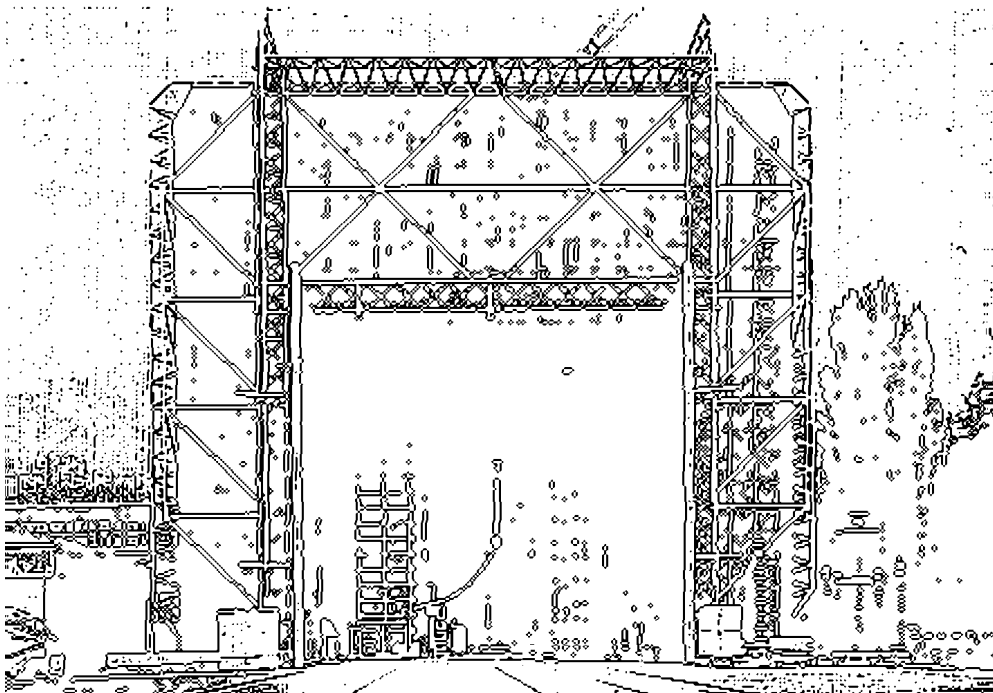


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

**DISSERTATION**

*Julia Alexandra Podesser*  
*September 2015*



Institut für  
Hochspannungstechnik und Systemmanagement  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Schichler

# **VERGLEICH DER ELEKTROSTATISCHEN AUFLADUNG ALTERNATIVER UND KONVENTIONELLER FLÜSSIG/ FESTER ISOLIERSYSTEME FÜR LEISTUNGSTRANSFORMATOREN**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
„Doktor der technischen Wissenschaften“

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Julia Alexandra Podesser**

genehmigt von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
an der Technischen Universität Graz



1. Begutachter: Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Michael Muhr
2. Begutachter: Prof. Dr. Maks Babuder  
(Milan Vidmar Electric Power Research Institute-Ljubljana)

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement  
Technische Universität Graz

Graz, im September 2015

---

## DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2010 bis 2015 während und nach meiner Beschäftigung als Universitätsassistentin am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz im Rahmen eines Forschungsprojektes, das im Auftrag von Siemens AG Österreich Transformers Weiz bearbeitet wurde.

Ich möchte mich hiermit bei dem Betreuer meiner Dissertation, **Herrn Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Michael Muhr**, bedanken, der das Zustandekommen des Forschungsprojektes förderte, wodurch diese Dissertation erst ermöglicht wurde. Ich bedanke mich für die fachlichen Diskussionen und die kritischen Fragestellungen, die meine Arbeit vorantrieben. Weiters bedanke ich mich für die Möglichkeit wissenschaftliche Tagungen und Konferenzen zu besuchen, bei denen ich meine Forschungsarbeit präsentieren durfte und wichtige Kontakte knüpfen konnte, die den Fortschritt dieser Arbeit förderten.

Herrn **Prof. Dr. Maks Babuder** danke ich für die Korrektur und Begutachtung dieser Arbeit.

Ich möchte mich bei **Herrn Dipl.-Ing. Dr. Georg Johannes Pukel** und **Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Priv.-Doz. Robert Schwarz** von Siemens AG Österreich Transformer Weiz für die Betreuung des Forschungsprojektes bedanken. Ich danke insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Dr. Georg Johannes Pukel für die vielen fachlichen Diskussionen und die Unterstützung während des gesamten Projektes und in der Entstehungsphase der Dissertation.

Großer Dank gebührt **Dipl.-Ing. Georgios Spandonis**, der insbesondere beim Bau und der Handhabung der Versuchsanlage mit seiner Erfahrung in vielen Gesprächen bedeutende Hilfestellungen leistete.

Ich danke auch den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement für die fachlichen Diskussionen.

Besonderer Dank gilt **Bettina Wieser**. Ihr zeit- und arbeitsintensiver Einsatz im Rahmen ihrer Anstellung am Forschungsprojekt trieben diese Arbeit voran.

Ich danke auch allen Angehörigen der Werkstätte des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement. Besonders **Herr Anton Schriebl** und **Herr Matthias Kainz** ermöglichten durch den Aufbau der Versuchsanlage erst die praktische Forschungstätigkeit, die dieser Dissertation zugrunde liegt.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglichten und mich während des gesamten Studiums und der Dissertation unterstützten.

---

## **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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Graz, den 15. September 2015

Julia Alexandra Podesser

## **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. The uploaded text document in TUGRAZonline is identical with this dissertation.

Graz, September 15<sup>th</sup>, 2015

Julia Alexandra Podesser

---

## **KURZFASSUNG**

Hochspannungstransformatoren sind üblicherweise mit einem Mineralöl-Zellulose-Isoliersystem ausgeführt. Der flüssige Isolierstoff besitzt neben der isolierenden Funktion auch eine Kühlwirkung. Er zirkuliert durch Kühlkanäle im Wicklungssystem, nimmt dort die Verlustwärme der Wicklungen auf und gibt sie an Wärmetauschern an die Umgebung ab. Durch die relative Bewegung zwischen dem flüssigen und dem festen Isolierstoff kommt es zur elektrostatischen Aufladung. Dies kann zu Teilentladungen und im schlimmsten Fall sogar zu einem elektrischen Durchschlag führen.

Erste Schadensfälle durch elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren traten in den 1970er Jahren auf und führten zu einer intensiven Forschungstätigkeit in diesem Bereich. Die Forschungstätigkeit war jedoch vor allem auf Isoliersysteme mit Mineralöl fokussiert. Heutzutage versucht man das konventionell in Transformatoren eingesetzte Mineralöl durch alternative Isolierflüssigkeiten (natürlichen und synthetischen Ester) zu ersetzen. Diese Flüssigkeiten besitzen neben der besseren Umweltverträglichkeit auch den großen Vorteil eines höheren Flamm- und Brennpunktes. Im Rahmen eines Forschungsprojektes am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz wurde die elektrostatische Aufladungsneigung und das Aufladungsverhalten von alternativen Isoliersystemen mit Esterflüssigkeiten und von Isoliersystemen mit Mineralöl vermessen und verglichen.

In der vorliegenden Dissertation ist zuerst eine Literaturrecherche zu den theoretischen Grundlagen der elektrostatischen Aufladung flüssig/ fester Isoliersysteme dargestellt. Dann wird auf die elektrostatische Aufladung und ihre Auswirkungen speziell in Leistungstransformatoren eingegangen. Weiters sind Untersuchungsmethoden für die elektrostatische Aufladungsneigung, die im Laufe der Zeit entwickelt wurden, beschrieben. In weiterer Folge wird auf die durchgeführten experimentellen Untersuchungen eingegangen. Zuerst wird der angewandte Prüf- und Messaufbau, die sogenannte Strömungsmodellanlage, beschrieben. Dann werden die untersuchten Isoliermaterialpaare, die Variationsparameter und die Versuchsdurchführung dargestellt. Zum Schluss sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen beschrieben. Dabei wird der Einfluss der Art der Isolierflüssigkeit und der Type des eingesetzten festen Isolierstoffes behandelt. Weiters wird das Aufladungsverhalten der alternativen Isoliersysteme und jener mit Mineralöl bezüglich verschiedener Einflussparameter (Strömungsform, Feuchte, Wechselspannungsbeanspruchung usw.) verglichen.

### **Schlüsselworte:**

Leistungstransformator, elektrostatische Aufladung, Mineralöl, Esterflüssigkeiten, Strömungsmodellanlage

---

## **ABSTRACT**

High voltage power transformers are usually realised with a mineral oil-cellulose insulation system. The liquid insulation doesn't only have an insulating function but it is also used for cooling. It circulates through the cooling ducts in the coil system, there it absorbs the heat losses from the windings and transfers them at heat exchangers to the ambient. Because of the relative motion between the liquid and the solid insulating material there is static electrification. This can result in partial discharges or in the worst case in a breakdown.

First failures in power transformers because of static electrification came up in the 1970ies and lead to an intensive research in this field. However, the research was focussed on insulation systems with mineral oil. Today it is tried to substitute mineral oil that is conventionally used in transformers by alternative insulating liquids (natural and synthetic ester). These liquids have a better environmental compatibility and also the big advantage of a higher flash and fire point. Within a research project at the Institute of High Voltage Engineering and System Management at Graz University of Technology the electrostatic charging tendency and the charging behaviour of alternative insulation systems with ester fluids and insulation systems with mineral oil were measured and compared.

In this dissertation there is first a literature research about the theoretical basics of electrostatic charging in a liquid/ solid insulation system. Then the electrostatic charging and its effects in power transformers are explained. After that test procedures for the electrostatic charging tendency that have been developed over time are described. Subsequently the experimental investigations are explained. First the test setup that was used for the experiments, called streaming model test setup, is shown. Then the investigated solid-liquid couples, the variation parameters and the testing methods are described. Finally the results of the experiments are shown. The influence of the liquid insulating material and of the type of solid insulating material is analysed. In addition the electrostatic charging behaviour of alternative insulation systems and of insulation systems with mineral oil is compared concerning the effect of different parameters (flow type, moisture, ac field etc.).

### **Keywords:**

power transformer, static electrification, mineral oil, ester fluids, streaming model test setup

**INHALTSVERZEICHNIS**

1	Einleitung .....	1
1.1	Problemstellung – Elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren .....	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit .....	2
1.3	Struktur der Arbeit .....	3
2	Theoretische Grundlagen zur elektrostatischen Aufladung.....	5
2.1	Ladungsbildung an der flüssig/ festen Grenzfläche .....	5
2.2	Ladungsabtransport in einer Flüssigkeitsströmung .....	21
2.3	Ladungsanhäufung und Ladungsableitung .....	27
2.4	Elektrisches Ersatzschaltbild des Aufladungsprozesses .....	28
3	Aufladungsphänomene in Leistungstransformatoren .....	30
3.1	Aufladungsursache.....	30
3.2	Schäden durch elektrostatische Aufladung.....	31
3.3	Gegenmaßnahmen .....	32
4	Methoden für Aufladungsuntersuchungen an flüssig/ festen Isoliersystemen .....	35
4.1	Versuchsaufbauten mit ebener Strömung .....	35
4.2	Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung .....	37
4.3	Versuchsaufbauten nach der Filtermethode .....	38
4.4	Gegenüberstellung der Untersuchungsmethoden .....	39
5	Prüfstand: Strömungsmodellanlage .....	42
5.1	Bestandteile und Funktion.....	42
5.2	Bedienung der Strömungsmodellanlage.....	48
5.3	Messsystem .....	50
6	Experimentelle Untersuchungen mit der Strömungsmodellanlage .....	57
6.1	Untersuchte Isoliersysteme.....	57
6.2	Variationsparameter .....	66
6.3	Versuchsvorbereitungen .....	66
6.4	Versuchsablauf.....	68
6.5	Auswertung der Messergebnisse.....	72
6.6	Versuchsnachbereitungen .....	73
7	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen .....	75
7.1	Verhalten der Messströme .....	75
7.2	Elektrostatische Aufladungsneigung verschiedener Isolierflüssigkeiten.....	78
7.3	Elektrostatische Aufladungsneigung verschiedener Feststoffe .....	85
7.4	Elektrostatische Aufladungsneigung bei unterschiedlichen Strömungsformen .....	95
7.5	Elektrostatische Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte der Isolierflüssigkeit.....	101
7.6	Elektrostatische Aufladungsneigung unter Hochspannungsbeanspruchung.....	108
7.7	Elektrostatische Aufladungsneigung bei Entladespuren im Strömungskanal.....	114
7.8	Zusatzbetrachtung: Druckverlust an einem Strömungskanal bei verschiedenen Isolierflüssigkeiten .....	117
8	Resümee .....	121
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	124
	Literaturverzeichnis.....	128
	Anhang .....	136

# 1 EINLEITUNG

In dieser Einführung wird auf das Problem der elektrostatischen Aufladung in Leistungstransformatoren eingegangen. Weiters wird auch die Notwendigkeit von Forschungsarbeiten in diesem Bereich erläutert. Daraus folgend werden die Zielsetzungen der in der vorliegenden Dissertation behandelten Forschungstätigkeit dargestellt. Zum Schluss wird die Struktur der Arbeit beschrieben.

## 1.1 Problemstellung – Elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren

Wenn zwei verschiedenartige, isolierende (oder von Erde isolierte) Stoffe eine relative Bewegung zu einander durchführen, kommt es durch den triboelektrischen Effekt zur elektrostatischen Aufladung. Die beiden Stoffe werden mit entgegengesetzter Polarität aufgeladen und es kann durch eine erhöhte Ladungsansammlung zum Aufbau hoher elektrischer Felder kommen. Wenn die Durchschlagsfeldstärke in einem Bereich überschritten wird, bewirkt dies elektrostatische Entladungen [EPR95] S. 7.

Elektrostatische Aufladung führte in der Vergangenheit in verschiedensten Bereichen von Industrie und Alltag zu Problemen und Schäden. Einer der ersten betroffenen Bereiche war die Erdölindustrie. Die Problematik besteht hier darin, dass durch die Weiterverarbeitung von Rohöl auch Flüssigkeiten mit isolierenden Eigenschaften entstehen. Wenn diese Flüssigkeiten durch Leitungen transportiert werden, tritt elektrostatische Aufladung auf. Dies ist z.B. beim Umfüllen dieser Flüssigkeiten in einen Vorratstank oder einen Tankwagen der Fall. Teile der Flüssigkeit können verdampfen, sodass diese Dämpfe in dem Vorratstank oder Tankwagen über der Flüssigkeit schweben. Durch den triboelektrischen Effekt entstandene Ladungen sammeln sich nun an verschiedenen Stellen an: in der Flüssigkeit selbst, an ihrer Grenzfläche zum Dampf oder an den Tankwänden. Eine elektrische Entladung kann in diesem Fall durch die entzündlichen Medien zu einer Explosion führen. Eine Maßnahme gegen Schäden durch elektrostatische Aufladung besteht darin den verwendeten Flüssigkeiten ionisierbare Additive hinzuzufügen, die die Leitfähigkeit erhöhen [EPR95] S. 8 – S. 9. In der Automobilindustrie traten auch Probleme durch elektrostatische Aufladung auf, als man dazu überging, ursprünglich metallische Bauteile wie Leitungen und Pumpen, durch welche der Treibstoff geführt wird, aus polymeren Stoffen zu fertigen. Der Treibstofffluss durch diese Bauteile führt zur elektrostatischen Aufladung. Der Grund für die Verwendung des polymeren Materials besteht in der leichteren Verarbeitbarkeit und Montage dieser Werkstoffe. Die Ladungsansammlung kann auch hier zu Entladungen führen. Zwar besteht in diesem Fall durch die Entladung selbst nicht die Gefahr einer Explosion, da diese relativ energiearm ist. Jedoch kann es bei Entladungen an immer derselben Stelle zur Schädigung der Bauteile und zum Treibstoffverlust kommen. Treibstoffverlust an der falschen Stelle kann auch zu gefährlichen Situationen führen. Es muss jedoch betont werden, dass in Fahrzeugen mit polymeren Bauelementen im Treibstoffkreis elektrostatische Aufladung nur in Extremsituationen wie z.B. bei sehr niedrigen Temperaturen wirklich zu Schäden führen kann [EPR95] S. 15.

Seit den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts führte die elektrostatische Aufladung auch bei Leistungstransformatoren immer wieder zu Schäden [CIG00] S. 6. In diesem Fall liegt der Grund in der relativen Bewegung der eingesetzten Isoliermaterialien [EPR95] S. 10. Üblicherweise kommt ein Mineralöl-Zellulose-Isoliersystem in Leistungstransformatoren zum Einsatz [Küc09] S. 493. Die Isolierflüssigkeit wirkt im Transformator auch als Kühlmittel. Sie zirkuliert durch Kühlkanäle im Wicklungssystem, nimmt dort die Verlustwärme auf und gibt sie an Wärmetauschern ab [EPR95] S. 10. Bei großen Leistungstransformatoren wird meist eine Zwangsumlaufkühlung eingesetzt, bei der die Flüssigkeitsströmung durch Pumpen bewerkstelligt wird [EPR99\_a] S. 1-9 –



S. 1-10, [ABB04] S. 97. Es zeigte sich, dass die Strömung der Isolierflüssigkeit durch die Kühlkanäle im Wicklungssystem eines Transformators zu elektrostatischer Aufladung zwischen dem festen und dem flüssigen Isolierstoff führen kann [EPR95] S. 10. Die dabei entstehenden Ladungsansammlungen können Teilentladungen oder im schlimmsten Fall sogar elektrische Durchschläge hervorrufen, siehe z.B. [EPR93] S. 1-1-8, [Tam80] S. 340, [Shi79] S. 1249. Leistungstransformatoren stellen einen der wichtigsten Bestandteile des elektrischen Netzes dar. Fällt ein Leistungstransformator aus, so sind der Ersatz bzw. die Reparatur sehr kosten- und zeitintensiv. Zudem wird die Versorgungssicherheit eingeschränkt [Lem96] S. 1.

Elektrostatische Aufladung wurde als Schadensursache in Leistungstransformatoren erstmals in Japan aufgedeckt. Dieses Phänomen trat jedoch verstärkt in den Vereinigten Staaten auf [EPR99] S. 3-5. Betroffen waren nur zwangsgekühlte Leistungstransformatoren [Lem96] S. 5. Es ist schwierig, eine genaue Anzahl für die eingetretenen Fehlerfälle durch elektrostatische Aufladung zu nennen. Die Angaben in der Literatur sind diesbezüglich sehr vage formuliert. Laut [EPR99] S. 3-4 geht man weltweit von weniger als 50 Fällen aus, bei denen die Schadensursache mit Sicherheit elektrostatische Aufladung war. Jedoch wird auch betont, dass angenommen werden muss, dass elektrostatische Aufladung auch häufig eine Schadensursache gewesen sein könnte, wenn die Ursache nicht gefunden wurde.

Seit dem Auftreten der ersten Ausfälle von Transformatoren aufgrund von elektrostatischer Aufladung wurde dieses Phänomen sehr intensiv erforscht. Die Ziele dieser Forschungstätigkeit waren unter anderem ein besseres Verständnis für die auftretenden chemischen, physikalischen und elektrischen Vorgänge zu erhalten, geeignete Methoden und Parameter für die Beurteilung der elektrostatischen Aufladungshöhe eines flüssig/ festen Isoliersystems zu finden, den Einfluss verschiedener Parameter (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, usw.) auf das Aufladungsphänomen zu untersuchen und Maßnahmen abzuleiten, die zur Reduktion der Aufladungshöhe führen [CIG00] S. 5 – S. 26.

Der Schwerpunkt der Forschungstätigkeit im Bereich der elektrostatischen Aufladung in Leistungstransformatoren lag bis zum jetzigen Zeitpunkt vor allem bei der Untersuchung der konventionell eingesetzten Isoliersysteme mit Mineralöl, siehe z.B. Tabellen in [CIG00] S. 11 – S. 12 und [Sch14] S. 17. Heutzutage besteht jedoch der Trend Mineralöl durch biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten zu substituieren [Per09]. Diese Flüssigkeiten besitzen neben der besseren Umweltverträglichkeit auch den großen Vorteil eines höheren Brennpunktes und Flammpunktes als Mineralöl [CIG10] S. 16 – S. 18, [Puk12] S. 2. Der Einsatz der alternativen Isolierflüssigkeiten in Verteiltransformatoren hat sich bereits bewährt. Die geplante Ausweitung ihres Einsatzes auf Hochspannungsleistungstransformatoren erfordert jedoch die genaue Kenntnis der Eigenschaften dieser Flüssigkeiten. Unter anderem spielt dabei auch die elektrostatische Aufladungsneigung der alternativen Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit verschiedenen festen Isolierstoffen eine wichtige Rolle [Per09]. Es stellen sich somit neue Forschungsthemen, die auf dem Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz im Rahmen eines Forschungsprojektes bearbeitet wurden und in der vorliegenden Dissertation dargestellt sind.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die übergeordneten Zielsetzungen der im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Forschungstätigkeit waren die Folgenden:

1. *Bestimmung der elektrostatischen Aufladungsneigung von Mineralöl und von alternativen Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit unterschiedlichen Feststoffen unter Variation verschiedener für den Transformator relevanter Betriebsparameter bzw. Einflussfaktoren*
2. *Vergleich der elektrostatischen Aufladungsneigung und des Aufladungsverhaltens der alternativen Isoliersysteme mit jenen von Isoliersystemen mit Mineralöl*

Da das Aufladungsverhalten von Mineralöl in der Vergangenheit bereits intensiv erforscht wurde, sollte dieser Vergleich eine Risikoabschätzung beim Einsatz alternativer Isoliersysteme in Hochspannungstransformatoren ermöglichen.

Die Forschungstätigkeit gliederte sich in die folgenden zeitlich chronologisch angeführten Schritte:

1. Zu Beginn wurde nach einer Literaturrecherche ein geeignetes Prüfverfahren für die Untersuchung der elektrostatischen Aufladungsneigung unterschiedlicher flüssig/ fester Isoliermaterialpaare ausgewählt. An das Prüfverfahren wurde die Anforderung gestellt, dass es die Variation folgender Parameter erlaubt, die auch im Betrieb eines Transformators relevant sind:
  - Relative Geschwindigkeit zwischen dem flüssigen und festen Isolierstoff
  - Systemtemperatur
  - Feuchte der Isolierflüssigkeit
  - Wechselspannungsbeanspruchung
2. Als zweiter Schritt folgten die Planung, Dimensionierung und der Aufbau der Versuchsanlage.
3. Dann wurden folgende Materialpaare unter Variation obiger Parameter auf ihre elektrostatische Aufladungsneigung hin vermessen und verglichen:

Mineralöl – Zellulose	Mineralöl – Aramid
Synthetischer Ester – Zellulose	Synthetischer Ester – Aramid
Natürlicher Ester – Zellulose	Natürlicher Ester – Aramid

Zuerst erfolgte die Untersuchung von Materialpaaren mit Mineralöl, da hier Vergleichsmöglichkeiten in der Literatur vorhanden sind und somit die versuchstechnisch erhaltenen Tendenzen überprüfbar waren.

### 1.3 Struktur der Arbeit

Diese Dissertation ist aus 9 Kapiteln aufgebaut. Das vorliegende Kapitel 1 stellt eine Einführung dar, in der zuerst auf die Problemstellung der elektrostatischen Aufladung in Leistungstransformatoren eingegangen und auf den Forschungsbedarf in diesem Bereich durch das Aufkommen neuer Isoliermaterialien hingewiesen wird. Weiters wird die Zielsetzung der Forschungstätigkeit und der vorliegenden Dissertation beschrieben.

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen zur elektrostatischen Aufladung flüssig/ fester Isoliersysteme beschrieben. Dabei wird auf die vier Phasen des Aufladungsprozesses eingegangen.

Nach der theoretischen Behandlung des Aufladungsphänomens wird in Kapitel 3 speziell auf das Zustandekommen elektrostatischer Aufladung im Leistungstransformator eingegangen. Weiters werden typische Schäden in Transformatoren beschrieben und die in der Praxis angewandten Gegenmaßnahmen dargestellt.

Wie bereits erwähnt, ist das Problem der elektrostatischen Aufladung in Transformatoren seit den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts bekannt. Seit dieser Zeit wurden verschiedene Prüfaufbauten entwickelt, die zur Bestimmung der Aufladungshöhe flüssig/ fester Isoliersysteme eingesetzt wurden. Eine Literaturrecherche über diese Aufbauten ist in Kapitel 4 dargestellt. Diese Recherche ermöglichte auch die Auswahl eines für die vorliegenden Untersuchungen geeigneten Prüfaufbaus.

In Kapitel 5 wird der erstellte Prüfstand, die sogenannte Strömungsmodellanlage, bezüglich des Aufbaus, der Funktion und der eingesetzten Messtechnik beschrieben.

In Kapitel 6 sind die experimentellen Untersuchungen mit der erstellten Versuchsanlage dargestellt. Nach der Beschreibung der untersuchten flüssig/ festen Isoliermaterialpaare und Variationsparameter werden die Versuchsvorbereitung und die Versuchsdurchführung erläutert. Weiters wird auch auf die Auswertungsmethode der Messergebnisse und die versuchsnachbereitenden Maßnahmen eingegangen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit der Strömungsmodellanlage sind in Kapitel 7 dargestellt. Die elektrostatische Aufladungshöhe und das Aufladungsverhalten werden für die alternativen Isoliersysteme und für die Isoliersysteme mit Mineralöl zuerst bezüglich des Einflusses der festen und der flüssigen Isolierstoffkomponente analysiert. Dann wird die Auswirkung verschiedener Parameter (Strömungsform, Feuchte der Flüssigkeit, Hochspannungsbeanspruchung, Fehlstellen am Feststoff) auf die Aufladungshöhe der verschiedenen flüssig/ festen Isoliermaterialpaare beschrieben.

In Kapitel 8 wird ein Resümee der wichtigsten Erkenntnisse dieser Dissertation gegeben. Kapitel 9 fasst die Inhalte der einzelnen Kapitel noch einmal kurz zusammen und gibt einen Ausblick zu möglichen weiterführenden Arbeiten.

Es wird an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die praktischen Untersuchungen in dieser Arbeit im Rahmen eines Forschungsprojektes am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz durchgeführt wurden. Dabei wurden insgesamt sechs Berichte verfasst, deren Inhalt und Textpassagen zum Teil in der vorliegenden Arbeit integriert sind, jedoch nicht explizit referenziert wurden, da sie demselben Autor entstammen und es sich bei den Berichten um nicht veröffentlichte Texte handelt.

## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR ELEKTROSTATISCHEN AUFLADUNG

Unter elektrostatischer Aufladung versteht man das Auftreten einer Ladungstrennung aufgrund der relativen Bewegung zwischen zwei Stoffen. Ein bekanntes Anwendungsbeispiel für dieses Phänomen ist der Bandgenerator nach van de Graaff, der zur Gleichspannungserzeugung bis zu 25 MV ([Küc09] S. 368) eingesetzt werden kann. Bei diesem Generator kommt es durch die Bewegung eines isolierenden Bandes zur Ladungstrennung [EPR99\_a] S. 1-2. Elektrostatische Aufladung kann zwischen verschiedenen Medien auftreten. Die Betrachtungen in diesem Kapitel beschränken sich jedoch auf die elektrostatische Aufladung zwischen einem Feststoff und einer an diesem vorbeiströmenden Flüssigkeit.

Die elektrostatische Aufladung vollzieht sich grundsätzlich in vier Phasen [Gas86]:

1. Ladungsbildung an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Feststoff
2. Ladungsabtransport durch eine Flüssigkeitsströmung
3. Ladungsanhäufung
4. Ladungsabfluss über Ableitwiderstände gegen Erde

Man muss beachten, dass im Fall der elektrostatischen Aufladung durch eine Flüssigkeitsströmung im Gegensatz zum einfachen Fall des Bandgenerators nach van de Graaff diese vier Phasen mit einander stark verbunden sind [Nel94] S. 17.

Im vorliegenden Kapitel werden die vier Phasen des Aufladungsprozesses zwischen Flüssigkeit und Feststoff näher erklärt.

### 2.1 Ladungsbildung an der flüssig/ festen Grenzfläche

Zu Beginn des Prozesses der elektrostatischen Aufladung zwischen einer Flüssigkeit und einem Feststoff steht die Ladungsbildung. Darunter versteht man die Bildung von Ladungen einer Polarität an der Feststoffwand und von Ladungen entgegengesetzter Polarität in der Flüssigkeit. Durch den Vorgang der Ladungsbildung kommt es somit zur Polarisierung der beiden in Kontakt stehenden Materialien. Die beschriebene Ladungsverteilung bezeichnet man – aufgrund der zwei unterschiedlich geladenen Ladungsschichten zu beiden Seiten der flüssig/ festen Grenzfläche – als elektrische Doppelschicht. Die Ladungsbildung wird in der Literatur meist über einen physikalisch-chemischen Prozess erklärt, der stattfindet, sobald ein Feststoff und eine Flüssigkeit in Kontakt kommen. Der Prozess ist jedoch bis zum heutigen Zeitpunkt noch immer nicht genau bekannt und ist daher Gegenstand verschiedener Forschungstätigkeiten. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Theorien zur Ladungsbildung durch physikalisch-chemische Reaktionen entwickelt [Ela10] S. 1593 – S 1594. In diesem Kapitel wird zuerst auf diese Theorien eingegangen. Dann werden der Aufbau und die wichtigsten Parameter der elektrischen Doppelschicht beschrieben.

#### 2.1.1 Theorien zur Ladungsbildung

Für die Beschreibung der physikalisch-chemischen Reaktionen an der flüssig/ festen Grenzfläche, die zur Ladungsbildung führen, wurden verschiedene Modelle entwickelt [Wal81], [Tou96], [Was97]. Auch wenn diese Modelle realistisch sind, können sie die auftretenden Vorgänge nicht vollkommen darstellen. Analysen der elektrostatischen Aufladung zwischen flüssigen und festen Materialien wurden anfangs sehr intensiv für Metall in Kombination mit isolierenden Flüssigkeiten

gemacht, da bei dieser Materialpaarung auch die ersten Probleme in der Erdölindustrie auftraten, siehe z.B. [Kli58]. Dabei wurde die elektrostatische Aufladung häufig beim Fließen einer isolierenden Flüssigkeit durch metallische Rohre betrachtet. Schwierigkeiten bei der Beschreibung des physikalisch-chemischen Prozesses ergaben sich bereits hier durch verschiedene Unklarheiten. Unter anderem ist unbekannt, ob ein reiner Ionenaustausch oder ein Austausch von Ionen und Elektronen an der Grenzfläche zur Ladungsbildung in Flüssigkeit und Feststoff führt. Weiters können bereits geringste Verunreinigungen in der Flüssigkeit von 1 ppm und weniger die Ladungsbildung bestimmen und verändern. Es ist daher schwierig die Ladungsbildung zu quantifizieren. Für das flüssig/ feste Isoliermaterialpaar in einem Leistungstransformator ist die Beschreibung des zugrundeliegenden Prozesses sogar noch komplizierter als im Fall der Flüssigkeitsströmung durch ein metallisches Rohr. Zum einen liegt dies daran, dass zusätzliche Verunreinigungen im Laufe des Betriebes eines Transformators entstehen. Feuchte wird zum Beispiel durch Alterung des Pressboards gebildet. Dies kann den Prozess verändern. Weiters besitzt Pressboard eine poröse Oberfläche wodurch die Strömung und die flüssig/ feste Kontaktfläche anders sind als bei dem meist betrachteten Fall eines glatten, metallischen Rohres. Zusätzlich besteht Pressboard nicht aus einem einzelnen Stoff, sondern besitzt verschiedene Bestandteile. Jeder dieser Bestandteile könnte eine eigene Reaktion mit den Verunreinigungen in der Isolierflüssigkeit eingehen [Mor97] S. 688 – S. 689.

Im Folgenden wird auf drei bedeutende Modelle für die Ladungsbildung durch physikalisch-chemische Prozesse eingegangen, die auch in [Ela11] hervorgehoben werden. Diese sind das „klassische“ Adsorptionsmodell nach H. L. Walmsley und G. Woodford, das Korrosionsmodell nach G. G. Touchard et al und das „erweiterte“ Adsorptionsmodell nach A. P. Washabaugh und M. Zahn. Man geht bei diesen Modellen davon aus, dass Verunreinigungen bzw. Additive aus der Flüssigkeit mit dem Feststoff reagieren, wodurch es zu einem Austausch von Ladungsträgern an der flüssig/ festen Grenzfläche kommt.

### „Klassisches“ Adsorptionsmodell

H. L. Walmsley und G. Woodford nahmen in [Wal81] ein Modell für die Ladungsbildung an, das auf den Vorgängen der Adsorption und Desorption von Ionen aus der Flüssigkeit an der Feststoffoberfläche basiert. In [Wal81], [Wal82] und [Wal83] wurden mit diesem Modell die bei verschiedenen Strömungsformen entstehenden elektrischen Ströme in der Flüssigkeit berechnet. Die Betrachtungen konzentrierten sich dabei auf Treibstoffe (Kohlenwasserstoffe), die durch metallische Rohre fließen.

Das Modell nach H. L. Walmsley und G. Woodford nimmt an, dass die Flüssigkeit mit einem Additiv versetzt ist. Dieses dissoziiert zu den Ionen  $A_L^+$  und  $B_L^-$ . Die positiven und negativen Ionen werden an der festen Oberfläche adsorbiert und desorbiert. Dadurch entsteht eine Ionenflussdichte  $\Gamma_{\pm}$  an der Feststoffwand, die durch die Randbedingung für die flüssig/ feste Grenzfläche in **Gleichung 2-1** beschrieben wird. Im Gegensatz zu früheren Modellen stellt diese Gleichung die Adsorption und Desorption zu verschiedenen Anteilen dar [Wal81] S. 1763 – S. 1764.

$$\Gamma_{\pm} = \underbrace{K_{\pm} \cdot n_{\pm}}_{\text{Adsorption}} - \underbrace{K'_{\pm}}_{\text{Desorption}} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

Die Adsorptionsrate  $K_{\pm}$  und die Desorptionsrate  $K'_{\pm}$  aus obiger Gleichung sind dabei folgendermaßen definiert [Wal81] S. 1763, [Ela11] S. 27:

$$K_{\pm} = k_{f\pm} \cdot \gamma_w \quad \text{Gleichung 2-2}$$

$$K'_{\pm} = k_{r\pm} \cdot n_{\pm} \text{ Oberfläche} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

Legende zu **Gleichung 2-1 bis Gleichung 2-3** [Wal81] S. 1761 – S. 1763, [Ela11] Notation:

$\Gamma_{\pm}$	Flussdichte von positiven bzw. negativen Ionen an der Feststoffwand in $1/(m^2s)$
$K_{\pm}$	Adsorptionsrate in $m/s$
$K'_{\pm}$	Desorptionsrate in $1/(m^2s)$
$n_{\pm}$	Konzentration der positiven bzw. negativen Ionen nahe der Feststoffwand in $1/m^3$
$k_{f\pm}$	Geschwindigkeitskonstante der Adsorption in $m^3/s$
$k_{r\pm}$	Geschwindigkeitskonstante der Desorption in $1/s$
$Y_w$	Anteil freier Oberflächenplätze in $1/m^2$
$n_{\pm}$ Oberfläche	Konzentration der Oberflächenionen in $1/m^2$

**Gleichung 2-1** ermöglicht die Beschreibung aller drei Arten von Ionenflüssen für jeweils positive und negative Ionen, die an einer Feststoffwand auftreten können [Wal81] S. 1763 – S. 1764:

- Ioneninjektion in die Flüssigkeit durch Desorption
- Ionenentfernung aus der Flüssigkeit durch Adsorption
- Nullfluss (Gleichgewichtszustand)

Die Desorptionsrate in **Gleichung 2-1** spielt eine immer größere Rolle, je mehr die Feststoffoberfläche verunreinigt ist bzw. je mehr Oberflächenionen bereits angelagert sind, siehe **Gleichung 2-3** [Ela11] S. 27. Wenn man jedoch davon ausgeht, dass die Flüssigkeit in ein reines Rohr eingebracht wird, dann kann die Desorption in **Gleichung 2-1** vernachlässigt werden. Man erhält dadurch eine vereinfachte Randbedingung für die flüssig/ feste Grenzfläche, die im Englischen auch als *“radiation boundary condition“* bezeichnet wird. In diesem Fall kann der Gleichgewichtszustand (Nullfluss  $\Gamma = 0$ ) dadurch erreicht werden, dass die Adsorptionsrate  $K_{\pm}$  sehr niedrig gewählt wird [Wal81] S. 1764.

$$\Gamma_{\pm} = K_{\pm} \cdot n_{\pm}$$

Gleichung 2-4

Welche Polarität nun Flüssigkeit und Feststoff durch die beschriebenen Vorgänge annehmen, hängt vom Unterschied der Adsorptionsraten  $K_+$  und  $K_-$  und/ oder der Diffusionskoeffizienten  $D_+$  und  $D_-$  für positive und negative Ionen ab. Hierzu werden in [Wal81] S. 1768 – S. 1770 verschiedene Fallunterscheidungen unter anderem in Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Flüssigkeit, der Intensität der Adsorptionsreaktion an der Feststoffwand und der Rekombinationsrate der Ionen in der Flüssigkeit gemacht. Betrachtet man z.B. den Fall einer gering leitfähigen Flüssigkeit und einer höheren Rekombination als Adsorption, so sind allein die Adsorptionsraten  $K_+$  und  $K_-$  für die Polarisation bestimmend. In diesem Fall gilt Folgendes [Wal81] S. 1768 – S. 1769:

- $K_+ = K_-$ :** Positive und negative Ionen werden zu gleichen Teilen adsorbiert. Es tritt keine Polarisation auf.
- $K_+ > K_-$ :** Es besteht eine höhere Adsorption positiver Ionen an der Feststoffoberfläche, wodurch ein Überschuss negativer Ionen in der Flüssigkeit verbleibt.
- $K_- > K_+$ :** Es besteht eine höhere Adsorption negativer Ionen an der Feststoffoberfläche, wodurch ein Überschuss positiver Ionen in der Flüssigkeit verbleibt.

Für weitere Details zum “klassischen“ Adsorptionsmodell wird auf [Wal81] verwiesen.

### Korrosionsmodell

Das Korrosionsmodell wurde von G. G. Touchard et al in [Tou94] und [Tou96] begründet. Wie bereits das vorhergehende Modell wurde dieses Modell für Kohlenwasserstoffe entwickelt, die durch metallische Rohre fließen.

Auch beim Korrosionsmodell wird wieder vom Vorhandensein von Ionen in der isolierenden Flüssigkeit ausgegangen. Einerseits können diese, wie auch beim zuvor beschriebenen “klassischen“ Adsorptionsmodell angenommen, von Additiven stammen, andererseits von Verunreinigungen, die auch bei sehr reinen Flüssigkeiten immer vorhanden sind. Zur einfacheren Betrachtung wird von

einem einzigen Additiv bzw. einer einzigen Verunreinigung  $A_L B_L$  ausgegangen.  $A_L B_L$  dissoziiert gemäß **Gleichung 2-5**.



Die Flüssigkeit selbst ist nach außen hin neutral, da sich die negativen und positiven Ionen aufheben. Sobald die Flüssigkeit in Kontakt mit einem Feststoff gerät, tritt ein physikalisch-chemischer Prozess auf, der von den beteiligten Materialien abhängt. Zuerst tritt eine Korrosion an der Feststoffwand auf, wobei der aus den Atomen  $C_s$  – teils oder gänzlich – bestehende Feststoff der Reaktion in **Gleichung 2-6** unterliegt:



In weiterer Folge reagieren die Kationen des Feststoffes  $C_s^+$  mit den Anionen  $B_L^-$  aus der Flüssigkeit gemäß **Gleichung 2-7**. Das Korrosionsmodell geht davon aus, dass die Ionen  $C_s^+$  in ausreichender Menge vorhanden sind, sodass die Reaktion in **Gleichung 2-7** nicht durch einen Mangel an  $C_s^+$  begrenzt wird.



Die Flüssigkeit beinhaltet nun durch die ablaufenden Reaktionen neben den Verunreinigungen bzw. Additiven  $A_L B_L$  auch die zweite Art von Verunreinigungen  $C_s B_L$ . Die dargestellten Reaktionen bewirken eine Ansammlung von positiven Ladungen  $A_L^+$  in der Flüssigkeit und negativen Ladungen  $e^-$  an der Feststoffoberfläche [Tou96] S. 1051 – S. 1052.

Der Gleichgewichtszustand ist erreicht, sobald die Reaktion in **Gleichung 2-7** ausgeglichen ist. Die elektrische Doppelschicht ist nun voll ausgebildet und die Ladungsbildung in Flüssigkeit und Feststoff an der Grenzfläche ist abgeschlossen [Tou96] S. 1052.

Herrscht ein Ungleichgewicht an der Grenzfläche, dann tritt eine Wandstromdichte  $i_w$  an der Feststoffwand auf. Die Wandstromdichte kann nach **Gleichung 2-8** formuliert werden.  $\rho_w$  stellt dabei die Raumladungsdichte in der Flüssigkeit nahe der Feststoffwand dar.  $\rho_{wD}$  entspricht der Raumladungsdichte nahe der Wand im Gleichgewichtszustand d.h. bei voll ausgebildeter Doppelschicht [Tou96] S. 1052. **Gleichung 2-8** zeigt, dass die Wandstromdichte  $i_w$  zu Null wird, sobald die Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand  $\rho_w$  jener im Gleichgewichtszustand  $\rho_{wD}$  entspricht [Ela11] S. 29. Der Faktor  $K$  in **Gleichung 2-8** beschreibt die Stärke der physikalisch-chemischen Reaktionen [Ela11\_a] S. 1467. Er stellt in der ersten Version des Korrosionsmodells eine Konstante dar und ist laut **Gleichung 2-9** definiert [Tou96] S. 1052.

$$i_w = K \cdot (\rho_{wD} - \rho_w) \quad \text{Gleichung 2-8}$$

$$K = \frac{k_3 \cdot n_{N0}}{2 \cdot e_0 \cdot (n_{N0} - n_{ND})} \cdot \frac{V}{A} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

Legende zu **Gleichung 2-5 bis Gleichung 2-9** [Tou96] S. 1051 – S. 1052, [Ela11] Notation:

$A_L B_L$	chemische Verbindung, Verunreinigung oder Additiv in der Flüssigkeit
$A_L^+, B_L^-$	Ionen in der Flüssigkeit
$C_s$	Atom, aus dem der Feststoff besteht
$C_s^+$	Ion aus Feststoffwand
$e^-$	Elektron
$k_1, k_{-1}$	Geschwindigkeitskonstanten der Dissoziationsreaktion in 1/s ( $k_1$ ) bzw. $m^3/s$ ( $k_{-1}$ )

$k_2, k_{-2}$	Geschwindigkeitskonstanten der Korrosionsreaktion in 1/s ( $k_2$ ) bzw. $m^3/s$ ( $k_{-2}$ )
$k_3, k_{-3}$	Geschwindigkeitskonstanten der Rekombinationsreaktion in $m^3/s$ ( $k_3$ ) bzw. 1/s ( $k_{-3}$ )
$i_w$	Wandstromdichte in $A/m^2$
$\rho_{wD}$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand für vollständig ausgebildete Doppelschicht in $C/m^3$
$\rho_w$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand in $C/m^3$
$K$	Geschwindigkeitskonstante in m/s
$n_{N0}$	Konzentration negativer Ionen in der Flüssigkeit (weit entfernt von der Feststoffwand) in $1/m^3$
$e_0$	Elementarladung in C
$n_{ND}$	Anionenkonzentration für vollständig ausgebildete Doppelschicht in $1/m^3$
$V$	Flüssigkeitsvolumen, das mit Feststoffoberfläche $A$ in Kontakt steht, in $m^3$
$A$	Kontaktfläche an der Feststoffwand in $m^2$

Aktuelle Grundlagenforschung bezüglich des zugrundeliegenden physikalisch-chemischen Prozesses führte zu Neuerungen im Korrosionsmodell. Wie bereits erwähnt ging man ursprünglich davon aus, dass die Ionen  $C_s^+$  in ausreichender Menge vorhanden sind, sodass die Reaktion in **Gleichung 2-7** durch einen Mangel an  $C_s^+$  nicht eingeschränkt wird. Man könnte diesen Umstand auch so formulieren, dass die Menge der Ionen  $C_s^+$  und somit auch der Faktor  $K$  konstant sind [Cab06] S. 4. Jedoch zeigten verschiedene Untersuchungen, bei denen Flüssigkeiten Kapillare oder Kanäle durchströmten, dass der Faktor  $K$  in **Gleichung 2-8** keine Konstante sein kann. In [Pai08] wird dies anhand von Experimenten mit n-Heptan, das durch ein Edelstahlkapillar strömt, demonstriert. In [Ela09] und [Cab06] zeigte sich dies anhand der Ergebnisse an einem Pressboardkanal, der von Isolieröl durchströmt wird. Diese Untersuchungen wiesen nach, dass der Faktor  $K$  in Abhängigkeit der Wandschubspannung zunimmt. Dies bedeutet wiederum, dass die Menge der Ionen  $C_s^+$  von der Wandschubspannung abhängt. Somit sind der Korrosionsprozess und damit auch die resultierende Wandstromdichte  $i_w$  in **Gleichung 2-8** nicht nur abhängig von der stattfindenden chemischen Reaktion an der Grenzfläche sondern auch von der Wandschubspannung [Cab06] S. 4, [Pai08] S. 3, [Ela09] S. 357. Die Wandschubspannung steht wiederum in direktem Zusammenhang mit der Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit, wie **Gleichung 2-10** ([Sig09] S. 17) für eine laminare Strömung und **Gleichung 2-11** ([Gro07] S. B-48) für eine turbulente Strömung darstellen. Das zugrundeliegende Koordinatensystem ist aus **Abbildung 2-1** ersichtlich. Die laminare und turbulente Strömungsform werden in **Kapitel 2.2.1** näher beschrieben.

$$\tau_l = \eta \cdot \frac{dv_z}{dx} = \nu \cdot \rho \cdot \frac{dv_z}{dx} \tag{Gleichung 2-10}$$

$$\tau_t = \eta \cdot \frac{dv_z}{dx} + \rho \cdot l^2 \cdot \left(\frac{dv_z}{dx}\right)^2 \tag{Gleichung 2-11}$$

Legende zu **Gleichung 2-10**, **Gleichung 2-11** und **Abbildung 2-1** [Sig09] S. 17, S. 21 und S. 22, [Gro07] S. B-48:

$\tau_l$	Wandschubspannung bei laminarer Strömung in Pa
$\tau_t$	Wandschubspannung bei turbulenter Strömung in Pa, Formel nach Prandtl und Kármán
$\eta$	dynamische Viskosität in $Pa \cdot s = kg/(m \cdot s)$
$\nu$	kinematische Viskosität in $m^2/s$
$\frac{dv_z}{dx}$	Geschwindigkeitsgefälle, Scherrate in 1/s
$\rho$	Dichte in $kg/m^3$
$l$	freie Weglänge eines Teilchens in m

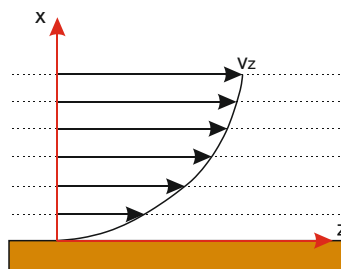


Abbildung 2-1: Nichtlineare Geschwindigkeitsverteilung in einer bewegten Flüssigkeit an einer ruhenden Wand, entsprechend [Sig09] S. 17



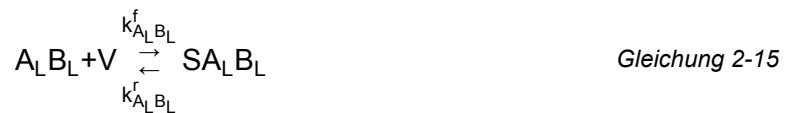
„Erweitertes“ Adsorptionsmodell

Das im Folgenden beschriebene „erweiterte“ Adsorptionsmodell wurde von A. P. Washabaugh und M. Zahn in [Was97] angegeben. Das Modell wurde grundsätzlich für das Materialpaar Mineralöl – Pressboard entwickelt [Was97]. Es stellt eine Kombination des „klassischen“ Adsorptionsmodells nach H. L. Walmsley und G. Woodford und des Korrosionsmodells nach G. G. Touchard et al dar [Ela11] S. 29. Die Entwickler des „erweiterten“ Adsorptionsmodells A. P. Washabaugh und M. Zahn bemängelten am Korrosionsmodell vor allem, dass wichtige physikalische Prozesse wie die Desorption von Ladungen an der Grenzfläche nicht berücksichtigt werden [Was97] S. 688.

Beim „erweiterten“ Adsorptionsmodell wird wieder von Verunreinigungen in der Flüssigkeit ausgegangen, die entsprechend der Reaktion in **Gleichung 2-12** dissoziieren.



In weiterer Folge kann eine Adsorption der Ionen  $A_L^+$  und  $B_L^-$  sowie der neutralen Moleküle  $A_L B_L$  aus der Flüssigkeit an der Feststoffwand entsprechend **Gleichung 2-13** bis **Gleichung 2-15** auftreten. In den Gleichungen stellen  $V_+$ ,  $V_-$  und  $V$  freie Oberflächenplätze für die Ionen und Moleküle an der Feststoffoberfläche dar.  $SA_L^+$ ,  $SB_L^-$  und  $SA_L B_L$  bezeichnen das Adsorbat.



An der Feststoffoberfläche können die adsorbierten Ionen dann einer Redoxreaktion unterliegen. Dabei tritt meist ein Elektronenaustausch gemäß **Gleichung 2-16** und **Gleichung 2-17** auf. Es wird angenommen, dass das adsorbierte Molekül  $A_L B_L$  nicht von diesen Reaktionen betroffen ist.



Somit entstehen die neutralen, adsorbierten Stoffe  $SA_L$  und  $SB_L$  an der Feststoffoberfläche. Diese können dann wieder gemäß **Gleichung 2-18** und **Gleichung 2-19** desorbiert werden.





Entsprechend diesen Reaktionen enthält die Flüssigkeit somit neben den bereits vorhandenen Ionen  $A_L^+$  und  $B_L^-$  und dem Molekül  $A_L B_L$  die neu gebildeten Stoffe  $A_L$  und  $B_L$  [Was97] S. 689 - S. 690, [Ela11] S. 29 – S. 30.

Legende für **Gleichung 2-12 bis Gleichung 2-19** [Was97] S. 689 – S. 690 und S. 693, [Ela11] Notation:

$A_L B_L$	chemische Verbindung, Verunreinigung in der Flüssigkeit
$A_L^+, B_L^-$	Ionen in der Flüssigkeit
$V_+, V_-, V$	freie Oberflächenplätze der Ionen und Moleküle an der Feststoffwand
$SA_L^+, SB_L^-, SA_L B_L$	Adsorbat
$e^-$	Elektron
$SA_L, SB_L$	neutrale, adsorbierte Stoffe an der Feststoffwand
$A_L, B_L$	neutrale Stoffe in der Flüssigkeit
$k_d$	Geschwindigkeitskonstante der Dissoziation in 1/s
$k_r$	Geschwindigkeitskonstanten der Rekombination in $m^3/s$
$k_+, k_-, k_{ALBL}^f$	Geschwindigkeitskonstanten für die Hinreaktion (f = forward) in $m^3/s$
$k_{SA_L}^f, k_{SB_L}^f, k_{A_L}^f, k_{B_L}^f$	
$k_+, k_-, k_{ALBL}^r$	Geschwindigkeitskonstanten für die Rückreaktion (r = reverse) in 1/s
$k_{SA_L}^r, k_{SB_L}^r, k_{A_L}^r, k_{B_L}^r$	

**Gleichung 2-13 bis Gleichung 2-19** zeigen die möglichen Reaktionen des Moleküls  $A_L B_L$  und der Ionen  $A_L^+$  und  $B_L^-$  mit der Feststoffoberfläche. Zum Aufbau der elektrischen Doppelschicht kommt es jedoch erst durch die spezifische Adsorption einer der beiden Ionenarten an der Feststoffoberfläche -  $A_L^+$  oder  $B_L^-$ . Die entgegengesetzt geladene Ionenart verbleibt in der Flüssigkeit. Somit baut sich eine elektrische Spannung zwischen der Grenzfläche und der Flüssigkeit auf. Die Flüsse für positive und negative Ionen an der Grenzfläche können über die Randbedingung in **Gleichung 2-20** und **Gleichung 2-21** dargestellt werden [Was97] S. 691 – S. 692.

$$\hat{n}_s \cdot \vec{\Gamma}_{A_L^+}^b = k_+^f \cdot n_{A_L^+}^b \cdot \sigma_{V^+} - k_+^r \cdot \sigma_{A_L^+} \quad \text{Gleichung 2-20}$$

$$\hat{n}_s \cdot \vec{\Gamma}_{B_L^-}^b = k_-^f \cdot n_{B_L^-}^b \cdot \sigma_{V^-} - k_-^r \cdot \sigma_{B_L^-} \quad \text{Gleichung 2-21}$$

Legende für **Gleichung 2-20 und Gleichung 2-21** [Was97] S. 690 – S. 693, [Wal81] S. 1761 – S. 1762, [Ela11] Notation:

$\hat{n}_s$	Einheitsvektor, der normal zur Feststoffwand steht und von der Flüssigkeit in Richtung Feststoff zeigt
$\vec{\Gamma}_{A_L^+}^b, \vec{\Gamma}_{B_L^-}^b$	Ionenflüsse für die positiven Ionen $A_L^+$ und die negativen Ionen $B_L^-$ an der Grenzfläche in $1/(m^2s)$
$k_+, k_-$	Geschwindigkeitskonstanten für die Hinreaktion (Adsorption) in $m^3/s$
$k_+^r, k_-^r$	Geschwindigkeitskonstanten für die Rückreaktion (Desorption) in 1/s
$n_{A_L^+}^b, n_{B_L^-}^b$	Konzentration der negativen und positiven Ionen in der Flüssigkeit an der Grenzfläche in $1/m^3$
$\sigma_{V^+}, \sigma_{V^-}$	Dichte der freien Oberflächenplätze für positive und negative Ionen in $1/m^2$
$\sigma_{A_L^+}, \sigma_{B_L^-}$	Dichte der adsorbierten Ionen $A_L^+$ und $B_L^-$ auf der Oberfläche in $1/m^2$

Im Gleichgewichtszustand – bei voll ausgebildeter Doppelschicht - werden die Ionenflüsse an der Grenzfläche zu Null. Die Polaritätsverhältnisse in Flüssigkeit und Feststoff können über die Geschwindigkeitskonstanten für den Gleichgewichtszustand  $k_+$  und  $k_-$  in **Gleichung 2-22** und **Gleichung 2-23** beschrieben werden [Was97] S. 692.

$$k_+ = \frac{k_+^f}{k_+^r} \quad \text{Gleichung 2-22}$$

$$k_{-} = \frac{k_{-}^f}{k_{-}^r}$$

Gleichung 2-23

Je nach dem Verhältnis der Geschwindigkeitskonstanten  $k_{+}$  und  $k_{-}$  gilt [Was97] S. 693:

- $k_{+} = k_{-}$ :** Es gibt keine spezifische Adsorption. Ionen beider Polaritäten werden zu gleichen Teilen adsorbiert.
- $k_{+} > k_{-}$ :** Es findet eine spezifische Adsorption positiver Ionen statt, wodurch sich die negativen Ionen in der Flüssigkeit ansammeln.
- $k_{+} < k_{-}$ :** Es findet eine spezifische Adsorption von negativen Ionen statt. Die positiven Ionen häufen sich in der Flüssigkeit an.

Herrscht ein Ungleichgewicht an der Grenzfläche besteht ein Ionenfluss an der Feststoffwand und die Wandstromdichte  $i_w$  kann laut **Gleichung 2-24<sup>1</sup>** angegeben werden. Bei **Gleichung 2-24** wird davon ausgegangen, dass sich die Reaktionsraten für positive und negative Ionen  $k_{+}^f$  und  $k_{-}^f$  bzw.  $k_{+}^r$  und  $k_{-}^r$  nicht stark unterscheiden. Daher wird in weiterer Folge nur mehr  $k^f$  und  $k^r$  geschrieben. Die Konstante  $\xi$  ist laut **Gleichung 2-25** definiert. Wenn  $k^r$  in **Gleichung 2-24** Null gesetzt wird, dann fällt die Desorption weg [Was97] S. 693. In diesem Fall entspricht der für die Wandstromdichte erhaltene Ausdruck in **Gleichung 2-24** grundsätzlich jenem des Korrosionsmodells in **Gleichung 2-8** [Ela11] S. 30.

$$i_w = k^f \cdot (\xi - \rho_w) + k^r \cdot \sigma_O \quad \text{Gleichung 2-24}$$

$$\xi = \rho_{wD} - \frac{k^r}{k^f} \cdot \sigma_{Od} \quad \text{Gleichung 2-25}$$

Legende für **Gleichung 2-22 bis Gleichung 2-25** [Was97] S. 690 und S. 693, [Ela11] Notation:

$k_{+}^f, k_{-}^f$	Geschwindigkeitskonstanten für die Hinreaktion (Adsorption) in $m^3/s$
$k_{+}^r, k_{-}^r$	Geschwindigkeitskonstanten für die Rückreaktion (Desorption) in $1/s$
$k^f$	Geschwindigkeitskonstante der Hinreaktion in $m/s$
$k^r$	Geschwindigkeitskonstante der Rückreaktion in $1/s$
$i_w$	Wandstromdichte in $A/m^2$
$\xi$	Konstante, die durch unterschiedliche Reaktionsraten der positiven und negativen Ladungsträger bedingt ist in $C/m^3$
$\rho_w$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand in $C/m^3$
$\rho_{wD}$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand bei vollständig ausgebildeter Doppelschicht in $C/m^3$
$\sigma_O$	Oberflächenladungsdichte in $C/m^2$
$\sigma_{Od}$	Oberflächenladungsdichte bei vollständig ausgebildeter Doppelschicht in $C/m^2$

Aktuelle Forschungstätigkeit im Bereich der elektrostatischen Aufladung flüssig/ fester Isoliersysteme wendet häufig Computersimulationen an, um das Aufladungsphänomen nachzubilden. Die erstellten Simulationen basieren dabei sowohl auf dem Korrosionsmodell, siehe z.B. [Ela11\_a], als auch auf dem "erweiterten" Adsorptionsmodell, siehe z.B. [Cab06\_a].

### 2.1.2 Die elektrischen Doppelschicht

In diesem Kapitel werden Modellvorstellungen der elektrischen Doppelschicht dargestellt. Danach wird auf die Ladungsverteilung in der Flüssigkeit im Detail eingegangen. Weiters werden wichtige Parameter der elektrischen Doppelschicht beschrieben.

<sup>1</sup> Vorzeichen laut [Ela11] S. 30

Modellvorstellungen der elektrischen Doppelschicht

Die elektrische Doppelschicht wird aus einer Schicht von Ladungen einer Polarität auf der Feststoffoberfläche und einer Schicht von gleich vielen Ladungen der entgegengesetzten Polarität in der Flüssigkeit gebildet [Atk06] S. 1033, [Wed12] S. 468 – S. 474. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Modelle für die elektrische Doppelschicht entwickelt, die sich vor allem auf die Grenzfläche der Materialkombination Quecksilber – Elektrolyt bezogen [Dör94] S. 115. Die Ladungsverteilung gemäß einer Doppelschicht wird jedoch auch an der Grenzfläche zwischen den flüssigen und festen Isolierstoffen in einem Transformator als Modellvorstellung herangezogen, siehe z.B. [Nel94], [Lem96], [Ela11]. Drei wesentliche Modelle der elektrischen Doppelschicht sind in **Abbildung 2-2** dargestellt. Diese werden im Folgenden näher beschrieben. Dabei wird der einfache Fall einer ebenen Grenzfläche betrachtet.

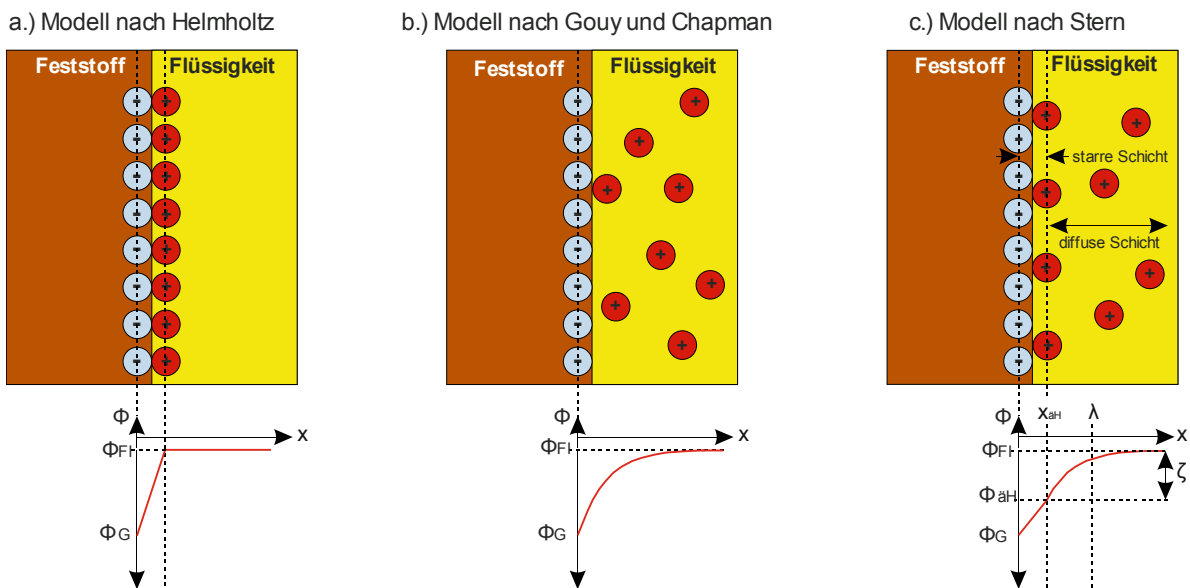


Abbildung 2-2: Modelle der elektrischen Doppelschicht, in Anlehnung an [Wed12] S. 470 – S. 471, [Moo76] S. 603 – S. 604

Legende zu **Abbildung 2-2** [Wed12] S. 468 - 474, [Ela11] Notation:

$\Phi$	elektrisches Potential in V
$\Phi_{FI}$	elektrisches Potential der Flüssigkeit in V
$\Phi_{\text{aH}}$	elektrisches Potential an äußerer Helmholtzfläche in V
$\Phi_G$	elektrisches Potential an der Grenzfläche in V
$x$	Abstand zur Grenzfläche in m
$x_{\text{aH}}$	Abstand der äußeren Helmholtzfläche zur Grenzfläche in m
$\zeta$	Zeta-Potential in V
$\lambda$	Debye-Länge in m

Das trivialste Modell wurde von Helmholtz im Jahre 1879<sup>2</sup> angegeben, siehe **Abbildung 2-2 a.)**. Nach diesem Modell ist die Feststoffoberfläche von Ladungen der einen Polarität besetzt. Die Ladungen entgegengesetzter Polarität streben möglichst nahe an die Oberflächenladungen heranzukommen und bringen eine starre Schicht in der Flüssigkeit hervor. Die Anordnung der Doppelschicht nach Helmholtz entspricht jener eines Plattenkondensators. Wie aus **Abbildung 2-2 a.)** ersichtlich, besteht ein linearer Potentialverlauf zwischen den zwei Ladungsschichten. Nachteilig beim Modell nach Helmholtz ist, dass dieses die thermische Bewegung der Ladungsträger in der Flüssigkeit nicht berücksichtigt. Diese verhindert, dass eine starre Schicht entsteht [Wed12] S. 469 – S. 470. Die Gültigkeit dieses Modells ist daher eingeschränkt. Es kann zum Beispiel beim absoluten Nullpunkt angewandt werden, an dem keine thermische Bewegung stattfindet [Dör94] S. 117.

<sup>2</sup> Primärquelle: [Hel79]

Das Modell nach Gouy (1910)<sup>3</sup> und Chapman (1913)<sup>4</sup> nimmt keine starre sondern eine diffuse Schicht von Ladungen in der Flüssigkeit an, siehe **Abbildung 2-2 b.)** [Wed12] S. 470. In diesem Fall besteht die zweite Kondensatorplatte nicht aus einer starren Schicht sondern aus einer "Raumladungswolke", wobei die Ladungsdichte mit dem Abstand zur Feststoffoberfläche geringer wird. Wie aus **Abbildung 2-2 b.)** ersichtlich, besteht in diesem Fall ein exponentieller Potentialverlauf [Dör94] S. 117 – S. 118. Ein Nachteil dieses Modells ist, dass die Ladungen als Punktladungen angenommen werden, sodass sie sich beliebig nahe an die Grenzfläche bewegen können [Wed12] S. 470. Dies ergibt zu hohe Ladungsträgerkonzentrationen nahe der Grenzfläche [Moo76] S. 606.

Im Modell nach Stern (1924)<sup>5</sup> in **Abbildung 2-2 c.)** werden die beiden vorhergehenden Modelle kombiniert [Wed12] S. 471. Das Modell nach Stern beinhaltet in der Flüssigkeit eine starre und eine diffuse Schicht. Die starre Schicht befindet sich zwischen den Ladungen in der Feststoffoberfläche und der sogenannten äußere Helmholtz-Fläche, siehe **Abbildung 2-2 c.)**. Im Bereich der starren Schicht besteht ein linearer Potentialverlauf analog zum Modell nach Helmholtz. Die diffuse Schicht erstreckt sich von der äußeren Helmholtz-Fläche in Richtung Flüssigkeit. In der diffusen Schicht besteht wieder ein exponentieller Potentialverlauf analog zum Modell nach Gouy und Chapman, der meist als Zeta-Potential  $\xi$  bezeichnet wird [Wed12] S. 471 – S. 472. Die Ladungen in der starren Schicht können durch eine Flüssigkeitsströmung nicht abtransportiert werden [Lem96] S. 8. Die Ladungen in der diffusen Schicht werden jedoch durch eine Strömung abgetragen [Tou96] S. 1051. Auch wenn das Modell der Doppelschicht im Laufe der Zeit weiterentwickelt wurde, wird für die Betrachtung der Ladungsverteilung zwischen den flüssigen und festen Isolierstoffen im Transformator das Modell nach Stern herangezogen, siehe z.B. [Lem96] S. 8 – S. 9, [Ela11\_a] S. 1467.

Zur mathematischen Beschreibung der Doppelschicht wurden im Laufe der Zeit verschiedene Größen verwendet. Neben dem bereits erwähnten Zeta-Potential  $\zeta$ , wurden unter anderem auch die Debye-Länge  $\lambda$ , die Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand bei voll ausgebildeter Doppelschicht  $\rho_{wD}$  und die Relaxationszeit  $\tau$  verwendet [Ela09] S. 354. Auf die Debye-Länge  $\lambda$ , die Raumladungsdichte  $\rho_{wD}$  und die Relaxationszeit  $\tau$  wird im Folgenden näher eingegangen.

### Ladungsverteilung in der Flüssigkeit

Die Bewegung von Ladungen in der diffusen Schicht der Flüssigkeit und die resultierende Stromdichte hängen grundsätzlich von folgenden Einflüssen ab [Umd93] S. 55, [Sch90] S. 35 – S. 36:

- Diffusion aufgrund von Konzentrationsunterschieden (Diffusionsstromdichte)
- Elektrisches Feld aufgrund von schwankenden Raumladungsdichten (Leistungsstromdichte)
- Strömung der Flüssigkeit (Konvektionsstromdichte)

**Gleichung 2-26** stellt die resultierende Stromdichte in der Flüssigkeit für eine Ionenart (positiv oder negativ) dar [Umd93] S. 55.

$$\vec{i}_i = \underbrace{-D_i \cdot \nabla \rho_i}_{\text{Diffusionsstromdichte}} + \underbrace{\kappa_i \cdot \vec{E}}_{\text{Leistungsstromdichte}} + \underbrace{\rho_i \cdot \vec{v}}_{\text{Konvektionsstromdichte}} \tag{Gleichung 2-26}$$

Legende für **Gleichung 2-26** [Umd93] S. 132 - 134:

$\vec{i}_i$	Stromdichte einer Ionenart in A/m <sup>2</sup>
$D_i$	Diffusionskonstante einer Ionenart in m <sup>2</sup> /s
$\rho_i$	Ladungsdichte einer Ionenart in C/m <sup>3</sup>
$\kappa_i$	spezifische Leitfähigkeit einer Ionenart in 1/Ωm

<sup>3</sup> Primärquelle: [Gou10]  
<sup>4</sup> Primärquelle: [Cha13]  
<sup>5</sup> Primärquelle: [Ste24]

$\vec{E}$	vektorielle elektrische Feldstärke in V/m
$\vec{v}$	vektorielle Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Im Falle einer ruhenden Flüssigkeit ( $\vec{v}=0$ ) wird die Konvektionsstromdichte in **Gleichung 2-26** zu Null. Somit wird die resultierende Ladungsverteilung in der elektrischen Doppelschicht für den Gleichgewichtszustand ( $\vec{i}_i = 0$ ) ohne Flüssigkeitsströmung nur von der Diffusion und dem wirkenden elektrischen Feld bestimmt [Nel94] S. 17.

Von **Gleichung 2-26** ausgehend lässt sich **Gleichung 2-27** aufstellen. Die Ableitung ist in [Umd93] S. 55 – S. 57 anschaulich dargestellt. Diese Differentialgleichung beschreibt die Raumladungsverteilung in einer Isolierflüssigkeit für den stationären Zustand ( $\frac{d\rho}{dt}=0$ ) bei einer Flüssigkeitsströmung. Die Lösung der Differentialgleichung liefert somit das Raumladungsprofil [Sch90] S. 40.

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 = D \cdot \Delta\rho - \frac{\rho}{\tau} - \vec{v} \cdot \nabla\rho \quad \text{Gleichung 2-27}$$

Legende für **Gleichung 2-27** [Umd93] S. 132 - 134:

$\rho$	Ladungsdichte in C/m <sup>3</sup>
$D$	mittlere Diffusionskonstante in m <sup>2</sup> /s
$\vec{v}$	vektorielle Strömungsgeschwindigkeit in m/s
$\tau$	Relaxationszeitkonstante in s

### Debye-Länge $\lambda$

Im Gleichgewichtszustand bei ruhender Flüssigkeit gibt die Debye-Länge  $\lambda$  an, wie weit die Ladungsverteilung der elektrischen Doppelschicht in die Flüssigkeit hineinreicht [Nel94] S. 17. Sie wird auch als Doppelschichtdicke bezeichnet. Die Debye-Länge gibt den Abstand zur Grenzfläche an, bei dem das elektrische Potential bzw. die Raumladungsdichte auf 1/e des Wertes bei der Wand abgesunken ist, siehe auch **Abbildung 2-2 c.)** [Gav61] S. 379 – S. 380. Ausgegangen wird dabei von der Raumladungsdichte  $\rho_w$  nahe der Feststoffwand, die hier ohne die starre Schicht bestehen würde [Umd93] S. 38. Die Debye-Länge kann laut **Gleichung 2-28**<sup>6</sup> [Was97] S. 692 und **Gleichung 2-29**<sup>7</sup> [Gav61] S. 380 beschrieben werden.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_{FI} \cdot k \cdot T}{2 \cdot e_0^2 \cdot z^2 \cdot n_0}} \quad \text{Gleichung 2-28}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_{FI} \cdot D}{K_{FI}}} \quad \text{Gleichung 2-29}$$

Legende für **Gleichung 2-28** und **Gleichung 2-29** [Gav61] S. 379 – S. 380, [Ela11] Notation und S. 21, [Was97] S. 692:

$\lambda$	Debye-Länge in m
$\epsilon_{FI}$	Permittivität der Flüssigkeit in (As)/(Vm), $\epsilon_{FI} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$
$k$	Boltzmannkonstante in J/K
$T$	absolute Temperatur in K
$e_0$	Elementarladung in C
$z$	Ionenwertigkeit ( $z_+ = -z_- = z$ )
$n_0$	Ionenkonzentration in der Flüssigkeit in 1/m <sup>3</sup> ( $n_+ = n_- = n_0$ )
$D$	mittlere Diffusionskonstante in m <sup>2</sup> /s
$K_{FI}$	spezifische Leitfähigkeit der Flüssigkeit in 1/( $\Omega$ m)

<sup>6</sup> ursprünglich angegeben von Debye und Hückel in [Deb23] für starke Elektrolyte

<sup>7</sup> ursprünglich angegeben von Frenkel in [Fre41] für die Doppelschicht bei Halbleiter - Metall

Entsprechend der Boltzmannverteilung liegen 87 % der Ladungsträger der diffusen Schicht zwischen der starren Schicht und einer Ebene im Abstand  $2 \cdot \lambda$  zur Grenzfläche. 95 % befinden sich zwischen der starren Schicht und einer Ebene im Abstand von  $3 \cdot \lambda$  zur Grenzfläche [Pai01] S. 172. Wie aus **Gleichung 2-29** ersichtlich ist, nimmt die Debye-Länge mit steigender Leitfähigkeit der Flüssigkeit ab. Typische Werte für die Debye-Länge dielektrischer Flüssigkeiten liegen bei 1 – 50  $\mu\text{m}$  [Nel94] S. 17. Beispielsweise wurde für die Simulationen der elektrischen Doppelschicht in [Ela11\_a] S. 1467 für Transformatoröl bei 20 °C eine Debye-Länge von 31,4  $\mu\text{m}$  gewählt.

### **Relaxationszeitkonstante $\tau$**

In verschiedenen Quellen in der Literatur werden die Ausdrücke Relaxationszeit und Relaxationszeitkonstante für die Bezeichnung der gleichen Größe herangezogen, z.B. [Kli58], [Ela11], [Umd93], [Küc09]. Im Folgenden wird nur die Bezeichnung Relaxationszeitkonstante verwendet.

Allgemein beschreibt die Relaxationszeitkonstante  $\tau$  eine Zeit, mit der ein physikalisches System nach einer Störung wieder seinem Gleichgewichtszustand entgegenstrebt. Zahlreiche Relaxationsvorgänge können durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden [Sch91] S. 1745 – S. 1746. Im Bereich der Elektrotechnik wird beispielsweise die Auf- und Entladung eines Kondensators durch die Zeitkonstante laut **Gleichung 2-30** charakterisiert [Fis94] S. 87 – S. 90.

$$\tau = R \cdot C \quad \text{Gleichung 2-30}$$

Für einen Plattenkondensator mit einer Isolierflüssigkeit als Dielektrikum beschreibt **Gleichung 2-31** die Kapazität  $C$  des Plattenkondensators und **Gleichung 2-32** den elektrischen Widerstand  $R$  zwischen den Kondensatorplatten. Durch Einsetzen dieser beiden Gleichungen in **Gleichung 2-30** ergibt sich für die Relaxationszeitkonstante  $\tau$  der Ausdruck in **Gleichung 2-33**. Wie aus **Gleichung 2-33** ersichtlich, wird die Relaxationszeitkonstante nicht mehr durch die Geometrie des Kondensators bestimmt sondern nur von den Stoffeigenschaften des Dielektrikums [Kli58] S. 38 – S. 39.

$$C = \frac{\epsilon_{FI} \cdot A}{l} \quad \text{Gleichung 2-31}$$

$$R = \frac{l}{A \cdot \kappa_{FI}} \quad \text{Gleichung 2-32}$$

$$\tau = \frac{\epsilon_{FI}}{\kappa_{FI}} \quad \text{Gleichung 2-33}$$

Legende zu **Gleichung 2-30** bis **Gleichung 2-33** [Kli58] S. 38 – S. 39 und S. 44, [Ela11] Notation:

$\tau$	Relaxationszeitkonstante in s
$C$	Kapazität eines Plattenkondensators in F
$R$	elektrischer Widerstand zwischen den Platten des Kondensators in $\Omega$
$l$	Abstand der Platten des Kondensators in m
$A$	Plattenfläche des Kondensators in $\text{m}^2$
$\kappa_{FI}$	spezifische Leitfähigkeit der Flüssigkeit in $1/(\Omega\text{m})$
$\epsilon_{FI}$	Permittivität der Flüssigkeit in $(\text{As})/(\text{Vm})$ , $\epsilon_{FI} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

Da auch die elektrische Doppelschicht mit einem Kondensator verglichen werden kann, kann die Relaxationszeitkonstante laut **Gleichung 2-33** auch für die zeitliche Beschreibung des Aufbaus ihrer Ladungsverteilung angewandt werden. Setzt man **Gleichung 2-33** in **Gleichung 2-29** für die Debye-Länge ein und formt auf die Relaxationszeitkonstante um, so erhält man **Gleichung 2-34**. Aus diesem formellen Zusammenhang ist ersichtlich, dass die Relaxationszeitkonstante auch so gedeutet werden kann, dass sie die erforderliche Zeit für die Diffusion der an der Grenzfläche gebildeten Ladungsträger bis zur Debye-Länge  $\lambda$  beschreibt. Es ist wichtig hervorzuheben, dass die Relaxationszeitkonstante nicht die Zeitkonstante für die Bildung der Ladungsträger durch den auf-

tretenden physikalisch-chemischen Prozess an der Grenzschicht beinhaltet. Dieser Prozess wird durch eine eigene Zeitkonstante beschrieben [Ela11] S. 23.

$$\tau = \frac{\lambda^2}{D} \quad \text{Gleichung 2-34}$$

Legende zu **Gleichung 2-34** [Ela11] Notation:

- $\tau$  Relaxationszeitkonstante in s
- $\lambda$  Debye-Länge in m
- $D$  mittlere Diffusionskonstante in  $m^2/s$

Im Bereich der elektrostatischen Aufladung flüssig/ fester Isoliersysteme wird die Relaxationszeitkonstante auch häufig angewandt, um den Entladevorgang einer zuvor elektrostatisch aufgeladenen Flüssigkeit zu beschreiben. Praktischen Bezug hat dies z.B. wenn die Entladung von Treibstoff in einem metallischen Tank ([Kli58] S. 94 – S. 110) oder die Entladung von Isolierflüssigkeit in einem Transformatorkessel betrachtet wird. Geht man davon aus, dass die Flüssigkeitsströmung und die Diffusion der Ladungen vernachlässigbar sind, dann wird die Entladung eines Flüssigkeitsvolumens durch **Gleichung 2-35** beschrieben, siehe z.B. [Umd93] S. 58.

$$\rho = \rho_{t=0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Gleichung 2-35}$$

Legende zu **Gleichung 2-35** [Umd93] S. 134:

- $\rho$  Ladungsdichte in der Flüssigkeit in  $C/m^3$
- $\rho_{t=0}$  Ladungsdichte zu Beginn der Entladung in  $C/m^3$
- $t$  Zeit in s
- $\tau$  Relaxationszeitkonstante in s

**Tabelle 2-1** gibt einen Überblick über die Relaxationszeitkonstanten verschiedener Isolierflüssigkeiten für Transformatoren bei 30 °C und 90 °C. In der Tabelle sind auch die relative Permittivität  $\epsilon_r$  und die Leitfähigkeit  $\kappa_{FL}$  dieser Flüssigkeiten angegeben. Die Werte stammen aus den experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Aus den gemessenen Werten für die Permittivität und Leitfähigkeit wurden über **Gleichung 2-33** die in **Tabelle 2-1** dargestellten Relaxationszeitkonstanten  $\tau$  der verschiedenen Isolierflüssigkeiten berechnet. Man kann erkennen, dass Mineralöl aufgrund seines höheren spezifischen Widerstandes die höchsten Relaxationszeitkonstanten aufweist. Weiters ist ersichtlich, dass ein hoher Temperatureinfluss auf die Zeitkonstante durch die damit verbundene Reduktion des spezifischen Widerstandes besteht.

