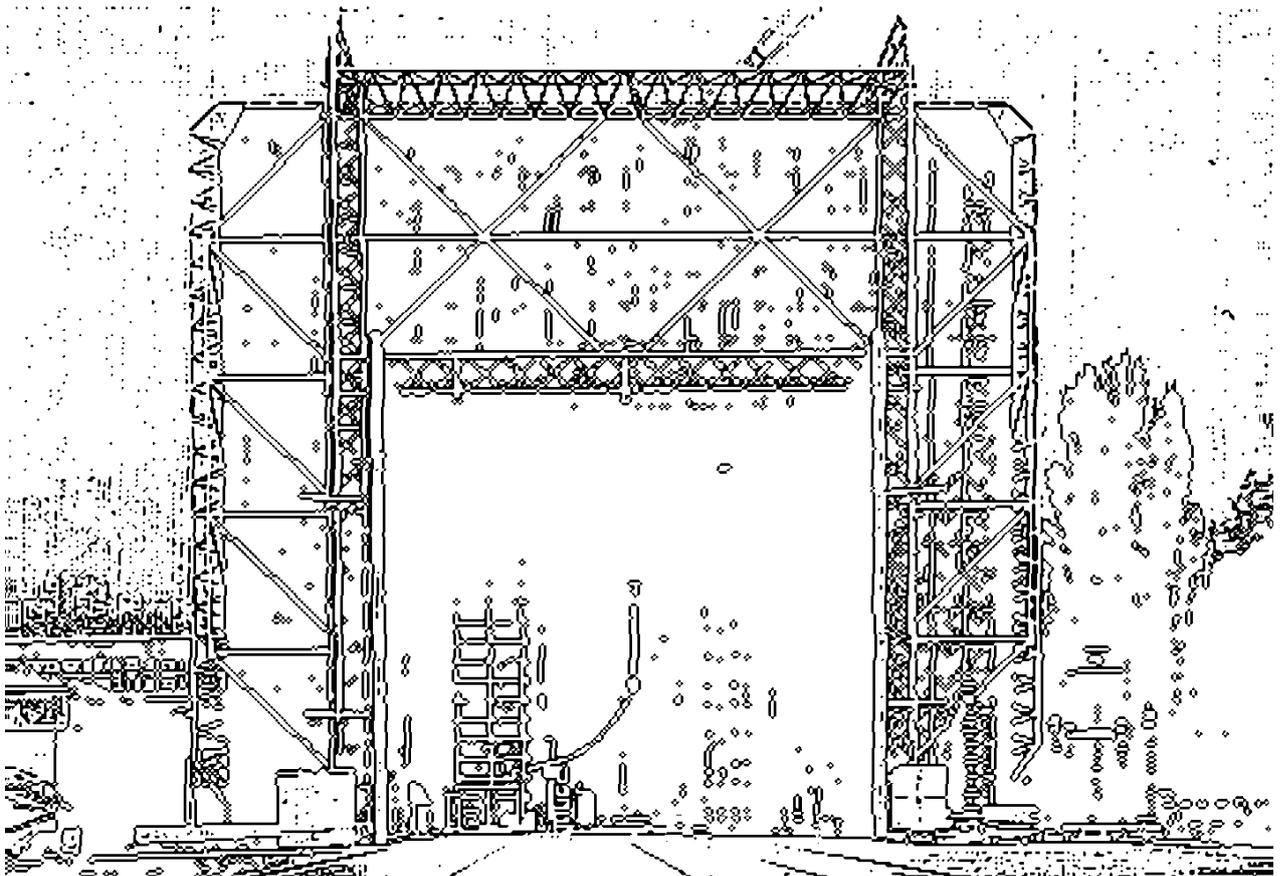


Technische Universität Graz

Masterarbeit



**Institut für Hochspannungstechnik
und Systemmanagement**

Prüfaufbau zur Bestimmung der Electrostatic Charging Tendency (ECT) von Öl-Board-Anordnungen mittels CIGRE Spinning Disc Verfahren

Masterarbeit

durchgeführt an der



Technischen Universität Graz

am



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

April 2012

Verfasser: Andreas ZLODNJAK, BSc
Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas JUDENDORFER
Begutachter: O.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Dr.h.c. Michael MUHR

Kurzfassung

Elektrizität wurde in den vergangenen Jahren zu einem essentiellen Bestandteil der Industrie und des sozialen Lebens. Aufgrund dessen ist es notwendig eine bessere, sichere und günstigere Energieversorgung zu gewährleisten, um eine sichere und nachhaltige Zukunft zu garantieren. Ziel dieser Masterarbeit war die Entwicklung und der Bau einer Messzelle, um die elektrostatische Aufladungsneigung von zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformatoren zu analysieren.

In dieser Arbeit wurde ein Prüfgerät nach dem Spinning Disc Verfahren realisiert, um die elektrostatische Aufladungsneigung von Öl-Pressboard-Kombinationen zu ermitteln. Neben Anforderungen wie niedrige Kosten und kurze Prüfzeiten, spielte auch die Größe des Prüfgeräts eine entscheidende Rolle. Gründe dafür waren, dass es zum einen leicht transportiert werden kann und zum anderen in (vorhandene) handelsübliche Wärmeschränke passen musste.

Der Prüfaufbau wurde erfolgreich entwickelt und gebaut. Messungen an drei praxiserprobten Isolierölen bestätigten die Funktionstauglichkeit der Prü fzelle. Eine eigens angefertigte Mess- und Steuereinheit ermöglicht die Erfassung der Messdaten und deren computerunterstützte Auswertung.

Abstract

Electricity has become an important part of industry and our social lives. There is a need for a more reliable and cheaper power supply for a safe and sustainable future. The purpose of this practical research was to analyze the electrostatic charging tendency of power transformers with forced cooling.

The aim of this project was to develop and build a measurement device to investigate the electrostatic charging tendency of oil-pressboard-combinations. The idea of the spinning disc test cell was used as basis for the realization of this measurement device. Beside requirements like low costs and short test cycle, the size of this unit was a limiting factor, because it should be lightweight and also fit into available standard thermal ovens.

The test setup was successfully designed and constructed within the scope of this work. Investigations of three practical used insulation-oils proved the capability of the test cell. A specially constructed measurement and control system make it possible to record the data and allows computer based analysis.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am.....

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

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

Graz,

.....

(signature)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Allgemeines.....	1
1.2. Motivation	3
1.3. Ziele dieser Arbeit	5
2. Elektrostatische Aufladungserscheinungen	6
2.1. Allgemeines.....	6
2.2. Grundlagen der Elektrostatik.....	6
2.3. Grenzschichtbetrachtung	7
2.3.1. <i>Doppelschicht nach Stern</i>	7
2.3.2. <i>Grundlagen aus der Strömungslehre</i>	8
2.3.3. <i>Kinetik des Ladungstransports an der Kontaktfläche</i>	10
2.4. Aufladungserscheinungen bei Transformatoren	12
2.4.1. <i>Allgemeines</i>	12
2.4.2. <i>Isolationssystem eines Leistungstransformators</i>	13
2.4.3. <i>Schadenfälle in der Vergangenheit</i>	15
2.4.4. <i>Unterschiede zwischen Kern- und Mantelbauweise</i>	15
2.4.5. <i>Einfluss der Alterung auf das elektrostatische Aufladungsverhalten</i>	16
3. Methoden zur Bestimmung der Aufladungsneigung	17
3.1. Grundlagen	17
3.2. Anordnungen zur Messung	17
3.3. Anordnung mit ebener Strömung.....	18
3.4. Anordnung mit rotierender Strömung.....	19
3.5. Anordnung für Filtermethoden.....	21
3.6. Anordnung für Injektionsmethode	22
3.7. Diskussion der Methoden.....	23
4. Messaufbau basierend auf einer Spinning DisC (SD)	25
4.1. Allgemeines.....	25
4.2. Anforderungen an die SD.....	25
4.3. Funktionsweise der Stromabnahme.....	27
4.4. Die Prüfwelle.....	29
4.5. Versuchsaufbau.....	31
4.5.1. <i>Einleitung</i>	31
4.5.2. <i>Mechanischer Aufbau</i>	31
4.5.3. <i>Steuereinheit</i>	37
4.5.4. <i>Messeinrichtung (Stromabnahme)</i>	42

4.6.	Versuchsdurchführung	45
4.6.1.	<i>Karl-Fischer-Titration</i>	45
4.6.2.	<i>Trocknung des Isolieröls</i>	45
4.6.3.	<i>Aufbereitung des Pressboards</i>	46
4.6.4.	<i>Probenmontage und Luftfeuchtigkeit</i>	47
5.	Ergebnisse	48
5.1.	Allgemeines.....	48
5.1.1.	<i>Rohdaten der aufgenommenen Messwerte</i>	48
5.1.2.	<i>Aufbereitung der Rohdaten</i>	49
5.1.3.	<i>Interpretation und Bezug zum realen Leistungstransformator</i>	50
5.2.	Ermittlung des Einflusses der Testzelle auf das Messergebnis.....	52
5.3.	Einflüsse auf die elektrostatische Aufladung.....	55
5.3.1.	<i>Einfluss der Probenmontage</i>	55
5.3.2.	<i>Einfluss der Drehzahl</i>	55
5.3.3.	<i>Einfluss der Temperatur</i>	57
5.3.4.	<i>Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Probe</i>	58
5.3.5.	<i>Einfluss der gealterten Pressboardproben</i>	59
5.4.	Einfluss des Isolieröls	60
5.4.1.	<i>Nynas Nytro 4000X</i>	60
5.4.2.	<i>Nynas Nytro 10XN</i>	63
5.4.3.	<i>Shell Diala GX</i>	67
5.5.	Diskussion und Vergleich der Isolieröle	70
6.	Schlussfolgerungen und Ausblick	72
6.1.	Allgemeines.....	72
6.2.	Aufbau der Prüfzelle	72
6.3.	Einfluss des Isolieröls auf die Aufladungsneigung.....	73
6.4.	Einfluss der Messzeit.....	74
6.5.	Einfluss der Probe auf die Aufladungsneigung.....	75
6.6.	Weitere Arbeiten.....	76
7.	Zusammenfassung	77
	Literaturverzeichnis	78

1. EINLEITUNG

1.1. Allgemeines

Noch zu Beginn des 18. Jahrhunderts brachten Menschen ihren Reichtum beziehungsweise Wohlstand durch den Besitz von Grund und Boden zum Ausdruck. In der Zeit des Absolutismus war an Volkswirtschaft wie wir sie heute kennen, sowie an einen freien Handel, nicht zu denken. In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts waren in England die ersten Schritte Richtung Industrialisierung mit der Entwicklung der Dampfmaschine gesetzt, wodurch der Grundstein für die Abhängigkeit von Rohstoffen und in weiterer Folge von Energie gelegt worden war. Nachdem die Industrialisierung auch in Europa und Amerika Einzug erhalten hatte, wurde der Maßstab zur Beurteilung des Wohlstandes von Grund und Boden zur Produktivität einer Volkswirtschaft geändert. Schnell wurde klar, dass die Energie in all ihren Erscheinungsformen den Motor der Industrialisierung und der Steigerung der Produktivität darstellt.

Besonders die elektrische Energie stellt einen sehr hohen Wert für den industriellen und den privaten Sektor dar. Gründe dafür sind in der vielseitigen Möglichkeit der Erzeugung sowie in der leichten Transportierbarkeit zu erkennen. Auch die Tatsache, dass elektrische Energie mit einem sehr hohen Wirkungsgrad in andere Energieformen umgewandelt werden kann, förderte den verstärkten Einsatz und den Ausbau der Elektrizität. All diesen hervorragenden Eigenschaften steht der Nachteil gegenüber, dass elektrische Energie nicht in nennenswertem Maße gespeichert werden kann. Dies hat zur Folge, dass das Angebot ständig der Nachfrage angepasst werden muss und somit sehr viele Bestrebungen und Mühen erforderlich sind, um ein funktionierendes und wirtschaftliches Elektrizitätsversorgungssystem gewährleisten zu können.

Diese Aufgabenstellung wird durch die Problemstellung der globalen Erwärmung, dem verstärkten Bewusstsein bezüglich Umwelt- und Naturschutz, sowie durch den Einsatz von erneuerbarer Energieerzeugung erschwert. Der Ausbau des Elektrizitätsübertragungs- und Verteilungssystems stellt einen wichtigen Ansatz zur Lösung dieses Problems dar. Investitionen, welche in diesem Bereich getätigt werden, sind aufgrund der Paradigmen der Elektrizitätswirtschaft [1] nicht trivial zu begründen und durchzusetzen.

Durch den Einsatz immer größer werdender Nennspannungen und Nennleistungen werden auch höhere Ansprüche an den Transformator als Verbindungselement zwischen den einzelnen Spannungsebenen gestellt. Diese Ansprüche wirken sich auf die Baugröße und somit direkt auf die Kosten für Material und Transport aus. Um die Baugröße und in weiterer Folge die Kosten zu minimieren führte die Entwicklung unumgänglich zur Zwangsumlaufkühlung. Diese hat die Aufgabe, die beim Betrieb des Transformators entstehende Wärme auf schnellstem Wege abzuführen und

somit für die Kühlung des Transformators zu sorgen.

In der Zeit um 1980 tauchten erstmals unerklärliche Schadensfälle am Isolationssystem von Transformatoren auf [2] [3]. Diese Isolationsschäden konnten weder einem bestimmten Transformatorentyp (Kern- bzw. Manteltransformator), noch einem bestimmten Öl oder einem Hersteller eindeutig zugeordnet werden. Allen gemeinsam war jedoch die Zwangsumlaufkühlung. Durch Forschungsarbeiten, welche vor allem von Japan und den Vereinigten Staaten vorangetrieben wurden, wurde die Zwangsumlaufkühlung als Verursacher der Ausfälle identifiziert. Bei großen zwangsumlaufgekühlten Hochspannungs-Leistungstransformatoren kann es in den Kühlkanälen der Hochspannungswicklung zu starken Isolationsschäden kommen, deren Begründung in der elektrostatischen Aufladungsneigung¹ des Isolationssystems liegt.

¹ ECT...Electrostatic Charging Tendency (elektrostatische Aufladungsneigung)

1.2. Motivation

Es liegt in der Natur des Menschen immer höhere Ansprüche an sich und seine Umwelt zu stellen. Aufgrund dieser Eigenschaft der immer währenden Expansion werden auch die Anforderungen an die Elektrizitätsversorgung und in weiterer Folge an die Versorgungssicherheit erhöht. Durch die ständige Verbesserung dieser und Erhöhung des Wirkungsgrades werden die Nennspannungen und die Nennleistungen unseres Energieversorgungssystems [4] weltweit immer weiter angehoben. Die Erhöhung und Verminderung der Spannung wird dabei über Transformatoren bewerkstelligt, welche somit eine zentrale Stellung bei der Umwandlung bzw. Verteilung der elektrischen Energie einnehmen.

Der Transport der elektrischen Energie erfolgt je nach zu überwindender Distanz in einer hohen oder niedrigen Spannungsebene. Dabei wird eine Einteilung in Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene vorgenommen [4]. Über die Faustformel Kilovolt ist gleich Kilometer kann eine ungefähre Vorstellung über das Verhältnis Spannungsebene zu Distanz erhalten werden.

Der klassische Dreiphasenwechselstrom, welcher sich über die letzten Jahrzehnte in der Elektrizitätsversorgung etabliert hat, kann ohne große Anstrengungen mittels Transformator auf die einzelnen Spannungsebenen angehoben beziehungsweise abgesenkt werden. Der Nachteil der Verwendung von Wechselspannung liegt in der Übertragbarkeit über große Distanzen. So ergeben sich über weite Entfernungen Übertragungsverluste, die durch induktive, sowie kapazitive Effekte hervorgerufen werden.

Strom über weite Distanzen zu transportieren ist durchwegs keine neue Idee. Beispielhaft können hier die Realisierungen der 1700km langen HGÜ² Inga-Kolwezi [5] im Kongo und die 1000km lange HGÜ Québec-New England zwischen Kanada und den USA [6] genannt werden.

Durch die jüngsten Bestrebungen, der Klimaveränderung mittels „Wüstenstrom“ unter dem Projektnamen Desertec [7] entgegen zu wirken, wurde die Technologie der HGÜ in Europa erneut zum Thema. Dieser Vision liegt die Erzeugung von elektrischem Strom aus der eingestrahlten Sonnenenergie in Nordafrika zu Grunde. Die Umwandlung von solarer Energie in elektrischen Strom sollte in Windkraftwerken sowie in solarthermischen Kraftwerken erfolgen und in die Verbraucherzentren von Europa und dem Nahen Osten transportiert werden. Aufgrund der weiten Strecken zwischen Erzeugungs- und Verbraucherzentren kommen ein Wechselstromtransport und die damit verbundenen hohen Verluste nicht in Frage. Diese Problemstellung führte nun zur verstärkten Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Hochspannungs-Gleichstromübertragung. Die Verwendung dieser Technologie ist für hohe Entfernungen zwischen zwei Punkten und nicht im vermaschten Netz

² HGÜ...Hochspannungs-Gleichstromübertragung engl. HVDC (High Voltage Direct Current)

vorgesehen. Basierend auf dieser Überlegung sind für eine HGÜ-Strecke jeweils zwei HGÜ-Konverterstationen, von Wechselspannung auf Gleichspannung und umgekehrt, notwendig. Durch die stetige Steigerung der Nennspannungen und Nennleistungen steigt auch die Wärmeentwicklung im Transformator, welche durch den erforderlichen Einsatz der Stromrichtertechnik in HGÜ Anlagen noch intensiver ausgeprägt ist. Bedenklich ist in diesem Zusammenhang die zu beobachtende Tendenz, dass Transformatoren in großen Netzverbänden immer häufiger mit Dauer-Volllast und zu Spitzenzeiten sogar mit Überlast betrieben werden. Temperaturen von 90°C oder 100°C sind dabei keine Besonderheit mehr. Die Zwangsumlaufkühlung ist somit ein geeigneter Weg die Baugröße zu verringern und damit auch die Kosten zu senken. Vollaugelastete Transformatoren stehen meist an strategisch besonders wichtigen Netzknoten. Die wirtschaftlichen und technischen Folgen von einem Ausfall eines Leistungstransformators an einem solchen Netzknoten brauchen an dieser Stelle nicht betont zu werden.

Die Alterung des Isoliersystems und der Einsatz neuer biologischer Öle sind weitere Themen, welche die Notwendigkeit von ECT³ Untersuchungen begründen.

³ ECT...Electrostatic Charging Tendency

1.3. Ziele dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll das Grundkonzept des Spinning-Disk Verfahrens, welches in der vorangegangenen Bachelorarbeit [24] als Prototyp gebaut wurde, verfeinert werden. Mit dieser Prü fzelle wird die elektrostatische Aufladungsneigung des Isoliersystems⁴ eines zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformators ermittelt. Die Anforderungen an dieses Prüfgerät wurden von der CIGRE⁵ (Joint Working Group 12/15.13 Task Force 01), der EPRI⁶ und dem MIT⁷ wie folgt definiert: [8]

1. Beurteilung von festen und flüssigen Isolierstoffen (der Materialkombination)
2. Kurze Prüfdauer
3. Einfache Probenfertigung
4. Kostengünstig
5. Geringes Probevolumen
6. Verwendung ebener Pressboardproben
7. International standardisierbar
8. Imprägnierung des Pressboards innerhalb der Versuchsanordnung
9. Messung soll auch unter AC und DC Feldeinfluss möglich sein

Ein weiteres Kriterium war die Handhabung des Prüfaufbaus. Neben dem Gewicht, welches durch die Fertigung des Gerätes aus Aluminium minimiert werden konnte, musste der Prüfaufbau auch in einen handelsüblichen Wärmeschrank passen, um den Einfluss der Temperatur auf das Messergebnis kontrollieren und steuern zu können. Nachdem die Prü fzelle am Papier erarbeitet worden war und die Anforderungen 1 bis 6 theoretisch erfüllt schienen, wurde diese gefertigt, um die Praxistauglichkeit zu erproben. Die Punkte 7 bis 9 wurden aufgrund der Kostenintensität in der Realisierung nicht berücksichtigt.

⁴ bestehend aus Isolieröl und Zellulose

⁵ Conference Internationale Des Grands Reseaux Electriques

⁶ Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, United States of America

⁷ Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States of America

2. ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNGERSCHWEINUNGEN

2.1. Allgemeines

Die wohl natürlichste und eindrucksvollste elektrische Aufladungserscheinung durch Reibungselektrizität beziehungsweise deren Entladung wird durch Gewitterblitze dargestellt. Der Ladungsausgleich ist letzten Endes in Form eines Lichtblitzes eindrucksvoll seh- und hörbar. Obwohl Benjamin Franklin bereits 1752 den ersten Blitzableiter erfand und den Begriff der Ladung definierte, konnten manche Phänomene der Elektrostatik, wie beispielsweise die Entstehung des Blitzes bis heute noch nicht vollständig geklärt werden..

Elektrostatische Aufladungserscheinungen können viele Ursachen haben. So kann das Trennen von Feststoffen wie beispielsweise das Abziehen einer Folie von einer Transportwalze, oder das Durchströmen von Flüssigkeiten durch Rohre zum Beispiel Isolieröl durch Zellulosekanäle beispielhaft angeführt werden. Voraussetzung ist ein intensiver Oberflächenkontakt der beteiligten Materialien, der sich in der Größenordnung von atomaren Abständen (0.1nm) bewegt. Die ECT darf nicht als Kenngröße eines bestimmten Materials verstanden werden. Vielmehr resultiert diese aus der Kombination beziehungsweise Paarung der beteiligten Materialien, in diesem Fall Zellulose und Öl.

Die elektrostatische Aufladung ist nicht nur mit negativen Auswirkungen verbunden. In den letzten Jahrzehnten sind Anwendungsbereiche entstanden, in denen die elektrostatische Aufladung technisch genutzt werden kann. Der wirtschaftliche Einsatz erstreckt sich vom elektrostatischen Lackieren und Beschichten über Rauchgasreinigung bis hin zum landwirtschaftlich genutzten Pflanzenschutz.

2.2. Grundlagen der Elektrostatik

Der intensive Oberflächenkontakt zweier unterschiedlicher Materialien und ein mechanischer Trennvorgang sind eine Notwendigkeit für eine "erfolgreiche" elektrostatische Aufladung. Die Materialkombination beziehungsweise das Gesamtsystem ist in Ruhe als neutral anzusehen, da an den Kontaktflächen, aufgrund der unterschiedlichen Fermi-niveaus, ein Ladungsübertritt und somit ein Ladungsausgleich stattfindet. Erst durch die mechanische Bewegung können sich die Ladungen nicht mehr ausgleichen und verursachen somit die ECT. Im Isolieröl erfolgt der Ladungstransport hauptsächlich durch Moleküle (Ionen), während dieser bei festen Medien (Zellulose) durch Löcher-Elektronen-Leitung stattfindet. Aufgrund dieser Tatsache erfolgt der Ladungsaustausch beim Pressboard, welches einen festen Isolierstoff darstellt, ausschließlich durch Elektronen [9].

2.3. Grenzschichtbetrachtung

2.3.1. Doppelschicht nach Stern

Die Doppelschicht nach Stern ist wohl eines der am weitest verbreiteten und anerkanntesten Modelle, das die Verhältnisse in der Nähe der Grenzschicht Öl-Zellulose am besten widerspiegelt. Folgende Formel [8] beschreibt den Verlauf der Überschussladungsdichte in Abhängigkeit der Distanz von der Grenzschicht.

$$\rho_U = \rho_S * e^{-\frac{x}{\delta}}$$

ρ_U Überschussladungsdichte [As/m^{-3}]

ρ_S hypothetische Überschussladungsdichte an der Grenzfläche (ohne starre Schicht) [As/m^{-3}]

δ Debye-Länge (Doppelschichtdicke) [m]

x Länge [m]

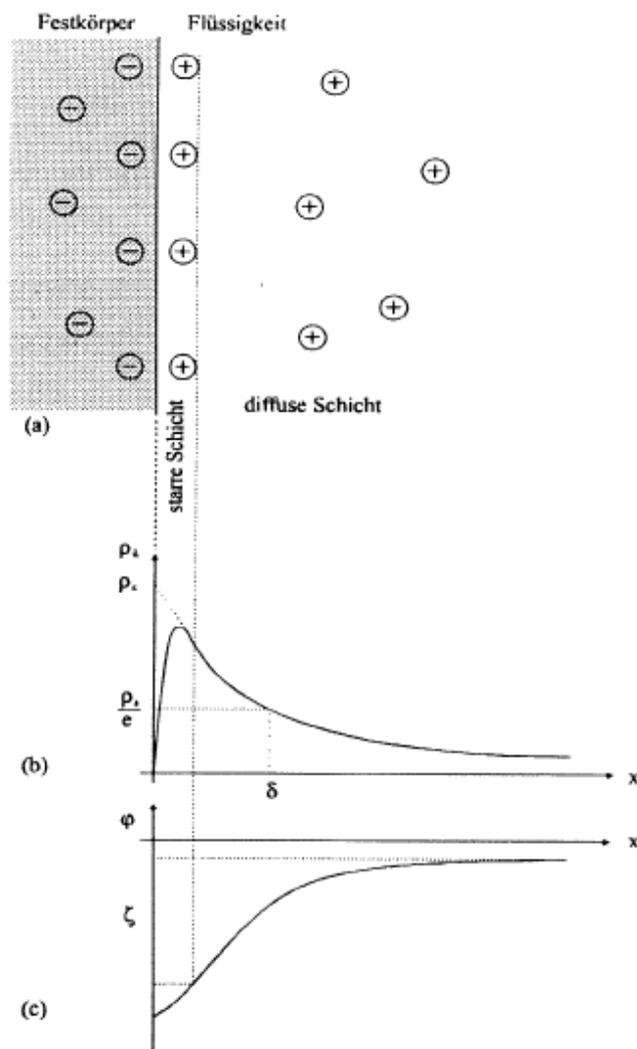


ABBILDUNG 2-1: DOPPELSCHICHT NACH STERN [8], (A) SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER GRENZSCHICHT, (B) VERTEILUNG DER ÜBERSCHUSSLADUNG, (C) POTENTIALVERLAUF

Stern vereinigte die Ansichten eines linearen Potentialabfalls von Helmholtz mit der von von Gouy und Chapman, welche wiederum der Ansicht waren, dass die Ionen nicht starr sondern diffus an der Elektrodenoberfläche haften und somit einen exponentiellen Potentialabfall verursachen. Aus der Kombination dieser Theorien entstand das Modell der starren und diffusen Schicht. Wie weit die Ladungstrennung in das Isolieröl reicht, kann aus der Debye-Länge⁸ ersehen werden.

2.3.2. Grundlagen aus der Strömungslehre

Der Physiker Osborne Reynolds entdeckte 1883 durch Strömungsversuche [10], dass es zur Charakterisierung von Strömungen⁹ eine dimensionslose Kennzahl (Reynolds-Zahl) gibt. Mit der Zugabe von Farbflüssigkeiten machte Reynolds die Strömungsverhältnisse in einem Rohr sichtbar und prägte damit die Begriffe der laminaren und turbulenten Strömung.

Laminare Strömung

Eine laminare Strömung ist eine Schichtströmung, in welcher keine Querbewegungen auftreten. Mittels schon vorhin erwähnter Zugabe von Farbflüssigkeiten wird ein scharf abgegrenzter Faden sichtbar. Die Flüssigkeitsteilchen bewegen sich somit auf voneinander getrennten, parallelen Bahnen, welche sich nicht gegenseitig durchdringen.

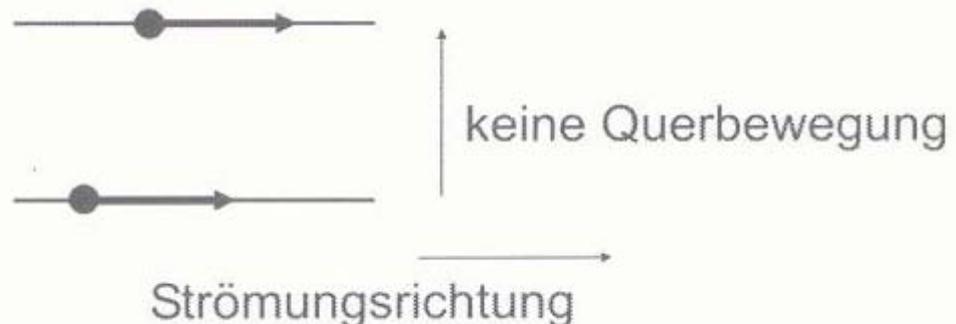


ABBILDUNG 2-2: LAMINARE STRÖMUNG [10]

Aus vorangehender Abbildung ist ersichtlich, dass das obere Teilchen nicht mit dem Teilchen der unteren Schicht kollidiert. Es bildet sich eine laminare Strömung.

⁸ Abstand von der Grenzschicht, bei der die Überschussladungsdichte den Wert ρ_0/e besitzt

⁹ z.B. laminare oder turbulente

Laminare Unterschicht

Reibungskräfte sind der Grund dafür, dass in unmittelbarer Nähe der Grenzschicht ein dünner Flüssigkeitsfilm am Festkörper¹⁰ haftet und somit nicht zum Stromtransport beiträgt. Die elektrostatische Aufladung wird von diesem Flüssigkeitsfilm, welcher in der Strömungslehre als laminare Unterschicht bezeichnet wird, maßgeblich beeinflusst. Es ist verständlich, dass das Verhältnis von Debye-Länge δ zur Dicke der laminaren Unterschicht eine wichtige Rolle spielt.

▪ *Debye-Länge > laminare Unterschicht:*

Ein großer Teil der Überschussladungen befindet sich nicht in der laminaren Unterschicht und wird somit durch die Strömung abtransportiert. Aufgrund dessen trägt diese zum Stromfluss bei.

▪ *Debye-Länge < laminare Unterschicht:*

Ein großer Teil der Überschussladungen befindet sich in der laminaren Unterschicht, welche von der Strömung nicht erfasst wird. Sie stellt somit keinen Anteil am Stromfluss dar.

Turbulente Strömung

Osborne Reynolds stellte bei seinen Rohrversuchen fest, dass sich die Farbfäden ab einer bestimmten Fließgeschwindigkeit nicht mehr auf exakt abgrenzbaren Bahnen bewegen. Es kommt neben der Hauptbewegungsrichtung (Flussrichtung) auch zu einer Querbewegung der Teilchen. Aufgrund von Turbulenzen erhöht sich im Rohr der Widerstand für die Flüssigkeit und führt zu höheren Verlusten.

