1
400	24,1	24,2	59,7	59,8	89,7	89,8	24,8	25,0
120 _{WH}	24,2	24,2	59,8	59,8	89,8	89,8	25,1	25,1

Tabelle 9-17: Temperaturverlauf bei VR5: Versuchsreihe VR, Raumtemperatur RT, Wiederholung WH

VR6: Temperaturverlauf für synthetischen Ester								
Nomex® 993								
Messtemperatur	RT		60 °C		90 °C		WH_RT	
Drehzahl	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}	T_{Anfang}	T_{Ende}
rpm	°C							
120	22,5	22,4	59,9	59,8	90,6	90,5	25,8	25,5
200	22,2	22,2	59,8	59,8	90,4	90,4	25,3	25,3
400	22,2	22,5	59,8	60,0	90,4	90,4	25,1	25,2
120 _{WH}	22,4	22,4	60,0	60,0	90,4	90,4	25,1	25,2

Tabelle 9-18: Temperaturverlauf bei VR6: Versuchsreihe VR, Raumtemperatur RT, Wiederholung WH