Tabelle 2-1: Relative Permittivität, Leitfähigkeit und resultierende Relaxationszeitkonstante verschiedener Isolierflüssigkeiten

Isolierflüssigkeit	30 °C			90 °C		
	$\epsilon_r$	$\kappa_{FL}$	$\tau$	$\epsilon_r$	$\kappa_{FL}$	$\tau$
	-	$1/(\Omega m)$	s	-	$1/(\Omega m)$	s
Mineralöl	2,17	$5 \cdot 10^{-14}$	384	2,09	$1,5 \cdot 10^{-12}$	12
Synthetischer Ester	3,19	$7,3 \cdot 10^{-12}$	3,9	3	$1,4 \cdot 10^{-10}$	0,2
Natürlicher Ester	3,1	$7,5 \cdot 10^{-12}$	3,6	2,85	$8,4 \cdot 10^{-11}$	0,3

### Raumladungsprofil $\rho$ in der Flüssigkeit

Die elektrische Doppelschicht bewirkt eine bestimmte Raumladungsverteilung in der Flüssigkeit. Diese ist abhängig von der Anordnung zwischen dem Feststoff und der Flüssigkeit. Um dies zu veranschaulichen wird im Folgenden die Raumladungsdichte an einer ebenen Fläche, zwischen



zwei parallelen Platten und in einem Rohr dargestellt. Dabei wird noch immer von einer ruhenden Flüssigkeit ausgegangen.

Der mathematische Zusammenhang zwischen Raumladungsdichte und Abstand von der Grenzfläche ist für die drei Anordnungen in **Gleichung 2-36** bis **Gleichung 2-38** laut [Tou96] S. 1053 (entsprechend [Bou57] und [Tou75]) angegeben. Die Gleichungen gehen von einer geringen Raumladungsdichte in der Flüssigkeit aus [Tou96] S. 1052. Die drei betrachteten Anordnungen und das zugrundeliegende Koordinatensystem sind in **Abbildung 2-3** skizziert. Es ist anzumerken, dass **Gleichung 2-37** und **Gleichung 2-38** gegenüber den Darstellungen in [Tou96] umgeformt wurden, sodass alle drei Gleichungen von einem Koordinatensystemursprung bei der Feststoffwand ausgehen. Weiters ist **Gleichung 2-38** ursprünglich in Zylinderkoordinaten angegeben. Da alle drei Anordnungen miteinander verglichen werden sollen, wird jedoch bei allen die Raumladungsverteilung entlang den Schnittebenen in **Abbildung 2-3** betrachtet.

Die Anordnung zweier paralleler Platten in **Abbildung 2-3** kann für einen Strömungskanal angewandt werden, wenn in **Abbildung 2-3** gilt  $a \ll d$ , siehe z.B. [Cab06] S. 1. Die Raumladungsdichte nahe der Wand  $\rho_w$  in **Gleichung 2-36** bis **Gleichung 2-38** entspricht wieder jener Raumladungsdichte, welche ohne eine starre Schicht auf der Feststoffoberfläche bestehen würde [Umd93] S. 38.

Ebene Fläche:

$$\rho(x) = \rho_w \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)} \quad \text{Gleichung 2-36}$$

Zwei parallele Flächen:

$$\rho(x) = \rho_w \cdot \frac{\cosh\left(\frac{x-a}{\lambda}\right)}{\cosh\left(\frac{a}{\lambda}\right)} \quad \text{Gleichung 2-37}$$

Rohr:

$$\rho(x) = \rho_w \cdot \frac{I_0\left(\frac{x-R}{\lambda}\right)}{I_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)} \quad \text{Gleichung 2-38}$$

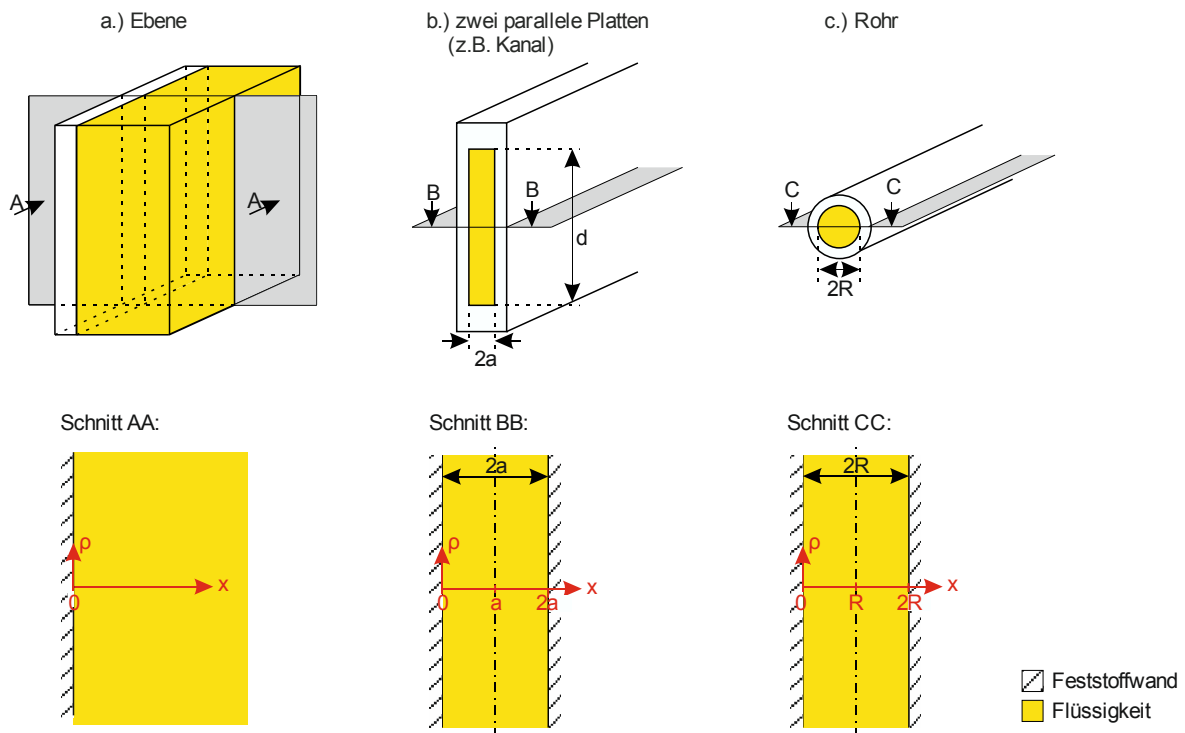


Abbildung 2-3: Verschiedene Anordnungen zwischen Flüssigkeit und Feststoff, in Anlehnung an [Bou57] S. 1012, [Cab06] S. 1, [Tou96] S. 1053 – S. 1055

Wenn man vom Gleichgewichtszustand bei vollständig ausgebildeter Doppelschicht ausgeht, dann gilt  $\rho_w = \rho_{wD}$  [Tou96] S. 1053. Durch Einsetzen von  $\rho_w = \rho_{wD}$  in **Gleichung 2-36** bis **Gleichung 2-38** und Umformung auf  $\rho(x)/\rho_{wD}$ , ergibt sich die bezogene Raumladungsdichte in p.u. in **Gleichung 2-39** bis **Gleichung 2-41** für die drei betrachteten Anordnungen.

Ebene Fläche: 
$$\frac{\rho(x)}{\rho_{wD}} = e^{-\frac{x}{\lambda}}$$
 Gleichung 2-39

Zwei parallele Flächen: 
$$\frac{\rho(x)}{\rho_{wD}} = \frac{\cosh(\frac{x-a}{\lambda})}{\cosh(\frac{a}{\lambda})}$$
 Gleichung 2-40

Rohr: 
$$\frac{\rho(x)}{\rho_{wD}} = \frac{I_0(\frac{x-R}{\lambda})}{I_0(\frac{R}{\lambda})}$$
 Gleichung 2-41

Legende **Gleichung 2-36** bis **Gleichung 2-41** und **Abbildung 2-3** [Tou96] S. 1053, [Bou57] S. 1009 – S. 1011, [Ela11] Notation, [Cab06] S. 1:

$\rho(x)$	Verteilung der Raumladungsdichte in $C/m^3$
$\rho_w$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand in $C/m^3$
$\rho_{wD}$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand bei vollständig ausgebildeter Doppelschicht in $C/m^3$
$x$	Abstand von der Feststoffwand in m
$\lambda$	Debye-Länge in m
$a$	halber Abstand zwischen den Platten bzw. halbe Kanalbreite in m
$d$	Kanalhöhe in m
$R$	Rohrradius in m
$I_0$	modifizierte Besselfunktion nullter Ordnung

Die bezogene Raumladungsdichte wurde als Funktion des Abstandes von der Feststoffwand für alle drei Anordnungen berechnet. Bei den Berechnungen wurde die Debye-Länge  $\lambda$  mit  $31,4 \mu m$  gewählt - entsprechend [Ela11\_a] S. 1467. Es wurden verschiedene Fälle betrachtet, bei denen die halbe Kanalbreite  $a$  bzw. der Rohrradius  $R$  variiert wurden – ähnlich wie in [Bou57] S. 1013:

**Fall 1:**  $\lambda \gg R, a = 2 \mu m$   
Die Debye-Länge ist viel größer als der Rohrradius bzw. die halbe Kanalbreite.

**Fall 2:**  $\lambda = R, a = 31,4 \mu m$   
Die Debye-Länge ist gleich groß wie der Rohrradius bzw. die halbe Kanalbreite.

**Fall 3:**  $\lambda \ll R, a = 200 \mu m$   
Die Debye-Länge ist viel kleiner als der Rohrradius bzw. die halbe Kanalbreite.

Der Verlauf der bezogenen Raumladungsdichte  $\rho(x)/\rho_{wD}$  ist für Fall 1 in **Abbildung 2-4**, für Fall 2 in **Abbildung 2-5** und für Fall 3 in **Abbildung 2-6** dargestellt. In jeder der drei Abbildungen ist die bezogene Raumladungsdichte  $\rho(x)/\rho_{wD}$  für alle drei Anordnungen (ebene Fläche, Kanal, Rohr) mit einander verglichen.

Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass die höchste Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand besteht und mit dem Abstand zur Feststoffwand abnimmt, so wie es auch in der Literatur beschrieben wird, siehe z.B. [Ela11] S. 21 – S. 22. Der Abstand zwischen den Feststoffwänden steigt von **Abbildung 2-4** bis zu **Abbildung 2-6** hin an. Dies hat einen großen Einfluss auf die Raumladungsverteilung im Rohr und im Kanal. An der ebenen Fläche bleibt  $\rho(x)/\rho_{wD}$  natürlich unbeeinflusst, da die zweite Feststoffwand (rechts in den Abbildungen) für diese Anordnung fehlt.

Wenn die Debye-Länge  $\lambda$  viel größer ist als der Rohrradius  $R$  bzw. die halbe Kanalbreite  $a$  (Fall 1:  $\lambda \gg R, a$ , **Abbildung 2-4**), dann unterscheidet sich die Raumladungsverteilungen an der ebenen Fläche stark von jener im Rohr und im Kanal. Im Rohr und Kanal kommt es zu einer quasi homogenen Raumladungsverteilung über den Querschnitt. Der Vergleich von **Abbildung 2-4** (Fall 1:  $\lambda \gg R, a$ ) und **Abbildung 2-5** (Fall 2:  $\lambda = R, a$ ) zeigt, dass mit zunehmendem Abstand zwischen den Feststoffwänden die Raumladungsdichte in der Rohr- bzw. Kanalmitte abnimmt. Wenn nun die Debye-Länge  $\lambda$  viel kleiner ist als der Rohrradius  $R$  bzw. die halbe Kanalbreite  $a$  (Fall 3:  $\lambda \ll R, a$ , **Abbildung 2-6**), ergibt sich für alle drei Anordnungen von der Feststoffwand bis zur Rohr- bzw. Kanalmitte ein relativ gleicher Verlauf der Raumladungsdichte. Man könnte in diesem Fall die komplizierteren formellen Zusammenhänge für die Rohranordnung und die Kanalordnung durch die einfachere **Gleichung 2-39** für die ebene Fläche annähern [Bou57] S. 1013.

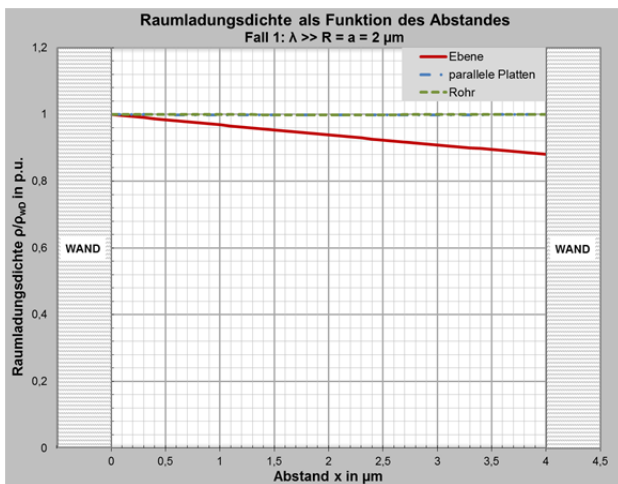


Abbildung 2-4: Bezogenen Raumladdungsdichte als Funktion des Wandabstandes für  $\lambda \gg R, a = 2 \mu\text{m}$

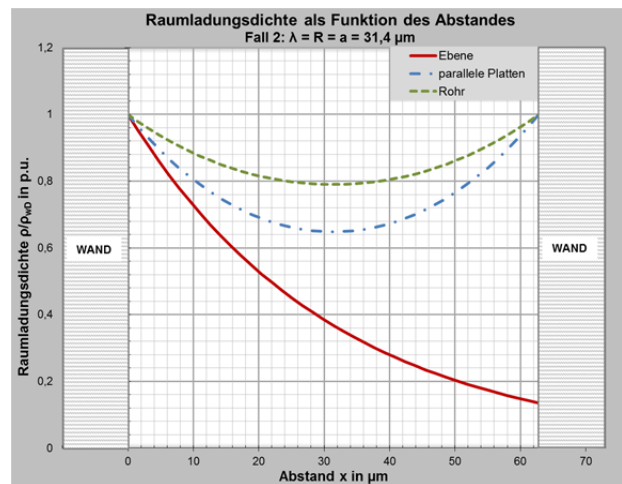


Abbildung 2-5: Bezogenen Raumladdungsdichte als Funktion des Wandabstandes für  $\lambda = R, a = 31,4 \mu\text{m}$

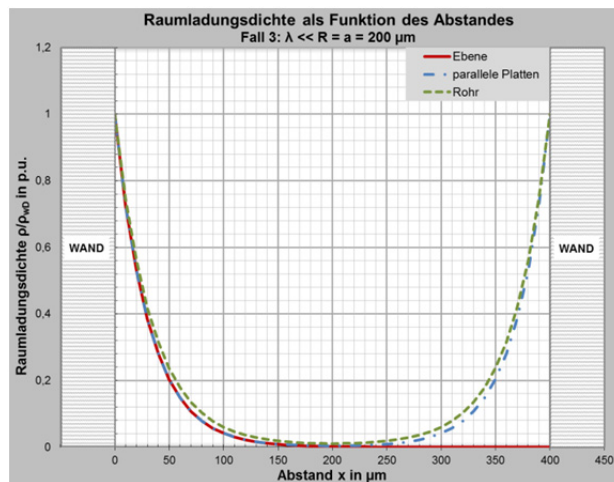


Abbildung 2-6: Bezogenen Raumladdungsdichte als Funktion des Wandabstandes für  $\lambda \ll R, a = 200 \mu\text{m}$

Zur mathematischen Beschreibung der elektrischen Doppelschicht wird, wie bereits erwähnt, unter anderem auch die Raumladungsdichte nahe der Wand bei vollständig ausgebildeter Doppelschicht  $\rho_{wD}$  herangezogen. Methoden um diese messtechnisch zu ermitteln, werden in [Ela09] vorgeschlagen.

## 2.2 Ladungsabtransport in einer Flüssigkeitsströmung

Sobald eine Flüssigkeitsströmung einsetzt, werden die Ladungen aus der diffusen Schicht der Doppelschicht abtransportiert [Tou96] S. 1051. Dadurch werden die positiven und negativen Ladungsträger an der Feststoffwand getrennt [Cab06\_a] S. 459. Dies bewirkt, dass wieder neue Ladungsträger an der flüssig/ festen Grenzfläche gebildet werden, die dann wiederum durch die Strömung abtransportiert werden. Das im Ruhezustand vorhandene statische Gleichgewicht wird durch ein dynamisches Gleichgewicht abgelöst [Vau08] S. 1. In Abhängigkeit der Strömungsform der Flüssigkeit ändert sich das Raumladungsprofil gegenüber jenem im ausgeglichenen Ruhezustand [Tou01] S. 443 – S. 444, wie es im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurde. Die bewegten Raumladungen in der Flüssigkeit bilden den sogenannten elektrostatischen Aufladestrom  $I_s$  (engl.: *streaming current*), der von der Raumladungsdichte und der Strömungsform abhängt [Pai01] S. 175.

Im Folgenden werden mögliche Strömungsformen einer Flüssigkeit behandelt. Dann werden das Raumladungsprofil und der elektrostatische Aufladestrom in Abhängigkeit der Strömungsform diskutiert. Die Betrachtungen werden anhand von kreisrunden Rohren durchgeführt.

### 2.2.1 Strömungsformen

Man kann grundsätzlich zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterscheiden [Sig09] S. 89. Die laminare Strömung wird auch als Schichtströmung bezeichnet. Bei dieser Strömungsform fließen die Flüssigkeitsteilchen in parallelen Bahnen, die sich nicht vermischen, da keine Querbewegungen auftreten [Sig09] S. 89. Das Geschwindigkeitsprofil ist für eine Rohrströmung in **Gleichung 2-42** ([Sch89] S. 98) und in **Abbildung 2-7 a.)** ([Sig09] S. 134, [Gro07] S. B48) dargestellt. Die höchste Strömungsgeschwindigkeit tritt in der Rohrachse auf. Diese ist doppelt so hoch wie die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem gesamten Rohrquerschnitt [Sch89] S. 100, [Sig09] S. 134 – S. 135.

$$v_{\text{lam}}(r) = v_{\text{max}} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad \text{Gleichung 2-42}$$

Legende zu **Gleichung 2-42** und **Abbildung 2-7 a.)** [Sch89] S. 98, [Umd93] S. 133, [Sig09] S. 134:

$v_{\text{lam}}(r)$	Strömungsgeschwindigkeit bei laminarer Strömung als Funktion des Abstandes von der Rohrachse in m/s
$v_{\text{max}}$	maximale Strömungsgeschwindigkeit in m/s
$v$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s
$r$	Abstand von der Rohrachse in m
$R$	Rohrradius in m

Die turbulente Strömung wird auch als Wirbelströmung bezeichnet. Bei dieser Strömungsform treten zusätzlich zur Grundströmung statistisch schwankende Bewegungen quer und längs zur Strömungsrichtung auf. Es kommt daher zu einer starken Vermischung der Flüssigkeit [Sig09] S. 89. Das Geschwindigkeitsprofil kann für eine Rohrströmung laut **Gleichung 2-43** nach *Nikuradse* beschrieben werden. Der Exponent  $n$  in der Gleichung ist abhängig von der sogenannten Reynoldszahl  $Re$  und steigt mit wachsender Rauheit der Rohrwand an. Das Geschwindigkeitsprofil ist in **Abbildung 2-7 b.)** dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich, tritt nahe der Rohrwand im Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten Strömung eine laminare Unterschicht (Viskosschicht) auf [Sig09] S. 137 - S. 138. **Abbildung 2-7** zeigt weiters, dass bei turbulenter Strömung die Strömungsgeschwindigkeit in der laminaren Unterschicht stark ansteigt, danach bis zur Rohrmitte hin jedoch nur mehr in geringem Maße. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrmitte entspricht ca. dem 1,25-fachen Wert der mittleren Geschwindigkeit über dem gesamten Rohrquerschnitt [Sch89] S. 100, [Sig09] S. 138.

$$v_{\text{turb}}(r) = v_{\text{max}} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n \quad \text{Gleichung 2-43}$$

Legende zu **Gleichung 2-43** und **Abbildung 2-7 b.)** [Sig09] S. 137 - S. 138, [Umd93] S. 133:

$v_{\text{turb}}(r)$	Strömungsgeschwindigkeit bei turbulenter Strömung als Funktion des Abstandes von der Rohrachse in m/s
$v_{\text{max}}$	maximale Strömungsgeschwindigkeit in m/s
$v$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s
$r$	Abstand von der Rohrachse in m
$R$	Rohrradius in m
$n$	Exponent in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl; z.B. $n = 1/7$ für $Re = 1,1 \cdot 10^5$ , siehe Tabelle 4-1 in [Sig09] S. 138
$Re$	Reynolds-Zahl
$\delta$	Dicke der laminaren Unterschicht in m

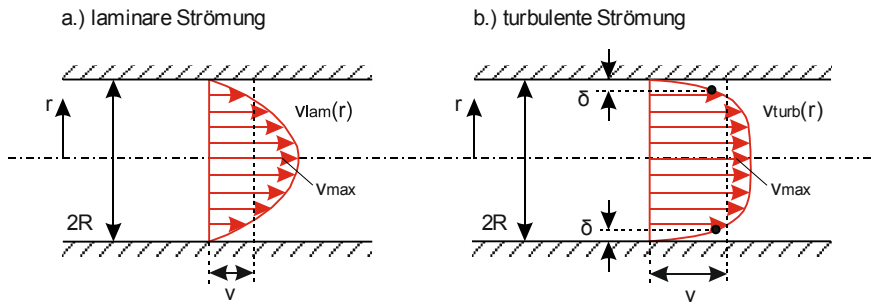


Abbildung 2-7: Geschwindigkeitsprofile von vollständig ausgebildeter laminarer und turbulenter Rohrströmung, entsprechend [Sig09] S. 134 und S. 138, [Gro07] S. B48

Die Dicke der laminaren Unterschicht kann laut [Gro07] S. B49 über **Gleichung 2-44** nach *Prandtl* berechnet werden.

$$\delta = \frac{68,4 \cdot R}{(0,5 \cdot Re)^{0,875}} \quad \text{Gleichung 2-44}$$

Legende zu **Gleichung 2-44** [Gro07] S. B48 – S. B49, [Umd93] S. 133:

$\delta$	Dicke der laminaren Unterschicht in m
$R$	Rohrradius in m
$Re$	Reynolds-Zahl

Die Strömungsform einer Flüssigkeit (laminar oder turbulent) wird durch die Reynolds-Zahl  $Re$  angegeben. Sie berechnet sich nach **Gleichung 2-45** [Sig09] S. 86 – S. 88. Für nicht kreisförmige Strömungsquerschnitte wird die Reynolds-Zahl mit dem gleichwertigen (= hydraulischen) Durchmesser  $d_h$  berechnet [Sig09] S. 148 – 149, [Gro07] S. B49. Der gleichwertige Durchmesser wird allgemein über **Gleichung 2-46** beschrieben. Für den Fall eines rechteckigen Strömungsquerschnittes (Kanal) berechnet sich der gleichwertige Durchmesser nach **Gleichung 2-47** [Sig09] S. 149.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad \text{Gleichung 2-45}$$

$$d_h = \frac{4 \cdot A_s}{U} \quad \text{Gleichung 2-46}$$

$$d_{h\_Kanal} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a+b} \quad \text{Gleichung 2-47}$$

Legende zu **Gleichung 2-45 bis Gleichung 2-47** [Umd93] S. 132 - S. 134, [Sig09] S. 149:

$Re$	Reynolds-Zahl
$v$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s
$d$	Rohrdurchmesser in m

$d_h$	gleichwertiger (=hydraulischer) Durchmesser in m
$d_{h\_Kanal}$	gleichwertiger (=hydraulischer) Durchmesser für einen rechteckigen Strömungsquerschnitt in m
$\nu$	kinematische Viskosität in $m^2/s$
$A_S$	durchströmte Querschnittsfläche in $m^2$
$U$	Umfang des durchströmten Querschnittes in m
$a, b$	Seitenlängen des rechteckigen Strömungsquerschnittes in m

Der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung findet bei der kritischen Reynolds-Zahl  $Re_{kr}$  statt. Diese muss grundsätzlich versuchstechnisch gefunden werden. Für Innenströmungen (Strömung in einem Kanal oder Rohr) wurde die kritische Reynolds-Zahl  $Re_{kr}$  experimentell mit 2320 nachgewiesen. Für  $Re < 2320$  besteht eine stabile laminare Strömung. Dies bedeutet, dass sich auch bei Einwirkung kleiner Störungen, z.B. Erschütterungen, von selbst wieder ein laminares Strömungsbild einstellt. Für  $Re \geq 2320$  bewirken kleinste Störungen bereits den Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungsverhältnissen. Technische Strömungen sind in diesem Bereich stets turbulent [Sig09] S. 93 - 94.

### 2.2.2 Raumladungsprofil

Wenn eine Flüssigkeit durch ein Rohr strömt, ändert sich das Raumladungsprofil vom Einlauf aus in Strömungsrichtung. Das vollständig ausgebildete Raumladungsprofil ergibt sich erst nach einer Länge, die als Einlaufbereich (engl.: *entrance region*) bezeichnet wird und bleibt dann unverändert. Das Raumladungsprofil für laminare und turbulente Strömung ist unterschiedlich [Tou01] S. 443. Im Folgenden wird zuerst das ausgebildete Raumladungsprofil für laminare und turbulente Strömung beschrieben. Dann wird die Entwicklung des Raumladungsprofils im Einlaufbereich eines Rohres dargestellt.

#### Ausgebildetes Raumladungsprofil bei verschiedenen Strömungsformen

Bei laminarer Strömung entspricht das ausgebildete Raumladungsprofil grundsätzlich jenem im Ruhezustand der Flüssigkeit [Tou01] S. 443. Dieses wurde für ein Rohr bereits über **Gleichung 2-38** beschrieben. **Gleichung 2-38** wird üblicherweise in Kugelkoordinaten angegeben. Dabei ergibt sich **Gleichung 2-48**. Für das ausgebildete Raumladungsprofil gilt  $\rho_w = \rho_{wD}$  [Tou96] S. 1053.

$$\rho(r) = \rho_w \cdot \frac{I_0\left(\frac{r}{\lambda}\right)}{I_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)} \quad \text{Gleichung 2-48}$$

Legende zu **Gleichung 2-48** [Tou96] S. 1053, [Ela11] Notation, [Umd93] S. 133:

$\rho(r)$	Verteilung der Raumladungsdichte in $C/m^3$
$\rho_w$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand in $C/m^3$
$r$	Abstand von der Rohrachse in m
$R$	Rohrradius in m
$I_0$	modifizierte Besselfunktion nullter Ordnung
$\lambda$	Debye-Länge in m

Bei turbulenter Strömung kann man die Strömung in einem Rohr in die laminare Unterschicht und den turbulent strömenden Bereich unterteilen, siehe **Abbildung 2-7 b.)**. In der laminaren Unterschicht besteht grundsätzlich die gleiche Raumladungsverteilung wie bei einer laminaren Strömung bzw. somit wie im Ruhezustand der Flüssigkeit [Tou01] S. 444. Im turbulent strömenden Bereich hängt die Raumladungsdichte vom Größenverhältnis der Debye-Länge  $\lambda$  zur Dicke der laminaren Unterschicht  $\delta$  ab. Dies wird anhand der Betrachtung der im Folgenden dargestellten zwei Grenzfälle deutlich, die auch in **Abbildung 2-8** und **Abbildung 2-9** veranschaulicht sind [Nel94] S. 17 – S. 18.

**Fall 1:  $\lambda \gg \delta$**

Wenn die Debye-Länge groß gegenüber der Dicke der laminaren Unterschicht ist, dann sind die Ladungen der Doppelschicht der turbulenten Strömung ausgesetzt [Nel94] S. 17 – S. 18. Somit kommt es außerhalb der laminaren Unterschicht durch die überlagerten Querbewegungen in der Flüssigkeit zu einer Vergleichmäßigung des Raumladungsprofils. Die Raumladungsdichte besitzt hier den Wert  $\rho_m$ , welcher der mittleren Raumladungsdichte in diesem Bereich entspricht, wenn keine Turbulenzen bestehen würden [Tou01] S. 444. In **Abbildung 2-8** ist für diesen Fall das turbulente Raumladungsprofil mit jenem bei rein laminarer Strömung verglichen. Man erkennt eine Übereinstimmung im Bereich der laminaren Unterschicht. Außerhalb dieses Bereichs nimmt die Raumladungsdichte bei turbulenter Strömung jedoch den mittleren Wert der Raumladungsdichte  $\rho_m$  bei laminarer Strömung an.

**Fall 2:  $\lambda \ll \delta$**

Wenn die Debye-Länge klein gegenüber der Dicke der laminaren Unterschicht ist, dann befinden sich annähernd alle Ladungen der elektrischen Doppelschicht in der laminaren Unterschicht, wodurch die Raumladungen von der turbulenten Strömung vorwiegend nicht erfasst werden [Lem96] S. 15. In **Abbildung 2-9** sind für diesen Fall das laminare und das turbulente Raumladungsprofil mit einander verglichen. Man erkennt, dass die Raumladungsverteilung für beide Strömungsformen gleich ist.

Laut [Lem96] S. 15 kann man für Transformatoröle mit einer Debye-Länge von 1 – 50  $\mu\text{m}$  ([Nel94] S. 17) annehmen, dass stets Fall 2 gilt und sich somit die Raumladungsverteilung im Bereich der laminaren Unterschicht befindet.

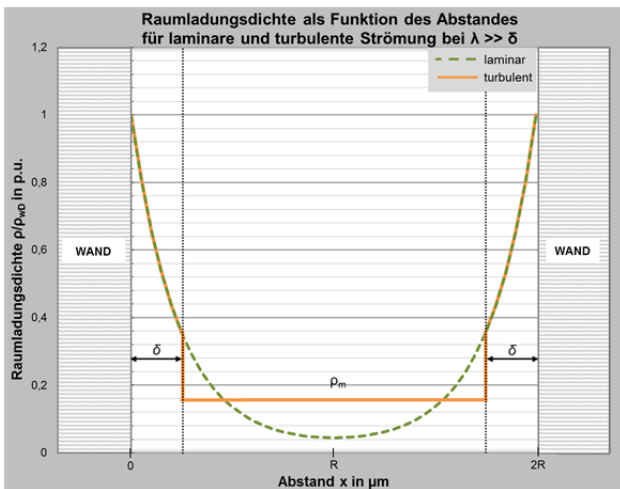


Abbildung 2-8: Raumladungsverteilung bei laminarer und turbulenter Strömung für  $\lambda \gg \delta$ , in Anlehnung an [Ela11] S. 22, [Bou57] S. 1025

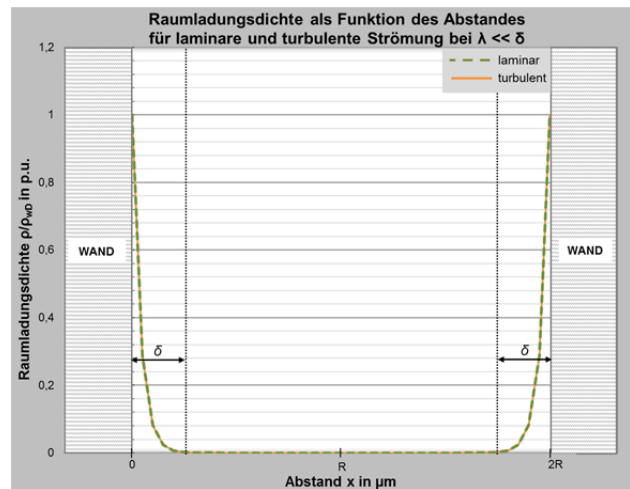


Abbildung 2-9: Raumladungsverteilung bei laminarer und turbulenter Strömung für  $\lambda \ll \delta$ , in Anlehnung an [Lem96] S. 14 und S. 16

**Raumladungsprofil im Einlaufbereich**

Bei einer Flüssigkeitsströmung durch ein Rohr ändert sich das Raumladungsprofil im Einlaufbereich bis nach einer bestimmten Rohrlänge das ausgebildete Raumladungsprofil erreicht ist. Die Flüssigkeit am Rohreinlauf kann als elektrisch neutral betrachtet werden. Die Raumladungsdichte nahe der Wand  $\rho_w$  entspricht durch die einströmende, neutrale Flüssigkeit nicht mehr jener der voll ausgebildeten Doppelschicht  $\rho_{wD}$ , die im Ruhezustand bestanden hat. Durch dieses Ungleichgewicht tritt der physikalisch-chemische Prozess an der flüssig/ festen Grenzfläche auf, der zur Ladungsbildung führt. Durch das Fortschwemmen der gebildeten Ladungen in der Flüssigkeit entwickelt sich die Raumladungsverteilung langsam mit wachsender Rohrlänge hin zu ihrer vollständig ausgebildeten Form, für die gilt  $\rho_w = \rho_{wD}$ . Sobald die Bedingung  $\rho_w = \rho_{wD}$  erfüllt ist, stoppt die phy-

sikalisch-chemische Reaktion in der Grenzschicht und es werden keine weiteren Ladungen mehr gebildet. Das vollständig ausgebildete Raumladungprofil ist in der Flüssigkeit erreicht. Der Bereich, in dem  $\rho_w \neq \rho_{wD}$  besteht, wird als Einlaufbereich bezeichnet [Tou01] S. 443.

**Abbildung 2-10** zeigt das Raumladungsprofil in einem Rohr im ausgeglichenen Ruhezustand der Flüssigkeit und **Abbildung 2-11** stellt im Vergleich dazu das veränderte Raumladungsprofil im Einlaufbereich entlang des Rohres für das Beispiel einer laminaren Strömung dar. Die Darstellungen in **Abbildung 2-11** gehen davon aus, dass die Relaxationszeitkonstante  $\tau$  (beschreibt den zeitlichen Verlauf für den Aufbau der Doppelschicht bzw. die Diffusion der Ladungen in der Flüssigkeit, siehe **Kapitel 2.1.2**) kleiner ist als die Zeitkonstante der physikalisch-chemischen Reaktion, die zur Ladungsbildung an der Grenzfläche führt. Dies wurde in [Tou81] bestätigt. Damit ergibt sich im Einlaufbereich des Rohres ein Raumladungsprofil entlang der Rohrachse, welches ähnlich und proportional zum ausgebildeten Profil ist. Dieses entspricht bei laminarer Strömung, wie zuvor beschrieben, jenem der vollständig ausgebildeten Doppelschicht im Ruhezustand [Pai01] S. 173 – S. 174. Mit steigender Reynolds-Zahl bzw. mit steigender Strömungsgeschwindigkeit ist bei der gleichen Position  $z$  die elektrische Doppelschicht weniger ausgebildet. Dies erkennt man aus dem Vergleich von **Abbildung 2-11 a.)** und **b.)**. In Bild a.) ist die Reynolds-Zahl  $Re$  bzw. die Strömungsgeschwindigkeit kleiner als in Bild b.). Daher ist das Raumladungsprofil an jeder Stelle  $z_1$  bis  $z_4$  in Bild a.) jenem der voll ausgebildeten Doppelschicht näher als in Bild b.) [Tou96] S. 1055.

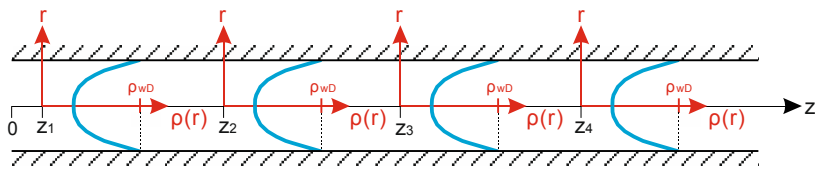
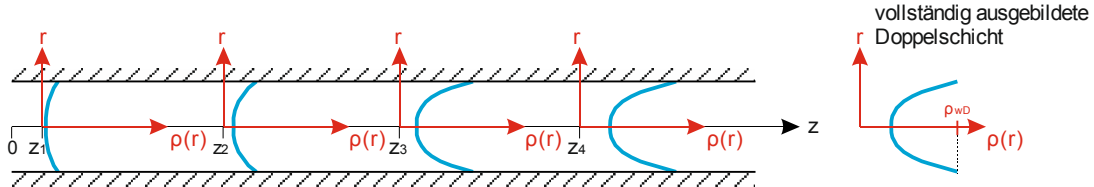
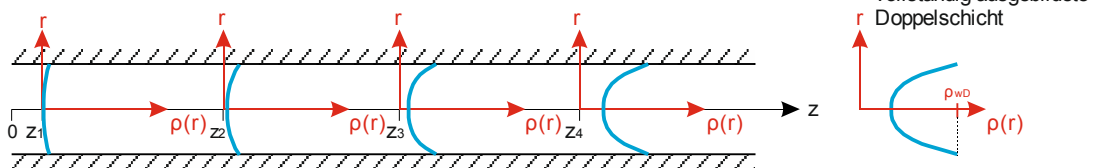


Abbildung 2-10: Vollständig ausgebildete Doppelschicht im Ruhezustand der Flüssigkeit in einem Rohr

a.)  $Re = Re_1$



b.)  $Re = Re_2$



**Re2 > Re1**

Abbildung 2-11: Entwicklung des Raumladungsprofils bei laminarer Strömung in einem Rohr, in Anlehnung an [Pai01] S. 173 und [Tou96] S. 1055

Legende zu **Abbildung 2-10** und **Abbildung 2-11** [Pai01] S. 173, [Tou96] S. 1055, [Ela11] Notation:

- $r$  Abstand von der Rohrachse in m
- $z$  Abstand vom Rohreinlauf in m
- $z_1, z_2, z_3, z_4$  Positionen entlang des Rohres
- $\rho(r)$  Verteilung der Raumladungsdichte in  $C/m^3$
- $\rho_{wD}$  Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand bei vollständig ausgebildeter Doppelschicht in  $C/m^3$
- $Re$  Reynolds-Zahl



### 2.2.3 Elektrostatischer Aufladestrom in der Flüssigkeit

Die durch die Flüssigkeitsströmung bewegten Ladungen aus der diffusen Schicht der elektrischen Doppelschicht bilden den elektrostatischen Aufladestrom (*engl.: streaming current*). Dieser ist laut **Gleichung 2-49** für ein Rohr mit dem Radius  $R$  an jeder Stelle  $z$  entlang der Rohrachse definiert. Wie auch in **Abbildung 2-11** dargestellt, entspricht  $z = 0$  dem Rohreinlauf [Pai01] S. 173 und S. 175.  $v(r)$  stellt dabei das Geschwindigkeitsprofil dar, das bei laminarer Strömung laut **Gleichung 2-42** und bei turbulenter Strömung laut **Gleichung 2-43** definiert wurde.

$$I_s(z) = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho(r,z) \cdot v(r) dr \quad \text{Gleichung 2-49}$$

Legende zu **Gleichung 2-49** [Pai01] S. 173 – S. 175, [Ela11] Notation:

$I_s(z)$	elektrostatischer Aufladestrom als Funktion der Rohrlänge in A
$R$	Rohrradius in m
$r$	Abstand von der Rohrachse in m
$\rho(r,z)$	Verteilung der Raumladungsdichte als Funktion des Abstandes zur Rohrachse und der Rohrlänge in $C/m^3$
$v(r)$	Geschwindigkeitsprofil in m/s

Der elektrostatische Aufladestrom in der Flüssigkeit ist eine beliebte Messgröße bei praktischen Untersuchungen der elektrostatischen Aufladung flüssig/ fester Isoliersysteme. Da er den Abtransport der durch den Aufladungsprozess erzeugten Ladungen in der Flüssigkeit darstellt, kann er als ein Maß für die Ladungsbildung bzw. die Ladungstrennung an der flüssig/ festen Grenzfläche herangezogen werden. Er wird meist messtechnisch erfasst, indem die Ladungen in der Flüssigkeit nach Durchströmen der Feststoffanordnung (z.B. Rohr oder Kanal) gegen eine metallische, geerdete Fläche abgeleitet werden. Eine solche Messung wird z.B. in [Pai12] angewandt.

#### Einfluss der Strömungslänge

Im Folgenden soll der Einfluss der Länge eines Strömungskanals bzw. eines Rohres auf den elektrostatischen Aufladestrom dargestellt werden. Die Entwicklung des Aufladestromes in Abhängigkeit der Strömungslänge wurde anschaulich in [Cab06\_a] am Beispiel eines rechteckigen Strömungskanals beschrieben. Die getroffenen Aussagen können jedoch auch auf kreisrunde Rohre angewandt werden. In [Cab06\_a] wurde der Prozess der elektrostatischen Aufladung über ein System von linearen, partiellen Differentialgleichungen beschrieben, welches mit dem Programm Scilab® gelöst wurde. Es wurde ein rechteckiger Strömungskanal entsprechend **Abbildung 2-3 b.)** betrachtet, der von Transformatorenöl durchströmt wurde. **Abbildung 2-12** zeigt eine Skizze der Berechnungsergebnisse zur Entwicklung des Aufladestromes in einem solchen Kanal. Die Abbildung stellt den Wert des Aufladestromes nach Durchströmung des gesamten Kanals ( $z = \text{Kanallende}$ ) als Funktion der Durchströmungszeit für verschiedene Kanallängen  $l$  dar. Die Durchströmung beginnt dabei zum Zeitpunkt  $t = 0$  [Cab06\_a] S. 458 – S. 463 und S. 465 - 466. Die Kurven  $I_s = f(t)$  in **Abbildung 2-12** besitzen einen transienten Bereich  $I_{s\_trans}$  und einen stationären Bereich  $I_{s\_stat}$ . Der Maximalwert des transienten Aufladestromes spiegelt den Abtransport der diffusen Schicht wieder, die vor Strömungsbeginn im Ruhezustand bestanden hat [Ela09] S. 356. Es wurde im vorliegenden Beispiel davon ausgegangen, dass die elektrische Doppelschicht vor Strömungsbeginn vollständig ausgebildet war [Cab06\_a] S. 463. Bei einer Flüssigkeitsströmung baut sich die Raumladungsverteilung in Strömungsrichtung auf bis hin zu ihrer Form bei einer vollständig ausgebildeter Doppelschicht, siehe **Abbildung 2-11** [Tou01] S. 443. Es tritt ein Übergang vom stationären Gleichgewicht im Ruhezustand der Flüssigkeit (entsprechend **Abbildung 2-10**) zum dynamischen Gleichgewicht bei einer Flüssigkeitsströmung (entsprechend **Abbildung 2-11**) ein [Vau08] S. 1. Im dynamisch ausgeglichenen Zustand fließt  $I_{s\_stat}$  [Ela09] S. 356. Aus **Abbildung 2-12** ist ersichtlich, dass der stationäre Wert des Aufladestromes  $I_{s\_stat}$  mit wachsender Kanallänge zunimmt. In der zusätzlichen Kanallänge steigt die Raumladungsdichte entsprechend **Abbildung 2-11** an, wodurch laut **Gleichung 2-49** auch der Aufladestrom zunimmt. Dies ist jedoch nur im Ein-

laufbereich des Kanals der Fall. Nach dem Einlaufbereich, wenn  $\rho_w = \rho_{wD}$  gilt, ändert sich der stationäre Wert des Aufladestromes auch mit steigender Kanallänge nicht mehr, da bereits die vollständig ausgebildete Doppelschicht mit der Strömung abtransportiert wird. Die Anzahl der abtransportierten Ladungen wird dann auch mit steigender Kanallänge nicht mehr höher [Cab06\_a] S. 465 – S. 466.

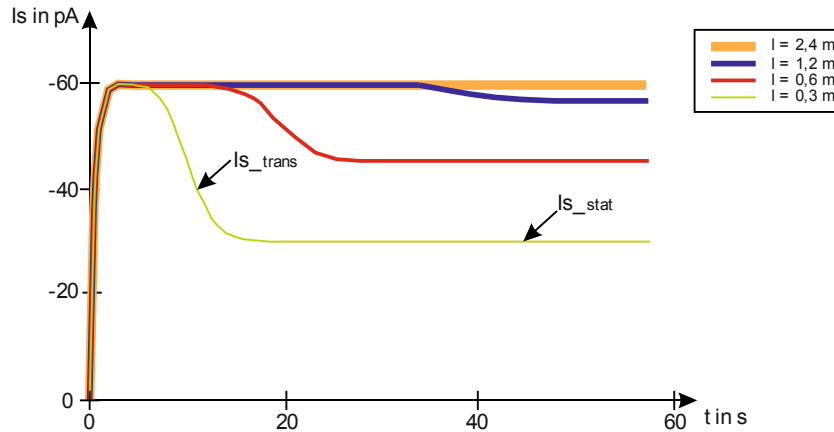


Abbildung 2-12: Elektrostatistischer Aufladestrom in Abhängigkeit von Durchströmungszeit und Kanallänge, entsprechend [Cab06\_a] S. 466

### Einfluss der Strömungsform

In Abhängigkeit der Strömungsform der Flüssigkeit ergeben sich unterschiedlich hohe Aufladeströme. Bei turbulenter Strömung bestehen grundsätzlich höhere Aufladeströme als bei laminarer Strömung, unabhängig vom Größenverhältnis der laminaren Unterschicht zur Debye-Länge [Lem96] S. 13 – S. 18, [Umd93] S. 41 – S. 48. Um dies zu erläutern, werden im Folgenden die beiden Grenzfälle  $\lambda \ll \delta$  und  $\lambda \gg \delta$  aus **Kapitel 2.2.2** bezüglich des resultierenden Aufladestromes analysiert.

#### Fall 1: $\lambda \gg \delta$

Wenn die Debye-Länge groß gegenüber der Dicke der laminaren Unterschicht ist, befinden sich Ladungen nicht nur in der laminaren Unterschicht, sondern auch im turbulent strömenden Bereich. Im Vergleich zur laminaren Strömung ergibt sich durch die Querbewegungen eine höhere Raumladungsdichte in der Rohrmitte (**Abbildung 2-8**), in der auch höherer Strömungsgeschwindigkeiten (**Abbildung 2-7 b.**) auftreten. Diese Kombination führt laut **Gleichung 2-49** zu einem höheren elektrostatischen Aufladestrom in der Flüssigkeit als bei laminarer Strömung [Lem96] S. 17 – S. 18, [Umd93] S. 46 – S. 47.

#### Fall 2: $\lambda \ll \delta$

Wenn die Debye-Länge klein gegenüber der Dicke der laminaren Unterschicht ist, befinden sich annähernd alle Ladungen in der laminaren Unterschicht. Die Raumladungen werden jedoch im Vergleich zu der rein laminaren Strömung mit einer höheren Strömungsgeschwindigkeit im Mittel in Richtung Rohrachse bewegt (größere mittlere relevante Strömungsgeschwindigkeit). Dies bewirkt einen höheren elektrostatischen Aufladestrom in der Flüssigkeit als bei laminarer Strömung [Lem96] S. 13 - S. 17, [Umd93] S. 41 – S. 46.

## 2.3 Ladungsanhäufung und Ladungsableitung

Bei einer Flüssigkeitsströmung führt der physikalisch-chemische Prozess an der Grenzfläche nicht nur zur Bildung von Ladungen in der Flüssigkeit, die durch diese abtransportiert werden, sondern auch von Ladungen entgegengesetzter Polarität an der Feststoffoberfläche [Ela11] S. 34.

Der Fluss positiver Ladungen an der Feststoffwand (vom Feststoff in die Flüssigkeit) kann über die Wandstromdichte  $i_w(z)$  in **Gleichung 2-50** beschrieben werden, siehe auch **Kapitel 2.1.1** S. 8. Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass die Wandstromdichte  $i_w(z)$  von der Raumladungsdichte  $\rho_w(z)$  an der Wand abhängt [Pai01] S. 175. Betrachtet man wieder die Flüssigkeitsströmung durch ein Rohr, dann nimmt mit wachsender Rohrlänge im Einlaufbereich die Raumladungsdichte  $\rho_w$  zu, siehe **Abbildung 2-11**, wodurch die Wandstromdichte  $i_w$  abnimmt. Sobald das Raumladungsprofil der vollständig ausgebildeten Doppelschicht in der Flüssigkeit entstanden ist, wird die Wandstromdichte  $i_w$  zu Null [Tou01] S. 443. Die Integration der Wandstromdichte über der flüssig/ festen Grenzfläche liefert den Wandstrom  $I_w$  [Ela11] S. 34. Der Wandstrom führt zu der Bildung des elektrostatischen Aufladestromes  $I_s$  in der Flüssigkeit.

$$i_w(z) = K \cdot (\rho_{wD} - \rho_w(z)) \quad \text{Gleichung 2-50}$$

Legende zu **Gleichung 2-50** [Ela11] Notation, [Pai01] S. 175:

$i_w(z)$	Wandstromdichte als Funktion der Rohrlänge in A/m <sup>2</sup>
K	Geschwindigkeitskonstante in m/s
$\rho_{wD}$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand bei vollständig ausgebildeter Doppelschicht in C/m <sup>3</sup>
$\rho_w(z)$	Raumladungsdichte nahe der Feststoffwand als Funktion der Länge der durchströmten Anordnung (z.B. Rohr oder Kanal) in C/m <sup>3</sup>

Die im Feststoff erzeugten Ladungen entgegengesetzter Polarität sammeln sich an der Feststoffoberfläche an, wodurch das Oberflächenpotential ansteigt [Mor04] S. 32. In Abhängigkeit der bestehenden Ableitwiderstände gegen Erde beginnen die Ladungen abzufließen. Sobald der Ladungsabfluss über die Kriechwege gleich dem Ladungszufluss durch den physikalisch-chemischen Prozess an der Grenzfläche ist, bleibt die angesammelte Ladung an der Feststoffoberfläche gleich. Wenn vor diesem Zeitpunkt durch die Ladungsansammlung ein zu hohes Potential entsteht, kann es zu elektrischen Entladungen kommen, die die angesammelte Ladung plötzlich reduzieren. Wenn die Strömung weiter anhält, steigt die Ladungsansammlung wieder an und es kommt zu weiteren Entladungen [Ela11] S. 34. Die Höhe der Ladungsansammlung und somit des entstehenden Potentials hängt grundsätzlich ab von der Ladungsbildung und der Ladungsableitung [Bou06] S. 650 – S. 651. Je höher der Ableitwiderstand desto höher ist die Ladungsansammlung. Eine Reduktion der Ladungsansammlung kann, nicht nur durch elektrische Entladungen und geringere Ableitwiderstände, sondern auch durch eine chemische Sättigung der Oberfläche auftreten [Tou99] S. 396.

Obige Erläuterungen beziehen sich nur auf die Ladungsanhäufung und -ableitung am Feststoff. Elektrostatische Aufladung kann natürlich auch zu einer erhöhten Ladungsansammlung in einem Flüssigkeitsvolumen führen, wenn die Flüssigkeit nach der Durchströmung der Feststoffanordnung in einen größeren Behälter eingebracht wird. Die Ladungen fließen auch hier über die bestehenden Ableitwiderstände gegen Erde ab.

## 2.4 Elektrisches Ersatzschaltbild des Aufladungsprozesses

Der Prozess der elektrostatischen Aufladung kann durch ein elektrisches Ersatzschaltbild beschrieben werden. In Anlehnung an [Mor04] S. 34 und [Pai03] S. 9 und S. 11 wurde das Ersatzschaltbild in **Abbildung 2-13** aufgestellt. Die Stromquelle stellt die Ladungsbildung durch den physikalisch-chemischen Prozess dar [Pai12] S. 3. Es fließen der Aufladestrom  $I_s$  in der Flüssigkeit und der Strom  $I_F$  durch den Feststoff, wobei gilt:  $I_s = -I_F$  [Yan11] S. 1. Der Widerstand R stellt den Ableitwiderstand des Feststoffes gegen Erde dar. Die Kapazität C der Anordnung beschreibt die Ladungsansammlung an der Feststoffoberfläche [Pai03] S. 9. Wenn die Kapazität vollständig geladen ist, dann entspricht der Strom  $I_F$  dem Ableitstrom  $I_L$ . Ab diesem Zeitpunkt bleibt die angesammelte Ladung konstant [Ela11] S. 34.

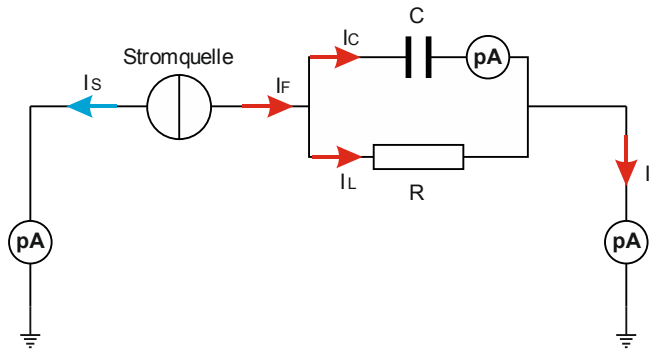


Abbildung 2-13: Elektrisches Ersatzschaltbild des Aufladungsprozesses  
in Anlehnung an [Mor04] S. 34, [Pai03] S. 9 und S. 11

Legende zu **Abbildung 2-13**:

$I_s$	elektrostatischer Aufladestrom in A
$I_F$	Strom durch den Feststoff in A
$I_C$	kapazitiver Strom in A
$I_L$	Ableitstrom vom Feststoff in A
C	Kapazität der Anordnung in F
R	Ableitwiderstand des Feststoffes gegen Erde in $\Omega$
$\text{pA}$	Picoamperemeter

In **Abbildung 2-13** ist auch die Messung der wichtigsten Größen zur Bestimmung der elektrostatischen Aufladungshöhe mittels Picoamperemetern dargestellt. Diese Größen sind:

- Elektrostatischer Aufladestrom  $I_s$  in der Flüssigkeit (engl.: *streaming current*)
- Ableitstrom  $I_L$  vom Feststoff (engl.: *leakage current*)
- Kapazitiver Strom  $I_C$  der Ladungsansammlung (engl.: *accumulation current*)

Alle drei Ströme wurden beispielsweise mit der Versuchsanordnung in [Pai12] messtechnisch erfasst.

## 3 AUFLADUNGSPHÄNOMENE IN LEISTUNGSTRANSFORMATOREN

Nach der allgemeinen Behandlung der theoretischen Hintergründe zur elektrostatischen Aufladung flüssig/ fester Isoliersysteme, wird im vorliegenden Kapitel die elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren im Detail behandelt. Dabei wird die Aufladungsursache dargestellt. In weiterer Folge werden typische Fehler beschrieben und es wird auf angewandte Gegenmaßnahmen eingegangen.

### 3.1 Aufladungsursache

Hochspannungsleistungstransformatoren können als Kern- oder Manteltransformator ausgeführt sein [EPR99\_a] S. 1-10. Die beiden Bauarten sind in **Abbildung 3-1** skizziert. Aus der Abbildung sind die grundsätzlichen Unterschiede gut ersichtlich. Beim Kerntransformator umgeben die Wicklungen den Kern, beim Manteltransformator ist es umgekehrt. Beim Kerntransformator ist weiters die Wicklungsachse meist senkrecht, beim Manteltransformator kann diese sowohl senkrecht als auch waagrecht ausgeführt sein [ABB04] S. 8 – S. 9.

Leistungstransformatoren werden üblicherweise dreiphasig ausgeführt [Küc09] S. 352. Sie bestehen grundsätzlich aus einem Eisenkern, um dessen Schenkel jeweils ein Schenkelsatz angeordnet ist. Ein Schenkelsatz beinhaltet die konzentrisch um den Schenkel angeordneten Wicklungen (Unterspannungs-, Oberspannungswicklung) [Küc09] S. 492, S. 497.

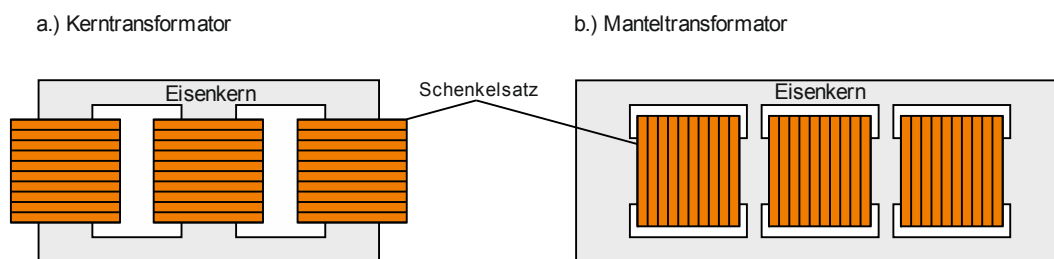


Abbildung 3-1: Transformatorbauarten, entsprechend [ABB04] S. 9

Eine elektrische Isolation ist innerhalb der Wicklungen, zwischen den Wicklungen und gegen Transformatorbestandteile auf Erdpotential wie den Transformatorkegel und den Eisenkern notwendig [Küc09] S. 496. Leistungstransformatoren werden üblicherweise mit einer Öl-Board-Isolierung (meist Mineralöl-Zellulose) ausgeführt [Küc09] S. 493. Die verwendeten Isoliermaterialien erfüllen neben ihrer isolierenden Funktion noch weitere Aufgaben. Der feste Isolierstoff dient auch als mechanische Stütze. Die Isolierflüssigkeit ist auch ein Kühlmittel und hat die Aufgabe die Verlustwärme aus dem Wicklungssystem abzuführen [EPR95] S. 10. Zeitgemäße Leistungstransformatoren besitzen relativ niedrige Verluste. Aufgrund der hohen übertragenen Leistung entstehen jedoch trotzdem beträchtliche thermische Beanspruchungen im Wicklungssystem. Besonders vorübergehende Überlastungen führen zu starken thermischen Beanspruchungen, weil die Verlustleistung mit dem Quadrat des Laststromes zunimmt [Küc09] S. 492 – S. 493. Die Isolierflüssigkeit zirkuliert durch die Kühlkanäle im Wicklungssystem, nimmt dort die entstandene Verlustwärme auf und gibt sie an Wärmetauschern ab [EPR95] S. 10. Leistungstransformatoren werden üblicherweise mit einer forcierten Kühlung betrieben, um einen Schaden durch Überhitzung im Wicklungssystem zu vermeiden [EPR99\_a] S. 1-9 – S. 1-10. Dies bedeutet, dass die Strömung der Isolierflüssigkeit durch Pumpen herbeigeführt wird [ABB04] S. 97. Die Strömung der Isolierflüssigkeit

führt durch die relative Bewegung zwischen dem flüssigen und festen Isolierstoff im Transformator zur elektrostatischen Aufladung, so wie es im **Kapitel 2** beschrieben wurde. Dabei können so hohe Potentiale entstehen, dass elektrische Entladungen auftreten [EPR99\_a] S. 1-10.

Der Kühlkreislauf und die Ladungsbildung im Wicklungssystem sind schematisch für einen Kerntransformator in **Abbildung 3-2** und für einen Manteltransformator in **Abbildung 3-3** laut Darstellungen in der Literatur abgebildet. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass die Isolierflüssigkeit über Pumpen zum unteren Kesselbereich befördert wird. Von dort aus strömt sie durch die Kühlkanäle im Wicklungssystem [Shi79] S. 1245, [Tam80] S. 335. Die Kühlkanäle werden durch die mit Papier umwickelten Windungen und Pressboardscheiben gebildet [Oom90] S. 972. Über die Kühlkanäle fließt die Isolierflüssigkeit in den oberen Kesselbereich. Dann gelangt sie zu den Wärmetauschern und zu den Pumpen, wodurch sich der Strömungskreislauf schließt. Der Kontakt zwischen flüssigem und festem Isolierstoff bewirkt üblicherweise eine positive Aufladung der Isolierflüssigkeit und eine negative Aufladung des Feststoffes [Shi79] S. 1245, [Tam80] S. 335. Die am Feststoff angesammelten, negativen Ladungen werden über die Wicklungen und den Kern gegen Erde abgeleitet. Die meisten der positiven Ladungen in der Isolierflüssigkeit werden im oberen Kesselbereich abgeleitet, da die Flüssigkeit hier eine längere Standzeit hat [Shi79] S. 1245. Wenn die Isolierflüssigkeit zu den Wärmetauschern und den Pumpen gelangt, besitzt sie noch eine geringfügige Restladung [Tam80] S. 335. Es ist zu beachten, dass eine Ladungsbildung natürlich auch in den anderen Teilen des Transformators wie den Pumpen und Wärmetauschern auftritt. Dies ist jedoch in **Abbildung 3-2** und **Abbildung 3-3** nicht dargestellt [Oom90] S. 972. Es ist weiters zu beachten, dass sich durch die Strömung von bereits geladener Isolierflüssigkeit der Vorgang der Relaxation jenem der Ladungsbildung überlagert. Misst man z.B. den Ableitstrom einer Wicklung so wird dieser gebildet aus der Summe von negativen Ladungen, die durch die Strömung am Feststoff gebildet wurden, und von positiven Ladungen, die aus der Isolierflüssigkeit am Feststoff relaxiert sind [Shi79] S. 1246.

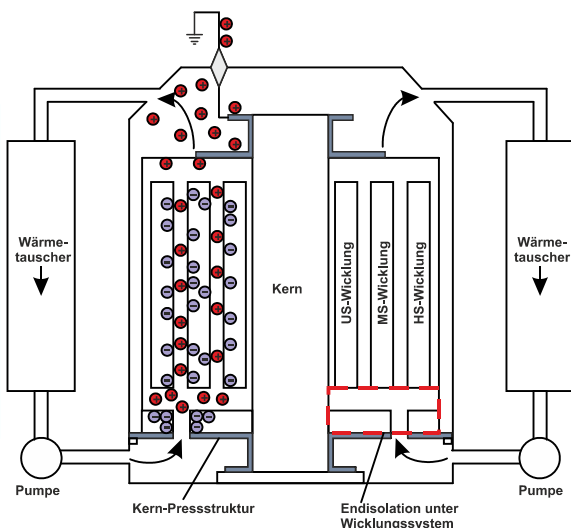


Abbildung 3-2: Kerntransformator, in Anlehnung an [Shi79] S. 1245 und S. 1249, [Hig79] S. 1260

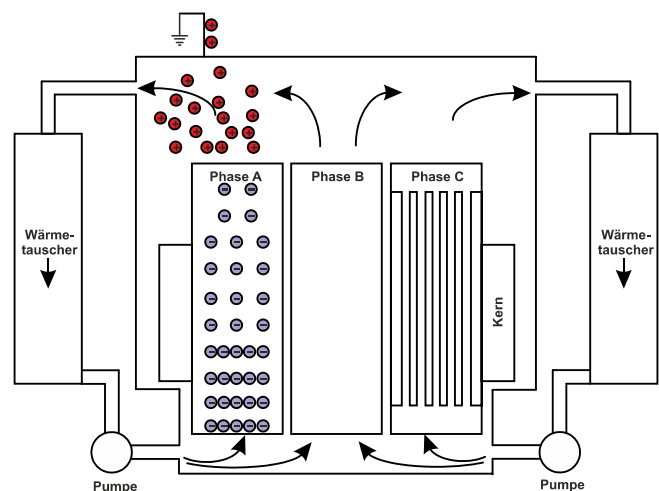


Abbildung 3-3: Manteltransformator, in Anlehnung an [Lem96] S. 6, [Oom90] S. 972, [Erd88] S. 123

### 3.2 Schäden durch elektrostatische Aufladung

Typische Schäden durch elektrostatische Aufladung in Transformatoren sind elektrische Entladungen, Oberflächenentladungen am Feststoff und sogenannte *wormholes*, Entladekanäle unter der Oberfläche [EPR99\_a] S. 1-10. In [Mor97] wurde die elektrostatische Aufladung für unversehrtes und durch Entladungen beschädigtes Pressboard verglichen. Dabei ergab sich, dass der elektrostatische Aufladestrom bei degradiertem Pressboard erhöht ist. Dies weist darauf hin, dass durch

Entladungen eine Art Kettenreaktion ausgelöst werden kann, die die elektrostatische Aufladung so weit erhöht, bis es zum Ausfall des Transformators kommt [Mor97] S. 693.

In einem Kerntransformator treten elektrische Entladungen durch elektrostatische Aufladung vor allem im Bereich der Endisolation am unteren Ende der Wicklungen auf, siehe **Abbildung 3-2**. Dies wurde in [Shi79] S. 1249 und in [Hig79] S. 1265 anhand von Messungen an maßstabsgetreuen Transformatormodellen bzw. echten Transformatoren gezeigt. Untersuchungen an maßstabsgetreuen Modellen von Manteltransformatoren in [Tam80] wiesen zwei Arten von Entladungen auf. Zum einen wurden Entladungen nahe dem Auslass der Kühlkanäle im oberen Kesselbereich entdeckt. Diese wurden mit dem hohen Gleichfeld aufgrund der Ladungsträgerkonzentration in der Isolierflüssigkeit im oberen Kesselbereich in Zusammenhang gebracht. Die Entladungen im oberen Kesselbereich konzentrierten sich dabei nicht auf eine einzige Stelle, sondern betrafen nahezu den gesamten oberen Bereich der Wicklungsanordnung. Weiters traten Oberflächenentladungen im Einlassbereich der Kühlkanäle am festen Isolierstoff durch die hohe Ladungsansammlung auf [Tam80] S. 340. Eine typische Fehlerstelle bildet hier im Einlassbereich zu den Kühlkanälen die 45°-Linie an den Pressboardscheiben im Wicklungssystem (engl.: *washer*), die in **Abbildung 3-4** dargestellt sind. Die Abbildung zeigt eine Phase eines Manteltransformators mit Kern und Isolieranordnung. An der 45°-Linie der Pressboardscheiben endet die seitliche Pressboardisolation. Es wird angenommen, dass lokale Turbulenzen in der Isolierflüssigkeit die erhöhte elektrostatische Aufladung an der 45°-Linie bewirken [EPR95] S. 10 – S.13.

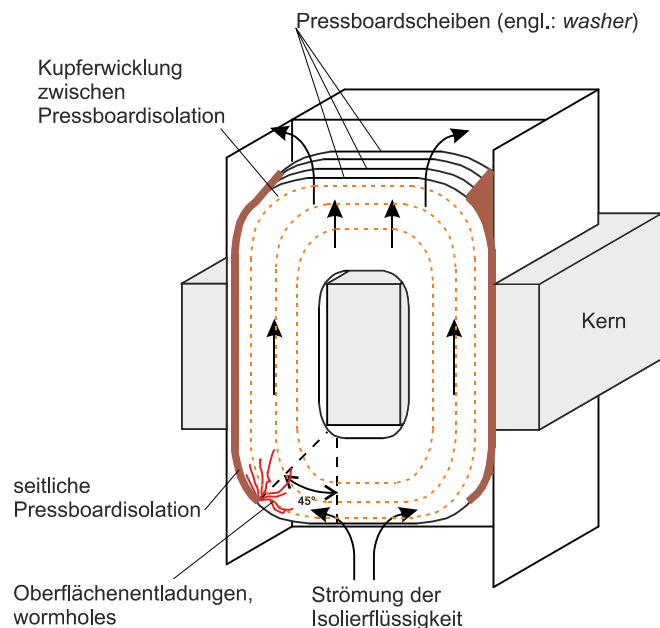


Abbildung 3-4: Strömung der Isolierflüssigkeit durch die Wicklungsanordnung einer Phase eines Manteltransformators, in Anlehnung an [EPR95\_a] S. 1-6-5, [EPR95] S. 12 – S. 13

### 3.3 Gegenmaßnahmen

Um dem Risiko eines Schadens durch elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren entgegenzuwirken, wurden verschiedene Maßnahmen im Laufe der Zeit umgesetzt. Diese sind im Folgenden dargestellt [Cro88] S. 143 – S. 144.

#### – Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit der Isolierflüssigkeit ist einer der wichtigsten Einflussparameter für die elektrostatische Aufladung [Sie94] S. 859. Dies ist unter anderem anhand von **Gleichung 2-49** für den elektrostatischen Aufladestrom in der Flüssigkeit ersichtlich. Mit höherer

Strömungsgeschwindigkeit nimmt auch der Aufladestrom in der Flüssigkeit zu. Die Untersuchungen in [Pai00] S. 88 zeigen deutlich, dass eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit einerseits eine geringere Ladungsbildung an der flüssig/ festen Grenzfläche bewirkt und andererseits auch zu einer geringeren Ladungsansammlung an der Pressboard-Oberfläche führt. Die sich aufbauenden Potentiale werden somit vermindert.

Die Verringerung von Turbulenzen in der Flüssigkeitsströmung durch Designänderungen im Transformator stellt auch eine sinnvolle Maßnahme dar, um die elektrostatische Aufladung zu reduzieren [Nel94] S. 24.

– Zusätzliches Relaxationsvolumen für die Isolierflüssigkeit

Aufgrund der Vermutung, dass die Umwälzpumpen hohe Ladungsmengen in der Isolierflüssigkeit hinterlassen, wurde versucht, die Isolierflüssigkeit nach Passieren der Pumpen möglichst elektrisch neutral zu machen, bevor sie wieder in den Transformator-Kessel einfließt. Die Pumpen wurden daher in Strömungsrichtung vor den Radiatoren im oberen Bereich des Transformators angebracht. Die Radiatoren ergaben dadurch ein zusätzliches Relaxationsvolumen für die aufgeladene Isolierflüssigkeit [Cro88] S. 143, [Nel94] S. 24. Durch diese Maßnahme wurde jedoch das grundsätzliche Problem, die elektrostatische Aufladung zwischen Isolierflüssigkeit und festem Isolierstoff, nicht gelöst [Nel94] S. 24.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist weiters fraglich, wenn die Ergebnisse von Messungen an einem realen Transformator der Kernbauart in [Hig79] betrachtet werden. Demnach werden wesentliche Ladungsmengen in der Isolierflüssigkeit gerade in den Wärmetauschern (bestehen aus Radiatoren und eventuell Lüftern) gebildet und bestimmen die Ladungsverteilung im Transformator. Entsprechend [Hig79] relaxiert jedoch der Großteil der in der Isolierflüssigkeit vorhandenen Ladungen bereits vor Einlauf in das Wicklungssystem in der Kern-Preßkonstruktion (**Abbildung 3-2**), da hier geringere Strömungsgeschwindigkeiten herrschen. Obwohl die Höhe der erzeugten Ladungsmenge je nach Bauform des Wärmetauschers stark unterschiedlich ist, besitzt daher die Art des eingesetzten Wärmetauschers auf die Aufladung im Wicklungssystem selbst keinen hohen Einfluss [Hig79] S. 1262 – S. 1264.

– Austausch hoch aufladender Isolierflüssigkeiten

In [Cro88] S. 143 wird als eine weitere vorbeugende Maßnahme gegen Aufladungsschäden vorgeschlagen, bei zu hoher elektrostatischer Aufladung der Isolierflüssigkeit im Transformator diese durch eine gering aufladende Flüssigkeit auszutauschen. Für einen Transformator im Betrieb wurde in [Cro88] S. 143 ein Grenzwert der Ladungsdichte im Öl von  $150 \mu\text{C}/\text{m}^3$  festgelegt. Die Aufladungshöhe - elektrostatische Aufladungsneigung genannt - von Isolierflüssigkeiten wird üblicherweise mit einem sogenannten *mini-static tester* vermessen, der in **Kapitel 4.3** näher beschrieben wird. In diesem Prüfaufbau wird die elektrostatische Aufladung der Isolierflüssigkeit in Verbindung mit einem bestimmten Referenzfilter (meist Zellulosefilter) vermessen [Oom84]. Die Maßnahme die Isolierflüssigkeit bei zu hohen Aufladungswerten zu tauschen ist jedoch nur sinnvoll, wenn das Schadensrisiko vor allem von der Isolierflüssigkeit abhängen würde. In einer statistischen Analyse von Schadensfällen in [EPR99] S. 3-7 wird jedoch betont, dass eine niedrige elektrostatische Aufladungsneigung der Isolierflüssigkeit keine Sicherheit vor einem Schaden bietet.

– Additive in der Isolierflüssigkeit

Um die Probleme durch elektrostatische Aufladung in der Erdölindustrie unter Kontrolle zu bekommen, wurde unter anderem die Methode angewandt die Leitfähigkeit der Treibstoffe über Additive zu erhöhen, siehe z.B. [Kli58] S. 27 – S. 29. Eine höhere Leitfähigkeit bewirkt eine niedrigere Relaxationszeitkonstante, siehe **Gleichung 2-33** [Nel94] S. 24. Im Transformator stellt jedoch eine Erhöhung der Leitfähigkeit der Isolierflüssigkeit keine anwendbare Lösung dar, da das Isolationssystem seine elektrische Festigkeit beibehalten muss [EPR95] S. 14. Es



wurden allerdings auch im Transformator spezielle Additive eingesetzt, die die Aufgabe hatten die Aufladung zu unterdrücken. Dieser Lösungsansatz wurde zuerst in Japan angewandt. Bekannte Additive in diesem Zusammenhang sind Alkylbenzole und 1,2,3-Benzotriazol (BTA) [Nel94] S. 24.

Der Einfluss von BTA auf die elektrostatische Aufladungsneigung wurde in der Vergangenheit vielfach untersucht, siehe z.B. [Mor99], [Mor03], [Was96]. Jedoch ist noch immer umstritten, wie dieses Additiv genau den Aufladungsprozess beeinflusst [Nel94] S. 24. Eine mögliche Erklärung laut [led88] S. 155 besteht darin, dass BTA von der Zelluloseoberfläche adsorbiert<sup>8</sup> wird und dadurch das Aufladungsverhalten ändert. Dabei wird davon ausgegangen, dass ohne zugefügte Additive negative Ionen aus der Isolierflüssigkeit von der Zellulose adsorbiert werden, wodurch die Isolierflüssigkeit und somit der elektrostatische Aufladestrom bei einer Strömung positiv sind. Wenn BTA der Isolierflüssigkeit zugefügt wird, dann wird BTA von der Zelluloseoberfläche adsorbiert und bestimmt an den betroffenen Stellen somit das Aufladungsverhalten. BTA reagiert nun mit positiven Ionen aus der Isolierflüssigkeit, wodurch negative Ladungen in der Flüssigkeit verbleiben. Insgesamt wird dadurch der elektrostatische Aufladestrom  $I_s$  in der Flüssigkeit reduziert [led88] S. 155.

In [EPR95] S. 14 werden die Ergebnisse einiger Studien zu der Wirkung von BTA verglichen. Dabei zeigt sich, dass verschiedene Studien zum Teil zu unterschiedlichen Erkenntnissen führten. Frühe Studien wiesen darauf hin, dass ein geringer oder sogar kein Einfluss auf die elektrostatische Aufladung durch BTA besteht. Einige Studien zeigten eine die Aufladung rein unterdrückende Wirkung für verschiedene BTA-Konzentrationen. Für den gleichen Bereich an BTA-Konzentrationen wiesen andere Untersuchungen nach, dass die Aufladung bis zu einer bestimmten Konzentration abnimmt. Mit weiterer Erhöhung der Konzentration zeigte sich jedoch ein Anstieg der erzeugten Ladungsdichte mit entgegengesetztem Vorzeichen [EPR95] S. 14. Diese und weitere Ergebnisse zeigen, dass bei der Anwendung von BTA noch Unsicherheiten bestehen können.

Nach der Gegenüberstellung der beschriebenen Maßnahmen, scheinen die effizientesten und gesichertesten Handlungen gegen Schäden durch elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit (laut [EPR95] S. 14) und ein möglichst turbulenzarmes Design zu sein.