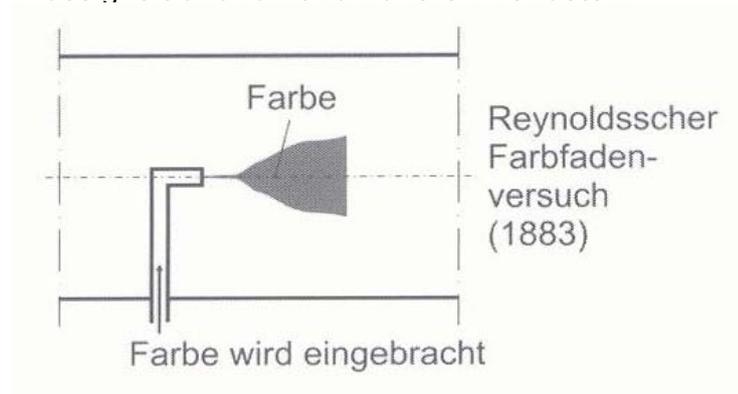


ABBILDUNG 2-3: TURBULENTE STRÖMUNG [10]

Zur Behandlung der Strömungsproblematik wird an dieser Stelle auf einschlägige Fachliteratur [11][25] verwiesen.

¹⁰ In unserem Fall: rotierende Scheibe mit Pressboard

2.3.3. Kinetik des Ladungstransports an der Kontaktfläche

An der Kontaktfläche zwischen festen und flüssigen Isolierstoff findet ein Ladungsaustausch statt, welcher in [12] wie folgt beschrieben wird:

“Der Ladungsaustausch an der Kontaktschicht Öl-Zellulose stellt den grundlegenden Mechanismus der elektrostatischen Aufladungserscheinung von Kohlenwasserstoffverbindungen dar. Der Übergang von Ladungsträgern an der Kontaktschicht ist an ein dynamisches Gleichgewicht gebunden. Das bedeutet, dass die Intensität für den Übergang der Ladungsträger in beiden Richtungen gleich groß ist. Durch einen erzwungenen Stromfluss (Konvektions-, Diffusions- und Feldstrom) wird das Gleichgewicht gestört und die Intensität des Ladungsüberganges überwiegt in einer Richtung.

Die Kinetik des Ladungstransportes unmittelbar vor und durch die Kontaktfläche wird durch vier Mechanismen bestimmt. In der Chemie werden diese Mechanismen auch als sogenannte Hemmungen bezeichnet, weil sie jene Prozesse beschreiben, die den Ladungsträgertransport begrenzen. Es sind dies:

- *Widerstandshemmung*
- *Reaktionshemmung*
- *Durchtrittshemmung*
- *Diffusionshemmung*

Aus elektrotechnischer Sicht stellen diese vier Mechanismen Spannungsabfälle infolge des Stromflusses durch das Isolieröl dar.“

▪ **Widerstandshemmung**

Die Widerstandshemmung beschreibt den ohm'schen Spannungsabfall, welcher durch die endliche Leitfähigkeit des Isolieröls unmittelbar vor der Kontaktfläche entsteht.

- **Reaktionshemmung**

Bevor ein quantenmechanischer Ladungsübertritt an den Kontaktflächen erfolgen kann, müssen zuerst Ionen durch chemische Reaktionen gebildet werden. Diese Ionen sind nun in der Lage, Elektronen für den Ladungsübertritt bereit zu stellen. Reaktionen die ihrerseits nun langsamer ablaufen als der Ladungsübertritt führen folglich zu einer Reaktionshemmung.

- **Durchtrittshemmung**

Die Elektronen müssen beim Übergang durch die Kontaktschicht eine Potenzialbarriere überwinden (Tunneleffekt), der sich in der starren Schicht ausbildet (siehe 2.3.1. *Doppelschicht nach Stern*).

- **Diffusionshemmung**

An jeder Kontaktfläche zwischen Festkörper und Flüssigkeit haftet ein dünner Flüssigkeitsfilm, der sich in Ruhe befindet und sich nicht bewegt. Durch ein elektrisches Feld oder Diffusion wird der Ladungstransport durch diese Schicht ermöglicht.

Widerstands-, Reaktions-, und Durchtrittshemmung können gegenüber der Diffusionshemmung vernachlässigt werden. Die Bildung der Überschussladungen erfolgt vorwiegend durch den Diffusionsprozess, welcher auch den Einfluss der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit verständlich macht (siehe *Kapitel 5*).

2.4. Aufladungserscheinungen bei Transformatoren

2.4.1. Allgemeines

Gegen Ende des zwanzigsten Jahrhunderts, um 1980 tauchten die ersten Schadenfälle an größeren Leistungstransformatoren auf, deren Ursache anfänglich ungeklärt blieb. Diese Schadenfälle konnten keinem bestimmten Transformatorentyp¹¹ Hersteller noch einem bestimmten Isolieröltyp zugeordnet werden. Der gemeinsame Nenner wurde schließlich in der Zwangsumlaufkühlung, welche bei allen beschädigten Transformatoren vorhanden war, gefunden und auch nachgewiesen [2] [3].

Diese Theorie wurde untermauert, nachdem festgestellt wurde, dass bei Transformatoren mit natürlicher Ölkühlung (ON, ohne gepumpten Kühlkreislauf) keine Ausfälle auf die elektrostatische Aufladung zurückgeführt werden konnten.

Die Schäden aufgrund der elektrostatischen Aufladung traten direkt beim oder kurz nach der Inbetriebnahme der Ölumlaufrpumpe des Leistungstransformators auf. Thermische Überbeanspruchung oder äußere Überspannung konnten in diesem Zusammenhang zweifelsfrei ausgeschlossen werden. Neben der Funktion als Isoliermedium hat das Isolieröl noch die Aufgabe, die Verlustwärme, welche in den einzelnen Wicklungen entsteht, abzutransportieren. Aufgrund der steigenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungen ergab sich eine größere Wärmeentwicklung auf engerem Raum. Diese Verlustwärme musste aus dem Transformator abgeführt werden, was unumgänglich zum Einsatz der Zwangsumlaufkühlung führte. Die Verwendung der Zwangsumlaufkühlung bietet zwei Möglichkeiten um eine ausreichende Kühlleistung zu erreichen:

- Erhöhung des Temperaturunterschiedes von abfließenden und zufließenden Isolieröl am Wärmetauscher

- Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmediums

Aus wirtschaftlichen Gründen kann die Erhöhung des Temperaturunterschiedes (erste Variante) kaum realisiert werden. Begründet durch die Festigkeit des Isoliersystems und der damit verbundenen Lebensdauer der eingesetzten Materialien ist die Betriebstemperatur des Transformators auf 90°C begrenzt. Die Umgebungsluft wird als Kühlmedium im Wärmetauscher verwendet, die ohne zusätzlichen Mehraufwand auch eine vorgegebene Kühlleistung aufweist.

¹¹ Shell-type oder core-type

Die zweite Möglichkeit zur Erhöhung der Kühlwirkung ist die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Isolieröls. Bei dieser Variante kann es zu lokalen Geschwindigkeitsmaxima des Öls von bis zu 2 m/s kommen. Durch die Strömung entsteht, an den Grenzflächen von Öl und Zellulose Reibung, welche eine Ladungstrennung nach sich zieht. Durch die Zirkulation des Isolieröls findet ein Ladungstransport statt, welcher an geeigneten Stellen zum Ladungsüberschuss und letzten Endes zur Beschädigung des festen Isoliermaterials führen kann.

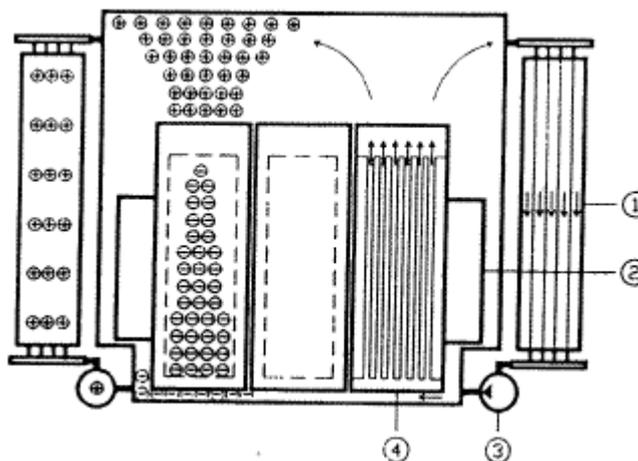


ABBILDUNG 2-4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER LADUNGSTRENNUNG UND DES LADUNGSTRANSPORTS IN ZWANGSUMLAUFGEKÜHLTEN LEISTUNGSTRANSFORMATOREN [2]

2.4.2. Isolationssystem eines Leistungstransformators

Das technisch und historisch bewährte Isolationssystem eines Leistungstransformators besteht aus einem Isolieröl (Mineralöl) und Zellulose (Transformerboard).

Fester Isolierstoff (Transformerboard)

Pressspan, welcher bereits zur Isolation der ersten elektrischen Maschinen eingesetzt worden war, konnte durch seine Weiterentwicklung zum Transformerboard neuen elektrischen und mechanischen Ansprüchen gerecht werden. Dieses Transformerboard vereinigt die elektrischen Vorteile von Weichpapier mit den mechanischen Vorzügen von Hartpapier. Die Herstellung erfolgt aus ungebleichter Sulfatzellulose. Skandinavische und kanadische Nadelhölzer mit ihren langsam und dicht gewachsenen Zellen sind speziell für mechanisch beanspruchtes Transformerboard geeignet [13].

Transformerboard zeichnet sich aus durch:

- leicht zu trocknen und zu imprägnieren
- niedrige Dielektrizitätskonstante
- gute mechanische Eigenschaften
- geringere Herstellkosten
- raschere Liefermöglichkeiten
- völlige Freiheit in der Wahl der Durchmesser, da kein teurer Wickeldorn benötigt wird.

Zur Erklärung des Herstellprozesses wird auf die einschlägige Fachliteratur [13] verwiesen.

Flüssiger Isolierstoff (Isolieröl)

Das Isolieröl dient zur elektrischen Isolation der Wicklungen und zum Abtransport der Wärme. Natürliche Eigenschaften, welche die meisten guten Isolieröle besitzen, führen Alterungsprodukte in dielektrisch unschädliche Verbindungen über. Durch die fortschreitende Alterung des Isolieröls werden diese natürlichen Schutzstoffe verbraucht und es ist naheliegend, künstliche Inhibitoren zuzugeben. Eine stetige Überwachung dieser künstlich hinzugefügten Inhibitoren ist unerlässlich, da auch diese über die Betriebsjahre hinweg verbraucht werden.

Mineralöle werden für gewöhnlich in Leistungstransformatoren eingesetzt, jedoch sind seit geraumer Zeit Bestrebungen im Gange, umweltfreundliche bzw. biologische Isolieröle, auch 'Ester-Öle' genannt einzusetzen. Biologische Öle sind generell umweltfreundlicher und haben im Falle eines Unfalls durch Feuer oder Leckagen keine katastrophalen Auswirkungen. Esteröle werden als ungiftig, leicht biologisch abbaubar und nicht wassergefährdend eingestuft. Des Weiteren zählt eine höhere thermische Beständigkeit zu den Vorzügen, welche kompaktere Bauweisen und somit geringere Kosten im Transformatorenbau ermöglichen können.

Für den Einsatz in Leistungstransformatoren werden biologische Öle noch als technisch unausgereift angesehen. Es wird jedoch intensiv daran gearbeitet die Forschungen voranzutreiben, um den Einsatz und somit auch die Vorzüge der Esteröle auch in zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformatoren zu ermöglichen.

2.4.3. Schadenfälle in der Vergangenheit

Leistungstransformatoren stellen in der Energieversorgung die wirtschaftlich wohl aufwendigsten Betriebsmittel dar. Ausfälle dieser Leistungstransformatoren, welche oft an strategisch wichtigen Netzknoten vollausgelastet betrieben werden, hätten schwerwiegende ökonomische Folgen.

Um 1980 herum tauchten die ersten Schadensfälle im Isolationssystem von großen Leistungstransformatoren auf, die zunächst unerklärlich waren. Der erste Schadensfall in den Vereinigten Staaten, der durch elektrostatische Aufladung entstand, wurde 1984 von Crofts beschrieben [3]. In den folgenden Jahren tauchten immer wieder Ausfälle an großen Leistungstransformatoren auf, deren Ursache in der elektrostatischen Aufladung gesehen wurde. 1988 wurden bereits über 12 Schadensfälle durch die elektrostatische Aufladung begründet, wobei die Dunkelziffer um einiges höher geschätzt wird. Infolge dessen wurden Forschungsgruppen (EPRI, MIT) von den Erzeugern und Betreibern ins Leben gerufen, welche sich mit dem Problem und der Erforschung der elektrostatischen Aufladung auseinandersetzten.

Durch das aufkommende Umweltbewusstsein und den damit verbundenen Einsatz neuer biologischer Öle, gewann auch die elektrostatische Aufladungsuntersuchung erneut an Bedeutung.

2.4.4. Unterschiede zwischen Kern- und Mantelbauweise

Grundsätzlich wird im Transformatorenbau zwischen Kern- und Mantelbauweise (coretype - shelltype) unterschieden.

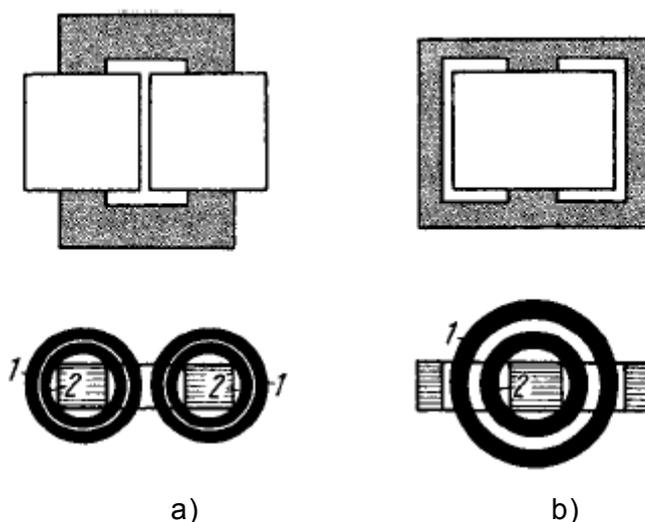


ABBILDUNG 2-5: EINPHASENDARSTELLUNG A) KERNTTRANSFORMATOR; B) MANTELTRANSFORMATOR [22]

Beim Einphasenkerntransformator ist auf jedem Schenkel die halbe Windungszahl untergebracht und der Eisenquerschnitt besitzt überall die gleiche Stärke. Der Einphasenmanteltransformator trägt die gesamte Wicklung auf dem Schenkel in der

Mitte und kann durch die Aufteilung des Rückschlusses an Bauhöhe sparen, da jede Jochhälfte nur den halben Fluss führen muss.

Zu Beginn der Ausfälle, welche durch die elektrostatische Aufladung bedingt waren, wurde versucht, die Ursachen einer der beiden Bauweisen, Kern- oder Manteltransformator, zuzuordnen. Dies konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, da beide Bauweisen mit der gleichen Ausfallsursache konfrontiert waren.

2.4.5. Einfluss der Alterung auf das elektrostatische Aufladungsverhalten

Wie bei allen technischen Anwendungen unterliegen auch die elektrischen Eigenschaften des Isolationssystems eines Transformators einer natürlichen Degradation durch Alterung.

Die Volumenleitfähigkeit eines Isolieröls beruht im Wesentlichen auf Verunreinigungen. Reinstes Isolieröl besteht aus gesättigten Kohlenwasserstoffen paraffinischer und naphthenischer Struktur [14] womit es praktisch keine freien Ladungsträger gibt, welche den Strom leiten könnten. Erst durch Verunreinigungen, welche aus der Herstellung (Raffination) oder Umgebung (Luftfeuchtigkeit) hinzukommen entsteht eine Leitfähigkeit.

Der Wassergehalt im Isolieröl, der zur Beurteilung herangezogen wird, ist an und für sich nicht als Problem der Erhöhung der Leitfähigkeit anzusehen. Der Anteil der Leitfähigkeit, der durch die Feuchtigkeit entsteht, ist so gering, dass dieser vernachlässigt werden kann. Die Leitfähigkeit wird unter anderem durch das Vorhandensein von Karbonsäuren erhöht, welche auch in neuwertigen Isolierölen zu finden sind und durch die natürliche Alterung der gesättigten Kohlenwasserstoffe entstehen. Diese Karbonsäuren dissoziieren mit dem Wasser und haben eine deutliche Erhöhung der Leitfähigkeit zur Folge. Zudem ist im Normalbetrieb eines Transformators mit Temperaturen bis zu 90°C [13] zu rechnen, welche die Dissoziation der Karbonsäuren mit anderen Ionenbindungen exponentiell ansteigen lassen.

3. METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER AUFLADUNGSNEIGUNG

3.1. Grundlagen

In der Vergangenheit wurden mehrere Verfahren zur Untersuchung der elektrostatischen Aufladungsneigung von Öl-Zellulose-Isoliersystemen entwickelt und erprobt [29]. Prinzipiell wird zwischen Untersuchungsmethoden welche die realen Strömungsverhältnisse in einem Transformator nachbilden (*screening of design*) und jenen, welche eine quantitative Bewertung der einzelnen Materialien zulassen (*screening of material*) unterschieden [8].

- Versuchsanordnung mit Bauteilen aus realen Transformatoren und Nachbildung der Geometrie
-screening of design
- Messaufbau zur Bewertung der einzelnen Materialien und der ECT
-screening of material

Es ist zu bedenken, dass der Nachbau eines realen Transformators beziehungsweise die originalgetreue Nachbildung der komplizierten Strömungsverhältnisse in den Kühlkanälen und Wicklungen mit erheblichem Aufwand verbunden ist.

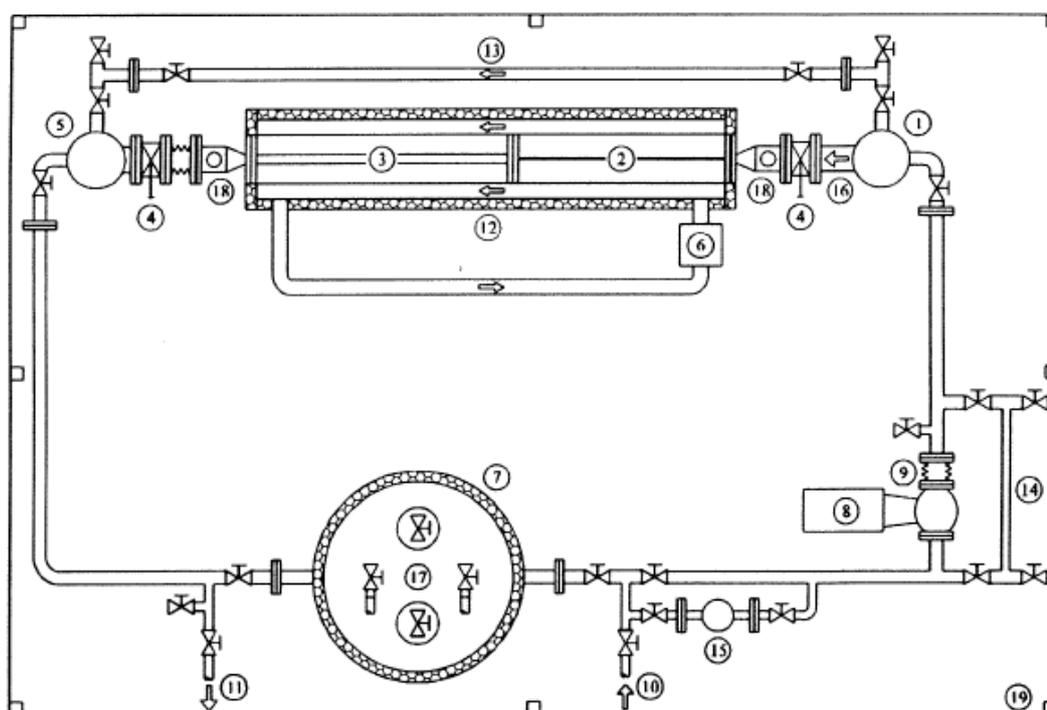
3.2. Anordnungen zur Messung

Grundsätzlich können die Anordnungen zur quantitativen und qualitativen Bestimmung der Aufladungsneigung in vier Gruppen unterteilt werden:

- Anordnung mit ebener Strömung: Tube models, large size duct models
- Anordnung mit rotierender Strömung: Spinning disc charger, Couette charger
- Anordnung für Filtermethoden: Mini-static charge tester, Recirculating tester
- Anordnung für Injektionsmethoden

3.3. Anordnung mit ebener Strömung

Unter Anordnung mit ebener Strömung ist ein Kanalmodell zu verstehen, welchem der Gedanke der realitätsgetreuen Nachbildung der Kühlkanäle zugrunde liegt [12]. Das Isoliermedium (Öl) wird dabei im Kreis gepumpt, wodurch sich die gleichen Verhältnisse und Bedingungen wie bei einem realen Transformator einstellen. Da dieses Modell eine sehr große räumliche Ausdehnung besitzt [26], kann das Isolieröl über Pumpen bis in den turbulenten Strömungsbereich beschleunigt werden. Der Nachteil des Kanalmodells ist im komplexen Aufbau der Anlage, im großen Platzbedarf, sowie in der dafür benötigten Ölmenge zu sehen, welche 60 Liter und mehr betragen kann. Eine prinzipielle Darstellung dieses Modells ist in nachfolgender Abbildung zu sehen.



1	Ladungsabscheider 1	8	Umwälzpumpe	15	Durchflussschaltventil
2	Beruhigungsstrecke	9	Dehnungsausgleich	16	Zulauf Kanalmodell
3	Kanalmodell	10	Zulauf Ölreinigung	17	Ölkühlung
4	Absperrventile	11	Ablauf Ölreinigung	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 ANORDNUNG MIT EBENER STRÖMUNG (KANALMODELL) [12]

3.4. Anordnung mit rotierender Strömung

Couette Charger-CC

Der Couette Charger wurde am MIT¹² entwickelt und zählt zur Gruppe der Anordnungen mit rotierender Strömung [15]. An beiden zylindrischen Flächen wird auf der ölzugewandten Seite das zu prüfende Isolationsmaterial (Pressboard) angebracht. Das Isolieröl befindet sich im Zwischenraum und sorgt bei Rotation für die elektrostatische Aufladung. Es ist prinzipiell möglich den inneren oder den äußeren Zylinder rotieren zu lassen. Aufgrund der kleinen Baugröße des Innenzylinders kann dieser auf sehr hohe Drehzahlen (2000 min^{-1}) beschleunigt werden, wodurch nicht nur laminare sondern auch turbulente Strömungsverhältnisse untersucht werden können.

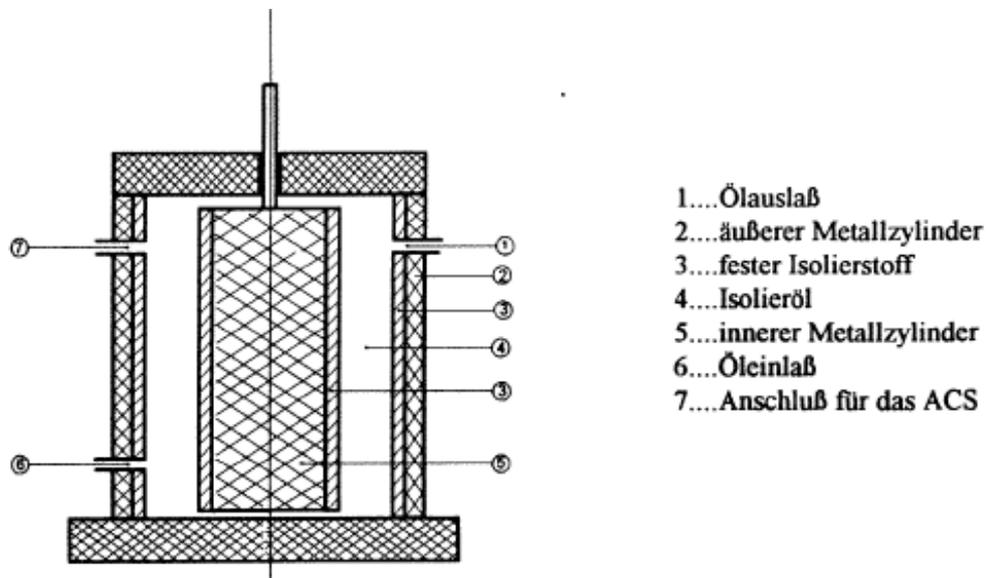


ABBILDUNG 3-2: PRINZIPELLER AUFBAU DES COUTTE CHARGER MIT ROTIERENDEM INNENZYLINDER [15]

¹² Massachusetts Institute of Tehnology, USA

Spinning Disc Charger

Der Versuchsaufbau nach Spinning Disc [16][28] beruht auf dem gleichen Prinzip wie der Couette Charger. Bei dieser Anordnung wird das Pressboard auf beiden Seiten einer Aluminiumscheibe befestigt und im zu untersuchenden Öl rotiert. Diese Bewegung führt wie auch schon beim CC zu einer Aufladung, welche über die Antriebswelle abgenommen und gemessen wird. Auf dieses Messverfahren wird im *Kapitel 4* näher eingegangen.

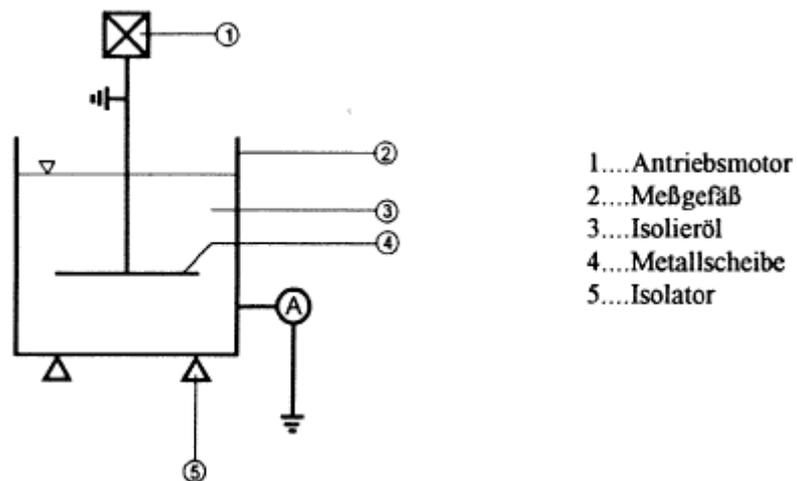
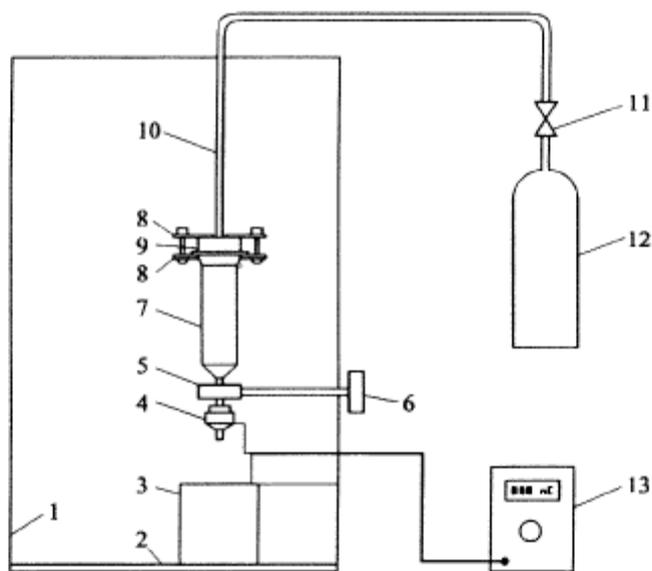


ABBILDUNG 3-3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES SPINNING DISK CHARGER [16]

3.5. Anordnung für Filtermethoden

Bei der Anordnung für Filtermethoden oder auch Mini-Static Charge Tester [17] wird das flüssige Isoliermedium durch ein Zellulosefilter gepresst. Durch diesen erzwungenen Vorgang findet eine Ladungsseparation statt. Die metallische Siebplatte, auf der das Zellulosefilter aufliegt, wird als Messelektrode verwendet. Als Gegenelektrode dient der elektrisch isoliert gefertigte Auffangbehälter des Isolieröls. Zur Messung wird die Boardprobe in kleine definierte Elemente zerteilt und in einem Behälter in den Strömungskreislauf integriert. Dieser Behälter mit Probematerial wird vom Isolieröl durchdrungen und verursacht somit die elektrostatische Aufladung. Die Strömungsverhältnisse im Probenaufnahmebehälter können nicht beeinflusst werden. Durch die unterschiedlichen und nicht definierten Strömungsverhältnisse ergibt sich erneut ein schwer kontrollierbarer Einflussfaktor. Ein schwerwiegender Nachteil ist, dass bei dieser Anordnung ein Zellulosefilter als Referenzmaterial verwendet wird. Dieses Zellulosefilter wird in öldurchströmten Kühlkanälen eines realen Transformators nicht verwendet.



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 DER FILTERMETHODE. AUFBAU DES MINI-STATIC TESTERS NACH OOMMEN [17]

3.6. Anordnung für Injektionsmethode

Bei diesem Prinzip [18] wird zuerst die elektrostatische Aufladung eines Referenzöls gemessen, indem es in einem geschlossenen Kreislauf durch einen Papierwickel gepresst wird. Anschließend wird das zu untersuchende Öl dosiert beigemischt und der Versuch erneut durchgeführt, woraufhin sich eine andere, für das zu untersuchende Öl spezifische Aufladung, ergibt. Diese Änderung im Messergebnis lässt auf die Aufladungsneigung des zu prüfenden Öls schließen. Aufgrund der Tatsache, dass diese Methode einige nicht von der Hand zu weisende Nachteile (beispielsweise nur eine relative Aufladung messbar) besitzt, konnte sich die Injektionsmethode international nicht durchsetzen.

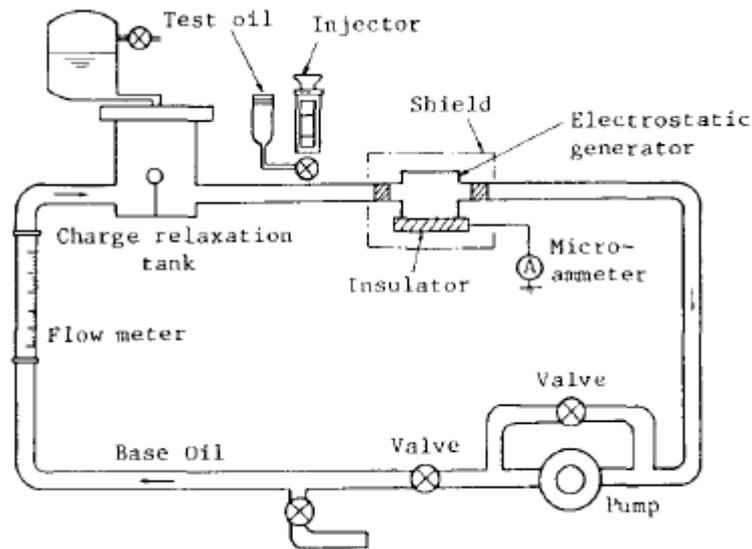


ABBILDUNG 3-5: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER INJEKTIONSMETHODE [18]

3.7. Diskussion der Methoden

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass mit jeder einzelnen beschriebenen Methode eine Aussage über die elektrostatische Aufladung zwischen festen und flüssigen Isolierstoffen getroffen werden kann. Nun soll eine Beurteilung der Methoden nach festgelegten Kriterien erfolgen.