Transformatorhersteller besitzen bezüglich Design und Grenzwerten für die Strömungsgeschwindigkeit einen hohen Erfahrungsschatz für konventionelle Isoliersysteme mit Mineralöl, um Fehler durch elektrostatische Aufladung zu verhindern. Wenn jedoch Transformatoren mit neuen Isoliersystemen realisiert werden, müssen das passende Design und die Grenzwerte erst gefunden werden. Dies zeigt den dringenden Forschungsbedarf bei der Realisierung von Transformatoren mit alternativen Isoliersystemen.

---

<sup>8</sup> In [led88] S. 155 wird von Absorption gesprochen. Da das beschriebene Phänomen an der Feststoffoberfläche auftritt, muss es sich jedoch um eine Adsorption handeln.

## 4 METHODEN FÜR AUFLADUNGSUNTERSUCHUNGEN AN FLÜSSIG/ FESTEN ISOLIERSYSTEMEN

Als in den 1970er Jahren die ersten Schadensfälle an Großtransformatoren mit dem Phänomen der elektrostatischen Aufladung in Zusammenhang gebracht wurden [CIG00] S. 6, begannen intensive Forschungstätigkeiten bezüglich des elektrostatischen Aufladungsverhaltens flüssig/ fester Isoliersysteme für Transformatoren. Seit dieser Zeit wurden verschiedene Prüfanordnungen und Prüfverfahren entwickelt, mit denen die sogenannte "elektrostatische Aufladungsneigung" (engl.: *ECT = electrostatic charging tendency*) eines flüssig/ festen Materialpaares bestimmt werden kann. Dabei wird üblicherweise entweder der Ableitstrom vom Feststoff gemessen oder es wird der elektrostatische Aufladestrom in der Isolierflüssigkeit erfasst. Somit beurteilt die elektrostatische Aufladungsneigung grundsätzlich das Maß der Ladungstrennung an der flüssig/ festen Grenzfläche bzw. das Maß der Ladungserzeugung bei einer Flüssigkeitsströmung. Neben der Höhe der Aufladungsneigung des eingesetzten Isoliersystems spielt jedoch auch die Ladungssammlung am festen Isolierstoff eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von elektrostatischen Entladungen, die zu Schäden in Transformatoren führen können. Jedoch wird laut dem Bericht der CIGRE Joint Working Group 12/15.13 „Static Electrification in Power Transformers“ [CIG00] eine niedrige Aufladungsneigung eines Isoliersystems als eine Grundvoraussetzung betrachtet, um das Risiko eines Schadens zu verringern [CIG00] S. 10 – 25. Die verschiedenen Versuchsaufbauten zur Untersuchung der elektrostatischen Aufladungsneigung flüssig/ fester Materialpaare können in Abhängigkeit der in diesen angewandten Strömungsform der Isolierflüssigkeit in eine der folgenden Hauptgruppen unterteilt werden [CIG00] S. 10:

- Versuchsaufbauten mit ebener Strömung
- Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung
- Versuchsaufbauten nach der Filtermethode

In den folgenden Abschnitten werden die drei Gruppen von Versuchsaufbauten kurz beschrieben und miteinander verglichen.

### 4.1 Versuchsaufbauten mit ebener Strömung

Versuchsaufbauten mit ebener Strömung verwenden Rohr- oder Kanalmodelle, die die Kühlkanäle in Transformatoren nachbilden. Diese Prüfaufbauten ermöglichen die praktische Simulation der Strömungsverhältnisse in den Kühlkanälen und der in diesen entstehenden elektrostatischen Aufladung [Lem96] S. 27. Die Modelle sind aus dem zu untersuchenden festen Isolierstoff gefertigt und werden von der Isolierflüssigkeit durchströmt [Pra98] S. 3. Durch die relative Bewegung von flüssigem und festem Isolierstoff tritt elektrostatische Aufladung auf, die messtechnisch erfasst werden kann. Eine Liste von umgesetzten Versuchsaufbauten mit ebener Strömung ist in [CIG00] S. 11 zu finden.

Im Laufe der Zeit wurden sehr unterschiedliche Modelle realisiert. Es wurden Modelle mit rechteckigem, quadratischem, kreisförmigem oder auch kreisringförmigem Strömungsquerschnitt untersucht [CIG00] S. 11, siehe **Abbildung 4-1**. Daneben wurden auch aufwändiger gefertigte Modelle z.B. mit Distanzstücken (engl.: *spacer*) im Strömungskanal (**Abbildung 4-2**, z.B. in [EPR93] S. 2-2-9), mit Papier umwickelten Kupferleitern als Kanalwände (**Abbildung 4-3**, z.B. in [Kra92] S. 4) oder auch mit mehreren parallelen oder seriellen Kanälen (**Abbildung 4-4**, z.B. in [Yum00] S. 836) ver-

wendet. Es wurden sowohl *medium* und *large-scale models* mit bis zu einigen Metern Länge [CIG00] S. 11 und S. 14 als auch kurze Modelle von z.B. 30 cm Länge [Pai12] S. 2 untersucht. Versuchsaufbauten mit ebener Strömung verlangen nach einer relativ hohen Menge an Isolierflüssigkeit von bis zu einigen 1000 l. Bei Untersuchungen mit Kanal- und Rohrmodellen bestehen lange Vorbereitungs- und Konditionierungszeiten für die Proben. Diese können mehrere Tage bis zu einigen Wochen betragen [CIG00] S. 14.

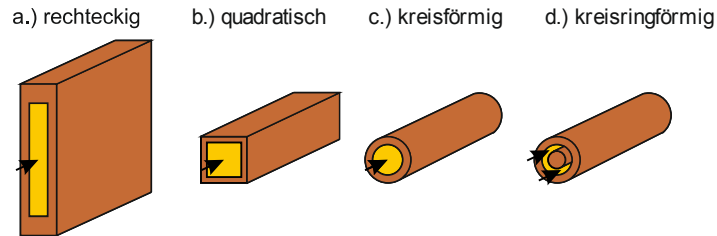


Abbildung 4-1: Strömungsquerschnitte von Kanal- und Rohrmodellen

Strömungsquerschnitt

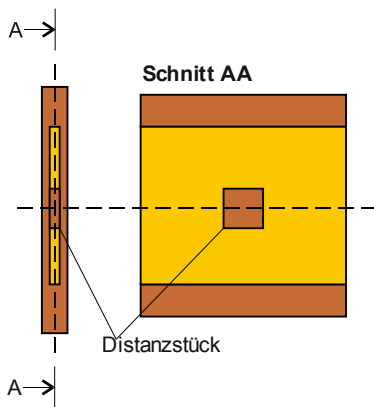


Abbildung 4-2: Rechteckiges Kanalmodell mit Distanzstück, entsprechend [EPR93] S. 2-2-9

Strömungsquerschnitt

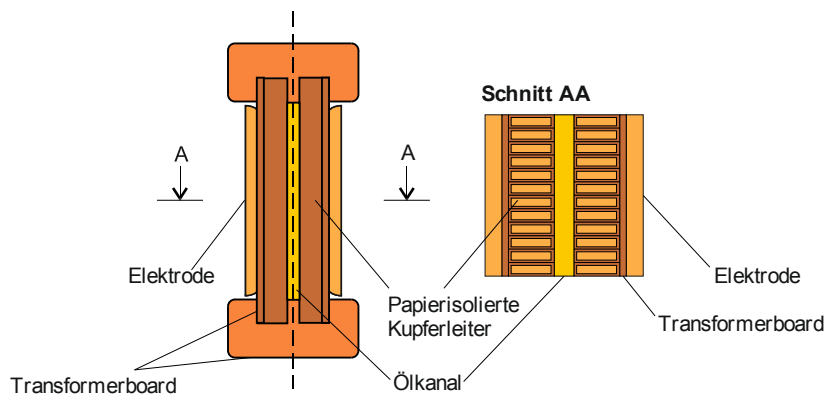
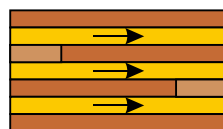
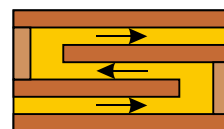


Abbildung 4-3: Rechteckiges Kanalmodell mit Papier umwickelten Leitern, entsprechend [Kra92] S. 4



a.) Modell mit parallelen Kanälen



b.) Modell mit seriellen Kanälen

Abbildung 4-4: Modelle mit mehreren Kanälen, entsprechend [Yum00] S. 836

Versuchsaufbauten mit ebener Strömung (siehe z.B. [Yum00] S. 835, [EPR93] S. 2-2-4, [Pai12] S. 2) bestehen grundsätzlich neben den Modellen selbst aus einer Pumpe, über die die Strömungsgeschwindigkeit der Isolierflüssigkeit im Modell eingestellt werden kann, einem oder mehreren Kesseln, die als Vorratsbehälter oder Relaxationsbehälter dienen, und Vorrichtungen zur Durchflussmessung. Häufig ist auch eine Kühl- und Heizvorrichtung vorgesehen, um Untersuchungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchführen zu können.

Die Messgrößen stellen normalerweise der Ableitstrom vom Feststoffmodell und/ oder der elektrostatische Aufladestrom aus der Flüssigkeit dar [Lem96] S. 28, [CIG00] S. 11. Der Aufladestrom wird meist zwischen einem Relaxationskessel und Erde gemessen, in dem die Flüssigkeit nach Durchströmen des Modells die Ladungen abgibt, siehe z.B. [Pai12] S. 2. Eine alternative Methode wurde in [EPR93] S. 2-2-15 – S. 2-2-18 beschrieben. Die Raumladung wird dabei direkt in der Isolierflüssigkeit mit einer eigens angefertigten Messeinrichtung, der sogenannten CDM (*charge density measuring device*), erfasst. Der Aufladestrom berechnet sich dann aus der Raumladungsdichte

te und dem Durchflussvolumen [Lem96] S. 28 – S. 29. In [Pai12] S. 2 wurde als zusätzliche Messgröße neben dem Ableitstrom und dem Aufladestrom auch die Ladungsansammlung am Feststoff erfasst.

## 4.2 Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung

Bei Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung kann man zwischen *spinning disc* - Systemen und *couette chargers* unterscheiden [Pra98] S. 4. Im Folgenden werden die beiden Prüfaufbauten kurz beschrieben.

### 4.2.1 *Spinning disc* - Systeme

In *spinning disc* - Systemen dreht sich eine Scheibe in einem mit Isolierflüssigkeit befüllten Prüfkessel. Die relative Bewegung zwischen den festen und flüssigen Materialien führt zur elektrostatischen Aufladung, die messtechnisch erfasst wird [Lem96] S. 33. Der erste Prüfaufbau nach diesem Prinzip wurde in [Ked89] beschrieben. Hierbei wurde die Aufladung zwischen einer Metallscheibe und Mineralöl untersucht. Die *Cigre Test Cell* stellt eine Erweiterung dieses ursprünglichen *spinning disc* - Systems dar. Neben anderen Modifikationen war in diesem Aufbau die Metallscheibe an der Ober- und Unterseite von festem Isolierstoff umgeben, wodurch die Aufladung von flüssig/ festen Isoliermaterialpaaren, die in Transformatoren eingesetzt werden, ermöglicht wurde [Lem96] S. 41 – S. 42. Im Laufe der Zeit wurden viele verschiedene *spinning disc* - Systeme realisiert. Eine Liste von umgesetzten Versuchsaufbauten ist in [Sch14] S. 17 zu finden. Die Aufbauten unterscheiden sich neben den untersuchten Materialpaaren vor allem auch durch die Abmessungen des Prüfkessels und der rotierenden Scheibe.

**Abbildung 4-5** zeigt eine Skizze des *spinning disc* - Prüfaufbaus, der am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz im Rahmen der Masterarbeit [Zlo12] gebaut und während der Masterarbeit [Sch14] erweitert wurde. Dieser Prüfaufbau besteht aus einem mit der Isolierflüssigkeit befüllten Aluminiumkessel, der über einen Deckel verschließbar ist. In diesem Kessel rotiert eine metallische Scheibe, die auf der Ober- und Unterseite mit dem festen Isolierstoff verschraubt ist. Durch die Zentrifugalkraft bei der Rotation der Scheibe werden die Ladungen aus der Doppelschicht in der Flüssigkeit zur Kesselwand befördert. Die Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens fließen gleichzeitig von der Feststoffoberfläche über die metallische Scheibe, die Antriebswelle des Motors, die Kohlebürsten an der Welle und ein Elektrometer gegen Erde ab. Dieser Ableitstrom vom Feststoff wird beim Prüfaufbau in **Abbildung 4-5** zur Beurteilung der Aufladungsneigung des betrachteten flüssig/ festen Isoliersystems herangezogen [Zlo12] S. 27 – S. 36, [Sch14] S. 53 – S. 56. Als Messgröße kann jedoch auch der Strom der Ladungen entgegengesetzter Polarität aus der Isolierflüssigkeit verwendet werden, siehe z.B. [Bou10] S. 337. Dieser wird dann vom Prüfkessel gegen Erde gemessen. Der Prüfaufbau in **Abbildung 4-5** ermöglicht Untersuchungen bei verschiedenen Temperaturen, indem der gesamte Aufbau in einem Ofen platziert wird [Sch14] S. 68.

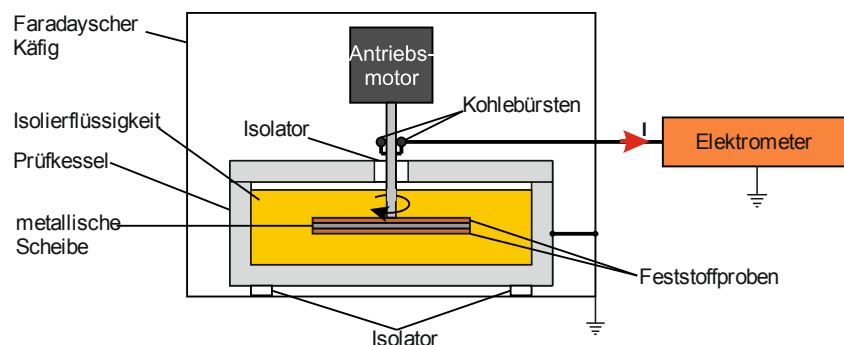


Abbildung 4-5: *Spinning disc* am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz, in Anlehnung an [Zlo12] S. 28, [Sch14] S. 53

### 4.2.2 Couette charger

Der *couette charger* wurde im Rahmen eines von EPRI (Electric Power Research Institute) gesponserten MIT (Massachusetts Institute of Technology)- Projektes gebaut [Lem96] S. 32, [Sie94] S. 854. **Abbildung 4-6** zeigt eine Skizze des *couette chargers*. Dieser Prüfaufbau besteht im Prinzip aus zwei konzentrisch angeordneten Metallzylindern (innerer und äußerer Zylinder). Im Zwischenraum der Zylinder befindet sich die zu untersuchende Isolierflüssigkeit [Lyo88] S. 161. Die mit der Flüssigkeit in Kontakt stehenden Flächen der Zylinder können entweder blank oder mit einem anderen zu untersuchenden Material (Kupfer, Pressboard) umgeben sein. Der innere Zylinder rotiert und verursacht die sogenannte Couette-Strömung [EPR95] S. 19. Die Drehzahl ist variabel und die Strömungsform kann von laminarer bis zu turbulenter Strömung variiert werden [Lyo88] S. 161. Die Rotation bewirkt einen Abtransport der Ladungsträger aus der elektrischen Doppelschicht an den Zylindern in das Innere der Flüssigkeit zwischen den Zylindern. Der *couette charger* ist mit einem Heizband umgeben, sodass Untersuchungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchführbar sind [EPR95] S. 19.

Die Aufladungsneigung wurde beim *couette charger* über verschiedene Messgrößen beurteilt. Zu Beginn der Entwicklung dieses Prüfaufbaus wurde die Isolierflüssigkeit aus dem *couette charger* über den Auslass in ein Auffanggefäß (engl.: *fluid receiver*) geleitet und es wurde ein Strom zwischen diesem Behälter und Erde messtechnisch erfasst [Lyo88] S. 162. Durch die Entwicklung des sogenannten *absolute charge sensors* war die Bestimmung der Raumladungsdichte direkt in der Isolierflüssigkeit möglich [Mor91]. Auch eine Messung des Ableitstromes und der Spannung zwischen den beiden Zylindern wurde angewandt [EPR95] S. 19.

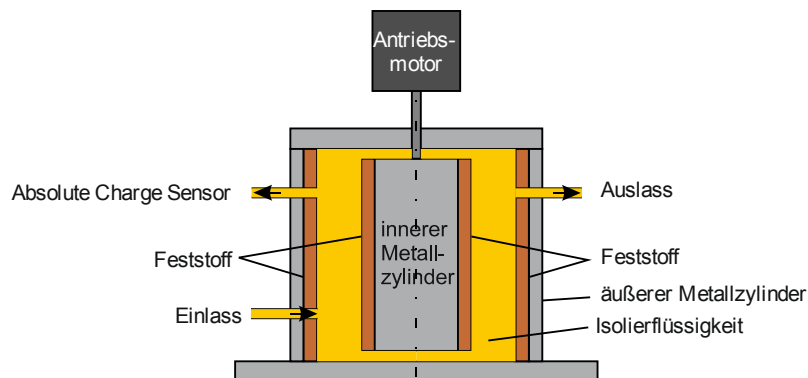


Abbildung 4-6: Couette charger, entsprechend [Lem96] S. 32

### 4.3 Versuchsaufbauten nach der Filtermethode

Der bekannteste Vertreter von Prüfaufbauten, die nach der Filtermethode funktionieren, ist der *mini-static tester*. Dieser Prüfaufbau basiert auf jenem nach Young [You72], welcher intensiv für die Bestimmung der elektrostatischen Aufladungsneigung von Flugzeugtreibstoffen in [Leo76] verwendet wurde. Der erste *mini-static tester* für die Untersuchung von Isolierflüssigkeiten für Transformatoren wurde 1984 von Westinghouse Electric Cooperation in [Oom84] beschrieben. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene, modernere Varianten dieses Prüfaufbaus realisiert, die eine leichtere und genauere Versuchsdurchführung ermöglichen, jedoch grundsätzlich alle das gleiche Funktionsprinzip besitzen. Eine Liste von umgesetzten Versuchsaufbauten nach der Filtermethode ist in [CIG00] S. 13 – S. 14 zu finden.

**Abbildung 4-7** stellt eine Skizze einer verbesserten Variante des *mini-static testers* dar, die auf dem Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz für Untersuchungen im Rahmen der Masterarbeit [Wie\_iA] aufgebaut wurde. Als Vorbild wurden dabei die Prüfaufbauten in [Oom84] S. 1924 und [Ren09] S. 989 herangezogen. Der *mini-static*

tester in **Abbildung 4-7** besteht grundsätzlich aus einer Glasspritze, an deren Düse ein Filterhalter angeschlossen ist, einer Stickstoffflasche, einem Vorratsgefäß mit Isolierflüssigkeit, einem Auffanggefäß und einem Elektrometer. Im Filterhalter befindet sich der Zellulosefilter Whatman 541. Die Spritze wird durch Gasdruck aus dem Vorratsbehälter über ihre Düse mit der Isolierflüssigkeit befüllt. Nach dem Befüllvorgang erfolgt die Messung. Durch Umlegen von Ventilen kann nun der Gasdruck an die Oberseite der Spritze angelegt werden. Die Isolierflüssigkeit wird dann mit einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit durch den Zellulosefilter gepresst und in ein Auffanggefäß geleitet. Nach [Oom84] S. 1924 wird ein Volumenstrom durch den Filter von 1,67 ml/s empfohlen. Die relative Bewegung zwischen Isolierflüssigkeit und Zellulosefilter bewirkt elektrostatische Aufladung, die messtechnisch erfasst wird. Als Messgröße kann bei einem *mini-static tester* der Ableitstrom vom Filterhalter gegen Erde herangezogen werden. Diese Messgröße wurde bei dem Prüfaufbau in **Abbildung 4-7** erfasst. Es kann jedoch auch wie z.B. in [Pai12\_a] S. 1538 der Strom der Ladungen entgegengesetzter Polarität aus der Flüssigkeit gemessen werden, die aus dem Auffanggefäß gegen Erde abgeleitet werden.

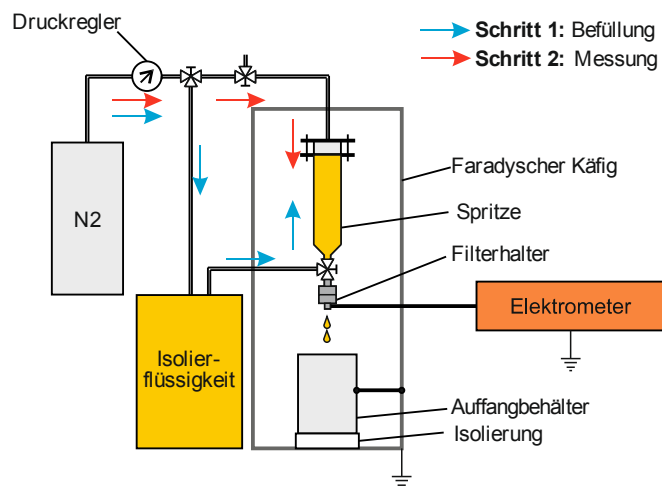


Abbildung 4-7: Mini-static tester am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz, gebaut im Rahmen der Masterarbeit [Wie\_iA] in Anlehnung an [Oom84] S. 1924, [Ren09] S. 989

Üblicherweise wird die elektrostatische Aufladungsneigung einer Isolierflüssigkeit, wenn sie mit dem *mini-static tester* gemessen wird, über die erzeugte Ladungsdichte in der Flüssigkeit angegeben. Diese wird aus dem Mittelwert des gemessenen Ableitstromes  $i(t)$  nach **Gleichung 4-1** berechnet [Oom84] S. 1924, [Per06] S. 559:

$$\rho = \frac{\bar{i} \cdot t}{V} \cdot 10^{12} = \frac{\bar{i}}{\dot{V}} \cdot 10^{12} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Legende zu **Gleichung 4-1** [Oom84] S. 1924, [Per06] S. 559:

$\rho$	Ladungsdichte in $\mu\text{C}/\text{m}^3$ bzw. in $\text{pC}/\text{ml}$
$\bar{i}$	Mittelwert des Ableitstromes in A
$t$	Zeit, die die gesamte Isolierflüssigkeit benötigt, um den Filter zu durchströmen in s
$V$	Volumen der durch den Filter gepressten Isolierflüssigkeit in ml
$\dot{V} = \frac{V}{t}$	Volumenstrom in ml/s

#### 4.4 Gegenüberstellung der Untersuchungsmethoden

Die CIGRE Joint Working Group 12/15.13 beurteilte die bestehenden Untersuchungsmethoden für die elektrostatische Aufladungsneigung flüssig/ fester Isoliersysteme und prüfte diese auf ihre Normierungsfähigkeit hin [CIG00] S. 25 – S. 26. **Tabelle 4-1** zeigt das Ergebnis dieser Beurteilung entsprechend den Ausführungen in [CIG00] S. 25 und [Pra98] S. 5. In **Tabelle 4-1** sind die drei

Hauptgruppen von Untersuchungsmethoden bezüglich verschiedener relevanter Kriterien miteinander verglichen. Diese Kriterien beschreiben die Vergleichbarkeit mit realen Verhältnissen im Transformator, spiegeln den Versuchsaufwand wieder und geben Eigenschaften des Messverfahrens an, wobei auch die Normierungsfähigkeit des Verfahrens beurteilt wird. Anzustreben sind natürlich eine möglichst gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die realen Verhältnisse, ein vertretbarer Versuchsaufwand, eine relativ gute Reproduzierbarkeit und eine Normierungsfähigkeit.

Tabelle 4-1: Vergleich der Untersuchungsmethoden für elektrostatische Aufladungsneigung flüssig/ fester Isoliersysteme, entsprechend [CIG00] S. 25, [Pra98] S. 5

VERGLEICH DER UNTERSUCHUNGSMETHODEN FÜR DIE ELEKTROSTATISCHE AUFLADUNGSNEIGUNG FLÜSSIG/ FESTER ISOLIERSYSTEME							
Kriterium		Ebene Strömung		Rotierende Strömung		Filtermethode	
Vergleichbarkeit mit realen Verhältnissen	Übertragbarkeit der Strömungsverhältnisse	x	ebene Strömung (laminar, turbulent)	x x	dreidimensionale rotierende Strömung (CTC) Couette-Strömung (CC)	x	laminar
	Untersuchte Isolierstoffkomponente(n)	x	Öl-Board	x x	Öl-Board (CTC, CC) Öl-(Metall-Scheibe)	x	Öl
	Referenzkomponente	x	keine	x x	keine (CTC, CC) Metall-oder Teflon-Scheibe	x - x x	Papier Stahl, Gold
	Form der Feststoffkomponente	x x	plattenförmig rohrförmig	x x	plattenförmig (CTC) rohrförmig (CC)	x	Filter
	Übertragbarkeit auf HS-Transformatoren	x	hoch	x	mittel	x - x	niedrig
Versuchsaufwand	Probenherstellung	x x	schwierig (Kanal) sehr schwierig (Rohr)	x	schwierig (CTC, CC)	x	einfach
	Probenvolumen der flüssigen Komponente	x	hoch	x - x	niedrig (mittel)	x	niedrig
	Probenvolumen der festen Komponente	x	hoch	x	niedrig	x	niedrig
	Vorbereitung und Konditionierung	x	hoch	x x	mittel (CTC, CC) niedrig (Metall- Scheibe)	x - x x	Papier Metall
Eigenschaften Messverfahren	Reproduzierbarkeit	x - x	mittel (niedrig)	x - x	mittel (niedrig)	x	hoch
	Normierungsfähigkeit	x	nicht geeignet	x - x	wenig geeignet	x	geeignet

Legende zu **Tabelle 4-1** [Pra98] S. 5:

- x Kriterium sehr gut erfüllt
- x Kriterium erfüllt
- x Kriterium sehr schlecht erfüllt
- CTC Cigre Test Cell
- CC couette charger

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Untersuchungsmethoden sind aus **Tabelle 4-1** gut ersichtlich. Dabei fällt auf, dass die Ergebnisse von Versuchsaufbauten mit ebener Strömung am besten auf die Bedingungen im realen Transformator anwendbar sind [Lem96] S. 37. Einerseits wird das gleiche Isoliermaterialpaar geprüft, das auch beim Leistungstransformator zum Einsatz kommt [Pra98] S. 3. Andererseits werden die Strömungsverhältnisse in den Kühlkanälen realitätsnah nachgebildet [Lem96] S. 27. Die durch die Flüssigkeitsströmung in Kühlkanälen entstehende Aufladung kann für einen breiten Geschwindigkeitsbereich und auch für verschiedene Strömungsfor-

men (laminar und turbulent) praktisch simuliert und vermessen werden [Pra98] S. 3. Die Strömungsgeschwindigkeit stellt einen der wichtigsten Einflussparameter auf die elektrostatische Aufladung dar [Sie94] S. 859. Die Ergebnisse aus praktischen Messungen mit solchen Prüfaufbauten erlauben somit Rückschlüsse auf konstruktive Verbesserungen in der Entstehungsphase eines Transformators [Pra98] S. 3. Dem gegenüber stehen die Nachteile eines hohen Zeit- und Kostenaufwandes für die Erstellung des Prüfaufbaus, die Versuchsvorbereitungen und die Versuchsdurchführung. Die Herstellung der Modelle ist weiters sehr aufwändig [Lem96] S. 31 - 32. Sowohl die benötigten flüssigen als auch festen Isolierstoffe sind in großen Mengen notwendig. Die Konditionierung der flüssigen und festen Materialien (Trocknung und Imprägnierung) ist aufgrund der hohen Mengen bzw. der großen unhandlichen Modelle relativ zeitaufwändig [CIG00] S. 14 und S. 26. Aufgrund des hohen Aufwandes eignen sich solche Prüfaufbauten eher für Grundlagenstudien als für ein normiertes Verfahren [CIG00] S. 26.

Bei Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Verhältnisse im Transformator weniger gegeben, wie aus **Tabelle 4-1** ersichtlich ist. Zwar können auch hier ein flüssiger und ein fester Isolierstoff zugleich vermessen werden, jedoch ist die rotierende Strömung keine im Transformator auftretende Strömungsform. Für den *couette charger* kommt weiters der Nachteil hinzu, dass nicht jeder feste Isolierstoff untersuchbar ist. Er muss dermaßen biegsam sein, dass er auf den metallischen Zylindern angebracht werden kann. Ein Vorteil von Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung ist, dass sie deutlich geringere Mengen an festen und flüssigen Isolierstoffen benötigen als jene mit ebener Strömung [Pra98] S. 4. Weiters ist der Aufwand für Versuchsvorbereitungen deutlich geringer als bei Untersuchungen mit Kanal- oder Rohrmodellen [CIG00] S. 25. Jedoch ist auch bei den Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung die Herstellung der Feststoffproben nicht trivial. Trotz einiger Vorteile sind daher auch Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung für einen normierten und schnellen Vor-Ort Test nicht einsetzbar [CIG00] S. 25 - S. 26, [Pra98] S. 4.

Für Versuchsaufbauten nach der Filtermethode stellt, wie bereits beschrieben, der *mini-static tester* das bekannteste Beispiel dar. Nachteilig gegenüber den anderen beiden Arten von Prüfaufbauten ist, dass als Feststoff (Filterpapier, Metallfilter etc.) ein Material eingesetzt wird, das für die Aufladungsphänomene in den Kühlkanälen von Transformatoren nicht relevant ist. Es wird hiermit nur die Aufladungsneigung einer Isolierflüssigkeit in Kombination mit einem Referenzmaterial vermessen. Diese Untersuchung liefert somit Ergebnisse, die einen relativen Vergleich der elektrostatischen Aufladungsneigung verschiedener Isolierflüssigkeiten ermöglichen. Es muss auch angemerkt werden, dass die Strömung durch den Filter nicht die Verhältnisse bei der Strömung der Isolierflüssigkeit durch einen Kühlkanal nachbildet [Lem96] S. 36 - 38. Der Versuchsaufwand ist relativ niedrig. Die benötigten Mengen an flüssigen und festen Probenvolumen sind auch gering. Ein großer Vorteil ist weiters die gute Reproduzierbarkeit dieses Messverfahrens. Der *mini-static tester* wurde von der CIGRE Joint Working Group 12/15.13 für eine Normierung und einen schnellen Vor-Ort Test von Isolierflüssigkeiten als geeignet befunden [CIG00] S. 25 - S. 26.

Seit der Veröffentlichung des Berichtes [CIG00] der CIGRE Joint Working Group 12/15.13 sind nun über 15 Jahre vergangen und bis heute gibt es kein normiertes Verfahren für die Messung der elektrostatischen Aufladungsneigung. Normative Vorgaben bezüglich der elektrostatischen Aufladungsneigung sind spärlich vorhanden. In DIN EN 60296:2004 wird die „Elektrostatische Aufladungs-Tendenz“ als eine wesentliche Eigenschaft einer Isolierflüssigkeit für bestimmte Hochspannungstransformatoren erwähnt und es wird auf das von [CIG00] vorgeschlagene Prüfverfahren, den *mini-static tester*, verwiesen. Es werden keine expliziten Grenzwerte genannt, jedoch wird angegeben, dass für Transformatoren mit einem OD- oder OF-Kühlsystem diese zwischen Hersteller und Abnehmer vereinbart werden können.



## 5 PRÜFSTAND: STRÖMUNGSMODELLANLAGE

Basierend auf der Literaturrecherche über Untersuchungsmethoden für die elektrostatische Aufladungsneigung in **Kapitel 4** wurde entschieden einen Versuchsaufbau mit ebener Strömung für die geplanten Untersuchungen an verschiedenen flüssig/ festen Isoliermaterialpaaren zu verwenden. Dieser ist einerseits für Grundlagenforschung gut geeignet, welche beim Einsatz neuer Materialien notwendig ist. Andererseits bietet dieser im Vergleich zu den anderen Prüfaufbauten die beste Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die realen Verhältnisse in Transformatoren [CIG00] S. 25 – S. 26. Da in solchen Versuchsanlagen die Strömungsverhältnisse in den Kühlkanälen von Transformatoren nachgebildet werden, wird die erstellte Anlage als *Strömungsmodellanlage* bezeichnet. Im vorliegenden Kapitel wird die Strömungsmodellanlage beschrieben. Es wird dabei zuerst auf ihre Bestandteile und ihre Funktion eingegangen. In weiterer Folge werden die Bedienung der Anlage und das Messsystem beschrieben.

### 5.1 Bestandteile und Funktion

Die Strömungsmodellanlage wurde nach dem Vorbild der Kanalmodellanlage gebaut, die in den 1980er und 1990er Jahren am Institut für Hochspannungstechnik erfolgreich für Aufladungsuntersuchungen von Mineralöl eingesetzt wurde, siehe z.B. [Sch90] S. 67 – S. 83, [EPR93] S. 2-2-1 – S. 2-2-14 und [Lem96] S. 27 – S. 32. Beschreibungen der Strömungsmodellanlage sind in [Pod13], [Pod13\_a], [Pod14] veröffentlicht worden. In **Abbildung 5-1** ist die Versuchsanlage schematisch dargestellt. Der exakte Konstruktionsplan der gesamten Anlage und Konstruktionszeichnungen der wichtigsten Bestandteile befinden sich in **Anhang A**.

Die Strömungsmodellanlage dient der Nachbildung der Aufladungsvorgänge, die in den Kühlkanälen von Leistungstransformatoren stattfinden, und ermöglicht zugleich die messtechnische Erfassung der elektrostatischen Aufladung eines flüssig/ festen Isoliermaterialpaares. Dabei können verschiedene Betriebsbedingungen in einem Transformator nachgebildet werden. Es können die Parameter der Isolierflüssigkeit (Temperatur, Feuchte und Strömungsgeschwindigkeit) in der Anlage verändert und während der experimentellen Untersuchungen konstant gehalten werden. Weiters können verschiedene flüssig/ feste Isoliermaterialpaare untersucht werden. Die zu untersuchende Isolierflüssigkeit zirkuliert in der Anlage in einem geschlossenen Kreislauf. Die Flussrichtung entspricht der Pfeilrichtung in **Abbildung 5-1**. Die Hauptbestandteile der Anlage sind ein Strömungsmodell, eine hydraulische Beruhigungsstrecke, zwei Ladungsabscheider, ein Hauptkessel, eine Umwälzpumpe, das Heiz- und Kühlsystem und ein Messsystem, das die Aufladungshöhe und die Umgebungs- und Flüssigkeitsparameter automatisch einliest und speichert. Der Kreislauf ist aus einem Rohrsystem aufgebaut, welches hauptsächlich aus 2“ Kohlenstoffstahlrohren besteht. Wie aus **Abbildung 5-1** ersichtlich, ist der Strömungskreislauf vom Bedien- und Messbereich räumlich durch Schirmgitter getrennt.

Das Strömungsmodell bildet einen Kühlkanal in einem Leistungstransformator nach. Es besteht aus dem festen zu untersuchenden Isolierstoff. Das Modell hat einen rechteckigen Querschnitt von 5 mm x 80 mm und eine Länge von 1245 mm, siehe **Abbildung 5-2**. Das Strömungsmodell wird über Flanschanschlüsse in die Anlage eingebaut. Die Strömung der Isolierflüssigkeit durch das Modell führt zur elektrostatischen Aufladung. Für die Aufladungsmessung sind Elektroden am Modell angebracht. Um die Elektroden vor äußeren Störeinflüssen abzuschirmen und auch um der Verfeuchtung des Modells entgegenzuwirken, ist dieses von einer Schirmhülle (**Nr. 8 in Abbildung 5-1**) umgeben, siehe auch [Lem96] S. 29. Die Schirmhülle ist aus Pressboard gefertigt und besitzt einen metallischen Mantel. Sie besteht aus zwei Halbschalen, die mit Gurten am Modell befestigt werden. Die beiden Halbschalen sind mit einander elektrisch verbunden und geerdet.

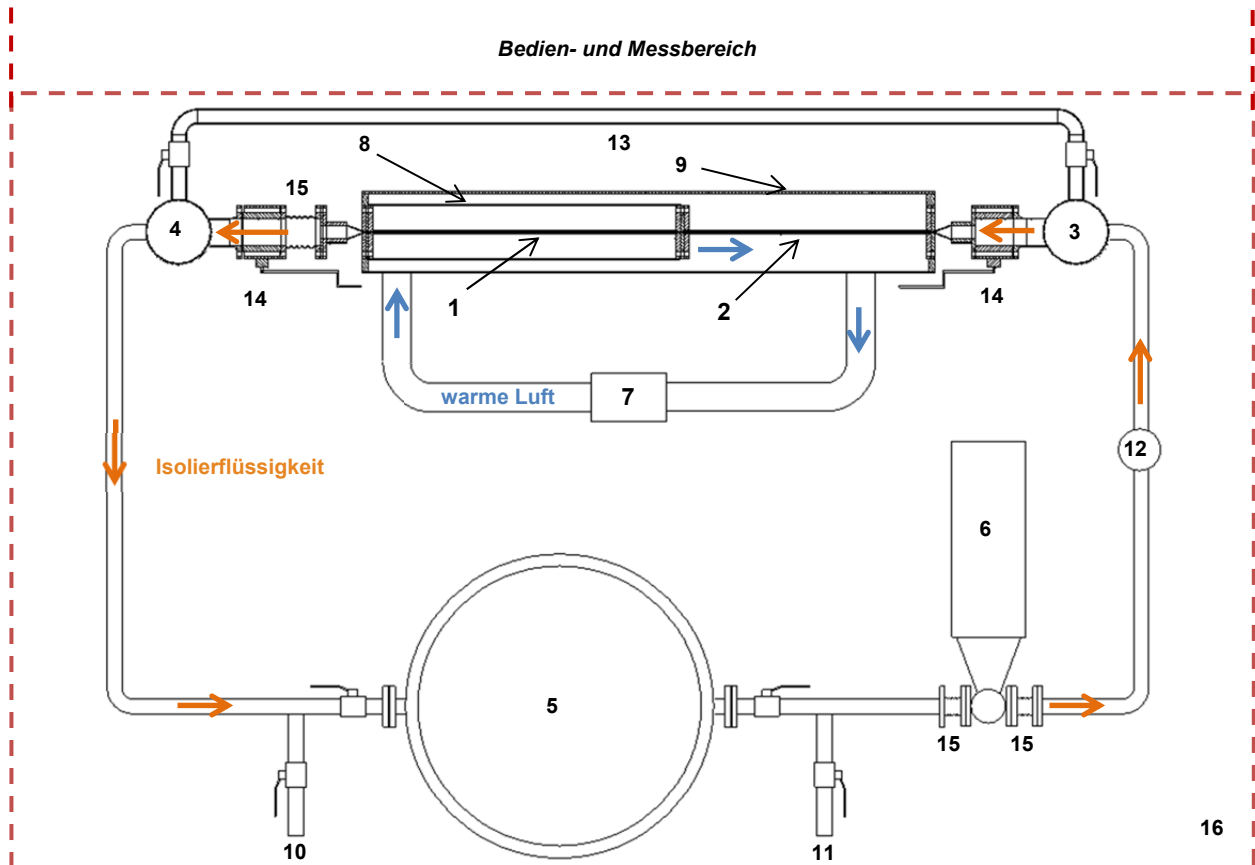


Abbildung 5-1: Strömungsmodellanlage [Pod13] S. 2, [Pod13\_a] S. 2, [Pod14] S. 2; gebaut in Anlehnung an die Kanalmodellanlage in [EPR93] S. 2-2-4

Legende zu **Abbildung 5-1**:

- |   |                                 |       |                                        |
|---|---------------------------------|-------|----------------------------------------|
| 1 | Strömungsmodell                 | 9     | Umlufthülle                            |
| 2 | hydraulische Beruhigungsstrecke | 10,11 | Zu- und Ablauf zur Aufbereitungsanlage |
| 3 | Ladungsabscheider 1             | 12    | Durchflusssensor                       |
| 4 | Ladungsabscheider 2             | 13    | Bypass                                 |
| 5 | Hauptkessel                     | 14    | 4" Kugelhähne                          |
| 6 | Umwälzpumpe                     | 15    | Faltenbalg                             |
| 7 | Umluftheizung                   | 16    | Schirmgitter                           |
| 8 | Schirmhülle                     |       |                                        |

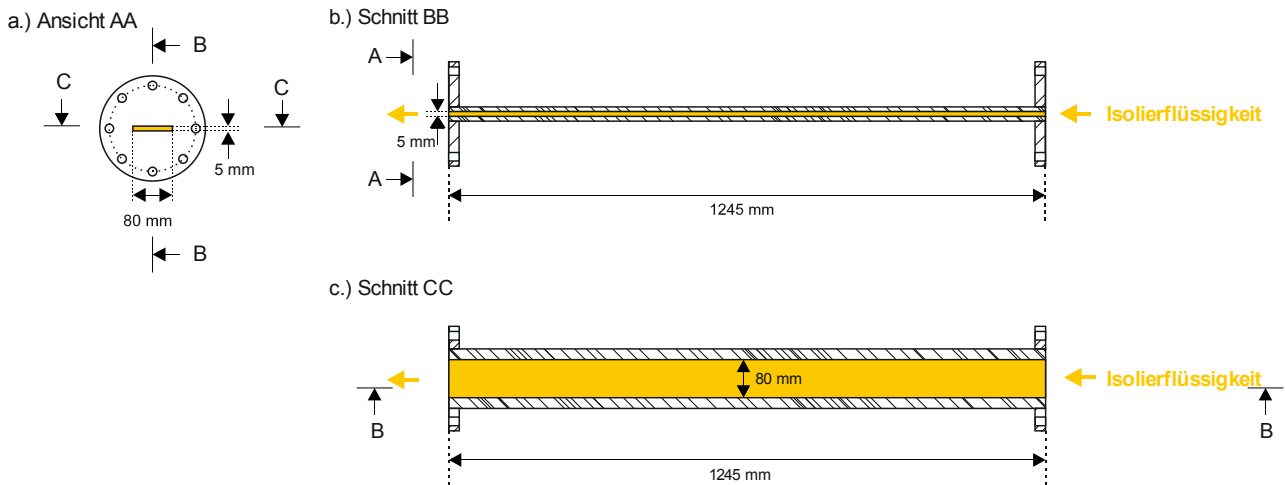


Abbildung 5-2: Strömungsmodell, a.) und b.) in [Pod13] S. 3, [Pod13\_a] S. 2, [Pod14] S. 2; gebaut in Anlehnung an das Kanalmodell in [EPR93] S. 2-2-5

Bevor die Isolierflüssigkeit das Modell erreicht, muss sie durch eine hydraulische Beruhigungsstrecke fließen. Diese besteht aus Metall. Sie stellt einen rechteckigen Kanal mit demselben Querschnitt wie das Strömungsmodell dar. Die Beruhigungsstrecke dient als Anlaufstrecke für die Isolierflüssigkeit und ermöglicht die Ausbildung eines stationären Strömungsprofils bevor die Isolierflüssigkeit in das Modell fließt, siehe auch [Sch90] S. 69. Entsprechend den Ausführungen in [Sch90] S. 69 benötigt eine laminare Strömung eine Länge vom 100-fachen hydraulischen Durchmesser, um ein stationäres Strömungsprofil anzunehmen. Für die Ausbildung einer turbulenten Strömung genügt bereits der 50-fache hydraulische Durchmesser. Über **Gleichung 2-47** kann der hydraulische Durchmesser des betrachteten Kanalquerschnittes von 5 mm x 80 mm berechnet werden:

$$d_{h\_Kanal} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,08 \text{ m} \cdot 0,005 \text{ m}}{0,08 \text{ m} + 0,005 \text{ m}} = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Aus der Berechnung ergibt sich, dass für das Modell mit einem Querschnitt von 5 mm x 80 mm eine Anlaufstrecke von 0,94 m zur Ausbildung einer laminaren Strömung und von 0,47 m zur Ausbildung einer turbulenten Strömung notwendig ist. Um beide Strömungsformen abzudecken, wurde die Beruhigungsstrecke mit einer Länge von 1 m hergestellt (wie auch bei der Kanalmodellanlage in [Sch90] S. 69). In **Abbildung 5-3** ist die Beruhigungsstrecke dargestellt. Man erkennt aus der Abbildung auch eine senkrecht entlang der Außenseite des Kanals angebrachte mechanische Verstärkung, die ein Durchbiegen des Kanals verhindert.

In der Strömungsmodellanlage befinden sich weiters zwei Ladungsabscheider. Bei einem Ladungsabscheider handelt es sich um einen metallischen, geerdeten Kessel. Die Ladungsabscheider haben die Aufgabe, Ladungen aus der durch sie hindurchströmenden Isolierflüssigkeit gegen Erde abzuleiten, siehe auch [Sch90] S. 69. Ladungsabscheider 1 befindet sich in Flussrichtung gesehen vor dem Strömungsmodell und Ladungsabscheider 2 dahinter, siehe **Abbildung 5-1**. Ladungsabscheider 1 ermöglicht, dass die Isolierflüssigkeit möglichst elektrisch neutral wird, bevor sie durch das Modell fließt. In Ladungsabscheider 2 sollen Ladungen, die sich beim Durchströmen des Modells in der Isolierflüssigkeit angesammelt haben, wieder abgegeben werden, siehe auch [Lem96] S. 29. Jeder der beiden Ladungsabscheider hat ein Fassungsvermögen von ca. 54 l und besitzt insgesamt in seinem Inneren eine leitende, geerdete Fläche von ca. 2,7 m<sup>2</sup>, an der die Ladungen aus der Isolierflüssigkeit relaxieren können. Diese Fläche ergibt sich aus der inneren Fläche des Kessels sowie aus einer zusätzlich im Kesselinneren vorgesehenen Lochblechanordnung. **Abbildung 5-4** zeigt Ladungsabscheider 1. Aus der Abbildung sind die Anschlüsse eines Ladungsabscheiders erkennbar. Über den 2" Rohranschluss in Bodennähe ist der Abscheider mit dem Rohrsystem der Anlage verbunden. Der 4" Flanschanschluss in ca. 90 cm Höhe vom Boden führt zur Versuchsstrecke, die aus der Beruhigungsstrecke und dem Modell besteht. Knapp über dem Kesselboden ermöglicht ein Ablassstutzen die Entleerung des Abscheiders. Nicht sichtbar in der Abbildung ist ein weiterer 2" Rohranschluss auf der Hinterseite des Abscheiders in der Höhe des 4" Flanschanschlusses. Die Verbindung dieser 2" Rohranschlüsse zwischen den beiden Ladungsabscheidern bildet einen Bypass, der parallel zum Modell und der Beruhigungsstrecke montiert ist, siehe **Abbildung 5-1**. Am Kopfflansch des Ladungsabscheiders befinden sich weitere drei 1/2" Stutzen, über die zum einen die Entlüftung der Ladungsabscheider ermöglicht wird. Zum anderen wurden diese Stutzen auch dazu verwendet, verschiedene Sensoren in den Flüssigkeitskreislauf einzubringen. Für Ladungsabscheider 1 wird weiters einer der Stutzen für den Anschluss eines Bypasses genutzt, in dem der Füllstand in diesem Ladungsabscheider bestimmt wird. Für Ladungsabscheider 2 sind der 2" Rohranschluss und der 4" Flanschanschluss in **Abbildung 5-4** spiegelverkehrt angeordnet.

Die Durchflussmenge der Isolierflüssigkeit in der Anlage und somit die Strömungsgeschwindigkeit im Modell sind über eine von einem Frequenzumrichter drehzahlgesteuerte Zahnradpumpe einstellbar.



Abbildung 5-3: Hydraulische Beruhigungsstrecke



Abbildung 5-4: Ladungsabscheider 1

**Legende zu *Abbildung 5-4*:**

- |   |                              |
|---|------------------------------|
| 1 | 2" Rohranschluss             |
| 2 | 4" Flanschanschluss          |
| 3 | Ablassstutzen                |
| 4 | 1/2" Stutzen auf Kopfflansch |

Der Hauptkessel im Kreislauf besitzt ein Fassungsvermögen von 1500 l und wird als Vorratstank genutzt. Er ist in **Abbildung 5-5** dargestellt. Für die Untersuchungen wurde der Hauptkessel mit 1200 l befüllt. Der Zulauf und Abfluss des Kessels befinden sich im Kesselboden. Zwischen diesen ist eine ca. 40 cm hohe Trennwand angeordnet, die den Flüssigkeitsstrom in den oberen Kesselbereich leitet. Durch diese Maßnahme und aufgrund der großen Flüssigkeitsmenge im System verweilt die Isolierflüssigkeit nach dem Durchlauf der Versuchsstrecke länger im Hauptkessel, wodurch eine zusätzliche Zeit für die Relaxation von Ladungen bewirkt wird. Zwischen Kesseldeckel und Zulaufrohr ist seitlich entlang des Kessels ein Bypass angeordnet (**Nr. 6** in **Abbildung 5-5**). Dieser ermöglicht über ein Schauglas eine schnelle optische Bestimmung des Füllstandes im Kessel.

Die Entlüftungsventile der beiden Ladungsabscheider sind über Schläuche mit dem Hauptkessel verbunden (**Nr. 3** und **Nr. 4** in **Abbildung 5-5**), um den direkten Kontakt der Isolierflüssigkeit mit der feuchten Umgebungsluft zu vermeiden und auch um Verunreinigungen der Anlage durch austretende Isolierflüssigkeit zu verhindern. Wenn eine Entlüftung der Anlage über die Ladungsabscheider notwendig ist z.B. nach dem Fluten eines neu eingebauten Modells mit Isolierflüssigkeit, kann die Luft aus den Ladungsabscheidern über den Hauptkessel und einen an diesem angeschlossenen Atmer mit Silikagelvorlage an die Umgebung abgegeben werden (**Nr. 5** in **Abbildung 5-5**).

Beim Ein- und Auslass des Hauptkessels ist jeweils ein Anschluss für Zulauf und Abgang zu einer Aufbereitungsanlage installiert (**Nr. 7** und **Nr. 8** in **Abbildung 5-5**). Somit ist es möglich die Isolierflüssigkeit in der Strömungsmodellanlage über die Aufbereitungsanlage zu entgasen, von Partikeln zu befreien und zu entfeuchten.



Abbildung 5-5: Hauptkessel

Legende zu **Abbildung 5-5**:

- 1, 2 Kühlwasseranschlüsse an Kühlwendel
- 3, 4 Entlüftungsschläuche der Ladungsabscheider
- 5 Atmer mit Silikagelvorlage
- 6 Kesselbypass
- 7, 8 Zu- und Abfluss zur Aufbereitungsanlage

Das Kühl- und Heizsystem für die Isolierflüssigkeit ist auch im Hauptkessel untergebracht. Das Aufheizen der Isolierflüssigkeit wird durch eine elektrische Bandheizung ermöglicht, die um den Kessel herum angebracht ist. Darüber befindet sich eine Wärmedämmung, die weiters von einem Aluminiummantel umgeben ist. Über eine mit Kaltwasser durchströmte Kühlwendel im Kessel kann die Isolierflüssigkeit abgekühlt werden. In **Abbildung 5-5** sind die Anschlüsse (**Nr. 1** und **Nr. 2**) zur Kühlwendel ersichtlich.

Die Temperierung der Isolierflüssigkeit vor einem Versuch passiert immer über Nacht. Dabei zirkuliert die Isolierflüssigkeit durch den geschlossenen Kreislauf, um auch die übrigen Bestandteile der

Strömungsmodellanlage auf die richtige Temperatur zu bringen. Die Isolierflüssigkeit fließt nicht über das Modell sondern über den Bypass zwischen den Ladungsabscheidern. Das Modell und die Beruhigungsstrecke werden über 4“ Kugelhähne (**Nr. 14** in **Abbildung 5-1**) vom restlichen System getrennt. Um die Temperatur im Kreislauf möglichst konstant zu halten, ist dieser thermisch isoliert. Die Temperaturänderungen der Isolierflüssigkeit im Kessel sind mit Volumsänderungen verbunden, wodurch der Luftpolster über der Isolierflüssigkeit im Kessel auch volumsmäßig zu- und abnimmt. Die Luft kann über den am Kessel angebrachten Atmer abgegeben bzw. eingesaugt werden, wodurch auch einer Verfeuchtung der Isolierflüssigkeit entgegengewirkt wird.

Vor und während Untersuchungen bei hoher Temperatur werden auch das Modell und die Beruhigungsstrecke auf die Temperatur der Isolierflüssigkeit aufgeheizt. Einerseits wird dadurch einem Abkühlen der Isolierflüssigkeit beim Durchströmen der Versuchsstrecke entgegengewirkt [Lem96] S. 29. Andererseits wird durch diese Maßnahme versucht, bereits vor dem eigentlichen Versuch einen Feuchteausgleich zwischen Board und Flüssigkeit bei der untersuchten Temperaturstufe zu erreichen [EPR93] S. 2-2-6. Das Modell und die Beruhigungsstrecke sind von einer Umlufthülle umgeben (**Nr. 9** in **Abbildung 5-1**). Diese ist aus einer oberen und einer unteren Halbschale zusammengesetzt. Die Halbschalen sind doppelwandig ausgeführt. Die Wände bestehen aus Pressboard. Dazwischen befindet sich eine Wärmedämmung. An zwei Stützen in der Umlufthülle ist über Heißluftschläuche ein Heizlüfter angebracht.

In **Abbildung 5-6** ist die Versuchsstrecke der Strömungsmodellanlage ohne Wärmedämmung dargestellt. Man erkennt die beiden Ladungsabscheider, die Beruhigungsstrecke, den Bypass zur Versuchsstrecke und das von einer Schirmhülle umgebene Modell. In **Abbildung 5-7** ist die wärmegegedämmte Versuchsstrecke dargestellt. Neben den Ladungsabscheidern sieht man auch den Heizlüfter, die Heißluftschläuche und die Umlufthülle.

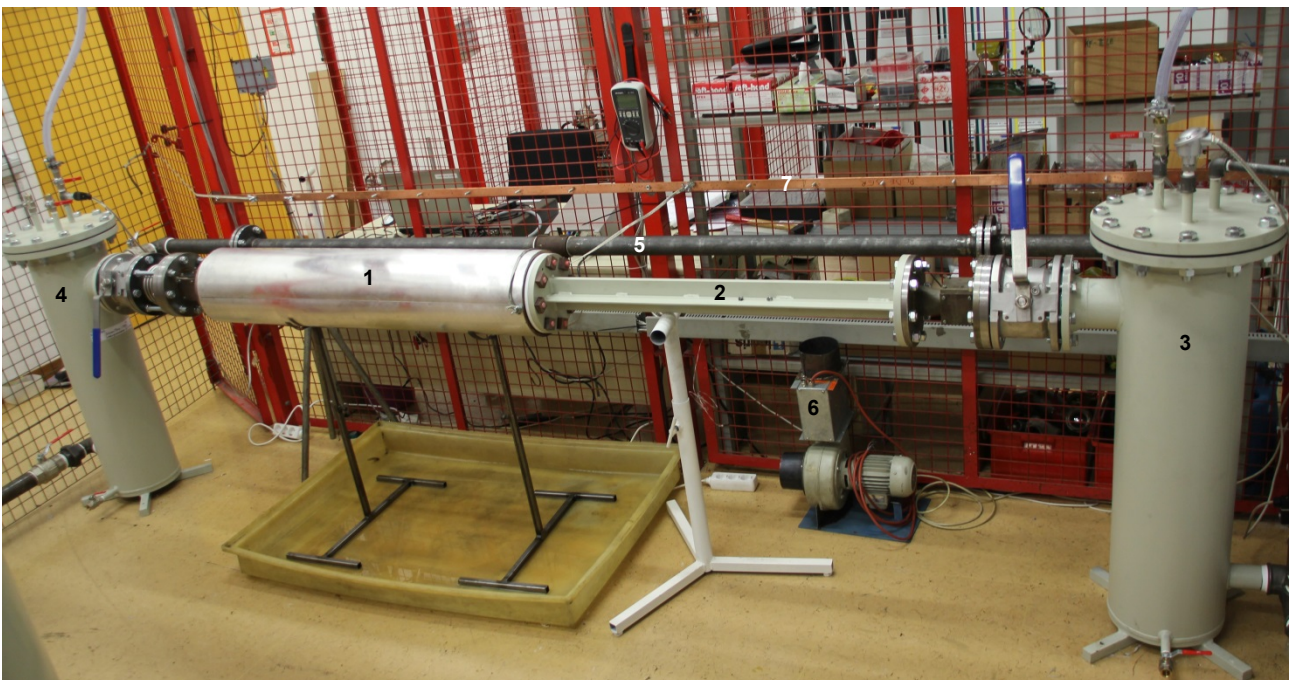


Abbildung 5-6: Versuchsstrecke der Strömungsmodellanlage ohne Wärmedämmung [Pod13] S. 3

Legende zu **Abbildung 5-6**:

1	Schirmhülle	5	Bypass
2	hydraulische Beruhigungsstrecke	6	Heizlüfter
3	Ladungsabscheider 1	7	Erdungsschiene
4	Ladungsabscheider 2		



Abbildung 5-7: Versuchsstrecke der Strömungsmodellanlage mit Wärmedämmung

Legende zu **Abbildung 5-7**:

1	obere Halbschale der Umlufthülle	5	Heißluftschlauch
2	untere Halbschale der Umlufthülle	6	Heizlüfter
3	Ladungsabscheider 1	7	Erdungsschiene
4	Ladungsabscheider 2		

Alle elektrischen Verbraucher der Versuchsanlage werden über einen eigenen Elektroverteiler versorgt, siehe **Abbildung 5-8**. Der Plan der Elektroinstallation ist in **Anhang A** dargestellt. Im Rahmen der Elektroinstallation wurde auch das Erdungssystem der Strömungsmodellanlage genauestens bedacht. Der Elektroverteiler der Versuchsanlage ist niederohmig mit dem Erdungssystem des Gebäudes verbunden. Von der Hauptpotentialausgleichsschiene des Elektrovertailers aus wird das Erdpotential in den Versuchsstand geführt. An drei Erdungsschienen im Versuchsraum, siehe z.B. **Nr. 7** in **Abbildung 5-7**, sind die Hauptbestandteile des Prüfaufbaus (Ladungsabscheider, Kessel, Pumpe) angeschlossen. Damit kann sichergestellt werden, dass die gesamte Versuchsanordnung auf einem einheitlichen Bezugspotential liegt. Weiters können die während eines Versuches erzeugten Ladungen aus der Isolierflüssigkeit kontrolliert abfließen. Die Schirmhülle des Modells und die Messtechnik sind auch mit dem Bezugspotential des Elektrovertailers der Versuchsanlage verbunden. Der Versuchsstand ist von einem Käfig aus Schirmgittern umgeben, die auch auf das Bezugspotential des Elektrovertailers gelegt sind.

## 5.2 Bedienung der Strömungsmodellanlage

Der Bedien- und Messbereich sind räumlich vom Strömungskreislauf durch metallische Schirmgitter getrennt, siehe **Abbildung 5-1**. Im Bedien- und Messbereich ist unter anderem der Elektroverteiler der Versuchsanlage aufgestellt. Die Versuchsanlage kann über ein Bedienfeld am Elektroverteiler betrieben werden, siehe **Abbildung 5-9**. Insgesamt sind fünf Schalter im Bedienfeld mit folgenden Bezeichnungen vorhanden:

- Umwälzpumpe
- Umluftheizung
- Heizregister – UH

- Kesselheizung
- Kesselkühlung



Abbildung 5-8: Elektroverteiler der Strömungsmodellanlage



Abbildung 5-9: Bedienfeld der Strömungsmodellanlage

Über den Schalter „Umwälzpumpe“ wird der Frequenzumrichter für die Umwälzpumpe eingeschaltet. Die Drehzahl der Umwälzpumpe und somit die Strömungsgeschwindigkeit der Isolierflüssigkeit im Modell werden über das Potentiometer mit der Bezeichnung „FU-Pumpe“ im Bedienfeld am Schaltschrank eingestellt. Über das Potentiometer wird dem Frequenzumrichter ein Steuersignal von 4 bis 20 mA vorgegeben. Ein Display, das neben dem Elektroverteiler aufgestellt ist, zeigt den momentanen Durchfluss in der Anlage an, siehe **Abbildung 5-8**. Der Durchfluss wird in ausreichender Distanz nach der Umwälzpumpe vor Ladungsabscheider 1 gemessen, siehe **Nr. 12** in **Abbildung 5-1**.

Der Schalter „Umluftheizung“ schaltet die Versorgung für den Radialventilator und das Heizregister des Heizlüfters ein. Über den zusätzlichen Schalter „Heizregister – UH“ wird das Heizregister separat betätigt. Der Schalter „Kesselheizung“ bedient die Bandheizung um den Hauptkessel. Der Schalter „Kesselkühlung“ betätigt ein Magnetventil, das den Kühlwasserkreislauf für die Kühlwendel im Hauptkessel schaltet.

Weiters erkennbar aus **Abbildung 5-9** sind zwei Thermostate mit Display. Der Thermostat mit der Bezeichnung „Umlufttemperatur“ schaltet das Heizregister des Heizlüfters und regelt somit die Temperatur in der Umlufthülle. Der zweite Thermostat mit der Bezeichnung „Kesseltemperatur“ schaltet die Bandheizung und den Kaltwasserkreislauf im Hauptkessel. Über das Display ist die Solltemperatur für die Umluft und die Isolierflüssigkeit im Kessel vorgebar. Neben den Regelkreisen wurden in der Elektroinstallation auch verschiedene Sicherheitskreise vorgesehen. Sowohl der Heizkreis für die Umluft- als auch jener für die Isolierflüssigkeitstemperatur sind mit einem zusätzlichen Sicherheitsthermostaten ausgestattet, der bei einer Fehlfunktion der Thermostate in der Schaltschranktür abschaltet. Weiters ist im Bypass des Hauptkessels ein Niveauschalter eingebaut. Dieser schaltet bei Unterschreitung des für den Hauptkessel minimalen Füllstandes die elektrische Versorgung der Pumpe aus. Dies ist eine Sicherheitsfunktion, die bei einem Leck in der Anlage ein weiteres Auswerfen von Isolierflüssigkeit über die Pumpe verhindert.



### 5.3 Messsystem

Das Messsystem der Strömungsmodellanlage ist in **Abbildung 5-10** schematisch dargestellt. In dieser Abbildung sind die Messpunkte in der Anlage und die einzelnen Messgrößen eingezeichnet. Bei den angeführten Messgrößen kann man zwischen folgenden Gruppen unterscheiden:

- Messgrößen, die für die Steuerung und Handhabung der Anlage für den Benutzer notwendig sind. Diese sind in **Abbildung 5-10** in **grüner Farbe** eingezeichnet.
- Umgebungs- und Flüssigkeitsparameter  
Diese sind in **Abbildung 5-10** in **blauer Farbe** eingezeichnet.
- Messgrößen, über die die elektrostatische Aufladung bestimmt wird. Diese sind in **Abbildung 5-10** in **roter Farbe** eingezeichnet.

Die Messgrößen der letzten beiden Gruppen werden für weitere Analysen und Auswertungen automatisch über eine eigens für diese Anwendung erstellte Software am Messcomputer eingelesen und abgespeichert. In **violetter Farbe** sind Steuerfunktionen angedeutet, die vom Elektroverteiler ausgehen und in **Kapitel 5.2** bereits erklärt wurden.

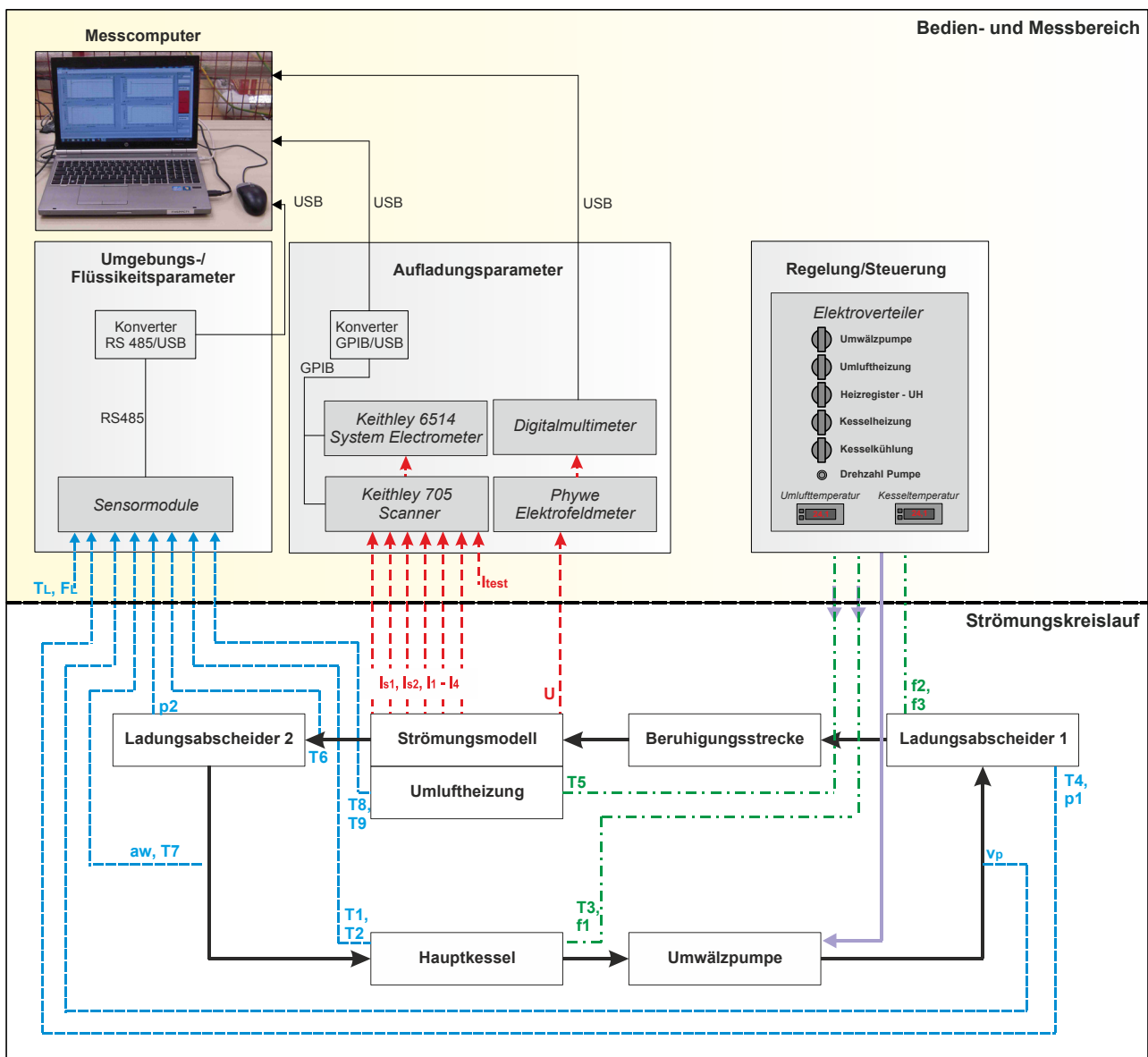


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der Messgrößen und Messpunkte in der Strömungsmodellanlage

### 5.3.1 Messung von Größen zur Steuerung und Handhabung der Anlage

In **Tabelle 5-1** sind Messgrößen angeführt, die nicht für weitere Analysen aufgezeichnet werden, sondern einerseits der automatischen Steuerung der Anlage dienen und andererseits dem Benutzer Informationen über den Anlagenzustand geben sollen. Die Tabelle gibt die Bezeichnung der Messgröße, den verwendeten Sensor, den Messort und das Ziel der Messung dieser Größe für den Benutzer an. Der Messort ist auch aus **Abbildung 5-10** ersichtlich.

Tabelle 5-1: Messgrößen zur Steuerung und Handhabung der Strömungsmodellanlage

Messgröße	Sensor	Messort	Ziel der Messung
Temperatur T3	Pt100	im Hauptkessel, Nähe Kesselboden	Istwertsignal für Thermostat, der die Kesseltemperatur regelt, siehe <b>Abbildung 5-9</b> .
Temperatur T5	Pt100	in Umlufthülle	Istwertsignal für Thermostat, der die Umlufttemperatur regelt, siehe <b>Abbildung 5-9</b> .
Füllstand f1	Vibrationsfüllstandsschalter	in Bypass zu Hauptkessel (in Höhe des minimalen Füllstandes)	<b>Sicherheitskreis:</b> Pumpe wird bei Unterschreitung des minimalen Füllstandes im Hauptkessel abgeschaltet.
Füllstand f2	Vibrationsfüllstandsschalter	in Bypass von Ladungsabscheider 1, ca. 0,8 m über dem Boden	Füllstandsanzeige, die beim Befüllen und Entleeren der Strömungsmodellanlage notwendig ist.
Füllstand f3	Vibrationsfüllstandsschalter	in Bypass von Ladungsabscheider 1, ca. 0,3 m über dem Boden	

### 5.3.2 Messung der Umgebungs- und Flüssigkeitsparameter

Die in der Strömungsmodellanlage gemessenen Umgebungs- und Flüssigkeitsparameter sind in **Tabelle 5-2** zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Umgebungs- und Flüssigkeitsparameter

Messgröße	Sensor	Messort	Ziel der Messung
Druck p1	Druckmessumformer	Ladungsabscheider 1	Kontrolle der Druckbelastung des Modells
Druck p2	Druckmessumformer	Ladungsabscheider 2	
Temperatur T1	Pt100	obere Hauptkesseltemperatur (ca. 1 m über dem Kesselboden)	Erfassung der Temperaturverteilung im Hauptkessel
Temperatur T2	Pt100	untere Hauptkesseltemperatur (ca. 0,18 m über dem Kesselboden)	
Temperatur T4	Pt100	Ladungsabscheider 1 in Höhe des Auslassstutzens in Richtung Versuchsstrecke	Erfassung der Temperatur vor und nach der Versuchsstrecke
Temperatur T6	Pt100	zwischen Strömungsmodell und Ladungsabscheider 2, eingebaut in einem Flansch	
Temperatur T7	Feuchte- und Temperaturtransmitter (Vaisala)	in Rohrstrecke zwischen Ladungsabscheider 2 und Hauptkessel	Erfassung der relativen Feuchte und zugehörigen Temperatur der Isolierflüssigkeit
Feuchte aw			
Durchfluss v <sub>p</sub>	Schraubenvolumeter	in Rohrstrecke zwischen Pumpe und Ladungsabscheider 1	Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit im Strömungsmodell
Temperatur T <sub>L</sub>	Luftfeuchte-/ Temperaturmessumformer (Greisinger electronic)	Messraum	Aufzeichnung der Umgebungsbedingungen
Feuchtigkeit F <sub>L</sub>			
Temperatur T8	Pt100	Schirmhülle	Erfassung der Temperaturverhältnisse beim Modell bei der Aufheizung und den Versuchen mit höherer Temperatur
Temperatur T9	Pt100	Umlufthülle	

**Tabelle 5-2** gibt die Bezeichnung der Messgröße, den verwendeten Sensor, den Messort und das Ziel der Messung dieser Größe für den Benutzer an. Der Messort ist auch aus **Abbildung 5-10** ersichtlich. Die Parameter in **Tabelle 5-2** werden durch Sensormodule der Firma Gantner aus den Sensoren in der Anlage eingelesen, digitalisiert, an den Messcomputer weitergegeben und in diesem abgespeichert, siehe **Abbildung 5-10**.

### 5.3.3 Messung der elektrostatischen Aufladungsneigung

In der Strömungsmodellanlage wird die elektrostatische Aufladungsneigung über Ableitströme erfasst, die über Elektroden vom Modell gegen Erde abgeleitet werden. Die Elektrodenanordnung am Strömungsmodell ist aus **Abbildung 5-11** in Verbindung mit den Darstellungen in **Abbildung 5-2** ersichtlich. Entlang des Strömungsmodells sind auf beiden breiten Seiten jeweils vier Plattenelektroden angebracht. Zwei gegenüberliegende Plattenelektroden, siehe **Abbildung 5-11** Schnitt BB, bilden ein Elektrodenpaar (EP). Somit ergeben sich insgesamt vier Elektrodenpaare (EP1 bis EP4). Die Plattenelektroden sind mit Pressboardplatten an das Modell gedrückt. Dies ist aus **Abbildung 5-12** ersichtlich. Zusätzlich ist am Ein- und Auslass des Modells jeweils eine Schirmelektrode (SE1, SE2) angebracht. Als Schirmelektroden werden "Lametterbänder" verwendet, die um die äußere Oberfläche des Modells angebracht werden und mit Pressboardplättchen festgedrückt werden, siehe **Abbildung 5-13**. Diese haben die Aufgabe Oberflächenströme von den Flanschen abzuleiten und somit Verfälschungen des Messsignals der Elektrodenpaare zu verhindern, siehe auch [Sch90] S. 71.

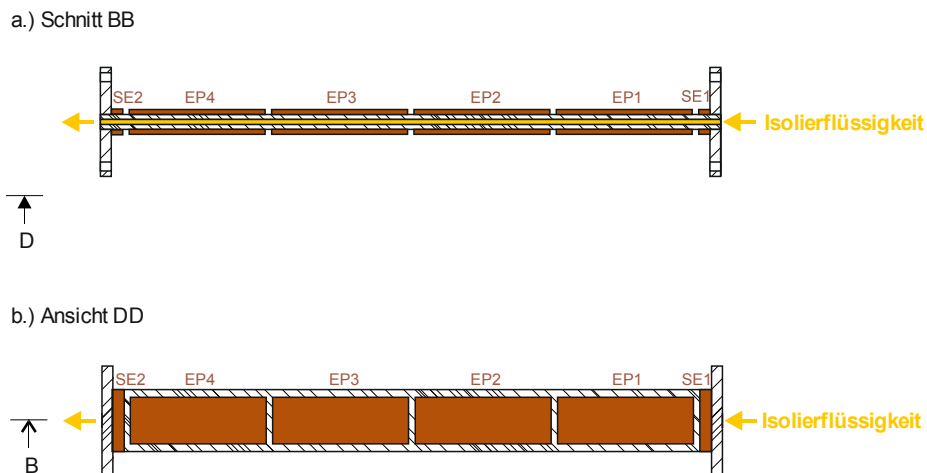


Abbildung 5-11: Skizze der Elektrodenanordnung am Strömungsmodell, in Anlehnung an [Sch90] S. 72

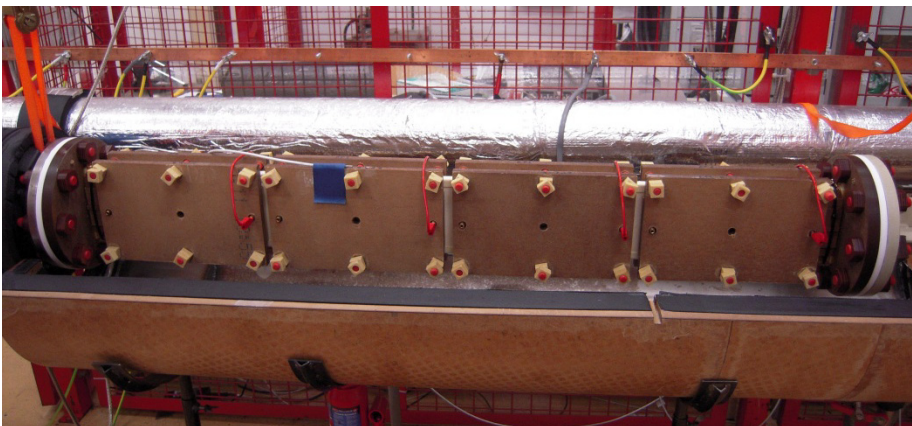


Abbildung 5-12: Elektrodenanordnung am Strömungsmodell

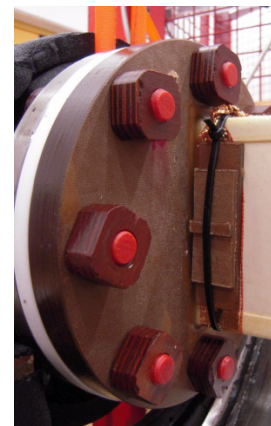


Abbildung 5-13: Schirmelektroden

Über die Messung der Ableitströme am Modell wird das Maß der Ladungserzeugung bzw. der Ladungstrennung an der flüssig/ festen Grenzfläche beurteilt. Die Ladungen aus dem Feststoff werden über ein Elektrometer gegen Erde abgeleitet. Damit die Ladungen nicht gegen die metallischen Flansche der Anlage abgeleitet werden, sind die Modellflansche über Teflonscheiben von den Metallflanschen der Anlage elektrisch isoliert, siehe **Abbildung 5-12**. Es ist anzumerken, dass das Messsystem für die Ableitströme auf jenem der Kanalmodellanlage basiert, siehe z.B. [Sch90] S. 71 – S. 73. Es wurden Untersuchungen mit und ohne Hochspannungsbeanspruchung durchgeführt. Dafür kamen zwei verschiedene Messschaltungen zum Einsatz, die im Folgenden beschrieben sind.

### Untersuchungen ohne Hochspannungsbeanspruchung

Bei Versuchen ohne Hochspannungsbeanspruchung wurde die in **Abbildung 5-14** angeführte Messschaltung angewandt. Die Plattenelektroden der einzelnen Elektrodenpaare sind miteinander elektrisch verbunden. Die Ableitströme aller vier Elektrodenpaare ( $I_1$  bis  $I_4$ ) und der beiden Schirmelektroden ( $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ) werden über einen Multiplexer (Keithley Scanner 705) sequentiell einem Elektrometer (Keithley 6514 System Electrometer) zur Messung durchgeschaltet. Somit gibt es insgesamt sechs Messstellen. Jede Messstelle wird für eine einstellbare Abtastzeit vermessen. Die Abtastzeit wurde mit 9 s gewählt. Die Messwerte während der Abtastzeit werden über den Messcomputer eingelesen und abgespeichert. Aus diesen Messwerten wird der Medianwert gebildet und zusätzlich abgespeichert. Der Medianwert als Funktion der Zeit wird dann für weitere Analysen herangezogen. Zur Kontrolle der richtigen Funktion des Messsystems wurde bei jedem Versuch ein genau bekannter Teststrom  $I_{\text{test}}$  mitaufgezeichnet. Alle Messleitungen sind mit einer Schutzbeschaltung (SB) versehen, um das Messgerät vor Überspannungen zu schützen.