An das Prüfverfahren werden folgende Anforderungen gestellt [8]:

- Eignung für alle Materialien, welche im Betrieb von Leistungstransformatoren zum Einsatz kommen und eine elektrostatische Aufladung nach sich ziehen
- realitätsnahe Oberflächen- und Materialverhältnisse an Kontaktflächen zwischen festen und flüssigen Isolierstoffen
- Übertragbarkeit von Messergebnissen aus Modellgebilden auf reale Leistungstransformatoren
- Eindeutig bestimmbare Strömungs-, Temperatur- und Feuchtebedingungen
- Einfacher Versuchsaufbau und Versuchsablauf sowie geringer Materialbedarf (zb.: geringe Ölmengen) für das Prüfverfahren.

Anhand dieser Kriterien kann eine Reihung der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Prüfverfahren zur Bestimmung der elektrostatischen Aufladungsneigung erfolgen.

1. Kanalmodell
2. Spinning Disc Charger
3. Couette Charger
4. Mini-Static Tester
5. Injektionsmethode

Es ist nicht weiter verwunderlich, dass das Kanalmodell an erster Stelle gereiht wird, stellt dieses doch das aufwendigste aller Prüfverfahren dar. Ergebnisse, welche durch diese Methode entstehen, lassen sich am ehesten auf die Verhältnisse im realen Leistungstransformator umlegen. Das Isolieröl wird im Kreislauf gepumpt und kann somit zusätzlich beheizt werden. Gegen das Eindringen von Luftfeuchtigkeit kann dieses Modell auch nach außen hin abgekapselt werden. Nachteile sind im großen benötigten Ölvolumen, der räumlich Ausdehnung sowie die dadurch entstehenden Kosten, zusehen.

Unmittelbar nach dem Kanalmodell bietet die Prüfmethode mittels Spinning Disc

Aufbau die beste Alternative. Die Boardproben sind einheitlich, das bedeutet rund, eben, klein ausgeführt und haben keinen Bezug zur Geometrie eines realen Transformators. Somit kann mit dem erhaltenen Messergebnis die elektrostatische Aufladungsneigung der Materialkombination bestimmt werden, jedoch bleiben die Strömungsverhältnisse in einem realen Transformator unberücksichtigt. Als Vorteile sind hier das geringe Probevolumen und die geringe Baugröße zu nennen.

Der Couette Charger, ähnlich dem Prinzip des Spinning Disc Verfahrens (konstante, bekannte Strömungsverhältnisse, geringer Materialbedarf und somit geringe Kosten) hat den gravierenden Nachteil der komplizierten Probenfertigung. Die Probe muss, damit sie getestet werden kann, in Zylinderform gebracht werden. Auch mit dem Couette Charger kann kein Bezug zu den Strömungen im realen Transformator und den dort herrschenden Verhältnissen hergestellt werden.

Bei den Filtermethoden kann die elektrostatische Aufladungsneigung nur relativ zu einem Referenzmaterial ermittelt werden. Diese Referenzmaterialien werden nicht in einem zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformator verwendet, worin ein Nachteil zu sehen ist. Die Boardprobe wird in kleine definierte Elemente zerteilt und in einem Behälter in den Ölkreislauf integriert. Diese Probenelemente liegen undefiniert in diesem Behälter woraus sich nicht kontrollierbare Strömungsverhältnisse ergeben und somit ebenfalls als negativ zu bewerten sind.

Die Injektionsmethode erlaubt ebenfalls nur eine relative Bewertung der elektrostatischen Aufladungsneigung. Zuerst wird die Aufladungsneigung eines Referenzöls gemessen. Anschließend wird eine definierte Menge des zu untersuchende Isolieröls beigemischt und der Versuch wiederholt.

4. MESSAUFBAU BASIEREND AUF EINER SPINNING DISC (SD)

4.1. Allgemeines

Durch den stetig steigenden Bedarf an elektrischer Energie und den damit verbundenen Leistungssteigerungen im Energieversorgungssektor werden leistungsstärkere Netzelemente gebaut und bis an ihre physikalischen¹³ Grenzen ausgelastet. Nicht nur durch den wachsenden Zwang immer größere Leistungen preiswert bereitzustellen, sondern auch durch die Forderung der Kostensenkung werden dem Transformatorenbau große Herausforderungen auferlegt. Die Senkung der Kosten wird durch eine Verringerung der Baugröße und der damit einhergehenden Zwangsumlaufkühlung bewerkstelligt. Die Zwangsumlaufkühlung und der Einsatz neuer biologischer Öle haben die Notwendigkeit der Untersuchung der elektrostatischen Aufladung wieder aufgezeigt.

Es ist durchaus nicht verwunderlich, dass jene Transformatoren welche an strategisch wichtigen Netzknoten stehen bis an ihre Grenzen getrieben werden. Verständlicherweise ist ein Ausfall dieser strapazierten Leistungstransformatoren von schwerwiegenden technischen Folgen, wie auch von hohen wirtschaftlichen Verlusten gekennzeichnet. Somit ist es unabdinglich, diese Netzelemente mit Materialien höchster Qualität auszustatten, sowie diese im Laufe der Lebenszeit ständig zu überwachen und wenn nötig auch eine geplante Abschaltung vorzunehmen (Revision).

4.2. Anforderungen an die SD

Die Forderung von Herstellern und Betreibern von großen Leistungstransformatoren nach einem normierbaren Verfahren zur quantitativen Untersuchung der elektrostatischen Eigenschaften von Pressboard-Isolierölkombinationen führte zur Entwicklung des Messaufbaus basierend auf einer Spinning Disc. Wie bereits im *Kapitel 3* erwähnt, zählt dieser Prüfaufbau zu den Verfahren *screening of material*. Das Resultat beinhaltet somit eine Aussage über die elektrostatische Aufladungsneigung der Materialkombination fest-flüssig, ohne die Strömungsverhältnisse in einem realen Transformator zu berücksichtigen. In Abschnitt 1.3 sind die Anforderungen an die SD angeführt, welche nachfolgend näher erläutert werden:

¹³ physikalische Grenzen...thermisch, elektrisch und mechanisch

- Beurteilung von festen und flüssigen Isolierstoffen (Materialkombination):

Die elektrostatische Aufladungsneigung ist keine materialspezifische Kenngröße und hängt immer von der Kombination der zu prüfenden Pressboard – Isolieröl - Paarung ab. Da die Charakteristik der ECT äußerst sensibel bezüglich der Materialkombination ist, kann nicht jede von unter *Abschnitt 3* beschriebenen Methoden als geeignet angesehen werden. So besitzen die Filtermethoden neben den Vorteilen einer kurzen und kostengünstigen Prüfdauer den Nachteil, dass die Filtermaterialien nicht die gleichen Eigenschaften besitzen, wie die verwendeten festen Isolierstoffe in einem realen Transformator.

- kurze Prüfdauer:

Die Prüfdauer eines Prüfvorganges besteht aus der Aufladungsmessung zuzüglich der Aufbereitungszeit der Boardproben¹⁴. Aus wirtschaftlichen Gründen wird natürlich eine kurze Prüfdauer angestrebt. Die Zeit für die Durchführung einer Untersuchung variiert sehr stark zwischen den einzelnen Methoden. So besitzen die Filtermethoden den Vorteil einer Prüfdauer von einigen Stunden, während vergleichsweise das Kanalmodell eine Gesamtprüfzeit von mehreren Wochen aufweisen kann.

- einfache Probenfertigung:

Die Probenfertigung sollte einfach, wenig zeitaufwendig und auch in einer gut ausgestatteten Werkstatt ohne Spezialequipment möglich sein. Auch dieser Forderung wird nicht bei jeder Methode entsprochen. Allen voran fordert das Kanalmodell eine sehr komplizierte und zeitaufwendige Probenfertigung.

¹⁴ Aufbereitung besteht aus: Fertigung, Imprägnierung, Montage usw.

- kostengünstig:

Da die Kosten des Prüfaufbaus definitionsgemäß unter den Begriff der Fixkosten fallen, sind in diesem Fall die Kosten für die Bestimmung der elektrostatischen Aufladung pro Materialkombination von Relevanz, in der Fachliteratur als variable Kosten gekennzeichnet. Der Forderung nach Minimierung der Kosten wird durch einfache Probenfertigung, kurze Prüfzeiten, sowie durch ein geringes Probevolumen (beim flüssigen Isolierstoff) Rechnung getragen.

- geringes Probevolumen:

Der Umfang des Probevolumens wirkt sich bezüglich der Versuchsdurchführung auf mehrere Faktoren aus. Ein geringes Ölvolumen hat den Vorteil einer kurzen Trocknungszeit und einer relativ raschen Verfügbarkeit. Beim festen Isolierstoff sind kurze Imprägnier- und Fertigungszeiten als positiv anzusehen. Beide Eigenschaften wirken sich auf die Prüfzeit und somit günstig auf die variablen Kosten der Versuchsdurchführung aus.

- Verwendung ebener Pressboardproben:

Das Pressboard wird mit seinen hervorragenden Isolationseigenschaften als Hauptquelle für die elektrostatische Aufladung gesehen. Mit dem Bewusstsein, dass jeder mechanische Fertigungsschritt die Eigenschaften des Pressboards verändert, wurde beschlossen, unbearbeitete und nicht verformte Pressboardproben für die Prüfung zu verwenden.

4.3. Funktionsweise der Stromabnahme

Wie bereits im *Kapitel 2.2* beschrieben, findet an der Kontaktfläche zwischen festen und flüssigen Isolierstoff eine elektrostatische Aufladung statt, welche durch einen mechanischen Trennvorgang begründet ist. Dieser mechanische Trennvorgang wird beim Versuchsaufbau nach Spinning Disc über einen Gleichstrommotor bewerkstelligt. Über den regelbaren Gleichstrommotor wird eine Aluminiumwelle angetrieben, an deren Ende sich eine Trägerscheibe befindet. Auf dieser Trägerscheibe, welche ebenfalls aus Aluminium gefertigt wurde, befinden sich die zu untersuchenden Pressboardproben. Durch den Motor wird die Aluminiumscheibe in Rotation versetzt, wodurch eine Strömung des Isolieröls und in weiterer Folge die elektrostatische Aufladung entstehen. Wenn nun die Debye-Länge größer ist als die laminare Unterschicht (siehe *2.3.2 Grundlagen der Strömungslehre*), so wird ein großer Teil der Überschussladung mit der Strömung abtransportiert. Durch die Zentrifugalkraft, welche die rotierende Trägerscheibe auf die separierten Ladungsträger ausübt, wandert eine Art der Ladungsträger mit der Isolierölströmung zum

Gehäuse. Die Gegenladungen verbleiben auf der Oberfläche des festen Isolierstoffs. Diese zurückgebliebenen Ladungen diffundieren durch das Isolationsmaterial Pressboard bis an die metallische Oberfläche der Trägerscheibe. Über ein Elektrometer, welches den Stromkreis von Gehäusewand und Metallelektrode (Trägerscheibe) schließt, können die zuvor getrennten Ladungen rekombinieren. Es erscheint ein Strom, welcher in der Literatur als „leakage current“ bezeichnet wird und zur Beurteilung der elektrostatischen Aufladung der Materialkombination der Isolationsmaterialien herangezogen wird.

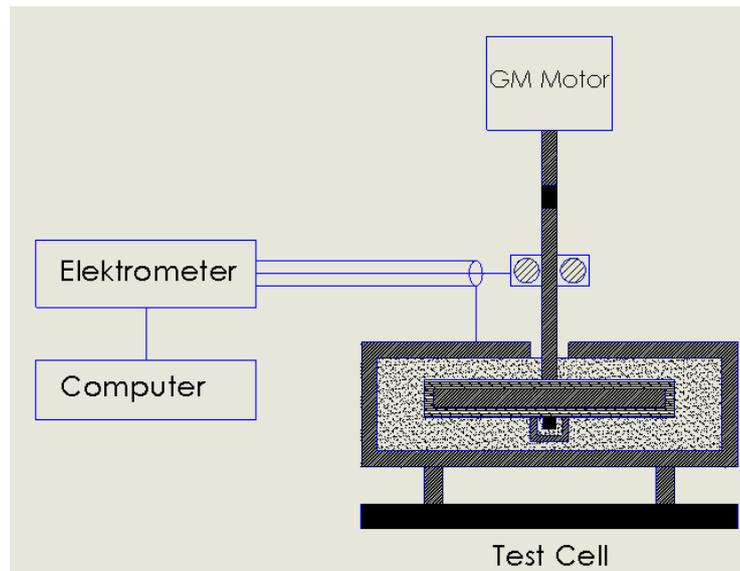


ABBILDUNG 4-1: VERSUCHSAUFBAU DER CIGRE TEST CELL [9]

Dieser „leakage current“ befindet sich in der Größenordnung von einigen pA, was eine Schirmung des Versuchsaufbaus zwangsläufig notwendig macht.

4.4. Die Prüfzelle

Die Spinning Disc Prüfzelle wurde in Kooperation mit dem Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, welches ebenfalls an der Technischen Universität Graz beheimatet ist, entwickelt. Nachstehend ist ein 3D Entwurf dieser Prüfzelle zu sehen.

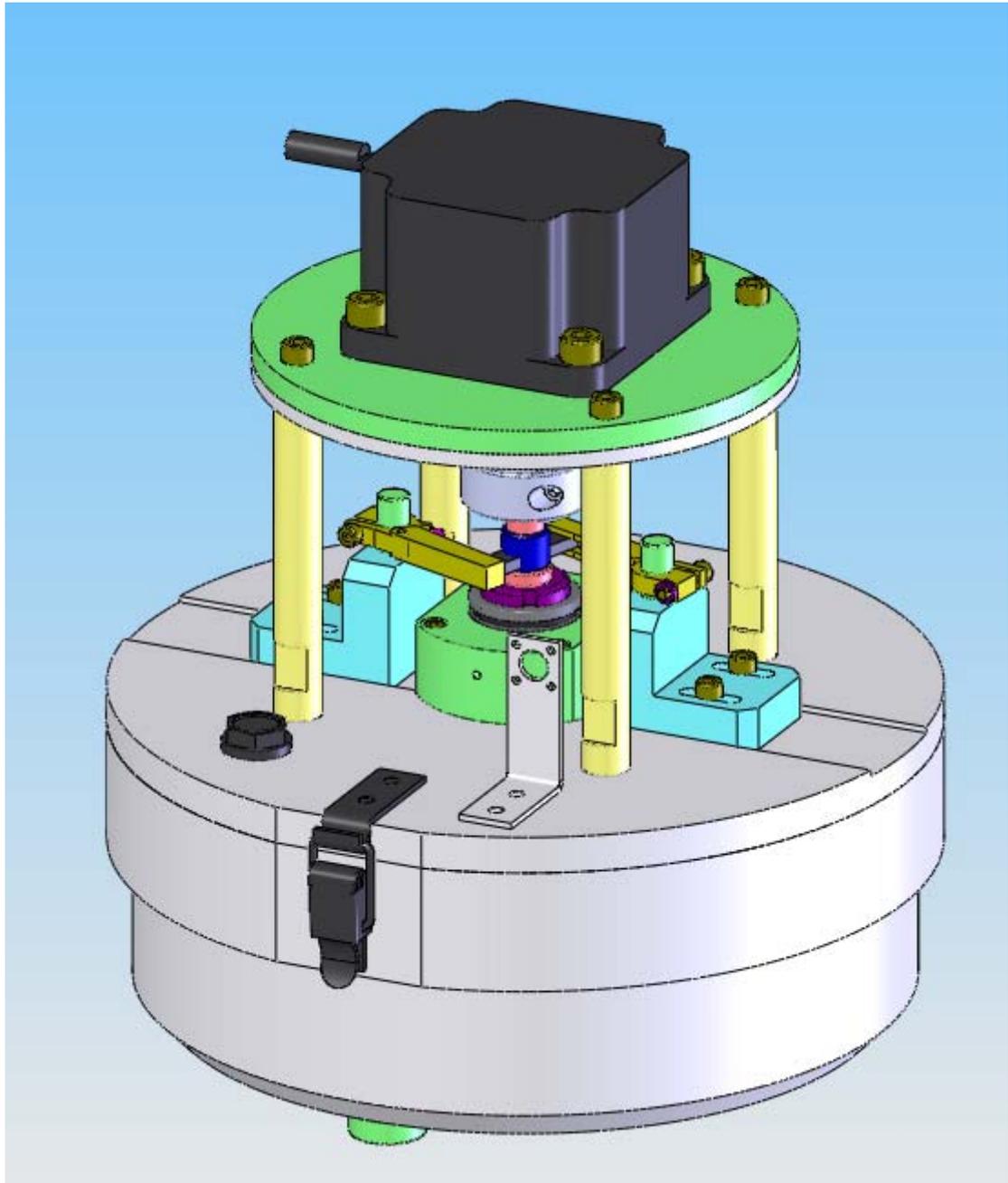


ABBILDUNG 4-2: MESSAUFBAU BASIEREND AUF EINER SPINNING DISC (SD), CAD-MODELL

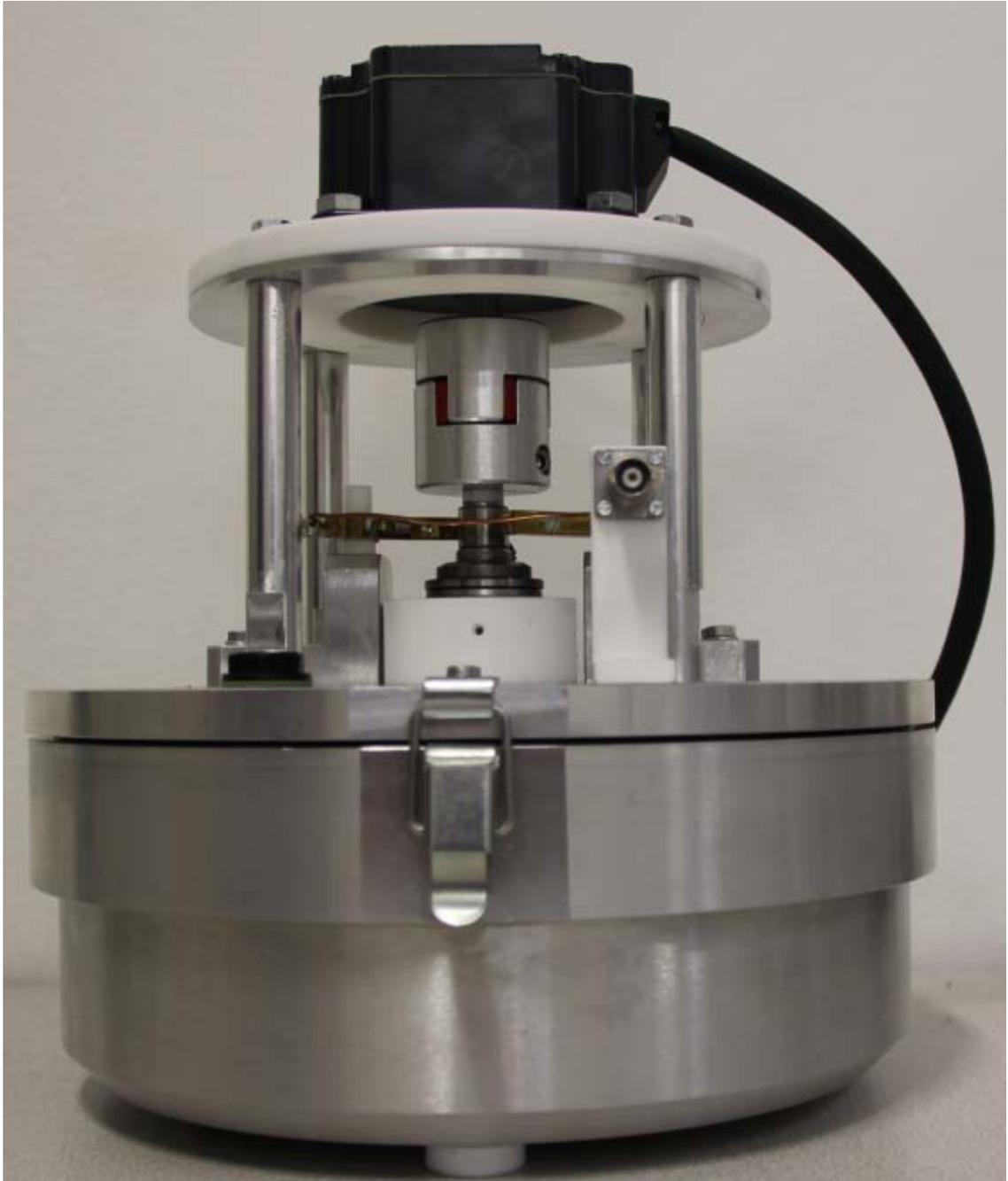


ABBILDUNG 4-3: MESSAUFBAU BASIEREND AUF EINER SPINNING DISC (SD)

4.5. Versuchsaufbau

4.5.1. Einleitung

Aufgrund der sehr geringen Ströme, welche zu erwarten waren, musste der Messaufbau mit äußerster Sorgfalt und Präzision durchgeführt werden.

4.5.2. Mechanischer Aufbau

Der Prototyp des Spinning Disc Chargers wurde in der vorangegangenen Bachelorarbeit entworfen und für weitere Aufladungsuntersuchungen in dieser Masterarbeit überarbeitet [24].

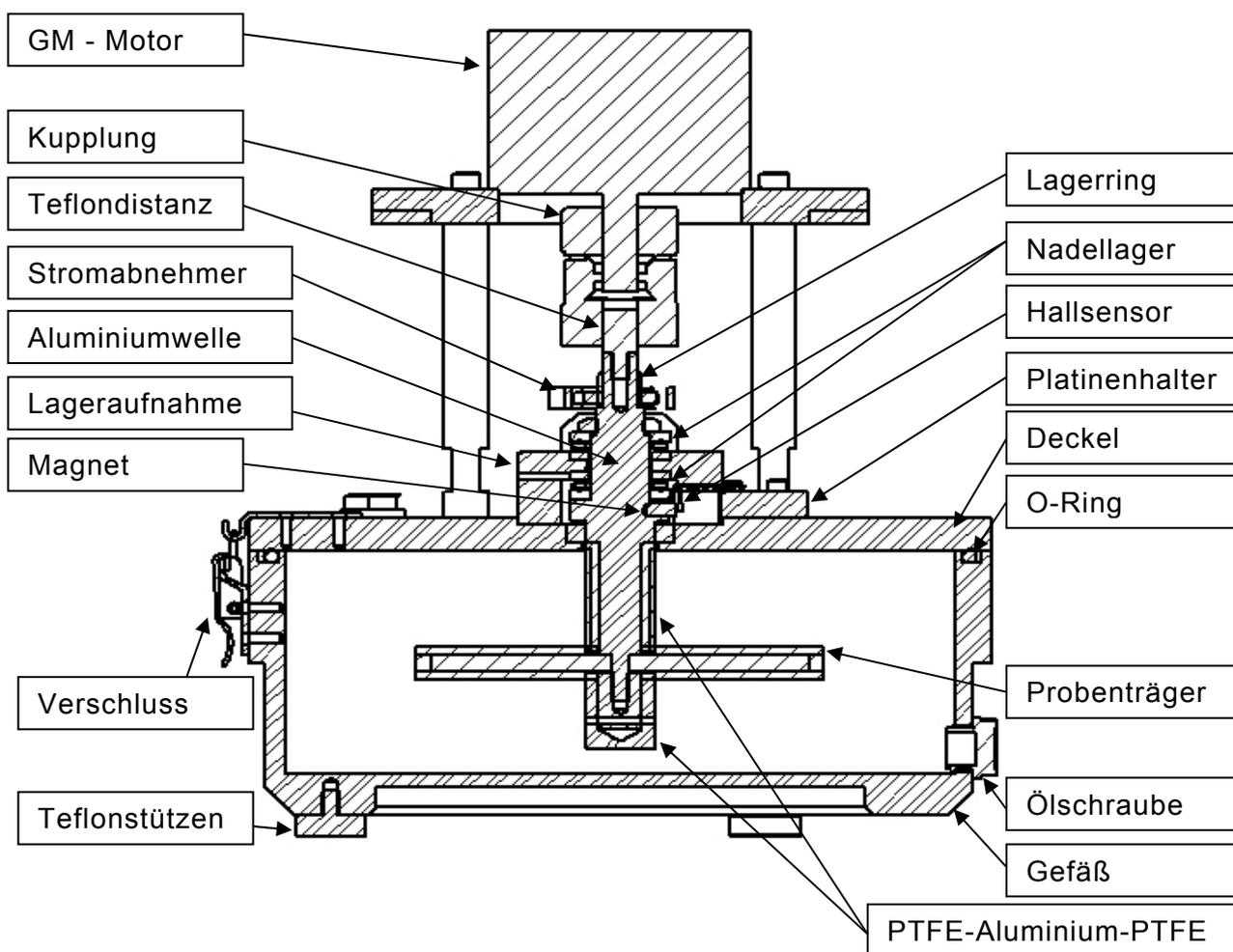


ABBILDUNG 4-4: SCHNITTANSICHT DER SPINNING DISC ANORDNUNG

Das Gehäuse der Messzelle wurde aufgrund der Gewichtsvorteile aus Aluminium gefertigt und besitzt einen Innendurchmesser von 230mm und eine Höhe von 80mm. Das Füllvolumen des Gefäßes beträgt 3.3 Liter. Generell wurden bei der Versuchsplanung einige Arbeitsschritte aus Kostengründen nicht berücksichtigt. So wurden ein Imprägniervorgang [27] des Pressboards innerhalb des Gefäßes und eine Befüllungsanlage für das Isolieröl in die Konstruktionspläne nicht mit-einbezogen und in weiterer Folge auch nicht realisiert. Allerdings trat dadurch die Notwendigkeit einer schnellen Montage der imprägnierten Proben zum Vorschein. Dies bewirkte, dass bei der Entwicklung der Prü fzelle von einem schraubbaren Messzellendeckel abgesehen und zu einem aufklappbaren Schnappverschluss übergegangen wurde. Damit das Gefäß auch unter dem Einfluss hoher Temperaturen keine Dichtheitsprobleme aufweist, wurde der Aluminiumbehälter aus dem Vollen gedreht.

Die Aluminiumwelle, auf der sich die Trägerscheibe mit den Boardproben befindet, wurde gegen das Isolieröl mit PTFE¹⁵ isoliert. Mit dieser Konstruktion wurde der Zweck verfolgt, dass die Ladungsträger nicht unmittelbar am Ort ihrer Trennung rekombinieren. Eine Rekombination der Ladungsträger, die nicht über das Elektrometer, sondern über andere Wege erfolgt, würde eine Verfälschung der Ergebnisse zur Folge haben. Das Material Teflon wurde aufgrund seiner hervorragenden elektrischen Isolationseigenschaften und seiner Temperaturfestigkeit gewählt. Die Temperaturfestigkeit war aufgrund der Prüftemperaturen, welche 90°C betragen können ein wichtiges Kriterium. Nicht temperaturbeständige Kunststoffe würden bei diesen Temperaturen bereits erweichen und zu kleben beginnen, das eine stärkere Abnutzung begünstigen und somit die Verwendungsdauer vermindern würde. Teflon ist durch seine ausgezeichneten Isolationseigenschaften ebenfalls ein Werkstoff der sich durch mechanische Reibung auflädt. Da sich die Teflonisolation auf der rotierenden Welle im Isolieröl befindet, erfolgt eine unerwünschte elektrostatische Aufladung. Eine zusätzliche Aluminiumhülse wirkt diesem störenden Einfluss auf das Messergebnis entgegen.

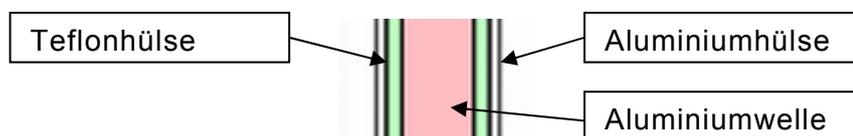


ABBILDUNG 4-5: AUFBAU DER ISOLATION DER ALUMINIUMWELLE

¹⁵ PTFE (Polytetrafluorethylen) ...Handelsname: Teflon

Der Ableitstrom (leakage current) wird über eine Messeinrichtung von der Aluminiumwelle abgenommen, welche im *Abschnitt 4.5.4* näher erklärt wird. Um Verfälschungen und Unsicherheiten des Messergebnisses durch den Antriebmotor zu verhindern, wurde dieser über eine elektrisch isolierende Kupplung montiert. Hierfür wurde eine flexible Kupplung verwendet, welche durch ihren dreiteiligen Aufbau nicht nur eine axiale Montagetoleranz aufweist, sondern auch einen minimalen Winkerversatz ausgleichen kann. Des Weiteren wurde ein Distanzstück aus Teflon eingebaut, das die leitende Aluminiumwelle mit der Kupplung verbindet und somit sicherstellt, dass keine Anteile am Messergebnis durch den Antriebsmotor entstehen. Der Ableitstrom wird über ein Elektrometer erfasst, welches an den Elektroden des Messsystems angeschlossen ist.

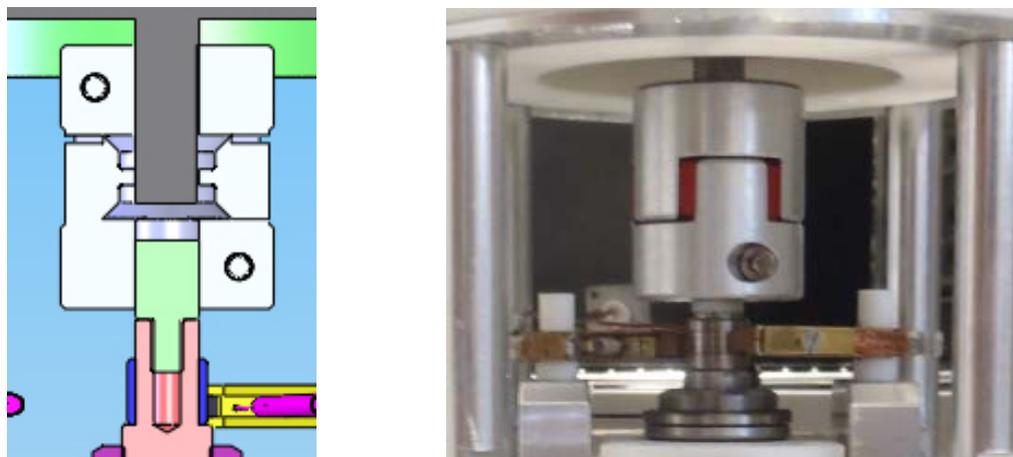


ABBILDUNG 4-6: FLEXIBLE KUPPLUNG

Die Aluminiumwelle wurde zur Stabilisierung mit zwei Nadellagern zwischengelagert. Über die Art der Montage werden neben den radialen Kräften auch axiale Belastungen geringfügig toleriert. Diese Nadellager wurden in Teflon eingepresst, damit kein zusätzlicher Einfluss auf das Ergebnis entstehen kann.

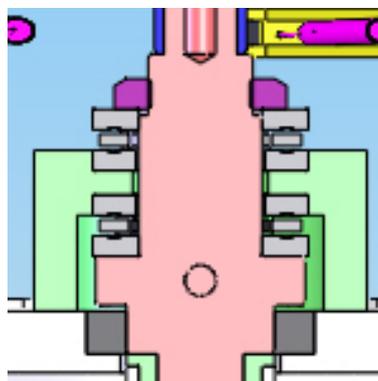


ABBILDUNG 4-7: LAGERUNG DER ALUMINIUMWELLE

Eine geerdete Metallbox, in der sich die Prüfzelle befindet, schirmt diese gegen die Störungen durch elektrische Felder ab. Das Gefäß wurde über Teflonstützen von der Grundfläche dieser Metallbox abgehoben, damit die Prüfzelle keinen Erdkontakt besitzt und in weiterer Folge potentialfreie Untersuchungen der Materialkombinationen möglich sind.

Probenträger

Bei der Montage der Pressboardproben auf die Trägerscheibe wurden zwei unterschiedliche Varianten gefertigt und getestet.

- **Variante 1 (geschraubte Proben):**

Um eine leichte und rasche Probenmontage zu ermöglichen, wurden die Pressboardscheiben auf den Aluminiumträger geschraubt. Die Trägerscheibe wurde gegen das zu untersuchende Öl mit einem Teflonring isoliert, um eine Rekombination der Ladungen am Ort ihrer Trennung zu verhindern. Da das rotierende Teflon im Isolieröl, wie bereits erwähnt, eine sehr hohe elektrostatische Aufladung bewirkt, wurde diese Anordnung wiederum mit einem Aluminiumring umgeben. Damit die Trägerscheibe und die sie umgebenden Ringe sich nicht gegeneinander verschieben, was zu einer elektrostatischen Aufladung führen würde, wurde bei der Realisierung eine Presspassung gefertigt. Eine Probe wird mit je 3 Stahlschrauben im 120° Winkel geschraubt.

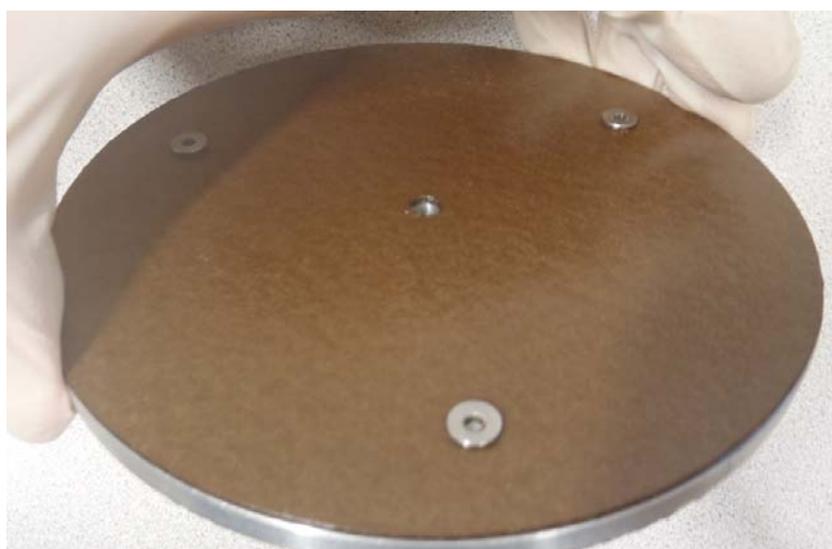


ABBILDUNG 4-8: GEFERTIGTE PROBE GESCHRAUBT

SCHNITT A-A

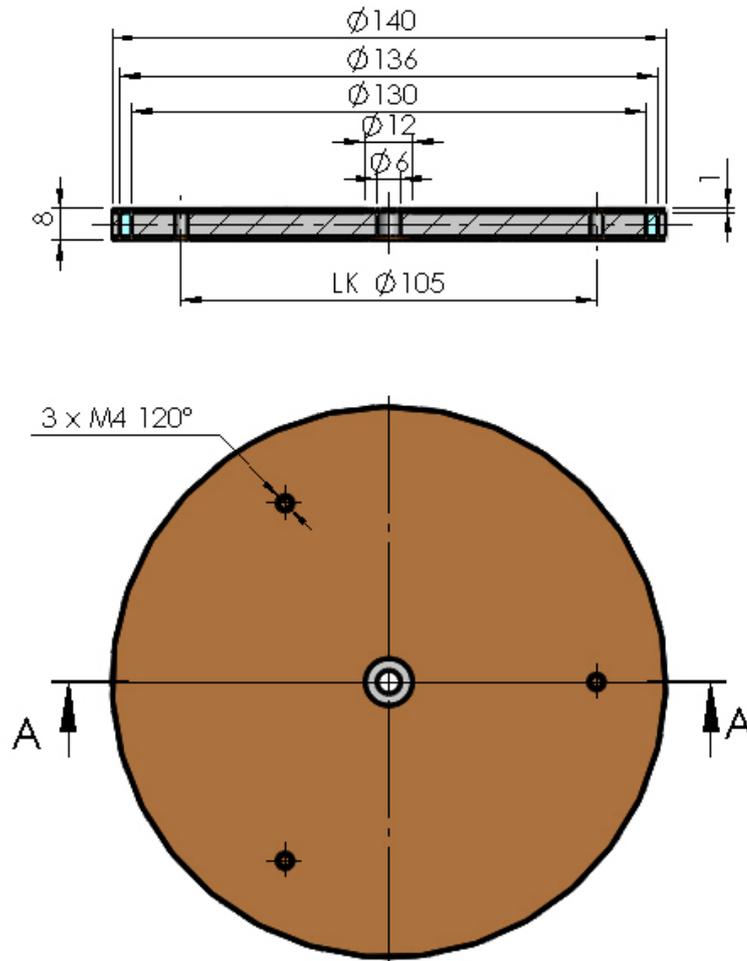


ABBILDUNG 4-9: SKIZZE GESCHRAUBTE PROBE

▪ **Variante 2 (geklebte Proben):**

Bei der zweiten Konstruktion wurden die Pressboardproben auf die Aluminiumträgerscheibe geklebt. Auch hier wurde die Trägerscheibe mit einem Teflonring und in weiterer Folge mit einem Aluminiumring geschirmt. Durch die Verwendung eines Kleberstoffs statt Schrauben wurde versucht, den leitenden Kontakt von Trägerscheibe und Isolieröl zu unterbinden (bei Variante 1 stellten die Schrauben diesen her). Es stellte sich jedoch heraus, dass die Art, mit der das Pressboard auf der Trägerscheibe montiert wurde, keinen merklichen Einfluss auf das Messergebnis hatte. Da der Kleber jedoch sehr lange (mindestens einen Tag) zum Aushärten benötigt, wurde aus zeitlichen Gründen von dieser Methode abgesehen.



ABBILDUNG 4-11: GEFERTIGTE PROBE GEKLEBT

SCHNITT A-A

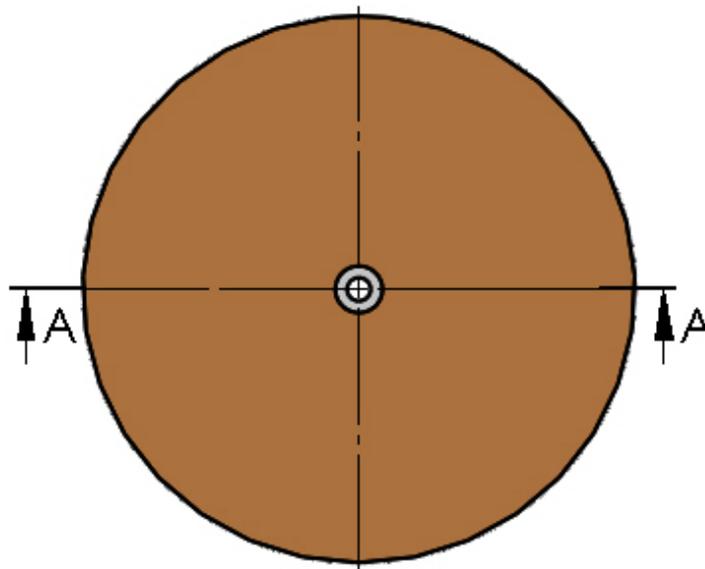
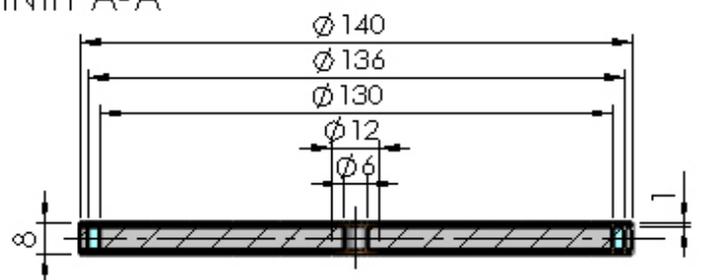


ABBILDUNG 4-11:SKIZZE GEKLEBTE PROBE

Der Einfluss auf das Messergebnis würde erheblich steigen, wenn der äußere Aluminiumring aus Pressboard gefertigt wäre. Begründet wird dies durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit und die Oberfläche, die ein solcher Ring aus Pressboard am äußeren Umfang besitzen würde.

4.5.3. Steuereinheit

Die Steuereinheit wurde eigens für die Prüfzelle entwickelt, um eine weitgehende Unabhängigkeit von der Laboreinrichtung zu ermöglichen. Aus nachstehendem Blockschaltbild ist ersichtliche, dass für den Betrieb lediglich eine Versorgung von 230V Wechselspannung erforderlich ist. Des Weiteren wurde die Option einer externen Spannungsversorgung für den Motor, sowohl Speisespannung, als auch Drehzahlstellung über ein Spannungsnetzteil ermöglicht.

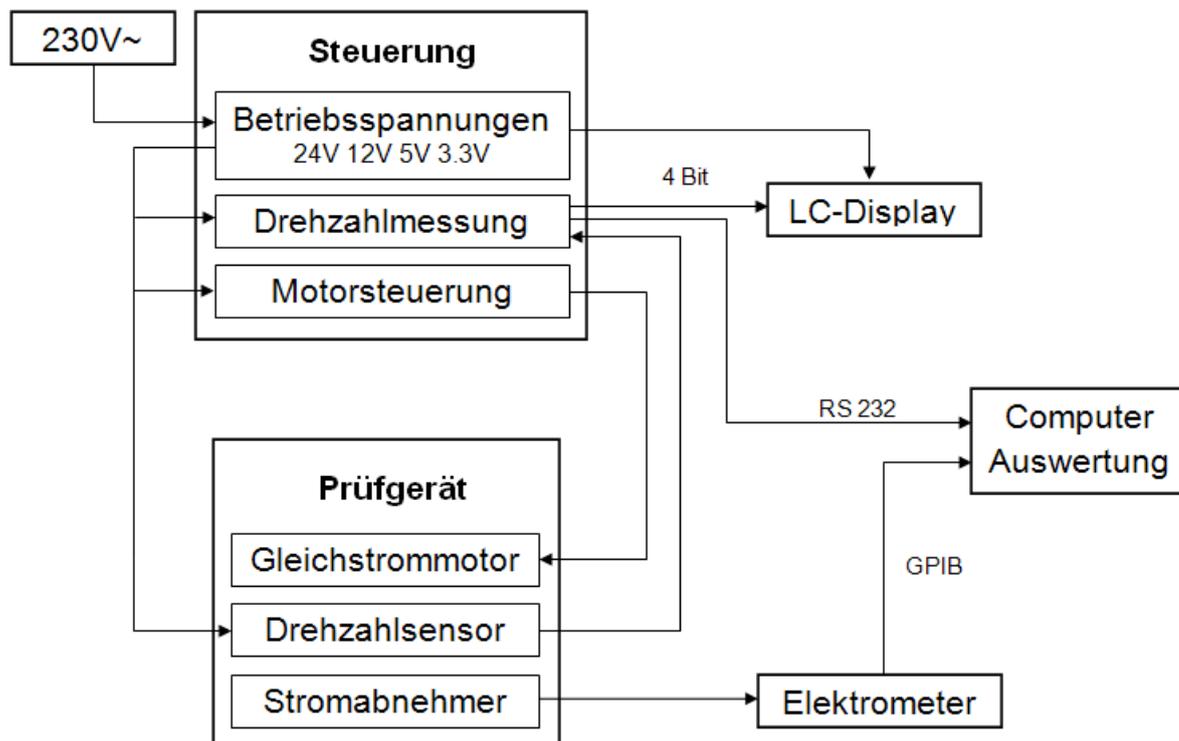


ABBILDUNG 4-12: BLOCKSCHALTBILD DER STEUERINHEIT

Nachstehend ist die Realisierung des dargestellten Blockschaltbildes der beschriebenen Steuereinheit zu sehen. Eine Überprüfung der eingestellten Drehzahl kann über einen Spannungsabgriff an den Buchsen "DREHZAHL U_OUT" erfolgen. Die Buchsen "MOTOR EXT 24VDC" können verwendet werden, um den Motor entkoppelt vom Rest der Steuereinheit mit Spannung zu versorgen. Über den Kippschalter "EXT N INT" (=extern-neutral-intern) kann diese Umschaltung durchgeführt werden.

Der Masseanschluss dient zur Erdung der Schirmung und des Messgerätes.

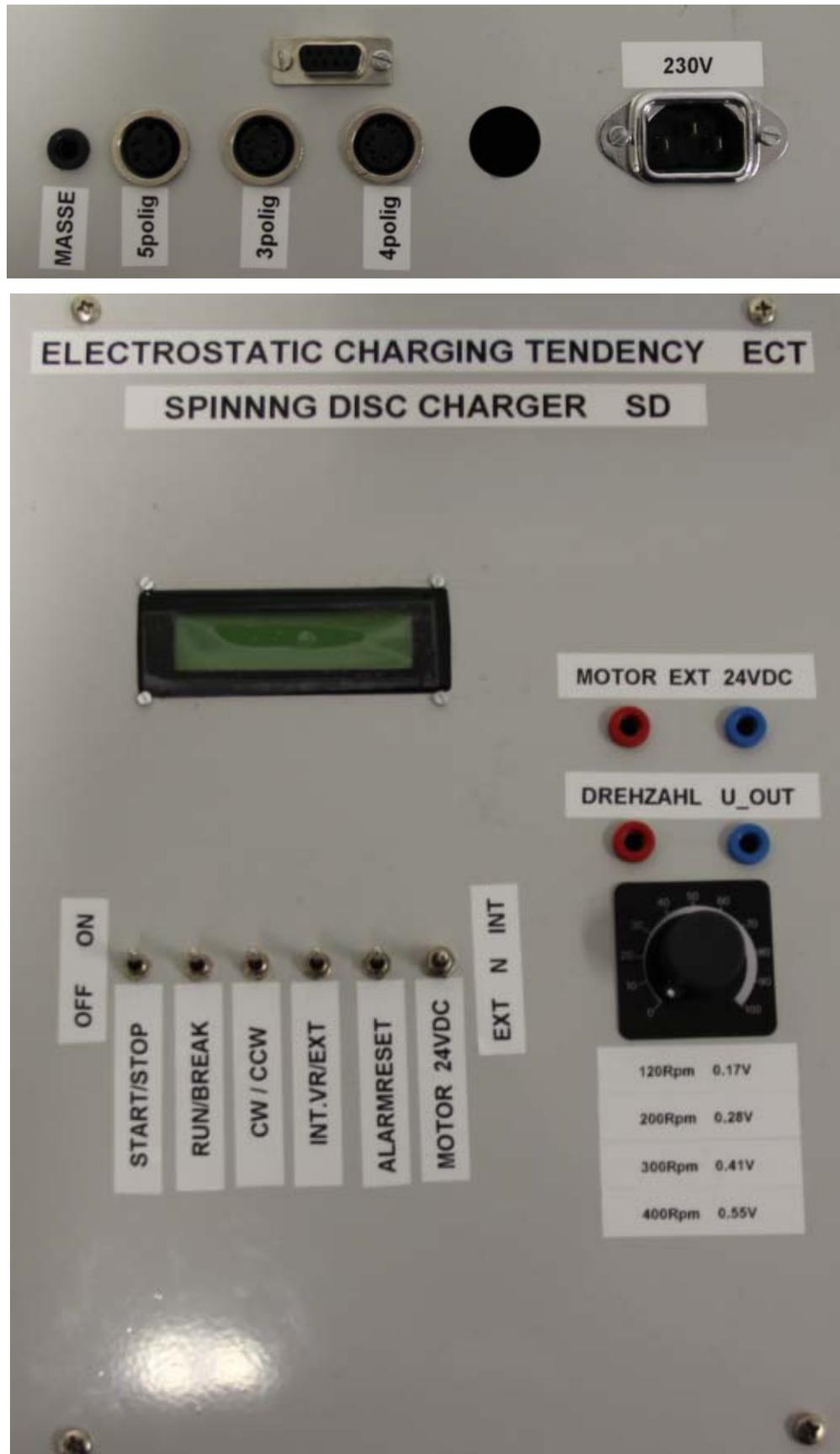


ABBILDUNG 4-13: MOTORSTEUEREINHEIT UND DREHZAHLMESSEINRICHTUNG

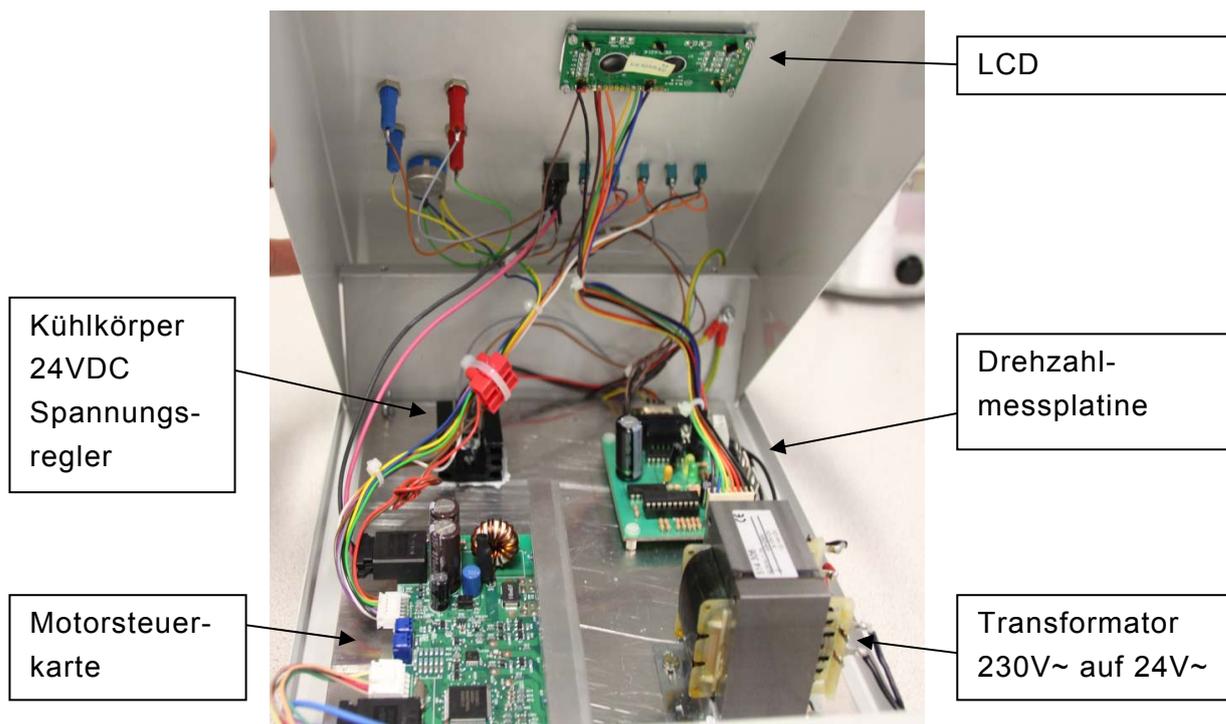


ABBILDUNG 4-14: INNENANSICHT DER STEUEREINHEIT

▪ **Spannungsversorgung**

Die Versorgung von 230V Wechselspannung wurde über einen handelsüblichen Kleintransformator auf 24V Wechselspannung transformiert. Aufgrund der Tatsache, dass in der Steuereinheit nur Gleichspannungen benötigt werden, wurden die 24V Wechselspannung am Ausgang des Transformators mittels eines Vollweggleichrichters gleichgerichtet und anschließend über einen Kondensator geglättet. Somit wurden konstante 24V Gleichspannung generiert und in weiterer Folge über den Einsatz von Spannungsreglern auf die notwendigen Betriebsspannungen (12V, 5V, 3.3V) der einzelnen Elemente geregelt. Der 24V Spannungsregler produzierte aufgrund seiner Aufgabe eine sehr hohe Verlustwärme, welche über die Verwendung von Kühlkörper unter Kontrolle gebracht werden konnte.

Spannungshöhe in V	Spannungsart	Verwendungszweck
230	AC	Elektrometer, Messcomputer
24	DC	Versorgung für Motor
12	DC	Versorgung für Hallelement
5	DC	Versorgung für LCD
3.3	DC	Versorgung für Mikro-Controller

TABELLE 1: ZUR VERFÜGUNG STEHENDE SPANNUNGEN IN DER STEUEREINHEIT

▪ **Drehzahlmessung**

Die Drehzahl ist eine der Faktoren, welche die elektrostatische Aufladung schon bei geringen Schwankungen merklich beeinflusst. Damit die Drehzahl als Quelle von markanten un stetigen Sprüngen in der aufgezeichneten Kennlinie ausgeschlossen werden konnte, wurde diese protokolliert und mit einem Zeitstempel versehen. Somit konnte bei unerklärlichen und unerwarteten Verläufen der ECT die Drehzahl als Verursacher identifiziert, beziehungsweise ausgeschlossen werden.

Zur Messung der Drehzahl wurde ein Hallensensor verwendet. Der Magnet, welcher den Hallensensor durchschalten lässt, wurde in die rotierende Aluminiumwelle eingebettet.

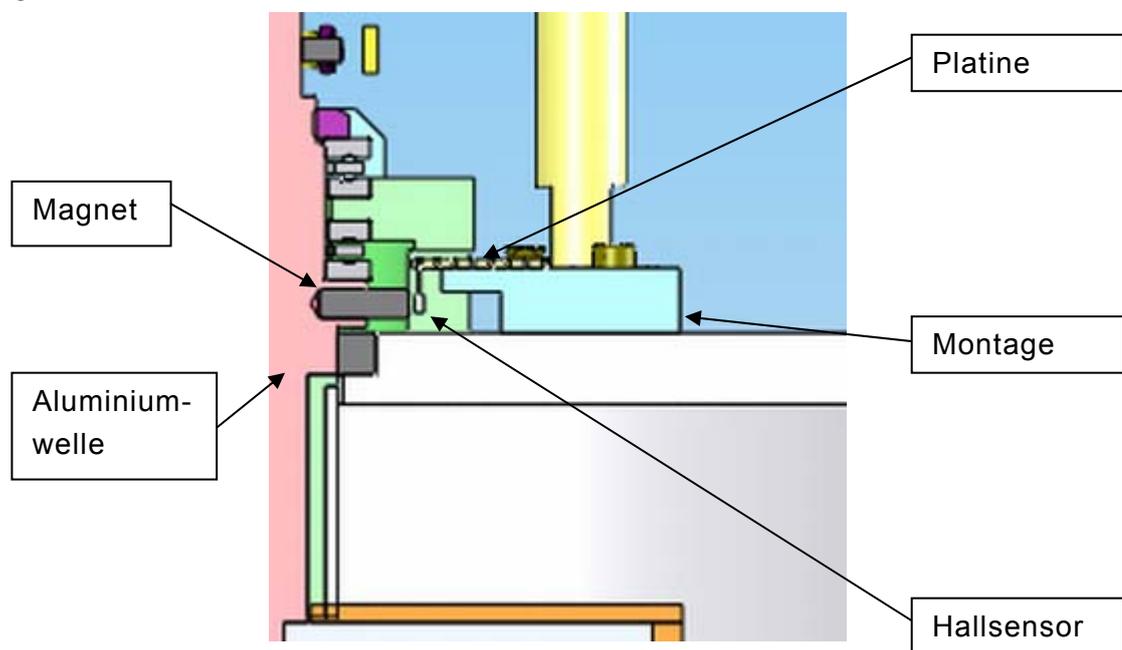


ABBILDUNG 4-15: DREHZAHLMESSSYSTEM

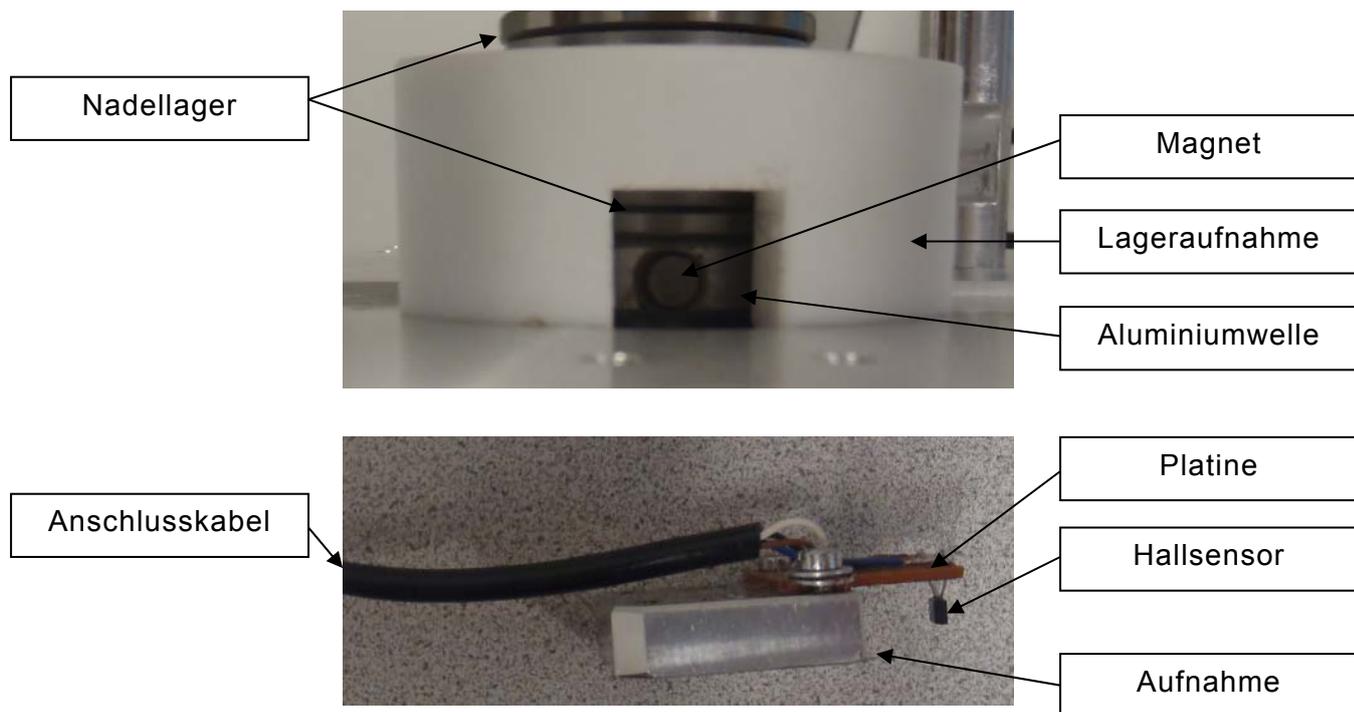


ABBILDUNG 4-16: KOMPONENTEN DES DREHZAHLMESSSYSTEMS

Die Impulse, welche durch das Rotieren der Welle entstehen, werden an einen Mikrocontroller weitergeleitet und gezählt. Vom Mikrocontroller der Type NXP werden diese gezählten Impulse, in eine Drehzahl umgerechnet und auf einem LCD¹⁶ zur Anzeige gebracht. Der Mikrocontroller wird in der Programmiersprache C programmiert und besitzt einen internen Quarzbaustein, welcher mit 7.373 MHz taktet und somit für diese Anwendung ausreichend war. Des Weiteren wird die errechnete Drehzahl über eine serielle Schnittstelle an den Messcomputer übermittelt und mit einem Zeitstempel versehen.

Nr.	Datum	Uhrzeit	Zeitstempel	Drehzahl	Stromwert
			ms	1/min	A
1	12/30/11	13:54:00	174922.0	201.0	-1,39E-06
2	12/30/11	13:54:00	175234.0	201.0	-1,72E-06
3	12/30/11	13:54:01	175562.0	201.0	-1,96E-06
4	12/30/11	13:54:02	177234.0	201.0	-1,20E-06
5	12/30/11	13:54:03	177547.0	201.0	-1,44E-06
6	12/30/11	13:54:03	177875.0	201.0	-1,87E-06

TABELLE 2: AUSSCHNITT AUS DEM MESSPROTOKOLL

Wie aus obiger Tabelle ersehen werden kann, besteht jeder Messeintrag aus Datum, Uhrzeit, Zeitstempel, Drehzahl und Höhe des Ableitstromes.

¹⁶ LCD...Liquid Cristal Display

▪ Drehzahlstellung

Die Drehzahl kann grundsätzlich auf zwei Arten eingestellt werden. Zum einen kann sie über ein Potentiometer und zum anderen über eine externe Spannungsquelle (0V bis 5V) vorgegeben werden.

Die Drehzahlstellung über das Potentiometer ist ohne weitere Hilfsmittel als ungenau anzusehen. Damit eine feinere Wahl der Drehzahl ermöglicht wird, kann ein Multimeter zur Kontrolle und Stellung der Spannung parallel zum Potentiometer verwendet werden.

Bei der zweiten Variante ist ein Spannungsnetzteil notwendig, welches eine feine Spannungseinstellung im Bereich von 0V bis 5V ermöglicht. Das Potentiometer wird in diesem Fall übergangen.

Für beide Varianten ist die Kenntnis des Spannungs-Drehzahlverhältnisses notwendig. Durch die lineare Abhängigkeit der Drehzahl von der Spannung kann dieses Verhältnis leicht ermittelt werden.