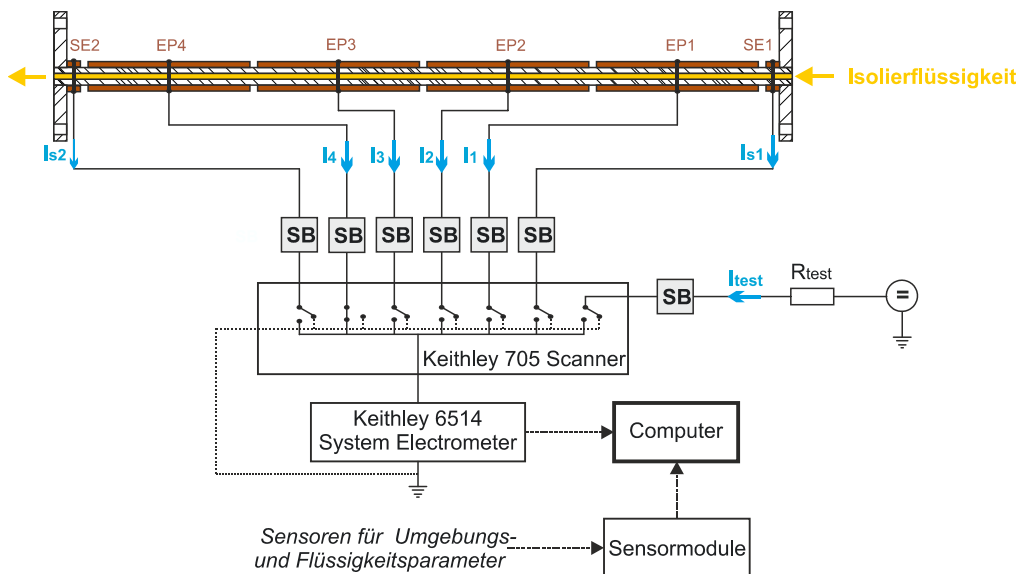


Abbildung 5-14: Messschaltung für Ableitstrommessung bei Untersuchungen ohne Hochspannungsbeanspruchung, [Pod13] S. 4, [Pod13\_a] S. 2, [Pod14] S. 2

### Messung von Ableitströmen bei Hochspannungsbeanspruchung

Bei Versuchen mit Hochspannungsbeanspruchung wurde die in **Abbildung 5-15** angeführte Messschaltung angewandt. Bis auf Elektrodenpaar 1 sind wieder die Plattenelektroden der einzelnen Elektrodenpaare mit einander verbunden. Bei den Untersuchungen unter Hochspannungsbeanspruchung wird an das erste Elektrodenpaar eine Spannung angelegt und das zweite Elektrodenpaar wird zusammen mit den Schirmelektroden direkt geerdet. Gemessen werden nur die Ableitströme am dritten und am vierten Elektrodenpaar. Die Messwerterfassung und -speicherung erfolgt analog wie es zuvor für die Untersuchungen ohne Hochspannung beschrieben wurde. Zum Schutz der Messschaltung gegen Überspannungen sind wieder Schutzbeschaltungen (SB) in den Messleitungen integriert.

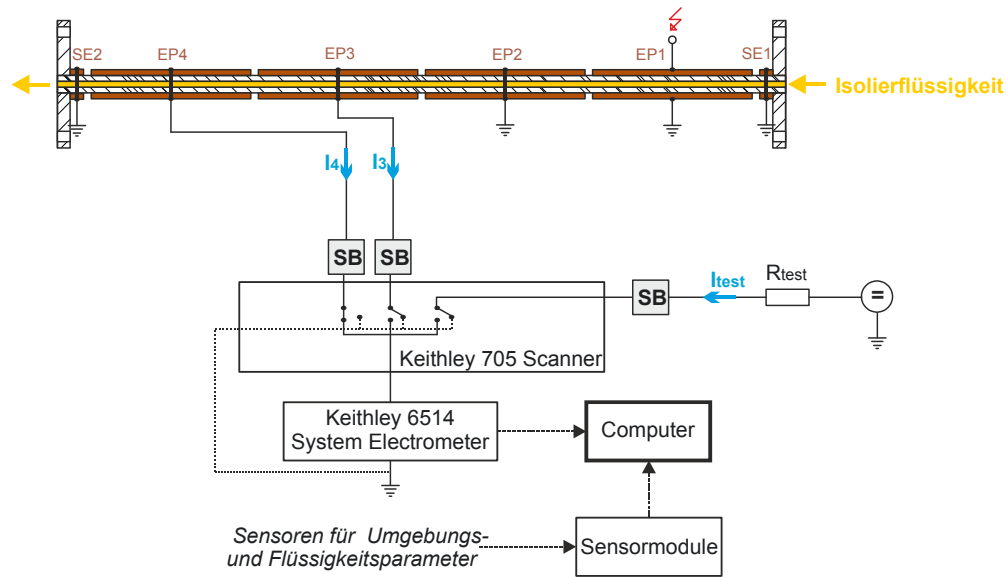


Abbildung 5-15: Messschaltung für Ableitstrommessung bei Untersuchungen mit Hochspannungsbeanspruchung

### 5.3.4 Messung der Spannungen am Modell

Neben der Bestimmung der elektrostatischen Aufladungsneigung über Ableitströme wurden auch Zusatzuntersuchungen gemacht, bei denen mit einem Elektrofeldmeter die sich aufbauenden Spannungen am Strömungsmodell erfasst wurden. Diese sind ein Maß für die Ladungsansammlung am Feststoff. Es kamen zwei verschiedene Messschaltungen zum Einsatz, die in **Abbildung 5-16** und in **Abbildung 5-17** dargestellt sind. In **Abbildung 5-16** wird die Spannung nur an Elektrodenpaar 3 gemessen. Dabei sind alle übrigen Elektrodenpaare und auch die Schirmelektroden geerdet. In der zweiten Messschaltung in **Abbildung 5-17** wird die Gesamtspannung an allen Elektroden gemessen. Für die Untersuchungen wurde ein Elektrofeldmeter (FM) der Firma Phywe in einen Aufbau mit Plattenkondensator integriert. An der einen Platte liegt dabei die zu messende Spannung an. Diese Platte ist über eine Teflonhalterung von Erde getrennt. Die zweite Platte ist geerdet und in ihrem Zentrum ist das Elektrofeldmeter angeordnet. Es kann von einem homogenen elektrischen Feld im Zentrum der Platten, wo die Feldmessung stattfindet, ausgegangen werden. Aus dem Abstand der Platten und der gemessenen elektrischen Feldstärke kann dann auf die Spannung zwischen den Platten geschlossen werden. Das Ausgangssignal des Elektrofeldmeters ist eine Spannung im mV-Bereich, die der elektrischen Feldstärke proportional ist. Diese wird mit einem Digitalmultimeter gemessen, in den Messcomputer eingelesen und abgespeichert. Ein Foto der Versuchsanordnung ist in **Abbildung 5-18** dargestellt.

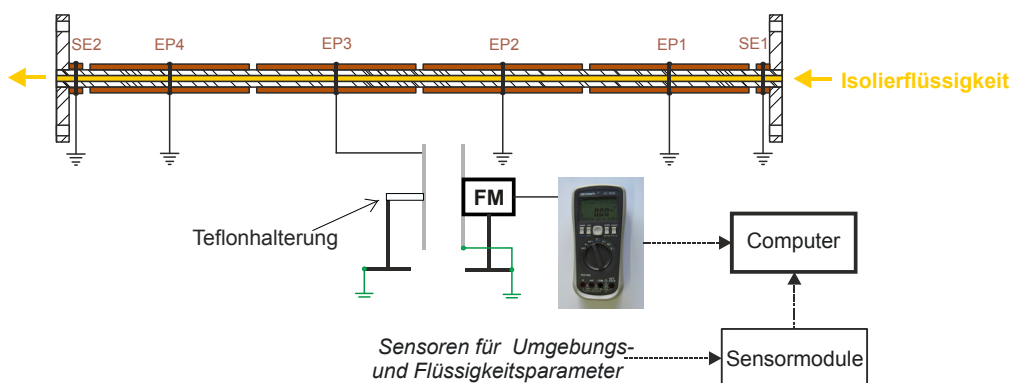


Abbildung 5-16: Messung der Spannung an Elektrodenpaar 3

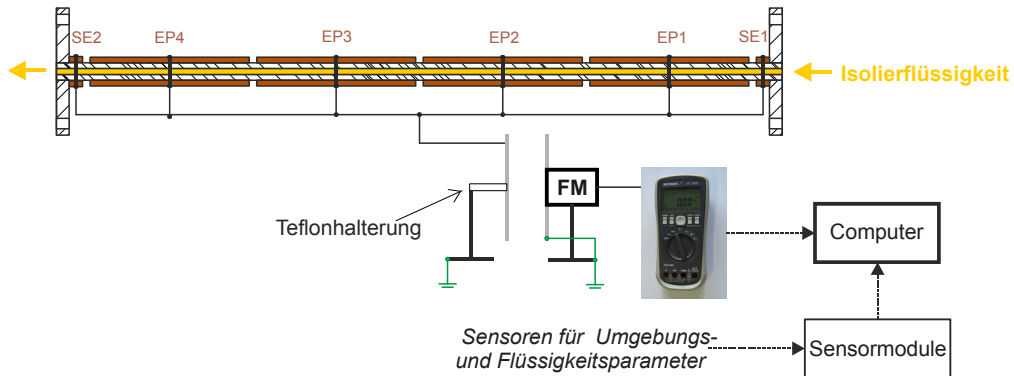


Abbildung 5-17: Messung der Spannung am gesamten Modell

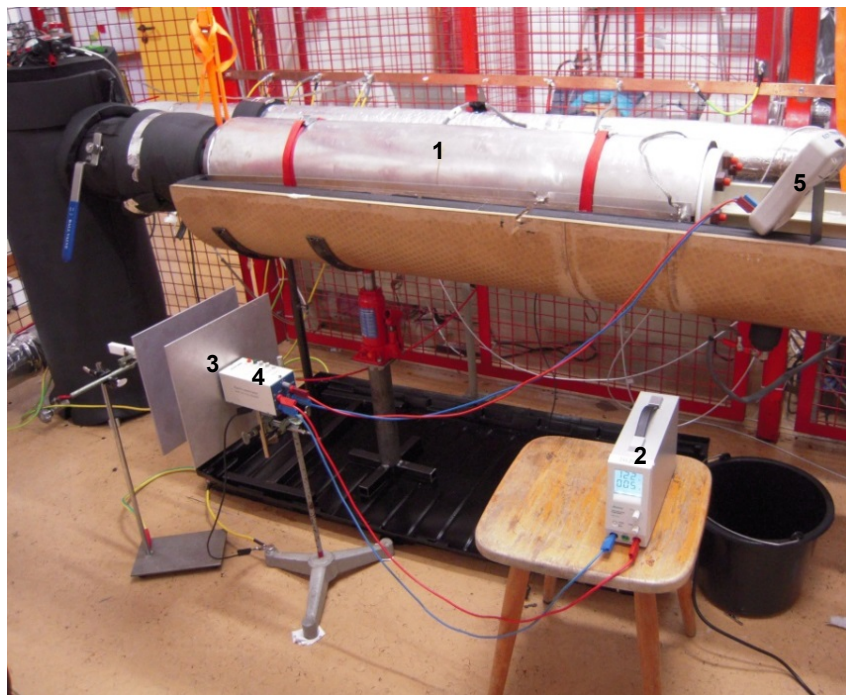


Abbildung 5-18: Versuchsaufbau mit Spannungsmessung über ein Elektrofeldmeter

Legende zu **Abbildung 5-18**:

- |   |                                           |   |                   |
|---|-------------------------------------------|---|-------------------|
| 1 | Schirmhülle mit Strömungsmodell           | 4 | Elektrofeldmeter  |
| 2 | Spannungsversorgung des Elektrofeldmeters | 5 | Digitalmultimeter |
| 3 | Plattenkondensator                        |   |                   |

### 5.3.5 Messprogramm

In LabView wurde das Messprogramm *ECT-Diagnostics* eigens für die Strömungsmodellanlage erstellt. Dieses steuert den Multiplexer und das Elektrometer für die Ableitstrommessung. Weiters liest es die Messwerte aus dem Elektrometer (Ableitströme), den Gantner-Sensormodulen (Umgebungs- und Flüssigkeitsparameter) und dem Digitalmultimeter (Spannung) aus, speichert diese ab und ermöglicht auch eine Vorauswertung der Messergebnisse. Die Bedienoberfläche des Messprogrammes ist in **Abbildung 5-19** dargestellt.

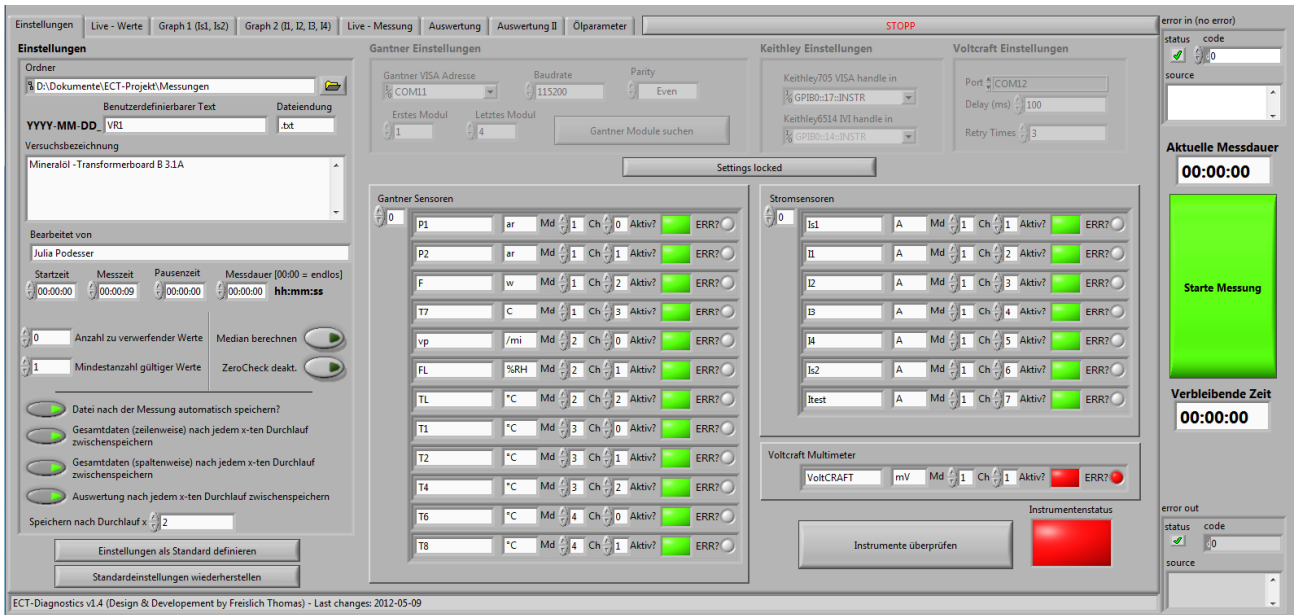


Abbildung 5-19: Bedienoberfläche von ECT-Diagnostics

## 6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT DER STRÖMUNGSMODELLANLAGE

Im vorliegenden Kapitel werden Gegenstand und Vorgangweise der experimentellen Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage beschrieben. Zuerst wird auf die untersuchten Isoliermaterialpaare eingegangen. Dann werden die Variationsparameter bei den Untersuchungen beschrieben. Bevor eine Messung möglich war, waren verschiedene versuchsvorbereitende Maßnahmen notwendig, auf die in weiterer Folge eingegangen wird. Dann werden die Versuchsdurchführung und die Auswertungsmethode beschrieben. Zum Schluss werden die versuchsnachbereitenden Maßnahmen erläutert.

### 6.1 Untersuchte Isoliersysteme

Die elektrostatische Aufladungsneigung ist keine materialspezifische Größe, sondern stellt die Eigenschaft eines Isoliermaterialpaares dar [Lem96] S. 27. Im Rahmen der in dieser Arbeit dargestellten Forschungstätigkeit wurden die sechs Materialpaare in **Tabelle 6-1** bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung als Funktion verschiedener Parameter untersucht.

Tabelle 6-1: In der Strömungsmodellanlage untersuchte Materialpaare

Mineralöl – Transformerboard B 3.1A	Mineralöl – Nomex® 994
Synthetischer Ester – Transformerboard B 3.1A	Synthetischer Ester – Nomex® 994
Natürlicher Ester – Transformerboard B 3.1A	Natürlicher Ester – Nomex® 994

Neben konventionellen Isoliersystemen mit Mineralöl wurden auch alternative Isoliersysteme erforscht. Der Vergleich des elektrostatischen Aufladungsverhaltens der alternativen Isoliersysteme und der Isoliersysteme mit Mineralöl sollte Aufschluss über ein mögliches Risiko bei der Anwendung der alternativen Isoliersysteme in Leistungstransformatoren geben. Im Folgenden werden die untersuchten flüssigen und festen Isolierstoffe separat beschrieben.

#### 6.1.1 Isolierflüssigkeiten

In der Strömungsmodellanlage wurden drei verschiedene Isolierflüssigkeiten untersucht: ein Mineralöl, ein synthetischer und ein natürlicher Ester. Diese drei Arten von Flüssigkeiten werden im Folgenden kurz bezüglich ihres Einsatzes in Transformatoren, ihres chemischen Aufbaues und ihrer wichtigsten Eigenschaften verglichen.

##### Einsatz in Transformatoren

Die am häufigsten angewandte Isolierflüssigkeit in Transformatoren stellt Mineralöl dar. Mineralöl wird in Leistungstransformatoren (engl.: *power transformers*), Verteiltransformatoren (engl.: *distribution transformers*), Fahrzeugtransformatoren im Bahnbereich (engl.: *traction transformers*) und in Messwandlern (engl.: *instrument transformers*) zur elektrischen Isolation eingesetzt. Da der Umweltgedanke auch im Bereich der Energietechnik an Bedeutung gewonnen hat, wird verstärkt versucht, umweltfreundliche, alternative Isolierflüssigkeiten in Transformatoren zu verwenden. Zu den alternativen Isolierflüssigkeiten zählen synthetische Esterflüssigkeiten, natürliche Esterflüssigkeiten und Silikonöl [CIG10] S. 6. Silikonöl wird jedoch in weiterer Folge nicht behandelt, da es im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht wurde.



Synthetischer Ester wurde erstmals in den 1970er Jahren in Verteiltransformatoren als Isolierflüssigkeit eingesetzt. Heutzutage wird er vor allem in Transformatoren verwendet, bei denen die Brandsicherheit und der Umweltaspekt relevant sind. Synthetischer Ester wird häufig angewandt, wenn höhere Temperaturen im Betrieb auftreten können. Zusammen mit temperaturbeständigen Feststoffen wie Aramid bildet diese Isolierflüssigkeit somit ein Isoliersystem mit sehr guter thermischer Beständigkeit [CIG10] S. 7.

Natürlicher Ester wurde erstmals in den 1990er Jahren in Verteiltransformatoren eingesetzt. Diese Isolierflüssigkeit wird heutzutage noch immer vor allem in Verteiltransformatoren verwendet. Natürlicher Ester wird auch in Leistungstransformatoren im niedrigen Leistungsbereich eingesetzt. Über 200 Transformatoren bis 200 MVA und 242 kV sind in Betrieb [CIG10] S. 6, S. 8.

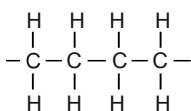
Sowohl für synthetischen als auch für natürlichen Ester besteht nun die Aufgabe, ihre Anwendung auf Transformatoren im hohen Leistungsbereich auszuweiten, bei welchen die Anforderungen an die Isolierflüssigkeit deutlich größer sind. Im Rahmen von Pilotprojekten wurden bereits vereinzelt Transformatoren im hohen Leistungsbereich mit Esterflüssigkeiten realisiert. In [Sie15] wird ein mit synthetischem Ester befüllter Spartransformator mit 240 MVA und 400/132/13 kV beschrieben, der in einer Umspannstation in London aufgestellt werden soll. In [Las14] S. 18 ist ein 420 kV Leistungstransformator dargestellt, der mit natürlichem Ester befüllt wurde. Dieser wurde in Baden-Württemberg eingesetzt, um das 380 kV-Netz mit dem 110 kV-Netz zu koppeln.

### Chemischer Aufbau

Mineralöl wird aus Erdöl hergestellt. Nach einer Raffination, Hydrierung und einer eventuellen Zugabe von Inhibitoren erhält man diese Isolierflüssigkeit. Die grundsätzlichen Komponenten von Mineralöl sind Paraffine, Naphtene, Aromate und Olefine. Die chemische Struktur dieser Bestandteile ist in **Abbildung 6-1** dargestellt [Küc09] S. 319. In Transformatoren wird entweder paraffinisches oder naphtenisches Mineralöl angewandt. Paraffinisches Mineralöl wird aus Rohöl mit einem hohen Anteil an n-Paraffinen hergestellt. Naphtenisches Mineralöl wird aus Rohöl mit einem geringen Gehalt an n-Paraffinen gewonnen [CIG10] S. 9.

Die Esterflüssigkeiten tragen ihren Namen von der nur in diesen Flüssigkeiten auftretenden Ester-Verbindung. Die chemische Struktur der Ester-Verbindung ist in **Abbildung 6-2** dargestellt. Synthetischer Ester wird aus Chemikalien hergestellt. Die Grundlage für die Herstellung von natürlichem Ester sind pflanzliche Öle. Dabei werden vor allem Soja-, Sonnenblumen- und Rapsöl verwendet. Der chemische Aufbau für synthetischen Ester ist aus **Abbildung 6-3** und für natürlichen Ester aus **Abbildung 6-4** ersichtlich [CIG10] S. 10 – S. 11.

a.) Paraffine



b.) Naphtene

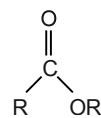
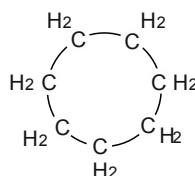
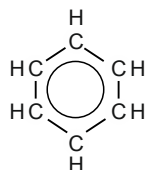


Abbildung 6-2: Chemischer Aufbau der Ester-Verbindung, entsprechend [CIG10] S. 10

c.) Aromate



d.) Olefine

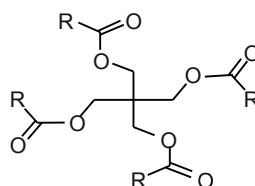
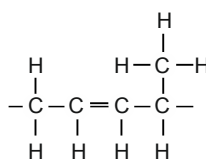


Abbildung 6-3: Chemischer Aufbau von synthetischem Ester, entsprechend [CIG10] S. 11

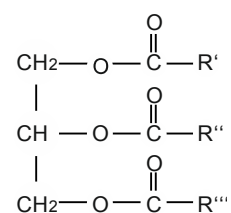


Abbildung 6-4: Chemischer Aufbau von natürlichem Ester, entsprechend [CIG10] S. 11

Abbildung 6-1: Chemischer Aufbau der grundsätzlichen Komponenten von Mineralöl, entsprechend [Küc09] S. 319

Legende zu **Abbildung 6-1 bis Abbildung 6-4** [CIG10] S. 10:

C	Kohlenstoff (Carbon)
H	Wasserstoff
O	Sauerstoff
R, R', R'', R'''	verschiedene Kohlenstoffketten
-	Einfachbindung
=	Doppelbindung

### Eigenschaften

Eine wichtige Eigenschaft einer Isolierflüssigkeit im Betrieb eines Transformators ist unter anderem ihre Fähigkeit zur Wasseraufnahme. H<sub>2</sub>O stellt ein polares Molekül dar, welches andere polare Moleküle anzieht. Mineralöl ist nicht polar, die Esterverbindung in **Abbildung 6-2** bedingt jedoch, dass die Esterflüssigkeiten polar sind. Daher können Esterflüssigkeiten weitaus höhere Mengen an Wasser aufnehmen als Mineralöl. Die Aufnahmefähigkeit von Wasser ist für die drei Isolierflüssigkeit bei 23 °C in ppm (*parts per million*) in **Tabelle 6-2** dargestellt. Die Sättigungsfeuchte ist eine Funktion der Temperatur. Je höher die Temperatur, desto mehr Wasser kann eine Isolierflüssigkeit aufnehmen [CIG10] S. 15 – S. 16.

Tabelle 6-2: Sättigungsfeuchte verschiedener Isolierflüssigkeiten, entsprechend [CIG10] S. 15

Isolierflüssigkeit	~Sättigungsfeuchte bei 23 °C
	ppm
Mineralöl	55
Synthetischer Ester	2600
Natürlicher Ester	1100

Für den Vergleich der Feuchte verschiedener Isolierflüssigkeiten kann nicht nur ihre absolute sondern auch ihre relative Feuchte herangezogen werden. Die Umrechnung zwischen absoluter und relativer Feuchte ist allgemein über **Gleichung 6-1** angegeben [CIG10] S. 16.

$$W_{rel} = \frac{W_{abs}}{W_{sat}} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Legende zu **Gleichung 6-1** [CIG10] S. 16:

$W_{rel}$	relative Feuchte bei einer bestimmten Temperatur in %
$W_{abs}$	absolute Feuchte in ppm
$W_{sat}$	Sättigungsfeuchte bei einer bestimmten Temperatur in ppm

Die drei Isolierflüssigkeiten unterscheiden sich auch bezüglich ihrer Oxidationsstabilität. Diese verhält sich folgendermaßen:

$$\text{Synthetischer Ester} > \text{Mineralöl} > \text{Natürlicher Ester}$$

Synthetischer Ester oxidiert bei Temperaturen > 125 °C. Als Nebenprodukte entstehen organische Säuren. Mineralöl oxidiert bereits bei niedrigeren Temperaturen von > 105 °C. Die Oxidation von Mineralöl führt zur Entstehung von organischen Säuren und Schlamm. Diese können die dielektrischen Eigenschaften der elektrischen Isolation negativ beeinflussen. Natürlicher Ester besitzt die schlechteste Oxidationsstabilität der betrachteten Isolierflüssigkeiten. Seine Oxidation führt zur Erhöhung der Viskosität. Sie kann die Isolierflüssigkeit zum Gelieren bringen und Nebenprodukte wie Alkohol oder Säuren hervorbringen [CIG10] S. 18 – S. 20.

Die Umweltverträglichkeit einer Isolierflüssigkeit stellt eine immer wichtigere Eigenschaft dar. Als umweltfreundlich wird eine Flüssigkeit bezeichnet, wenn sie schnell biologische abbaubar ist und eine niedrige Toxizität besitzt. Die Esterflüssigkeiten sind im Gegensatz zu Mineralöl als leicht bio-

logisch abbaubar eingestuft. Dies ist vorteilhaft falls es zum Austritt der Isolierflüssigkeit aus dem Transformatortank kommt. Dadurch sind aufwendige Reinigungsarbeiten nicht notwendig [CIG10] S. 17 – S. 18.

Mineralöl, synthetischer und natürlicher Ester werden von verschiedenen Herstellern angeboten. **Tabelle 6-3** enthält einige Eigenschaften speziell jener Isolierflüssigkeiten, die bei den experimentellen Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage verwendet wurden.

**Tabelle 6-3** enthält unter anderem den Flamm- und Brennpunkt der drei Isolierflüssigkeiten. Diese Werte beschreiben die Brandsicherheit. Für bestimmte Aufstellungsorte von Transformatoren stellt die Brandsicherheit der Isolierflüssigkeiten eine besonders wichtige Eigenschaft dar. Dies ist in Bereichen, an denen sich viele Menschen aufhalten z.B. in U-Bahntunneln, der Fall. Die Esterflüssigkeiten besitzen durch ihren höheren Flamm- und Brennpunkt eine höhere Brandsicherheit als Mineralöl [CIG10] S. 16 – S. 17.

Esterflüssigkeiten unterscheiden sich weiters von Mineralöl durch ihre deutlich höhere Viskosität [CIG10] S. 14. Für die untersuchten drei Isolierflüssigkeiten sind die Viskositätswerte in **Tabelle 6-3** für 40 °C zusammengefasst.

**Tabelle 6-3** enthält auch die dielektrischen Eigenschaften der drei untersuchten Isolierflüssigkeiten. Die angegebenen Werte wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage für die Flüssigkeiten in trockenem Zustand (3 % relative Feuchte) gemessen. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Esterflüssigkeiten im Vergleich zu Mineralöl in etwa die gleiche Durchschlagspannung  $U_d$  aufweisen. Sie besitzen weiters einen höheren Verlustfaktor  $\tan \delta$  und eine höhere Permittivität  $\epsilon_r$  sowie einen niedrigeren spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$ .

Tabelle 6-3: Eigenschaften der in der Strömungsmodellanlage untersuchten Isolierflüssigkeiten, \* laut [CIG10] S. 17, \*\* laut Datenblättern

Isolierflüssigkeit	Zusammensetzung**	Flammpunkt	Brennpunkt	$\nu^{**}$ bei 40 °C ISO 3104	$U_d$ IEC 60156	$\tan \delta$ bei 90 °C IEC 60247	$\epsilon_r$ bei 90 °C IEC 60247	$\rho$ bei 90 °C IEC 60247
		°C	°C	mm <sup>2</sup> /s	kV			$\Omega m$
Mineralöl	Naphtenisch	146** (ISO 2719)	170 – 180*	9,1	86,0	0,0009	2,09	$6,5 \cdot 10^{11}$
Synthetischer Ester	Pentaerythritester	260** (ISO 2719)	316** (ISO 2592)	28	89,9	0,0281	3	$7,2 \cdot 10^9$
Natürlicher Ester	Mischung natürlicher Triglyzeridester	327** (ISO 2592)	360** (ISO 2592)	37	87,1	0,0141	2,85	$1,2 \cdot 10^{10}$

Legende zu **Tabelle 6-3**:

- $\nu$  kinematische Viskosität in mm<sup>2</sup>/s
- $U_d$  Durchschlagspannung in kV
- $\tan \delta$  Verlustfaktor
- $\epsilon_r$  relative Permittivität
- $\rho$  spezifischer Widerstand in  $\Omega m$

### 6.1.2 Feststoffe

In der Strömungsmodellanlage wurden zwei verschiedene Feststoffe untersucht: Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994. Transformerboard B 3.1A besteht zum größten Anteil aus Zellulose und Nomex® 994 aus Aramid. Diese zwei Materialien werden im Folgenden kurz bezüglich ihres Einsatzes in Transformatoren, ihres chemischen Aufbaues und ihrer wichtigsten Eigenschaften miteinander verglichen.

#### Einsatz in Transformatoren

In Transformatoren mit einem flüssig/ festen Isoliersystem werden als fester Isolierstoff üblicherweise Pressboard und Papier auf Zellulosebasis verwendet [Mos87] S. 96, [Mos79] S. 21. Pressboard kann grundsätzlich als ein dickes Isolierpapier verstanden werden [Mos79] S. 21. Ein Bei-

spiel für ein sehr häufig im Transformatorenbau eingesetztes Pressboard ist Transformerboard, welches von der Firma *Weidmann Electrical Technology AG* hergestellt wird. Transformerboard ist unter anderem in verschiedenen Stärken und mit verschiedenen Dichten sowie mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit erhältlich. Das Transformerboard mit der Bezeichnung B 3.1A wird in Tafeln mit einer maximalen Dicke bis zu 0,8 cm erzeugt. Durch die Verklebung dieser Tafeln kann man auch Blockspan mit bis zu 20 cm Stärke herstellen. Blockspan bietet den Vorteil größter mechanischer Beständigkeit und elektrischer Durchschlagfestigkeit [Wei15] S. 6 – S. 17.

Bei höheren thermischen Anforderungen wird Zellulose durch feste Isolierstoffe auf der Basis von synthetischen Fasern (Aramid) wie z.B. Nomex® Pressboard und Nomex® Papier ersetzt [Küc09] S. 299, [Wei15\_a]. Nomex® wurde in Zusammenarbeit der Firmen *Weidmann Electrical Technology AG* und *Du Pont* entwickelt [Mos87] S. 96. Es wird in Transformatoren in thermisch stark beanspruchten Bereichen verwendet. Der Einsatz von Nomex® ermöglicht eine Reduktion der Maße bzw. eine längere Überlastung ohne Schädigung der Isolation [Mos87] S. 99. Der Substitutionsgrad hängt ab von der maximalen Last, den Kühlmaßnahmen und den zu erwartenden Laständerungen. Wenn die mittlere Temperatur der Isolierflüssigkeit erhöht ist z.B. in Transformatoren in Lokomotiven, erfordert dies eine vollständige Substitution von Transformerboard durch Nomex®. In Leistungstransformatoren mit hoher Temperatur der Isolierflüssigkeit im oberen Kesselbereich ist es notwendig, Bestandteile wie Lastschalter und Durchführungen durch Nomex®-Isolation thermisch abzutrennen [Mos87] S. 100 – S. 101. Ein grundsätzlicher Ersatz von Transformerboard durch Nomex® zahlt sich aufgrund der höheren Kosten für Nomex® häufig nicht aus. Ausnahmen ergeben sich, wenn eine Verringerung der Maße oder des Gewichtes eines Transformators durch den Einsatz von Nomex® eine deutliche Kostenreduktion bei der Errichtung einer Anlage (Verteilstation, Kraftwerk) schafft, sodass der höhere Preis des Transformators selbst eine untergeordnete Rolle spielt. Dies kann zum Beispiel bei unterirdischen Kraftwerken oder bei der Aufstellung des Transformators im Gebirge der Fall sein [Mos87] S. 99.

### Chemischer Aufbau

Pressboard besitzt grundsätzlich drei Bestandteile: Zellulose (70 – 75 %), Hemizellulose (15 – 25 %) und Lignin (3 – 5 %) [Pai01\_a] S. 2717. Die chemische Struktur des Hauptbestandteiles Zellulose ist in **Abbildung 6-5** dargestellt. Die verwendete Alpha-Zellulose wird gebildet durch "...ein aus Glukoseeinheiten bestehendes, kettenförmiges hochpolymeres Kohlehydrat..." [Mos79] S. 21.

Die Bezeichnung Aramid stammt von dessen Bestandteilen **A**romat und **P**oyamid. Die chemische Struktur von Aramid ist in **Abbildung 6-6** dargestellt [Sze13] Folie 3.

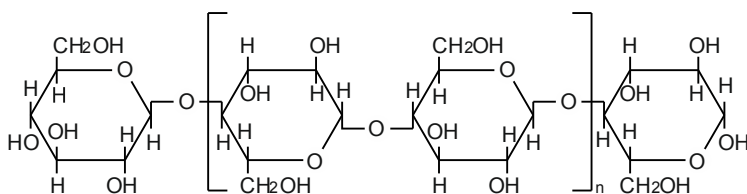


Abbildung 6-5: Chemischer Aufbau von Zellulose, entsprechend [Mos79] S. 21

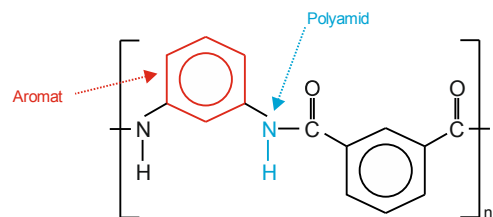


Abbildung 6-6: Chemischer Aufbau von Aramid, entsprechend [Sze13] Folie 3

### Eigenschaften

Der Vergleich von Transformerboard und Nomex® weist einige klare Vorteile für Nomex® auf:

- Betrieb bei hoher Temperatur:

Bei Transformerboard führen im Betrieb thermische Beanspruchungen über 120 °C zur Gasbildung und zur Änderung der Abmessungen. Nomex® kann im Gegensatz dazu bis zu Temperaturen von über 220 °C andauernd betrieben werden. Der Betrieb bei hoher Temperatur führt weder zur Gasbildung noch zur Entstehung anderer Nebenprodukte, die die Betriebsssi-

cherheit eines Transformators beeinflussen könnten. Nomex® weist weiters nur geringe Abmessungsänderungen durch den Betrieb bei höherer Temperatur auf [Mos87] S. 96.

- Trocknung:  
Dimensionsänderungen bei der Trocknung des festen Isolierstoffes äußern sich für Nomex® weitaus geringer [Mos87] S. 96.
- Dielektrische Eigenschaften:  
Das flüssig/ feste Isoliersystem weist bei der Anwendung von Nomex® aufgrund dessen niedrigerer relativer Permittivität  $\epsilon_r$  eine gleichmäßigere Verteilung der elektrischen Feldstärke zwischen Öl und Feststoff auf als bei auf Zellulose basierenden festen Isolierstoffen. Somit erhöht sich auch die Durchschlagspannung des Isoliersystems. Beispiele zu den relativen Permittivitätswerten von Kraftpapier auf Zellulosebasis und Nomex® Papier sind aus **Tabelle 6-4** ersichtlich [Sze13] Folie 9.

Tabelle 6-4: Vergleich der relativen Permittivität von Kraftpapier auf Zellulosebasis und Nomex®, entsprechend [Sze13] Folie 9

Feststoff	Dichte	Dicke	Relative Permittivität $\epsilon_r$
	$g/cm^3$	$mm$	
Kraftpapier auf Zellulosebasis	1,1	0,5	4,14
Nomex® Papier Type 410	1,06	0,51	3,17
Nomex® Papier Type E56	0,67	0,51	2,73

- Teilentladungsbeständigkeit:  
Nomex® besitzt im ölprägnierten Zustand eine bessere Teilentladungsbeständigkeit als Zellulose. Die Gegenüberstellung von Transformerboard B 3.1A und Nomex® NBC zeigte, dass es bei Nomex® erst nach der zehnfachen Zeit der Belastung zur Einleitung eines elektrischen Durchschlages gekommen ist [Mos87] S. 97, S.105.
- Brandsicherheit:  
Nomex® stellt grundsätzlich ein nicht brennbares Material dar [Mos87] S. 97.

Ein entscheidender Nachteil von Nomex® gegenüber Transformerboard sind, wie bereits erwähnt, die höheren Kosten [Mos87] S. 99.

Die in der Strömungsmodellanlage untersuchten Feststoffe Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 unterscheiden sich unter anderem durch zwei Eigenschaften, die die elektrostatische Aufladung beeinflussen. Diese sind ihre Oberflächenbeschaffenheit und ihr spezifischer Widerstand. Im Folgenden wird speziell auf diese beiden Eigenschaften näher eingegangen.

### Oberflächenbeschaffenheit

Grundsätzlich unterscheidet sich eine reale Oberfläche von der idealen Solloberfläche durch Gestaltabweichungen. Diese sind laut DIN 4760:1982 in sechs Arten eingeteilt. Gestaltabweichung sind unter anderem Rauheit und Welligkeit. Die reale Oberfläche kann in Wellen mit verschiedener Wellenlänge unterteilt werden. Die Welligkeit besitzt eine größere Wellenlänge als die Rauheit. Durch ein Profilfilter lässt sich das sogenannte Primärprofil (ungefiltertes Profil) einer Oberfläche in die Rauheit und die Welligkeit unterteilen, siehe **Abbildung 6-7**. Die Grenzwellenlänge  $\lambda_C$  eines Profilfilters stellt die Grenze zwischen Welligkeit und Rauheit dar [Jun12] S. 1 – S. 3. Statt der zweidimensionalen Messung der Oberflächenbeschaffenheit entlang einer Vorzugsrichtung d.h. entlang eines Profils, dienen moderne Messverfahren häufig zur dreidimensionalen Erfassung der gesamten Oberfläche. In diesem Fall verwendet man statt den Ausdrücken Primär-, Rauheits- und Welligkeitsprofil die Bezeichnungen Primär-, Rauheits- und Welligkeitsdatensatz einer Oberfläche.

Unabhängig von der Messmethode kann die Angabe von Welligkeit und Rauheit herangezogen werden, um die Beschaffenheit einer Oberfläche zu beurteilen und verschiedene Oberflächen mit einander zu vergleichen.

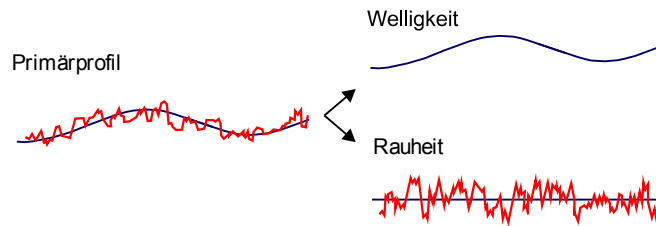


Abbildung 6-7: Unterteilung des Primärprofils in Welligkeit und Rauheit, entsprechend [Jun12] S. 2

Die Kanaloberflächen der Strömungsmodelle aus Transformerboard B 3.1A und aus Nomex® 994 sind unterschiedlich. Transformerboard B 3.1A besitzt eine Siebstruktur. Die Oberfläche von Nomex® 994 wurde gehobelt und stellt somit eine deutlich glattere Oberfläche dar. Um die Oberflächenbeschaffenheit der beiden Feststoffe zu vergleichen, wurden ihre Rauheit und Welligkeit am Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik der Technischen Universität Graz vermessen. Für die Messung wurde der Farbfokussensor InfiniteFocus G3 der Firma Alicona verwendet. Die Oberfläche wurde dabei nicht nur entlang eines Profils sondern dreidimensional vermessen.

Beim Farbfokussensor wird der zu untersuchende Feststoff in senkrechter Richtung bewegt. Es werden mehrere Bilder mittels Digitalkamera und Optik aufgezeichnet. Welcher Höhenbereich in den Aufnahmen scharf dargestellt ist, wird über die Objektivstellung bestimmt. Aus der Schärfeninformation lässt sich die Topographie der vermessenen Oberfläche errechnen [Lec06] S. 1229.

Als Ergebnis wurde ein Primärdatensatz generiert. Eine Abbildung dieses Datensatzes ist in einer Echtfarbandarstellung und in einer Falschfarbandarstellung möglich. Die Echtfarbandarstellung ist für Transformerboard B 3.1A aus **Abbildung 6-8** und für Nomex® 994 aus **Abbildung 6-9** ersichtlich. Man erkennt aus **Abbildung 6-8** deutlich die Siebstruktur von Transformerboard B 3.1A. Die Falschfarbandarstellung des Primärdatensatz ist für Transformerboard B 3.1A aus **Abbildung 6-10** und für Nomex® 994 aus **Abbildung 6-11** ersichtlich. Über die Farbinformation ist die Topographie veranschaulicht. Die in den Abbildungen auftretenden schwarzen Bereiche stellen Messausreißer dar, die jedoch bei der Berechnung von Oberflächenkenngrößen nicht berücksichtigt werden.

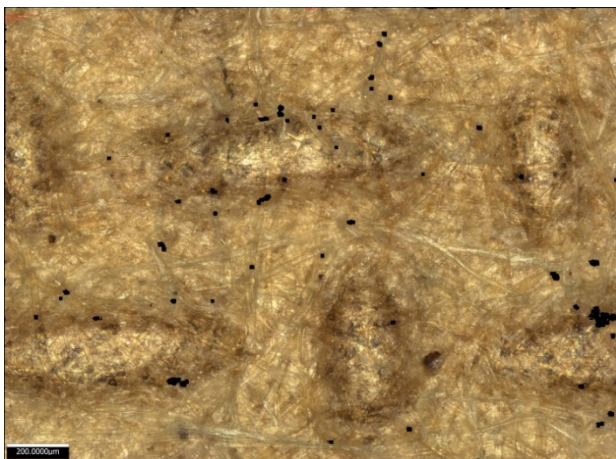


Abbildung 6-8: Echtfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Transformerboard B 3.1A

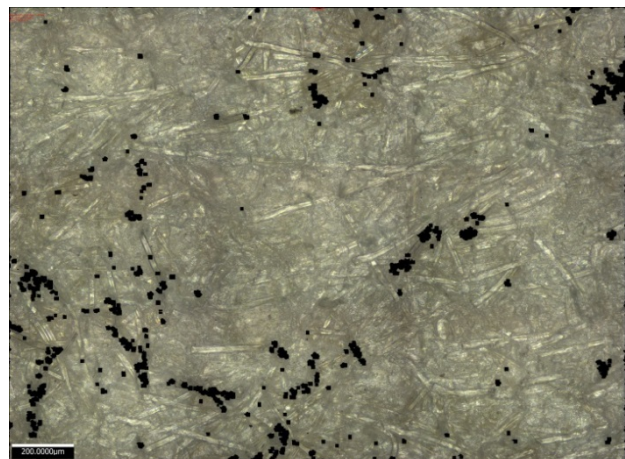


Abbildung 6-9: Echtfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Nomex® 994 gehobelt

Der Primärdatensatz wurde über einen Filter mit der Grenzwellenlänge  $\lambda_C$  von 150  $\mu\text{m}$  in den Rauheits- und den Welligkeitsdatensatz unterteilt. Durch Einsatz eines Hochpassfilters wurden alle Wellenlängen herausgefiltert, die größer als die Grenzwellenlänge sind. Dies ergab den Rauheitsdatensatz, der für Transformerboard B 3.1A in **Abbildung 6-12** und für Nomex® 994 in **Abbildung**

6-13 dargestellt ist. Durch Einsatz eines Tiefpassfilters wurden alle Wellenlängen herausgefiltert, die kleiner als die Grenzwellenlänge sind. Dies ergab den Welligkeitsdatensatz, der für Transformerboard B 3.1A in **Abbildung 6-14** und für Nomex® 994 in **Abbildung 6-15** dargestellt ist.

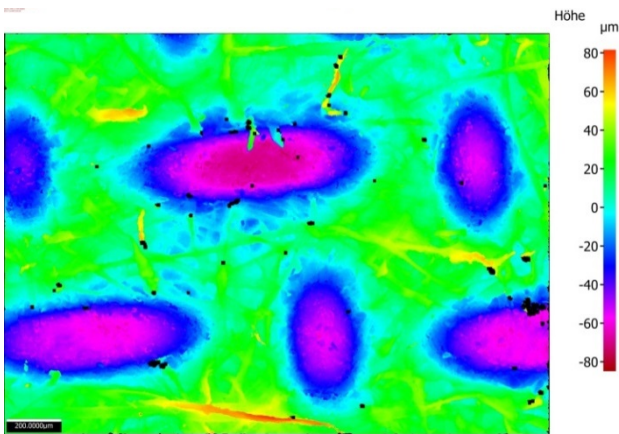


Abbildung 6-10: Falschfarbendarstellung des Primärdatensatzes von Transformerboard B 3.1A

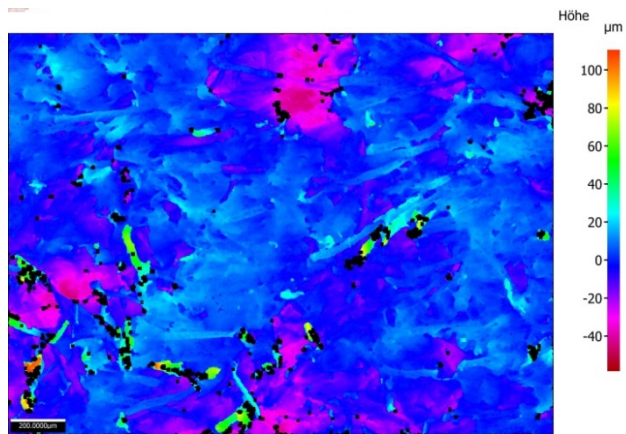


Abbildung 6-11: Falschfarbendarstellung des Primärdatensatzes von Nomex® 994 gehobelt

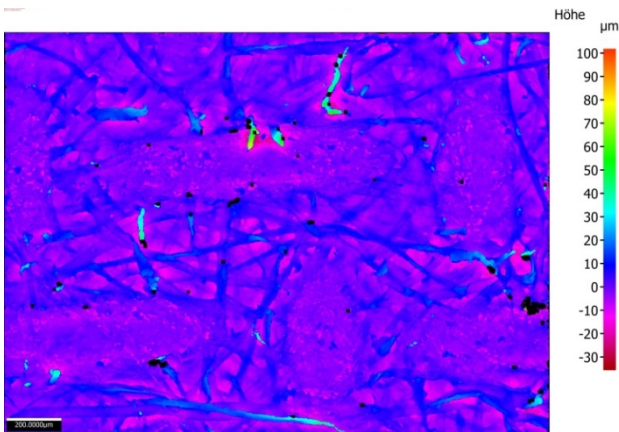


Abbildung 6-12: Falschfarbendarstellung des Rauheitsdatensatzes von Transformerboard B 3.1A,  $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$

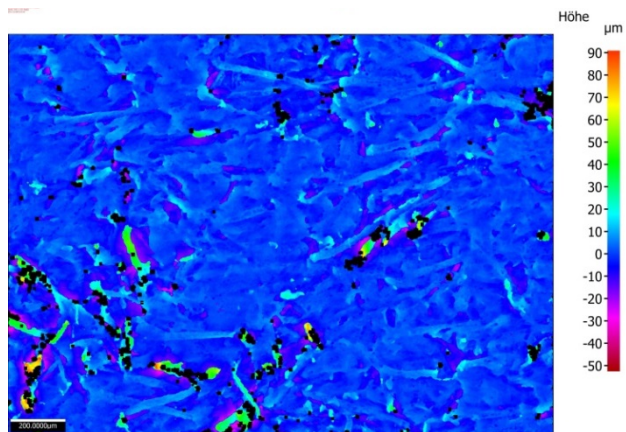


Abbildung 6-13: Falschfarbendarstellung des Rauheitsdatensatzes von Nomex® 994 gehobelt,  $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$

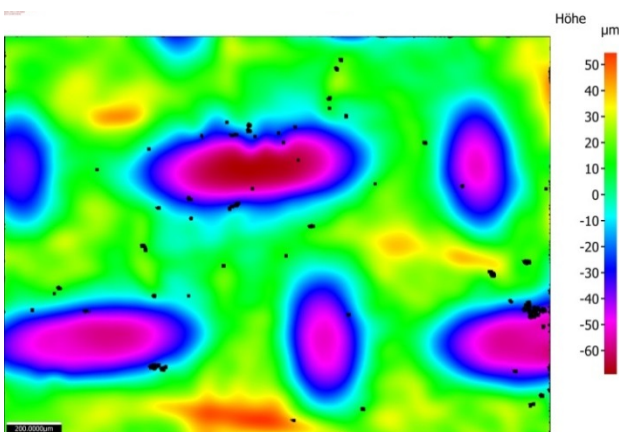


Abbildung 6-14: Falschfarbendarstellung des Welligkeitsdatensatzes von Transformerboard B 3.1A,  $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$

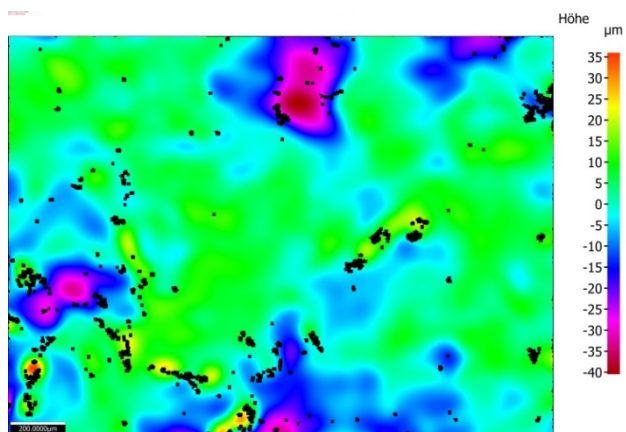


Abbildung 6-15: Falschfarbendarstellung des Welligkeitsdatensatzes von Nomex® 994 gehobelt,  $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$

Aus dem Rauheits- und den Welligkeitsdatensatz wurde der arithmetische Mittelwert der Höhen  $S_a$  über **Gleichung 6-2** laut EN ISO 25178-2:2012 S. 13 berechnet. Die Berechnung ergab für die Oberfläche der beiden Feststoffe die in **Tabelle 6-5** angegebenen Werte.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy \quad \text{Gleichung 6-2}$$

Legende zu **Gleichung 6-2**:

$S_a$  arithmetischer Mittelwert der Höhen in  $\mu m$   
 $A$  betrachtete Oberfläche in  $\mu m^2$   
 $z(x,y)$  Profilhöhe in  $\mu m$

Tabelle 6-5: Oberflächenbeschaffenheit der in der Strömungsmodellanlage untersuchten Feststoffe

Feststoff	$S_a$	
	Rauheit	Welligkeit
	$\mu m$	$\mu m$
Transformerboard B 3.1A	4,1	20,9
Nomex® 994	4,3	6,6

Die Rauheit berücksichtigt vor allem die Mikrostruktur der Feststoffproben d.h. die Fasern. Man erkennt aus **Tabelle 6-5**, dass der  $S_a$ -Wert für die Rauheit der beiden Feststoffe relativ gleich hoch ist. Dies bedeutet, dass auch die Faserstruktur sehr ähnlich ist. Die Welligkeit berücksichtigt Erscheinungen wie die Siebstruktur von Transformerboard B 3.1A. Daher besitzt Transformerboard B 3.1A einen deutlich höheren  $S_a$ -Wert für die Welligkeit als das bearbeitete Nomex® 994.

### Spezifischer Widerstand

In [Fab12] wurde die Leitfähigkeit verschiedener in Mineralöl imprägnierter Feststoffe über Polarisierung und Depolarisation bei unterschiedlichen Spannungsbeanspruchungen und Temperaturen als Funktion der Zeit gemessen. Der spezifische Widerstand von Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 lässt sich aus der in [Fab12] S. 114 – S. 115 und S. 118 - S. 119 für die beiden Feststoffe gemessenen Leitfähigkeit über **Gleichung 6-3** ([Küc09] S. 411) berechnen. **Tabelle 6-6** gibt den spezifischen Widerstand an, der bei 25 °C nach 10-minütiger Beanspruchung mit 1 kV bestanden hat. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass der spezifische Widerstand von Nomex® 994 höher ist als jener von Transformerboard B 3.1A.

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad \text{Gleichung 6-3}$$

Legende zu **Gleichung 6-3**:

$\kappa$  Leitfähigkeit in S/m  
 $\rho$  spezifischer Widerstand in  $\Omega m$

Tabelle 6-6: Spezifischer Widerstand der in der Strömungsmodellanlage untersuchten Feststoffe, berechnet aus den Diagrammen in [Fab12] S. 114 und S. 118

Feststoff	$\rho$
	$\Omega m$
Transformerboard B 3.1A	$2,5 \cdot 10^{14}$
Nomex® 994	$10^{15}$



## 6.2 Variationsparameter

Bei den experimentellen Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage an den sechs Isoliermaterialpaaren aus **Tabelle 6-1** wurden vier Parameter variiert. Diese sind im Folgenden beschrieben.

### Strömungsgeschwindigkeit der Isolierflüssigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit der Isolierflüssigkeit in den Kühlkanälen zwangsgekühlter Transformatoren stellt wie bereits erwähnt einen der wichtigsten Einflussparameter auf die elektrostatische Aufladung dar [Sie94] S. 859. Im Strömungsmodell wurden die Geschwindigkeiten 0,5 m/s, 1 m/s, 2 m/s und 4 m/s eingestellt. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit wurde für die Esterflüssigkeiten bei den Untersuchungen bei 20 °C auf 2,5 m/s begrenzt. Weiters wurde bei bestimmten Untersuchungen, in denen Auffälligkeiten im Stromverlauf auftraten, die mit Entladungen in Zusammenhang gebracht wurden, auf die Vermessung der höheren Strömungsgeschwindigkeiten verzichtet.

Laut [Lem96] S. 6 nimmt die Isolierflüssigkeit in den Kühlkanälen zwangsgekühlter Transformatoren mittlere Geschwindigkeiten von nur maximal 1 m/s an. Es war jedoch besonders zur Beurteilung von Trends wichtig auch höhere Strömungsgeschwindigkeiten zu untersuchen.

### Systemtemperatur

Die Untersuchungen wurden bei den Systemtemperaturen 20 °C, 60 °C und 90 °C durchgeführt. Bei den Untersuchungen bei 20 °C besaß das Strömungsmodell Raumtemperatur. Die Isolierflüssigkeit wurde auf die 20 °C heruntergekühlt. Für Untersuchungen bei 60 °C und 90 °C wurden die Isolierflüssigkeit und das Strömungsmodell erwärmt.

### Feuchte der Isolierflüssigkeit

Es wurden Versuche mit trockener und feuchter Isolierflüssigkeit durchgeführt. Bei den Trockenversuchen nahm die relative Feuchte der Isolierflüssigkeit einen Wert von um die 3 % an. Bei den Feuchtversuchen wurde ein Wert von ca. 20 % eingestellt. Die Strömungsmodelle wurden immer mit trockener Isolierflüssigkeit imprägniert.

### Spannungsbeanspruchung

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde auch der Einfluss einer elektrischen Wechsellspannungsbeanspruchung erforscht. Es wurde die elektrostatische Aufladungsneigung ohne Spannungsbeanspruchung mit jener bei Spannungsbeanspruchung bei 20 °C verglichen.

## 6.3 Versuchsvorbereitungen

Vor dem Beginn einer Versuchsreihe wurden die folgenden versuchsvorbereitenden Maßnahmen getroffen:

1. Trocknung und Imprägnierung der Strömungsmodelle
2. Einstellung der Feuchte der Isolierflüssigkeit in der Strömungsmodellanlage
3. Modelleinbau und Verschaltung des Messsystems
4. Vorversuch

### Trocknung und Imprägnierung der Strömungsmodelle

Die Strömungsmodelle wurden in einem Vapour-Phase Ofen getrocknet. Anschließend erfolgte die Imprägnierung der Modelle im Imprägnierkessel, siehe **Abbildung 6-16**.



Abbildung 6-16: Imprägniergefäß für die Strömungsmodelle

Die Imprägnierung erfolgte immer nach demselben Schema:

- Die Strömungsmodelle wurden in den Imprägnierkessel gestellt. Der Kessel wurde luftdicht verschlossen. Mittels Vakuumpumpe wurde ein Unterdruck von  $< 0,5$  mbar erzeugt und für zwei Stunden gehalten.
- Isolierflüssigkeit wurde aufbereitet. Der Feuchtegehalt wurde über einen kapazitiven Feuchtesensor überprüft.
- Trockene und auf  $40\text{ °C}$  erwärmte Isolierflüssigkeit wurde in den Imprägnierkessel gepumpt. Nach der vollständigen Befüllung des Kessels wurde das Vakuum noch vier weitere Stunden beibehalten und danach über eine Silikagelvorlage am Kessel gebrochen. Um die Isolierflüssigkeit nicht zu rasch abkühlen zu lassen und somit eine effizientere Imprägnierung zu ermöglichen, war der Imprägnierkessel wärmeisoliert.
- Für Mineralöl wurde bei Raumtemperatur von einer notwendigen Imprägnierzeit von 2,5 Tagen ausgegangen. Aufgrund der höheren Viskosität der Esterflüssigkeiten, siehe **Tabelle 6-3**, wurde bei diesen eine längere Imprägnierzeit der Modelle vorgesehen. Für synthetischen und natürlichen Ester wurde die dreifache Imprägnierzeit eingehalten.

### Einstellung der Feuchte der Isolierflüssigkeit in der Strömungsmodellanlage

Vor der experimentellen Untersuchung eines Isoliermaterialpaares musste erst die gewünschte Feuchte der Isolierflüssigkeit in der Strömungsmodellanlage eingestellt werden. Bei den Trockenversuchen wurde eine relative Feuchte von ca. 3 % bei  $20\text{ °C}$  eingestellt. Dafür wurde die Isolierflüssigkeit über eine Aufbereitungsanlage getrocknet und gleichzeitig über die integrierten Filter von Partikeln gereinigt. Bei den Feuchtversuchen wurde eine relative Feuchte von ca. 20 % bei  $20\text{ °C}$  in der Strömungsmodellanlage eingestellt. Dafür musste die Isolierflüssigkeit durch Zugabe von entionisiertem Wasser befeuchtet werden. Die Isolierflüssigkeit wurde auch vor den Feucht-

versuchen durch die Aufbereitungsanlage geleitet. Dabei wurde jedoch nur eine Filterung durchgeführt. Nach der Feuchteinstellung vor den Feucht- und Trockenversuchen wurde immer eine Ruhezeit von mindestens drei Tagen bis zum Beginn der Messungen eingehalten.

### Modelleinbau und Verschaltung des Messsystems

Der Modelleinbau wurde nach einem genau definierten Ablaufplan immer in gleicher Weise durchgeführt. Nach der Montage des Modells in der Anlage wurden die Messelektroden in bestimmten Abständen entsprechend **Abbildung 6-17** mit einem Anpressdruck von 5 Nm am Modell angebracht. Die Messelektroden wurden mit dem Messsystem entsprechend **Abbildung 5-14** verschaltet.

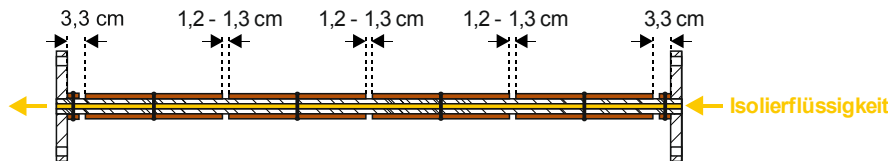


Abbildung 6-17: Position der Messelektroden entlang des Strömungsmodells

### Vorversuch

Nach der Montage des Modells und der Verschaltung des Messsystems wurde das Modell mit der Isolierflüssigkeit geflutet. Danach erfolgte ein Vorversuch, bei welchem das Modell mit der auf 20 °C temperierten Isolierflüssigkeit mit 4 m/s bei Mineralöl und 2,5 m/s bei Ester durchströmt wurde. Dies ermöglichte es die Dichtheit des Modells bei der maximal bei den Versuchen auftretenden Druckbelastung zu überprüfen. Außerdem wurde getestet, ob alle Messstellen richtig angeschlossen waren und vom Messsystem erfasst wurden. Weiters wurden durch die Durchströmung des Modells im Rahmen des Vorversuches Luftbläschen aus dem Modell gespült. Die erste Messung der Versuchsreihe wurde am Tag nach dem Vorversuch durchgeführt.

## 6.4 Versuchsablauf

Da es keine normativen Vorgaben für die Messung der elektrostatischen Aufladungsneigung unter Anwendung von Versuchsaufbauten mit ebener Strömung gibt, musste ein geeigneter Versuchsplan erst entwickelt werden. Basierend auf den Erfahrungen und Erkenntnissen aus Vorversuchen konnte ein Versuchsplan festgelegt werden. Im Folgenden wird die Ableitstrommessung nach diesem Versuchsplan beschrieben. Weiters wird kurz auf Zusatzmessungen mit einem Elektroföldmeter eingegangen. Dann wird ein Überblick über die durchgeführten Versuchsreihen gegeben.

### 6.4.1 Ableitstrommessung am Strömungsmodell

Im Rahmen einer Versuchsreihe wurde immer nur ein Isoliermaterialpaar untersucht. Eine Versuchsreihe erfolgte nach dem in **Abbildung 6-18** dargestellten Versuchsplan. Sie bestand aus vier Messserien (MS). Jede Messserie erforderte einen Zeitaufwand von einem Tag. Die erste Messserie wurde bei 20 °C, die zweite bei 60 °C und die dritte bei 90 °C durchgeführt. Die letzte Messserie fand wieder bei 20 °C und unter Hochspannungsbeanspruchung statt. Die Aufheizung von 20 °C auf 60 °C bzw. von 60 °C auf 90 °C erfolgte über Nacht. Die Abkühlung zwischen der 90 °C-Messserie und der 20 °C-Wiederholungsmessserie mit Hochspannungsbeanspruchung erforderte einen zusätzlichen Tag. An diesem Tag fand der Umbau der Messschaltung auf die Hochspannungsmessung statt, siehe **Abbildung 5-15**. Danach wurde ein zweiter Vorversuch durchgeführt, um die Messschaltung zu überprüfen.

Nach jeder Messserie wurde eine Probe der Isolierflüssigkeit aus der Strömungsmodellanlage entnommen. Diese wurde bezüglich Durchschlagsspannung, Verlustfaktor, relativer Permittivität, spezifischem Widerstand und absoluter Feuchte vermessen. Die Durchschlagsspannung wurde nach

IEC 60156:1995 mit dem Messgerät DTA-E der Firma Baur ermittelt. Die Bestimmung von Verlustfaktor, relativer Permittivität und spezifischem Widerstand erfolgte mittels DTL der Firma Baur entsprechend IEC 60247:2004. Die absolute Feuchte der Isolierflüssigkeit wurde über eine Karl Fischer Titration ermittelt.

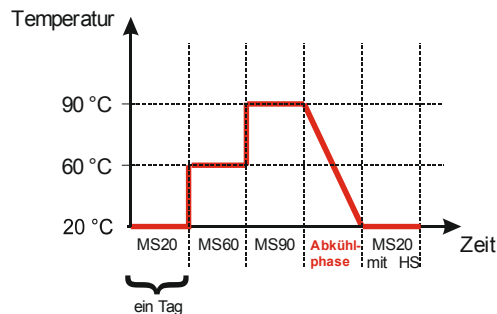


Abbildung 6-18: Versuchsplan

Im Folgenden wird auf den Ablauf einer Messserie eingegangen, wobei zwischen Messserien mit und ohne Hochspannungsbeanspruchung unterschieden wird.

### Messserien ohne Hochspannungsbeanspruchung

Im Rahmen einer Messserie wurden vier Strömungsgeschwindigkeiten hintereinander vermessen: 0,5 m/s, 1 m/s, 2 m/s und 4 m/s (bzw. maximal 2,5 m/s bei 20 °C und Ester). Zwischen der Vermessung unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten wurde jeweils eine bestimmte Ruhezeit eingehalten. In dieser Zeit zirkulierte die Isolierflüssigkeit im geschlossenen Kreislauf über den Bypass der Anlage mit verminderter Flussgeschwindigkeit. Diese Ruhezeit wurde einerseits zur verstärkten Relaxation von Ladungen aus der Isolierflüssigkeit genutzt. Andererseits war sie bei der Temperatureinstellung der Isolierflüssigkeit für Untersuchungen bei höherer Temperatur notwendig. Am Ende der Messserie wurde die niedrigste Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s noch einmal vermessen.

Das Ziel der Messungen war es den stationären Zustand der Ableitströme am Modell zu bestimmen. Dieser ist ein Maß für die Ladungstrennung bzw. Ladungserzeugung an der flüssig/ festen Grenzfläche. Im Rahmen von Vorversuchen wurde ermittelt, wie lange die Ableitströme für das Erreichen des stationären Zustandes benötigen. Aus den Erkenntnissen der Vorversuche wurde dann der in **Abbildung 6-19** dargestellte Zeitplan für eine Messserie erstellt. Für die Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung wurde grundsätzlich der Ableitstrom am ersten Elektrodenpaar  $I_1$  herangezogen. Daher ist auch dieser in **Abbildung 6-19** dargestellt.

### Messserien unter Hochspannungsbeanspruchung

Die Messserien unter Hochspannungsbeanspruchung wurden nach demselben Zeitplan durchgeführt wie die Messserien ohne Hochspannungsbeanspruchung. Die Hochspannungsbeanspruchung wurde in den Zeitplan folgendermaßen integriert:

15 Minuten vor Ende der Durchströmung mit einer Strömungsgeschwindigkeit wurde eine Wechselspannung von 2 kV an das erste Elektrodenpaar angelegt und 10 Minuten beibehalten. 5 Minuten vor Ende der Durchströmung wurde die Hochspannung wieder ausgeschaltet. Der Versuchsaufbau ist aus **Abbildung 6-20** ersichtlich.

Bei den Messserien unter Hochspannungsbeanspruchung wurden nur die Ableitströme  $I_3$  und  $I_4$  vermessen, siehe Messschaltung in **Abbildung 5-15**. Für die Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung bei den Untersuchungen der 20 °C-Wiederholungsmessung wurde grundsätzlich der Ableitstrom  $I_3$  herangezogen. Daher ist in **Abbildung 6-20** auch der Ableitstrom  $I_3$  als Funktion der Zeit dargestellt.

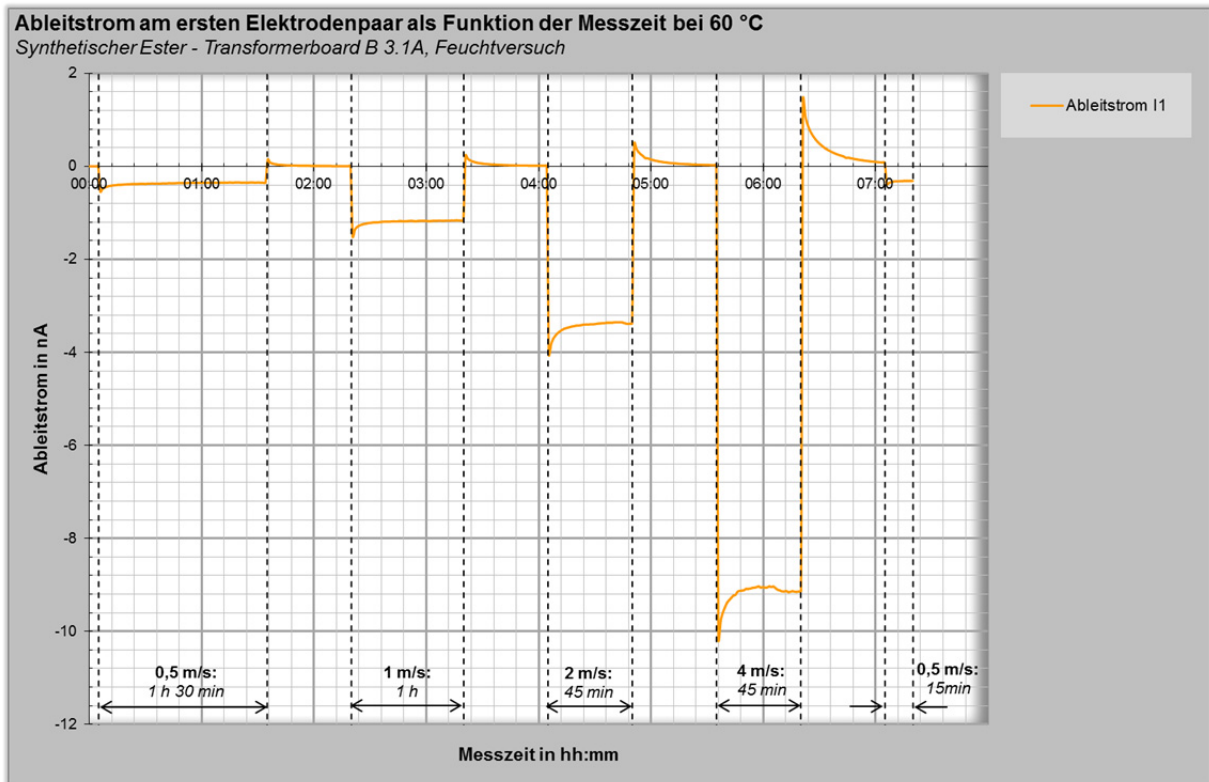


Abbildung 6-19: Zeitplan einer Messserie ohne Hochspannungsbeanspruchung

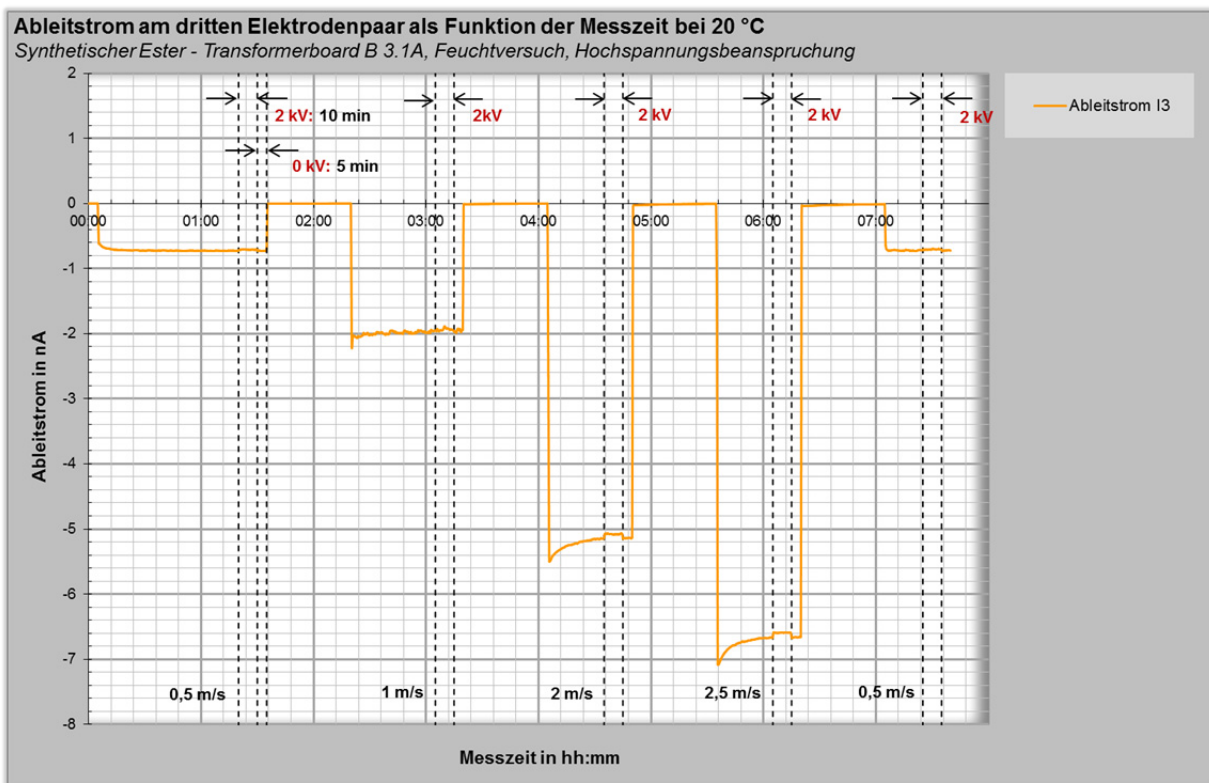


Abbildung 6-20: Messserie unter Hochspannungsbeanspruchung

### 6.4.2 Spannungsmessung am Strömungsmodell

Neben den Aufladungsuntersuchungen über die Ableitströme wurden im Rahmen von einzelnen Zusatzmessungen die sich beim Durchströmen des Modells an diesem aufbauenden Spannungen bestimmt. Nach der Abarbeitung des regulären Versuchsplanes in **Abbildung 6-18** wurden dafür zwei Messserien mit Spannungsmessung an zwei aufeinanderfolgenden Tagen angehängt. Bei der einen wurde mittels der Schaltung in **Abbildung 5-16** die Spannung an Elektrodenpaar 3 gemessen. Bei der zweiten Messserie wurde mittels der Schaltung in **Abbildung 5-17** die Spannung am gesamten Modell erfasst. Die Messserien erfolgten ausschließlich bei 20 °C. Sie wurden nach dem gleichen Zeitplan durchgeführt wie die Messserien mit Ableitstrommessung, siehe **Abbildung 6-19**. Dabei wurden meist nicht alle Strömungsgeschwindigkeiten vermessen, um das Modell durch den Spannungsaufbau nicht zu gefährden.

### 6.4.3 Überblick durchgeführter Versuchsreihen

In **Tabelle 6-7** wird ein Überblick über alle im Rahmen der Aufladungsuntersuchungen durchgeführten Versuchsreihen mit der Strömungsmodellanlage gegeben. Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, wurde im Rahmen einer Versuchsreihe der Einfluss der Variationsparameter Strömungsgeschwindigkeit, Systemtemperatur und Spannungsbeanspruchung für ein Isoliermaterialpaar untersucht. Die Feuchte der Isolierflüssigkeit konnte nicht im Rahmen derselben Versuchsreihe variiert werden, da die Feuchteeinstellung der Isolierflüssigkeit eine längere Vorbereitungszeit benötigte. Für die Untersuchung des Einflusses der Feuchte wurde eine neue Versuchsreihe mit dem gleichen Isoliermaterialpaar durchgeführt. In **Tabelle 6-7** sind für jede Versuchsreihe das untersuchte Isoliermaterialpaar und der eingestellte Feuchtezustand der Isolierflüssigkeit angegeben. Nach bestimmten Untersuchungen wurden Entladespuren in den Modellen entdeckt. Im Rahmen von VR13 wurde eine zusätzliche Untersuchung mit einem Modell durchgeführt, das im Kanalinneren bereits Entladespuren enthielt, um den Einfluss dieser Entladespuren auf das Aufladungsverhalten zu erforschen. Die Zusatzmessungen mit dem Elektrofeldmeter erfolgten nur nach den Trockenversuchen mit den Esterflüssigkeiten.

Tabelle 6-7: Überblick über experimentelle Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage

Versuchsreihe	Materialpaar	Feuchtezustand
VR1	Mineralöl – Transformerboard B 3.1A	feucht
VR2	Mineralöl – Nomex® 994	
VR3	Mineralöl – Transformerboard B 3.1A	trocken
VR4	Mineralöl – Nomex® 994	
VR5	synthetischer Ester – Transformerboard B 3.1A	feucht
VR6	synthetischer Ester – Nomex® 994	
VR7	synthetischer Ester – Transformerboard B 3.1A	trocken
VR8	synthetischer Ester – Nomex® 994	
VR9	natürlicher Ester – Transformerboard B 3.1A	feucht
VR10	natürlicher Ester – Nomex® 994	
VR11	natürlicher Ester – Transformerboard B 3.1A	trocken
VR12	natürlicher Ester – Nomex® 994	
VR13	natürlicher Ester – Nomex® 994 (Entladespuren)	

## 6.5 Auswertung der Messergebnisse

Die Vorgangsweise bei der Auswertung der Strom-Zeitverläufe und der Spannungs-Zeitverläufe wird im Folgenden beschrieben.