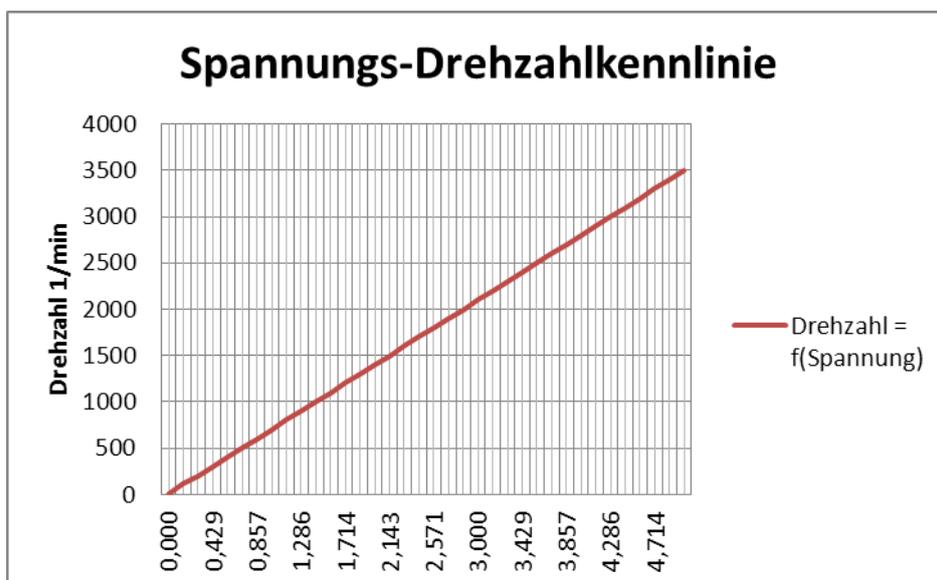


ABBILDUNG 4-17: SPANNUNGS-DREHZAHLENKENNLINIE DES ANTRIEBSMOTORS

4.5.4. Messeinrichtung (Stromabnahme)

Die Messeinrichtung hat die Aufgabe, den Ableitstrom von der Aluminiumwelle abzunehmen und zum Elektrometer zu führen. Dies kann auf unterschiedlichste Weise erfolgen und bietet dementsprechend viel Platz für kreative Ansätze. Aufgrund der Höhe des Ableitstromes, welcher sich im pA beziehungsweise nA Bereich befindet, musste das Stromabnahmesystem eine äußerst gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Durch die Rotation der Welle war ein Schleifkontakt unumgänglich und somit musste auch der mechanische Verschleiß minimal gehalten werden. Der große Nachteil eines Schleifkontaktes ist immer die richtige Materialkombination zu finden. Ein Maß für das Verschleißverhalten ist die Härte eines Werkstoffes. Diese gibt den mechanischen Widerstand an, den ein Werkstoff

der mechanischen Eindringung eines härteren Prüfkörpers entgegengesetzt. Wie bei jedem Bauteil das unter mechanischer Reibung verschleißt, ist dafür Sorge zu tragen, dass dieses Element leicht zugänglich ist, um ohne größere Anstrengungen ausgetauscht werden zu können.

- **Realisierung über Wälzlager**

Damit ein Ableitstrom dieser Größenordnung über ein Wälzlager transportiert werden kann, muss auf jede Art von Schmierung verzichtet werden. Dies hat natürlich erheblichen Einfluss auf die Lebenserwartung eines solchen Lagers. Ein weiterer Grund warum diese Variante nicht weiter verfolgt wurde, ist in der Wärmeentwicklung zu sehen. Durch den Verzicht auf Schmierung, müsste die Kühlung noch intensiver forciert werden. Der Nutzen einer solchen Kühlung und auch der Einfluss auf das Messergebnis waren zu diesem Zeitpunkt nicht abschätzbar und somit aus der Sicht der Kosten nicht weiter zu verfolgen.

- **Realisierung über Kohlebürsten**

Die Stromabnahme über Kohlebürsten durchzuführen erschien als funktionstaugliche Möglichkeit das Problem der Messeinrichtung zu lösen. Hierbei handelt es sich nicht um gewöhnliche Industriekohle, wie sie beispielsweise in Gleichstrommotoren vorzufinden ist. Industriekohle besitzt eine natürliche Isolationsschicht, welche für Ströme im hier vorliegenden Fall unüberwindbar sind. Aufgrund dessen wurde für die Realisierung Metallkohle verwendet, welche durch die Zugabe von Additiven eine höhere Leitfähigkeit aufweist.

Die Quaderförmigen Kohleelemente befinden sich in Halterungen, welche auf PTFE-Bolzen montiert wurden. Diese PTFE-Bolzen haben die Aufgabe die Halterungen und somit auch die Kohlebürsten gegen das Aluminiumgefäß zu isolieren. Die Montagebacken, welche die Bolzen aufnehmen, werden in einer Nut geführt und mit Langlöchern versehen. Durch die Langlöcher besteht die Option den ganzen Stromabnehmerapparat zu verschieben, um in weiterer Folge eine optimale Bürstenauflage zu ermöglichen.

Über ein Hebel-Federsystem werden die Kohlebürsten an einen Nadellagerring gepresst. Vibrationen und Unregelmäßigkeiten im Rundlauf der Welle werden dadurch ausgeglichen. Der Nadellagerring aus gehärtetem Stahl schützt die Aluminiumwelle vor Abrieb durch die Kohlebürsten, welche in dieser Konstruktion die Verschleißelemente bilden. Die Lebensdauer des Stromabnahmesystems ist somit durch die Abnutzung der Metallkohlebürsten gegeben. Die Kohlebürsten können ohne größeren Aufwand getauscht werden und die Kosten hierfür sind auch als minimal einzustufen.

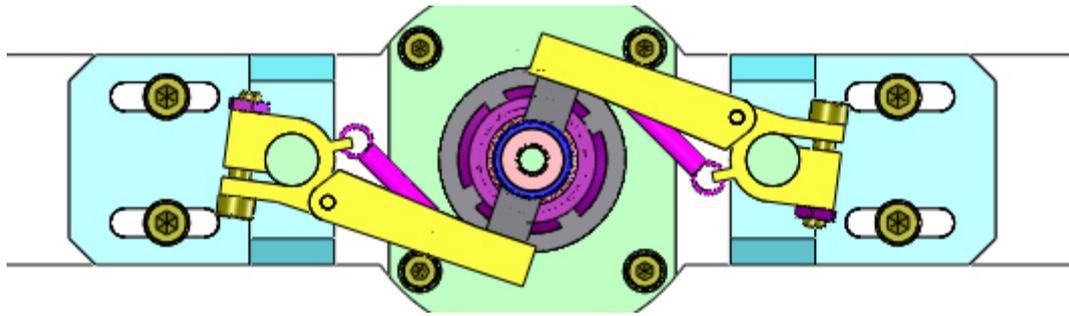


ABBILDUNG 4-18: STROMABNAHMESYSTEM

In nachstehender Abbildung ist eine Schnittansicht durch einen Stromabnehmer zu sehen. Die elektrische Isolation der Metallkohlenhalterung zum Gehäuse wird mittels Teflonbolzen bewerkstelligt. Dieser Bolzen wird in die Montagebacken eingepresst und hält seine Position auch bei höheren Temperaturen.

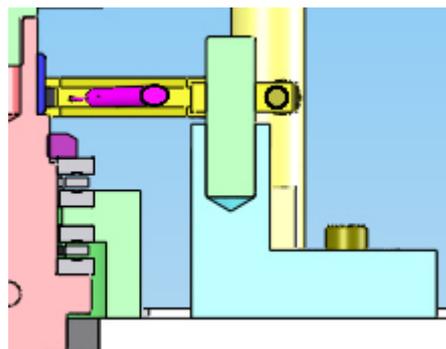


ABBILDUNG 4-19: STROMABNAHMEAPPARAT

4.6. Versuchsdurchführung

4.6.1. Karl-Fischer-Titration

Die Bestimmung des Wassergehalts im Isolieröl wurde mittels Karl-Fischer-Titration durchgeführt. Aufgrund des zu erwartenden geringen Wassergehalts (im ppm Bereich) wurde die coulometrische Methode [23] zur Untersuchung angewandt.

Die Probenentnahme aus dem Ölgefäß wurde mittels einer sterilen Spritze durchgeführt. Um den Wassergehalt bestmöglich bestimmen zu können, müssen circa 2-5ml des zu untersuchenden Isolieröls in die Titrierzelle gegeben werden. Bei der Einbringung muss darauf geachtet werden, dass das gesamte eingebrachte Isolieröl im Titriermittel landet und nicht an die Gefäßwände gespritzt wird. Um die eingebrachte Menge des Isolieröls zu erfassen, wurde die befüllte Spritze einmal vor und einmal nach dem Einbringen gewogen.

Das Messgerät misst die Zeit und den Strom, die nötig waren, um den Titrationsendpunkt zu erreichen.

Das Produkt:

$$\text{Zeit} * \text{Strom}$$

ist direkt proportional zur erzeugten Iodmenge respektive zur bestimmten Wassermenge.

Aufgrund der sehr geringen Wassergehalte ist eine genaue Arbeitsweise notwendig, damit das zu untersuchende Isolieröl so wenig wie möglich mit Luft in Berührung kommt. Schon allein die Feuchtigkeit der Umgebungsluft reicht aus, um den Wassergehalt im Öl zu heben und somit das Messergebnis zu verfälschen.

4.6.2. Trocknung des Isolieröls

Ein hoher Wassergehalt und eine hohe Verunreinigung durch Partikel beeinflussen die elektrischen Eigenschaften der Isolieröle und senken die Durchschlagfestigkeit. Die Bemühungen das Isolieröl trocken und auch gut gefiltert zum Einsatz zu bringen, sind somit sinnvoll und auch zweckdienlich. Durch die Aufbereitung werden die elektrischen Eigenschaften des Isolieröls verbessert und zugleich das Ausfallrisiko gesenkt. Der normale Wassergehalt eines aufbereiteten und funktionstüchtigen Isolieröls liegt im Bereich von wenigen ppm¹⁷.

¹⁷ ppm...parts per million

Die elektrostatische Aufladung wird gemessen, um die unterschiedlichen Isolieröle bei verschiedenen Temperaturen und Drehzahlen vergleichen zu können. Um einen objektiven Vergleich zu ermöglichen wird versucht, eine definierte, wenn möglich gleiche, Ausgangssituation für jede Messung herzustellen.

Trocknungsprozess:

- Filterung des Isolieröls mittels PTFE-Filter (Porenweite 1 μ)
- Trocknung des Öls bei 60°C für 24 Stunden

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist somit von folgenden Faktoren abhängig:

- Temperatur
- Druck
- Größe der Flüssigkeitsoberfläche (Gefäßform)

4.6.3. Aufbereitung des Pressboards

Der Trocknung und Ölimprägnierung des festen Isolationsmaterials, in diesem Fall Pressboard, kommt größte Bedeutung zu. Wichtige Gründe dafür sind:

- das Absinken der elektrischen Festigkeit bei zu hohem Wassergehalt
- Feuchtigkeit beschleunigt die Alterung
- Durchschläge infolge der Störung des Feuchtigkeits-Gleichgewichts
- Niedrige TE¹⁸-Einsetzspannung und höhere TE-Intensität bei Anwesenheit von Feuchtigkeit

An dieser Stelle wird zur Herstellung und Produktion von Transformerboard auf [13] verwiesen.

Trocknung des Pressboards

Wenn das Pressboard bzw. Zellulosematerial unter normalen Umgebungsbedingungen gelagert wird, besitzt diese einen relativ hohen Feuchtegehalt im Bereich von mehreren Prozent.

¹⁸ TE...Teilentladung

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist abhängig von:

- Materialspezifischen Eigenschaften (Porenweite, Oberflächenbeschaffenheit...)
- Temperatur
- Druck
- Dicke des zu trocknenden Materials

Trocknungsprozess:

- 48 Stunden lang trocknen der Proben bei 105°C in einem Wärmeschrank
- 24 Stunden lang Vakuum ziehen (<1mbar) bei 105°C
- Reduktion der Temperatur auf 90°C

Ölimprägnierung des Pressboards

Nachdem sowohl das Isolieröl, als auch das Pressboard separat getrocknet wurden, wird das Pressboard nun unter Vakuum mit Öl imprägniert. Durch die Verwendung eines aufgeheizten Isolieröls (90°C) kann die Imprägnier-Zeit deutlich verringert werden.

Imprägnier-Prozess:

- Proben werden unter Vakuum (<1mbar) unter 90°C für 24 Stunden imprägniert
- Brechen des Vakuums durch eine Trocknungseinheit (24 Stunden)
- Luftdichtes Einschweißen der imprägnierten Proben in Folie

4.6.4. Probenmontage und Luftfeuchtigkeit

Durch das Hantieren mit imprägnierten Proben unter normalen Umgebungsbedingungen ist der Kontakt mit Luft und der damit verbundenen Luftfeuchtigkeit unumgänglich. Da die Berührung der Probe mit Feuchtigkeit jeglicher Art (somit auch Luftfeuchtigkeit) zu einer Veränderung beziehungsweise Verschlechterung der Trocknung führt, war eine rasche und sorgfältige Vorgehensweise unabdinglich. Eine schnelle Probenmontage wurde aufgrund dieser Tatsache unumgänglich und führte zur Konstruktion des SD Zelle mit Scharnier und Schnappverschluss. Um den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auszuschließen, wurde ausschließlich mit Einweg-Handschuhen gearbeitet.

5. ERGEBNISSE

5.1. Allgemeines

Die Übermittlung der Messwerte vom Elektrometer zum Auswertecomputer erfolgte über eine GPIB-USB Übersetzung. Am Auswertecomputer wurden die Daten über ein eigens dafür geschriebenes Programm (C++) in eine Textdatei geschrieben und gespeichert. Mit der Software 'Matlab' wurden die Rohdaten dann aufbereitet und visualisiert.

5.1.1. Rohdaten der aufgenommenen Messwerte

Wie bereits aus den Rohdaten in nachstehender Abbildung ersehen werden kann, stellt sich bereits nach wenigen Minuten ein stationärer Zustand der elektrostatischen Aufladung ein.

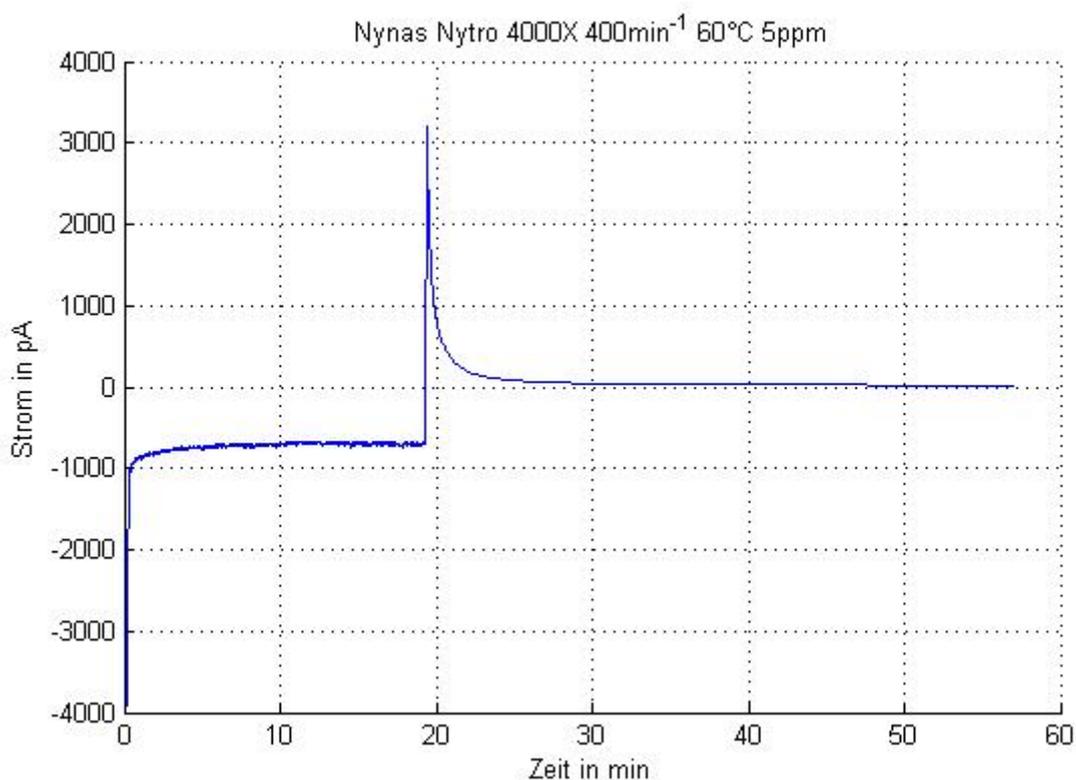


ABBILDUNG 5-1: DARSTELLUNG DER ROHDATEN DER AUFGENOMMENEN MESSKURVE

5.1.2. Aufbereitung der Rohdaten

Eine Aufbereitung der Rohdaten war aus Gründen der Visualisierung zweckdienlich. Aus *Abbildung 5-1* ist ersichtlich, dass die Messwerte der Aufladung (ca. die ersten 20 Minuten) eine höhere Schwankungsbreite aufweist als die der Entladung.

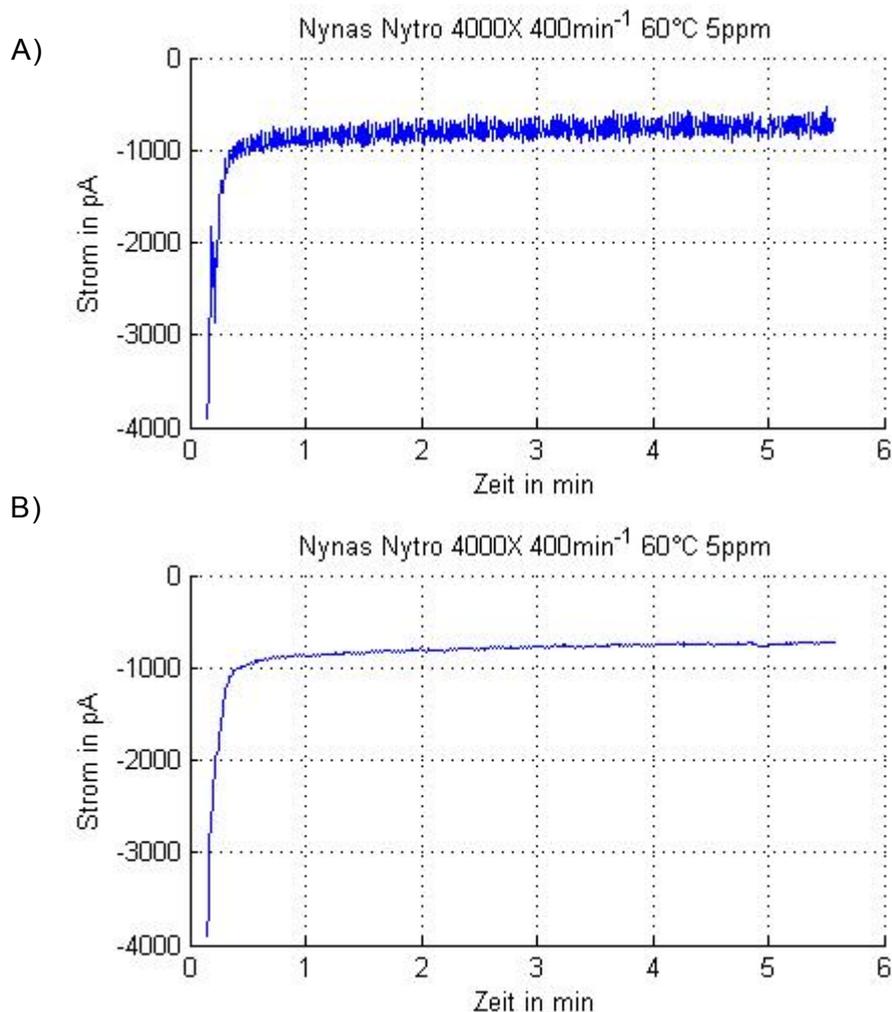


ABBILDUNG 5-2: MESSDATEN (AUFLADESTROM ÜBER DER ZEIT) IN MATLAB

- A) ROHDATEN DER MESSWERTE
- B) GEFILTERT MITTELWERTBILDUNG MIT N=25

In oberer Abbildung ist die ungefilterte Aufladekurve zu sehen, welche den Störungen durch den Prüfaufbau (mechanisch bzw. elektrisch) unterworfen ist und somit hohe Schwankungen besitzt. Im unteren Diagramm hingegen wurde eine Filterung vorgenommen, indem ein Mittelwert über eine Anzahl von 25 Messwerten gebildet wurde. In weiterer Folge ist in jedem Diagramm eine gefilterte Darstellung der Messergebnisse zu sehen.

Diese Schwankungen im Messergebnis der ungefilterten Daten können mehrere Ursachen haben. Eine mögliche Erklärung ist die Rotation und die dadurch entstehenden Vibrationen der Trägerscheibe, da diese bei der Aufladung durch einen

isoliert angebrachten Gleichstrommotor angetrieben wird. Eine weitere mögliche Ursache ist die Konstruktion des Probenträgers und die damit verbundenen Fertigungstoleranzen, sowie die Ausdehnkoeffizienten der unterschiedlichen Materialien. Im *Kapitel 4.5.2* wurden die Vorteile und Nachteile der Trägerkonstruktion erläutert. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass durch die Verwendung eines Klebstoffs anstatt Schrauben zur Probemontage kein merklicher Unterschied im Messergebnis festgestellt werden konnte. In [8] wurde jedoch eine deutliche Verbesserung des Messergebnisses beobachtet, wenn der Aluminiumaußenring durch einen Ring aus Pressboard ersetzt wurde. Dieser Pressboardring müsste natürlich aus dem gleichen Material wie die Probenscheiben gefertigt werden. Durch eine Konstruktion dieser Art könnte auch der Umfang, wo die höchste Rotationsgeschwindigkeit der Trägerscheibe auftritt zur elektrostatischen Aufladung genutzt werden. Des Weiteren würde dadurch auch die aufwendige Schirmung der Trägerscheibe (Aluminium-PTFE-Aluminium) hinfällig. Die Fertigung eines Ringes aus Pressboard konnte mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht realisiert werden.

5.1.3. Interpretation und Bezug zum realen Leistungstransformator

Die Abfolge der Vorzeichen, das bedeutet, dass der Aufladestrom immer negativ und der Entladestrom immer positiv sein müssen, ist durchaus keine physikalische Tatsache. Bei den Untersuchungen des Isolieröls Shell Diala GX ist zu sehen, dass sich die Vorzeichen genau entgegengesetzt einstellen.

Die Vorzeichenumkehr zwischen Auflade- und Entladestrom kann jedoch physikalisch erklärt werden. Der Antrieb der Trägerscheibe dient zur Simulation einer Konvektion, welche in einem realen Leistungstransformator durch die Zwangsumlaufkühlung des Isolieröls hervorgerufen wird. Durch diese Dynamik findet eine Reibung zwischen den Isoliermedien statt und zieht eine elektrostatische Aufladung nach sich. Durch die Reibung werden die Ladungen an der Grenzschicht (fest-flüssig) getrennt und über die Strömung, welche durch die Rotation der Trägerscheibe entsteht abtransportiert. Wenn demnach die Ursache (Antriebsmotor) der Strömungsbildung und somit auch die der Ladungstrennung vom System genommen wird, ist eine Vorzeichenumkehr nachvollziehbar.

Transientes Verhalten des Leckstromes

Das Transiente Verhalten der elektrostatischen Aufladung beim Ein- und Ausschalten ist auf eine hohe Relativbewegung zwischen den Isoliermedien zurückzuführen. Jede Änderung der Drehzahl, Ein- oder Ausschalten sowie Beschleunigung oder Bremsen bewirkt eine Störung der stationären Strömungsverhältnisse und kann aus einer visualisierten Messkurve ersehen werden.

Da beim Ein- und Ausschalten die Relativgeschwindigkeit¹⁹ am größten ist, ist auch ein Spitzenwert des Leckstromes zu diesen Zeitpunkten nicht überraschend. Bei der Wiederholung von Versuchen unter gleichen Bedingungen, hat sich gezeigt, dass das der Spitzenwert unterschiedliche Werte annehmen kann. Die Erklärung liegt in der begrenzten Abtastrate des Elektrometers, wodurch die Extremwerte nicht sicher bestimmt werden können.

Einschaltverhalten

Die höchste Relativgeschwindigkeit zwischen Trägerscheibe und Isolieröl tritt beim Einschalten des Antriebsmotors auf. Allmählich wird auch die ruhende Isolierflüssigkeit in Rotation versetzt und es entsteht ein stationäres Strömungsbild. Während der Antriebsmotor und damit auch die Trägerscheibe in wenigen Sekunden die vorgegebene Drehzahl erreicht haben, benötigt das Isolieröl einige Minuten um einen stationären Zustand zu erlangen.

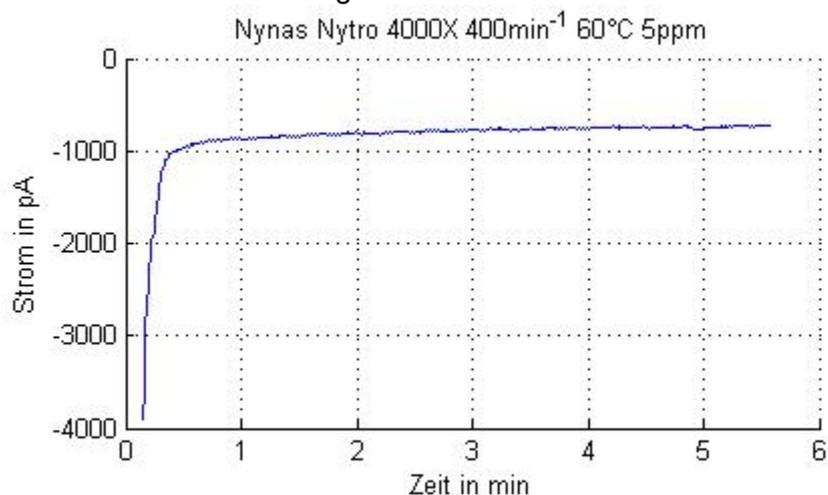


ABBILDUNG 5-3: VERLAUF DES STROMES WÄHREND DEM EINSCHALTVORGANG (GEFILTERT)

Wie aus vorangegangenem Diagramm zu sehen ist, hat das Strömungsbild bereits nach einer halben Minute einen nahezu stationären Zustand erreicht. Danach erfolgt nur mehr eine geringe Änderung.

Ausschaltverhalten

Der Antriebsmotor wurde ausgeschaltet, nachdem die transienten Vorgänge des Einschaltens abgeklungen waren und sich ein stationäres Verhalten eingestellt hatte. Zum Zeitpunkt des Ausschaltens tritt erneut eine hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Trägerscheibe und Isolieröl auf. Während der Motor mit Trägerscheibe innerhalb von Sekunden zum Stillstand kommt, rotiert das Isolieröl aufgrund der

¹⁹ Geschwindigkeitsunterschied zwischen ruhendem Isolieröl und rotierender Trägerscheibe

Trägheit noch kurze Zeit weiter. Die Relativgeschwindigkeit nimmt nach und nach ab, bis sich auch die Isolierflüssigkeit in Ruhe befindet und somit auch beim Ausschaltvorgang annähernd stationäres Verhalten erreicht wird. Wie bereits erwähnt, besitzt der Entladestrom eine andere Polarität als der Aufladestrom. Begründet wird dies durch die im System gespeicherten Ladungsträger die sich nach dem Ausschalten über das Elektrometer entladen.

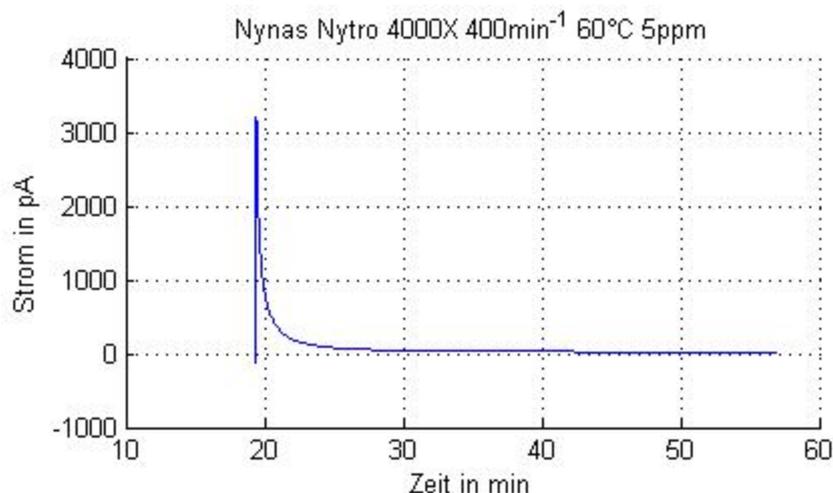


ABBILDUNG 5-4: VERLAUF DES STROMES WÄHREND DEM AUSSCHALTVORGANG (GEFILTERT)

Bei der Auswertung des Ausschaltvorganges ist prinzipiell keine softwaremäßige Filterung notwendig, was darauf schließen lässt, dass die Welligkeit des Aufladestromes durch die Rotation der Probe entsteht und durch die Apparatur selbst hervorgerufen wird.

5.2. Ermittlung des Einflusses der Testzelle auf das Messergebnis

Aufgrund der kleinen Ströme, welche zu erwarten waren musste die Testzelle auf ihre Funktionstauglichkeit überprüft werden. Es musste ermittelt werden, welchen Einfluss der Prüfaufbau selbst auf das Messergebnis ausübt.

Test mit Aluminiumscheibe

Eine Voraussetzung für weitere Messungen mit dieser Konstruktion war, dass die Aufladungsneigung zwischen Aluminium und Isolieröl um einiges geringer sein muss als zwischen festen und flüssigen Isolierstoff. Zweckdienlich wurden somit mehrere Messungen nur mit einer Aluminiumträgerscheibe und ohne Pressboard durchgeführt. Aus folgender Abbildung ist ersichtlich, dass nach dem Einschaltvorgang die elektrostatische Aufladung um die Nulllinie schwingt.

Mit diesem Ergebnis ist bewiesen, dass die Aufladung durch den Prüfaufbau minimal ist und einen zu vernachlässigenden Einfluss auf weitere Messergebnisse mit Isolierstoffpaarungen hat.