### Auswertung von Messserien ohne Hochspannungsbeanspruchung

Aus den aufgezeichneten Stromkurven wurde der stationäre Ableitstrom für jede Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Dabei wurde so vorgegangen, dass der Medianwert des Ableitstromes der letzten 10 Minuten vor Durchströmungsende einer Strömungsgeschwindigkeit berechnet wurde, siehe **Abbildung 6-21**. Die letzten 10 Minuten wurden herangezogen, da hier der Strom generell konstant war. Durch die Anwendung des Medianwertes wurden eventuell auftretende Messausreißer in der Berechnung nicht berücksichtigt.

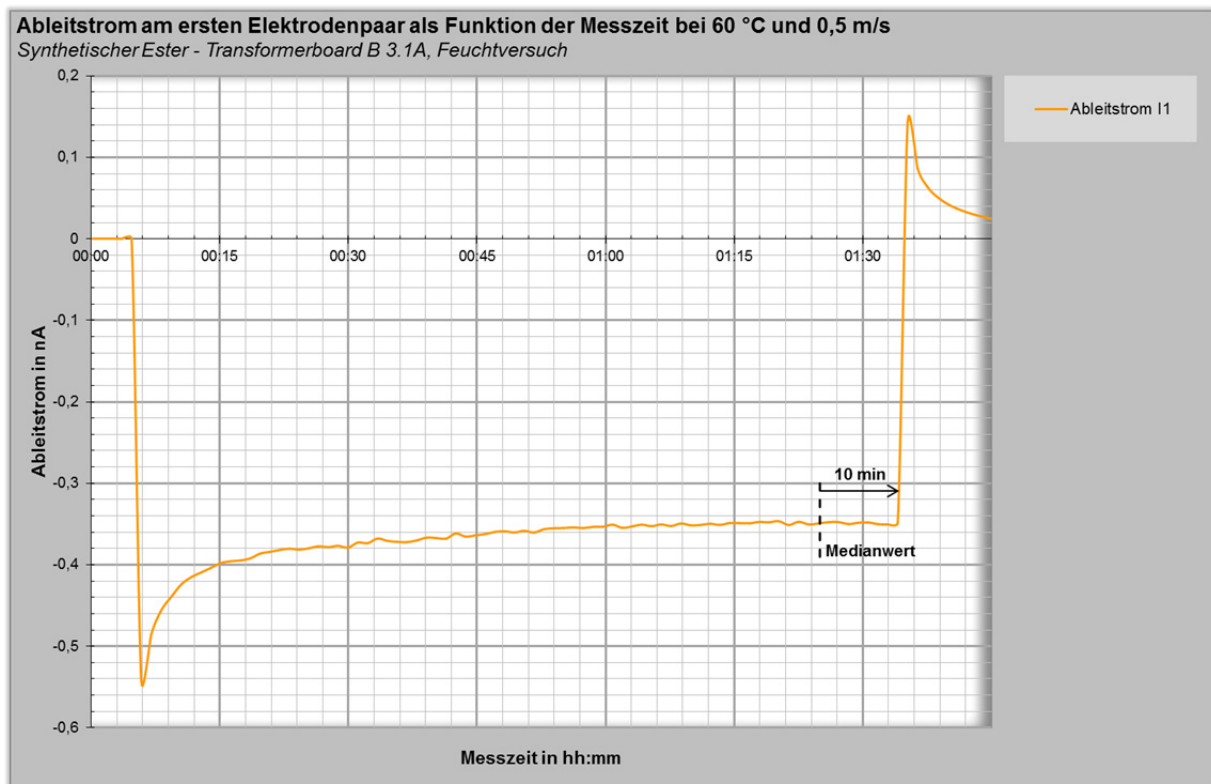


Abbildung 6-21: Auswertung der Strom-Zeitverläufe einer Messserie ohne Hochspannungsbeanspruchung

### Auswertung von Messserien unter Hochspannungsbeanspruchung

Aus den aufgezeichneten Stromkurven wurden die zwei stationären Ableitstromwerte  $I_{\text{vorHS}}$  und  $I_{2\text{kV}}$  als Ergebniswerte für jede Strömungsgeschwindigkeit bestimmt, siehe **Abbildung 6-22**. Die Ableitstromwerte  $I_{\text{vorHS}}$  und  $I_{2\text{kV}}$  ergeben sich folgendermaßen:

- $I_{\text{vorHS}}$ : Medianwert innerhalb der vier Minuten vor HS-Beanspruchung
- $I_{2\text{kV}}$ : Medianwert innerhalb der vier Minuten nach Beginn der HS-Beanspruchung

Um die Auswirkung der Hochspannungsbeanspruchung zu ermitteln, wurden die Werte  $I_{\text{vorHS}}$  und  $I_{2\text{kV}}$  mit einander verglichen.

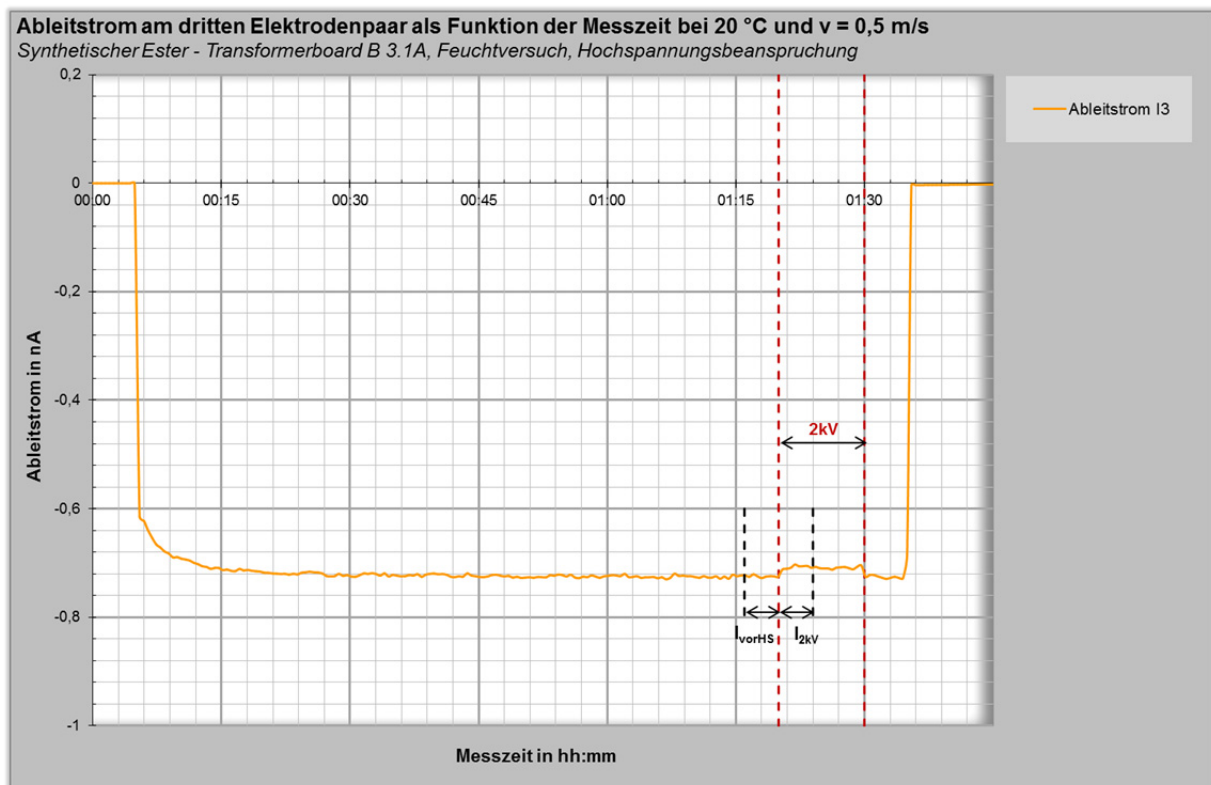


Abbildung 6-22: Auswertung der Strom-Zeitverläufe einer Messserie mit Hochspannungsbeanspruchung

### Auswertung der Messserien mit Spannungsmessung

Die Auswertung der Spannungskurven erfolgte analog wie bei den Ableitströmen: In den letzten 10 Minuten vor Durchströmungsende einer Strömungsgeschwindigkeit wurde der Medianwert der Spannung ermittelt.

## 6.6 Versuchsnachbereitungen

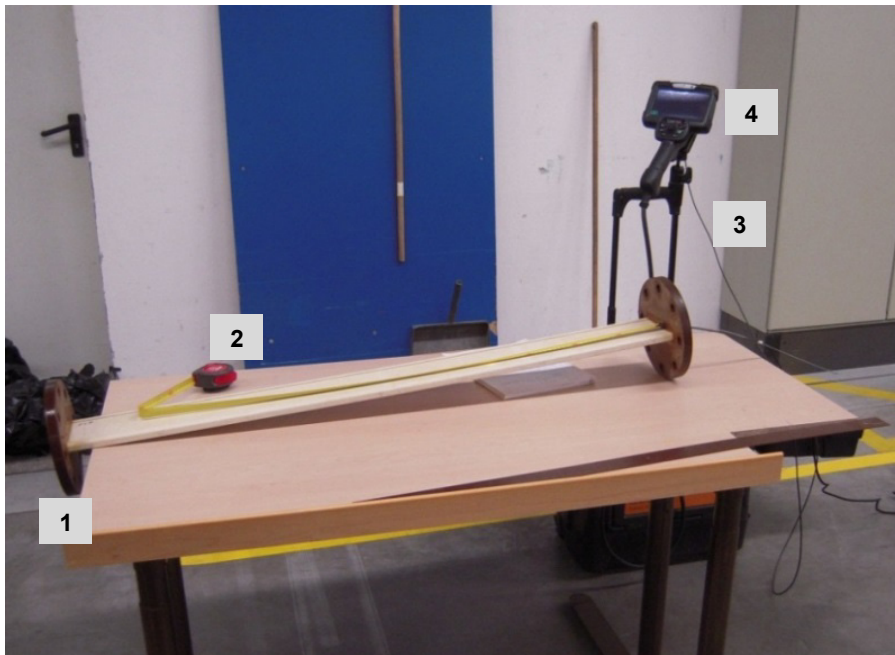
Im Folgenden sind verschiedene versuchsnachbereitende Maßnahmen beschrieben. Zuerst wird auf die Untersuchung der Strömungsmodelle auf Entladespuren hin eingegangen. Dann werden die Maßnahmen bei einem Wechsel der Isolierflüssigkeit in der Strömungsmodellanlage beschrieben.

### 6.6.1 Untersuchung der Strömungsmodelle auf Entladespuren

Nach jeder Versuchsreihe wurden die Strömungsmodelle aus der Versuchsanlage ausgebaut und auf Entladespuren hin untersucht. Die Außenseiten wurden ohne weitere Hilfsmittel optisch geprüft. Die Kanalinnenseiten wurden mittels einer Endoskopkamera untersucht, siehe **Abbildung 6-23**. Auffällige Stellen wurden fotografiert und ihre Position am bzw. im Modell wurde mit einem Maßband vermessen und notiert.

Wenn ein Modell nicht mehr für weitere Untersuchungen benötigt wurde, wurde es aufgeschnitten, um die Form der entdeckten Entladespuren genauer analysieren zu können. Dafür wurde eine der beiden breiten Seiten des Modells entfernt. Ein Beispiel eines aufgeschnittenen Strömungsmodells ist in **Abbildung 6-24** dargestellt.





Legende zu **Abbildung 6-23**:

- 1 Strömungsmodell
- 2 Maßband
- 3 Messkabel mit Kamera an der Spitze
- 4 Bildschirm, zeigt Aufnahmen der Kamera

Abbildung 6-23: Untersuchung des Kanalinneren der Strömungsmodelle mittels Endoskopkamera

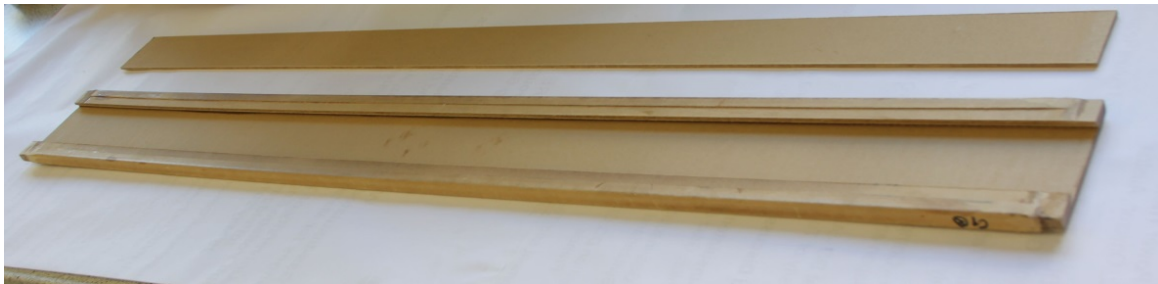


Abbildung 6-24: Aufgeschnittenes Strömungsmodell aus Transformerboard B 3.1A

### 6.6.2 Wechsel der Isolierflüssigkeit in der Strömungsmodellanlage

Nachdem eine Isolierflüssigkeit in Kombination mit beiden Feststoffen für alle Variationsparameter vermessen wurde, wurden die gleichen Untersuchungen für die nächste Isolierflüssigkeit durchgeführt. Dies ist auch aus der zeitlich chronologisch dargestellten Auflistung der Versuchsreihen in **Tabelle 6-7** ersichtlich. Für die Untersuchung einer neuen Isolierflüssigkeit mussten die Strömungsmodellanlage, die Aufbereitungsanlage und der Imprägnierkessel entleert und sorgfältig mit der neuen Isolierflüssigkeit gespült werden. Erst dann war die Befüllung mit der neuen Isolierflüssigkeit möglich.

# 7 ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit der Strömungsmodellanlage dargestellt und diskutiert. Vorab wird das Verhalten der Ableitströme am Strömungsmodell beschrieben, die in weiterer Folge für die Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung herangezogen werden.

Die elektrostatische Aufladungsneigung der untersuchten Isoliermaterialpaare wird als erstes in Abhängigkeit der verwendeten Isolierstoffe bei verschiedenen Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten analysiert. Zuerst wird der Einfluss der Art der Isolierflüssigkeit und dann der Type des eingesetzten festen Isolierstoffes behandelt.

In weiterer Folge wird die elektrostatische Aufladungsneigung der untersuchten flüssig/ festen Isoliermaterialpaare in Abhängigkeit verschiedener Parameter beschrieben. Zuerst wird der Einfluss der Strömungsform im Strömungsmodell erläutert, die sich in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Systemtemperatur einstellt. Dann wird der Einfluss des Feuchtezustandes der Isolierflüssigkeit und einer hohen Wechselladungsbeanspruchung auf die elektrostatische Aufladungsneigung dargestellt. Das Aufladungsverhalten wird anschließend auch beim Vorhandensein von Entladespuren im Strömungsmodell beschrieben. Die erhaltenen Tendenzen werden mit jenen verglichen, die in der Literatur für Isoliersysteme mit Mineralöl beschrieben werden. Ziel dieses Vergleiches ist es einerseits die Ergebnisse für die Isoliermaterialpaare mit Mineralöl zu überprüfen und andererseits auch zu ermitteln, ob die bekannten Tendenzen auch für die untersuchten alternativen Isoliersysteme Gültigkeit besitzen.

Als ergänzende Betrachtung zum Thema „alternative Isolierflüssigkeiten für Leistungstransformatoren“ werden zum Schluss dieses Kapitels die Ergebnisse von Druckmessungen am Strömungsmodell für die unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten dargestellt. Der Druckabfall an einem Kühlkanal ist zwar bezüglich des Aufladungsverhaltens im Leistungstransformator weniger relevant, stellt jedoch eine wichtige Größe bei der Dimensionierung des Transformators dar.

## 7.1 Verhalten der Messströme

Im Folgenden wird das Verhalten der gemessenen Ableitströme bei den experimentellen Untersuchungen bezüglich Kurvenverlauf und Polarität beschrieben. Dabei wird auf reproduzierbare Tendenzen und Auffälligkeiten eingegangen, die bei den weiteren Analysen beachtet werden müssen.

### 7.1.1 Kurvenform

Bei den einzelnen Messserien einer Versuchsreihe wurden die Ableitströme der Mess- und Schirmelektroden über der Zeit aufgezeichnet. Der bei einer Messserie aufgetretene Strom-Zeitverlauf ist für die weiteren Auswertungen und Analysen relevant und wird daher an dieser Stelle erläutert.

#### Phasen im Strom-Zeitverlauf bei Strömung

Der typische Kurvenverlauf der Ableitströme nach dem Einsetzen der Flüssigkeitsströmung besteht aus zwei Abschnitten. Nach dem Durchlauf einer transienten Periode erreicht der Ableitstrom einen stationären Wert. Der stationäre Wert wurde aus den Strom-Zeitverläufen als Ergebniswert ermittelt und für weitere Analysen zum Aufladungsverhalten herangezogen. Dieser ist ein Maß für die Ladungstrennung bzw. Ladungserzeugung an der flüssig/ festen Grenzfläche. Ein Beispiel für

den beschriebenen Strom-Zeitverlauf ist anhand vom Ableitstrom  $I_1$  für alle vermessenen Strömungsgeschwindigkeiten in **Abbildung 6-19** dargestellt.

Für das Isoliermaterialpaar Mineralöl - Transformerboard erreichten die Ableitströme bei 90 °C keinen stationären Wert, siehe **Abbildung 7-1**. Dies änderte sich auch nicht bei einer Verlängerung der Durchströmungszeit auf drei bis vier Stunden für eine Strömungsgeschwindigkeit. Dieses Verhalten konnte sowohl bei den Feucht- als auch bei den Trockenversuchen beobachtet werden und war somit reproduzierbar. Es ist anzunehmen, dass dieses Phänomen durch langandauernde Ausgleichsvorgänge zwischen dem Feststoff und der Isolierflüssigkeit zu begründen ist, die sich dem Aufladevorgang überlagern. Der Ergebniswert wurde auch hier entsprechend den Darstellungen in **Kapitel 6.5** ausgewertet. Jedoch sind diese Werte für weitere Analysen nur bedingt heranzuziehen.

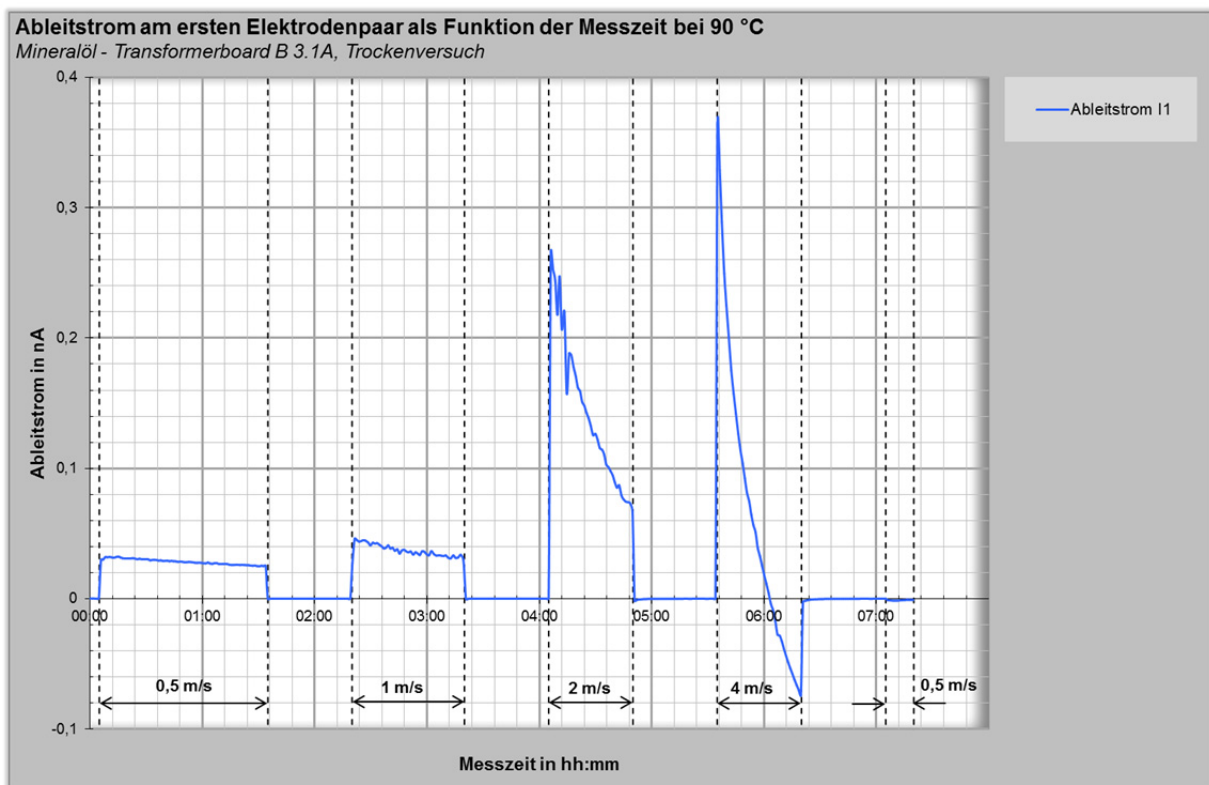


Abbildung 7-1: Strom-Zeitverlauf  $I_1$  bei der 90 °C-Messserie mit Mineralöl – Transformerboard B 3.1A

### Impulse im Strom-Zeitverlauf

Für die Isoliermaterialpaare Ester - Nomex® traten bei den Untersuchungen im Strom-Zeitverlauf hohe positive und negative Impulse in den Ableitströmen bei allen Temperaturstufen für mittlere bis hohe Strömungsgeschwindigkeiten (ab 1 m/s, 2 m/s, 2,5 m/s oder 4 m/s) auf, siehe Beispiel für synthetischen Ester in Verbindung mit Nomex® bei 90 °C in **Abbildung 7-2**. Es wird angenommen, dass die gemessenen Stromspitzen einen Hinweis auf Entladungen im flüssig/ festen Isoliersystem geben. Darauf wird in **Kapitel 7.3.3** und **Kapitel 7.7** näher eingegangen.

Für Ester - Transformerboard konnten geringe Stromschwankungen nur bei der höchsten Temperaturstufe und bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten (90 °C, ab 2 m/s oder 4 m/s) verzeichnet werden.

Für Mineralöl - Nomex® und Mineralöl – Transformerboard konnten auch geringe Stromschwankungen bei 90 °C festgestellt werden, siehe Beispiel in **Abbildung 7-1** bei 2 m/s. Jedoch scheinen diese eher durch Ausgleichsvorgänge zwischen Isolierflüssigkeit und Feststoff bedingt zu sein als durch Entladungen, da sie mit höherer Strömungsgeschwindigkeit nicht intensiver werden.

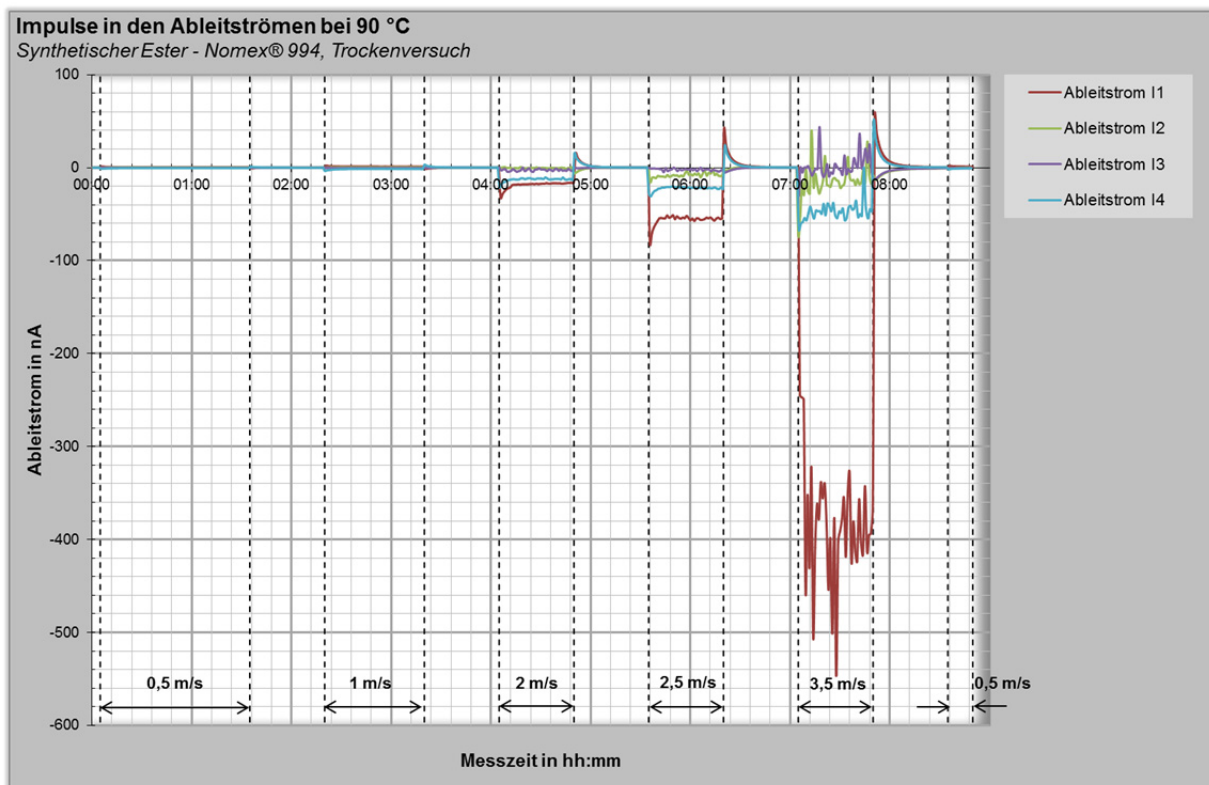


Abbildung 7-2: Impulse in den Ableitströmen für synthetischen Ester – Nomex® 994 bei 90 °C

### Ableitstrom als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit

Generell kann bei allen drei untersuchten Isolierflüssigkeiten ein Anstieg der elektrostatischen Auf ladungsneigung mit steigender Strömungsgeschwindigkeit verzeichnet werden. Dies ist unter anderem aus den Diagrammen in **Abbildung 7-3** bis **Abbildung 7-6** des nächsten Kapitels ersicht lich, in denen der Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit für die Trockenversu che dargestellt ist. Dieses Aufladungsverhalten stimmt mit den in der Literatur beschriebenen Ten denzen überein, siehe z.B. [EPR93] S. 2-2-7, [Pai03] S. 13.

#### **7.1.2 Polarität**

Für Isoliersysteme mit Mineralöl konnte eine klare Abhängigkeit der Polarität der Ableitströme an den Messelektroden von der Art des Feststoffes und der Systemtemperatur abgeleitet werden. Dieses Verhalten trat bei den Feucht- und Trockenversuchen auf und war somit reproduzierbar. Die Ableitströme von Mineralöl – Nomex® nahmen bei 20 °C positive Werte an, bei 60 °C und 90 °C negative Werte. Die Ableitströme von Mineralöl - Transformerboard besaßen bei 20 °C und 60 °C positive Polarität. Wie bereits in **Kapitel 7.1.1** beschrieben, ergaben sich bei der Vermes sung dieses Isoliermaterialpaares bei 90 °C keine stationären Ableitstromwerte. Begründet wird dies durch einen langandauernden Ausgleichsvorgang zwischen Feststoff und Isolierflüssigkeit, der sich der Aufladung überlagert. Wie aus **Abbildung 7-1** ersichtlich, kam es dabei zu einem Po laritätswechsel von positiven zu negativen Strömen. Wenn der Versuch am nächsten Tag wieder holt wurde, besaßen die Ableitströme rein negative Polarität. Ein Einschwingen der Ströme auf einen stationären Wert konnte trotzdem nicht erreicht werden. Dies zeigt, dass der Ausgleichsvor gang noch nicht abgeschlossen war.

Für die Isoliermaterialpaare mit Esterflüssigkeiten bestand für den Ableitstrom  $I_1$  tendenziell nega tive Polarität. Es konnten jedoch einige Ausnahmen beobachtet werden. Für Ester – Transformer board traten bei einigen Untersuchungen bei der ersten 20 °C – Messserie einer Versuchsreihe

positive Ableitströme auf. Bei der 20 °C-Wiederholungssesserie am Ende der Versuchsreihe hatten die Ableitströme jedoch wieder negative Polarität angenommen. Auch hier scheint sich ein Ausgleichsvorgang zu überlagern, der nach dem Temperaturzyklus abgeschlossen ist. Die grundsätzlichen Tendenzen, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden (Einfluss des Feststoffes, der Isolierflüssigkeit usw. auf die Aufladung) gelten jedoch unabhängig davon, ob die Ergebnisse der 20 °C- Untersuchungen zu Beginn oder am Ende der Versuchsreihe betrachtet werden d.h. unabhängig von der Polarität, da rein die absolute Höhe der Ableitströme beurteilt wird. Für die Isoliermaterialpaare Ester – Nomex® konnte für den Ableitstrom  $I_1$  bei höheren Temperaturen und niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten auch zum Teil positive Polarität beobachtet werden.

## 7.2 Elektrostatische Aufladungsneigung verschiedener Isolierflüssigkeiten

In diesem Kapitel wird die elektrostatische Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Art des flüssigen Isolierstoffes analysiert. Die drei Isolierflüssigkeiten Mineralöl, synthetischer und natürlicher Ester werden dabei verglichen. Dafür werden die Ergebnisse der Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage und von ergänzenden Untersuchungen mit einer *spinning disc* und einem *mini-static tester* dargestellt. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse zum Flüssigkeitseinfluss noch einmal zusammengefasst und diskutiert.

### 7.2.1 Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage

Im Folgenden wird die in der Strömungsmodellanlage gemessene elektrostatische Aufladungsneigung der drei Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur verglichen. Zuerst wird der Vergleich für Isoliermaterialpaare mit Transformerboard B 3.1A durchgeführt, dann für Isoliermaterialpaare mit Nomex® 994. Die dargestellten Ergebnisse stammen aus den Trockenversuchen, da diese den für die Praxis relevanten Fall darstellen. Die beschriebenen Trends haben allerdings auch für die Feuchtversuche Gültigkeit.

#### Isoliermaterialpaare mit Transformerboard B 3.1A

In **Abbildung 7-3** ist der Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Modell für die drei untersuchten Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1 A bei 20 °C und 60 °C dargestellt. **Abbildung 7-4** vergleicht die Ableitströme der gleichen Isoliermaterialpaare bei 90 °C. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass Mineralöl im Vergleich zu den beiden anderen Isolierflüssigkeiten die niedrigste elektrostatische Aufladungsneigung aufweist. Eine generelle Zuordnung, welche der beiden Esterflüssigkeiten die höhere Aufladungsneigung besitzt, ist jedoch nicht möglich. Dies schwankt mit der Temperaturstufe und der Strömungsgeschwindigkeit. Der natürliche Ester besitzt generell bei 20 °C und bei 60 °C nur in Verbindung mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten (2 m/s, 4 m/s) eine höhere Aufladungsneigung als der synthetische Ester. Der synthetische Ester nimmt bei 60 °C in Verbindung mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten (0,5 m/s, 1 m/s) und generell bei 90 °C die höhere Aufladungsneigung an.

#### Isoliermaterialpaare mit Nomex® 994

In **Abbildung 7-5** ist der Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Modell für die drei untersuchten Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Nomex® 994 bei 20 °C und 60 °C dargestellt. **Abbildung 7-6** zeigt die Ableitströme der gleichen Isoliermaterialpaare bei 90 °C. Aus den Bildern ist erkennbar, dass Mineralöl wieder im Vergleich zu den beiden anderen Isolierflüssigkeiten die niedrigste elektrostatische Aufladungsneigung aufweist. Eine klare Tendenz, dass eine der beiden Esterflüssigkeiten eine höhere Aufladungsneigung besitzt, ist jedoch auch hier nicht erkennbar. Synthetischer Ester weist generell bei 20 °C und bei 90 °C die höhere Aufladungsneigung auf, bei 60 °C jedoch nur für 4 m/s.

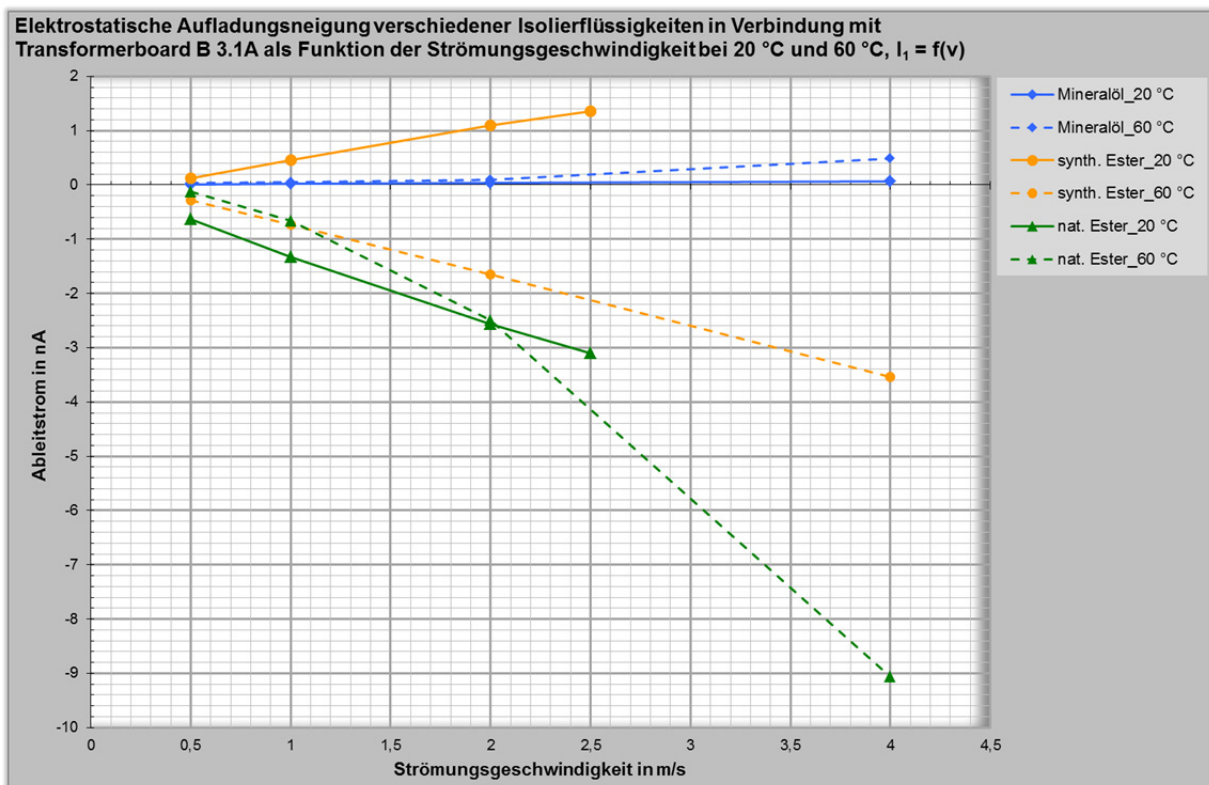


Abbildung 7-3: Strom-Geschwindigkeitsverlauf verschiedener Isolierflüssigkeiten mit Transformerboard B 3.1A bei 20 °C und 60 °C

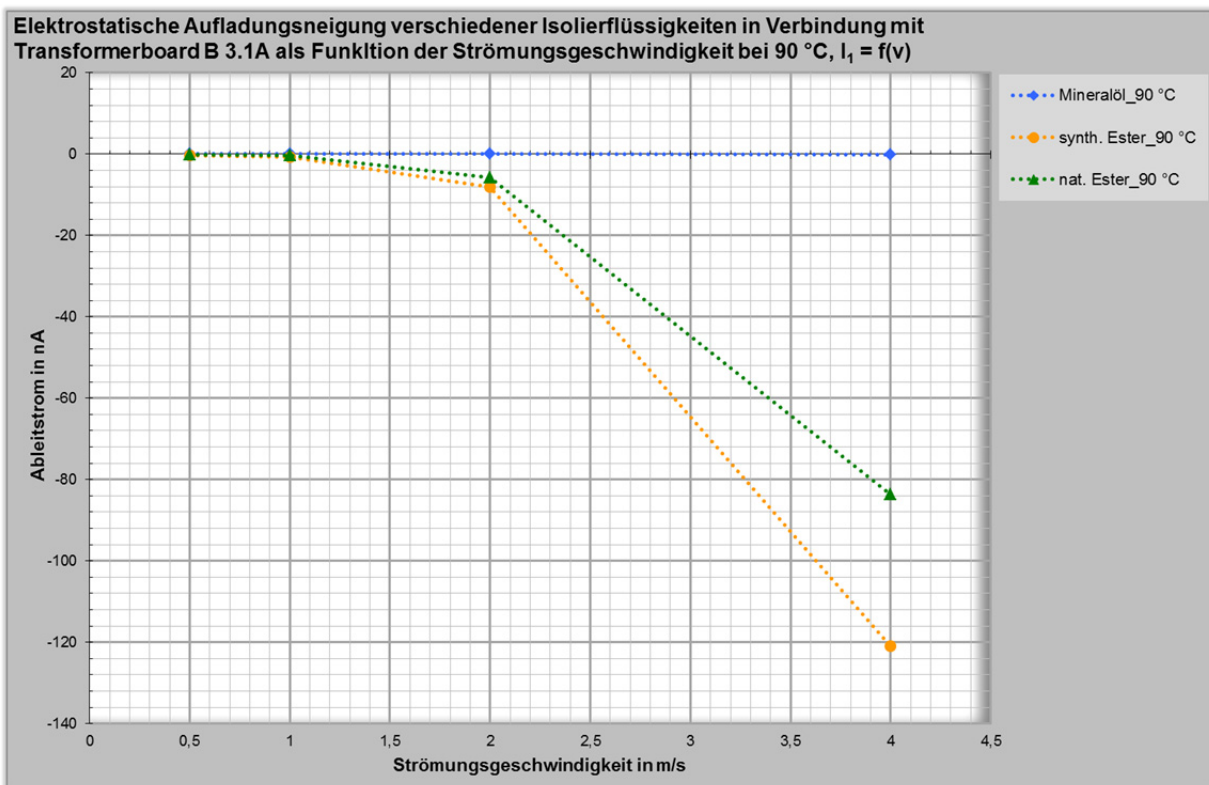


Abbildung 7-4: Strom-Geschwindigkeitsverlauf verschiedener Isolierflüssigkeiten mit Transformerboard B 3.1A bei 90 °C

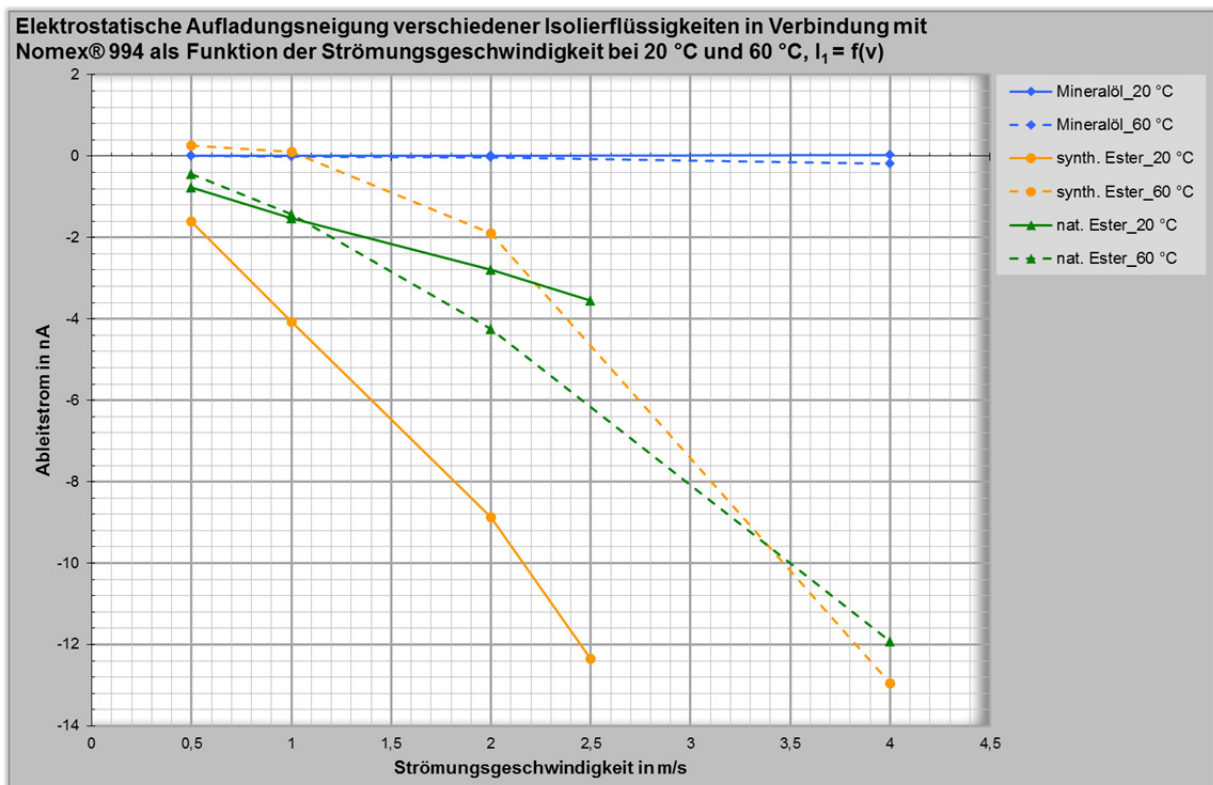


Abbildung 7-5: Strom-Geschwindigkeitsverlauf verschiedener Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 994 bei 20 °C und 60 °C

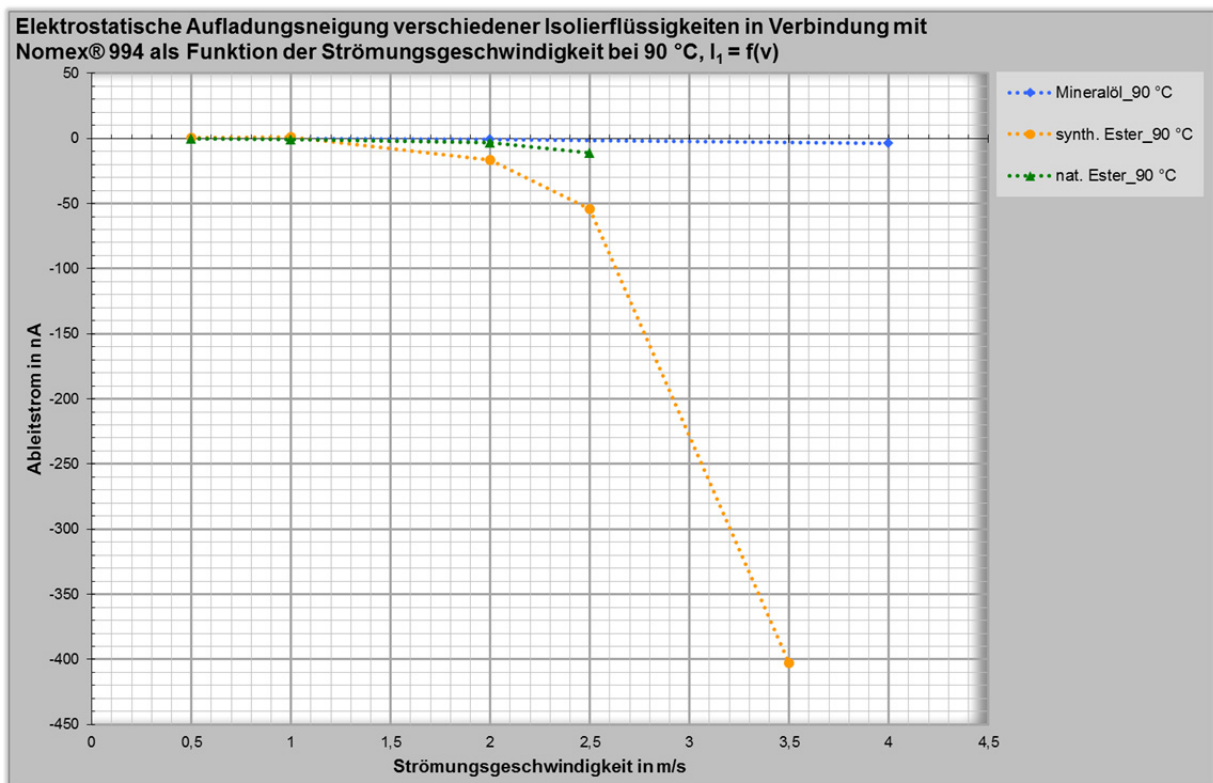


Abbildung 7-6: Strom-Geschwindigkeitsverlauf verschiedener Isolierflüssigkeiten mit Nomex® 994 bei 90 °C

### Erkenntnisse aus den Aufladungsuntersuchungen in der Strömungsmodellanlage

Zusammenfassend lassen die Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage für den betrachteten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich folgende Trends erkennen:

- Die drei Isolierflüssigkeiten weisen in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A die gleichen grundsätzlichen Tendenzen auf wie in Verbindung mit Nomex® 994.
- Mineralöl besitzt im Vergleich zu den Esterflüssigkeiten die niedrigste Aufladungsneigung.
- Eine generelle Zuordnung, dass eine der beiden Esterflüssigkeiten die höhere Aufladungsneigung hat, ist nicht möglich.

#### **7.2.2 Ergänzende Untersuchungen mit *spinning disc* und *mini-static tester***

Die in der Strömungsmodellanlage erforschten Isolierflüssigkeiten Mineralöl, synthetischer Ester und natürlicher Ester wurden im Rahmen von Studienarbeiten auch mit einer *spinning disc* [Sch14] und mit einem *mini-static tester* [Wie\_iA] bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung vermessen. Auf diese Weise war ein Vergleich mit den Messergebnissen der Strömungsmodellanlage möglich.

#### Messungen mit einer *spinning disc*

Die Funktionsweise der *spinning disc*, die am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement gebaut und betrieben wurde, wurde in **Kapitel 4.2.1** beschrieben. In diesem Prüfaufbau dreht sich eine mit dem zu untersuchenden Feststoff umgebene metallische Scheibe in einem mit der Isolierflüssigkeit befüllten Gefäß. Die relative Bewegung zwischen Isolierflüssigkeit und Feststoff führt zur elektrostatischen Aufladung. Die Aufladungsneigung wurde über den Ableitstrom vom Feststoff gegen Erde beurteilt [Sch14] S. 53. Die Untersuchungen wurden für die gleichen Materialpaare durchgeführt wie bei der Strömungsmodellanlage, siehe **Tabelle 6-1**. Ein Unterschied bestand lediglich darin, dass der untersuchte Feststoff Aramid nicht Nomex® 994 sondern Nomex® 993 war [Sch14] S. 63. Nomex® 993 besitzt eine geringere Dichte als Nomex® 994 [Wei15\_a] S. 3. Weitere Details zu den Feststoffuntersuchungen mit der *spinning disc* folgen in **Kapitel 7.3.2**. Die Variationsparameter bei den Messungen waren [Sch14] S. 68:

- Systemtemperatur (Raumtemperatur, 60 °C, 90 °C)
- Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe (120 rpm, 200 rpm, 400 rpm)

Da es sich bei der verwendeten *spinning disc* nicht um ein hermetisch abgeschlossenes System handelt, war eine exakte Einstellung der Feuchte der Isolierflüssigkeit während der Untersuchungen nicht möglich. Die relative Feuchte bewegte sich bei den Untersuchungen bei Mineralöl zwischen ca. 2 und 9 %, bei den Esterflüssigkeiten zwischen ca. 1 und 4 % [Sch14] S. i – S. vi. Somit bestanden bei den Untersuchungen in der *spinning disc* mit Mineralöl höhere Feuchten als bei den zuvor dargestellten Trockenversuchen in der Strömungsmodellanlage (ca. 3%, siehe **Kapitel 6.2**). Bei den Esterflüssigkeiten waren die relativen Feuchten jedoch bei beiden Untersuchungsmethoden im gleichen Bereich.

In **Abbildung 7-7** sind die Messergebnisse der *spinning disc* für die Aufladungsneigung der verschiedenen flüssig/ festen Isoliermaterialpaare beispielhaft für eine Rotationsgeschwindigkeit von 400 rpm dargestellt. Um eine übersichtlichere, logarithmische Darstellung zu ermöglichen, ist in der Abbildung der Betrag des Ableitstromes abgebildet. Die gemessenen Werte waren hauptsächlich negativ. Positive Messwerte sind mit einem \* gekennzeichnet. Aus **Abbildung 7-7** sind die grundsätzlich erhaltenen Tendenzen gut erkennbar. Die Darstellung aller Ergebnisse ist in [Sch14] S. 70 – S. 82 zu finden. Aus **Abbildung 7-7** sind die folgenden Tendenzen bezüglich des Einflusses der Isolierflüssigkeit auf die elektrostatische Aufladungsneigung erkennbar [Sch14] S. 72 – S. 76:

- Die drei Isolierflüssigkeiten weisen in Verbindung mit Transformerboard die gleichen Tendenzen auf wie in Verbindung mit Nomex®.



- Die elektrostatische Aufladungsneigung verhält sich für die drei Isolierflüssigkeiten folgendermaßen:

*Mineralöl < synthetischer Ester < natürlicher Ester*

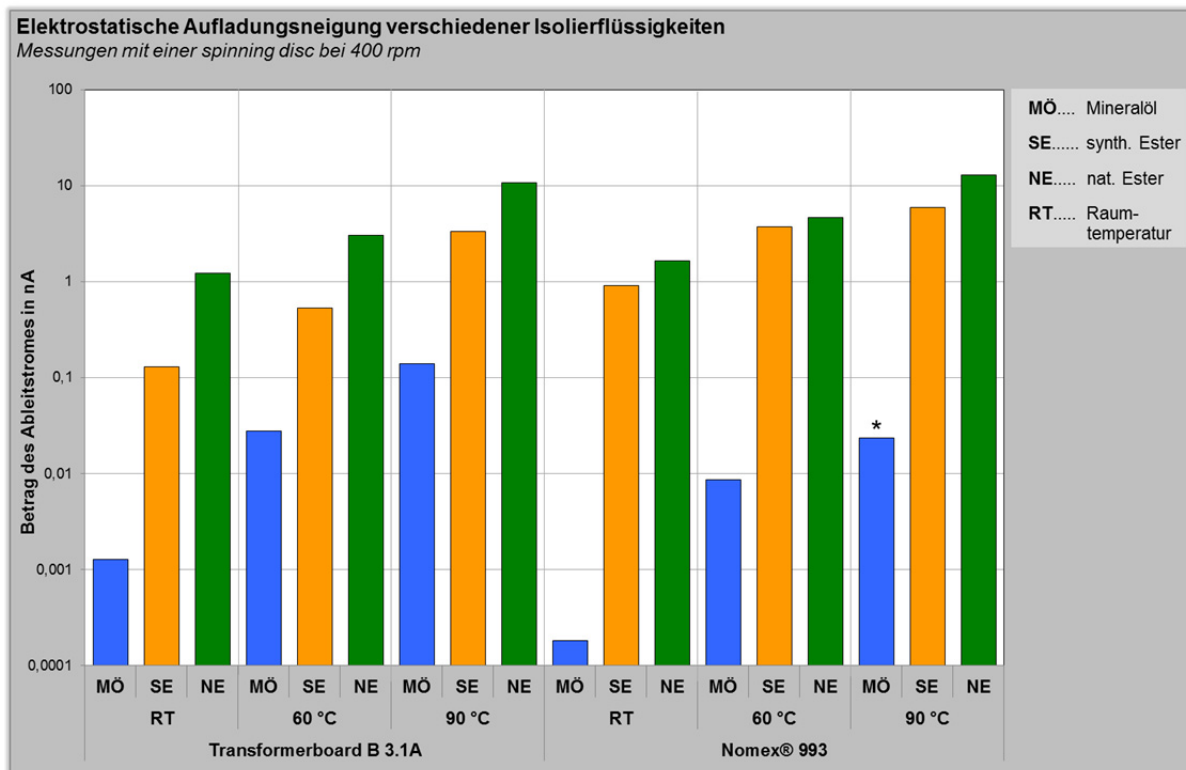


Abbildung 7-7: Flüssigkeitseinfluss auf die elektrostatische Aufladung bei verschiedenen Temperaturen und Feststoffen, Messdaten aus [Sch14] S. 70 – S. 72, \* Messwert positiv

### Messungen mit einem mini-static tester

Die Funktionsweise des *mini-static testers*, der am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement aufgebaut und für Untersuchungen genutzt wurde, wurde in **Kapitel 4.3** beschrieben. In diesem Prüfaufbau fließt die zu untersuchende Isolierflüssigkeit mit einem bestimmten Volumenstrom und somit mit einer definierten Strömungsgeschwindigkeit durch einen Filter aus Zellulose. Durch die relative Bewegung zwischen Zellulose und Isolierflüssigkeit kommt es zur elektrostatischen Aufladung, die über einen Ableitstrom vom Filter gegen Erde erfasst wurde. Die elektrostatische Aufladungsneigung wurde für die Materialpaare Mineralöl – Zellulose, synthetischer Ester – Zellulose und natürlicher Ester – Zellulose bestimmt. Die Variationsparameter bei den Untersuchungen waren:

- Systemtemperatur (20 °C, 40 °C, 60 °C)
- Relative Feuchte der Isolierflüssigkeit (*trocken* = 3 %, *feucht* = 20 %, *sehr feucht* = 60 %)

Die relative Feuchte der Isolierflüssigkeit wurde bei 20 °C eingestellt. Auf die Entwicklung der Feuchte bei den darauffolgenden Untersuchungen bei 60 °C und 90 °C wurde kein Einfluss mehr genommen. Die Untersuchungen fanden in einem Klimaschrank statt, wodurch – im Gegensatz zu der *spinning disc* – die Feuchte der Isolierflüssigkeit sehr genau einstellbar war. Aufgrund der unterschiedlichen Viskosität der drei Isolierflüssigkeiten war es schwierig, den Filter im *mini-static tester* immer mit gleichem Volumenstrom zu durchströmen. Daher wurde jede Isolierflüssigkeit bei jeder Temperaturstufe und in jedem Feuchtezustand mit drei verschiedenen Volumenströmen vermessen. Aus der Regressionsgeraden der gemessenen Ableitströme bei den drei verschiedenen Volumenströmen wurde dann der Ableitstrom bei dem laut [Oom84] S. 1924 empfohlenen Volumenstrom von 1,67 ml/s berechnet. Aus dem Ableitstrom wurde die Ladungsdichte in der Iso-

lierflüssigkeit in  $\mu\text{C}/\text{m}^3$  als Ergebniswert mittels **Gleichung 4-1** ermittelt und für weitere Analysen herangezogen.

**Abbildung 7-8** zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem *mini-static tester*. Daraus sind folgende Tendenzen bezüglich des Einflusses der Isolierflüssigkeit auf die elektrostatische Aufladungsneigung erkennbar:

- Mineralöl weist stets die niedrigste Aufladungsneigung auf.
- Welche der beiden Esterflüssigkeiten die höhere Aufladungsneigung besitzt, scheint mit dem Feuchtezustand zusammenzuhängen. Beim Zustand trocken wies natürlicher Ester eine höhere Aufladungsneigung auf. Bei den Zuständen feucht und sehr feucht besaß synthetischer Ester die höhere Aufladungsneigung.

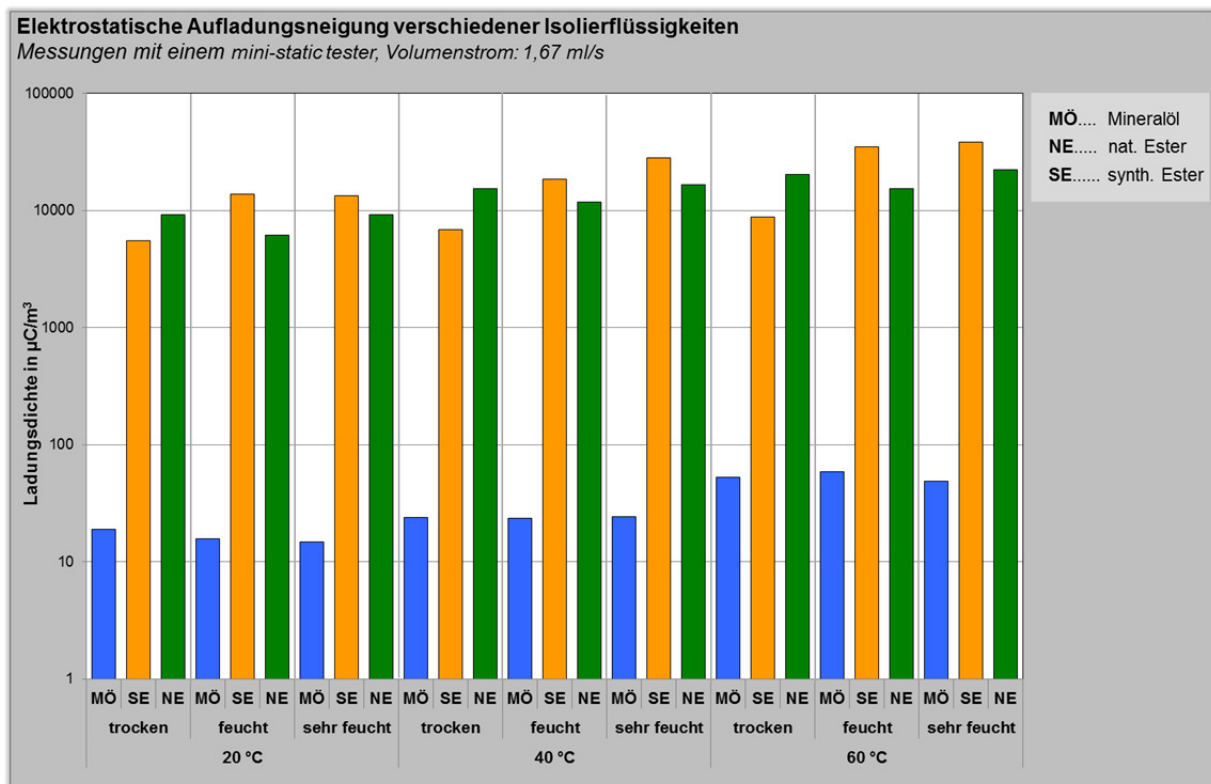


Abbildung 7-8: Flüssigkeitseinfluss auf die elektrostatische Aufladung bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten, Messdaten aus [Wie\_iA]

### 7.2.3 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurden die drei Isolierflüssigkeiten Mineralöl, synthetischer und natürlicher Ester bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung in der Strömungsmodellanlage vermessen. Die Flüssigkeiten wurden in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A und mit Nomex® 994 untersucht. Der Vergleich der drei Flüssigkeiten ergab unabhängig von der Art des eingesetzten Feststoffes dieselben Tendenzen. Es zeigte sich, dass generell das Mineralöl die niedrigste Aufladungsneigung aufweist. Ergänzende Untersuchungen der gleichen Isolierflüssigkeiten mit einer *spinning disc* und einem *mini-static tester* bestätigten dieses Ergebnis. Diese ergänzenden Untersuchungen scheinen weiters darauf hinzuweisen, dass natürlicher Ester bei niedrigen Feuchten die höhere elektrostatische Aufladungsneigung besitzt als synthetischer Ester. Eine generelle Zuordnung, dass eine der beiden Esterflüssigkeiten höher aufladend ist, war jedoch aus den Ergebnissen der Strömungsmodellanlage nicht möglich, auch nicht in Abhängigkeit der Feuchte.

Ein Vergleich der elektrostatischen Aufladungsneigung verschiedener Isolierflüssigkeiten ist z.B. auch in [Zel11] zu finden. Hier wurden fünf verschiedene Mineralöle, drei natürliche Ester und ein

synthetischer Ester bei verschiedenen Temperaturen (10 °C – 20 °C – 40 °C – 60 °C – 80 °C) und verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten (40 cm/s bis 95 cm/s) untersucht und miteinander verglichen. Als Untersuchungsmethode wurde ein Kanalmodell verwendet. Der Vergleich der verschiedenen Isolierflüssigkeiten bestätigt, dass die elektrostatische Aufladungsneigung<sup>9</sup> für die Esterflüssigkeiten höher ist als für die Mineralöle. Somit ergibt sich der gleiche Trend wie bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage. Der Vergleich der Esterflüssigkeiten untereinander zeigt für zwei der untersuchten natürlichen Ester durchgehend niedrigere Werte als für den synthetischen Ester. Der dritte vermessene natürliche Ester nahm bei höheren Temperaturen ab 40 °C höhere Werte als der synthetische Ester an. Daraus kann geschlossen werden, dass grundsätzlich keine generelle Aussage möglich ist, ob natürlicher oder synthetischer Ester eine höhere Aufladungsneigung besitzt. Dies kann sich mit den Flüssigkeitsparametern (z.B. der Temperatur) ändern und scheint von der genauen Zusammensetzung der Isolierflüssigkeit und somit vom Hersteller abzuhängen.

In [Zel11] werden verschiedene mögliche Begründungen für die deutlich höhere elektrostatische Aufladungsneigung der Esterflüssigkeiten im Vergleich zu Mineralöl angeführt und es wird dabei auf weitere Forschungsarbeiten zu diesem Thema verwiesen:

- Die elektrostatische Aufladungsneigung beurteilt das Maß der Ladungserzeugung an der flüssig/ festen Grenzfläche. Die Ladungserzeugung ist von dem stattfindenden physikalisch-chemischen Prozess abhängig, der zur Bildung der elektrischen Doppelschicht führt. Durch die unterschiedliche chemische Struktur von Mineralöl und Esterflüssigkeiten, vergleiche **Abbildung 6-1** bis **Abbildung 6-4**, ist es wahrscheinlich, dass auch der stattfindende physikalisch-chemischen Prozess anders ist und somit zu einem unterschiedlichen Maß der Ladungserzeugung führt [Zel11] S. 3. Bestehende Modelle für den physikalisch-chemischen Prozess wurden zu Beginn dieser Arbeit in **Kapitel 2.1.1** beschrieben. Es ist dabei zu beachten, dass diese Modelle nur für bestimmte Materialpaare aufgestellt wurden. Das "klassische" Adsorptionsmodell und das Korrosionsmodell gelten für die Materialkombination Treibstoff (Kohlenwasserstoffe) – Metall. Das "erweiterte" Adsorptionsmodell gilt für das Materialpaar Mineralöl – Pressboard. Für Materialpaare mit Esterflüssigkeiten bestehen bis jetzt noch keine Modelle für den physikalisch-chemischen Prozess.
- Eine andere Überlegung ist, dass die Viskosität der Isolierflüssigkeit eine Rolle bei der Ladungserzeugung spielt [Zel11]. Die Esterflüssigkeiten besitzen eine deutlich höhere Viskosität als Mineralöl, siehe **Tabelle 6-3**, wodurch die höhere Ladungserzeugung begründet werden könnte.  
Bei den Aufladungsuntersuchungen in [Per09] S. 11 – S. 12 wurde diese Theorie auch behandelt. Es wurden zwei Mineralöle, ein synthetischer Ester, drei natürliche Ester und ein Silikonöl bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung mit einem *mini-static tester* vermessen und verglichen. Da das Silikonöl bei den Untersuchungen trotz hoher Viskosität nur eine geringe elektrostatische Aufladungsneigung aufwies, wurde jedoch die Vermutung, dass eine höhere Viskosität eine höhere Ladungserzeugung bewirkt, in [Per09] als falsch beurteilt.
- Eine weitere Untersuchung in [Pai08] weist darauf hin, dass die Ladungserzeugung mit der Wandschubspannung zunimmt. Dieses Erkenntnis wiederum würde jedoch eine Zunahme der Ladungserzeugung mit steigender Viskosität, siehe **Gleichung 2-10** und **Gleichung 2-11**, in Zusammenhang bringen.

Obige Ansätze zur Erklärung der höheren Aufladungsneigung von Esterflüssigkeiten gegenüber Mineralöl zeigen deutlich, dass weitere Grundlagenforschung in diesem Bereich notwendig ist, um genauere Aussagen treffen zu können. Da Modellvorstellungen für den ablaufenden physikalisch-

<sup>9</sup> Die elektrostatische Aufladungsneigung (Maß der Ladungserzeugung) wird in [Zel11] beurteilt über den stationären  $I_{\text{generator}}$  (= Summe der stationären Ableitströme vom Modell mit umgekehrtem Vorzeichen).

chemischen Prozess für die Esterflüssigkeiten nicht vorhanden sind, können keine Berechnungen und Computersimulationen dieses Prozesses durchgeführt werden. Somit bleibt vorerst nur ein rein experimenteller Zugang für die Forschungstätigkeiten in diesem Bereich, der in Zukunft ein Aufstellen geeigneter Modelle ermöglichen könnte.

## 7.3 Elektrostatische Aufladungsneigung verschiedener Feststoffe

In diesem Kapitel wird die elektrostatische Aufladungsneigung in Abhängigkeit des festen Isolierstoffes analysiert. Die beiden Feststoffe Transformerboard und Nomex® werden in Verbindung mit den drei untersuchten Isolierflüssigkeiten verglichen. Dafür werden die Ergebnisse der Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage und von ergänzenden Untersuchungen mit einer *spinning disc* dargestellt. Im Rahmen der Analyse des Einflusses der Feststoffart auf die elektrostatische Aufladung wurden die Strömungsmodelle nach der Vermessung in der Strömungsmodellanlage auf eventuelle Entladespuren untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind auch im vorliegenden Kapitel dargestellt. Zum Schluss werden die Ergebnisse zum Feststoffeinfluss auf die elektrostatische Aufladungsneigung noch einmal zusammengefasst und diskutiert.

### 7.3.1 Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage

Im Folgenden ist die in der Strömungsmodellanlage gemessene elektrostatische Aufladungsneigung von Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 verglichen. Der Vergleich wird in Verbindung mit den einzelnen Isolierflüssigkeiten separat dargestellt. Die Ergebnisse stammen aus den Trockenversuchen, da diese den für die Praxis relevanten Fall darstellen. Die beschriebenen Trends haben allerdings auch für die Feuchtversuche Gültigkeit.

#### Isoliermaterialpaare mit Mineralöl

In **Abbildung 7-9** ist der Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Modell für Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 in Verbindung mit Mineralöl bei 20 °C und 60 °C dargestellt. **Abbildung 7-10** zeigt die Ergebnisse für 90 °C. Aus den Bildern ist erkennbar, dass in Verbindung mit Mineralöl Transformerboard B 3.1A bei 20 °C und 60 °C eine höhere Aufladungsneigung als Nomex® 994 besitzt. Für 90 °C gilt der umgekehrte Fall. Wie bereits in **Kapitel 7.1** beschrieben, waren die Ableitströme bei 90 °C für das Isoliermaterialpaar Mineralöl - Transformerboard von Ausgleichsvorgängen betroffen, sodass sich keine stationären Werte ergaben. Daher ist das Ergebnis bei 90 °C mit Vorsicht für weitere Analysen heranzuziehen.

#### Isoliermaterialpaare mit synthetischem Ester

In **Abbildung 7-11** ist der Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Modell für Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 in Verbindung mit synthetischem Ester bei 20 °C und 60 °C dargestellt. **Abbildung 7-12** zeigt die Ergebnisse für 90 °C. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass in Verbindung mit synthetischem Ester grundsätzlich Nomex® 994 eine höhere Aufladungsneigung als Transformerboard B 3.1A besitzt. Eine Ausnahme von diesem Trend tritt bei 60 °C für 0,5 m/s und 1 m/s auf. Aus **Abbildung 7-11** ist erkennbar, dass beim Ableitstrom für Nomex® 994 bei 60 °C im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ein Polaritätswechsel stattfindet, wodurch sich kurzfristig höhere Ableitstromwerte für Transformerboard B 3.1A ergeben. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit (ab 2 m/s) besitzt wieder Nomex® die höhere Aufladungsneigung.

#### Isoliermaterialpaare mit natürlichem Ester

In **Abbildung 7-13** ist der Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Modell für Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 in Verbindung mit natürlichem Ester bei 20 °C und 60 °C dargestellt. **Abbildung 7-14** zeigt die Ergebnisse für 90 °C. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass in Verbindung mit natürlichem Ester grundsätzlich Nomex® 994 eine höhere Aufladungsneigung als Transformerboard B 3.1A besitzt. Eine Ausnahme tritt bei 90 °C für 2 m/s auf. Für 2,5 m/s

und 4 m/s kann kein eindeutiger Vergleich durchgeführt werden, da für diese Strömungsgeschwindigkeiten keine gemeinsamen Messpunkte bei beiden Feststoffen bestehen.