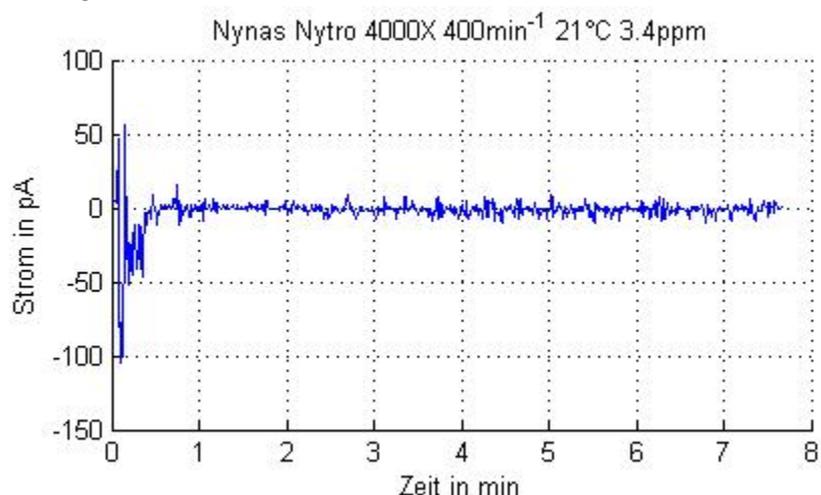


ABBILDUNG 5-5: AUFLADUNGSMESSUNG MITTELS ALUMINIUMTRÄGERSCHEIBE OHNE PRESSBOARD

Reproduzierbarkeits-Test

Ein weiteres und äußerst wichtiges Kriterium ist die Reproduzierbarkeit der Messungen um ein aussagekräftiges und glaubwürdiges Ergebnis zu erhalten. Hierfür wurden mehrere Messungen unter den gleichen Bedingungen aber zu verschiedenen Zeitpunkten wiederholt. Beispielhaft ist dies in untenstehender Abbildung bei einer Drehzahl von 400 min⁻¹ bei 60°C für das Isolieröl Nynas Nytro 4000X dargestellt.

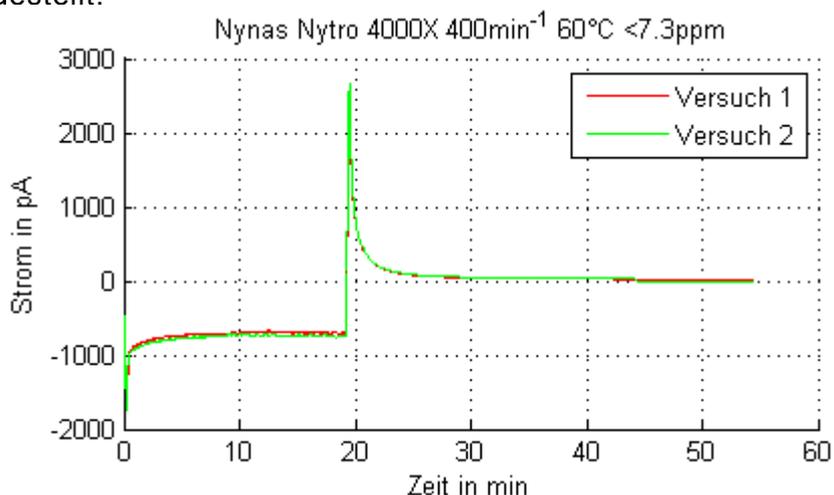


ABBILDUNG 5-6: VERGLEICHSMESSUNG ZUR FESTSTELLUNG DER REPRODUZIERBARKEIT MIT DEM ISOLIERÖL NYNAS NYTRO 4000X BEI 60°C UND 400 MIN⁻¹ GEMESSEN

In der vorangegangenen Abbildung ist die Reproduzierbarkeitsnachweis der Testzelle zu sehen. Prinzipiell ist die Reproduzierbarkeit der stationären Werte gegeben. Die fehlende Deckungsgleichheit der Spitzenwerte wird der mangelhaften Abtastrate des Elektrometers zugeschrieben.

Peak-Problematik

Unter dem Begriff der Peak-Problematik ist das Problem der Extremwerverfassung zu verstehen. Wie aus *Abbildung 5-7* ersichtlich ist, kann der Spitzenwert eine große Schwankungsbreite bei zwei aufeinanderfolgenden Messungen unter den gleichen Bedingungen aufweisen.

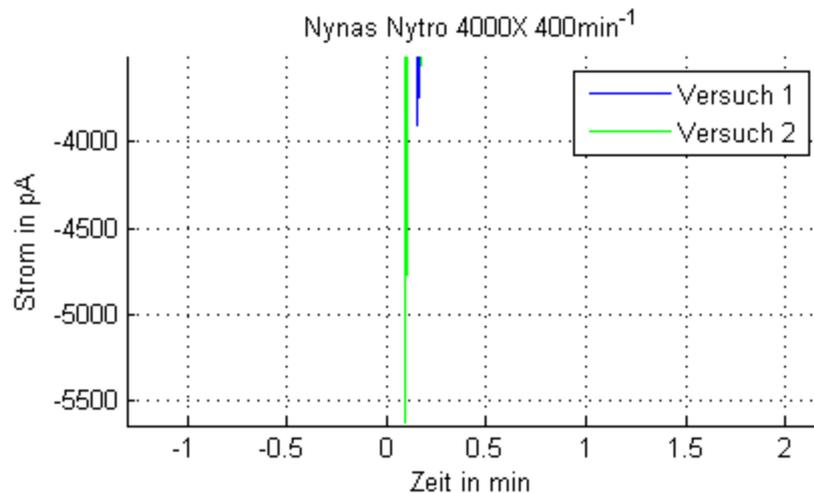


ABBILDUNG 5-7: PROBLEME BEI DER ERFASSUNG DER EINSCHALTSTROMSPITZE

Dieses Problem kann bei diesem Messaufbau durch mehrere Ursachen hervorgerufen werden:

- Messgerät

Das Keithley 617 ist in der Lage, dreimal pro Sekunde einen Messwert zu erfassen. Damit ein Spitzenwert zweifelsohne identifiziert werden kann, müsste das Elektrometer eine höhere Abtastrate besitzen.

- Zeit und Aufbereitung zwischen den Versuchen

Es ist durchaus möglich, dass sich zwischen den einzelnen Versuchen die Bedingungen geringfügig ändern, was auch zur Extremwertschwankung beitragen kann. So kann eine Füllstandsänderung, eine Erhöhung der Feuchte und der gleichen bereits das Messergebnis sensibel beeinflussen.

- mechanische Aufbau

Durch ungenaues Arbeiten kann sehr leicht eine nicht plane Montage der Trägerscheibe erfolgen. Dies würde eine Veränderung der Strömungsbedingungen nach sich ziehen und somit ins Messergebnis eingehen.

5.3. Einflüsse auf die elektrostatische Aufladung

5.3.1. Einfluss der Probenmontage

Wie bereits im *Kapitel 4.5.2* erwähnt wurde, konnte im Messergebnis kein merklicher Einfluss der Art der Probenmontage festgestellt werden, egal ob die Pressboardproben geschraubt oder geklebt wurden. Die Unterschiede bei den Extremwerten werden auf die nicht ausreichende Abtastrate des Elektrometers zurückgeführt. Beim Aufladevorgang kann praktisch kein Unterschied ermittelt werden, während beim Entladevorgang die Kurve der geschraubten Probe unter der geklebten liegt. Dies weist vermutlich auf veränderte Strömungsverhältnisse aufgrund der Schrauben hin. Ein möglicher Grund, warum die Differenz beim Aufladevorgang nicht in Erscheinung tritt, könnte der gut dimensionierte Antriebsmotor sein, der den höheren Strömungswiderstand, der durch die Verschraubung entsteht, kompensiert.

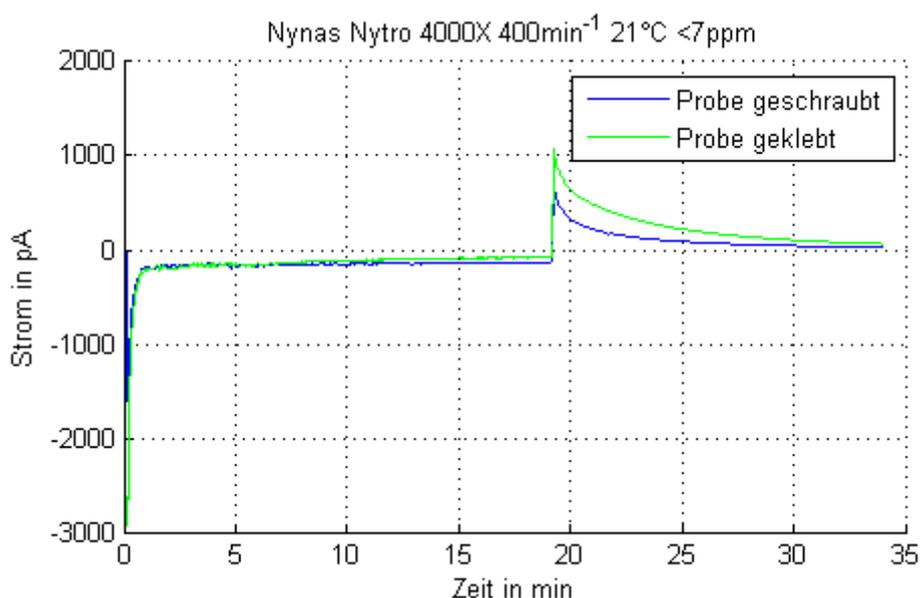


ABBILDUNG 5-8: GESCHRAUBTE PROBE VS. GEKLEBTE PROBE; ISOLIERÖL NYNAS NYTRO 4000X, GEMESSEN BEI 21°C UND 400 MIN⁻¹

5.3.2. Einfluss der Drehzahl

Ein Abtransport der Überschussladungen aus der Grenzschicht zwischen festem und flüssigem Isoliermaterial wird durch die Relativgeschwindigkeit hervorgerufen (*siehe Kapitel 2.3*). Obwohl im Gefäß vorwiegend turbulente Strömungsverhältnisse herrschen, befindet sich in der Nähe der Gefäßwand und der Oberfläche des Probenträgers eine laminare Unterschicht. Die Dicke dieser laminaren Unterschicht ist meist sehr gering und kann messtechnisch nur schwer oder gar nicht erfasst werden. Jedoch ist genau diese laminare Unterschicht beziehungsweise deren Dicke dafür verantwortlich, wie viele Überschussladungen abtransportiert werden.

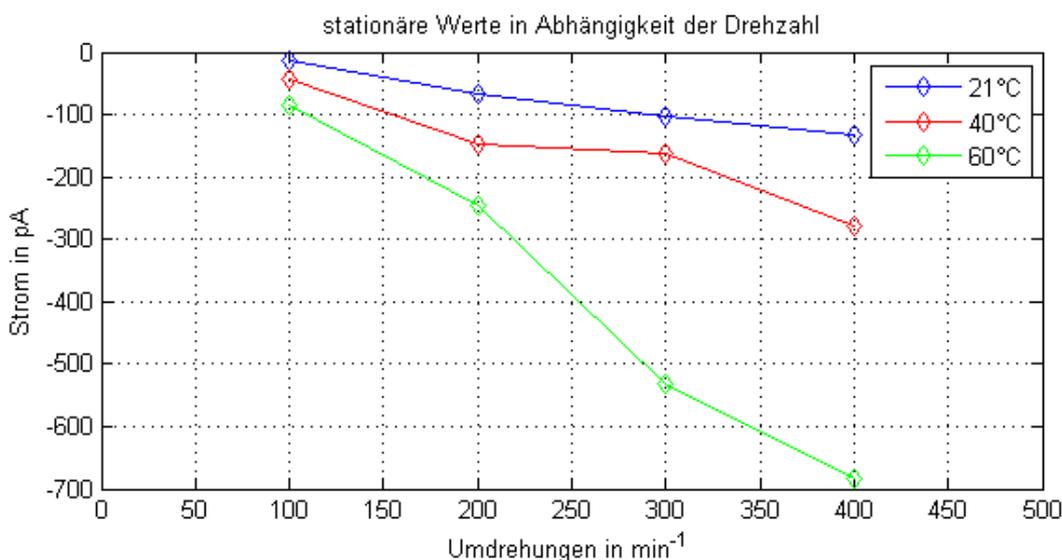


ABBILDUNG 5-9: ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNGSNEIGUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER DREHZAHL UND VARIIRTER TEMPERATUR FÜR DAS ISOLIERÖL NYNAS NYTRO 4000X

Das Verhältnis der Debye-Länge zur laminaren Unterschicht bestimmt die Anzahl der Überschussladungen, die von der turbulenten Strömung erfasst und abtransportiert werden. Ist das Verhältnis deutlich kleiner als eins, so befinden sich die Überschussladungen vorwiegend in der laminaren Unterschicht und können von der turbulenten Strömung nicht erfasst werden.

Aus obiger Abbildung ist ersichtlich, dass die Aufladungsneigung mit steigender Drehzahl zunimmt. Anhand dieser Darstellung kann sehr leicht nachvollzogen werden, welchen Einfluss eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Isolieröls im realen zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformator hat.

Aufgrund der Bedeutung der Drehzahl wurde diese laufend überwacht und protokolliert. Wie aus *Abbildung 5-10* ersichtlich ist, ergeben sich für die elektrostatiscbe Aufladung zu vernachlässigende Schwankungen der Drehzahl.

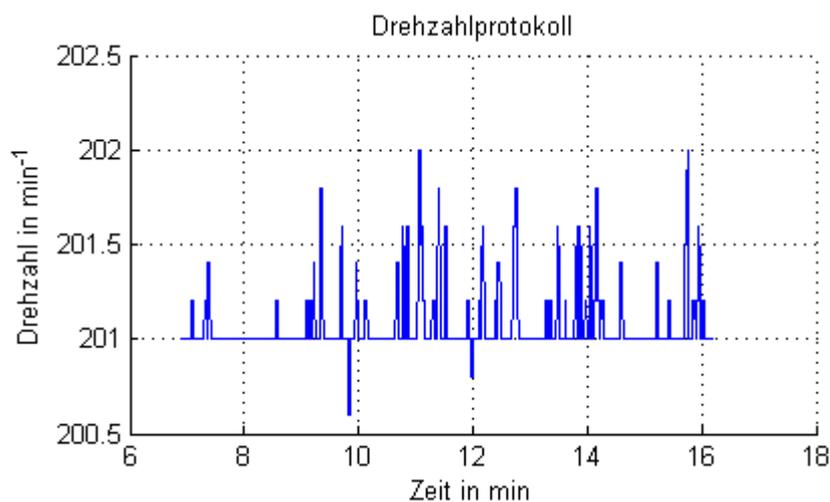


ABBILDUNG 5-10: DREHZAHLPROTOKOLL BEI 200 MIN⁻¹

5.3.3. Einfluss der Temperatur

An der Grenzfläche zwischen Feststoff und Flüssigkeit kommt es aufgrund der unterschiedlichen Fermi-Niveaus zu einem Elektronenaustausch. Da diese Fermi-Niveaus temperaturabhängig sind, ist auch die Bildung der Überschussladungen an dieser Grenzschicht mit einer Temperaturabhängigkeit behaftet. Mit steigender Temperatur nimmt die Viskosität des Isolieröls ab und somit erhöht sich die Ionenbeweglichkeit. Des Weiteren vermindert sich die Dicke der laminaren Unterschicht mit steigender Temperatur. Als Resultat der Erhöhung der Ionenbeweglichkeit nimmt auch die Debye-Länge zu, übersteigt die Länge der laminaren Unterschicht und ragt somit in den turbulenten Strömungsbereich der Isolierflüssigkeit. Unter der Bedingung, dass das Verhältnis der Debye-Länge zur Dicke der laminaren Unterschicht annähernd gleich groß oder größer als eins ist, erfolgt durch die turbulente Strömung ein Abtransport der Überschussladungen aus der Grenzschicht.

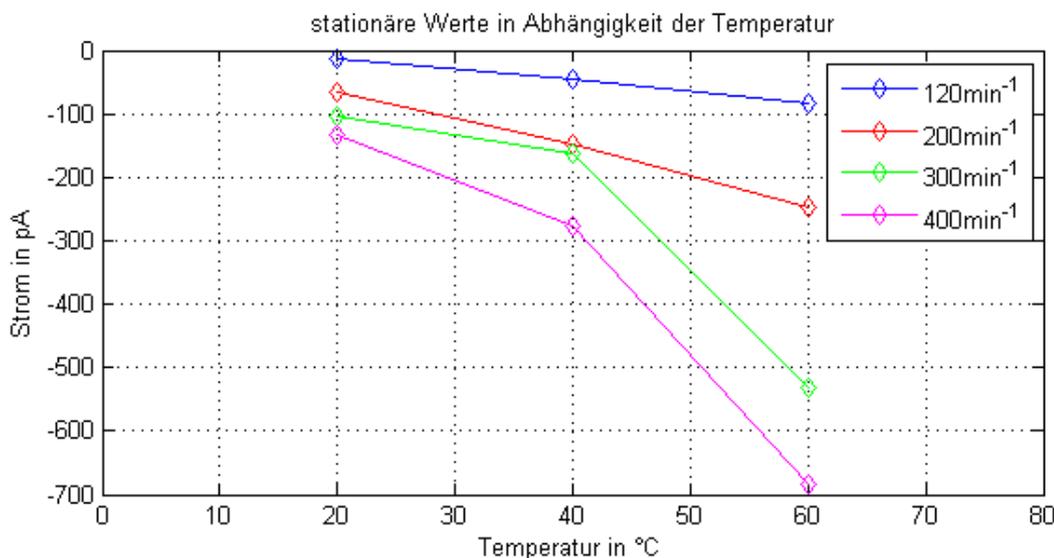


ABBILDUNG 5-11: ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNGSNEIGUNG IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR UND VARIIRTER DREHZAHL FÜR DAS ISOLIERÖL NYNAS NYTRO 4000X

Aus vorangehendem Diagramm ist ersichtlich, dass vor allem bei höherer Umdrehungszahl die elektrostatische Aufladung nicht mehr linear mit der Temperatur zunimmt. Die gewöhnlichen Betriebstemperaturen von Leistungstransformatoren werden mit durchschnittlich 90°C beziffert. Auch an strategisch wichtigen Netzknoten, wo ein Ausfall des Transformators besonders schwerwiegende Folgen hätte, werden diese im Regelfall bis an die Grenzen der thermischen Belastbarkeit getrieben. In Anbetracht der realen Betriebsbedingungen ist es durchaus nachvollziehbar, dass eine Beurteilung der elektrostatischen Aufladung bei Raumtemperatur keinen Sinn machen würde.

5.3.4. Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Probe

Das Isolationssystem von (zwangsumlaufgekühlten) Leistungstransformatoren besteht aus flüssigem Isolieröl und Zellulose. Mit Transformerboard (fester Isolierstoff) werden die vom Isolieröl durchströmten Kühlkanäle gebildet. Somit ist es nicht weiter verwunderlich, dass auch die Oberfläche des festen Isolierstoffs einen Einfluss auf die elektrostatische Aufladung besitzt.

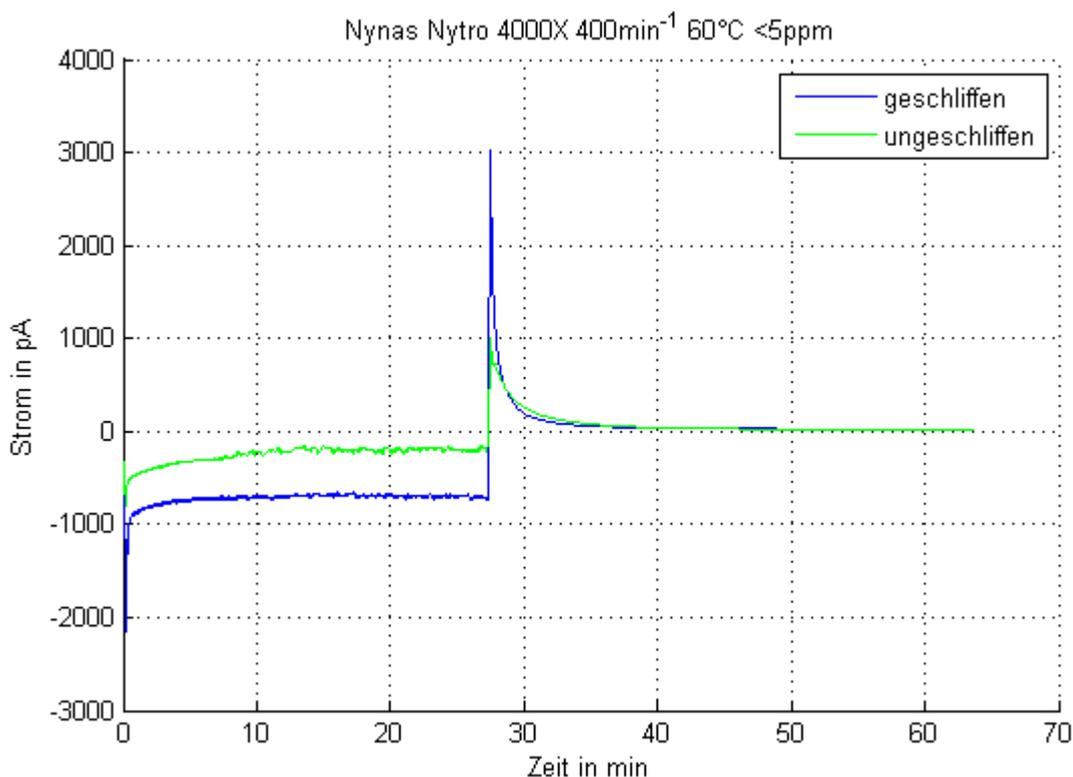


ABBILDUNG 5-12: EINFLUSS DER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT AUF DIE ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNG; ISOLIERÖL NYNAS NYTRO 4000X GEMESSEN BEI 60°C UND 400 MIN⁻¹

Das Kühlsystem in einem realen Transformator ist als Kreislauf ausgeführt. Die Wirkung der Geometrie des Kühlkreislaufs auf die elektrostatische Aufladung kann mittels Spinning Disc Prüfzelle, welche den Methoden *screening of material* zugeschrieben wird, nicht erfasst werden.

Bei den Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit auf die elektrostatische Aufladungsneigung, wurde mit steigender Rauigkeit ein höherer Leckstrom erwartet. In *Abbildung 5-12* ist ein gegenläufiges Verhalten zu sehen. Da bis auf die Oberflächenrauigkeit der Boardprobe die Versuchsbedingungen gleichgeblieben sind, lässt dies eine Änderung der Strömungsverhältnisse im Bereich der Grenzschicht vermuten.

Um genauere Aussagen machen zu können, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

5.3.5. Einfluss der gealterten Pressboardproben

Die elektrischen Eigenschaften des Öl/Zellulose Isolationssystems werden in erster Linie durch den Wasseranteil in diesem Mischdielektrikum verschlechtert. Die wichtigste Funktion der Isolierung ist die elektrische Festigkeit, welche durch einen erhöhten Feuchtigkeitsgehalt vermindert wird. Die Feuchtigkeit kann einerseits von außen in Form von Luftfeuchtigkeit eindringen und andererseits entsteht diese als Hauptprodukt bei der Alterung von Öl und Papier.

Der Sättigungsfeuchtegehalt von Öl und Papier ist temperaturabhängig und ändert sich mit der Belastung des Transformators. Während die Wasseraufnahmefähigkeit von Zellulose mit steigender Temperatur abnimmt, nimmt diese beim Isolieröl zu.

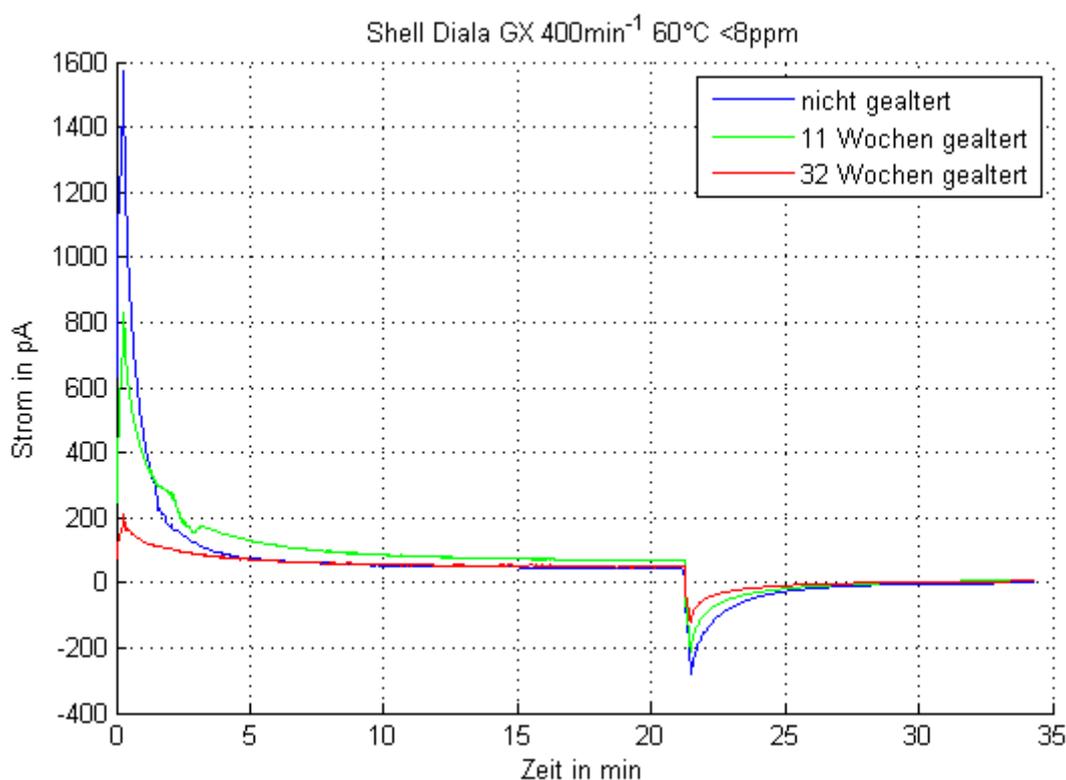


ABBILDUNG 5-13: EINFLUSS DER GEALTERTEN PRESSBOARDPROBEN; ISOLIERÖL SHELL DIALA GX, GEMESSEN BEI 60°C UND 400 MIN⁻¹

Es ist aus *Abbildung 5-13* der Einfluss der Alterung ersichtlich. Um dies darzustellen wurden Pressboardproben welche 11 Wochen und 32 Wochen künstlich gealtert wurden mit einer neuwertigen Probe verglichen. Das Resultat ist, dass die elektrostatische Aufladungsneigung mit dem Alter der Zellulose abnimmt.

Physikalisch kann das damit begründet werden, dass elektrostatische Aufladung bei hochisolierenden Materialien in Erscheinung tritt. Je älter die Boardproben sind, umso mehr Feuchtigkeit besitzen diese. Mit steigender Feuchtigkeit nimmt die elektrische Leitfähigkeit zu und somit die elektrostatische Aufladungsneigung ab.

5.4. Einfluss des Isolieröls

Nachdem die Funktionstauglichkeit der Prüfwelle festgestellt wurde, konnte die elektrostatische Aufladungsneigung an drei praxiserprobten Isolierölen

- Nynas Nytro 4000X [19]
- Nynas Nytro 10XN [20]
- Shell Diala GX [21]

gemessen werden.

In diesem Kapitel werden vorwiegend Diagramme abgebildet, welche entweder maximale Temperatur oder maximale Drehzahl beinhalten. Bei geringerer Umdrehungszahl und niedrigeren Temperaturen ist der Effekt auch vorhanden, jedoch nicht so gut sichtbar ausgebildet.

5.4.1. Nynas Nytro 4000X

Darstellung der elektrostatischen Aufladung bei 60°C

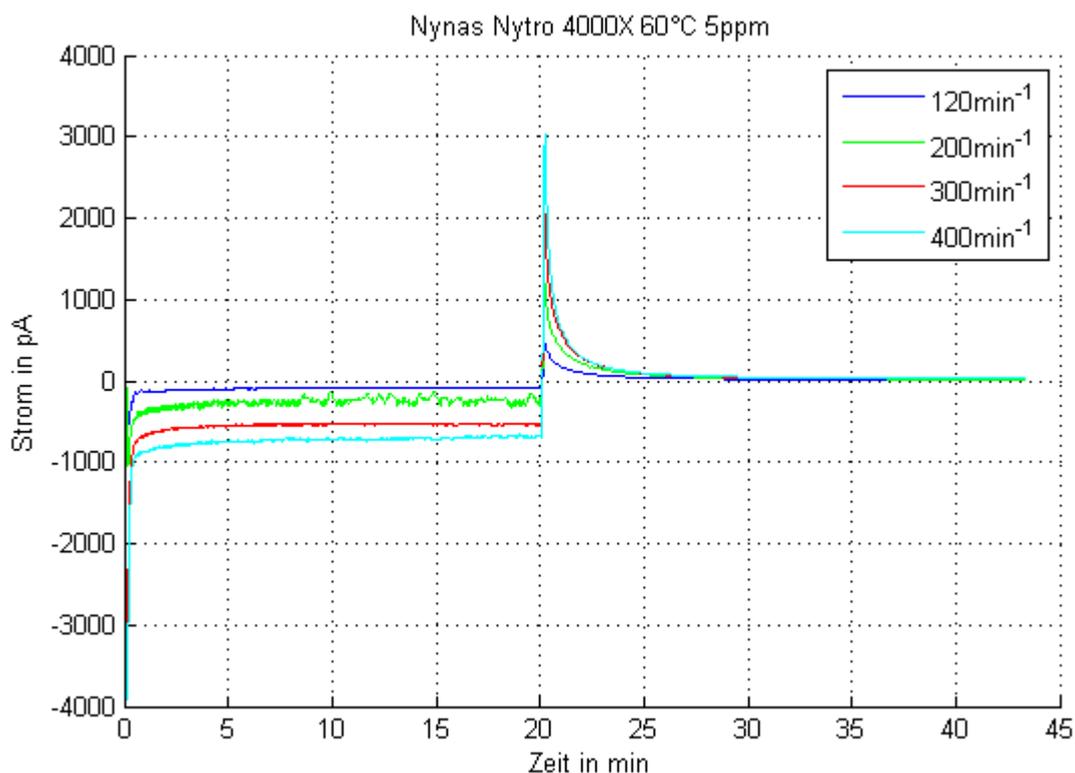


ABBILDUNG 5-14: ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNG NYNAS NYTRO 4000X IN pA GEMESSEN BEI 60°C UND VARIERTER DREHZAHL

Das Isolieröl Nynas Nytro 4000X ist durch einen negativen Aufladestrom und durch einen positiven Entladestrom gekennzeichnet.

Spitzenwert des Einschaltstromes

Zur besseren Darstellung werden die Messwerte der 'Spitzenwert-Diagramme' und der 'stationären-Diagramme' auf der Ordinate im logarithmischen Maßstab aufgetragen.