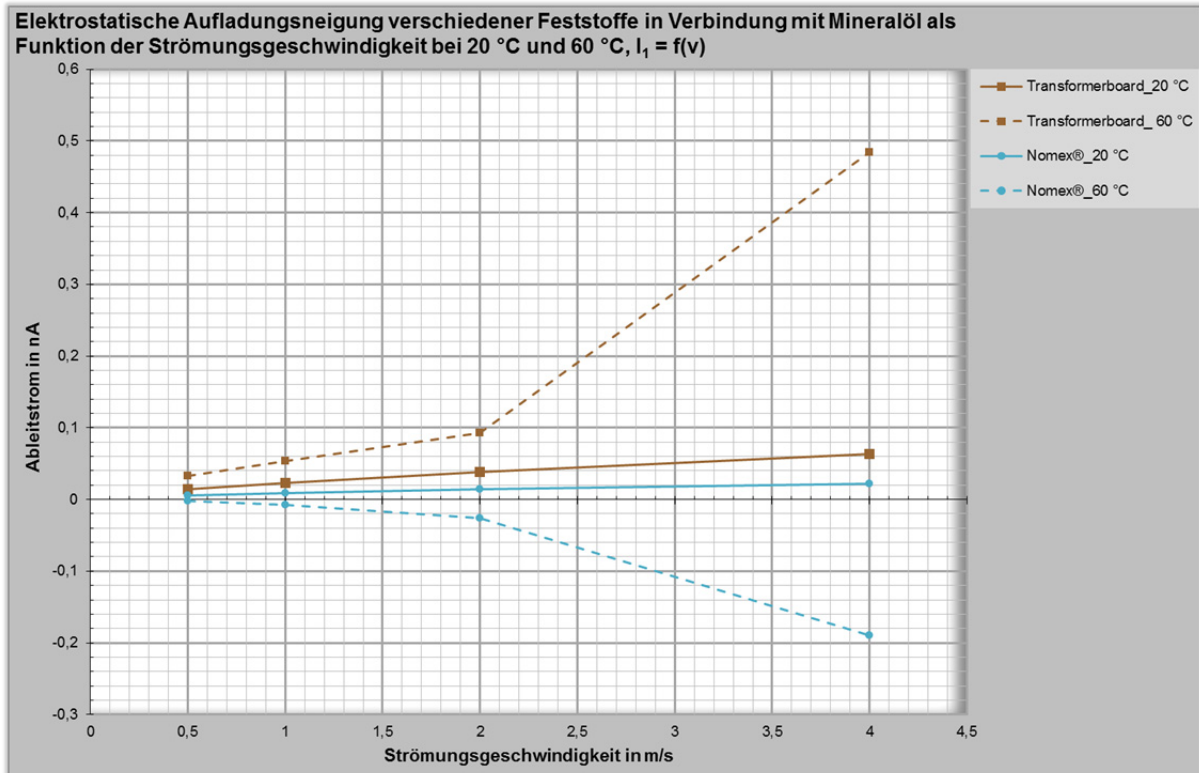


Abbildung 7-9: Strom-Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Feststoffe mit Mineralöl bei 20 °C und 60 °C

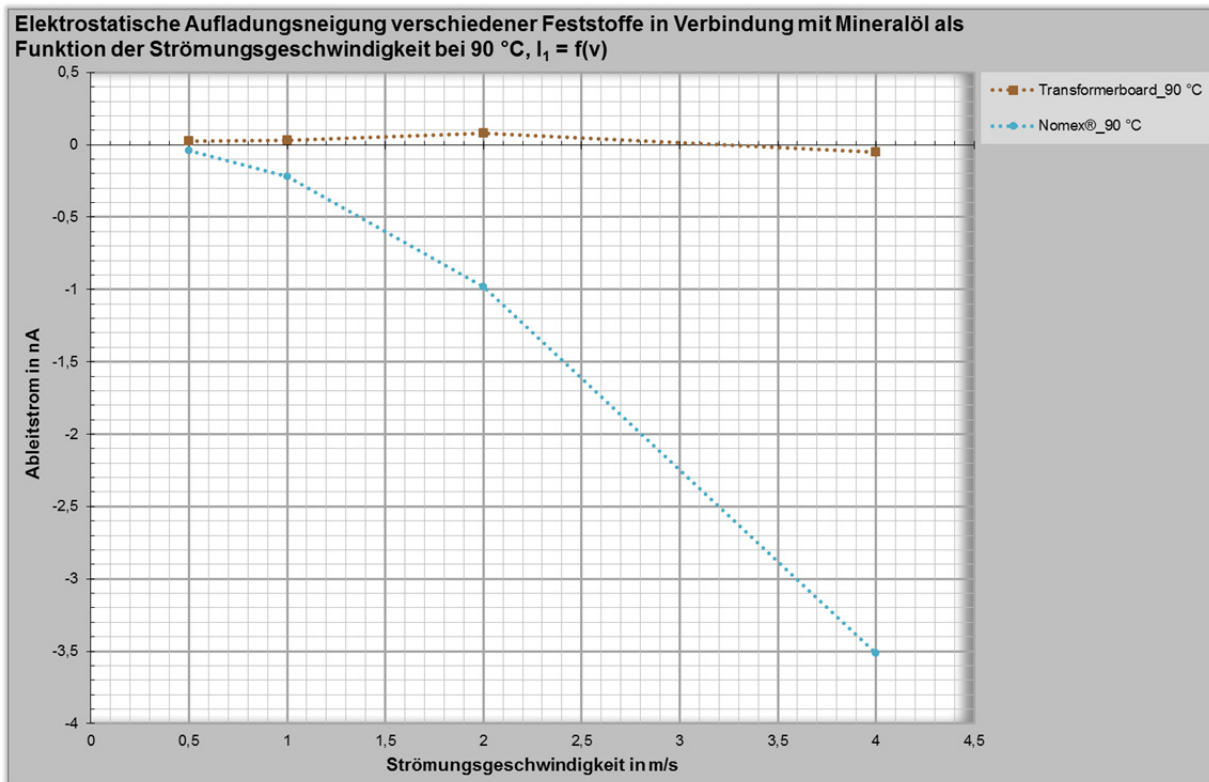


Abbildung 7-10: Strom-Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Feststoffe mit Mineralöl bei 90 °C

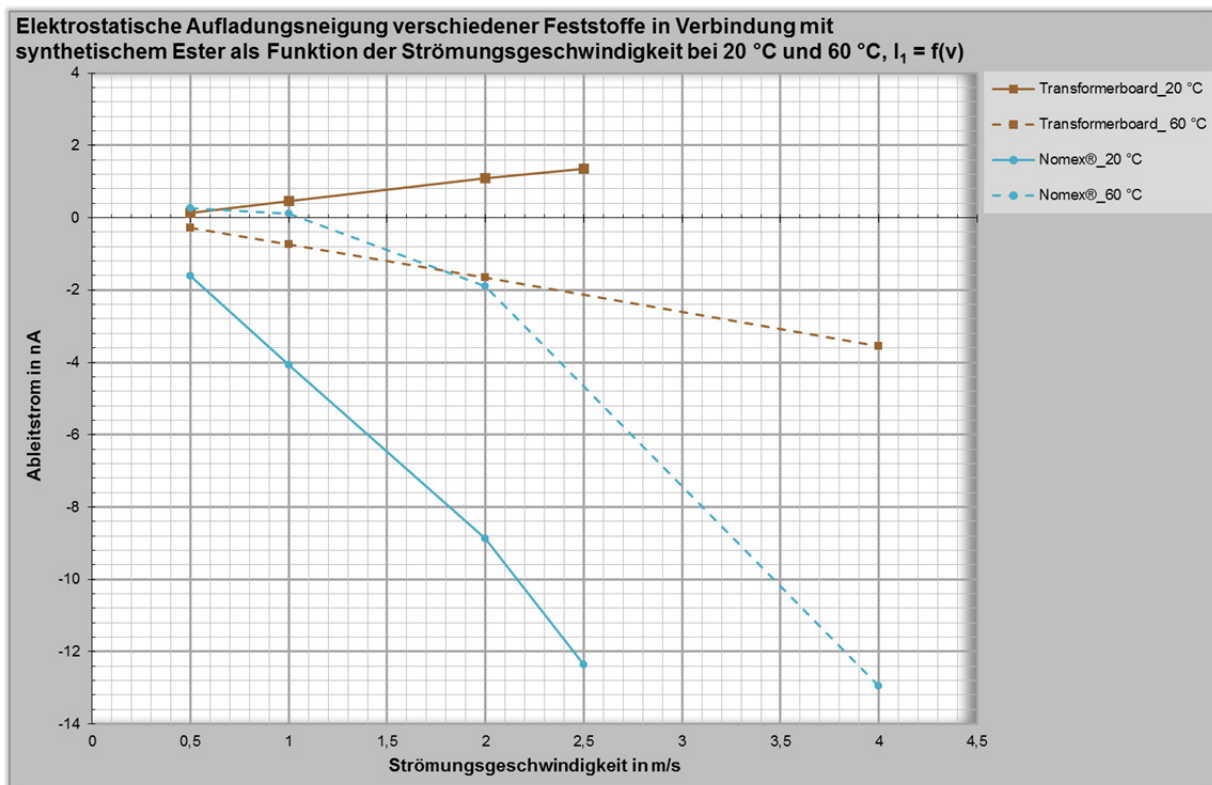


Abbildung 7-11: Strom-Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Feststoffe mit synthetischem Ester bei 20 °C und 60 °C

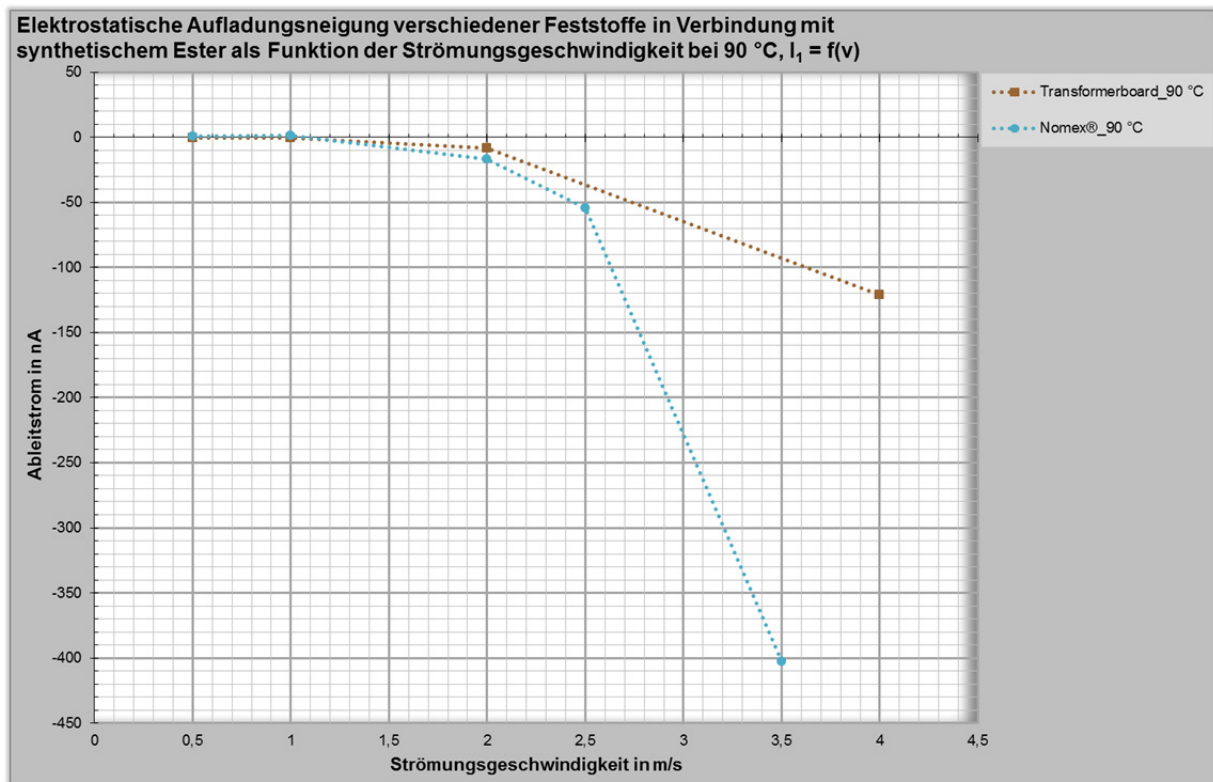


Abbildung 7-12: Strom-Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Feststoffe mit synthetischem Ester bei 90 °C

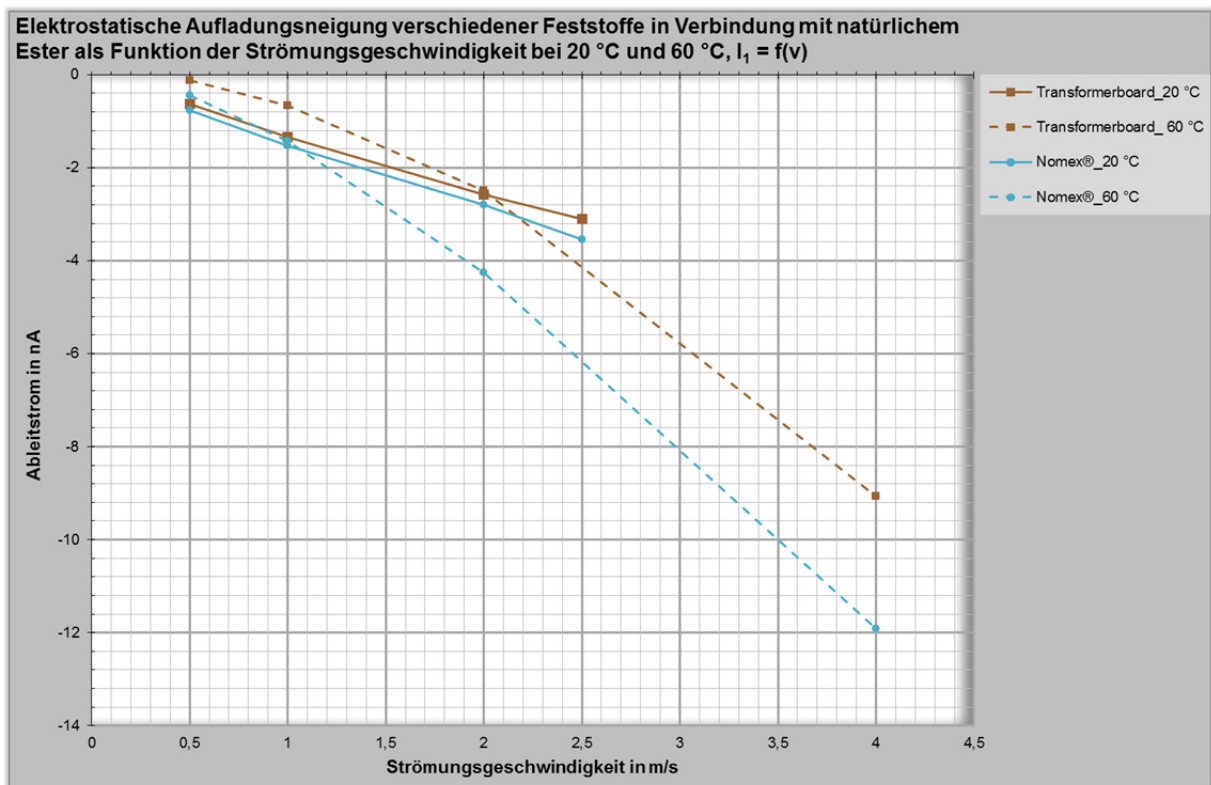


Abbildung 7-13: Strom-Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Feststoffe mit natürlichem Ester bei 20 °C und 60 °C

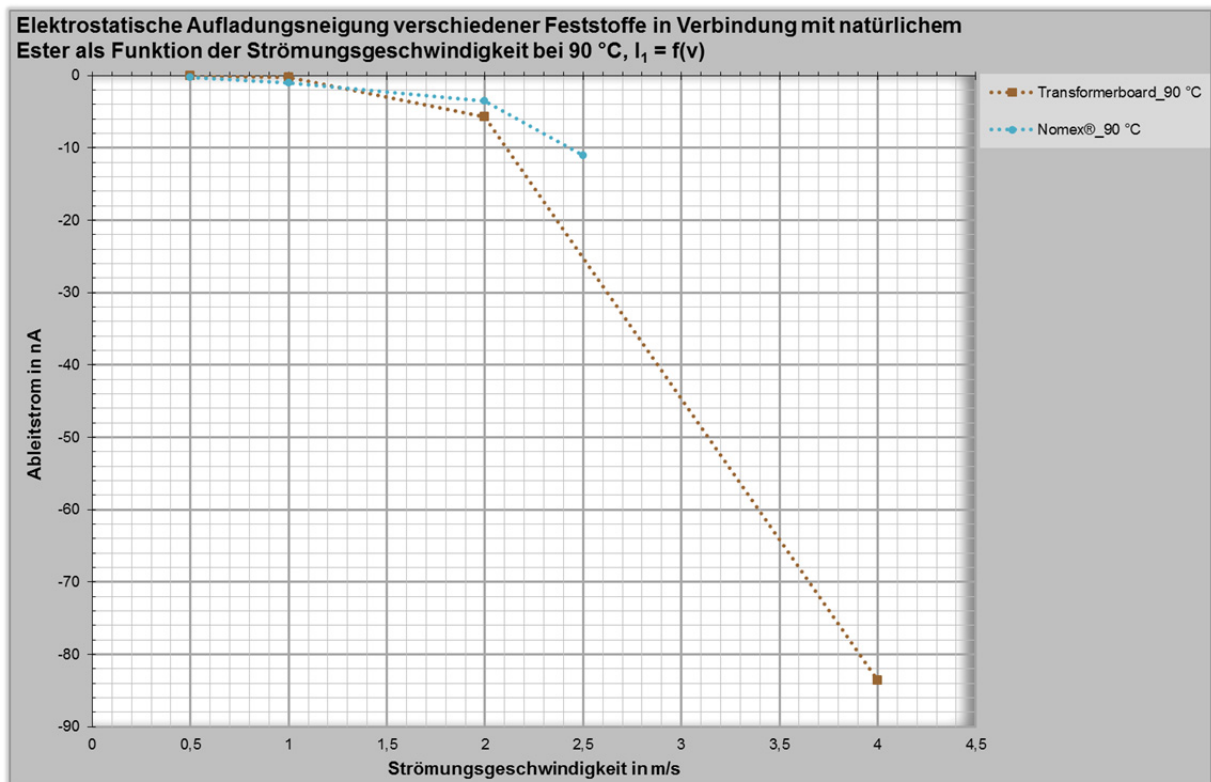


Abbildung 7-14: Strom-Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Feststoffe mit natürlichem Ester bei 90 °C

### Erkenntnisse aus den Aufladungsuntersuchungen in der Strömungsmodellanlage

Zusammenfassend lassen die Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage für den betrachteten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich folgende Trends erkennen:

- Transformerboard B 3.1A zeigt meist in Verbindung mit Mineralöl die höhere Aufladungsneigung als Nomex® 994 (Ausnahme: 90 °C).
- In Verbindung mit Esterflüssigkeiten besitzt meistens Nomex® 994 die höhere Aufladungsneigung als Transformerboard B 3.1A.

Die in der Strömungsmodellanlage untersuchten Feststoffe haben, wie in **Tabelle 6-5** dargestellt, eine unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit. Sie besitzen zwar eine relativ gleiche Rauheit, jedoch weist Transformerboard B 3.1A eine deutlich höhere Welligkeit als Nomex® 994 auf. Da in der Literatur beschrieben wird ([EPR93] S. 2-2-8), dass die Oberflächenbeschaffenheit eines Feststoffes die Aufladungsneigung beeinflusst, wurden zusätzliche Untersuchungen von Nomex® und Transformerboard mit einer *spinning disc* durchgeführt. Dabei sollte herausgefunden werden, ob die mit der Strömungsmodellanlage erhaltenen Erkenntnisse generell gültig sind oder von der Oberflächenbeschaffenheit der Materialien abhängen.

#### **7.3.2 Ergänzende Untersuchungen mit einer spinning disc**

Im Rahmen der zwei Studienarbeiten [Sch14] und [Riz14] wurden zusätzliche Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die elektrostatische Aufladungsneigung von Transformerboard und Nomex® mit einer *spinning disc* durchgeführt. Der Inhalt der beiden Untersuchungen ist im Folgenden kurz beschrieben.

- **Untersuchungen 1:** Feststoffe mit Siebstruktur  
Die beiden Materialien Transformerboard B 3.1A und Nomex® 993 wurden in Verbindung mit Mineralöl, synthetischem und natürlichem Ester untersucht [Sch14] S. 63. Die Oberfläche dieser Feststoffe besaß eine Siebstruktur. Nomex® 994 war mit Siebstruktur nicht erhältlich. Daher wurde Nomex® 993 eingesetzt. Laut [Wei15\_a] S. 3 unterscheidet sich Nomex® 993 von dem in der Strömungsmodellanlage untersuchten Nomex® 994 durch eine geringere Dichte. Nomex® 994 ist mit  $1,15 \text{ g/cm}^3$  als Stoff hoher Dichte eingestuft, Nomex® 993 hingegen mit einer Dichte von  $0,07$  bis  $0,85 \text{ g/cm}^3$  als Stoff mittlerer Dichte [Wei15\_a] S. 3. Die Boardscheiben für die Untersuchungen in der *spinning disc* besaßen eine Dicke von 1 mm [Sch14] S. 63.
- **Untersuchungen 2:** Feststoffe mit gehobelter Oberfläche  
Die beiden Materialien Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 wurden in Verbindung mit Mineralöl und natürlichem Ester untersucht. Das Ziel war es möglichst glatte Materialien bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung zu vermessen. Daher wurde die Oberfläche der beiden Feststoffe mit einer Dickenhobelmaschine bearbeitet. Aus fertigungstechnischen Gründen mussten Boardscheiben mit einer Stärke von 2 mm verwendet werden [Riz14] S. 6.

Die Variationsparameter bei beiden Untersuchungen waren folgende [Sch14] S. 68, [Riz14] S. 7:

- Systemtemperatur (Raumtemperatur, 60 °C, 90 °C)
- Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe (120 rpm, 200 rpm, 400 rpm)

Die Rauheit und Welligkeit der Materialien beider Untersuchungen wurden am Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik der Technischen Universität Graz vermessen. Die Ergebnisse für den arithmetischen Mittelwert der Höhen  $S_a$  für Rauheit und Welligkeit sind in **Tabelle 7-1** dargestellt. Die graphische Darstellung des Oberflächendatensatzes befindet sich in **Anhang B**.

Die Welligkeit berücksichtigt grobe Erscheinungen in der Oberfläche wie die Siebstruktur. Aus **Tabelle 7-1** ist ersichtlich, dass bei beiden Untersuchungen mit der *spinning disc* Nomex® eine höhe-



re Welligkeit aufwies als Transformerboard. Somit bestanden die umgekehrten Verhältnisse wie bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage, bei denen das untersuchte Transformerboard die gröbere Struktur besaß, siehe **Tabelle 6-5**. Es muss angemerkt werden, dass beide Feststoffe aus Untersuchung 2 mit derselben Dickenhobelmaschine bearbeitet wurden. Es konnte zwar dadurch nicht die gleiche Oberflächenbeschaffenheit für beide Feststoffe erreicht werden, jedoch bestand ein deutlich geringerer Unterschied in der Welligkeit als bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage, siehe **Tabelle 6-5**, und bei den Untersuchungen 1 in der *spinning disc*, siehe **Tabelle 7-1**.

Die Rauheit berücksichtigt die Faserstruktur der Feststoffproben. Aus **Tabelle 7-1** ist ersichtlich, dass bei Untersuchung 1 die Rauheit von Transformerboard und Nomex® relativ gleich ist, so wie bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage, siehe **Tabelle 6-5**. Die Bearbeitung der Materialien mit der Dickenhobelmaschine hat jedoch zu einer höheren Rauheit von Nomex® als für Transformerboard bei Untersuchung 2 geführt.

Tabelle 7-1: Oberflächenbeschaffenheit der in der spinning disc untersuchten Feststoffe

Untersuchung	Feststoff	Oberfläche	S <sub>a</sub>	
			Rauheit	Welligkeit
			µm	µm
1	Transformerboard B 3.1A	mit Siebstruktur	4,1	20,9
	Nomex® 993		4,6	36,3
2	Transformerboard B 3.1A	gehobelt	2,2	2,8
	Nomex® 994		6,2	6,0

In **Abbildung 7-15** ist die elektrostatische Aufladungsneigung von Nomex® und Transformerboard mit Siebstruktur in Verbindung mit Mineralöl, synthetischem und natürlichem Ester verglichen. In **Abbildung 7-16** sind die Feststoffe mit bearbeiteter Oberfläche in Verbindung mit Mineralöl und natürlichem Ester bezüglich ihrer Aufladungsneigung einander gegenübergestellt.

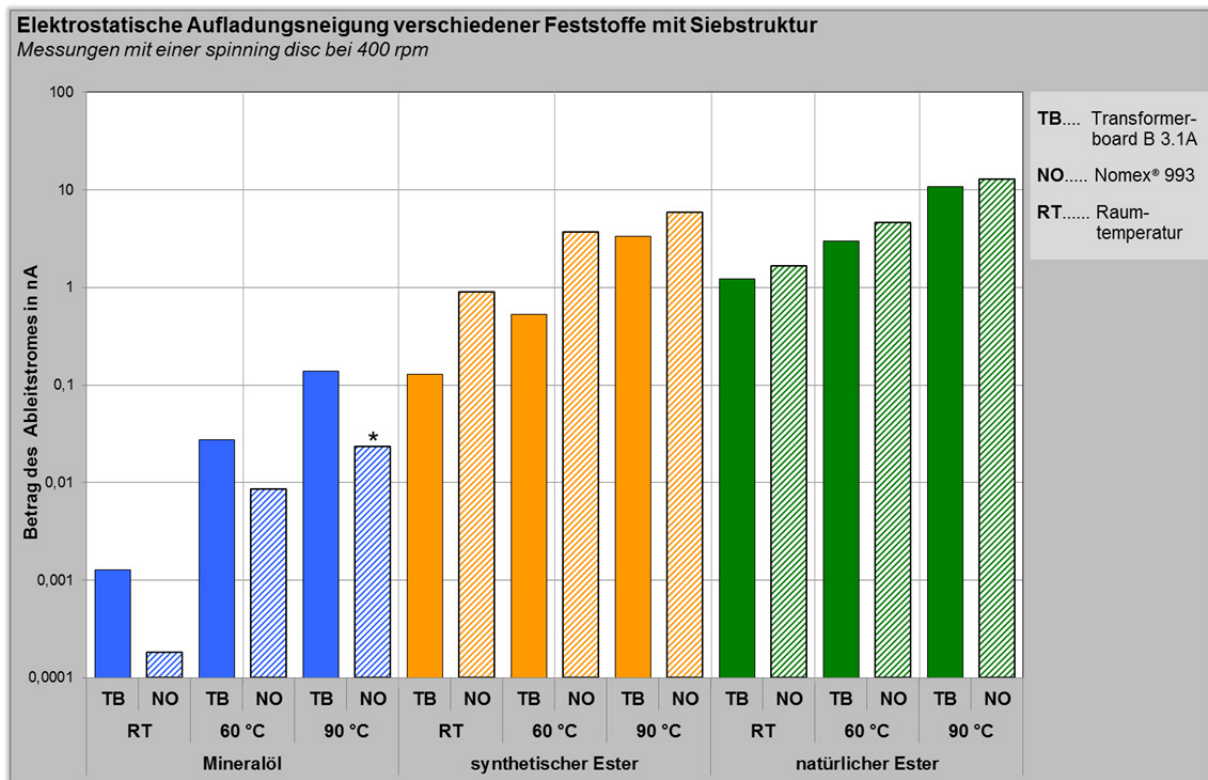


Abbildung 7-15: Feststoffeinfluss auf die elektrostatische Aufladung in Verbindung mit verschiedenen Isolierflüssigkeiten (Feststoff mit Siebstruktur, 1 mm Stärke), Messdaten aus [Sch14], \* Messwert positiv

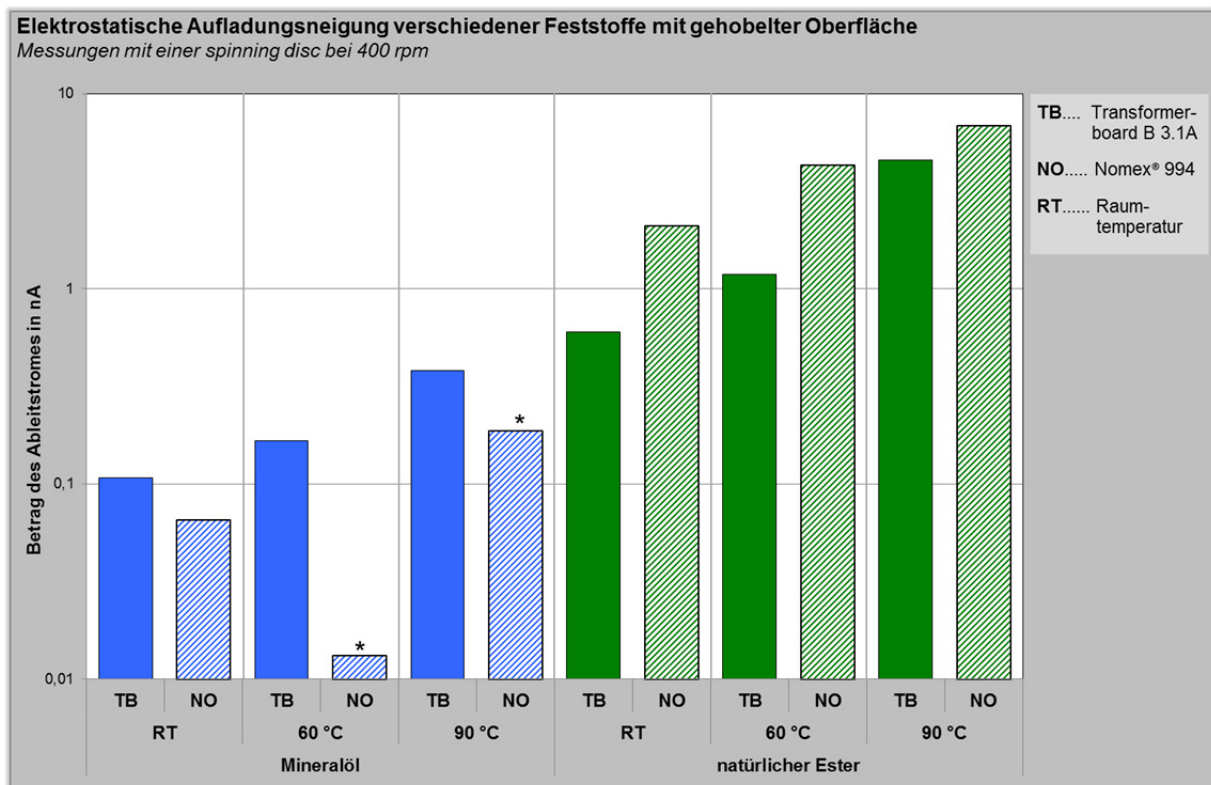


Abbildung 7-16: Feststoffeinfluss auf die elektrostatische Aufladung in Verbindung mit verschiedenen Isolierflüssigkeiten (Feststoff mit gehobelter Oberfläche, 2 mm Stärke), Messdaten aus [Riz14], \* Messwert positiv

Um eine übersichtlichere, logarithmische Darstellung der Messwerte zu ermöglichen, zeigen **Abbildung 7-15** und **Abbildung 7-16** den Betrag des Ableitstromes. Die gemessenen Werte waren hauptsächlich negativ. Positive Messwerte sind in den Abbildungen mit einem \* gekennzeichnet. Die Diagramme zeigen die bei den Untersuchungen nachgewiesenen Tendenzen am Beispiel der Ergebnisse bei 400 rpm. Eine vollständige Darstellung der Messergebnisse der beiden Untersuchungen ist in [Sch14] S. 76 – S. 82 bzw. in [Riz14] S. 12 – S. 15 zu finden. Aus den Diagrammen in **Abbildung 7-15** und **Abbildung 7-16** sind folgende grundsätzlichen Tendenzen erkennbar:

- In Verbindung mit Mineralöl besitzt generell Transformerboard B 3.1A die höhere Aufladungsneigung als Nomex® (993 bzw. 994) [Sch14], [Riz14].
- In Verbindung mit Esterflüssigkeiten besitzt Nomex® (993 bzw. 994) die höhere Aufladungsneigung als Transformerboard B 3.1A [Sch14], [Riz14].

Obwohl im Gegensatz zu den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage die Oberflächenstruktur von Nomex® gröber war als jene von Transformerboard, ergeben sich bei den Untersuchungen in der *spinning disc* die gleichen Tendenzen wie bei jenen in der Strömungsmodellanlage. Dies zeigt, dass im betrachteten Rauheits- und Welligkeitsbereich die Oberflächenbeschaffenheit einen untergeordneten Einfluss auf die elektrostatische Aufladungsneigung der beiden betrachteten Feststoffe zu besitzen scheint.

### 7.3.3 Entladungen im Strömungsmodell

Neben der Untersuchung der elektrostatischen Aufladungsneigung über die Ableitströme an den Strömungsmodellen, wurde auch geprüft, ob die Modelle durch die Beanspruchung bei den praktischen Versuchen Entladespuren davongetragen hatten. Es wurden die Kanalaußenseiten und die Kanalinnenseiten der Modelle nach jeder Versuchsreihe in der Strömungsmodellanlage geprüft. Für die Untersuchung der Kanalinnenseiten wurde eine Endoskopkamera verwendet, siehe **Kapi-**

**tel 6.6.1.** Wenn ein Modell nicht mehr gebraucht wurde, wurde es aufgeschnitten und auch optisch auf Auffälligkeiten geprüft.

### Feststoffuntersuchungen mit Mineralöl

Nach den experimentellen Untersuchungen mit Mineralöl konnten weder am Transformerboard-Modell noch am Nomex®-Modell Entladespuren gefunden werden.

### Feststoffuntersuchungen mit Esterflüssigkeiten

Der erste Versuch mit Esterflüssigkeiten fand mit einem Transformerboard-Modell statt. Dies ist aus der zeitlich chronologischen Auflistung der Untersuchungen in **Tabelle 6-7** ersichtlich. Auffällig waren hier die bereits beschriebenen Impulse in den Ableitströmen bei der höchsten Temperaturstufe und bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Solch intensive Erscheinungen waren bei den Untersuchungen mit Mineralöl nicht aufgefallen. Entladespuren am Modell wurden jedoch nicht gefunden.

Der zweite Versuch mit Esterflüssigkeiten fand mit einem Nomex®-Modell statt. Auffällig waren auch hier die Stromimpulse in den Strom-Zeitverläufen, die jedoch bei allen Temperaturstufen für mittlere bis hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftraten. Bei dieser Versuchsreihe kam es weiters bei der 90 °C-Messserie nach ca. 5-minütiger Durchströmung mit der maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s zu einer Entladung von der Außenseite des Modells zu Elektrodenpaar 1 hin. Die Entladespur ist aus **Abbildung 7-18** ersichtlich. Die Entladung beschädigte das Elektrometer, wodurch der Versuch abgebrochen werden musste. An den Kanalinnenseiten wurden keine Entladespuren gefunden. Seit diesem Ereignis wurden erst die in **Abbildung 5-14** dargestellten Schutzbeschaltungen in den Messleitungen verwendet, um das Elektrometer vor weiteren Beschädigungen zu schützen. Dieser Vorfall zeigte, dass die Kombination von hoher Strömungsgeschwindigkeit und hoher Temperatur das Auftreten von energiereichen Entladungen beim Isoliermaterialpaar Nomex®-Ester begünstigt. Bei den darauffolgenden Untersuchungen mit Nomex® wurde die maximale Strömungsgeschwindigkeit bei 90 °C reduziert.

Nach diesem Ereignis wurden Zusatzmessungen mit einer Feldmühle durchgeführt, um die auftretenden Spannungen bei Transformerboard und Nomex® in Verbindung mit Esterflüssigkeiten bestimmen und vergleichen zu können. Diese Messungen fanden bei 20 °C im Rahmen der Trockenversuche jeweils nach den Untersuchungen entsprechend dem Versuchsplan in **Abbildung 6-18** statt. Dabei wurden zwei Messserien an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Zuerst wurde das Potential an einem einzigen Elektrodenpaar erfasst, siehe **Abbildung 5-16**. Dann wurde die Spannung an allen Elektrodenpaaren gemeinsam gemessen, siehe **Abbildung 5-17**. Die Untersuchungen zeigten die Tendenz, dass sich generell höhere Spannungen bei Nomex® ergaben bzw. sich mit steigender Strömungsgeschwindigkeit einstellten. Dies ist aus dem Vergleich der Messspannungen an Elektrodenpaar 3 für Transformerboard und Nomex® in Verbindung mit den beiden Esterflüssigkeiten in **Abbildung 7-17** ersichtlich.

Weitere Untersuchungen mit Esterflüssigkeiten führten beim Transformerboard-Modell zu keinen Entladespuren. Im Nomex®-Modell wurden sowohl punktförmige Spuren, siehe **Abbildung 7-19**, als auch verzweigte Spuren, siehe **Abbildung 7-20** und **Abbildung 7-21**, gefunden. Es ist wahrscheinlich, dass diese Entladungen entweder bei der 90 °C-Messung, bei der Messserie unter Hochspannungsbeanspruchung oder bei den am Ende der Versuchsreihe durchgeführten Spannungsmessungen aufgetreten sind. Die stark verzweigte Entladespur in **Abbildung 7-21** verläuft unter der Oberfläche. Man spricht hier in der Fachliteratur von *wormholes*. Diese Erscheinung stellt einen typischen Fehler durch elektrostatische Aufladung in Transformatoren dar und wurde bereits in **Kapitel 3.2** beschrieben.

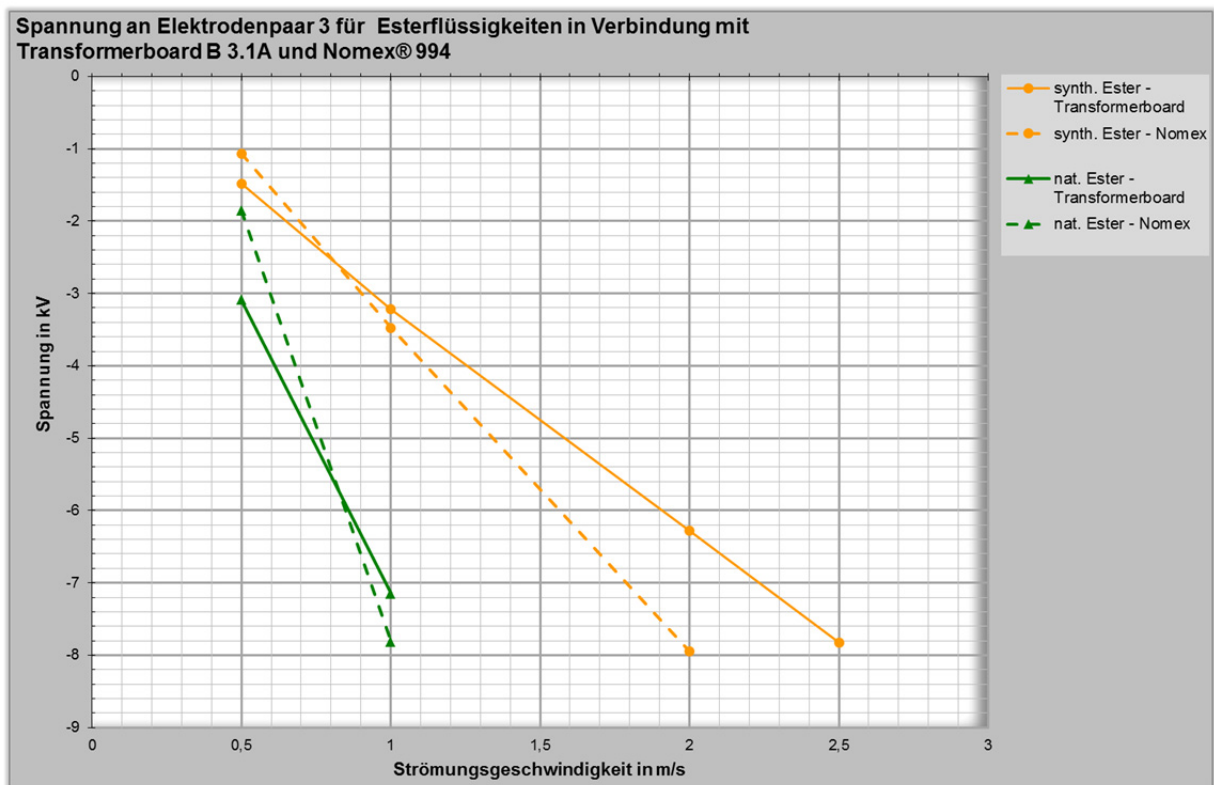


Abbildung 7-17: Spannungs-Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Feststoffe in Verbindung mit Esterflüssigkeiten

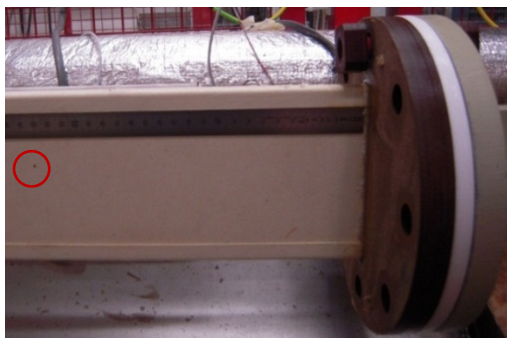


Abbildung 7-18: Punktförmige Entladespur auf Außenseite des Nomex®-Modells

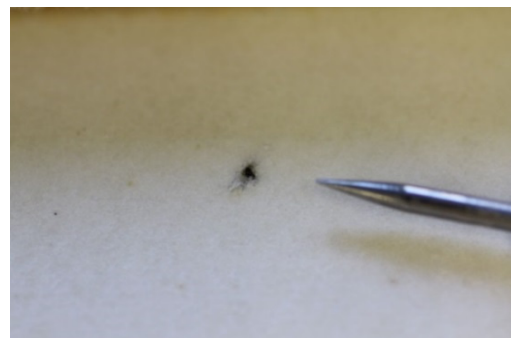


Abbildung 7-19: Punktförmige Entladespur auf Kanalinnenseite des Nomex®-Modells



Abbildung 7-20: Verzweigte Entladespur an Kanalinnenseite des Nomex®-Modells, Endoskopaufnahme



Abbildung 7-21: Entladespur auf Kanalinnenseiten des Nomex®-Modells

### 7.3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Der Vergleich der beiden Feststoffe Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994 in der Strömungsmodellanlage bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung hat gezeigt, dass in Abhängigkeit der verwendeten Isolierflüssigkeit unterschiedliche Tendenzen erkennbar sind. Für Isoliermaterialpaare mit Mineralöl zeigt sich meist eine höhere Aufladungsneigung für Transformerboard B 3.1A. In Kombination mit Esterflüssigkeiten besitzt tendenziell Nomex® 994 die höhere Aufladungsneigung.

Die beiden Materialien Nomex® 994 und Transformerboard B 3.1A wurden in Kombination mit Mineralöl bereits in der Vergangenheit in der früheren Kanalmodellanlage des Institutes für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Graz auf ihre Aufladungsneigung hin untersucht, siehe [EPR93] S. 2-2-6 – S. 2-2-8. Diese Untersuchung zeigte auch, dass in Verbindung mit Mineralöl Transformerboard B 3.1A eine höhere Aufladungsneigung aufweist als Nomex® 994. Die höhere Aufladungsneigung von Transformerboard B 3.1A gegenüber Nomex® 994 wurde in [EPR93] S. 2-2-8 mit der raueren Oberfläche von Transformerboard B 3.1A in Zusammenhang gebracht.

Um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Aufladungsneigung von Transformerboard und Nomex® zu untersuchen, wurden Zusatzmessungen im Rahmen von Studienarbeiten mit einer *spinning disc* durchgeführt. Bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage besaß Transformerboard aufgrund seiner Siebstruktur eine höhere Welligkeit als das vermessene Nomex® 994. Zusatzmessungen mit der *spinning disc* haben jedoch gezeigt, dass die beschriebenen Tendenzen auch bei einer höheren Welligkeit von Nomex® gültig sind. Auch eine geringfügig höhere Rauheit von Nomex® gegenüber Transformerboard änderte nichts an den festgestellten Tendenzen. Es scheint, dass im betrachteten Bereich von Welligkeit und Rauheit die Oberflächenstruktur der Feststoffe eine untergeordnete Rolle spielt. Die elektrostatische Aufladungsneigung bzw. Ladungserzeugung wird somit vor allem durch den unterschiedlichen chemischen Aufbau der beiden Feststoffe bestimmt, siehe **Abbildung 6-5** und **Abbildung 6-6**.

Für das Isoliermaterialpaar Pressboard - Mineralöl bestehen Annahmen, welche Rolle der chemische Aufbau des Feststoffes bei der Aufladung spielt. Laut den experimentellen Untersuchungen in [Pai02] wird der Aufladungsprozess vom Vorhandensein leicht ionisierbarer Gruppen im Pressboard beeinflusst, in diesem Fall Carboxylgruppen (-COOH) und auch teils Hydroxylgruppen (-OH). Carboxylgruppen sind in der Hemizellulose enthalten [Pai02] S. 183, die wie in **Kapitel 6.1.2** beschrieben, auch einen Bestandteil von Pressboard darstellt. Hydroxylgruppen sind im Zellulose-Molekül vorhanden [led88] S. 155, siehe **Abbildung 6-5**. Bereits in den 80er Jahren des vorhergehenden Jahrhunderts wurde die Rolle der Hydroxylgruppen beim Aufladungsprozess in [led88] S. 155 beschrieben. Die Rolle der chemischen Bestandteile von Nomex® bei der Aufladung wurde bis jetzt noch nicht experimentell untersucht.

Die Erfahrungen aus den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage zeigen, dass beim Einsatz vom Isoliermaterialpaar Ester - Nomex® in Leistungstransformatoren grundsätzlich erhöhte Vorsicht und daher ein entsprechendes Design notwendig sind. Dafür sprechen folgende Faktoren:

- Wie beschrieben führen Esterflüssigkeiten in Verbindung mit Nomex® 994 zu einer höheren Aufladungsneigung als in Verbindung mit Transformerboard B. 3.1A. Eine höhere Aufladungsneigung bedeutet eine höhere Ladungserzeugung. Nomex® besitzt weiters einen höheren spezifischen Widerstand als Transformerboard, siehe **Tabelle 6-6**. Dadurch wird die Ladungsableitung erschwert d.h. die Ladungsansammlung und somit die auftretenden Potentiale werden erhöht. Dies wurde durch Zusatzmessungen mit einem Elektrofeldmeter besonders für höhere Strömungsgeschwindigkeiten deutlich nachgewiesen.
- An den Nomex®-Modellen wurden nach den Untersuchungen der Esterflüssigkeiten Entladespuren festgestellt. Diese waren für die Isoliermaterialpaare Mineralöl - Transformerboard, Ester - Transformerboard und Mineralöl - Nomex® nicht nachweisbar. Laut den Erfahrungen

aus den Messungen ist insbesondere die Kombination von hoher Strömungsgeschwindigkeit und hoher Temperatur günstig für das Auftreten von Entladungen.

- Bei der Vermessung von Nomex® in Verbindung mit Esterflüssigkeiten waren hohe positive und negative Impulse in den Ableitströmen bei allen Temperaturstufen für mittlere bis hohe Strömungsgeschwindigkeiten aufgetreten. Diese scheinen einen Hinweis auf das Auftreten von Entladungen zu geben, die im worst case auch zu den festgestellten Entladespuren führen können.

## 7.4 Elektrostatische Aufladungsneigung bei unterschiedlichen Strömungsformen

In **Kapitel 2.2** wurde bereits beschrieben, dass die Strömungsform einer Isolierflüssigkeit in einem Rohr oder Kanal einen großen Einfluss auf die Höhe der elektrostatischen Aufladung besitzt. In der Vergangenheit wurde der Einfluss der Strömungsform für Isoliersysteme mit Mineralöl bereits intensiv erforscht. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Strömungsmodellanlage zur elektrostatischen Aufladungsneigung von Mineralöl, synthetischem und natürlichem Ester in Abhängigkeit der Strömungsform dargestellt und mit den für Mineralöl aus der Literatur bekannten Tendenzen verglichen. Ziel dieses Vergleiches ist es einerseits die Ergebnisse für Mineralöl zu überprüfen und andererseits auch zu ermitteln, ob die bekannten Tendenzen nicht nur für Mineralöl sondern generell für alle Isolierflüssigkeiten Gültigkeit besitzen.

Im Folgenden wird zuerst die Strömungsform der drei Isolierflüssigkeiten im Strömungsmodell in Abhängigkeit von Systemtemperatur und Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Dann wird das Verhalten der gemessenen Ableitströme in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl analysiert. Zum Schluss werden die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und diskutiert.

### 7.4.1 Strömungsverhältnisse im Modell

Die Strömungsform der Flüssigkeit in einem Rohr oder Kanal wird durch die dimensionslose Reynolds-Zahl gekennzeichnet, siehe **Kapitel 2.2.1**. Für Reynolds-Zahlen  $< 2320$  besteht eine laminare Strömung. Bei Reynolds-Zahlen  $> 2320$  kommt es zum Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungsverhältnissen [Sig09] S. 94. Die Reynolds-Zahl wurde für die vermessenen Isolierflüssigkeiten bei den untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturstufen berechnet. Dafür musste zuerst der hydraulische Durchmesser  $d_h$  des durchströmten Modellquerschnittes von 5 mm x 80 mm mittels **Gleichung 2-47** ermittelt werden. Dabei ergibt sich folgender Wert, siehe Berechnung in **Kapitel 5.1**:

$$d_h = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Dann wurde die Reynolds-Zahl über **Gleichung 2-45** berechnet. Ein Beispiel für die Berechnung ist im Folgenden für Mineralöl bei 20 °C ( $\nu = 19,6 \text{ mm}^2/\text{s}^{10}$ ) und bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s im Modell angegeben.

$$R_e = \frac{v \cdot d_h}{\nu} = \frac{4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{19,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1918$$

Die Reynolds-Zahl ist in **Abbildung 7-22** für die drei Isolierflüssigkeiten im untersuchten Geschwindigkeits- und Temperaturbereich dargestellt. Bei 20 °C bestehen für alle drei Isolierflüssig-

<sup>10</sup> Laut Messung von Siemens AG Österreich

keiten noch laminare Strömungsverhältnisse. Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität der Isolierflüssigkeiten und die Reynolds-Zahl nimmt zu, siehe **Gleichung 2-45**. Bei gleicher Temperatur besitzen die Esterflüssigkeiten gegenüber Mineralöl immer eine höhere Viskosität. Daher sind die Esterflüssigkeiten bei gleicher Temperatur auch erst bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten als Mineralöl vom Übergang zu turbulenter Strömung betroffen. Natürlicher Ester erreicht bei 60 °C aufgrund seiner hohen Viskosität den Bereich  $Re > 2320$  im vermessenen Geschwindigkeitsbereich nicht, bei 90 °C erst ab ca. 2,6 m/s.

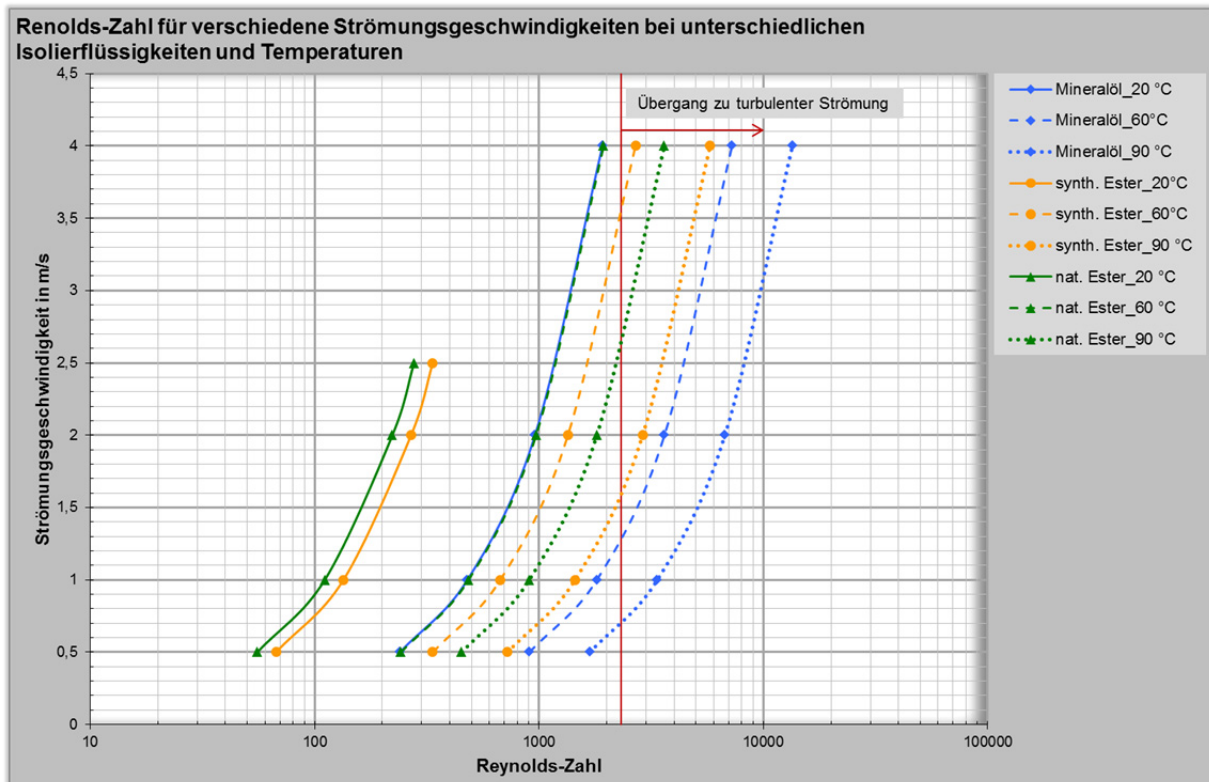


Abbildung 7-22: Strömungsform der Isolierflüssigkeiten bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage

#### 7.4.2 Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage

Im vorliegenden Kapitel wird das elektrostatische Aufladungsverhalten in Abhängigkeit der Strömungsform der Isolierflüssigkeit analysiert. Die dargestellten Ergebnisse stammen aus den Trockenversuchen, da diese den für die Praxis relevanten Fall darstellen. Die beschriebenen Trends haben allerdings generell auch für die Feuchtversuche Gültigkeit.

##### Strom-Reynolds-Zahl-Verlauf im laminaren und turbulenten Strömungsbereich

Die Ergebnisse der Aufladungsuntersuchungen in der Strömungsmodellanlage sind in **Abbildung 7-23** und **Abbildung 7-24** zusammengefasst. In **Abbildung 7-23** ist die elektrostatische Aufladungsneigung der drei Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A bei verschiedenen Temperaturen als Funktion der Reynolds-Zahl veranschaulicht. **Abbildung 7-24** zeigt die elektrostatische Aufladungsneigung der gleichen Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Nomex® 994. Um die geringen Ableitströme im Bereich niedriger Reynolds-Zahlen in **Abbildung 7-24** noch erkennbar darzustellen, ist in diesem Diagramm der Messpunkt für synthetischen Ester bei 90 °C und 3,5 m/s mit einem Wert von ca. 400 nA nicht mehr dargestellt.

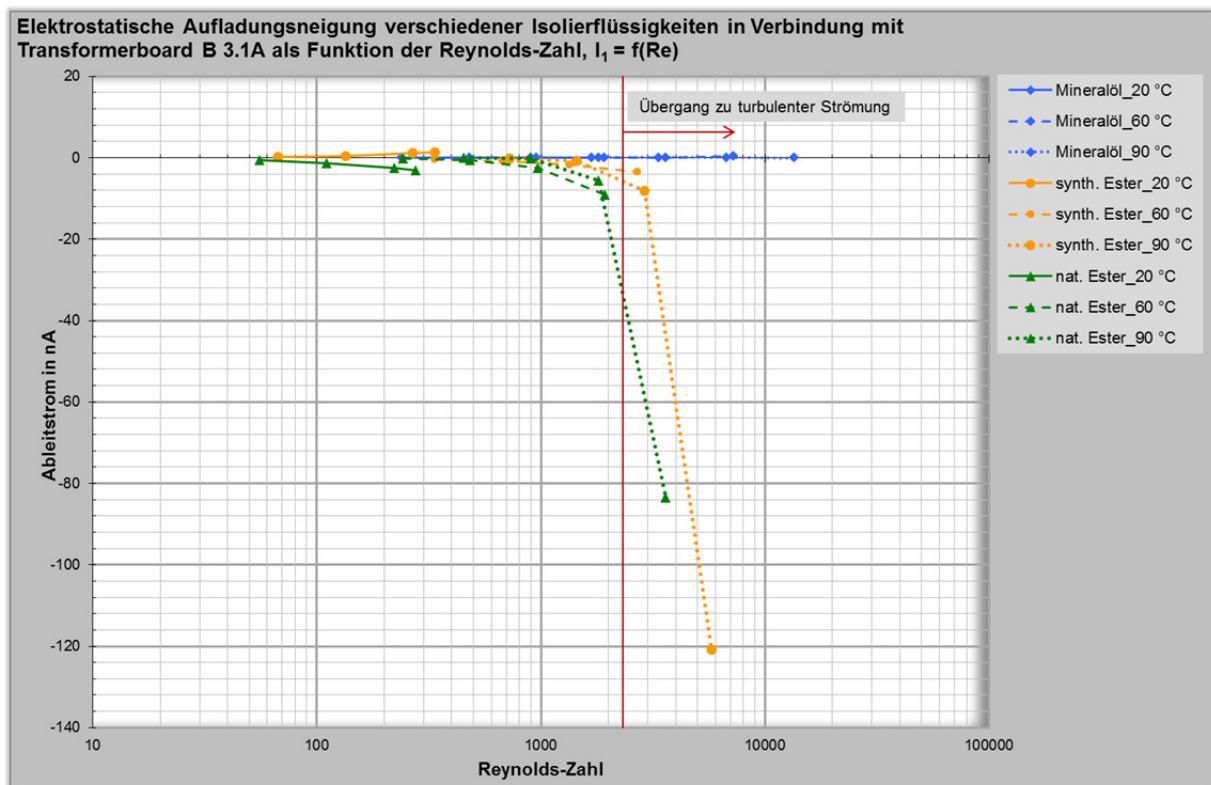


Abbildung 7-23: Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Reynolds-Zahl für verschiedene Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A

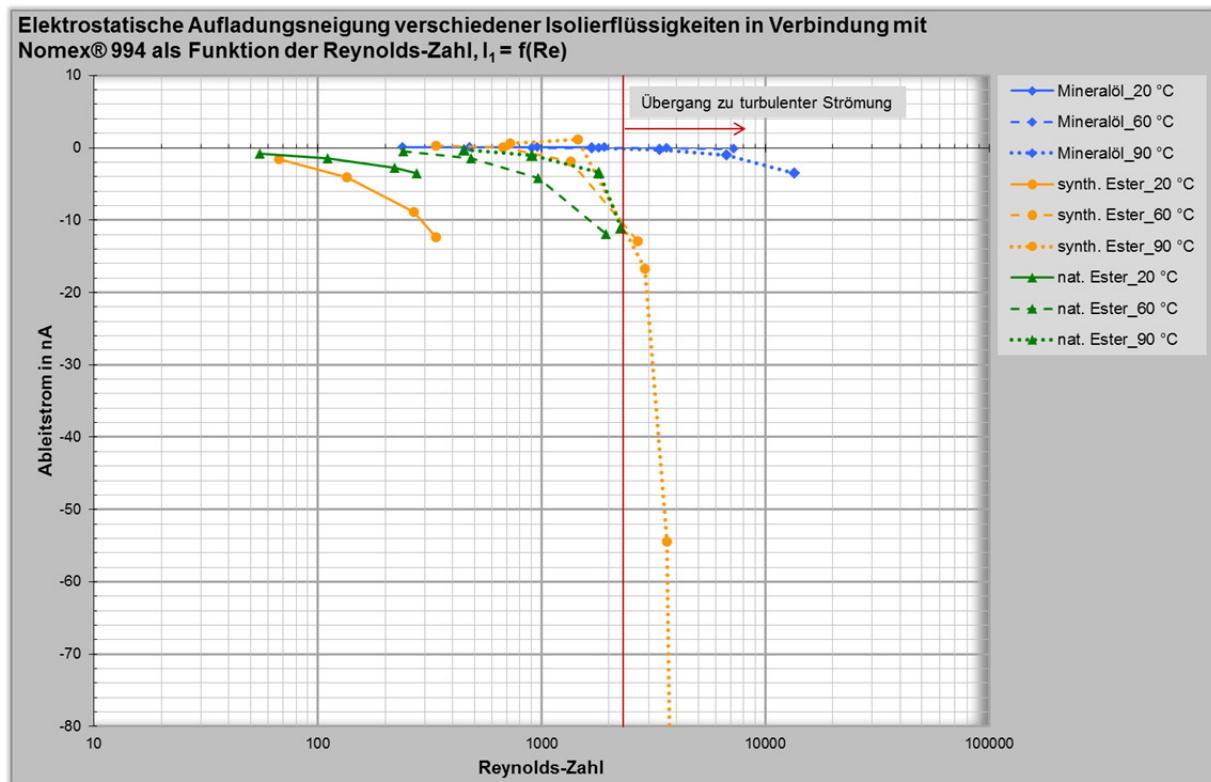


Abbildung 7-24: Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Reynolds-Zahl für verschiedene Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Nomex® 994



Aus **Abbildung 7-23** und **Abbildung 7-24** ist erkennbar, dass die Ableitströme aller drei Isolierflüssigkeiten im Bereich  $Re > 2320$  einen deutlich höheren Anstieg besitzen als im laminaren Strömungsbereich.

Eine Analyse des Verhaltens der Ableitströme im laminaren Bereich in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl kann anhand der Diagramme des vorhergehenden **Kapitels 7.3.1** durchgeführt werden, die den Strom-Geschwindigkeitsverlauf der Ableitströme am Strömungsmodell darstellen. Bei einer Temperatur von  $20\text{ °C}$  bestehen laut **Abbildung 7-22** für alle Isolierflüssigkeiten im betrachteten Geschwindigkeitsbereich laminare Strömungsverhältnisse. Bei  $20\text{ °C}$  zeigt der Ableitstrom  $I_1$  aller untersuchten Isolierflüssigkeiten ein relativ lineares Verhalten als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit und somit auch laut **Gleichung 2-45** als Funktion der Reynolds-Zahl (Viskosität und Modellquerschnitt bleiben konstant!). Dies ist für Mineralöl in Kombination mit beiden Feststoffen aus **Abbildung 7-9** ersichtlich. Diese Tendenz kann bei  $20\text{ °C}$  auch für die Esterflüssigkeiten in Verbindung mit beiden Feststoffen aus **Abbildung 7-11** und **Abbildung 7-13** erkannt werden. Auffällig ist in **Abbildung 7-11** lediglich der Knick für synthetischen Ester in Verbindung mit Nomex® bei  $2,5\text{ m/s}$ . Impulse im Strom-Zeitverlauf führten bei diesem Messpunkt zu einer geringfügigen Erhöhung des Stromes.

Für Mineralöl bei  $60\text{ °C}$  ist der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung aus **Abbildung 7-9** gut erkennbar. Es besteht vor allem in Kombination mit Transformerboard und auch näherungsweise in Kombination mit Nomex® bis zum Messpunkt bei  $2\text{ m/s}$  ein linearer Anstieg des Stromes. Bei  $4\text{ m/s}$  ist der Strom bereits überproportional angestiegen. Dies weist darauf hin, dass im Bereich um  $2\text{ m/s}$  der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung beginnt. Aus **Abbildung 7-22** ist ersichtlich, dass es bei Mineralöl laut Berechnung bei  $60\text{ °C}$  ab ca.  $1,3\text{ m/s}$  zum Übergang zu turbulenter Strömung kommen kann. Eine Analyse des Stromverlaufes im laminaren Bereich für Mineralöl bei  $90\text{ °C}$  ist aufgrund zu weniger Messpunkte in diesem Bereich nicht möglich. Für die Esterflüssigkeiten ist bei höheren Temperaturen der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung seltener gut erkennbar und ein lineares Verhalten im laminaren Bereich seltener nachweisbar. Für synthetischen Ester sollte der Übergang laut den berechneten Reynolds-Zahlen in **Abbildung 7-22** bei  $60\text{ °C}$  ab ca.  $3,5\text{ m/s}$  auftreten können. Zum Beispiel ist in **Abbildung 7-11** erkennbar, dass für synthetischen Ester in Verbindung mit Transformerboard sogar bis ca.  $4\text{ m/s}$  relativ lineare Verhältnisse bestehen. Der Messpunkt bei  $4\text{ m/s}$  scheint somit am Ende des laminaren Bereiches bzw. am Beginn des Übergangsbereiches zu stehen. Für synthetischen Ester in Verbindung mit Nomex® kann jedoch aus **Abbildung 7-11** kein lineares Verhalten bei laminarer Strömung erkannt werden.

Die Analyse des Verhaltens der Ableitströme im Bereich  $Re > 2320$  gestaltet sich schwieriger, da nicht viele Messpunkte in diesem Bereich aufgenommen wurden. Eine Interpretation des Aufladungsverhaltens ist erst ab mindestens drei Messpunkten möglich. Dies ist für Mineralöl nur bei der  $90\text{ °C}$ -Messserie der Fall ( $1\text{ m/s}$ ,  $2\text{ m/s}$ ,  $4\text{ m/s}$ ). Bei den Esterflüssigkeiten kann nur die Untersuchung mit synthetischem Ester in Verbindung mit Nomex® im Bereich  $Re > 2320$  analysiert werden, da hier ein zusätzlicher Messpunkt bei  $3,5\text{ m/s}$  aufgezeichnet wurde und somit insgesamt drei Messpunkte im Bereich  $Re > 2320$  vorhanden sind. In **Abbildung 7-25** sind die Ableitströme für Mineralöl in Verbindung mit Nomex® bei allen drei Temperaturstufen noch einmal im Detail dargestellt. **Abbildung 7-26** zeigt die Ergebnisse für synthetischen Ester in Verbindung mit Nomex®. In den beiden Diagrammen sind die Messwerte für  $90\text{ °C}$  durch eine rote Umrandung hervorgehoben. Es wurde mittels Excel eine Trendlinie für die Messpunkte der  $90\text{ °C}$ -Messserie im Bereich  $Re > 2320$  gelegt. Weiters ist die Gleichung der Trendlinie auch in den Diagrammen angegeben. Für Mineralöl zeigt die Gleichung der Trendlinie in **Abbildung 7-25** einen annähernd quadratischen Zusammenhang für den Ableitstrom als Funktion der Reynolds-Zahl an. Für synthetischen Ester zeigt die Gleichung in **Abbildung 7-26**, dass der Ableitstrom mit der 5,7-fachen Potenz der Reynolds-Zahl ansteigt. Der Vergleich von **Abbildung 7-25** und **Abbildung 7-26** veranschaulicht, dass die Ableitstromwerte für den synthetischen Ester einerseits bei niedrigeren Reynolds-Zahlen liegen und andererseits auch näher an der Grenze  $Re = 2320$  auftreten als die Ableitstromwerte für Mineralöl. Somit ist es möglich, dass die dargestellten Messwerte von syntheti-

schem Ester noch vorwiegend in einem Übergangsbereich von laminarer zu turbulenter Strömung sind und die Messwerte für Mineralöl bereits hauptsächlich im turbulenten Bereich auftreten. Dies könnte den unterschiedlichen Verlauf erklären.

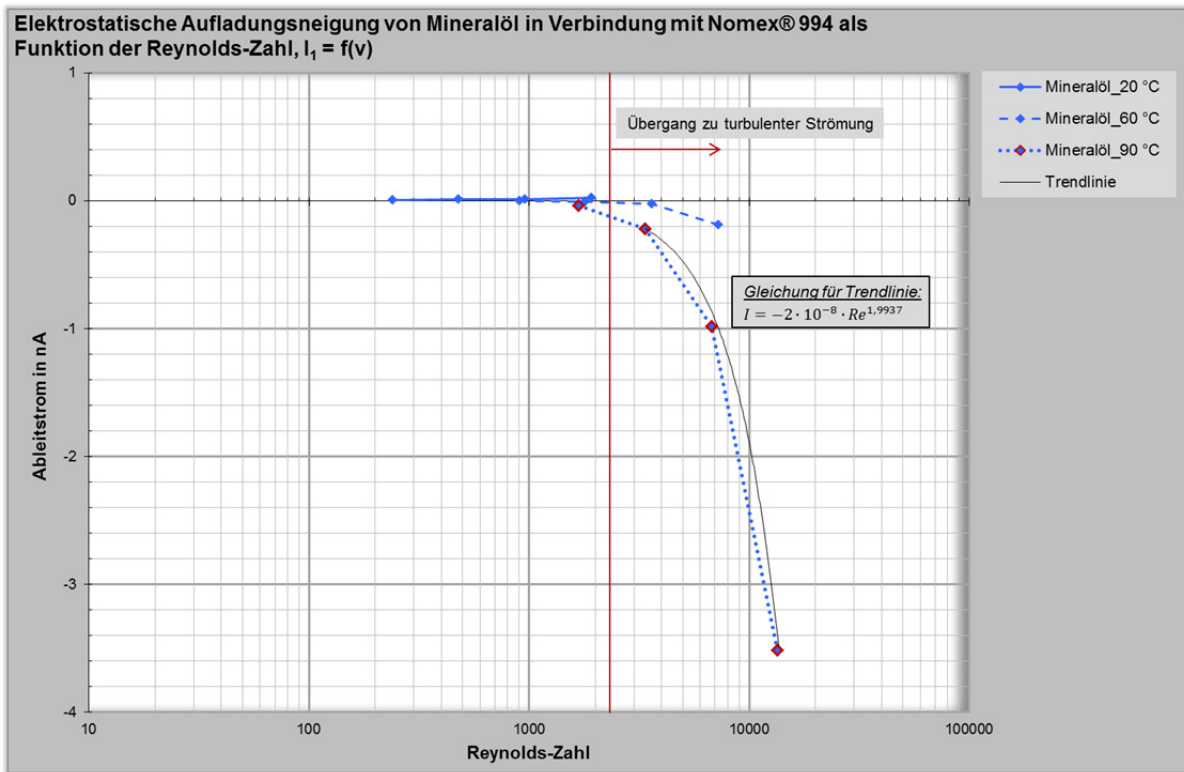


Abbildung 7-25: Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Reynolds-Zahl von Mineralöl in Verbindung mit Nomex® 994

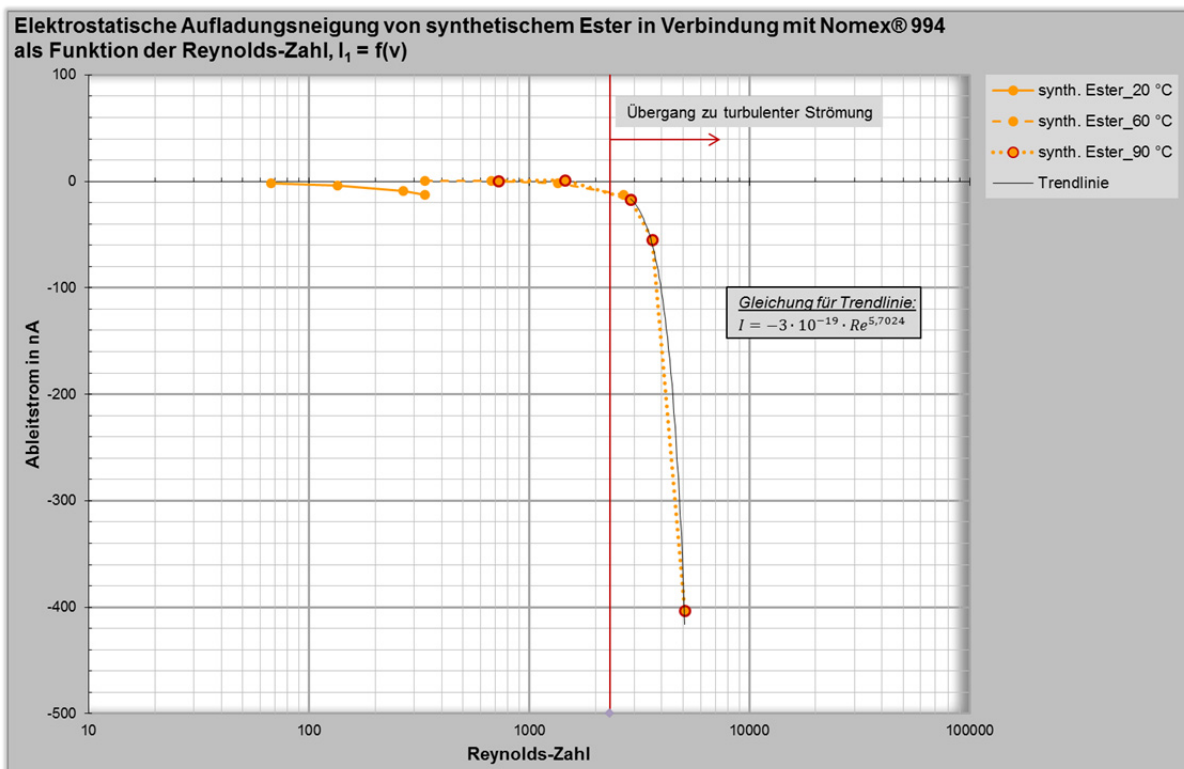


Abbildung 7-26: Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Reynolds-Zahl von synthetischem Ester in Verbindung mit Nomex® 994

### Temperatureinfluss im laminaren und turbulenten Strömungsbereich

Im laminaren Strömungsbereich kann beobachtet werden, dass der Ableitstrom meist bei gleicher Reynolds-Zahl mit höherer Temperatur absinkt. Für Mineralöl ist dies aus **Abbildung 7-27** aus dem Vergleich der Messwerte bei 20 °C und 60 °C erkennbar. Da sich bei 90 °C keine stationären Werte ergeben haben, sind diese in der Abbildung nicht dargestellt. Die beschriebene Tendenz ist aus **Abbildung 7-26** für synthetischen Ester erkennbar. **Abbildung 7-23** und **Abbildung 7-24** veranschaulichen diese Tendenz auch gut für natürlichen Ester.

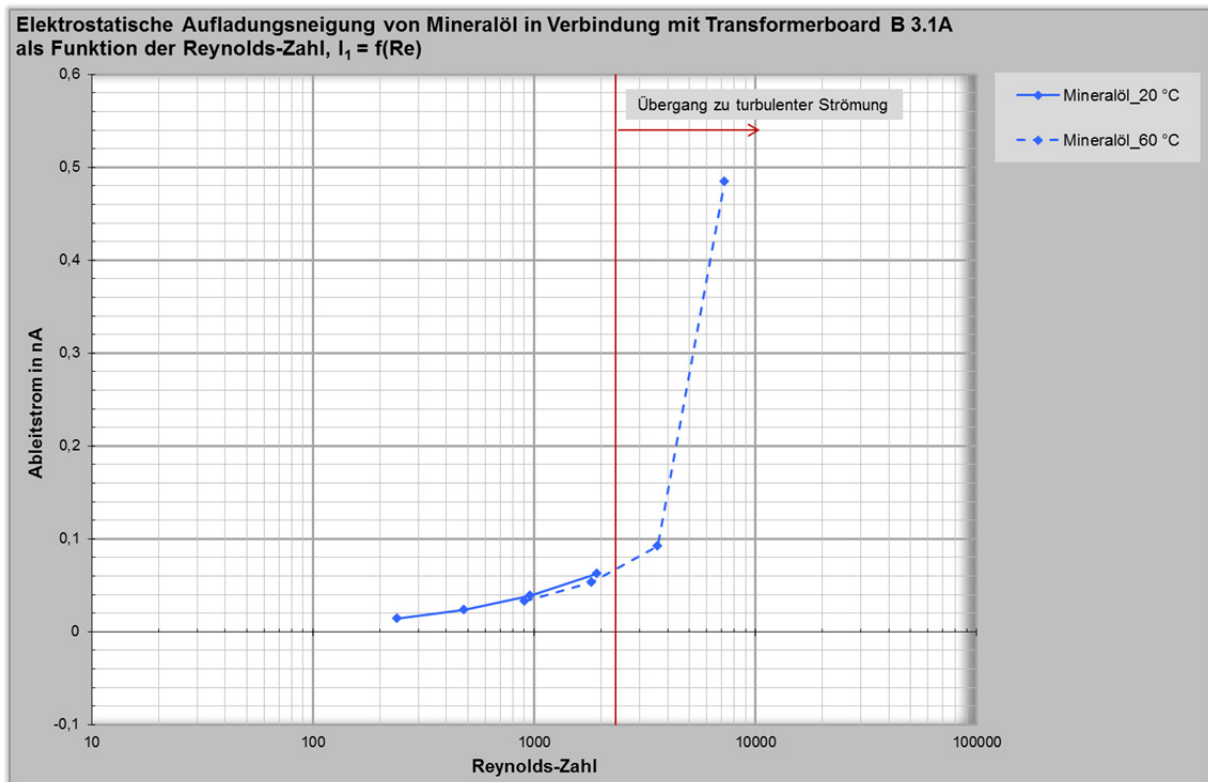


Abbildung 7-27: Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Reynolds-Zahl von Mineralöl in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A

Im Bereich  $Re > 2320$  wird häufig die starke Zunahme der Ableitströme als Funktion der Reynolds-Zahl durch eine höhere Temperatur der Isolierflüssigkeit noch intensiviert. Dies ist aus **Abbildung 7-24** für Mineralöl gut erkennbar, wenn man die Ableitströme für 60 °C und 90 °C gegenüberstellt. Für die Ableitströme bei 90 °C ergeben sich bei gleicher Reynolds-Zahl höhere Werte. Für synthetischen Ester ist die gleiche Tendenz in **Abbildung 7-23** und **Abbildung 7-24** anhand des Vergleiches der Ableitströme bei 60 °C und 90 °C im Bereich  $Re > 2320$  ersichtlich. Aufgrund der hohen Viskosität von natürlichem Ester besitzt dieser im Bereich  $Re > 2320$  zu wenige Werte, sodass sein Verhalten in Abhängigkeit der Temperatur bei dieser Strömungsform nicht analysiert werden kann.

#### 7.4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die Analyse der elektrostatischen Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Strömungsform zeigt für Mineralöl und für die Esterflüssigkeiten sehr ähnliche Tendenzen. Diese Tendenzen stimmen auch generell sehr gut mit dem in der Literatur für Mineralöl beschriebenen Verhalten überein:

- Bei laminarer Strömung zeigt sich für alle drei Isolierflüssigkeiten ein deutlich schwächerer Anstieg der Ableitströme als Funktion der Reynolds-Zahl als im Bereich  $Re > 2320$ . Dies stimmt mit den Erläuterungen in [Sch90] S. 82 zum Verhalten im laminaren Bereich und im

Bereich für Reynolds-Zahlen größer als die kritische Reynolds-Zahl überein. In [Sch90] sind Untersuchungen an einem Kanalmodell durchgeführt worden, welches die gleichen Abmessungen und die gleiche Elektrodenanordnung besaß wie das Strömungsmodell.

- Im laminaren Strömungsbereich konnte ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Ableitstrom und Reynolds-Zahl für Mineralöl bei niedrigen und hohen Temperaturen beobachtet werden. Ein solches Verhalten wurde für Mineralöl bereits in der Literatur [Hig79] S. 1261 beschrieben. Für die alternativen Isolierflüssigkeiten wurde ein linearer Zusammenhang bei laminarer Strömung bei 20 °C durchgängig beobachtet, bei höheren Temperaturen jedoch nur vereinzelt. Es ist anzunehmen, dass bei höherer Temperatur andere Einflussfaktoren, wie ein Feuchteausgleich zwischen Flüssigkeit und Board, zusätzlich die Aufladung beeinflussen.
- Die Analyse des Aufladungsverhaltens im Bereich  $Re > 2320$  wurde für die 90 °C-Messungen von Mineralöl und synthetischem Ester in Verbindung mit Nomex® durchgeführt. Für Mineralöl zeigt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen Ableitstrom und Reynolds-Zahl. Diese Tendenz wurde anhand von Messungen mit Mineralöl in [Hig79] S. 1261 für den turbulenten Bereich festgestellt. Für synthetischen Ester ergibt sich ein Anstieg des Ableitstromes mit der 5,7-fachen Potenz der Reynolds-Zahl. Dieses Verhalten entspricht am ehesten jenem, das laut [Hig79] S. 1261 im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung herrscht. In [Hig79] S. 1261 wird für den Übergangsbereich ein Anstieg des Ableitstromes mit  $Re^2$  bis  $Re^5$  angegeben. Andererseits könnte ein dermaßen hoher Anstieg des Ableitstromes auch ein Hinweis auf Entladungsaktivitäten sein, da bei der Untersuchung von synthetischem Ester in Verbindung mit Nomex® bei 90 °C und hoher Strömungsgeschwindigkeit hohe Impulse im Strom-Zeitverlauf beobachtet wurden, siehe **Kapitel 7.1.1**.
- Bei laminarer Strömung konnte für alle drei Isolierflüssigkeiten die Tendenz beobachtet werden, dass der Ableitstrom bei gleicher Reynolds-Zahl mit höherer Temperatur absinkt. Dies wird auch in [Hig79] S. 1261 für Mineralöl beschrieben. Im Bereich  $Re > 2320$  kann eine Erhöhung der Aufladungsneigung mit steigender Temperatur für Mineralöl und synthetischen Ester erkannt werden. Diese Tendenz wird auch in [Sch90] S. 82 außerhalb des laminaren Bereiches beschrieben. Eine Analyse des Verhaltens von natürlichem Ester ist aufgrund zu weniger Werte in diesem Bereich nicht möglich.

## 7.5 Elektrostatische Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte der Isolierflüssigkeit

Im vorliegenden Kapitel wird der Einfluss der Feuchte der Isolierflüssigkeit auf die elektrostatische Aufladungsneigung der untersuchten flüssig/ festen Isoliermaterialpaare behandelt. Dafür werden die Ergebnisse der Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage und von Zusatzmessungen mit einem *mini-static tester* dargestellt. Zum Schluss werden die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und diskutiert. Untersuchungen zum Feuchteeinfluss auf die elektrostatische Aufladungsneigung von Mineralöl wurden in der Vergangenheit bereits häufig durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Literatur werden im vorliegenden Kapitel mit den eigenen verglichen. Ziel dieses Vergleiches ist es einerseits die Ergebnisse für Mineralöl zu überprüfen und andererseits auch zu ermitteln, ob die gleichen Tendenzen generell für alle drei Isolierflüssigkeiten Gültigkeit besitzen.

### 7.5.1 Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage

Im Folgenden wird zuerst die FeuchteEinstellung und somit der Feuchteunterschied zwischen den Feucht- und Trockenversuchen in der Strömungsmodellanlage beschrieben. Dann werden die Ergebnisse der elektrostatischen Aufladungsneigung von feuchten und trockenen Isolierflüssigkeiten für jede Isolierflüssigkeit einzeln gegenübergestellt. Es sind die Ergebnisse der Untersuchungen

mit Transformerboard B 3.1A dargestellt. Die Aussagen dieses Kapitels haben jedoch auch für Isoliersysteme mit Nomex® 994 Gültigkeit.

### Feuchteverhältnisse

Die drei Isolierflüssigkeiten Mineralöl, synthetischer und natürlicher Ester wurden in den Zuständen *trocken* und *feucht* bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung in der Strömungsmodellanlage untersucht. Die Einstellung dieser beiden Feuchtezustände erfolgte, wie bereits in **Kapitel 6.2** beschrieben, vor jeder Versuchsreihe nach folgenden Vorgaben für die relative Feuchte bei einer Temperatur von 20 °C:

- trocken = 3 %
- feucht = 20 %

Auf die Entwicklung der Feuchte während einer Versuchsreihe wurde kein Einfluss mehr genommen. Die Feuchte wurde in der Strömungsmodellanlage auf zwei Arten gemessen. Zum einen wurde während jeder Messserie die relative Feuchte über einen Feuchte- und Temperaturtransmitter erfasst. Weiters wurde am Ende jeder Messserie eine Probe der Isolierflüssigkeit gezogen und daraus mittels Karl Fischer Titration die absolute Feuchte bestimmt.

Die Entwicklung der relativen Feuchte während der einzelnen Messserien ist für die drei Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A in **Abbildung 7-28** für die Feuchteversuche und in **Abbildung 7-29** für die Trockenversuche dargestellt. Die Messdaten stammen vom Feuchte- und Temperaturtransmitter. Die für die einzelnen Strömungsgeschwindigkeiten angegebenen Feuchtwerte stellen Mittelwerte über der gesamten Durchströmungszeit mit der betreffenden Strömungsgeschwindigkeit dar. Man erkennt aus den Diagrammen, dass während einer Messserie die relative Feuchte näherungsweise konstant blieb.

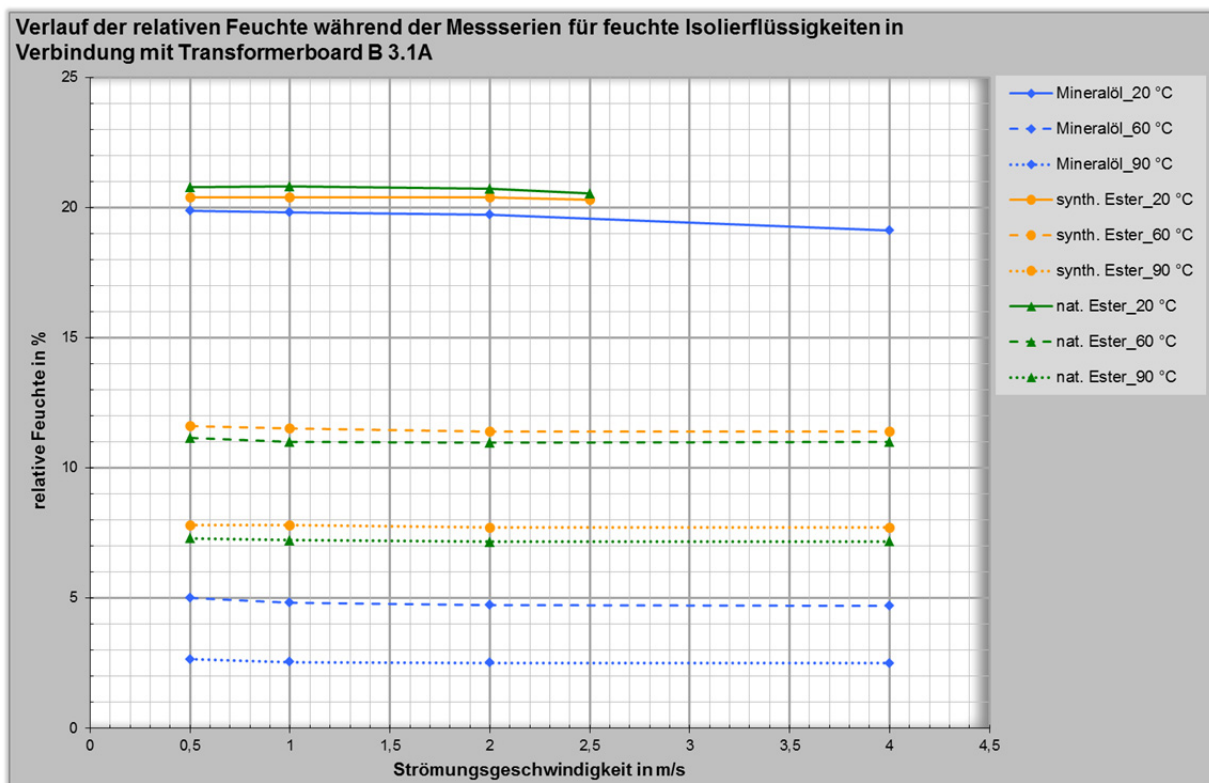


Abbildung 7-28: Relative Feuchtentwicklung über die einzelnen Messserien mit feuchten Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A

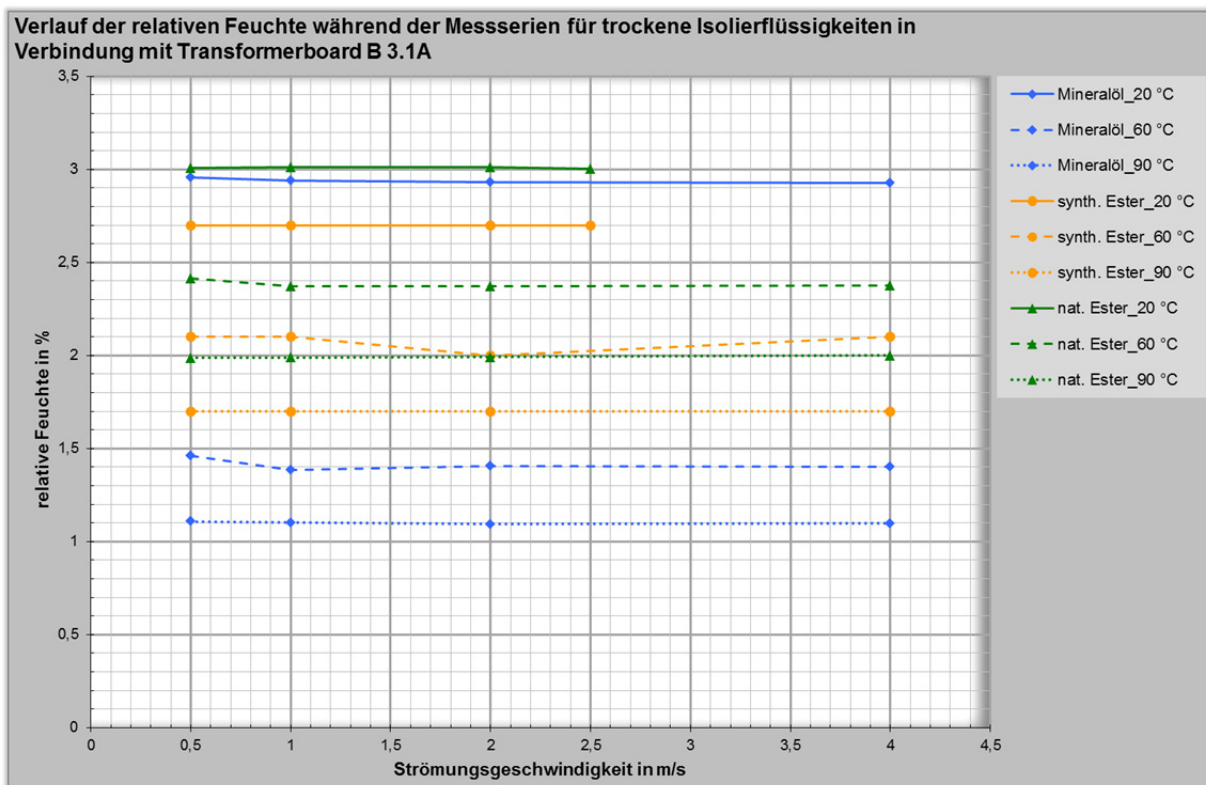


Abbildung 7-29: Relative Feuchtentwicklung über die einzelnen Messserien mit trockenen Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A

Die Entwicklung der relativen Feuchte während der einzelnen Versuchsreihen ist aus **Tabelle 7-2** ersichtlich. Die Tabelle stellt die relative Feuchte der drei Isolierflüssigkeiten im Zustand *trocken* und *feucht* in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A dar. Die Werte entsprechen der relativen Feuchte bei der Messtemperatur. Die dargestellten Messdaten stammen ebenfalls vom Feuchte- und Temperaturtransmitter. Die Werte in der Tabelle geben die relative Feuchte im Mittel über die einzelnen Messserien an. Aus **Tabelle 7-2** ist ersichtlich, dass die vorgegebenen Bedingungen für die FeuchteEinstellung gut erfüllt wurden. Weiters ist erkennbar, dass die relative Feuchte mit steigender Temperatur abnimmt. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass eine Temperaturerhöhung zum Anstieg der Sättigungsfeuchte führt, siehe **Gleichung 6-1**. Aus **Tabelle 7-2** ist weiters erkennbar, dass der relative Feuchteunterschied zwischen den Feucht- und Trockenversuchen mit steigender Temperatur geringer wird.

Tabelle 7-2: Relative Feuchte der Isolierflüssigkeiten bei den Feucht- und Trockenversuchen mit Transformerboard B 3.1A, gemessen mittels Feuchte- und Temperaturtransmitter der Firma Vaisala

Isolierflüssigkeit	Messserie	Mittlere, relative Feuchte in % und Messtemperatur in °C		
		feucht	trocken	Differenz
Mineralöl	MS 20	19,6 % (20,4 °C)	2,9 % (20,1 °C)	16,7 % (0,3 °C)
	MS 60	4,8 % (59,0 °C)	1,4 % (60,2 °C)	3,4 % (1,2 °C)
	MS 90	2,5 % (87,8 °C)	1,1 % (89,2 °C)	1,4 % (1,4 °C)
Synthetischer Ester	MS 20	20,4 % (20,2 °C)	2,7 % (20,3 °C)	17,7 % (0,1 °C)
	MS 60	11,5 % (59,7 °C)	2,1 % (59,9 °C)	9,4 % (0,2 °C)
	MS 90	7,8 % (89,0 °C)	1,7 % (89,2 °C)	6,1 % (0,2 °C)
Natürlicher Ester	MS 20	20,7 % (20,3 °C)	3,0 % (20,3 °C)	17,7 % (0 °C)
	MS 60	11,0 % (59,9 °C)	2,4 % (60,2 °C)	8,6 % (0,3 °C)
	MS 90	7,2 % (89,1 °C)	2,0 % (89,7 °C)	5,2 % (0,6 °C)

Die absolute Feuchte der Isolierflüssigkeiten bei den Versuchsreihen mit Transformerboard B 3.1A ist aus **Tabelle 7-3** ersichtlich. Die Werte wurden mittels Karl Fischer Titration ermittelt. Wie bereits in **Kapitel 6.1.1** beschrieben, können die Esterflüssigkeiten deutlich höhere Mengen an Wasser aufnehmen. Aus **Tabelle 7-3** ist diese Eigenschaft deutlich erkennbar. Der absolute Feuchteunterschied zwischen den Feucht- und Trockenversuchen ist bei gleich eingestellter relativer Feuchte für Mineralöl mit 7,8 bis 11,4 ppm im Vergleich zu den Esterflüssigkeiten mit ca. 150 bis 380 ppm deutlich niedriger.

*Tabelle 7-3: Absolute Feuchte der Isolierflüssigkeiten bei den Feucht- und Trockenversuchen mit Transformerboard B 3.1A, gemessen mittels Karl Fischer Titration*

*\* gemessen mittels Feuchte- und Temperaturtransmitter und umgerechnet wegen Fehlfunktion von Karl Fischer Coulometer*

Isolierflüssigkeit	Messserie	Absolute Feucht in ppm		
		feucht	trocken	Differenz
Mineralöl	MS 20	11*	2,4	8,6
	MS 60	11,3*	3,5	7,8
	MS 90	14,8*	3,4	11,4
Synthetischer Ester	MS 20	415,8	38,5	377,3
	MS 60	406,4	50,9	355,5
	MS 90	412,5	39,1	373,4
Natürlicher Ester	MS 20	181	23,9	157,1
	MS 60	181,1	28,8	152,3
	MS 90	179,6	31,4	148,2

### Vergleich der Aufladungsneigung von feuchter und trockener Isolierflüssigkeit

In **Abbildung 7-30** bis **Abbildung 7-32** ist der Ableitstrom  $I_1$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit für feuchte und trockene Isolierflüssigkeit in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A bei 20 °C, 60 °C und 90 °C dargestellt. **Abbildung 7-30** zeigt die Ergebnisse für Mineralöl, **Abbildung 7-31** für synthetischen Ester und **Abbildung 7-32** für natürlichen Ester. Um eine übersichtliche Darstellung zu ermöglichen, werden an dieser Stelle nur die Strömungsgeschwindigkeiten 0,5 m/s und 1 m/s betrachtet. Diese stellen für den Betrieb eines Leistungstransformators auch die relevantesten Geschwindigkeiten dar. Die Ergebnisse des Vergleiches der Aufladungsneigung feuchter und trockener Isolierflüssigkeit aus **Abbildung 7-30** bis **Abbildung 7-32** sind in **Tabelle 7-4** zusammengefasst. Aus den Diagrammen und der Tabelle kann Folgendes erkannt werden:

- Die Ergebnisse für Mineralöl lassen darauf schließen, dass generell der Zustand *trocken* zu höherer Aufladung führt. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die Ergebnisse für die übrigen Ableitströme und auch für Nomex® 994 zum Schluss führen, dass generell für Mineralöl keine klare Tendenz der elektrostatischen Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte erkannt werden kann.
- Für die Esterflüssigkeiten ist keine klare Tendenz der elektrostatischen Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte der Isolierflüssigkeit ersichtlich. In Abhängigkeit von Temperaturstufe und zum Teil von der Strömungsgeschwindigkeit ist entweder der Zustand *trocken* oder der Zustand *feucht* höher aufladend. Bezieht man auch die Ergebnisse für Nomex® 994 mit ein, so ergeben sich die gleichen Verhältnisse.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass keine generell gültige Tendenz der Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte für die untersuchten Isolierflüssigkeiten besteht.

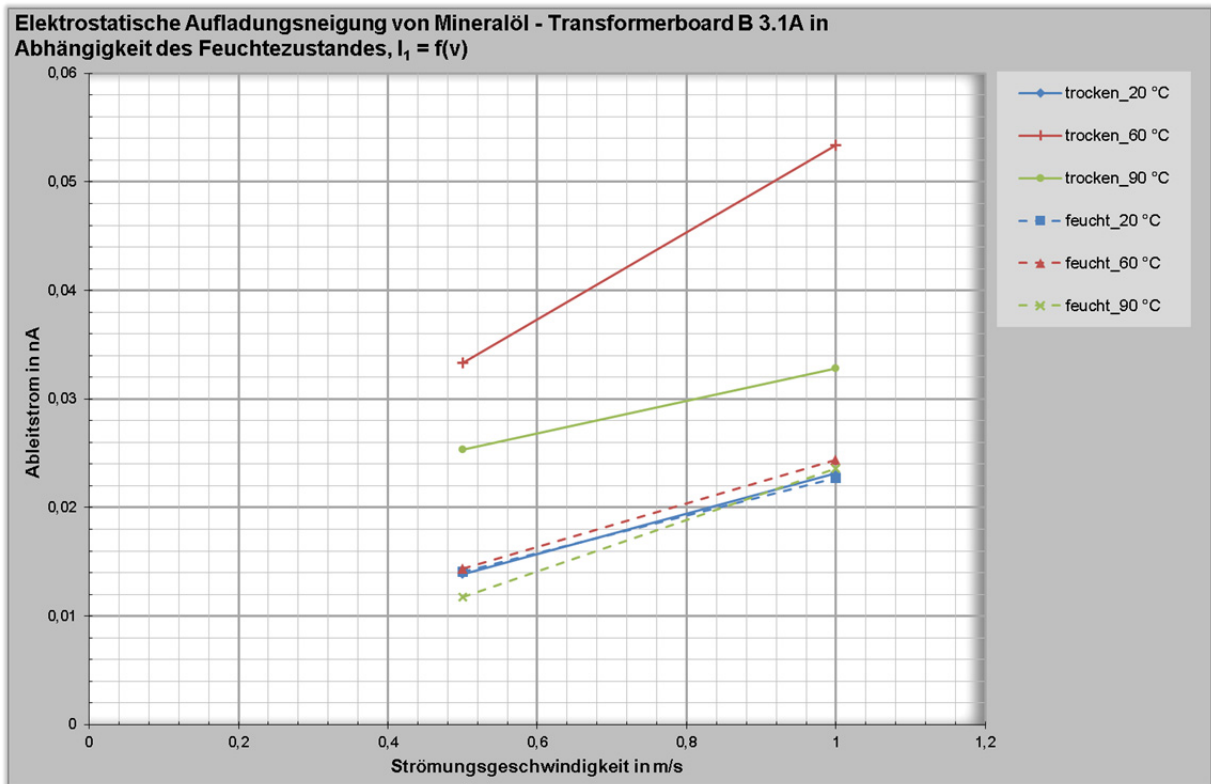


Abbildung 7-30: Strom-Geschwindigkeitsverlauf von Mineralöl - Transformerboard B 3.1A bei 20 °C, 60 °C und 90 °C

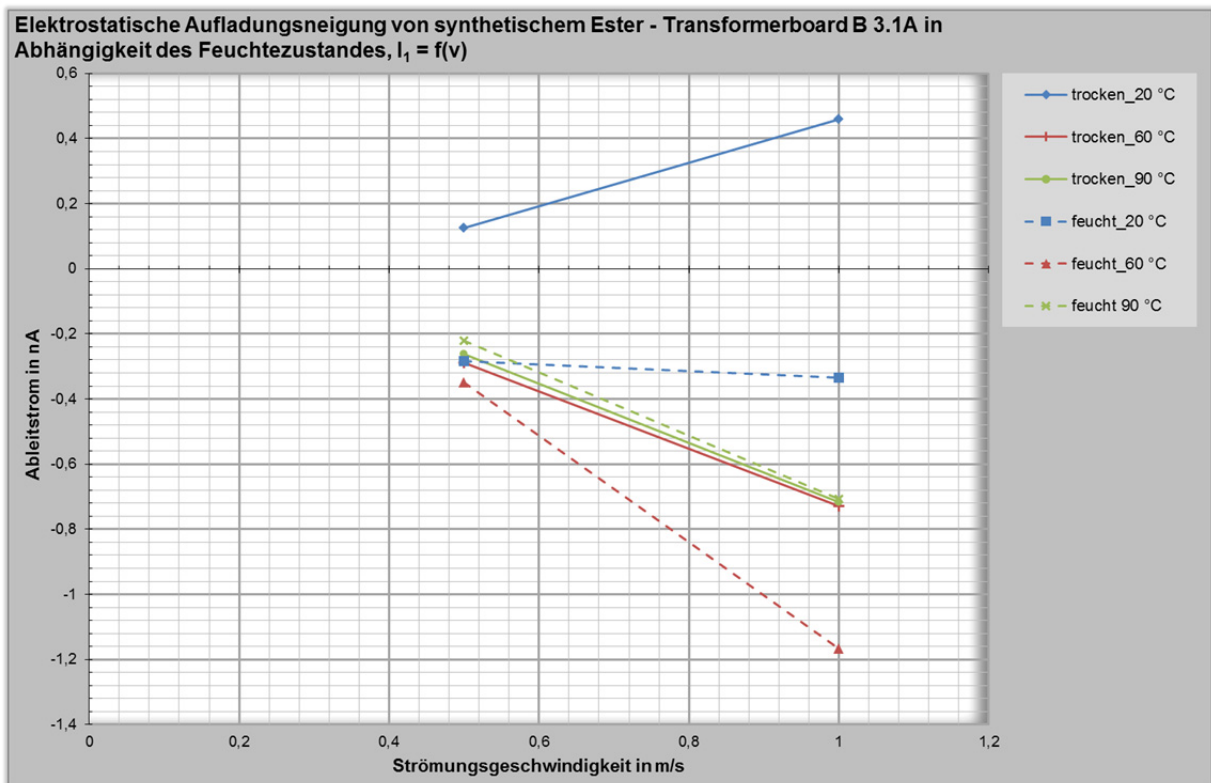


Abbildung 7-31: Strom-Geschwindigkeitsverlauf von synthetischem Ester - Transformerboard B 3.1A bei 20 °C, 60 °C und 90 °C



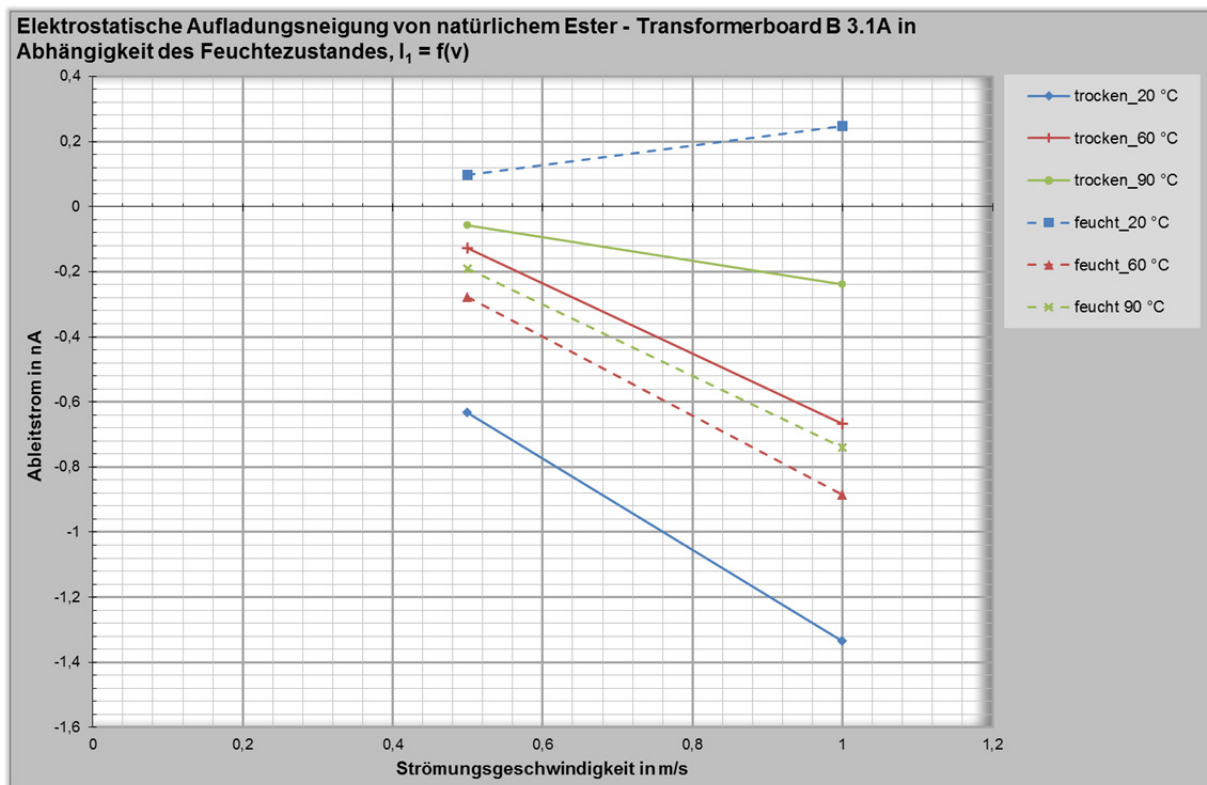


Abbildung 7-32: Strom-Geschwindigkeitsverlauf von natürlichem Ester - Transformerboard B 3.1A bei 20 °C, 60 °C und 90 °C

Tabelle 7-4: Ergebnisse der Strömungsmodellanlage zum Feuchteinfluss auf die elektrostatische Aufladungsneigung

	20 °C	60 °C	90 °C
<b>Mineralöl</b>	0,5 m/s: f ≥ t 1 m/s: t ≥ f	t > f	t > f
<b>Synthetischer Ester</b>	0,5 m/s: f > t 1 m/s: t > f	f > t	t > f
<b>Natürlicher Ester</b>	t > f	f > t	f > t

Legende zu **Tabelle 7-4**:

t trocken  
f feucht

### 7.5.2 Ergänzende Untersuchungen mit einem mini-static tester

Um die Ergebnisse der Strömungsmodellanlage zu überprüfen, wurden im Rahmen der Studienarbeit [Wie\_iA] zusätzliche Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte auf die elektrostatische Aufladungsneigung mit einem *mini-static tester* durchgeführt. Wie bereits in **Kapitel 7.2.2** beschrieben, wurden in der Studienarbeit [Wie\_iA] die Materialpaare Mineralöl – Zellulose, synthetischer Ester – Zellulose und natürlicher Ester – Zellulose in Abhängigkeit folgender Variationsparameter bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung vermessen:

- Systemtemperatur (20 °C, 40 °C, 60 °C)
- Relative Feuchte der Isolierflüssigkeit (*trocken* = 3 %, *feucht* = 20 %, *sehr feucht* = 60 %)

Die relative Feuchte der Isolierflüssigkeit wurde bei 20 °C eingestellt. Auf die Entwicklung der Feuchte bei den darauffolgenden Untersuchungen bei 60 °C und 90 °C wurde kein Einfluss mehr genommen. Die Punkte *trocken* und *feucht* waren gleich eingestellt wie bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage. Zusätzlich wurde der Messpunkt *sehr feucht* untersucht. Die Vermessung des zusätzlichen Feuchtepunktes wurde durchgeführt, um eine mögliche Tendenz

der Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte eindeutiger erkennbar zu machen. Der *mini-static tester* erlaubt eine deutlich weniger zeit- und arbeitsaufwendige Untersuchung eines zusätzlichen Messpunktes als die Strömungsmodellanlage.

In **Abbildung 7-33** ist die mit dem *mini-static tester* ermittelte Ladungsdichte für die drei Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit vom Feuchtezustand bei verschiedenen Temperaturen dargestellt. Die Ergebnisse des Vergleiches der Aufladungsneigung feuchter und trockener Isolierflüssigkeit aus **Abbildung 7-33** sind in **Tabelle 7-5** zusammengefasst. Aus dem Diagramm und der Tabelle kann Folgendes erkannt werden:

- Für Mineralöl fällt bei 20 °C die Aufladungsneigung mit steigender Feuchte ab. Bei den übrigen Temperaturstufen zeigt sich kein Trend. Bei 40 °C ist die Aufladungsneigung für alle drei Feuchtezustände relativ gleich. Bei 60 °C besitzt der Zustand *feucht* die höchste Aufladungsneigung und der Zustand *sehr feucht* die niedrigste.
- Bei synthetischem Ester scheint die Aufladung mit steigender Feuchte anzusteigen.
- Bei natürlichem Ester nimmt die Aufladung beim Zustand *feucht* bei allen Temperaturstufen den niedrigsten Wert an.

Zusammenfassend kann für Mineralöl und natürlichen Ester kein klarer Trend der Aufladungsneigung in Abhängigkeit des Feuchtezustandes erkannt werden. Für synthetischen Ester scheint die Aufladungsneigung mit steigender Feuchte zuzunehmen.

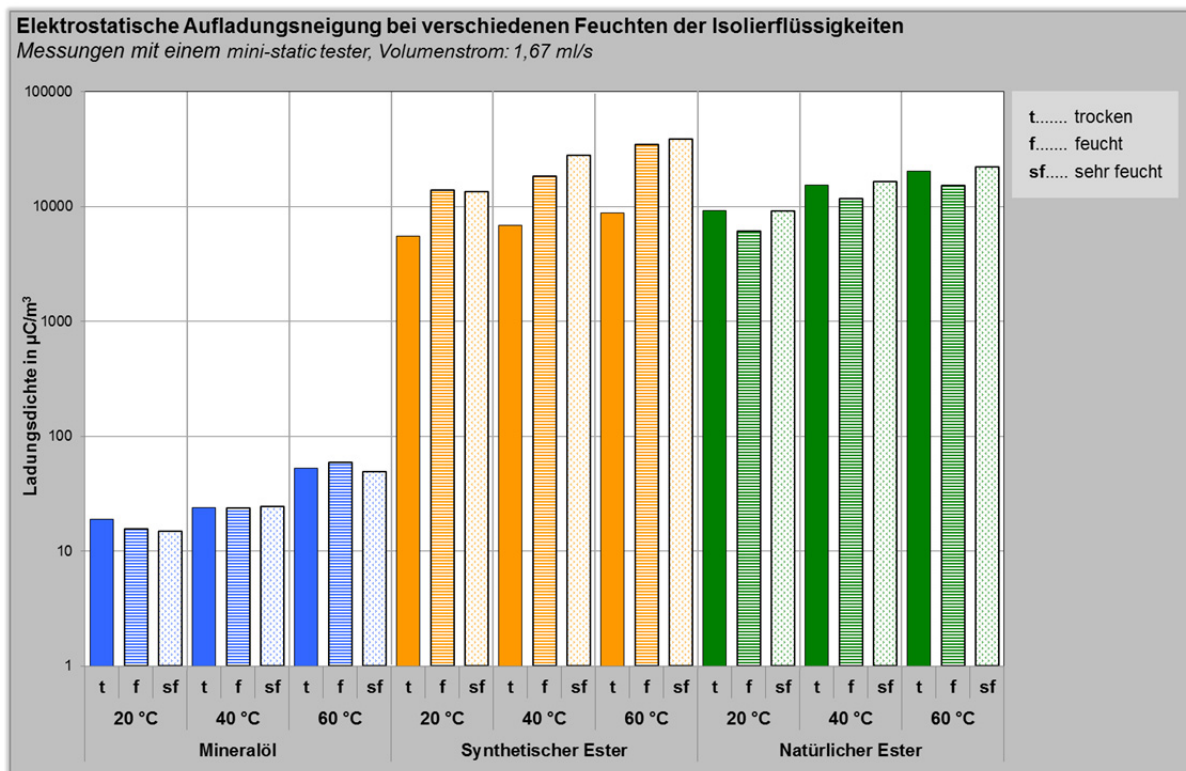


Abbildung 7-33: Feuchteinfluss auf die elektrostatische Aufladung verschiedener Isolierflüssigkeiten, Messdaten aus [Wie\_iA]

Tabelle 7-5: Ergebnisse des *mini-static testers* zum Feuchteinfluss auf die elektrostatische Aufladungsneigung

Isolierflüssigkeit	20 °C	40 °C	60 °C
Mineralöl	t > f > sf	sf ≥ t ≥ f	f > t > sf
Synthetischer Ester	f > sf > t	sf > f > t	sf > f > t
Natürlicher Ester	t > sf > f	sf > t > f	sf > t > f

Legende zu **Abbildung 7-33** und **Tabelle 7-5**:

t	trocken
f	feucht
sf	sehr feucht

### 7.5.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die drei Isolierflüssigkeiten Mineralöl, synthetischer und natürlicher Ester wurden bezüglich des Einflusses ihres Feuchtegehaltes auf die elektrostatische Aufladungsneigung erforscht. Bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage konnte kein klarer Trend der Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte nachgewiesen werden. Vergleichsmessungen mit einem *mini-static tester* zeigten das gleiche Verhalten für Mineralöl und natürlichen Ester. Einzig für synthetischen Ester schien die Aufladung mit steigender Feuchte zuzunehmen.

Feuchte wird in einem Leistungstransformator durch Alterung des Pressboards gebildet. Die entstehenden H<sub>2</sub>O-Moleküle stellen zusätzliche Verunreinigungen in der Isolierflüssigkeit dar, die den physikalisch-chemischen Prozess der Ladungsbildung verändern könnten, siehe **Kapitel 2.1.1** [Mor97] S. 688 – S. 689. Die Feuchtezunahme in der Isolierflüssigkeit durch Alterung wurde bei den praktischen Untersuchungen durch die Zugabe von entionisiertem Wasser simuliert. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Feuchte in der Isolierflüssigkeit und der Änderung der Aufladungsneigung konnte jedoch nicht festgestellt werden.

In der Vergangenheit wurde der Einfluss des Feuchtegehaltes der Isolierflüssigkeit auf die elektrostatische Aufladung für Mineralöl bereits intensiv untersucht. Die Untersuchungen verschiedener Forschungsinstitutionen ergaben jedoch auch häufig sehr unterschiedliche Ergebnisse. In [Oom88] S. 125 wird von Untersuchungen berichtet, bei denen mit einem *mini-static tester* die Aufladungsneigung von verschiedenen Isolierölen im Bereich von ca. 5 ppm bis 55 ppm vermessen wurde. Dabei wurde festgestellt, dass die Aufladungsneigung von Mineralöl mit zunehmender Feuchte abnimmt. In [Lem96] S. 97 sind Untersuchungen beschrieben, bei denen verschiedene Isolieröle im Bereich von 5 ppm bis 35 ppm auch mit einem *mini-static tester* vermessen wurden. Es ergab sich, wie bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage, keine generell gültige Tendenz des Aufladungsverhaltens als Funktion der Feuchte. Es wird berichtet, dass bei manchen Ölen kein Trend ersichtlich war, andere eine Zunahme und manche eine Abnahme der elektrostatischen Aufladungsneigung mit Zunahme der Feuchte im untersuchten Öl aufwiesen.

## 7.6 Elektrostatische Aufladungsneigung unter Hochspannungsbeanspruchung

Im vorliegenden Kapitel wird der Einfluss einer hohen Wechsellspannungsbeanspruchung auf die elektrostatische Aufladung behandelt. Dafür werden die Ergebnisse der Messungen in der Strömungsmodellanlage dargestellt und diskutiert. Die Ergebnisse stammen aus den Trockenversuchen, da diese den für die Praxis relevanten Fall darstellen. Die beschriebenen Trends haben allerdings auch für die Feuchtversuche Gültigkeit. Zum Schluss werden die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und diskutiert. Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Hochspannungsbeanspruchung auf die elektrostatische Aufladungsneigung von Mineralöl wurden in der Vergangenheit bereits durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Literatur werden im vorliegenden Kapitel mit den eigenen verglichen. Ziel dieses Vergleiches ist es einerseits die Ergebnisse für Mineralöl zu überprüfen und andererseits auch zu ermitteln, ob die bekannten Tendenzen nicht nur für Mineralöl, sondern generell für alle Isolierflüssigkeiten Gültigkeit besitzen.

### 7.6.1 Strom-Zeitverläufe bei Hochspannungsbeanspruchung

Für die Untersuchungen wurde der in **Abbildung 5-15** dargestellte Messaufbau eingesetzt. Nach einer bestimmten Durchströmungsdauer wurde das Modell mit Hochspannung beaufschlagt. Es wurde eine hohe Wechsellspannung von 2 kV an das erste Elektrodenpaar angelegt. Die Ableit-

ströme wurden am dritten und vierten Elektrodenpaar gemessen. Für die Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung wird im Folgenden der Ableitstrom des dritten Elektrodenpaares herangezogen. Wie in **Kapitel 6.5** beschrieben, wurden bei einer Messserie für jede Strömungsgeschwindigkeit zwei Ergebniswerte aus den Strom-Zeitverläufen der Ableitströme bestimmt. Diese sind:

- $I_{\text{vorHS}}$ : Ableitstrom vor Hochspannungsbeanspruchung
- $I_{2\text{kV}}$ : Ableitstrom bei Hochspannungsbeanspruchung

Um den Einfluss der elektrischen Spannungsbeanspruchung zu bewerten, wurde die absolute Ableitstromänderung zwischen den Zuständen  $I_{2\text{kV}}$  und  $I_{\text{vorHS}}$  laut **Gleichung 7-1** berechnet.

$$\Delta I_3 = |I_{2\text{kV}}| - |I_{\text{vorHS}}| \quad \text{in pA} \tag{Gleichung 7-1}$$

Weiters wurde auch die prozentuelle Abweichung des Ableitstromes unter Hochspannungsbeanspruchung  $I_{2\text{kV}}$  vom Ableitstrom vor der Hochspannungsbeanspruchung  $I_{\text{vorHS}}$  rechnerisch ermittelt, siehe **Gleichung 7-2**.

$$\Delta I_3 = \frac{100}{|I_{\text{vorHS}}|} \cdot (|I_{2\text{kV}}| - |I_{\text{vorHS}}|) \quad \text{in \%} \tag{Gleichung 7-2}$$

Wenn der Ableitstrom durch die Hochspannungsbeanspruchung betragsmäßig ansteigt, dann nimmt  $\Delta I_3$  in pA und in % einen positiven Wert an. Wenn der Ableitstrom durch die Hochspannungsbeanspruchung betragsmäßig abfällt, dann nimmt  $\Delta I_3$  in pA und in % einen negativen Wert an. Die bei den Untersuchungen aufgetretene Änderung des Ableitstromes  $\Delta I_3$  durch Hochspannungsbeanspruchung in pA und % ist für Transformerboard B 3.1A in **Tabelle 7-6** und für Nomex® 994 in **Tabelle 7-7** zusammengefasst.

Tabelle 7-6: Absolute und prozentuelle Änderung des Ableitstromes  $I_3$  durch die Hochspannungsbeanspruchung für die drei Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A

v	Mineralöl		Synthetischer Ester		Natürlicher Ester	
	$\Delta I_3$		$\Delta I_3$		$\Delta I_3$	
m/s	pA	%	pA	%	pA	%
0,5	-0,04	-1,39	-16,5	-2,95	-20,6	-3,25
1	-0,09	-1,95	-38,9	-2,32	-55,8	-2,45
2	-0,09	-1,18	-70,1	-1,69	-141,7	-2,13
2,5			-75,0	-1,42	-161,3	-1,84
4	-0,15	-1,13				

Tabelle 7-7: Absolute und prozentuelle Änderung des Ableitstromes  $I_3$  durch die Hochspannungsbeanspruchung für die drei Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Nomex® 994, \*Stromimpulse im Messsignal

v	Mineralöl		Synthetischer Ester		Natürlicher Ester	
	$\Delta I_3$		$\Delta I_3$		$\Delta I_3$	
m/s	pA	%	pA	%	pA	%
0,5	-0,016	-1,21	-22,3	-4,66	-19,5	-1,47
1	-0,001	-0,06	-108,9	-4,90	-29,3	-0,75
2	-0,014	-0,38	*		-81,3	-0,86
2,5			*		*	
4	-0,029	-0,47				

Die Diagramme in **Abbildung 7-34** bis **Abbildung 7-36** zeigen den Ableitstrom  $I_3$  bei den Untersuchungen unter Hochspannungsbeanspruchung für die drei Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A. **Abbildung 7-37** bis **Abbildung 7-39** zeigen den Ableitstrom  $I_3$  für die drei Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit Nomex® 994.

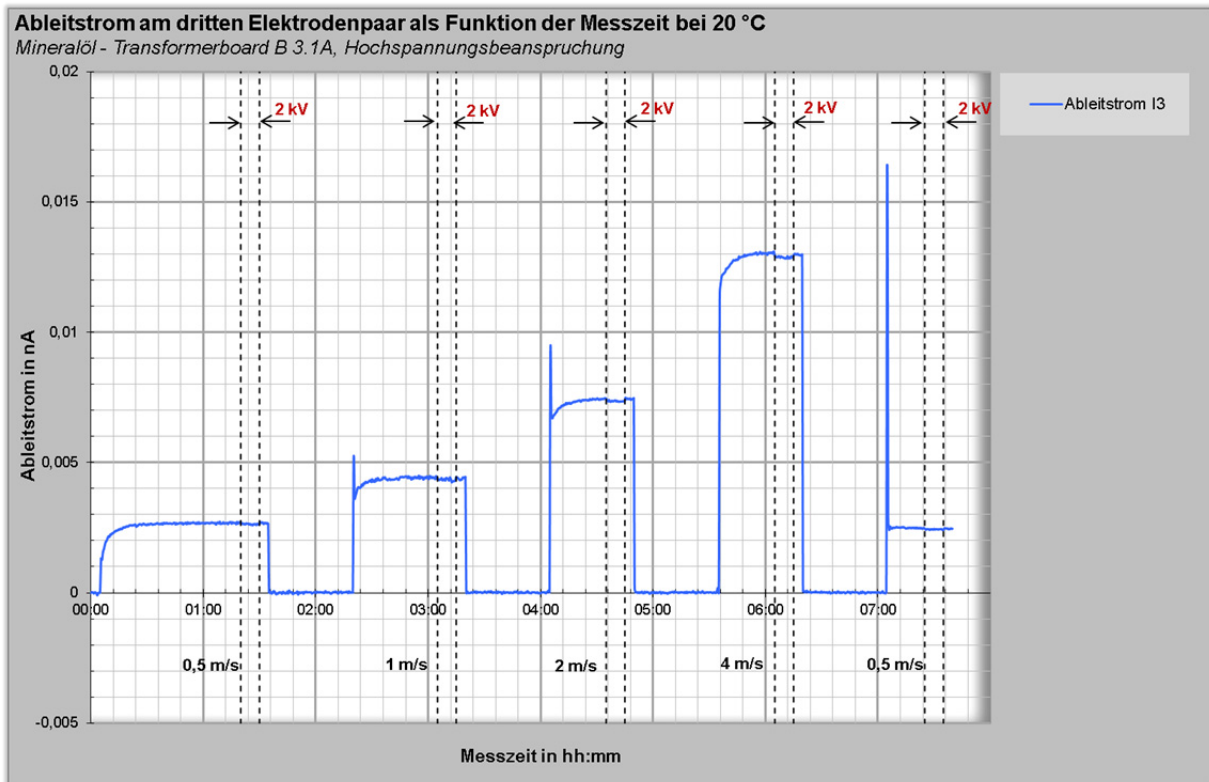


Abbildung 7-34: Strom-Zeitverlauf  $I_3$  für Mineralöl – Transformerboard B 3.1A bei 20 °C und Hochspannungsbeanspruchung

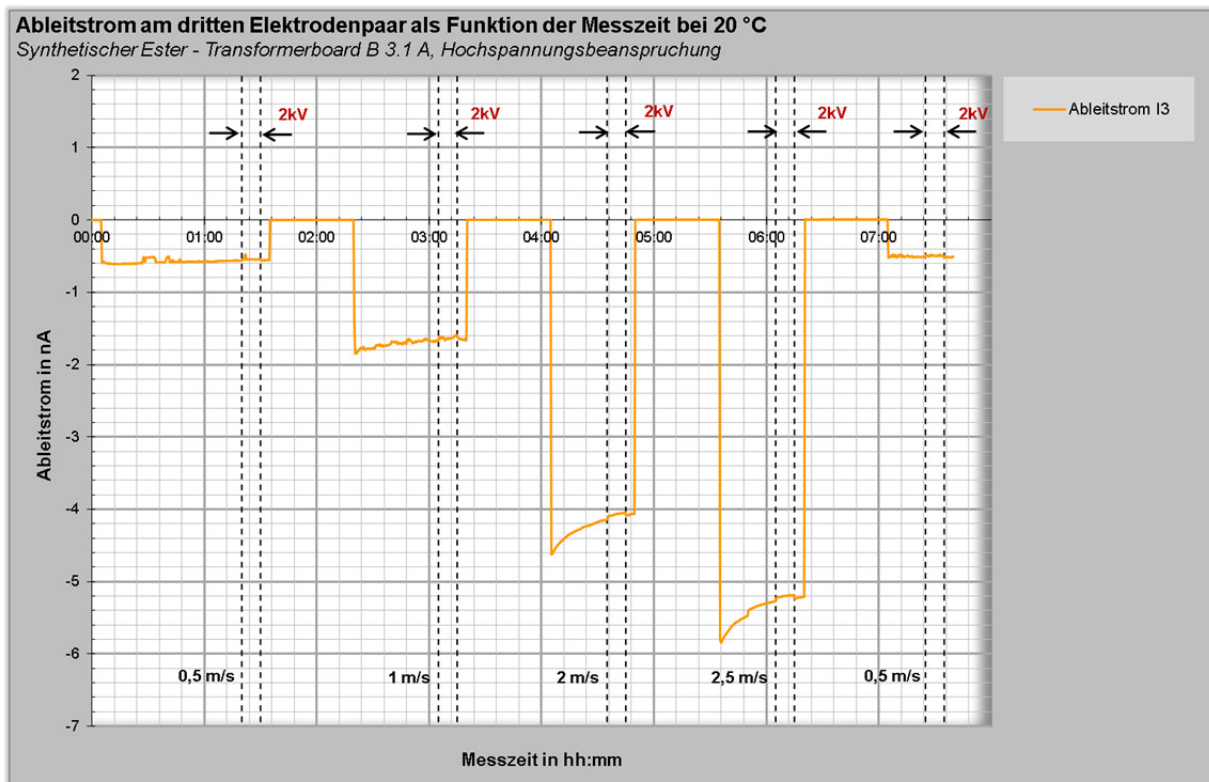


Abbildung 7-35: Strom-Zeitverlauf  $I_3$  für synthetischen Ester - Transformerboard B 3.1A bei 20 °C und Hochspannungsbeanspruchung

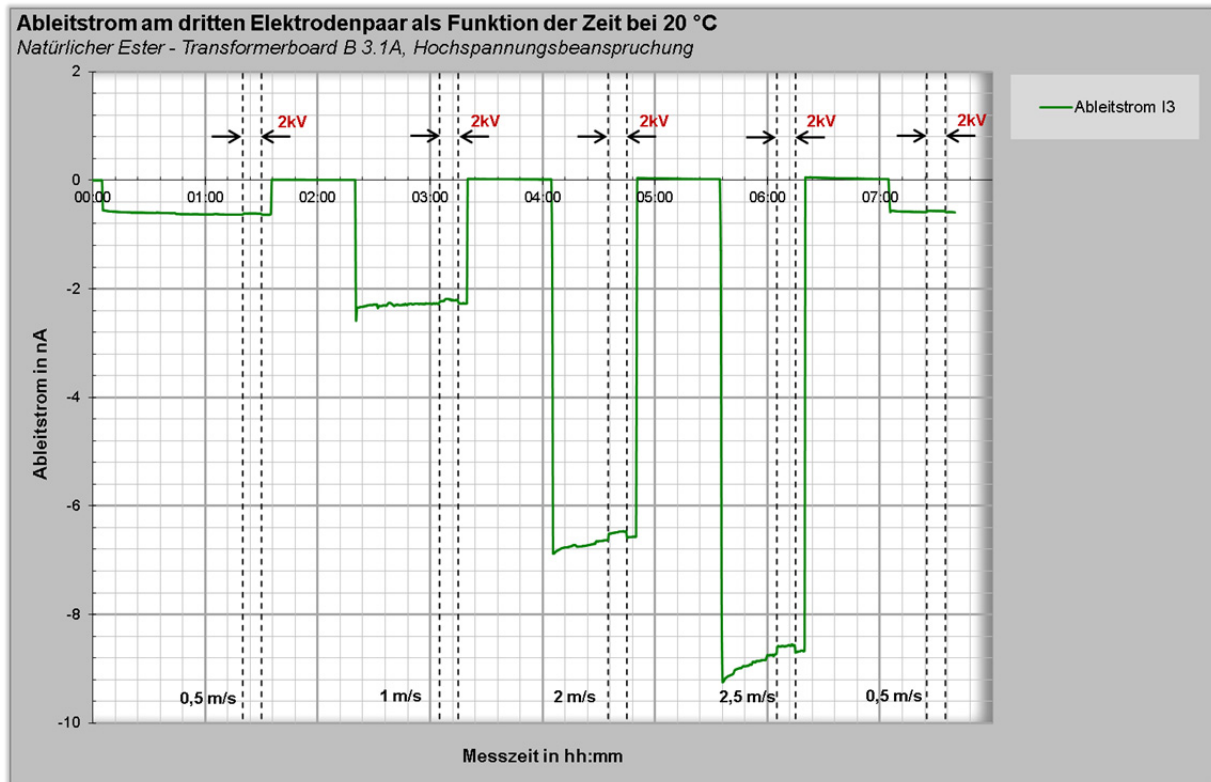


Abbildung 7-36: Strom-Zeitverlauf  $I_3$  für natürlichen Ester - Transformerboard B 3.1A bei 20 °C und Hochspannungsbeanspruchung

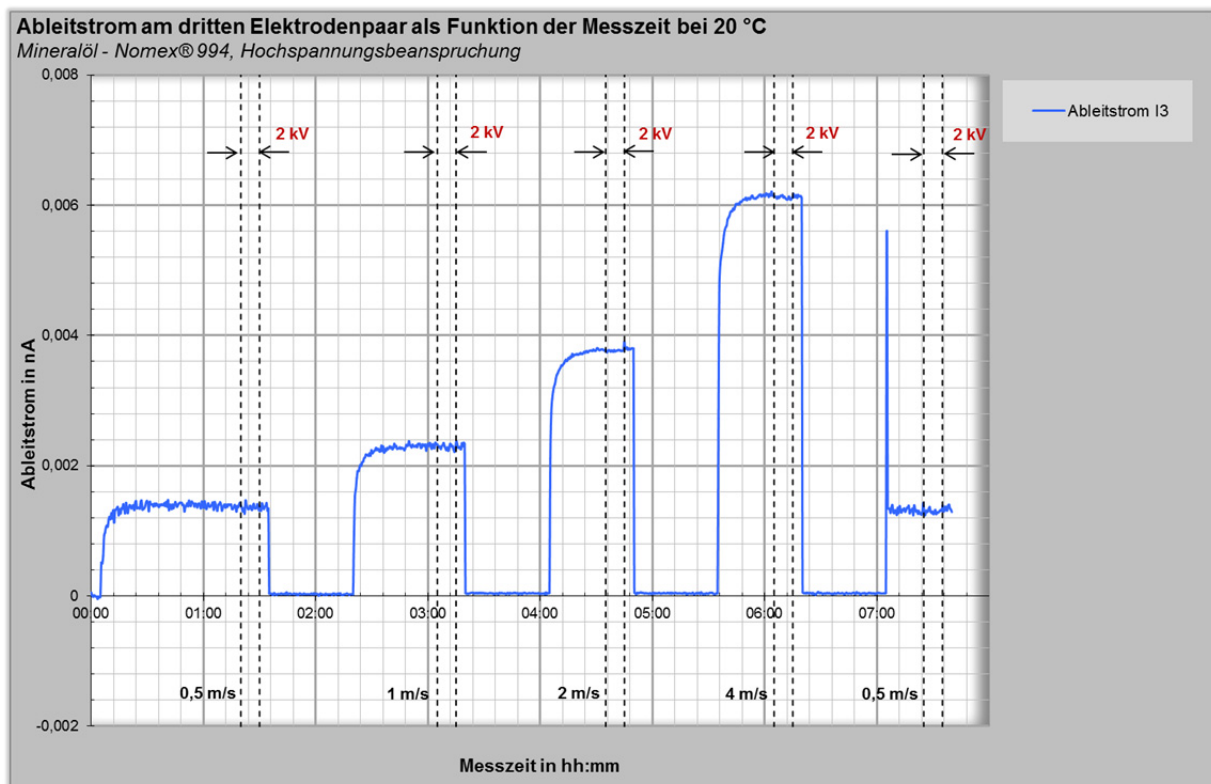


Abbildung 7-37: Strom-Zeitverlauf  $I_3$  für Mineralöl – Nomex® 994 bei 20 °C und Hochspannungsbeanspruchung

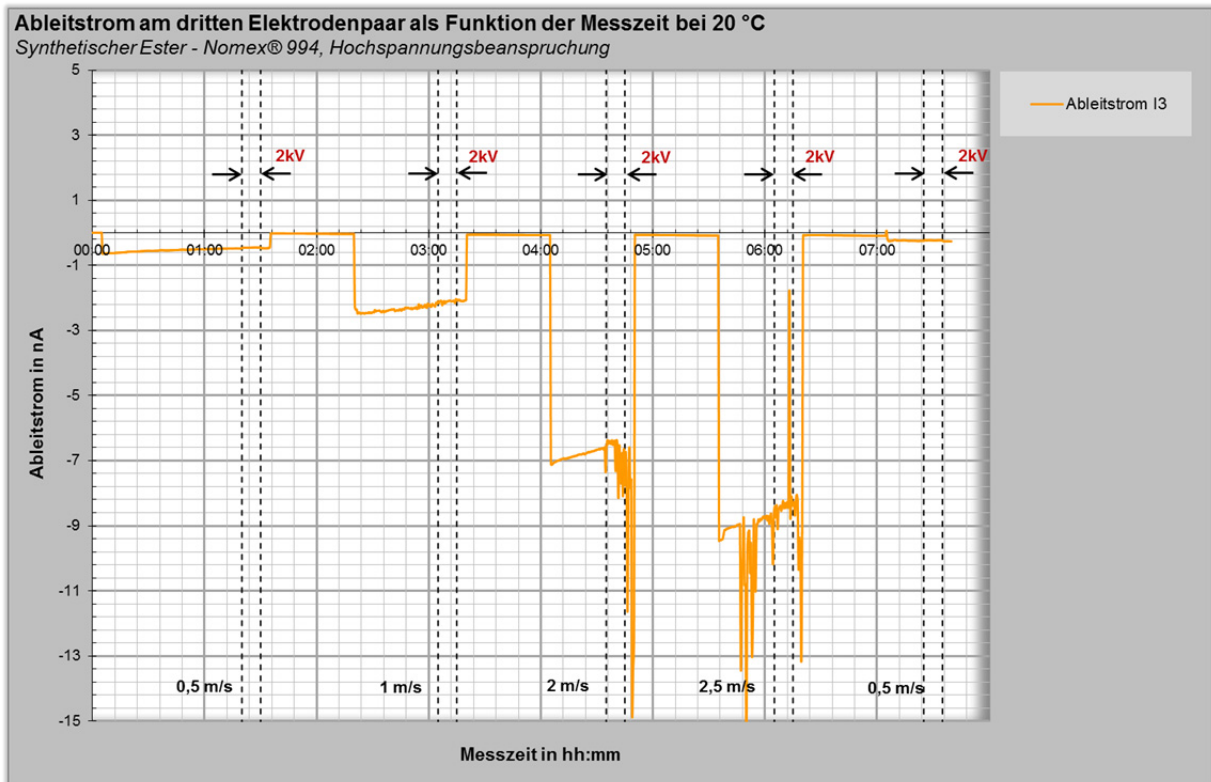


Abbildung 7-38: Strom-Zeitverlauf  $I_3$  für synthetischen Ester – Nomex® 994 bei 20 °C und Hochspannungsbeanspruchung

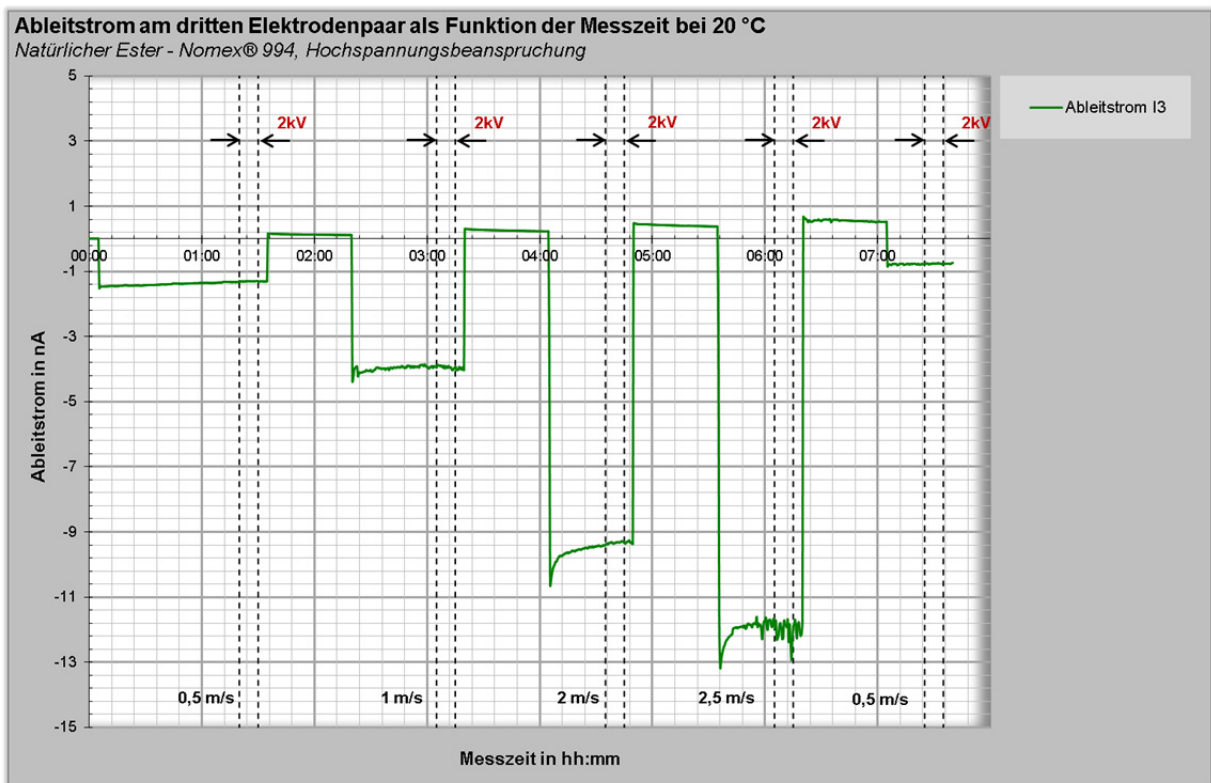


Abbildung 7-39: Strom-Zeitverlauf  $I_3$  für natürlichen Ester – Nomex® 994 bei 20 °C und Hochspannungsbeanspruchung

Im Folgenden wird das Verhalten der Ableitströme bei Hochspannungsbeanspruchung zuerst in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A und dann in Verbindung mit Nomex® 994 beschrieben.

### Transformerboard B 3.1A

Alle drei Isolierflüssigkeiten zeigen in Kombination mit Transformerboard B 3.1A grundsätzlich die gleichen Tendenzen beim Anlegen einer hohen Wechselspannung, siehe **Abbildung 7-34** bis **Abbildung 7-36** und **Tabelle 7-6**:

- Der Ableitstrom nimmt durch die Hochspannungsbeanspruchung ab. Bei einer Beanspruchung mit 2 kV ergibt sich eine maximale Absenkung des Ableitstromes  $I_3$  bei Mineralöl bis ca. 2 % und bei den Esterflüssigkeiten bis um die 3 % des Wertes vor der Beanspruchung. Die absolute Änderung des Ableitstromes  $I_3$  liegt bei Mineralöl im fA-Bereich. Für synthetischen Ester nimmt die absolute Änderung Werte von < 80 pA und für natürlichen Ester von < 170 pA an. Es ist noch einmal hervorzuheben, dass auch die Ableitströme generell bei Mineralöl deutlich niedriger sind als bei den Esterflüssigkeiten.
- Es ergibt sich mit höherer Strömungsgeschwindigkeit eine höhere, absolute Stromänderung durch Hochspannungsbeanspruchung.

### Nomex® 994

Das Verhalten der drei Isolierflüssigkeiten in Kombination mit Nomex® 994 bei Hochspannungsbeanspruchung ist aus den Diagrammen in **Abbildung 7-37** bis **Abbildung 7-39** und aus **Tabelle 7-7** ersichtlich:

- Die Untersuchungen unter hoher Wechselspannung waren für die Esterflüssigkeiten in Verbindung mit Nomex® schwierig, da die Ableitströme bei der wiederholten 20 °C-Messserie nach einer gewissen Durchströmungszeit bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten hohe Stromimpulse aufwiesen, die, wie bereits erwähnt, das Auftreten von Entladungen im Kanalinneren widerzuspiegeln scheinen. Wie aus **Abbildung 7-38** und **Abbildung 7-39** ersichtlich, treten die Stromimpulse unabhängig von der angelegten elektrischen Spannungsbeanspruchung auf. Sie scheinen durch die angelegte Spannung auch nicht verstärkt zu werden. Beim Auftreten von Stromimpulsen im Messsignal wurde die Ableitstromänderung in **Tabelle 7-7** nicht berechnet, da die Stromimpulse die Berechnung verfälscht hätten.
- Für Mineralöl in Verbindung mit Nomex® 994 nimmt der Ableitstrom bei Hochspannungsbeanspruchung ab. Es treten geringste Änderungen des Ableitstromes  $I_3$  auf. Wie aus **Tabelle 7-7** ersichtlich, besteht eine maximale Änderung von 0,029 pA bzw. bis zu ca. 1 % vom Wert vor der Hochspannungsbeanspruchung. Es muss angemerkt werden, dass die Ableitströme bei den Untersuchungen mit Mineralöl selbst auch sehr niedrig waren (< 10 pA). Auch für die Esterflüssigkeiten nimmt der Ableitstrom  $I_3$  bei Hochspannungsbeanspruchung ab. Betrachtet man nur die Strömungsgeschwindigkeiten, bei denen keine Stromimpulse auftraten, so gilt laut **Tabelle 7-7**, dass für synthetischen Ester (bis inklusive 1 m/s) die absolute Änderung der Ableitströme Werte von < 110 pA und bis zu ca. 5 % vom Wert vor der Hochspannungsbeanspruchung annimmt. Für natürlichen Ester (bis inklusive 2 m/s) treten Änderungen von < 90 pA und bis zu 1,5 % vom Wert vor der Hochspannungsbeanspruchung auf.
- Für die Esterflüssigkeiten ergibt sich mit steigender Strömungsgeschwindigkeit eine höhere, absolute Stromänderung durch Hochspannungsbeanspruchung. Für Mineralöl sind die geringen Änderungen des Ableitstromes im fA-Bereich schwerer detektierbar, wodurch sich nicht die gleiche klare Tendenz wie bei den Esterflüssigkeiten ergibt.



## 7.6.2 Zusammenfassung und Diskussion

Die Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage haben gezeigt, dass für alle drei Isolierflüssigkeiten in Kombination mit beiden Feststoffen die gleiche Reaktion auf die hohe Wechselspannungsbeanspruchung unter Elektrodenpaar 1 auftritt: Es kommt zu einer Absenkung des Ableitstromes  $I_3$ . Diese betrug bei den Untersuchungen maximal 5 % des Wertes vor der Hochspannungsbeanspruchung. Die Absenkung kann folgendermaßen interpretiert werden:

Die Wechselspannungsbeanspruchung an Elektrodenpaar 1 führt zu einer Erhöhung der Ladungsbildung an der flüssig/ festen Grenzfläche in diesem Bereich. Die Ladungen aus der diffusen Schicht unter Elektrodenpaar 1 werden durch die Flüssigkeitsströmung abtransportiert und bewirken unter Elektrodenpaar 3 durch die zusätzlich erzeugten Ladungen ein ausgebildeteres Raumladungsdichte  $\rho_w$  nahe der Wand ist somit höher. Entsprechend **Gleichung 2-50** ist dadurch die Wandstromdichte unter Elektrodenpaar 3 und somit der gemessene Ableitstrom an diesem Elektrodenpaar geringer.

In der Literatur wird generell beschrieben, dass für Mineralöl der elektrostatische Aufladestrom in der Flüssigkeit unter der Einwirkung eines elektrischen Wechselfeldes zunimmt [Sie94] S. 861. Somit passen obige Annahmen mit den in der Literatur dargestellten Tendenzen überein. Die Zunahme der Ladungserzeugung wird in [Lyo88] S. 169 – S. 170 durch eine Injektion von Ladungen von der flüssig/ festen Grenzfläche aus in die Flüssigkeit erklärt.

## 7.7 Elektrostatische Aufladungsneigung bei Entladespuren im Strömungskanal

Bei den Isoliermaterialpaaren Ester – Nomex® wurden nach den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage vermehrt Entladespuren an den Kanalinnenseiten entdeckt, siehe **Kapitel 7.3.3**. Im vorliegenden Kapitel wird der Einfluss dieser Entladespuren auf das elektrostatische Aufladungsverhalten in einem Strömungskanal behandelt.

Um den Einfluss von Entladespuren auf die elektrostatische Aufladung zu erforschen, wurde eine zusätzliche Untersuchung durchgeführt. Die Versuchsreihe mit trockenem, natürlichem Ester wurde wiederholt, siehe **Tabelle 6-7**. Bei dieser Wiederholungsmessung kam ein Modell zum Einsatz, das eine Entladespur im Kanalinneren aufwies. Die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen mit trockenem, natürlichem Ester wurden dann verglichen. Im Folgenden werden die bei den beiden Versuchsreihen eingesetzten Modelle mit Modell<sub>neu</sub> und Modell<sub>ES</sub> bezeichnet:

Modell<sub>neu</sub>: Dieses Modell war zu Beginn der Versuchsreihe frei von Entladespuren. Nach den Untersuchungen wurde eine kleine, punktförmige Entladespur zwischen Elektrodenpaar 3 und 4 gefunden.

Modell<sub>ES</sub>: Dieses Modell wies aufgrund vorhergehender Untersuchungen eine großflächig verzweigte Entladespur unter Elektrodenpaar 1 auf, siehe **Abbildung 7-20**.

### 7.7.1 Strom-Zeitverläufe bei Entladespuren im Kanalinneren

Die aufgezeichneten Strom-Zeitverläufe für Modell<sub>neu</sub> und Modell<sub>ES</sub> wurden bezüglich des Auftretens von Stromimpulsen, die mit Entladungen in Verbindung gebracht werden, und der Stromhöhe der Ableitströme analysiert.

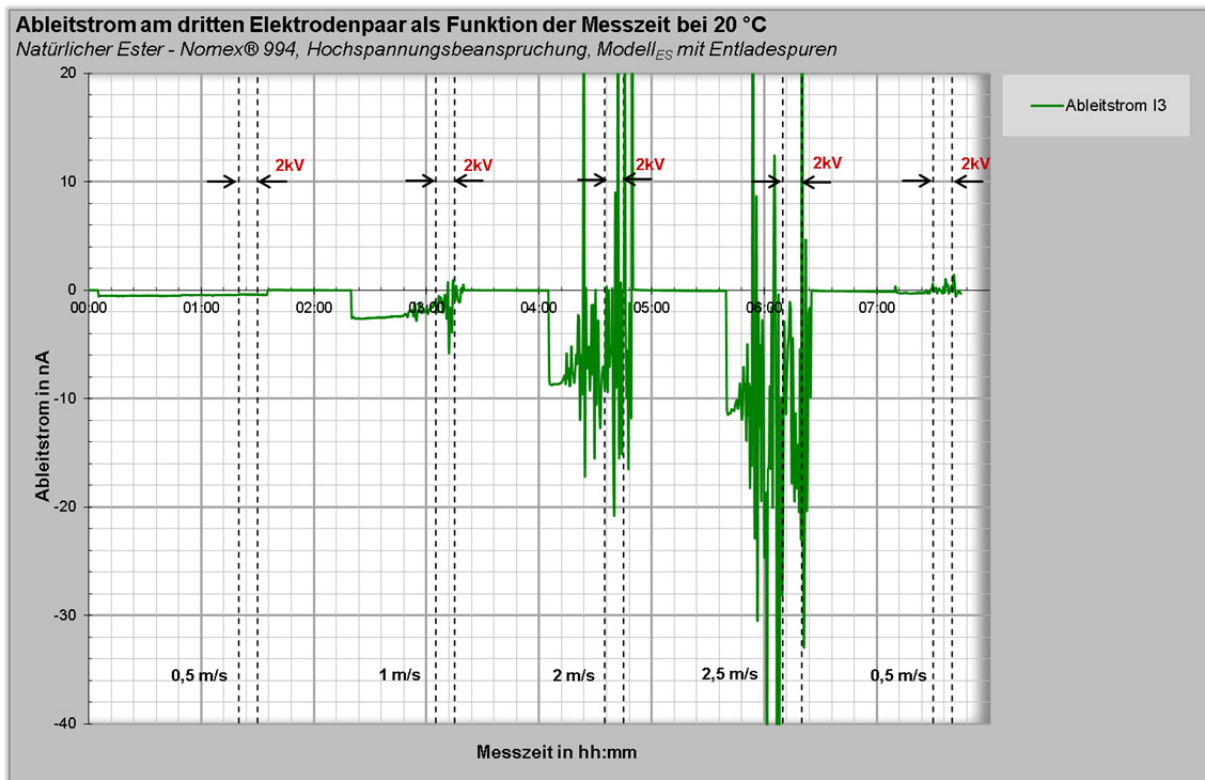
#### Stromimpulse

Der Einsatz von Impulsen im Strom-Zeitverlauf wurde in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturstufe für Modell<sub>neu</sub> und Modell<sub>ES</sub> näher betrachtet. Das Ergebnis dieser Analyse ist in **Tabelle 7-8** zusammengefasst. Daraus ist ersichtlich, dass beim Vorhandensein von Entladespuren im Modell die Impulse in den Stromkurven bereits ab niedrigeren Strömungsgeschwin-

digkeiten auftreten. Der Einsatz der Impulse bei niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten ist auch gut aus dem Vergleich der Strom-Zeitverläufe für  $I_3$  von Modell<sub>neu</sub> in **Abbildung 7-39** und Modell<sub>ES</sub> in **Abbildung 7-40** bei der wiederholten 20 °C- Messserie am Ende der Versuchsreihe erkennbar. Aus den Diagrammen ist auch ersichtlich, dass die Impulse bei Modell<sub>ES</sub> in **Abbildung 7-40** deutlich intensiver und höher sind.

Tabelle 7-8: Auftreten von Stromimpulsen

	Modell <sub>neu</sub>	Modell <sub>ES</sub>
MS20	2,5 m/s ( $I_3$ )	ab 1 m/s ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ )
MS60	-	ab 4 m/s ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ )
MS90	2,5 m/s ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ )	ab 2 m/s ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ )
MS20_U	2,5 m/s ( $I_3, I_4$ )	ab 1 m/s ( $I_3, I_4$ )

Abbildung 7-40: Strom-Zeitverlauf von  $I_3$  bei der wiederholten 20 °C-Messserie mit Modell<sub>ES</sub>

### Höhe der Ableitströme

Der Vergleich der Höhe der Ableitströme von Modell<sub>neu</sub> und Modell<sub>ES</sub> – vor Einsatz der Impulse – ermöglicht keine Zuordnung, dass eines der beiden Modelle generell bei allen Temperaturstufen eine höhere elektrostatische Aufladungsneigung aufweist.

Beim Modell mit Entladespuren zeigte sich im Gegensatz zum Modell ohne Entladespuren eine spezielle Erscheinung, die in **Abbildung 7-41** dargestellt ist. Die Abbildung zeigt die Ableitströme aller vier Elektrodenpaare bei der 20 °C- Messserie mit Modell<sub>ES</sub>. Nach einer bestimmten Durchströmungszeit bei 1 m/s und auch bei 2 m/s treten die bereits beschriebenen Stromimpulse in allen Ableitströmen auf. Gleichzeitig steigt Ableitstrom  $I_1$  plötzlich stark an und die Ableitströme der übrigen Elektrodenpaare fallen gleichzeitig ab. Aufgrund der hohen Stromimpulse wurde auf die Vermessung von noch höheren Strömungsgeschwindigkeiten bei dieser Messserie verzichtet.

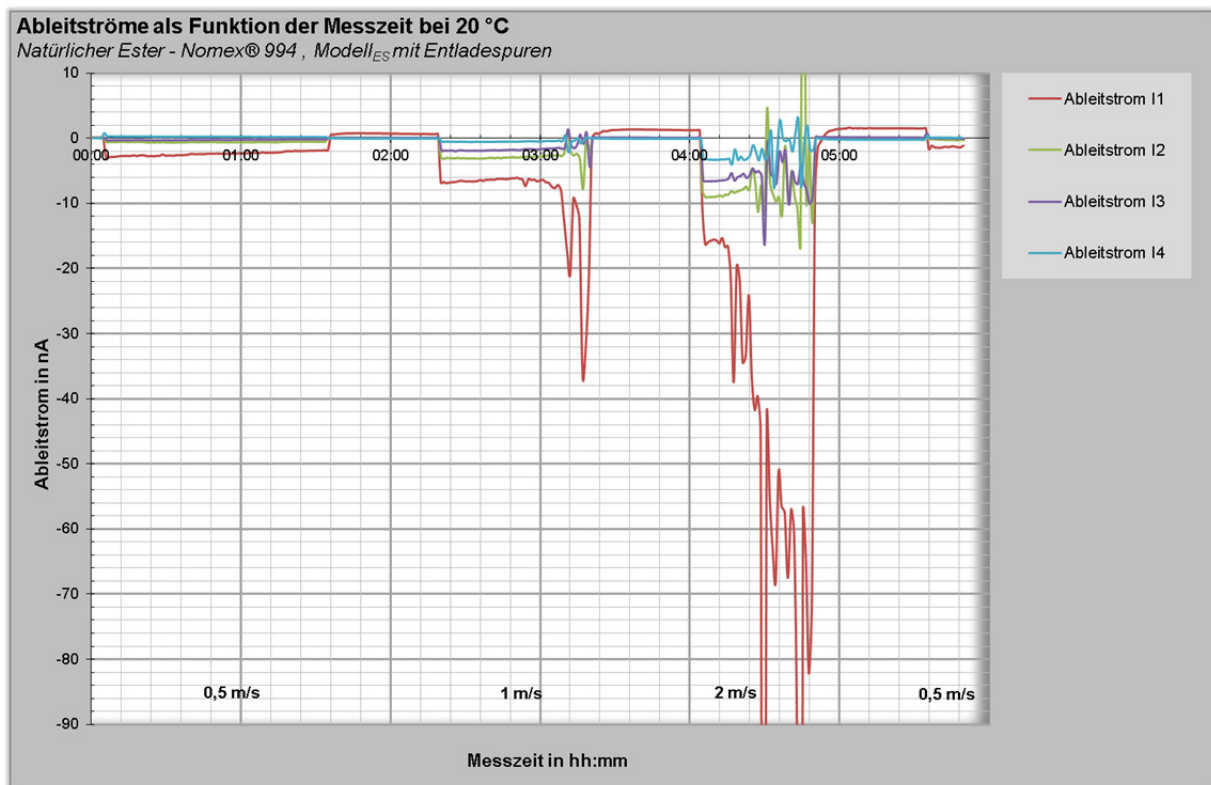


Abbildung 7-41: Strom-Zeitverlauf aller Ableitströme bei der 20 °C-Messserie mit Modell<sub>ES</sub>

### 7.7.2 Zusammenfassung und Diskussion

Die Untersuchungen mit Nomex®-Modellen mit und ohne Entladespuren im Kanalinneren haben gezeigt, dass beim geschädigten Modell Impulse in den Strom-Zeitverläufen bereits ab niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Weiters treten die Impulse mit höherer Intensität auf. Wie bereits beschrieben werden diese Impulse mit Entladungen in Zusammenhang gebracht. Es ist anzunehmen, dass die verstärkte Entladungstätigkeit beim Modell mit Entladespuren darauf zurückzuführen ist, dass die Entladespur die elektrische Festigkeit örtlich herabsetzt. Dadurch kommt es bereits bei einer geringeren Ladungsansammlungen bzw. einem niedrigeren elektrischen Potential zu Entladungserscheinungen. Dieses Erkenntnis könnte bei einer Ableitstrommessung an einem realen Transformator von Nutzen sein. Man könnte die Ableitströme der Wicklungen bei reinem Pumpenbetrieb in bestimmten Zeitabständen messen. Wenn sich über die Messungen zeigt, dass Stromimpulse bei immer niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten auftreten und auch deren Intensität ansteigt, könnte dies auf entstandene Schäden und ein mögliches Gefahrenpotential hinweisen.

Beim Modell mit Entladespuren wurde beobachtet, dass der Ableitstrom  $I_1$  plötzlich ansteigt und die übrigen Messströme abfallen. Diese Erscheinung könnte folgendermaßen interpretiert werden:

Die Strömung der Isolierflüssigkeit bewirkt eine zunehmende Ladungsansammlung an der Feststoffoberfläche, die das Potential stetig anhebt. Durch die Entladespur unter Elektrodenpaar 1 ist die elektrische Festigkeit örtlich stark herabgesetzt und es treten beim Erreichen der Durchschlagfeldstärke stetige Entladungen auf, die im Bereich der Entladespur unter Elektrodenpaar 1 die Ladungserzeugung erhöhen. Der Anstieg der Ladungserzeugung könnte durch die erhöhte Temperatur aufgrund der Entladungen bewirkt werden. Dies verursacht einerseits einen Anstieg der Wandstromdichte unter Elektrodenpaar 1 und somit einen Anstieg des Ableitstromes  $I_1$ . Andererseits steigt durch die höhere Ladungserzeugung auch die Raumladungsdichte in der Flüssigkeit an,

wodurch die Ableitströme der übrigen in Strömungsrichtung dahinter liegenden Elektrodenpaare abfallen, siehe **Gleichung 2-50**.

Es ist anzunehmen, dass obige Erscheinung auch beim Modell ohne Entladespuren aufgetreten wäre, wenn durch weitere Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit sehr intensive, kontinuierliche Entladungen eingesetzt hätten. Die Untersuchungen mit Modellen mit und ohne Entladespuren scheinen darauf hinzuweisen, dass intensive Entladungsercheinungen eine Erhöhung der Ladungserzeugung im betroffenen Bereich bewirken. Eine höhere Ladungserzeugung durch die Entladespur selbst – ohne dem Auftreten der Entladungen - konnte jedoch nicht für alle Temperaturstufen durchgehend nachgewiesen werden.

## 7.8 Zusatzbetrachtung: Druckverlust an einem Strömungskanal bei verschiedenen Isolierflüssigkeiten

Eine Größe, die bezüglich elektrostatischer Aufladung weniger relevant ist, jedoch beim Einsatz alternativer Isolierflüssigkeiten in Leistungstransformatoren eine wichtige Rolle spielt, ist der Druckverlust in einem Kühlkanal. Die Drücke in der Strömungsmodellanlage wurden bei allen Untersuchungen miterfasst, um die Druckbelastung des Modells zu überwachen. Der Druckabfall am Modell laut Messung ist im Folgenden dargestellt. Danach wird der über die Messung bestimmte Druckverlust mit berechneten Werten verglichen. Zum Schluss werden die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert.