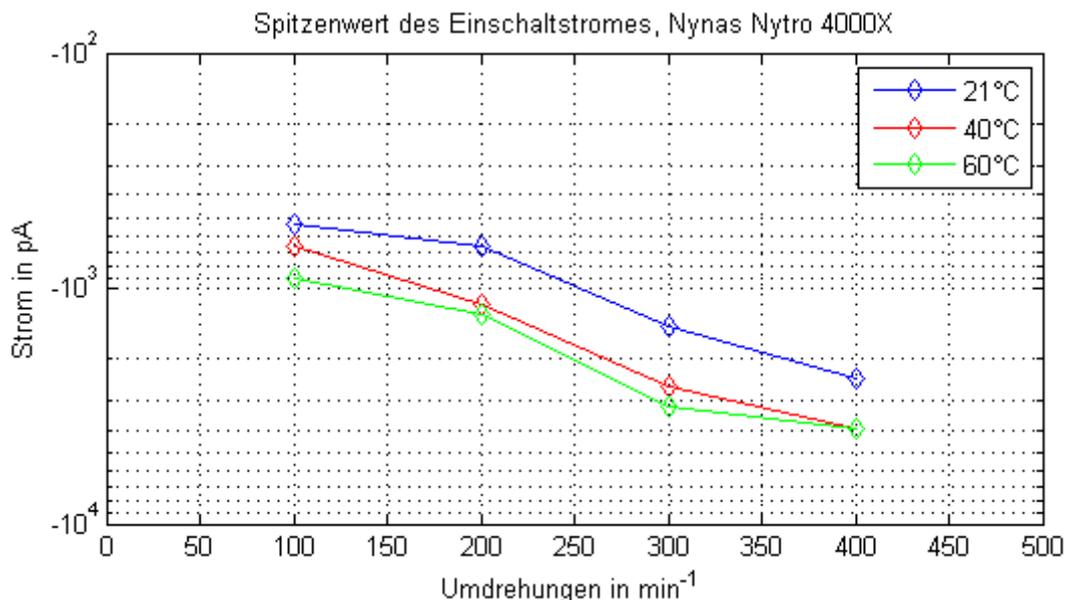


ABBILDUNG 5-15: SPITZENWERT DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 4000X GEMESSEN BEI VARIIRTER DREHZAHL UND DEN TEMPERATUREN 21,40 UND 60°C

Trotz der im *Kapitel 5.2* beschriebenen Peak-Problematik ist eine eindeutige Tendenz im Verlauf der elektrostatischen Aufladung zu erkennen. Die Visualisierung zeigt, dass bei höheren Temperaturen und bei höheren Drehzahlen mit einer stärkeren Aufladung zu rechnen ist.

Der Spitzenwert bei 60°C mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 400 min⁻¹ (rot markiert) deutet auf einen Fall von Peak-Problematik hin. Dieser ist entgegen der Tendenz kleiner als der Spitzenwert bei 40°C und ebenfalls 400 min⁻¹.

Nynas Nytro 4000X		Temperatur		
		21°C	40°C	60°C
Drehzahl	120 min ⁻¹	-538,6	-663,9	-899,8
	200 min ⁻¹	-662	-1166	-1291
	300 min ⁻¹	-1465	-2604	-3160
	400 min ⁻¹	-2409	-3924	-3905

TABELLE 3: SPITZENWERT DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 4000X IN pA BEI VARIIRTER DREHZAHL UND TEMPERATUR

Stationärer Wert des Aufladestromes

Bei den Untersuchungen der stationären Werte des Aufladestromes kann der Einfluss der Temperatur und der Drehzahl eindeutig erkannt werden. Gegenüber der Spitzenwertdarstellung kann hier auf die Berücksichtigung der Peak-Problematik verzichtet werden.

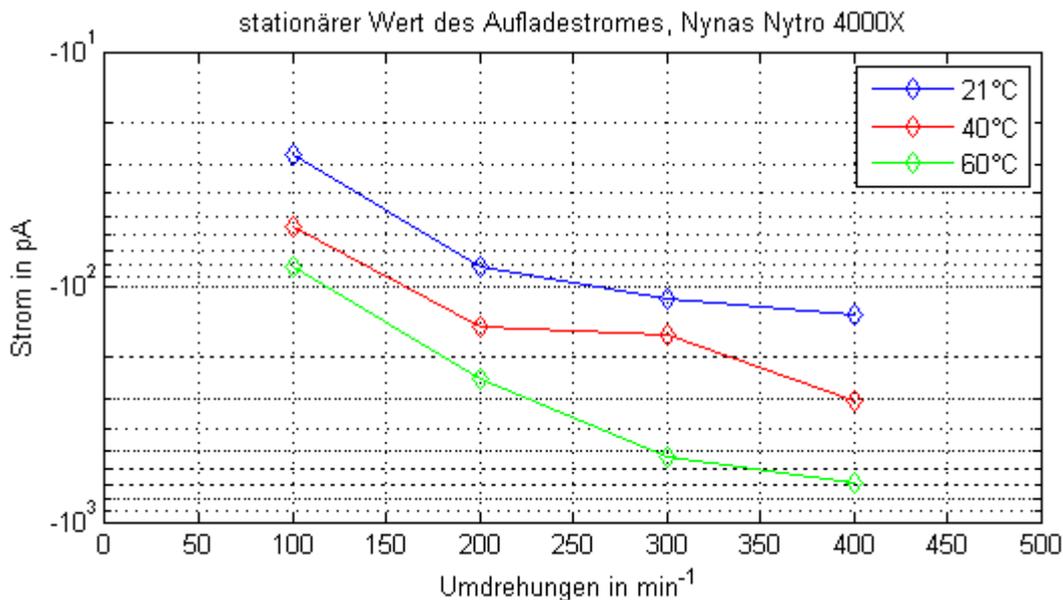


ABBILDUNG 5-16: STATIONÄRER WERT DES AUFLADESTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 4000X IN PA BEI VARIIRTER DREHZAHL UND DEN TEMPERATUREN 21,40 UND 60°C

Die Ermittlung der stationären Werte erfolgt über eine Mittlung der letzten n=300 Werte, bevor der Motor ausgeschaltet wird und sich in weiterer Folge die Polarität des Stromes umkehrt.

Nynas Nytro 4000X		Temperatur		
		21°C	40°C	60°C
Drehzahl	120 min ⁻¹	-27,7	-55,4	-83
	200 min ⁻¹	-81,5	-148,6	-245,9
	300 min ⁻¹	-113,2	-161	-530,3
	400 min ⁻¹	-132,7	-306,6	-680,2

TABELLE 4: STATIONÄRE WERTE DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 4000X IN PA BEI VARIIRTER DREHZAHL UND TEMPERATUR

5.4.2. Nynas Nytro 10XN

Darstellung der elektrostatischen Aufladung bei 60°C

Bei den elektrostatischen Untersuchungen des Isolieröls Nynas Nytro 10XN wurde eine relativ geringe Aufladungsneigung festgestellt. In nachstehender Abbildung sind die Messkurven bei 60°C und Verschiedenen Drehzahlen zu sehen. Obwohl der Wert des Leckstromes mit steigender Drehzahl zunimmt ist dieser im Vergleich zum Isolieröl Nynas Nytro 4000X sehr gering.

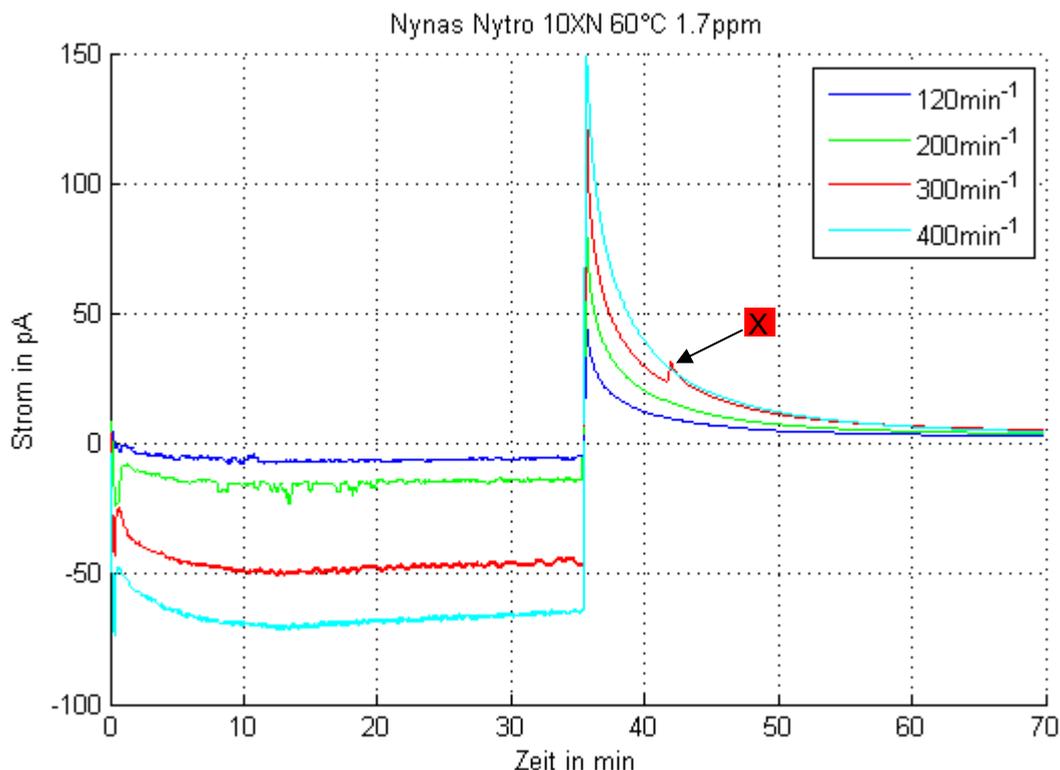


ABBILDUNG 5-17: ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNG DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 10XN IN pA GEMESSEN BEI 60°C MIT VARIERTER DREHZAHL

Auffällig ist auch, dass beim Einschalten der Spitzenwert den stationären Wert nur kaum bis gar nicht übersteigt. Eine Begründung der geringen elektrostatischen Aufladung wird in der chemischen Struktur des Isolieröls vermutet.

In der Messkurve der Drehzahl 300 min⁻¹ ist ein physikalisch nicht erklärbarer Kurvenverlauf zu sehen (rotes X). Diese Unförmigkeit wird einem Messfehler zugeschrieben, welcher durch den Prüfaufbau entstanden ist. Die Bereichsumschaltung des Keithley 617 bei 20 pA kann in diesem Fall als Fehlerursache ausgeschlossen werden, da die Unförmigkeit über diesem Bereich liegt.

Bemerkenswert ist, dass das Nynas Nytro 4000X Isolieröl und das Nynas Nytro 10XN trotz Unterschiede in der Höhe der Werte den gleichen Polaritätsverlauf aufweisen.

Spitzenwert des Einschaltstromes

Aufgrund des niedrigen Spitzenwertes und der daraus folgenden geringen elektrostatischen Aufladung wurde das Isolieröl Nynas Nytro 10XN nur bei 60°C geprüft.

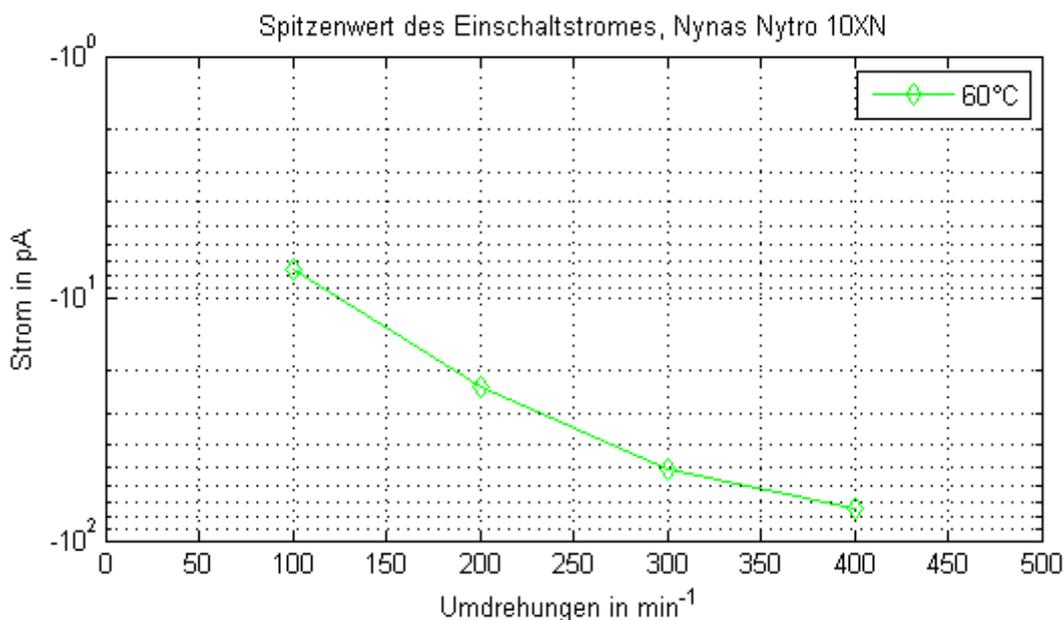


ABBILDUNG 5-18: SPITZENWERT DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 10XN IN pA GEMESSEN BEI EINER TEMPERATUR VON 60°C UND VARIIRTER DREHZAHL

Bei der Darstellung der Spitzenwerte des Einschaltstromes ist trotz niedriger elektrostatischer Aufladung ein deutlicher Verlauf zu erkennen. Der Wert des Stromes steigt wie erwartet auch hier mit zunehmender Drehzahl an.

Nynas Nytro 10XN		Temperatur
		60°C
Drehzahl	120 min ⁻¹	-11,5
	200 min ⁻¹	-68,4
	300 min ⁻¹	-79,8
	400 min ⁻¹	-146,6

TABELLE 5: SPITZENWERT DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 10XN IN pA GEMESSEN BEI EINER TEMPERATUR VON 60°C UND VARIIRTER DREHZAHL

Stationärer Wert des Aufladestromes

Der stationäre Wert des Aufladestromes wurde wie der Spitzenwert nur bei 60°C für das Isolieröl 10XN dargestellt. Mit steigender Umdrehungszahl pendelt sich auch der Aufladestrom bei höheren Werten ein. Trotz geringen stationären Wertes ist auch in diesem Fall eine klare Tendenz zu erkennen.

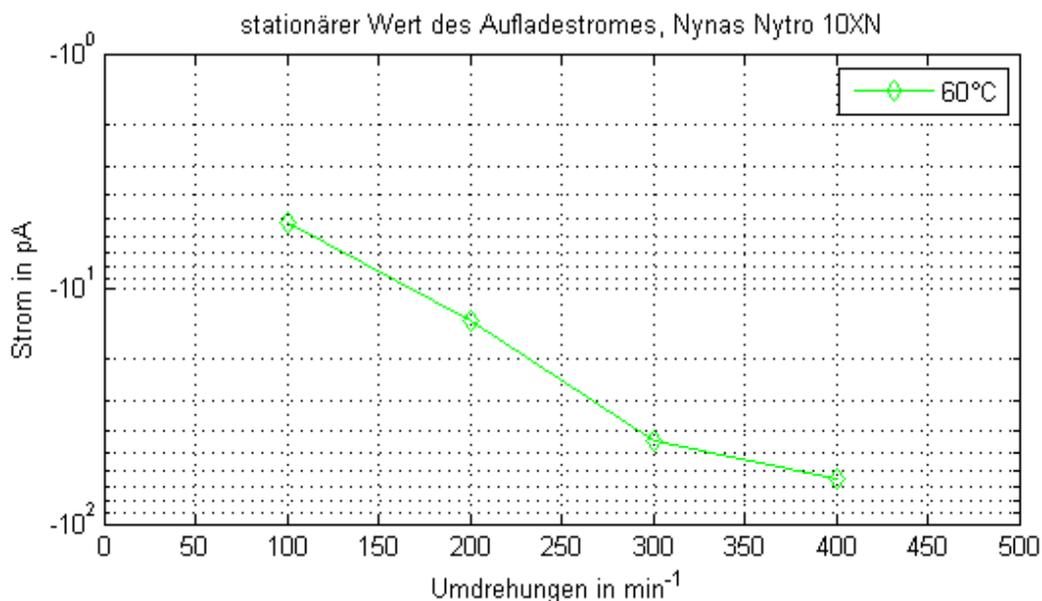


ABBILDUNG 5-19: STATIONÄRER WERT DES AUFLADESTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 10XN IN pA GEMESSEN BEI EINER TEMPERATUR VON 60°C UND VARIIRTER DREHZAHL

In nachstehender Tabelle sind die numerischen Daten der stationären Werte bei einer Temperatur von 60°C und variabler Drehzahl in Pikoampere (pA) ersichtlich.

Nynas Nytro 10XN		Temperatur
		60°C
Drehzahl	120 min ⁻¹	-5,28
	200 min ⁻¹	-13,6
	300 min ⁻¹	-44,67
	400 min ⁻¹	-64,06

TABELLE 6: STATIONÄRE WERTE DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 10XN IN pA GEMESSEN BEI EINER TEMPERATUR VON 60°C UND VARIIRTER DREHZAHL

Vergleich der Spitzenwerte mit den stationären Werten

In der folgenden Diagramm sind die Spitzenwerte und die stationären Werte des Einschaltstromes dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Spitzenwerte des Leckstromes bei den einzelnen Drehzahlen doch immer deutlich über jenen der stationären liegen.

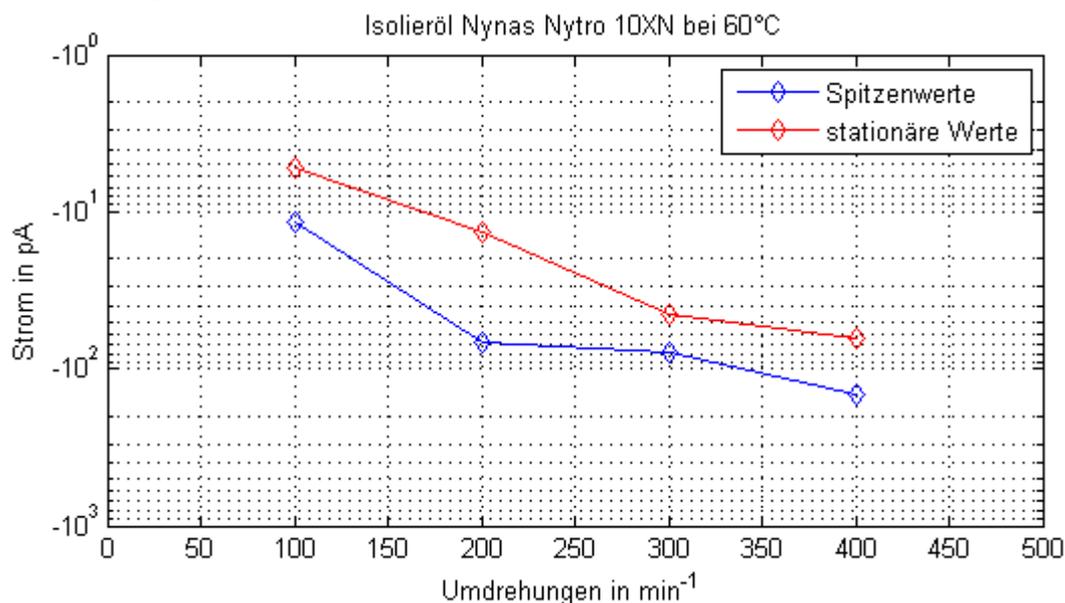


ABBILDUNG 5-20: GEGENÜBERSTELLUNG DER SPITZENWERTE UND DER STATIONÄREN WERTE DES ISOLIERÖLS NYNAS NYTRO 10XN BEI 60°C UND VARIERTER DREHZAHL

Aus der *Abbildungen 5-14* (Nynas Nytro 4000X) und *Abbildung 5-21* (Shell Diala GX) ist ersichtlich, dass die Spitzenwerte deutlich höher liegen als die stationären Leckstromwerte sind.

Wie aus den Messungen ersichtlich ist, weist das Nynas Nytro 10XN geringe Stromwerte im stationären Zustand auf. Ferner besitzt dieses auch beim Einschalten einen Spitzenwert, der weit unter denen der anderen Isolieröle (Nynas Nytro 4000X und Shell Diala GX) liegt. Dies lässt vermuten, dass das Isolieröl Nynas Nytro 10XN aufgrund seiner chemischen Struktur generell eine geringe Aufladungsfreudigkeit besitzt.

5.4.3. Shell Diala GX

Darstellung der elektrostatischen Aufladung bei 60°C

Bei erster Betrachtung fällt auf, dass sich die Polarität gegenüber den zuvor beschriebenen Isolierölen invertiert verhält. Der Aufladestrom ist in diesem Fall mit positiven und der Entladestrom mit negativen Vorzeichen versehen. Wie bereits *Kapitel 5.4.1* erwähnt wurde, kann nicht im Vorhinein vorausgesehen werden, welchen Polaritätsverlauf das zu untersuchende Öl haben wird.

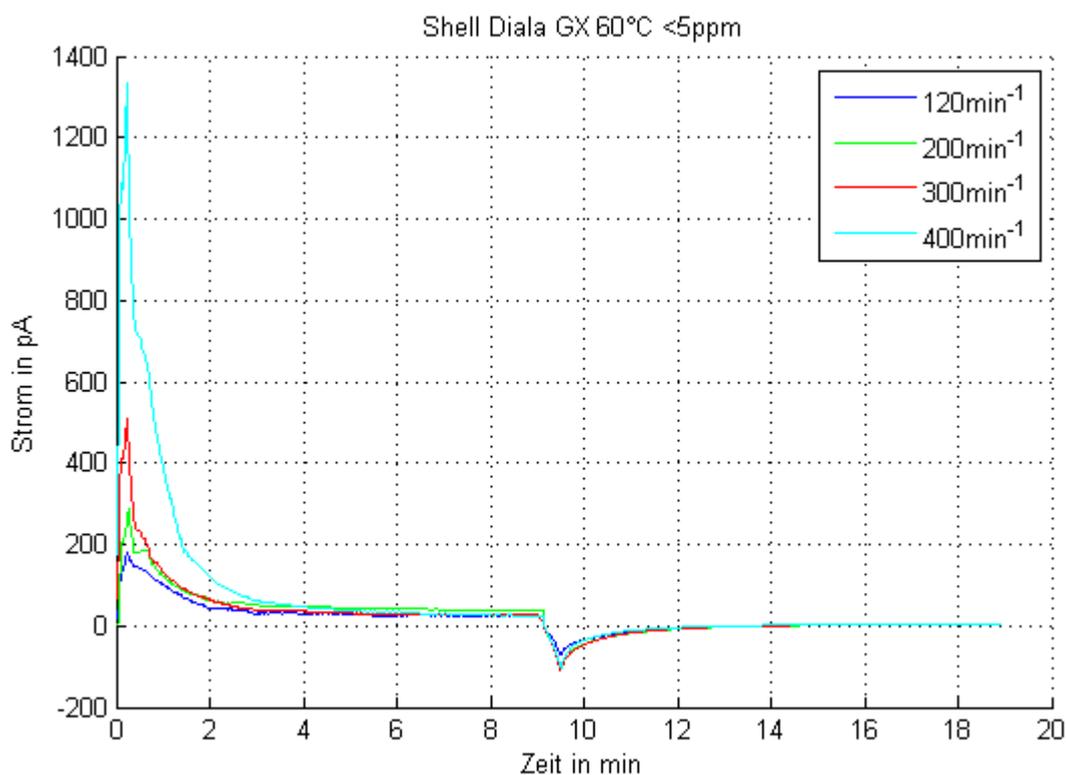


ABBILDUNG 5-21: ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNG DES ISOLIERÖLS SHELL DIALA GX IN pA GEMESSEN BEI 60°C UND VARIERTER DREHZAHL

Bemerkenswert ist, dass, trotz extremer Unterschiede in der Höhe der Einschaltstromspitze, alle Messkurven, unabhängig von der Drehzahl, in etwa den gleichen eingeschwungenen Wert erreichen.

Spitzenwert des Einschaltstromes

In nachstehender Abbildung sind die Spitzenwerte des Isolieröls Shell Diala GX zu sehen. Die positive Steigung der Messkurven ergibt sich aufgrund der Polarität des Einschaltstromes. Mit steigender Temperatur und steigender Drehzahl nimmt beim Shell Diala GX die elektrostatische Aufladung zu. Der Polaritätswechsel hat keinen Einfluss auf die Peak-Problematik.

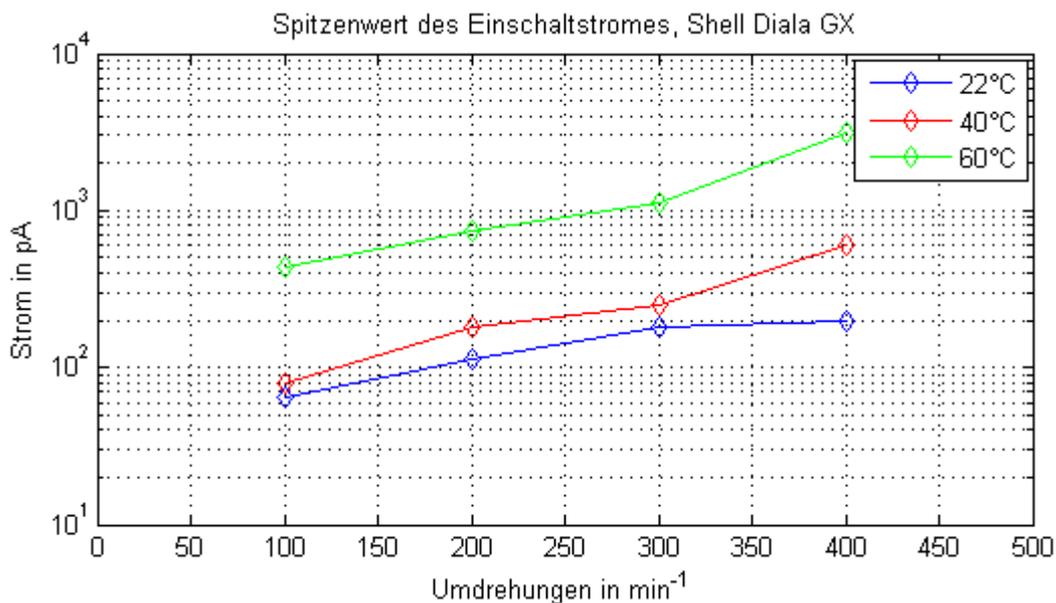


ABBILDUNG 5-22: SPITZENWERT DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS SHELL DIALA GX IN PA GEMESSEN BEI VARIERTER DREHZAHL UND DEN TEMPERATUREN 22, 40 UND 60°C

Nachfolgende Tabelle zeigt die positiven Werte des Einschaltstromes bei den unterschiedlichen Drehzahl-Temperatur Kombinationen.

Shell Diala GX		Temperatur		
		22°C	40°C	60°C
Drehzahl	120 min ⁻¹	64,5	79,9	437,5
	200 min ⁻¹	112,4	178,8	750,8
	300 min ⁻¹	180	252	1126
	400 min ⁻¹	196	599	3126

TABELLE 7: SPITZENWERT DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS SHELL DIALA GX IN PA GEMESSEN BEI VARIERTER DREHZAHL UND TEMPERATUR

Stationärer Wert des Aufladestromes

Bei der Darstellung der stationären Werte des Aufladestromes ist keine eindeutige Tendenz im Kurvenverlauf ersichtlich. Aus nachfolgendem Diagramm ist ersichtlich, dass sich die stationären Werte der elektrostatischen Aufladung einem konstanten Wert nähern.

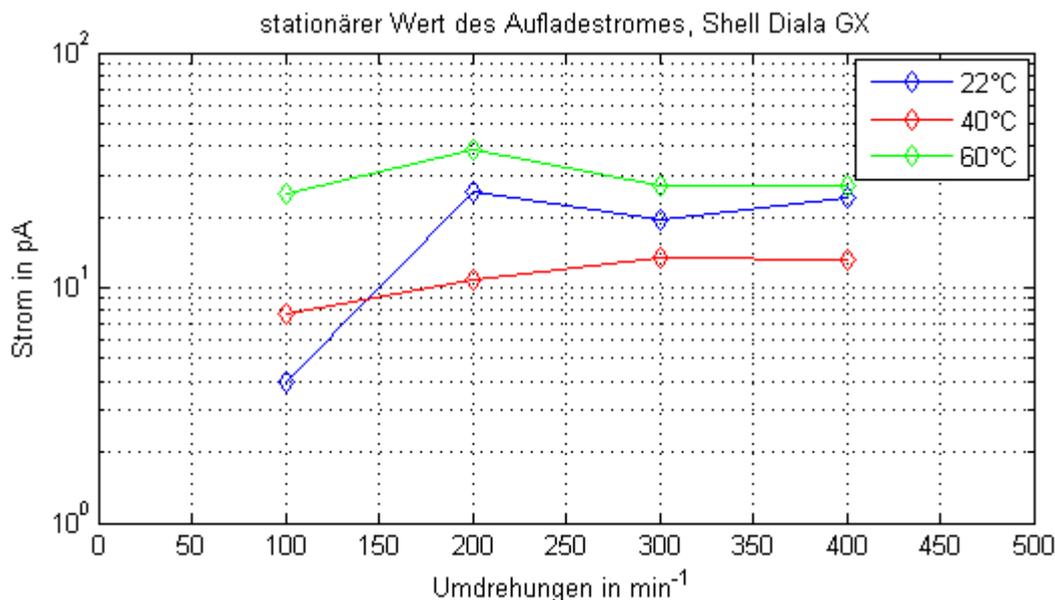


ABBILDUNG 5-23: STATIONÄRER WERT DES AUFLADESTROMES DES ISOLIERÖLS SHELL DIALA GX GEMESSEN BEI VARIERTER DREHZAHL UND TEMPERATUREN 22,40 UND 60°C

Ein Schnittpunkt zwischen der 40°C und der 22°C Messkurve ist ebenfalls ersichtlich. Dieser kann aus physikalischer Sicht nicht erklärt werden.

Eine mögliche Erklärung wäre eine Messungenauigkeit, welche auf den kleinen Aufladestrom zurückzuführen ist. Durch die extrem kleinen Werte der stationären Ströme kann eine Veränderung der Prüfparameter (Temperatur, Drehzahl, Feuchtigkeit usw.) große Auswirkungen haben.

Es ist denkbar, dass sich unter Einfluss der Luftfeuchtigkeit die Leitfähigkeit des Isolieröls verändert hat. Eine höhere Feuchtigkeit im Öl würde eine Erhöhung der Leitfähigkeit nach sich ziehen. Die elektrostatische Aufladung würde aufgrund einer erhöhten Leitfähigkeit geringer werden.

Shell Diala GX		Temperatur		
		22°C	40°C	60°C
Drehzahl	120 min ⁻¹	3,97	7,82	25,08
	200 min ⁻¹	25,8	10,73	38,77
	300 min ⁻¹	19,59	13,38	27,36
	400 min ⁻¹	24,36	13,09	27,37

TABELLE 8: STATIONÄRE WERTE DES EINSCHALTSTROMES DES ISOLIERÖLS SHELL DIALA GX IN pA GEMESSEN BEI VARIERTER DREHZAHL UND TEMPERATUR

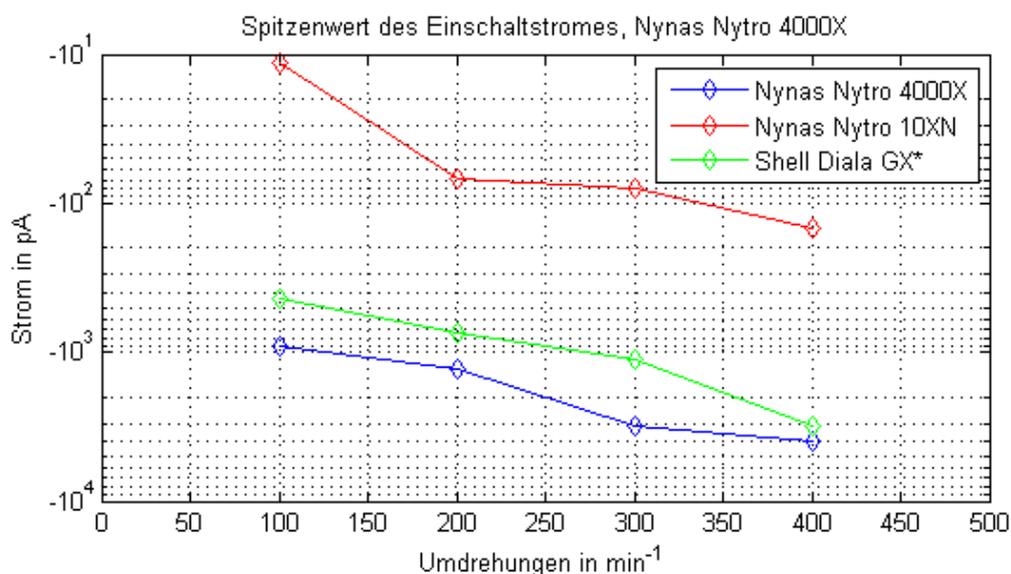
5.5. Diskussion und Vergleich der Isolieröle

Im vorangegangenen *Kapitel 5.4* wurde der Einfluss des Isolieröls auf die elektrostatische Aufladungsneigung erläutert und die Ergebnisse präsentiert. In diesem Kapitel werden die einzelnen Öle miteinander verglichen.

Wie bereits im *Kapitel 5.1.3* erwähnt wurde, kann vor der Untersuchung des Isolieröls keine Aussage über die Polarität des Aufladestroms beziehungsweise des Entladestromes gemacht werden. Was jedoch aus den Messungen zweifelsohne hervorgeht ist, dass Nynas Nytro 4000X und Nynas Nytro 10XN den gleichen Polaritätsverlauf besitzen. Das Isolieröl Shell Diala GX hingegen besitzt einen genau umgekehrten Verlauf der Vorzeichen. Da an den physikalischen Bedingungen des Versuchsaufbaus keine Veränderungen zwischen den Untersuchungen der einzelnen Isolieröle vorgenommen wurden, lässt dies auf den Aufbau beziehungsweise chemische Zusammensetzung des Isolieröls schließen, die das Vorzeichen des Leckstromes bestimmen beziehungsweise beeinflussen. Diese Zusatzstoffe scheinen somit nicht nur Öl spezifisch, sondern auch charakteristisch für den Hersteller zu sein.

Spitzenwerte des Einschaltstromes

Die Spitzenwerte des Einschaltstromes sind in der nächsten Abbildung²⁰ für alle drei Untersuchten Isolieröle zu sehen. Eine Ungenauigkeit beim Messen dieser Extremwerte ergibt sich durch die Peak-Problematik welche im *Kapitel 5.2* beschrieben wurde.



5-24: VERGLEICH DER ISOLIERÖLE: NYNAS NYTRO 4000X, NYNAS NYTRO 10XN UND SHELL DIALA GX IN ABHÄNGIGKEIT DER DREHZAHL GEMESSEN BEI 60°C

²⁰ Das Shell Diala GX wurde invertiert dargestellt um einen Vergleich zu ermöglichen

Es ist ersichtlich, dass das Isolieröl Nynas Nytro 10XN eine wesentlich geringere Einschaltstromspitze besitzt, als die anderen beiden. Eine mögliche Ursache dieser Eigenschaft könnte die niedrige Viskosität des Nynas Nytro 10XN sein. Die Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit. Je höher die Viskosität, umso zäher die Flüssigkeit.

Das Shell Diala GX und das Nynas Nytro 4000X liegen bezüglich der Einschaltstromspitze im selben Wertebereich. Das unterschiedliche Vorzeichen wird in der Zugabe von Chemikalien vermutet.

Stationärer Wert des Aufladestromes

In nachfolgender Abbildung sind die stationären Werte des Aufladestromes der drei untersuchten Isolieröle dargestellt. Die Werte des Isolieröls Shell Diala GX mussten erneut invertiert werden um einen Vergleich zu ermöglichen.

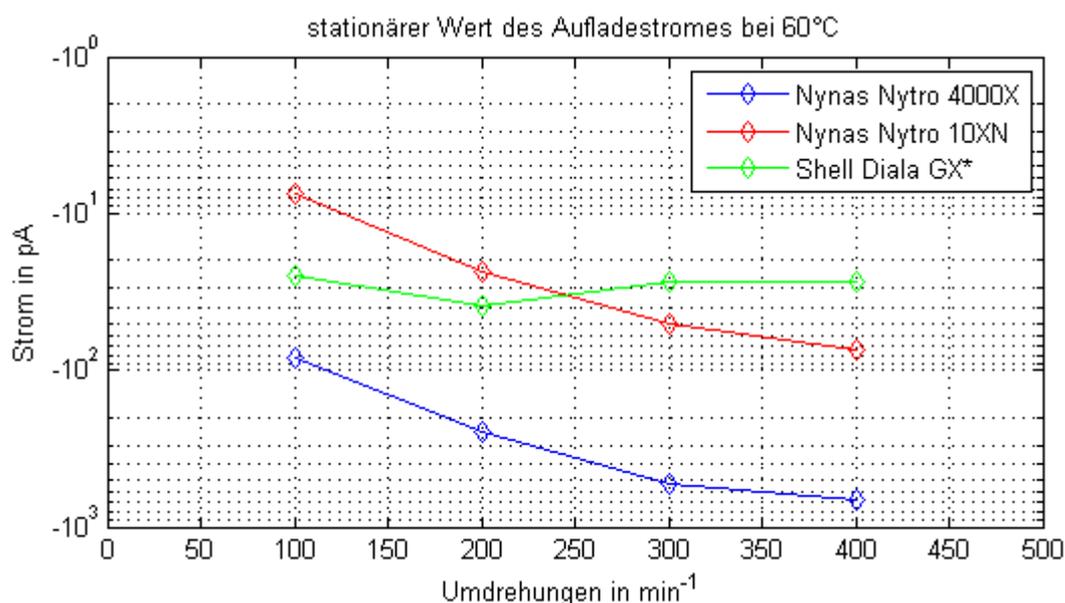


ABBILDUNG 5-25: VERGLEICH DER ISOLIERÖLE: NYNAS NYTRO 4000X, NYNAS NYTRO 10XN UND SHELL DIALA GX IN ABHÄNGIGKEIT DER DREHZAHL GEMESSEN BEI 60°C (POLARITÄTSSUMKEHR BEI SHELL DIALA GX)

Anfänglich wurde zwischen den Isolierölen des Herstellers Nynas nur ein Zusammenhang über die Polarität hergestellt. In zuvor dargestelltem Diagramm ist jedoch auch ein nahezu paralleler Verlauf der stationären Werte dieser beiden Öle zu erkennen. Dies lässt den Schluss zu, dass diese Isolieröle nicht nur vom selben Hersteller, sondern auch aus der gleichen Produktfamilie stammen.

Das Shell Diala GX weist im Gegenzug einen völlig anderen Verlauf der stationären Werte auf.

Schlussfolgernd kann eine Unterscheidung der Öle aufgrund der elektrostatischen Aufladung wie beispielhaft in *Abbildung 5-25* ersichtlich, erfolgen.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

6.1. Allgemeines

Nachdem der Prüfaufbau zur Bestimmung der elektrostatischen Aufladung mittels Spinning Disc Verfahren entwickelt, konstruiert und gefertigt wurde, konnte weiteres Optimierungspotential erkannt werden. In diesem Kapitel sollen nun Verbesserungsvorschläge erläutert werden, welche den Prüfablauf und die mechanische Konstruktion betreffen. Des Weiteren werden in diesem Abschnitt die praktischen Ergebnisse dieser Arbeit nochmals zusammengefasst.

6.2. Aufbau der Prüfzelle

Die ersten Testläufe nach der Konstruktion und Fertigung der SD Prüfzelle lieferten ein nicht zufriedenstellendes Ergebnis. Der Grund dafür war ein Konstantstrom in der Höhe von ungefähr 300 nA, der sich dem zu messenden Leckstrom überlagerte. Da sich der Leckstrom vor allem bei niedrigen Temperaturen und kleinen Drehzahlen im zweistelligen pA-Bereich einstellt, machte der überlagerte Konstantstrom die Ergebnisse unbrauchbar. Nach intensiver Überarbeitung der Konstruktion wurde der radiale Wellendichtring als Fehlerquelle identifiziert. Durch die Kombination der beteiligten Materialien (PTFE, PVC, Aluminium, Isolieröl) und der Rotationsbewegung der Antriebswelle baute sich eine Spannung auf, welche einen Konstantstrom von 300 nA zufolge hatte.

Durch den Ausbau des radialen Wellendichtringes konnte jedoch eine vollständige Abdichtung des Ölbehälters nicht mehr gewährleistet werden. Infolgedessen erhöhte sich die Feuchte im Isolieröl bei längeren Versuchsreihen. Durch häufigere Aufbereitung des zu untersuchenden Isolieröls konnte der Einfluss der Feuchtigkeit minimiert werden.

Abhilfe könnte durch eine luftdichte Konstruktion (beispielsweise eine Zylinderhaube) geschaffen werden, welche alle rotierenden Teile des Prüfaufbaus überdeckt. Durch die Luftdichtheit wäre auch eine Erzeugung von Unterdruck mittels Vakuumpumpe möglich. Aufgrund der Ausdehnung des Öls infolge einer Temperaturerhöhung müsste ebenfalls ein Ausgleichsgefäß vorgesehen werden, damit das Öl nicht austreten kann und eine saubere Arbeitsweise ermöglicht wird.

Anfänglich stand die Idee im Raum, den Antriebsmotor unter dem Gefäß einzubauen, wodurch allgemein die Handhabung und im speziellen der Probenwechsel erleichtert werden sollte. Des Weiteren wird im Maschinenbau in der Regel versucht, den Schwerpunkt des Antriebselements beziehungsweise den Schwerpunkt der beweglichen Teile so tief wie möglich anzubringen, um Vibrationen zu minimieren. Aufgrund des vorhin beschriebenen Dichtungsproblems musste der Anbau des Antriebsmotors nach oben verlegt werden und hatte bei höheren

Drehzahlen Vibrationen zur Folge. Der Einfluss dieser Vibrationen auf die Strömungsverhältnisse im Ölbehälter und somit auf die elektrostatische Aufladung konnte nicht abgeschätzt werden. Ein höheres Füllvolumen beziehungsweise ein Design bei dem der Antriebsmotor tiefer eingebaut werden würde, könnte jedoch die Entstehung von Vibrationen unterbinden.

Die Montage des Probenträgers an der Antriebswelle stellte sich ebenfalls als mögliche Fehlerquelle heraus. So verändern sich bei einer nicht-planen Fixierung des Probenträgers die Strömungsverhältnisse und haben eine Verfälschung des Messergebnisses zur Folge.

Wie bereits im *Kapitel 5.3.1* erwähnt wurde, spielt es keine Rolle, ob die Probe auf den Probenträger geschraubt oder geklebt wird. Jedoch wird in [8] ein relevanter Unterschied in der elektrostatischen Aufladung festgestellt, wenn statt Trägerisolation (siehe *Kapitel 4.5.1*) ein Ring aus Pressboard angebracht wäre. Dieser Ring müsste selbstverständlich aus demselben Material wie die zu untersuchenden Proben bestehen, damit das Ergebnis seine Aussagekraft behält. Leider konnte mit den zur Verfügung stehenden Mitteln kein Ring aus Pressboard hergestellt und dadurch auch nicht der Einfluss, der daraus resultieren würde, ermittelt werden.

6.3. Einfluss des Isolieröls auf die Aufladungsneigung

Im *Kapitel 5.4* wurde der Einfluss des Isolieröls auf die elektrostatische Aufladungsneigung an drei Isolierölen (Nynas Nytro 4000X, Nynas Nytro 10XN und Shell Diala GX) nachgewiesen.

Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen sind, dass bei gleichen physikalischen Versuchsbedingungen (Temperatur, Umdrehungszahl) die einzelnen Isolieröle eine unterschiedliche Aufladungsneigung und Polarität besitzen. Der Grund dafür wird in den unterschiedlichen chemischen Strukturen der Isolieröle und in der möglichen Zugabe von (künstlichen) Inhibitoren²¹ vermutet.

Eine weitere Schlussfolgerung aus dem *Kapitel 5.4* ist, dass das Isolieröl Nynas Nytro 10XN die geringste Aufladungsneigung besitzt. Eine mögliche Ursache dafür ist, die Viskosität, welche bei diesem Isolieröl geringer ist als bei Nynas Nytro 4000X und Shell Diala GX. Es wird dennoch vermutet, dass die Viskosität nicht der einzige Grund ist, der für diese geringe Aufladungsneigung sorgt. Auch hier wird ein Einfluss der chemischen Zusammensetzung vermutet.

²¹ Inhibitor ist ein (künstlicher) Zusatzstoff, der chemische Vorgänge (beispielsweise Alterung) unterbindet bzw. verlangsamt

6.4. Einfluss der Messzeit

Da die Messung der elektrostatischen Aufladung vor allem in Kombination mit einer statistischen Aussagekraft einen enormen Zeitaufwand fordert, ist es zweckdienlich zu erkennen, ab welchem Zeitpunkt eine Messung noch nutzbringende Ergebnisse liefert. Dies wird beispielhaft an einer Messung des Isolieröls Nynas Nytro 4000X gemessen bei 400 min^{-1} und 60°C gezeigt.

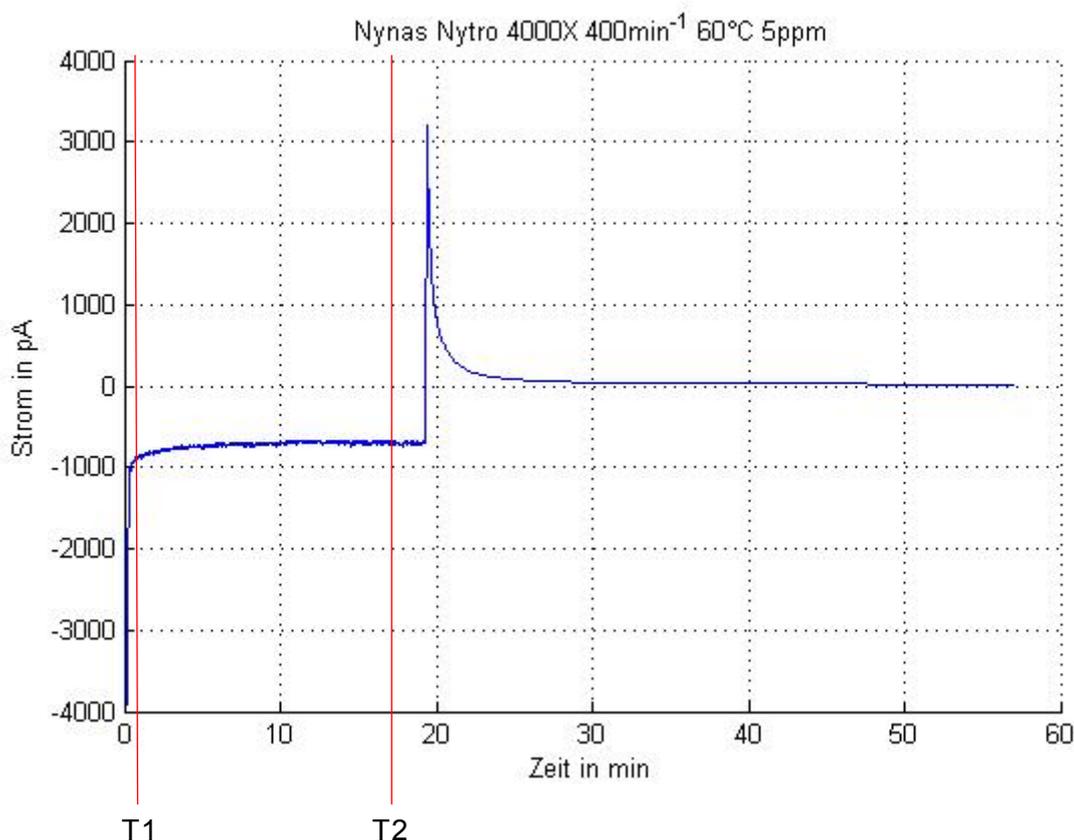


ABBILDUNG 6-1: NUTZEN DER MESSZEIT

In vorangegangener Abbildung ist zu sehen, dass im Bereich von 0 bis T1 ein starker Abfall des Betrages des Leckstromes zu verzeichnen ist. Im Vergleich dazu findet im Intervall zwischen T1 und T2 nur mehr eine geringe Änderung statt. Ab T2 beziehungsweise ab dem eingeschwungenen Zustand ist mit keiner neuen Information des Aufladestromes mehr zu rechnen und somit jede weitere Messzeit überflüssig.

Diese Arbeitsweise führt bereits bei einer geringen Anzahl von Messungen zu einer enormen Zeitersparnis.

6.5. Einfluss der Probe auf die Aufladungsneigung

Probenmontage

Im *Kapitel 4.5.2* werden zwei unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten des Probenträgers erläutert. Bei der ersten Variante wurden die Zelluloseproben auf den Probenträger geschraubt und in der zweiten Ausführungsform wurden diese geklebt. Bedenken, dass durch die Montage mittels Schrauben eine veränderte elektrostatische Aufladung gemessen werden würde, bewahrheitete sich nicht. In *Kapitel 5.3.1* ist zu sehen, dass der Aufladevorgang bei beiden Varianten nahezu ident ist. Bei der Entladung ergeben sich Differenzen, deren Ursache in den veränderten Strömungsverhältnissen, welche durch die Schraubenköpfe entstehen können, gesehen wird. Bei den Untersuchungen zur elektrostatischen Aufladung in Bezug auf die Zwangsumlaufkühlung ist der Aufladestrom von Interesse, da die Ausfälle von denen berichtet wird (*Kapitel 2.4.1*) direkt oder kurz nach dem Einschalten der Ölumwälzpumpen auftraten.

In dieser Arbeit wurden die Proben auf den Probenträger geschraubt, da erstens keine Unterschiede bei der Aufladung festgestellt wurden und zweitens das Kleben enorm viel Zeit in Anspruch genommen hätte. Auch der Einfluss des Klebstoffes auf die elektrostatische Aufladung wäre nicht trivial zu bestimmen gewesen.

Eine Fertigung des Außenringes aus Pressboard anstatt aus Aluminium bringt nach [8] feststellbare Unterschiede in der elektrostatischen Aufladung. Eine solche Konstruktion konnte mit den zur Verfügung stehenden Mitteln jedoch nicht realisiert werden.

Oberflächenbeschaffenheit

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit wurde im *Kapitel 5.3.4* behandelt. In *Abbildung 5-12* ist der Verlauf der Messkurven (Oberfläche geschliffen und ungeschliffen) zu sehen. Die Erwartungen an diesen Versuch waren, dass der Betrag der elektrostatischen Aufladung beziehungsweise der Betrag des Leckstroms bei geschliffenen Proben geringer sein müsste als bei ungeschliffenen. In *Abbildung 5-12* ist ein genau gegenläufiges Verhalten zu erkennen. Da die Versuchsbedingungen (Temperatur und Drehzahl) beibehalten wurden, wird eine Veränderung in den Strömungsverhältnissen an der Grenzschicht von festem und flüssigem Isoliermedium vermutet.

Um genauere Aussagen tätigen zu können, müssen weitere Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt werden.

Einfluss des Probenalters

Das Zellulosematerial unterliegt einer natürlichen Alterung, was eine Veränderung der Eigenschaften mit sich bringt. Der Einfluss gealterter Zellulose auf die elektrostatische Aufladung wurde im *Kapitel 5.3.5* behandelt. In *Abbildung 5-12* wurden 'nicht gealterte Proben' mit Proben die 11 beziehungsweise 32 Wochen gealtert wurden verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass gealterte Proben eine niedrigere elektrostatische Aufladung besitzen als neuwertige.

Eine mögliche Ursache könnte die Verringerung der elektrischen Isolationsfestigkeit durch den Anstieg des Feuchtigkeitsgehalts sein.

6.6. Weitere Arbeiten

Der Prüfaufbau nach SD weist mit momentanem Stand einen respektablen Automatisierungsgrad auf. Jedoch wurde während den Versuchen erst das wirkliche Potential dieser Prüfmethode erkannt.

Es wäre denkbar, Versuchsreihen vollkommen automatisiert durchzuführen. Von der Drehzahl,- über die Temperaturstellung bis hin zur Messdatenerfassung. Zurzeit wurde nur die Erfassung der Messdaten und der Drehzahl computerunterstützt ausgeführt. Wenn nun auch noch die Temperatur dem Auswertecomputer bekannt wäre, dann könnte über ein Auswerteprogramm ein Mikrocontroller angesteuert werden. Dieser Mikrocontroller würde dann die Temperatur im Wärmeschrank, die Drehzahl des Motors sowie die Prüfdauer steuern können. Aus Gründen der Reaktionsgeschwindigkeit würde die Regelung dieser Größen vom Mikrocontroller übernommen werden. Die Aufgaben des Auswertecomputers wären somit die Parameter des nächsten Versuches zu ermitteln, sie dem Mikrocontroller mitzuteilen und in weiterer Folge die Werte des Leckstromes mit einem Zeitstempel zu versehen und mit zu protokollieren.

So könnten Versuchsreihen bis auf den Probenwechsel und der Feuchtigkeitsbestimmung vollkommen automatisiert ausgeführt werden.

Da die elektrostatische Aufladung keine absolute Größe ist und aufgrund der Materialpaarung zweier Isolierstoffe entsteht, wären weitere Messungen notwendig um eine statistische Auswertung durchführen zu können.

Das Problem der Spitzenwernerfassung könnte durch den Einsatz eines Elektrometers mit höherer Abtastrate behoben werden.

Der Großteil dieser Ideen würde die Kosten und den zeitlichen Horizont dieser Arbeit bei weitem überschreiten. Sie sollte als Anregungen und Inspiration für weitere Arbeiten an diesem Prüfaufbau mittels Spinning Disc Verfahren dienen.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Die Messung der elektrostatischen Aufladung ist ein relevanter Bestandteil zur Bewertung des Isolationsdesigns von zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformatoren. Durch die fortschreitende Alterung der vorhandenen Infrastruktur und dem Einsatz neuer Isoliermaterialien gewinnt die Messung dieser Kenngröße erneut an Bedeutung.

In dieser Masterarbeit wurde ein Konzept für die Messung der elektrostatischen Aufladung nach der Spinning Disc Verfahren erarbeitet und auch mechanisch gefertigt (*Kapitel 4.4*). Die Funktionstauglichkeit des Prüfgeräts wurde durch die Ermittlung der Aufladungsneigung von drei Isolierölen in Kombination mit Pressboard nachgewiesen und kann in weiterer Folge zur Bestimmung der elektrostatischen Eigenschaften weiterer Materialkombinationen verwendet werden.

Die Übertragung des geringen Ableitstromes von der rotierenden Aluminiumwelle auf das Elektrometer stellte ein grundlegendes Problem dar. Nachdem in [24] Konzepte für diese Aufgabe erarbeitet und untersucht wurden, erwies sich der Einsatz von Metallkohlebürsten als optimal. Ein Nadellagerinnenring schützte die Aluminiumwelle vor mechanischen Abrieb. Die Kohlebürsten wurden angefedert und gewährleisteten dadurch den elektrischen Kontakt und somit die sichere Stromabnahme (*Kapitel 4.5.4*).

Durch die Rotation der Pressboardscheiben im Ölbad wird die elektrostatische Aufladung, welche durch die Strömung des flüssigen Isoliermediums im realen zwangsumlaufgekühlten Leistungstransformator entsteht, nachgebildet. Der Einfluss der Drehzahl (*Kapitel 5.3.2*) wurde über ein induktives Messsystem (*Kapitel 4.5.3*) protokolliert. Nach den ersten Testmessungen wurde klar, dass sich die Drehzahl durch den Temperatureinfluss nicht erhöht, wodurch eine Regelung dieser unnötig wurde.

Prinzipiell kann gesagt werden, dass sowohl eine Erhöhung der Drehzahl (welche der Strömungsgeschwindigkeit des Isolieröls entspricht) als auch eine Erhöhung der Temperatur zu einem Anstieg der elektrostatischen Aufladung führen. Aus den Untersuchungen (*Kapitel 5*) geht hervor, dass eine Steigerung der Temperatur einen stärkeren Einfluss auf die elektrostatische Aufladung ausübt als eine Steigerung der Drehzahl. Auch der Typ des Isolieröls hat eine Auswirkung auf die Höhe und Polarität der Aufladung. Die niedrigste Aufladungsneigung wurde beim Isolieröl Nynas Nytro 10XN bestimmt.

Nachdem die Funktionstauglichkeit des Prüfaufbaus mittels Spinning Disc Verfahren nachgewiesen wurde, kann diese Testzelle zur Untersuchung weiterer Isolierstoffkombinationen verwendet werden. Beispielsweise kann die elektrostatische Aufladungsneigung biologischer Isolieröle und von verschiedenartigen Zelluloseproben (geschliffen – ungeschliffen) untersucht werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Stiegler H., Skriptum zur Vorlesung: Grundlagen der Energiewirtschaft, 1. Auflage, Graz: TU Graz; 2008
- [2] Crofts DW. The static Electrification Phenomena in Power Transformers. IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol. 23, No. 1. Dallas: TU Electric Dallas. 1988: 137-146.
- [3] Crofts DW. Static Electrification in Power Transformers. IEEE Electrical System and Equipment Committee Meeting, Springfield; Illinois. 1987.
- [4] Fickert L., Skriptum zur Vorlesung Grundlagen der elektrischen Energiesysteme, Graz: TU Graz; 2009
- [5] Autor ABB: Inga-Kolwezi. URL: <http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/ae638bad1d35b5d1c12577490032bfea.aspx>, abgerufen am 11.04.2012
- [6] Autor ABB: The HVDC Transmission Quebec-New England, URL: <http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/87f88a41a0be97afc125774b003e6109.aspx>; abgerufen am 11.04.2012
- [7] Desertec Foundation, URL: <http://www.desertec.org/?gclid=CPKol6KYnq8CFYIu3wodE26bcA>; abgerufen am 11.04.2012
- [8] Lemesch G. Methoden zur Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung von flüssigen/festen Isolierungssystemen [Dissertation]. Graz: TU Graz; 1996: 33-42
- [9] Lewis TJ. Electrical Effects at Interfaces and Surfaces. IEEE Trans on Elect. Ins., Vol. 21, No 3. 1986: 289-295
- [10] Brenn G., Meile W., Vorlesungsskriptum Strömungslehre und Wärmeübertragung I, 10. Auflage, Graz: TU Graz; 2010
- [11] Schmidlechner J. Numerische Untersuchung der Strömungsbedingungen in der ECT-Testzelle nach Cigre (Spinning Disc) [Diplomarbeit]. Graz: TU Graz; 1996
- [12] Schobel W. Die elektrostatische Aufladung von strömenden Isolierölen [Dissertation]. Graz: TU Graz; 1990: 31-32
- [13] Moser H.P., Transformerboard. Weidmann AG, 1979, Sonderdruck der Zeitschrift SCIENTIA ELECTRICA

- [14] Koch M., Tenbohlen S., Ölleitfähigkeit und Grenzschichtpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum. Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart; 2005
- [15] Lyon DJ, Melcher JR, Zahn M. Couette Charger for Measurement of Equilibrium and Energization Flow Electrification Parameters: Applications to Transformer Insulation. IEEE Trans on Elect. Ins., Vol. 23, No.1. 1988: 159-176.
- [16] Kedzia J. Investigation of Transformer Oil, Electrification in Spinning Disc Systems. IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol 24. 1989: 59-65.
- [17] Oommen TV. Electrostatic Charging Tendency of Transformer Oils. IEEE Trans. PAS Vol. 103, No. 2. 1984: 389-418.
- [18] Ieda M., Okugo H., Tsukioka H., Goto k., Miyamoto T., Kohno Y., Supression of static electrification of isulatin goil for large power transformers. IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.23, No.1
- [19] Nynas AB: Nynas Nytro 4000X, Produktdatenblatt 2 Seiten, URL: [https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wnpds/Nytro_4000X_IEC/\\$File/PDS_Nytro_4000X_EN.pdf](https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wnpds/Nytro_4000X_IEC/$File/PDS_Nytro_4000X_EN.pdf); abgerufen 11.04.2012
- [20] Nynas AB: Nynas Nytro 10XN, Produktdatenblatt 2 Seiten, URL: [https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wnpds/Nytro_10XN_IEC/\\$File/PDS_Nytro_10XN_EN.pdf](https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wnpds/Nytro_10XN_IEC/$File/PDS_Nytro_10XN_EN.pdf); abgerufen am 11.04.2012
- [21] Shell: Shell Diala GX, Produktdatenblatt 2 Seiten, URL: http://schmierstoffdatenbank.de/uploads/tx_albertbeck/50218175245f118bd190f5.pdf; abgerufen am 11.04.2012
- [22] Müller G., Ponick B., Grundlagen elektrischer Maschinen. 9.Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH und Co.KG&A, Weinheim, 2006
- [23] Bruttel P., Schlink R., Wasserbestimmung durch Karl-Fischer-Titration. Metrohm, 2006
- [24] Zlodnjak A., Prüfaufbau zur Bestimmung der Electrostatic Charging Tendency (ECT) von Öl-Board-Anordnungen mittels CIGRE Spinning Disc Verfahren [Bachelorarbeit]. Graz: TU Graz; 2011

- [25] Ofner R.F., Einfluss der Strömungsverhältnisse auf die elektrostatische Aufladung von elektrischen Isolierölen [Diplomarbeit]. Graz: TU Graz; 1994
- [26] Felder K., Zusammenhang zwischen elektrostatischer Aufladung und Strömungsgeschwindigkeit von Isolieröl in Kühlkanalmodellen von Hochspannungstransformatoren [Diplomarbeit]. Graz: TU Graz; 1995
- [27] Namwar S., Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der electrostatic charging tendency von Öl-Zellulose-Isolierungen [Diplomarbeit]. Graz: TU Graz; 1993
- [28] Peyraque L., Beroual A., Buret F., Static Electrification of the Insulating Materials used in Power transformers. Conference Record of the ICDL '96 12th International Conference on Conduction and Breakdown on Dielectric Liquids, Roma, Italy, July 1996
- [29] Sierota A., Rungis J., Electrostatic Charging in Transformer Oils. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, No. 5, October 1994