### 7.8.1 Druckverlust am Strömungsmodell entsprechend Messung

In der Strömungsmodellanlage wurden der Druck  $p_1$  in Ladungsabscheider 1 und der Druck  $p_2$  in Ladungsabscheider 2 gemessen, siehe **Abbildung 5-10**. Es wurde der Differenzdruck  $\Delta p_{12}$  zwischen den beiden Ladungsabscheidern laut **Gleichung 7-3** berechnet.  $\Delta p_{12}$  beinhaltet neben dem Druckverlust an der gesamten Kanalstrecke  $\Delta p_K$  (alle Bestandteile mit Kanalquerschnitt von 5 mm x 80 mm) auch den Druckverlust an verschiedenen Armaturen  $\Delta p_{A\text{ ges}}$  (4"- Kugelhähne, Faltenbalg, 2" und 4" Rohrstücke, Verengungen und Erweiterungen, siehe **Abbildung 5-1**).

$$\Delta p_{12} = p_1 - p_2 = \Delta p_K + \Delta p_{A\text{ ges}} \quad \text{Gleichung 7-3}$$

Der gesamte Druckverlust an den Armaturen  $\Delta p_{A\text{ ges}}$  zwischen den Ladungsabscheidern ergibt sich laut **Gleichung 7-4** aus der Summe der Druckverluste an den 2" Armaturen  $\Delta p_{A\text{ 2"}}$  und an den 4" Armaturen  $\Delta p_{A\text{ 4"}}$ .

$$\Delta p_{A\text{ ges}} = \Delta p_{A\text{ 2"}} + \Delta p_{A\text{ 4"}} \quad \text{Gleichung 7-4}$$

Legende zu **Gleichung 7-3** und **Gleichung 7-4**:

$\Delta p_{12}$	Druckverlust zwischen den Ladungsabscheidern in bar
$p_1$	Druck in Ladungsabscheider 1 in bar
$p_2$	Druck in Ladungsabscheider 2 in bar
$\Delta p_K$	Druckverlust an der Kanalstrecke in bar
$\Delta p_{A\text{ ges}}$	Druckverlust an Armaturen zwischen Ladungsabscheider 1 und 2 in bar
$\Delta p_{A\text{ 2"}}$	Druckverlust an Armaturen mit einem 2" Querschnitt zwischen Ladungsabscheider 1 und 2 in bar
$\Delta p_{A\text{ 4"}}$	Druckverlust an Armaturen mit einem 4" Querschnitt zwischen Ladungsabscheider 1 und 2 in bar

Der Druckverlust an den Armaturen eines Querschnittes  $\Delta p_A$  wurde allgemein gemäß **Gleichung 7-5** laut [Sch07] S. 257 berechnet. Der erste Teil von **Gleichung 7-5** beschreibt den aufgrund des Reibungswiderstandes an der Rohrwand entstehenden Druckverlust. Der zweite Teil der Gleichung beschreibt die zusätzlichen Druckverluste durch Rohreinbauten [Sch07] S. 254. Die Widerstandsbeiwerte  $\zeta_u$  für die Berechnung dieser Zusatzverluste wurden laut den Tabellen in [Sch07] S. 255 und 256 für die verschiedenen Rohreinbauten (Kugelhähne, Faltenbalg usw.) gewählt.

$$\Delta p_A = \left( \underbrace{\lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2}_{\text{Wandreibung}} + \underbrace{\sum \zeta_u \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2}_{\text{Rohreinbauten}} \right) \cdot 10^{-5} \quad \text{Gleichung 7-5}$$

Legende zu **Gleichung 7-5**:

$\Delta p_A$	Druckverlust an Armaturen in bar
$\lambda$	Reibungszahl; abhängig von Strömungsform
$l$	Länge des Rohres in m
$d$	Rohrdurchmesser in m
$\rho$	Dichte der Isolierflüssigkeit in $\text{kg/m}^3$
$v$	mittlere Geschwindigkeit der Isolierflüssigkeit in m/s
$\zeta_u$	Widerstandsbeiwert durch Rohreinbauten

Der Druckverlust an den Armaturen  $\Delta p_{A \text{ ges}}$  wurde vom Druckverlust  $\Delta p_{12}$  zwischen den Ladungsabscheidern subtrahiert, um den Druckverlust an der Kanalstrecke  $\Delta p_K$  zu erhalten. Es zeigte sich, dass  $\Delta p_{A \text{ ges}}$  vernachlässigbar kleine Werte annimmt, sodass  $\Delta p_K$  annähernd  $\Delta p_{12}$  entspricht.

$$\Delta p_K = \Delta p_{12} - \Delta p_{A \text{ ges}} \quad \text{Gleichung 7-6}$$

$$\Delta p_{12} \gg \Delta p_{A \text{ ges}} \rightarrow \Delta p_K \approx \Delta p_{12}$$

Die gesamte Strecke mit Kanalquerschnitt besitzt eine Länge von 2,295 m. Sie beinhaltet neben dem Modell und der Beruhigungsstrecke auch die Teflonscheiben zwischen dem Modell und dem metallischen System, siehe **Abbildung 5-12**, und die metallischen Flanschanschlüsse zum Modell und zur Beruhigungsstrecke hin. Aus dem Druckverlust an der gesamten Kanalstrecke wurde der Druckverlust am Strömungsmodell mit der Länge von 1,245 m laut **Gleichung 7-7** berechnet. Der Druckverlust am Strömungsmodell wurde für alle drei Isolierflüssigkeiten bei den drei Systemtemperaturen berechnet und ist in **Abbildung 7-42** dargestellt.

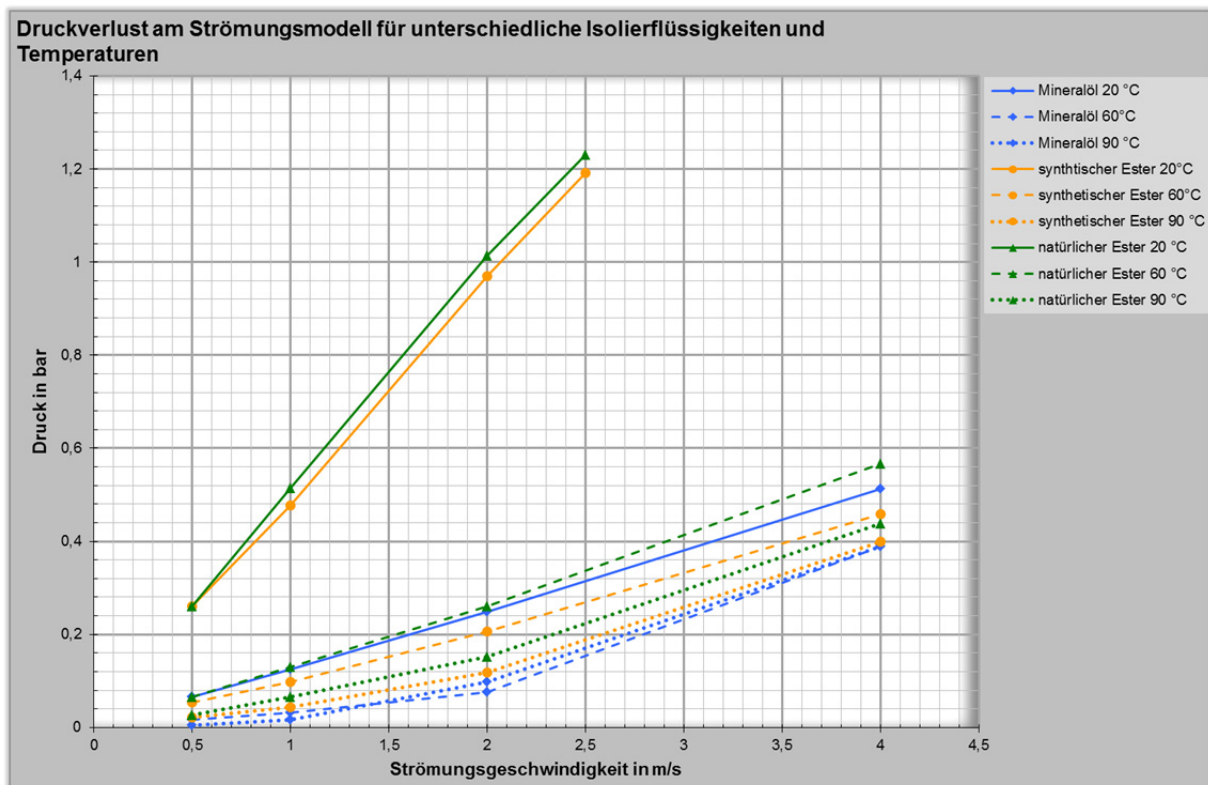


Abbildung 7-42: Druckverlust am Modell für verschiedene Isolierflüssigkeiten und Temperaturen, laut Messwerten

$$\Delta p_{SM\_Messung} = \Delta p_K \cdot \frac{1,245 \text{ m}}{2,295 \text{ m}} \quad \text{Gleichung 7-7}$$

Legende zu **Gleichung 7-6** und **Gleichung 7-7**:

- $\Delta p_K$  Druckverlust an Kanalstrecke in bar
- $\Delta p_{12}$  Druckverlust zwischen den Ladungsabscheidern in bar
- $\Delta p_{A\_ges}$  Druckverlust an Armaturen zwischen Ladungsabscheider 1 und 2 in bar
- $\Delta p_{SM\_Messung}$  Druckverlust an Strömungsmodell laut Messung in bar

Aus **Abbildung 7-42** ist ersichtlich, dass sich für die Esterflüssigkeiten beim Durchströmen der Modelle weitaus höhere Druckverluste ergeben als für Mineralöl, insbesondere bei einer Temperatur von 20 °C. Der Grund dafür liegt in der höheren Viskosität der Esterflüssigkeiten.

### 7.8.2 Druckverlust am Strömungsmodell entsprechend Berechnung

Vor der Herstellung der Strömungsmodelle musste der Druckverlust an einem Strömungsmodell rechnerisch ermittelt werden, um die Modelle entsprechend den Anforderungen in der Strömungsmodellanlage zu dimensionieren. Die Berechnung des Druckverlustes an einem Strömungsmodell  $\Delta p_{SM\_Rechnung}$  wurde laut **Gleichung 7-8** ([Sch07] S. 249) durchgeführt. In der Gleichung wird der hydraulische Durchmesser  $d_h = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  (siehe Berechnung in **Kapitel 5.1**) für den rechteckigen Strömungskanal eingesetzt.

$$\Delta p_{SM\_Rechnung} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \right) \cdot 10^{-5} \quad \text{Gleichung 7-8}$$

Legende zu **Gleichung 7-8**:

- $\Delta p_{SM\_Rechnung}$  berechneter Druckverlust am Strömungsmodell in bar
- $\lambda$  Reibungszahl; abhängig von Strömungsform
- $l$  Länge des Rohres in m
- $d_h$  hydraulischer Durchmesser in m
- $\rho$  Dichte der Isolierflüssigkeit in  $\text{kg/m}^3$
- $v$  mittlere Geschwindigkeit der Isolierflüssigkeit in m/s

Der aus den Messwerten  $p_1$  und  $p_2$  ermittelte Druckverlust  $\Delta p_{SM\_Messung}$  aus dem vorhergehenden Kapitel wird mit dem Berechnungswert  $\Delta p_{SM\_Rechnung}$  in **Tabelle 7-9** für die drei Isolierflüssigkeiten beispielhaft bei 20 °C verglichen. Die aus den Messwerten ermittelten Druckverluste am Modell und die mittels **Gleichung 7-8** berechneten Werte stimmen gut überein. Der maximale Druckverlust bei den Untersuchungen ergibt sich, wie auch aus **Abbildung 7-42** ersichtlich, für natürlichen Ester bei 20 °C und 2,5 m/s. Die Berechnung ergab dabei einen Druckverlust von ca. 1,2 bar, siehe **Tabelle 7-9**. Eine Dimensionierung der Strömungsmodelle unter Einhaltung eines Sicherheitsabstandes war bis ca. 1,5 bar notwendig.

Tabelle 7-9: Vergleich des Druckverlustes am Modell laut Messung und Berechnung bei 20 °C

v m/s	Druckverlust $\Delta p_{SM}$ am Strömungsmodell					
	bar					
	Mineralöl		Synthetischer Ester		Natürlicher Ester	
	Messung	Berechnung	Messung	Berechnung	Messung	Berechnung
0,5	0,07	0,05	0,26	0,21	0,26	0,24
1	0,12	0,11	0,48	0,43	0,51	0,49
2	0,25	0,21	0,97	0,85	1,01	0,98
4	0,51	0,43	1,19	1,07	1,23	1,22

### **7.8.3 Zusammenfassung und Diskussion**

Die berechneten und gemessenen Werte für den Druckverlust am Strömungsmodell passen gut überein. Dies bestätigt die gemessenen Druckwerte.

Die Betrachtung des Druckverlustes am Strömungsmodell zeigt, dass sich für die Esterflüssigkeiten insbesondere bei 20 °C deutlich höhere Druckverluste ergeben als bei Mineralöl. Dies ist auf die höhere Viskosität dieser Flüssigkeiten zurückzuführen. Der höhere Druckverlust ist bei der Auslegung eines Leistungstransformators unter anderem bei der Wahl der eingesetzten Umwälzpumpen zu beachten.

## 8 RESÜMEE

Heutzutage besteht der Trend das konventionell für Isolier- und Kühlzwecke in Transformatoren eingesetzte Mineralöl durch alternative, biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten zu ersetzen. Bevor dies in großen Hochspannungsleistungstransformatoren möglich ist, müssen die Eigenschaften dieser Flüssigkeiten genau bekannt sein. Dazu zählt auch die Kenntnis ihres elektrostatischen Aufladungsverhaltens [Per09]. Elektrostatische Aufladung hat in der Vergangenheit zu zahlreichen Schäden in Leistungstransformatoren geführt [CIG00] S. 6.

Ziel der vorliegenden Dissertation war es die elektrostatische Aufladungsneigung und das Aufladungsverhalten von alternativen Isoliersystemen und von Isoliersystemen mit Mineralöl zu bestimmen und zu vergleichen, um ein mögliches Risiko beim Einsatz der alternativen Isoliersysteme in Leistungstransformatoren abzuschätzen. Dazu wurden folgende Isoliermaterialpaare untersucht:

Mineralöl – Transformerboard B 3.1A	Mineralöl – Nomex® 994
Synthetischer Ester – Transformerboard B 3.1A	Synthetischer Ester – Nomex® 994
Natürlicher Ester – Transformerboard B 3.1A	Natürlicher Ester – Nomex® 994

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eigens die sogenannte Strömungsmodellanlage gebaut. In dieser Prüfanlage wird ein Modell aus dem festen Isolierstoff, das einen Kühlkanal in einem Transformator nachbildet, von der zu untersuchenden Isolierflüssigkeit durchströmt. Dadurch tritt elektrostatische Aufladung auf. Das Maß der Ladungserzeugung an der flüssig/ festen Grenzfläche wurde über Ableitströme beurteilt, die zwischen dem Modell und Erde fließen. Die Ergebnisse der Aufladungsuntersuchungen an den sechs Isoliermaterialpaaren sind im Folgenden zusammengefasst:

### Elektrostatische Aufladungsneigung verschiedener Isolierflüssigkeiten

Der Vergleich der drei Isolierflüssigkeiten Mineralöl, synthetischer und natürlicher Ester ergab in Verbindung mit beiden Feststoffen dieselben Tendenzen. Es zeigte sich, dass grundsätzlich das Mineralöl die niedrigste Aufladungsneigung aufweist. Zusatzmessungen mit anderen Prüfaufbauten bestätigten dieses Ergebnis. Die Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage ließen jedoch keine klare Tendenz erkennen, dass eine der beiden Esterflüssigkeiten eine höhere elektrostatische Aufladungsneigung besitzt. In der Literatur [Zel11] S. 3 dokumentierte Untersuchungen weisen auch darauf hin, dass grundsätzlich keine generelle Aussage möglich ist, dass natürlicher oder synthetischer Ester eine höhere Aufladungsneigung hat. Dies kann sich mit den Flüssigkeitsparametern (z.B. der Temperatur) ändern und scheint auch vom Hersteller abzuhängen.

In der Literatur [Zel11] S. 3 werden verschiedene mögliche Begründungen für die deutlich höhere elektrostatische Aufladungsneigung der Esterflüssigkeiten im Vergleich zu jener von Mineralöl angeführt. Einerseits ist es wahrscheinlich, dass der physikalisch-chemische Prozess an der flüssig/ festen Grenzfläche aufgrund der unterschiedlichen chemischen Struktur von Mineralöl und Esterflüssigkeiten verschieden ist und somit zu einem unterschiedlichen Maß der Ladungserzeugung führt. Andererseits könnten auch andere Eigenschaften, wie die höhere Viskosität der Esterflüssigkeiten, eine wichtige Rolle bei der Ladungserzeugung spielen. Weitere Grundlagenforschung ist in diesem Bereich notwendig, um genauere Aussagen treffen zu können.



### Elektrostatische Aufladungsneigung verschiedener Feststoffe

Die Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage ergaben, dass in Verbindung mit Mineralöl Transformerboard B 3.1A in den meisten Fällen eine höhere Aufladungsneigung als Nomex® 994 besitzt. In Verbindung mit den Esterflüssigkeiten weist generell Nomex® eine höhere Aufladungsneigung als Transformerboard B 3.1A auf.

Die Oberfläche von Transformerboard B 3.1A besitzt aufgrund seiner Siebstruktur eine höhere Welligkeit als die Oberfläche von Nomex® 994. Zusatzuntersuchungen mit einer *spinning disc* zeigten, dass die beschriebenen Tendenzen auch im umgekehrten Fall d.h. bei einer höheren Welligkeit von Nomex® gültig sind. Auch eine geringfügig höhere Rauheit von Nomex® gegenüber Transformerboard änderte nichts an den festgestellten Tendenzen. Es scheint, dass im betrachteten Bereich von Welligkeit und Rauheit die Oberflächenstruktur der Feststoffe eine untergeordnete Rolle spielt. Die elektrostatische Aufladungsneigung wird somit vor allem durch den unterschiedlichen chemischen Aufbau der beiden Feststoffe bestimmt.

Die Untersuchungen haben weiters gezeigt, dass beim Einsatz von Nomex® in Verbindung mit Esterflüssigkeiten grundsätzlich erhöhte Vorsicht und daher ein entsprechendes Design notwendig sind. Dafür sprechen folgende Faktoren:

- Die Esterflüssigkeiten besitzen in Verbindung mit Nomex® 994 eine höhere Aufladungsneigung als in Verbindung mit Transformerboard B. 3.1A. Dies bedeutet sie weisen eine höhere Ladungserzeugung auf. Nomex® hat weiters einen höheren spezifischen Widerstand als Transformerboard wodurch auch eine höhere Ladungsansammlung zu erwarten ist. Dies wurde durch Zusatzmessungen mit einem Elektrofeldmeter besonders für höhere Strömungsgeschwindigkeiten deutlich nachgewiesen.
- Bei der Untersuchung der Esterflüssigkeiten waren Impulse in den Ableitströmen zu beobachten. Diese scheinen einen Hinweis auf das Auftreten von Entladungen zu geben. Diese Impulse waren beim Isoliermaterialpaaren Ester - Transformerboard nur bei der höchsten Temperaturstufe und höheren Strömungsgeschwindigkeiten (90 °C, ab 2 m/s oder 4 m/s) beobachtet worden. Für die Isoliermaterialpaare Ester - Nomex® traten die Impulse bei allen Temperaturstufen für mittlere bis hohe Strömungsgeschwindigkeiten (ab 1 m/s, 2 m/s, 2,5 m/s oder 4 m/s) auf. Dies weist darauf hin, dass Nomex® in Verbindung mit Esterflüssigkeiten bereits bei geringeren Beanspruchungen von Entladungserscheinungen betroffen ist.
- Nach den Untersuchungen mit den Esterflüssigkeiten wurden Entladespuren am Nomex®-Modell gefunden, die für die Isoliersysteme Mineralöl - Transformerboard, Ester - Transformerboard und Mineralöl - Nomex® nicht nachweisbar waren.

### Elektrostatische Aufladungsneigung bei unterschiedlichen Strömungsformen

Die Analyse der elektrostatischen Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Strömungsform der Isolierflüssigkeit zeigt für alle drei Isolierflüssigkeiten sehr ähnliche Tendenzen. Diese Tendenzen stimmen auch generell sehr gut mit dem in der Literatur für Mineralöl beschriebenen Verhalten überein:

- Bei laminarer Strömung zeigt sich für alle drei Isolierflüssigkeiten ein deutlich schwächerer Anstieg der Ableitströme als Funktion der Reynolds-Zahl als im Bereich  $Re > 2320$ .
- Im laminaren Strömungsbereich wird in der Literatur [Hig79] S. 1261 für Mineralöl ein linearer Anstieg der Ableitströme als Funktion der Reynolds-Zahl beschrieben. Diese Tendenz konnte bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage für Mineralöl bei niedrigen und hohen Temperaturen beobachtet werden. Für die alternativen Isolierflüssigkeiten wurde ein linearer Zusammenhang bei laminarer Strömung bei 20 °C durchgängig beobachtet, bei höheren

Temperaturen jedoch nur vereinzelt. Es ist anzunehmen, dass bei höherer Temperatur andere Einflussfaktoren, wie ein Feuchteausgleich zwischen Flüssigkeit und Board, zusätzlich die Aufladung beeinflussen.

- Bei laminarer Strömung konnte für alle drei Isolierflüssigkeiten die Tendenz beobachtet werden, dass der Ableitstrom bei gleicher Reynolds-Zahl mit höherer Temperatur absinkt. Dies wird auch in [Hig79] S. 1261 für Mineralöl beschrieben. Im Bereich  $Re > 2320$  kann eine Erhöhung der Aufladungsneigung mit steigender Temperatur für Mineralöl und synthetischen Ester erkannt werden. Diese Tendenz wird auch in [Sch90] S. 83 für Mineralöl beschrieben.

#### Elektrostatistische Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte der Isolierflüssigkeit

Bei den Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage konnte kein klarer Trend der Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Feuchte nachgewiesen werden. Ähnliches Verhalten wurde auch in der Literatur in [Lem96] S. 97 beschrieben. Vergleichsmessungen mit einem *mini-static tester* zeigten das gleiche Verhalten für Mineralöl und natürlichen Ester. Einzig für synthetischen Ester schien die Aufladung mit steigender Feuchte zuzunehmen.

#### Elektrostatistische Aufladungsneigung unter Hochspannungsbeanspruchung

Die experimentellen Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage weisen darauf hin, dass die Ladungserzeugung unter der Einwirkung einer hohen Wechselladungsbeanspruchung für alle drei Isolierflüssigkeiten zunimmt. Diese Tendenz wird in der Literatur [Sie94] S. 861 für Mineralöl beschrieben.

#### Elektrostatistische Aufladungsneigung bei Entladespuren im Strömungskanal

Die Untersuchungen mit Nomex®-Modellen mit und ohne Entladespuren im Kanalinneren zeigen, dass beim geschädigten Modell Impulse in den Strom-Zeitverläufen bereits ab niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Es ist anzunehmen, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass die Entladespur die elektrische Festigkeit örtlich herabsetzt. Dadurch kommt es bereits bei einer geringeren Ladungsansammlungen zu Entladungserscheinungen.

Die Untersuchungen scheinen weiters darauf hinzuweisen, dass intensive Entladungserscheinungen eine Erhöhung der Ladungserzeugung im betroffenen Bereich bewirken. Eine höhere Ladungserzeugung durch die Entladespur selbst – ohne dem Auftreten der Entladungen - konnte jedoch nicht für alle Temperaturstufen durchgehend nachgewiesen werden.

#### Druckverlust an einem Strömungskanal bei verschiedenen Isolierflüssigkeiten

Die Betrachtung des Druckverlustes am Strömungsmodell zeigt, dass sich für die Esterflüssigkeiten insbesondere bei 20 °C deutlich höhere Druckverluste ergeben als bei Mineralöl. Dies ist auf die höhere Viskosität dieser Flüssigkeiten zurückzuführen. Der höhere Druckverlust ist bei der Auslegung eines Leistungstransformators unter anderem bei der Wahl der eingesetzten Umwälzpumpen zu beachten.

## 9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Unter elektrostatischer Aufladung versteht man das Auftreten einer Ladungstrennung aufgrund der relativen Bewegung zwischen zwei Stoffen [EPR99\_a] S. 1-2. Die beiden Stoffe werden mit entgegengesetzter Polarität aufgeladen und es kann durch eine erhöhte Ladungsansammlung zu elektrischen Entladungen kommen [EPR95] S. 7. Elektrostatische Aufladung führte in der Vergangenheit in verschiedensten Bereichen von Industrie und Alltag zu Problemen und Schäden. Betroffene Bereiche waren zum Beispiel die Erdölindustrie, die Automobilindustrie und auch die Energietechnik [EPR95] S. 8 – S. 15. Seit den 1970er Jahren traten auch in Leistungstransformatoren immer wieder Fehler durch elektrostatische Aufladung zwischen dem flüssigen und festen Isolierstoff auf [CIG00] S. 6. Seit den ersten Ausfällen von Transformatoren aufgrund von elektrostatischer Aufladung wurde dieses Phänomen sehr intensiv erforscht. Der Schwerpunkt der Forschungstätigkeit lag bis zum jetzigen Zeitpunkt jedoch vor allem bei der Untersuchung der konventionell in Leistungstransformatoren eingesetzten Isoliersysteme mit Mineralöl [CIG00] S. 11 – S. 14. Heutzutage besteht der Trend Mineralöl durch alternative, biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten zu ersetzen. Der Einsatz der alternativen Isolierflüssigkeiten in Verteiltransformatoren hat sich bereits bewährt. Die geplante Ausweitung ihres Einsatzes auf Hochspannungsleistungstransformatoren erfordert jedoch die genaue Kenntnis der Eigenschaften dieser Flüssigkeiten. Unter anderem spielt dabei auch die elektrostatische Aufladungsneigung der alternativen Isolierflüssigkeiten in Verbindung mit verschiedenen festen Isolierstoffen eine wichtige Rolle [Per09]. Das Ziel der vorliegenden Dissertation war es die elektrostatische Aufladungsneigung und das Aufladungsverhalten von alternativen Isoliersystemen und von Isoliersystemen mit Mineralöl zu bestimmen und zu vergleichen, um ein mögliches Risiko beim Einsatz der alternativen Isoliersysteme in Leistungstransformatoren abzuschätzen.

Die elektrostatische Aufladung zwischen einer Flüssigkeit und einem Feststoff vollzieht sich in vier Phasen: Ladungsbildung, Ladungsabtransport, Ladungsanhäufung und Ladungsabfluss [Gas86]. Unter der Ladungsbildung versteht man die Entstehung von Ladungen an der flüssig/ festen Grenzfläche. Diese wird in der Literatur meist über einen physikalisch-chemischen Prozess erklärt. Dieser Prozess ist bis zum heutigen Zeitpunkt noch immer nicht genau bekannt. Es gibt jedoch verschiedene Modelle, die ihn beschreiben [Ela10] S. 1593 – S. 1594. Bedeutende Modelle sind das "klassische" Adsorptionsmodell nach H. L. Walmsley und G. Woodford in [Wal81] und das Korrosionsmodell nach G. G. Touchard et al in [Tou94] und [Tou96] für das Materialpaar Treibstoff (Kohlenwasserstoff) – Metall. Für das Materialpaar Mineralöl – Pressboard wurde das "erweiterte" Adsorptionsmodell nach A. P. Washabaugh und M. Zahn in [Was97] entwickelt. Die Ladungsbildung führt im Ruhezustand der Flüssigkeit zu einer Schicht von Ladungen einer Polarität an der Feststoffwand und von einer Schicht von Ladungen entgegengesetzter Polarität in der Flüssigkeit. Diese Ladungsverteilung wird als elektrische Doppelschicht bezeichnet [Ela10] S. 1593. In der Flüssigkeit kann man zwei weitere Bereiche der Ladungsverteilung unterscheiden, eine starre und eine diffuse Schicht [Wed12] S. 471. Sobald eine Flüssigkeitsströmung einsetzt, kommt es zum Ladungsabtransport aus der diffusen Schicht der elektrischen Doppelschicht [Tou96] S. 1051. Dies bewirkt, dass wieder neue Ladungsträger an der flüssig/ festen Grenzfläche gebildet werden, die dann wiederum durch die Strömung abtransportiert werden. Das im Ruhezustand vorhandene statische Gleichgewicht wird durch ein dynamisches Gleichgewicht abgelöst [Vau08] S. 1. Die bewegten Raumladungen in der Flüssigkeit bilden den sogenannten elektrostatischen Aufladestrom  $I_s$  (engl.: *streaming current*), der von der Raumladungsdichte in der Flüssigkeit und von ihrer Strömungsform abhängt [Pai01] S. 175. Prinzipiell kann zwischen der laminaren und der turbulenten Strömungsform unterschieden werden [Sig09] S. 89. Bei einer Flüssigkeitsströmung führt der physikalisch-chemische Prozess an der Grenzfläche nicht nur zur Bildung von Ladungen in der Flüssigkeit, sondern auch zur Entstehung von Ladungen entgegengesetzter Polarität an der Feststoff-

oberfläche [Ela11] S. 34. An der Feststoffoberfläche kommt es zur Ladungsanhäufung, wodurch das Oberflächenpotential ansteigt [Mor04] S. 32. In Abhängigkeit der bestehenden Ableitwiderstände tritt ein Ladungsabfluss gegen Erde auf. Sobald der Ladungsabfluss über Kriechwege gleich dem Ladungszufluss durch den physikalisch-chemischen Prozess an der Grenzfläche ist, bleibt die angesammelte Ladung an der Feststoffoberfläche gleich. Wenn vor diesem Zeitpunkt durch die Ladungsansammlung ein zu hohes Potential entsteht, kann es zu elektrischen Entladungen kommen [Ela11] S. 34.

In Leistungstransformatoren entsteht elektrostatische Aufladung aufgrund der relativen Bewegung zwischen dem flüssigen und festen Isolierstoff [EPR99\_a] S. 1-10. Leistungstransformatoren werden üblicherweise mit einer Öl-Board-Isolierung (meist Mineralöl-Zellulose) ausgeführt [Küc09] S. 493. Die Isolierflüssigkeit besitzt dabei auch die Funktion eines Kühlmittels. Sie zirkuliert durch die Kühlkanäle im Wicklungssystem, nimmt dort die entstandene Verlustwärme auf und gibt sie an Wärmetauschern ab [EPR95] S. 10. Die Flüssigkeitsströmung durch die Zellulose-Kühlkanäle bewirkt im Transformator elektrostatische Aufladung. Dabei können hohe Potentiale entstehen. Typische Schäden durch elektrostatische Aufladung in Transformatoren sind elektrische Entladungen, Oberflächenentladungen am Feststoff und sogenannte *wormholes* (Entladekanäle unter der Oberfläche) [EPR99\_a] S. 1-10. Für Transformatoren der Kern- und Mantelbauart wurden Fehlstellen im Einlassbereich zu den Kühlkanälen am festen Isolierstoff gefunden [Shi79] S. 1249, [Hig79] S. 1265, [Tam80] S. 340. Für Transformatoren der Mantelbauart wurden zusätzlich Fehlstellen nahe dem Auslass der Kühlkanäle festgestellt, die mit dem hohen Gleichfeld aufgrund der hohen Ladungsträgerkonzentration in der Isolierflüssigkeit im oberen Kesselbereich in Zusammenhang gebracht wurden [Tam80] S. 340. Die effizientesten und gesichertsten Maßnahmen gegen Schäden durch elektrostatische Aufladung in Leistungstransformatoren scheinen die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit (laut [EPR95] S. 14) und ein möglichst turbulenzarmes Design zu sein.

Seit dem Auftreten der ersten Schäden in Leistungstransformatoren durch elektrostatische Aufladung wurden verschiedene Prüfanordnungen und Prüfverfahren entwickelt, mit denen die sogenannte "elektrostatische Aufladungsneigung" (engl.: *ECT = electrostatic charging tendency*) eines flüssig/ festen Materialpaares bestimmt werden kann. Dabei wird üblicherweise entweder der Ableitstrom vom Feststoff gegen Erde gemessen oder es wird der elektrostatische Aufladestrom in der Isolierflüssigkeit erfasst. Somit beurteilt die elektrostatische Aufladungsneigung grundsätzlich das Maß der Ladungstrennung an der flüssig/ festen Grenzfläche bzw. das Maß der Ladungserzeugung bei einer Flüssigkeitsströmung. Man kann zwischen Versuchsaufbauten mit ebener Strömung, mit rotierender Strömung und Versuchsaufbauten nach der Filtermethode unterscheiden. Bei allen Versuchsaufbauten wird eine relative Bewegung zwischen Flüssigkeit und Feststoff hergestellt, die zur elektrostatischen Aufladung führt [CIG00] S. 10 – 25. Versuchsaufbauten mit ebener Strömung verwenden aus dem festen Isolierstoff hergestellte Rohr- oder Kanalmodelle, die die Kühlkanäle in Transformatoren nachbilden. Die Strömung der Isolierflüssigkeit durch diese Modelle bewirkt elektrostatische Aufladung [Lem96] S. 27. Bei Versuchsaufbauten mit rotierender Strömung kann man zwischen *spinning disc* – Systemen und *couette chargern* unterscheiden [Pra98] S. 4. In *spinning disc* - Systemen dreht sich eine Scheibe in einem mit Isolierflüssigkeit befüllten Prüfkessel [Lem96] S. 33. Die Scheibe besteht aus oder ist von dem zu untersuchenden Feststoff umgeben [Ked89], [Lem96] S. 40 – S. 41. Der *couette charger* besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Metallzylindern. Zwischen den Zylindern befindet sich die zu untersuchende Isolierflüssigkeit [Lyo88] S. 161. Die Zylinder sind entweder blank oder mit einem anderen zu untersuchenden Material umgeben. Der innere Zylinder rotiert und verursacht die relative Bewegung zwischen Feststoff und Flüssigkeit [EPR95] S. 19. Der bekannteste Vertreter von Prüfaufbauten nach der Filtermethode ist der *mini-static tester*. In diesem Prüfaufbau wird die Isolierflüssigkeit mit einem bestimmten Volumenstrom durch einen Zellulosefilter gepresst [Oom84] S. 1924.

Für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde entschieden, einen Versuchsaufbau mit ebener Strömung zu verwenden. Dieser ist einerseits für Grundlagenforschung gut geeignet, welche vor dem Einsatz neuer Materialien in Transformatoren notwendig ist. Andererseits bietet dieser im Vergleich zu den anderen Prüfaufbauten die beste Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die realen Verhältnisse in Transformatoren [CIG00] S. 25 – S. 26. Der erstellte

Prüfaufbau wird als Strömungsmodellanlage bezeichnet. Die Strömungsmodellanlage dient der Nachbildung der Aufladungsvorgänge, die in den Kühlkanälen von Leistungstransformatoren stattfinden, und ermöglicht zugleich die messtechnische Erfassung der elektrostatischen Aufladung eines flüssig/ festen Isoliermaterialpaares. Dabei können verschiedene Betriebsbedingungen in einem Transformator nachgebildet werden. Die Anlage ermöglicht es die Parameter der Isolierflüssigkeit (Temperatur, Feuchte und Strömungsgeschwindigkeit) zu verändern und während der experimentellen Untersuchungen konstant zu halten. Weiters können verschiedene flüssig/ feste Isoliermaterialpaare untersucht werden. Der wichtigste Bestandteil der Prüfanlage ist das Strömungsmodell, das einen Kühlkanal im Transformator nachbildet. Das Strömungsmodell besteht aus dem zu untersuchenden Feststoff. Aufgrund der Isolierflüssigkeitsströmung durch das Modell entsteht in diesem elektrostatische Aufladung. Zur Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung wurden Ableitströme zwischen Modell und Erde erfasst. Im Rahmen von Zusatzmessungen mit einem Elektrofeldmeter wurden auch die sich aufbauenden Spannungen am Modell gemessen. Das Messsystem wird von einem Messprogramm gesteuert. Die Aufladungsparameter (Ableitströme und Spannung) und die Umgebungs- und Flüssigkeitsparameter werden automatisch eingelesen und abgespeichert.

Bei den experimentellen Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage wurden sechs Isoliermaterialpaare untersucht:

Mineralöl – Transformerboard B 3.1A	Mineralöl – Nomex® 994
Synthetischer Ester – Transformerboard B 3.1A	Synthetischer Ester – Nomex® 994
Natürlicher Ester – Transformerboard B 3.1A	Natürlicher Ester – Nomex® 994

Die Variationsparameter bei den Untersuchungen waren die Strömungsgeschwindigkeit der Isolierflüssigkeit, die Systemtemperatur und die Feuchte der Isolierflüssigkeit. Weiters wurde der Einfluss eines elektrischen Wechselfeldes und von im Strömungskanal vorhandenen Entladespuren auf die elektrostatische Aufladungsneigung geprüft. Im Rahmen einer Versuchsreihe wurde immer nur ein Isoliermaterialpaar untersucht. Eine Versuchsreihe bestand aus vier Messserien. Die erste Messserie wurde bei 20 °C, die zweite bei 60 °C und die dritte bei 90 °C durchgeführt. Die letzte Messserie fand wieder bei 20 °C und unter Hochspannungsbeanspruchung statt. Danach wurden für die Esterflüssigkeiten auch ergänzende Messserien bei 20 °C mit einem Elektrofeldmeter durchgeführt. Im Rahmen einer Messserie wurden verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten in aufsteigender Reihenfolge vermessen, wobei ein strikter Zeitplan bestand. Ausgewertet wurde jeweils der stationäre Ableitstrom bzw. die stationäre Spannung für jede Strömungsgeschwindigkeit. Bei den Untersuchungen unter Hochspannungsbeanspruchung wurde der Ableitstrom vor und bei Hochspannungsbeanspruchung ausgewertet. Nach einer Versuchsreihe wurde das Strömungsmodell ausgebaut und an den Kanalaußen- und Kanalinnenseiten auf Entladespuren untersucht.

Die Ergebnisse der Aufladungsuntersuchungen der drei Isolierflüssigkeiten sind im Folgenden zusammengefasst:

- Der Vergleich von Mineralöl, synthetischem und natürlichem Ester ergab in Verbindung mit Transformerboard B 3.1A und Nomex® 994, dass Mineralöl die niedrigste elektrostatische Aufladungsneigung besitzt. Die Ursache dafür könnte laut Literatur [Zel11] S. 3 in der unterschiedlichen chemischen Struktur von Mineralöl und Ester liegen, jedoch auch durch andere Eigenschaften wie die höhere Viskosität der Esterflüssigkeiten begründet werden. Weitere Grundlagenforschung ist in diesem Bereich notwendig, um genauere Aussagen treffen zu können. Eine generelle Zuordnung, dass eine der beiden Esterflüssigkeiten höher aufladend ist als die andere, war über die experimentellen Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage nicht möglich.
- Die Untersuchungen in der Strömungsmodellanlage ergaben, dass in Verbindung mit Mineralöl Transformerboard B 3.1A in den meisten Fällen eine höhere elektrostatische Aufladungsneigung als Nomex® 994 besitzt. In Verbindung mit den Esterflüssigkeiten weist generell Nomex® eine höhere Aufladungsneigung als Transformerboard B 3.1A auf. Zusatzuntersuchun-

gen mit einer *spinning disc* weisen darauf hin, dass die festgestellten Effekte nicht mit der Oberflächenbeschaffenheit der untersuchten Feststoffe zusammenhängen, sondern von deren unterschiedlicher chemischer Struktur herrühren. Beim Einsatz des Isoliermaterialpaares Ester - Nomex® gilt erhöhte Vorsicht. Es wurden nach den experimentellen Untersuchungen Entladespuren an den Strömungsmodellen festgestellt, die für die Isoliersysteme Mineralöl - Transformerboard, Ester - Transformerboard und Mineralöl - Nomex® nicht nachweisbar waren.

- Die Analyse der elektrostatischen Aufladungsneigung in Abhängigkeit der Strömungsform der Isolierflüssigkeit zeigt für alle drei Isolierflüssigkeiten sehr ähnliche Tendenzen, die generell sehr gut mit dem in der Literatur [Sch90] und [Hig79] für Mineralöl beschriebenen Verhalten übereinstimmen. Bei laminarer Strömung zeigt sich für alle drei Isolierflüssigkeiten ein deutlich schwächerer Anstieg der Ableitströme als Funktion der Reynolds-Zahl als im Bereich  $Re > 2320$ . Im laminaren Strömungsbereich sinkt der Ableitstrom bei gleicher Reynolds-Zahl mit höherer Temperatur ab. Im Bereich  $Re > 2320$  kann eine Erhöhung der Aufladungsneigung mit steigender Temperatur für Mineralöl und synthetischen Ester erkannt werden.
- Die experimentellen Untersuchungen zeigen für alle drei Isolierflüssigkeiten keinen klaren Zusammenhang zwischen der Aufladungsneigung und der Feuchte in der Isolierflüssigkeit. Ähnliches Verhalten wird teils auch in der Literatur für Mineralöl beschrieben, siehe z.B. [Lem96] S. 97.
- Die experimentellen Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Ladungserzeugung unter der Einwirkung einer hohen Wechselladungsbeanspruchung für alle drei Isolierflüssigkeiten zunimmt, sowie es in der Literatur [Sie94] S. 861 für Mineralöl beschrieben wird.
- Die experimentellen Untersuchungen mit Nomex®-Modellen mit und ohne Entladespuren im Kanalinneren zeigen, dass Entladungserscheinungen in einem Modell mit Entladespuren bereits ab niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Intensive Entladungserscheinungen scheinen weiters eine Erhöhung der Ladungserzeugung im betroffenen Bereich zu bewirken.
- Die Esterflüssigkeiten führen aufgrund ihrer höheren Viskosität bei der gleichen Temperaturstufe zu höheren Druckverlusten an einem Strömungskanal. Dies muss bei der Dimensionierung eines Transformators beachtet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden verschiedene Isoliermaterialpaare bezüglich ihrer elektrostatischen Aufladungsneigung vermessen. Die elektrostatische Aufladungsneigung ist ein Maß für die Ladungserzeugung, deren Grundlage der physikalisch-chemische Prozess an der Grenzfläche zwischen den beteiligten Isolierstoffen ist. In weiterführenden Arbeiten wäre eine Fokussierung auf den physikalisch-chemischen Prozess interessant, der bei den Isoliermaterialpaaren Mineralöl - Nomex®, Ester - Transformerboard und Ester - Nomex® stattfindet. Für das konventionelle Isoliersystem Mineralöl-Transformerboard wurden solche Untersuchungen z.B. in [Pai02] durchgeführt. Dabei wurde Pressboard chemisch behandelt, um verschiedene funktionelle Gruppen zu maskieren und somit deren Beteiligung am physikalisch-chemischen Prozess zu beurteilen.

Eine Weiterführung dieser Arbeit könnte auch in der Beurteilung der sich aufbauenden Spannungen am festen Isolierstoff unter dem Einfluss verschiedener Parameter bestehen. Diese Messungen wurden mit der Strömungsmodellanlage im Rahmen der vorliegenden Dissertation nur ergänzend für 20 °C und für Isoliersysteme mit Esterflüssigkeiten durchgeführt. Zu Beginn könnte für die Spannungsmessungen ein einfacherer Versuchsaufbau wie die *spinning disc* zum Einsatz kommen, um bedeutende Einflussparameter herauszufiltern. Für genauere Untersuchungen wird die Messung am Strömungsmodell mittels Elektrofeldmeter empfohlen.

# LITERATURVERZEICHNIS

- [ABB04] ABB, "Transformer Handbook", 2004
- [Atk06] Atkins P. W., Paula J., "Physikalische Chemie", 4., vollständig überarbeitete Auflage, ISBN 978-3-527-31546-8, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Deutschland, 2006
- [Bou06] Bourgeois A., Mortha G., Paillat T., Touchard G., Moreau O., Bertrand Y., "Flow electrification in power transformers: Study of a potential remedy", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, No. 3, pp. 650 - 656, 2006
- [Bou10] Bouslimi Y., Fofana I., Hemmatjou H., Volat C., "Static electrification assessment of transformer oils in the spinning disc system", International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 337 - 340, New Orleans, USA, 2010
- [Bou57] Boumans A. A., "Streaming currents in turbulent flows and metal capillaries", Physica XXIII, pp. 1007 - 1055, 1957
- [Cab06] Cabaleiro J. M., Paillat T., Moreau O., Touchard G., "Flow electrification of dielectric liquids in insulating channels: Limits to the application of the classical wall current expression", International Symposium on Electrohydrodynamics, pp. 1 - 4, Buenos Aires, Argentina, 2006
- [Cab06\_a] Cabaleiro J. M., Paillat T., Moreau O., Touchard T., "Parametric study by electrical analogy: Application to flow electrification in power transformers", Proceedings of the ESA/IEJ/IEEE- IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, pp. 458 - 469, 2006
- [Cha13] Chapman D. L., "A contribution to the theory of electrocapillarity", The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 6th Series, Vol. 25, No. 148, pp. 475 - 481, 1913
- [CIG00] CIGRÉ, Study Committee 12, Joint Working Group 12/15.13, "Static electrification in power transformers", technical brochure 170, 2000
- [CIG10] CIGRÉ, Working Group A2.35, "Experiences in service with new insulating liquids", technical brochure 436, 2010
- [Cro88] Crofts D. W., "The static electrification phenomena in power transformers", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 1, pp. 137 - 146, 1988
- [Deb23] Debye P., Hückel E., "Zur Theorie der Elektrolyte. I. Gefrierpunktserniedrigung und verwandte Erscheinungen", Physikalische Zeitschrift, Vol. 24, No. 9, pp. 185 - 206, 1923
- [Dör94] Dörfler H.-D., "Grenzflächen- und Kolloidchemie", ISBN 3-527-29072-9, VCH Verlagsgesellschaft mbH., Weinheim, Deutschland, 1994
- [Ela09] EL-Adawy M., Cabaleiro J. M., Paillat T., Moreau O., Touchard G., "Experimental determination of space charge density associated with flow electrification phenomenon: application to power transformers", Journal of Electrostatics, Vol. 67, Issues 2-3, pp. 354 - 358, 2009

- [Ela10] El-Adawy M., Paillat T., Bertrand Y., Moreau O., Touchard G., "Physicochemical analysis at the interface between conductive solid and dielectric liquid for flow electrification phenomenon", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 4, pp. 1593 - 1600, 2010
- [Ela11] EL-Adawy M., "Étude du phenomene d'électrisation par écoulement: comprehension de l'origine et du developpement du phenomene", Dissertation, Universite de Poitiers, Poitiers, Frankreich, 2011
- [Ela11\_a] EL-Adawy M., Paillat T., Touchard G. G., Cabaleiro J. M., "Numerical simulation of the electrical double layer development: physicochemical model at the solid and dielectric liquid interface for laminar flow electrification phenomenon", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 5, pp. 1463 - 1475, 2011
- [EPR93] EPRI, "Proceedings: Static electrification in power transformers", report, TR-102480, Palo Alto, California, USA, 1993
- [EPR95] EPRI, "Flow induced electrification of liquid insulated electrical equipment", final report, TR-104973, Palo Alto, California, USA, 1995
- [EPR95\_a] EPRI, "Proceedings: Static electrification in power transformers", report, TR-105019, Palo Alto, California, USA, 1995
- [EPR99] EPRI, "Symposium proceedings: Transformer reliability: Management of static electrification in power transformers", report, TR-113741, Palo Alto, California, USA, 1999
- [EPR99\_a] EPRI, "Electrokinetic effects in power transformers", final report, TR-113441, Palo Alto, California, USA, 1999
- [Erd88] Erdman H.G., "Electrical insulating oils", ISBN 0-8031-1179-7, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1988
- [Fab12] Fabian J., "Dielektrische Kennwerte von Isolierstoffen bei Gleichspannungsbeanspruchung. Leitfähigkeits- und Teilentladungsverhalten von mineralischem Isolieröl und Transformer-Board", Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Graz, Österreich, 2012
- [Fis94] Fischer O., "Elektrotechnische Grundlagen 2", 3., durchgesehene Auflage, ISBN 3-7029-0384-4, R. Oldenbourg Verlag Wien, Österreich, 1994
- [Fre41] Frenkel J. I., "On frictional electrization", 6th Conference on Semi-Conductors, Leningrad, Russia, 1940; Zusammenfassung in Journal of Physics (Academy of Sciences of the USSR), Vol. 4, No. 1 - 2, p. 172, 1941
- [Gas86] Gasworth S.M., Melcher J. R., Zahn M., "Electrification problems resulting from liquid dielectric flow", EPRI, EL-4501, Project 1536-7, 1986
- [Gav61] Gavis J., Koszman I., "Development of charge in low conductivity liquids flowing past surfaces: A theory of the phenomenon in tubes", Journal of Colloid Science, Vol. 16, Issue 4, pp. 375 - 391, 1961
- [Gou10] Gouy M., "Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte", Journal de Physique Théorique et Appliquée, Vol. 9, No. 6, pp. 457 - 468, 1910
- [Gro07] Grote K.-H., Feldhusen J., "Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau", 22., neubearbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-540-49714-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Deutschland, 2007



- [Hel79] Helmholtz H., "Studien über elektrische Grenzschichten", Annalen der Physik und Chemie, neue Folge Band 7, Nr. 7, S. 337 - S. 382, 1879
- [Hig79] Higaki M., Kako Y., Moriyama M., Hirano M., Hiraishi K., Kurita K., "Static electrification and partial discharges caused by oil flow in forced oil cooled core type transformers", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.4, pp. 1259 - 1267, 1979
- [Ied88] Ieda M., Okugo H., Tsukioka H., Goto K., Miyamoto T., Kohno Y., "Suppression of static electrification of insulating oil for large power transformers", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No.1, pp.153 - 157, 1988
- [Jun12] Jung S., "Oberflächenbeurteilung - Rauheitsmessung", Skriptum, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, Deutschland, 2012
- [Ked89] Kedzia J., "Investigation of transformer oil electrification in a spinning disk system", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No.1, pp. 59 - 65, 1989
- [Kli58] Klinkenberg A., van der Minne J. L., "Electrostatics in petroleum industry: The prevention of explosion hazards", LCCN 57-14772, Elsevier Publishing Company, Amsterdam - London - New York - Princeton, 1958
- [Kra92] Krause C., Moser H. P., Praxl G., Spandonis G., Stonitsch R., "Electrostatic charging in large size models of power transformer cooling ducts", CIGRÉ Session, JWG 12/ 15.13 TF-01, TF-02, pp. 1 - 8, Paris, Frankreich, 1992
- [Küc09] Kückler A., "Hochspannungstechnik, Grundlagen - Theorie - Anwendung", 3. neu bearbeitete Auflage, ISBN 978-3-540-78412-8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Deutschland, 2009
- [Las14] Lashbrook M., "Ester fluids for power transformers at > 100 kV. Design considerations for the use of alternative fluids", Transformers Magazine, Vol. 1, Issue 2, pp. 14 - 19, 2014
- [Lec06] Lechthaler M., Bauer W., "Rauigkeit und Topografie – ein Vergleich unterschiedlicher Messverfahren", Wochenblatt für Papierfabrikation 21, S. 1227 - 1234, 2006; (vorgetragen auf dem 17. PTS-CHT-Symposium „Chemische Technologie der Papiererzeugung“, München, Deutschland, 2006)
- [Lem96] Lemesch G., "Methoden zur Beurteilung der elektrostatischen Aufladungsneigung von flüssig/festen Isoliersystemen", Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik, Graz, Österreich, 1996
- [Leo76] Leonard J. T., Bogardus H. F., "Prostatic agents in jet fuels", U.S. Naval Research Laboratory Report 8021, 1976
- [Lyo88] Lyon D. J., Melcher J. R., Zahn M., "Couette charger for measurement of equilibrium and energization flow electrification parameters: Application to transformer insulation", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 1, pp. 159 - 176, 1988
- [Moo76] Moore W. J., Hummel D. O., "Physikalische Chemie", 2. Auflage, ISBN 3-11-002127-7, Walter de Gruyter, Berlin, Deutschland, 1976
- [Mor03] Moreau E., Paillat T., Touchard G., "Flow electrification in high power transformers: BTA effect on pressboard degraded by electrical discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 1, pp.15 - 21, 2003
- [Mor04] Moreau O., Paillat T., Touchard G., "Flow electrification in transformers: Sensor prototype for electrostatic hazard", Electrostatics 2003, Edinburgh, Great Britain, 2003; veröffentlicht in "Electrostatics 2003 - Proceedings of the Institute of Physics Conference", Conference Series Number 178, ISBN 978-0-7503-0949-3, pp. 31 - 36, Taylor & Francis Group, 2004

- [Mor91] Morin A. J., Zahn M., Melcher J. R., Otten D. M., "An absolute charge sensor for fluid electrification measurements", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 2, pp. 181 - 199, 1991
- [Mor97] Moreau E., Paillat T., Touchard G., "Evolution of the streaming current generated by an oil flow through a pressboard - Application to flow electrification in power transformers", 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 2, pp. 688 - 693, Minneapolis, USA, 1997
- [Mor99] Moreau E., Paillat T., Touchard G., "Oil electrification measured on a pressboard coming from a damaged power transformer", 1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 2, pp. 794 - 797, Austin, USA, 1999
- [Mos79] Moser H. P., "Transformerboard. Die Verwendung von Transformerboard in Großleistungs-transformatoren", Sonderdruck der Zeitschrift Scientia Electrica, Birkhäuser AG, Basel, Schweiz, 1979
- [Mos87] Moser H. P., Dahinden V., "Transformerboard II. Eigenschaften und Anwendung von Transformerboard aus verschiedenen Fasern", Styria, Graz, Österreich, 1987
- [Nel94] Nelson J. K., "Dielectric fluids in motion", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 10, No. 3, pp. 16 - 28, 1994
- [Oom84] Oommen T. V., Petrie E. M., "Electrostatic charging tendency of transformer oils", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-103, No. 7, pp. 1923 - 1931, 1984
- [Oom88] Oommen T. V., "Static electrification properties of transformer oil", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 1, pp. 123 - 128, 1988
- [Oom90] Oommen T.V., Lindgren S.R., "Streaming electrification study of transformer insulation system using a paper tube model", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 972 - 983, 1990
- [Pai00] Paillat T., Moreau O., Touchard G., "Flow electrification in transformers: Correlation between winding leakage current and pressboard charge accumulation", 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 1, pp. 85 - 88, 2000
- [Pai01] Paillat T., Moreau E., Touchard G., "Space charge density at the wall in the case of heptane flowing through an insulating pipe", Journal of Electrostatics, Vol. 53, Issue 2, pp. 171 - 182, 2001
- [Pai01\_a] Paillat T., Onic L., Moreau O., Bertrand Y., Mortha G., Charvet N., Touchard G., "Influence of pressboard physico-chemical composition on static electrification in power transformers", Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, Vol. 4, pp. 2716 - 2722, Chicago, USA 2001
- [Pai02] Paillat T., Charvet N., Moreau O., Mortha G., Bertrand Y., Touchard G., "Influence of pressboard ionizable groups on static electrification in power transformers", 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.180 - 183, 2002
- [Pai03] Paillat T., Mas P., Moreau O., Touchard G., "Flow electrification in transformers: Relevance of ECT and leakage current measurements", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 1, pp. 7 - 14, 2003
- [Pai08] Paillat T., Cabaleiro J. M., Romat H., Touchard G., "Flow electrification process: The physicochemical corroding model revisited," IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 1 - 4, Futuroscope-Chasseneuil, France, 2008

- [Pai12] Paillat T., Morin G., Touchard G., Bertrand Y., Moreau O., Tanguy A., "Electrostatic hazard in high power transformers: Analyze of ten years of the capacitive sensor", Proceedings of the 2012 Joint Electrostatics Conference, pp. 1 - 6, Cambridge, Canada, 2012
- [Pai12\_a] Paillat T., Zelu Y., Morin G., Perrier C., "Ester oils and flow electrification hazards in power transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 5, pp. 1537 - 1543, 2012
- [Per06] Perrier C., Beroual A., Bessède J. L., "Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, No. 3, pp. 556 - 564, 2006
- [Per09] Perrier C., Beroual A., "Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: Mineral, ester, and silicone oils", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 6, pp. 6 - 13, 2009
- [Pod13] Podesser J., Schwarz R., Pukel G., Wieser B., Muhr M., "Flow electrification in the cooling channels of a power transformer - presentation of the streaming model test setup", Electrostatics 2013, pp. 1 - 5, Budapest, Hungary, 2013
- [Pod13\_a] Podesser J., Schwarz R., Pukel G., Wieser B., Muhr M., "Investigation of the static electrification phenomenon in power transformers with the streaming model test setup", 18<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 1 - 5, Seoul, South Korea, 2013
- [Pod14] Podesser J., Schwarz R., Pukel G. J., Wieser B., Muhr M., Lashbrook M., "Static electrification of different solid-liquid couples used in transformers for insulation", IEEE 18<sup>th</sup> International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 1 -4, Bled, Slovenia, 2014
- [Pra98] Praxl G., Lemesch G., "Methoden zur Messung der elektrostatischen Aufladungsneigung von fest/flüssigen Isolierungssystemen in Hochspannungstransformatoren", 43<sup>rd</sup> International Scientific Colloquium, pp. 1 - 6, Ilmenau, Germany, 1998
- [Puk12] Pukel G. J., Schwarz R., Baumann F., Muhr H. M., Eberhardt R., Wieser B., Chu D., "Power transformers with environmentally friendly and low flammability ester liquids", CIGRE Session 2012, SC A2, pp. 1 - 10, Paris, France, 2012
- [Ren09] Ren S., Li H., Zhong L., Yu Q., Tang C., Zhu H., Cao X., Hanai M., Yamada S., Imamura T., Mori S., "Research on streaming electrification of insulation mineral oil", IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), pp. 988 - 991, Harbin, China, 2009
- [Riz14] Rizvanaj V., "Untersuchung der elektrostatischen Aufladungsneigung verschiedener Isolierstoffe mit einer Spinning Disc", Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Graz, Österreich, 2014
- [Sch07] Schramek E.-R., "Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik", 73. Auflage, ISBN 978-3-8356-3104-7, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, 2007
- [Sch14] Schantl M., "Elektrostatische Aufladungsuntersuchungen an alternativen Isolierflüssigkeiten mit einer Spinning Disc", Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Graz, Österreich, 2014
- [Sch89] Schade H., Kunz E., "Strömungslehre", 2., durchgesehene und verbesserte Auflage, ISBN 3-11-011873-4, Walter de Gruyter & Co, Berlin, Deutschland, 1989
- [Sch90] Schobel W., "Die elektrostatische Aufladung von strömenden Isolierölen", Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik, Graz, Österreich, 1990

- [Sch91] Schmutzer E., "Grundlagen der Theoretischen Physik", 2., durchgesehene Auflage in 4 Teilen, Teil IV, ISBN 3-326-00705-1, Deutscher Verlag der Wissenschaften GmbH, Berlin, Deutschland, 1991
- [Shi79] Shimizu S., Murata, H., Honda, M., "Electrostatics in power transformers", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 4, pp. 1244 - 1250, 1979
- [Sie15] Siemens AG, Energy Management Division, "Innovative transformers for urban environments. First ester transformer with waste heat utilization successfully shipped on April 16, 2015", brochure, 2015, 13.5.2015, internet: [http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/Transformers/news/2015/2015-apr-innovative-transformers\\_first-ester-transformer.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/Transformers/news/2015/2015-apr-innovative-transformers_first-ester-transformer.pdf)
- [Sie94] Sierota A., Rungis J., "Electrostatic charging in transformer oils. Testing and assessment", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.1, No 5, pp. 840 - 870, 1994
- [Sig09] Sigloch H., "Technische Fluidmechanik", 7., neu bearbeitete Auflage, ISBN 978-3-642-03089-5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Deutschland, 2009
- [Ste24] Stern O., "Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht", Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, Vol. 30, Issue 21 - 22, pp. 508 - 516, 1924
- [Sze13] Szewczyk R., "Aramid paper and board - properties and application of high temperature insulation", WEIDMANN Transformers Seminar, slide 1 - 16, Berlin, Germany, 2013
- [Tam80] Tamura R., Miura Y., Watanabe T., Ishii T., Yamada N., Nitta T., "Static electrification by forced oil flow in large power transformers", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 1, pp. 335 - 343, 1980
- [Tou01] Touchard G., "Flow electrification of liquids", Journal of Electrostatics, Vol. 51 - 52, pp. 440 - 447, 2001
- [Tou75] Touchard G., Dumargue P., "Transport de charges electriques par convection d'un liquide dielectrique dans une conduite cylindrique metallique - I la couche diffuse dans une conduite de section circulaire et entre deux plans paralleles", Electrochimica Acta, Vol. 20, Issue 2, pp. 125 - 135, 1975
- [Tou81] Touchard G., Romat H., "Electrostatic charges convected by flow of dielectric liquid through pipes of different length and different radii", Journal of Electrostatics, Vol. 10, pp. 275 - 281, 1981
- [Tou94] Touchard G. G., Patzek T. W., Radke C. J., "A physicochemical explanation for flow electrification in low conductivity liquids", Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 3, pp.1669 - 1675, Denver, USA, 1994
- [Tou96] Touchard G. G., Patzek T. W., Radke C. J., "A physicochemical explanation for flow electrification in low-conductivity liquids in contact with a corroding wall", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 5, pp.1051 - 1057, 1996
- [Tou99] Touchard G., Mas P., Paillat T., Moreau O., "Static electrification in power transformers: Correlation between charge generation and ECT-tan $\delta$  parameters for different oil-pressboard couples", Proceedings of the IEEE 13<sup>th</sup> International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 396 - 399, Nara, Japan, 1999

- [Umd93] Umdasch W., "Elektrostatische Durchflussmessung von Kraftstoffen", Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik, Graz, Österreich, 1993
- [Vau08] Vaucelle R., Paillat T., Moreau O., Bertrand Y., Cabaleiro J. M., Touchard G., "Analysis of flow electrification parameters of power transformer oils", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp.1 - 4, Futuroscope-Chasseneuil, France, 2008
- [Wal81] Walmsley H. L., Woodford G., "The generation of electric currents by the laminar flow of dielectric liquids", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 14, No. 10, pp. 1761 - 1782, 1981
- [Wal82] Walmsley H. L., "The generation of electric currents by the turbulent flow of dielectric liquids. I. Long pipes", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 15, No. 10, pp. 1907 - 1934, 1982
- [Wal83] Walmsley H. L., "The generation of electric currents by the turbulent flow of dielectric liquids. II. Pipes of finite length", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 16, No. 4, pp. 553 - 572, 1983
- [Was96] Washabaugh A. P., Zahn M., "Flow electrification measurements of transformer insulation using a couette flow facility", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 2, pp. 161 - 181, 1996
- [Was97] Washabaugh A. P., Zahn M., "A chemical reaction-based boundary condition for flow electrification", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 6, pp. 688 - 709, 1997
- [Wed12] Wedler G., Freund H.-J., "Lehrbuch der Physikalischen Chemie", 6., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, ISBN 978-3-527-32909-0, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Deutschland, 2012
- [Wei15] Weidmann Electrical Technology AG, "Transformerboard. Cellulosic insulation of unsurpassed quality", brochure, 11.5.2015, internet: <http://www.weidmann-electrical.com/de/medien/57-medien/263-broschueren-faltbroschueren>
- [Wei15\_a] Weidmann Electrical Technology AG, "High-temperature products", brochure, 11.5.2015, internet: <http://www.weidmann-electrical.com/de/medien/57-medien/263-broschueren-faltbroschueren>
- [Wie\_iA] Wieser B., Masterarbeit zu Aufladungsmessungen an alternativen Isolierflüssigkeiten mit einem *mini-static tester*, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Graz, Österreich, in Arbeit
- [Yan11] Yan Z., Morin G., Paillat, T., "Experimental determination of space charge density at solid-liquid interface versus temperature: Application to oil flow electrification in power transformers", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 1 - 4, Trondheim, Norway, 2011
- [You72] Young D. A., "Mini-static tester procedure", Exxon Research & Engineering Co., Linden, New Jersey, USA, 1972
- [Yum00] Yuming T., ZANJI W., Dachuan X., Jianchao Z., "Experimental and theoretical studies on static electrification phenomena owing to oil flow in EHV power transformers", Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol. 2, pp. 835 - 840, Xi'an, China, 2000

- [Zel11] Zelu Y., Paillat T., Morin G., Perrier C., Saravolac M., "Study on flow electrification hazards with ester oils", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 1 - 4, Trondheim, Norway, 2011
- [Zlo12] Zlodnjak A., "Prüfaufbau zur Bestimmung der Electrostatic Charging Tendency (ECT) von Öl-Board-Anordnungen mittels CIGRE Spinning Disc Verfahren", Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Graz, Österreich, 2012

# ANHANG

Anhang A	Konstruktionszeichnungen.....	i
Anhang B	Zusätzliche Messergebnisse .....	xi

# Anhang A Konstruktionszeichnungen

## Strömungsmodellanlage:

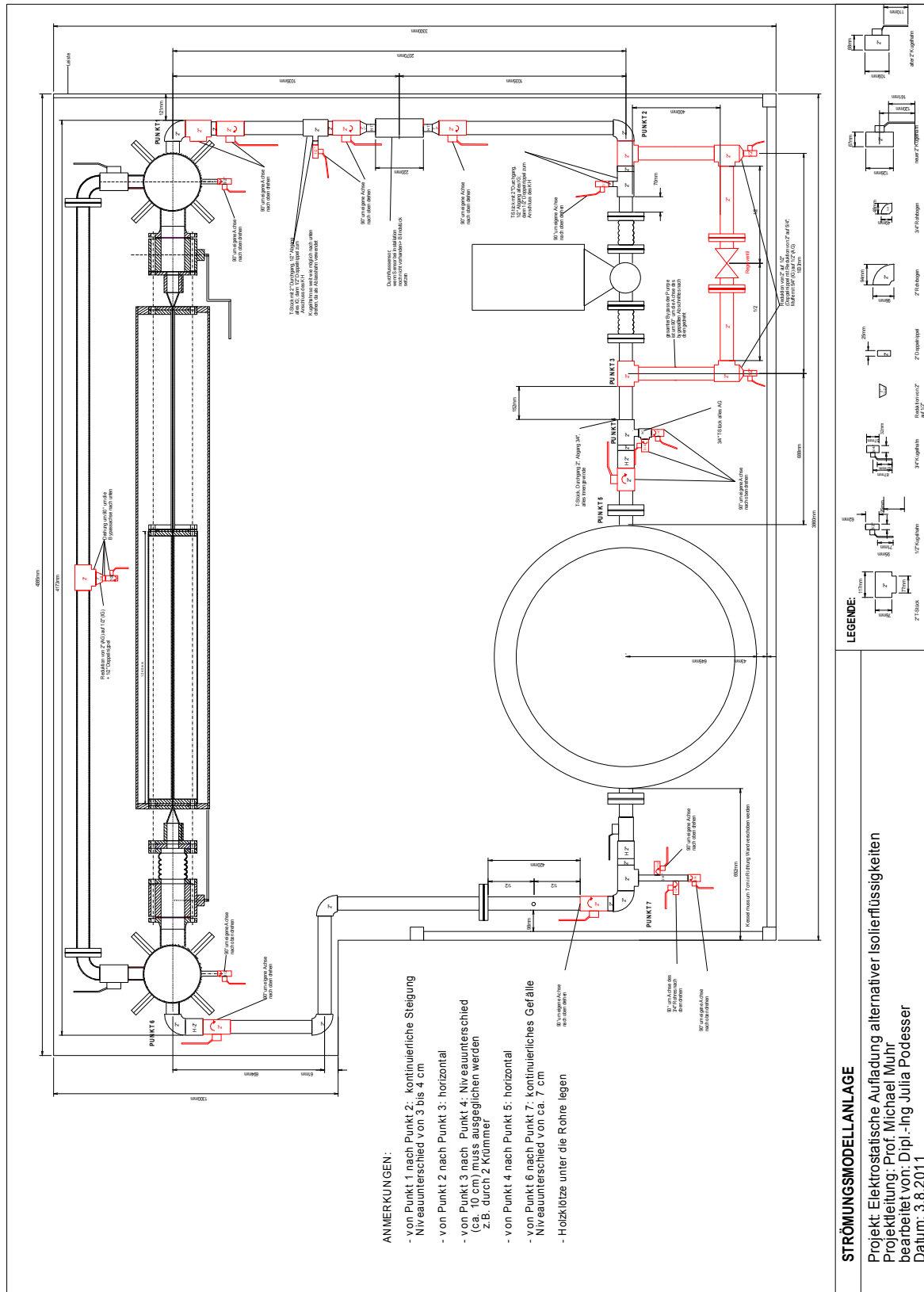


Abbildung A-1: Konstruktionszeichnung Strömungsmodellanlage



Hydraulische Beruhigungsstrecke:

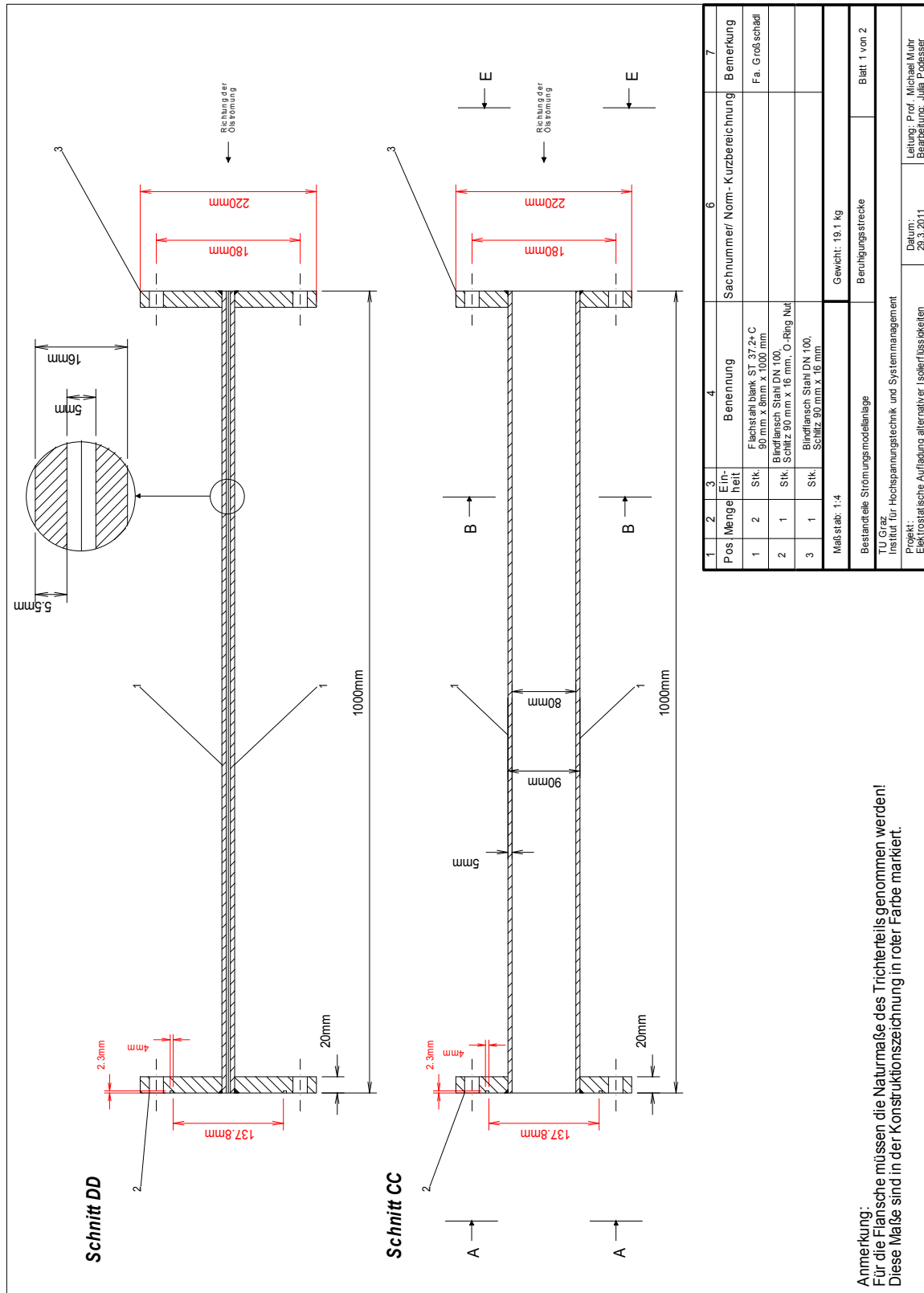


Abbildung A-2: Konstruktionszeichnung hydraulische Beruhigungsstrecke, Teil 1

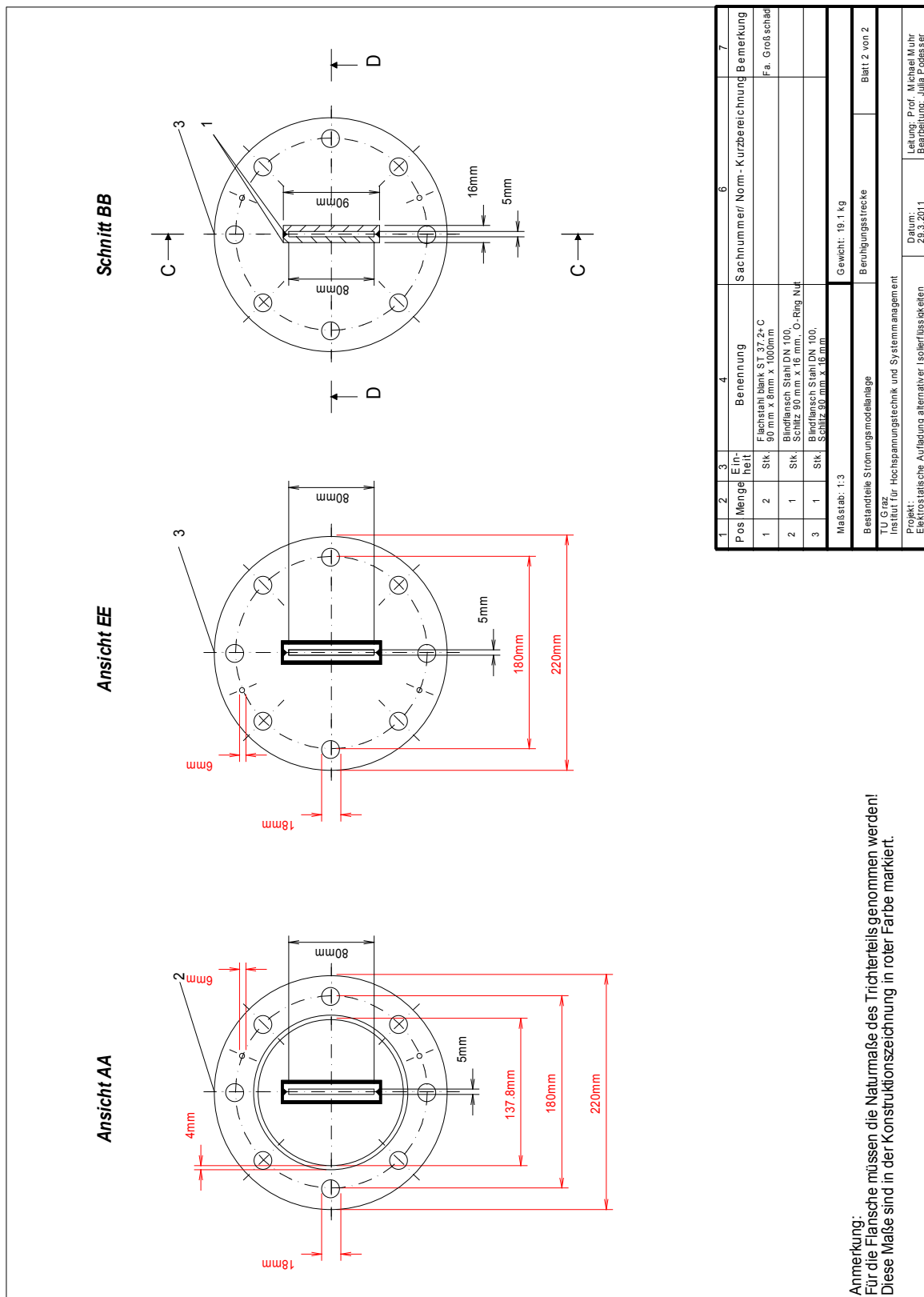


Abbildung A-3: Konstruktionszeichnung hydraulische Beruhigungsstrecke, Teil 2

Ladungsabscheider 1:

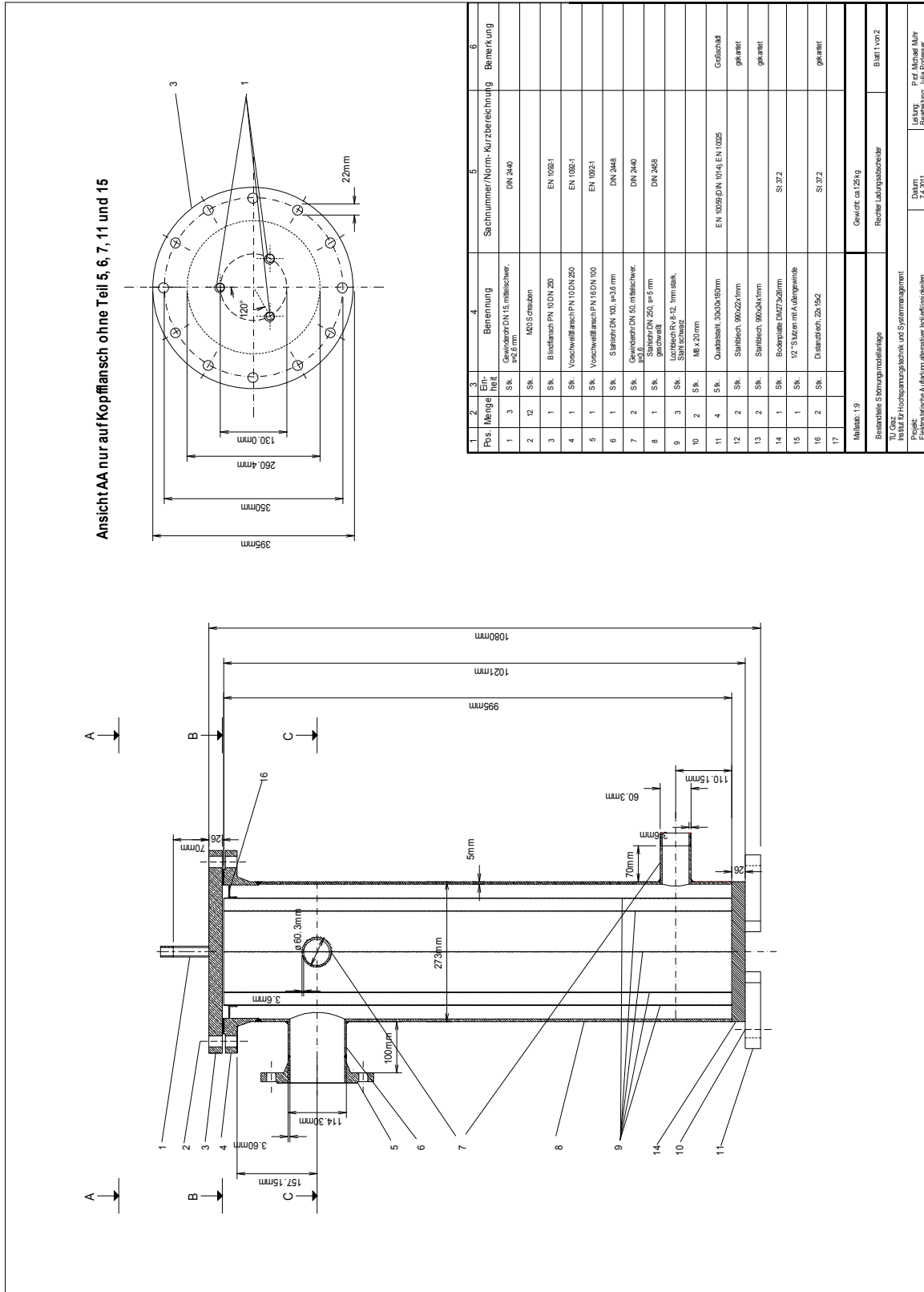
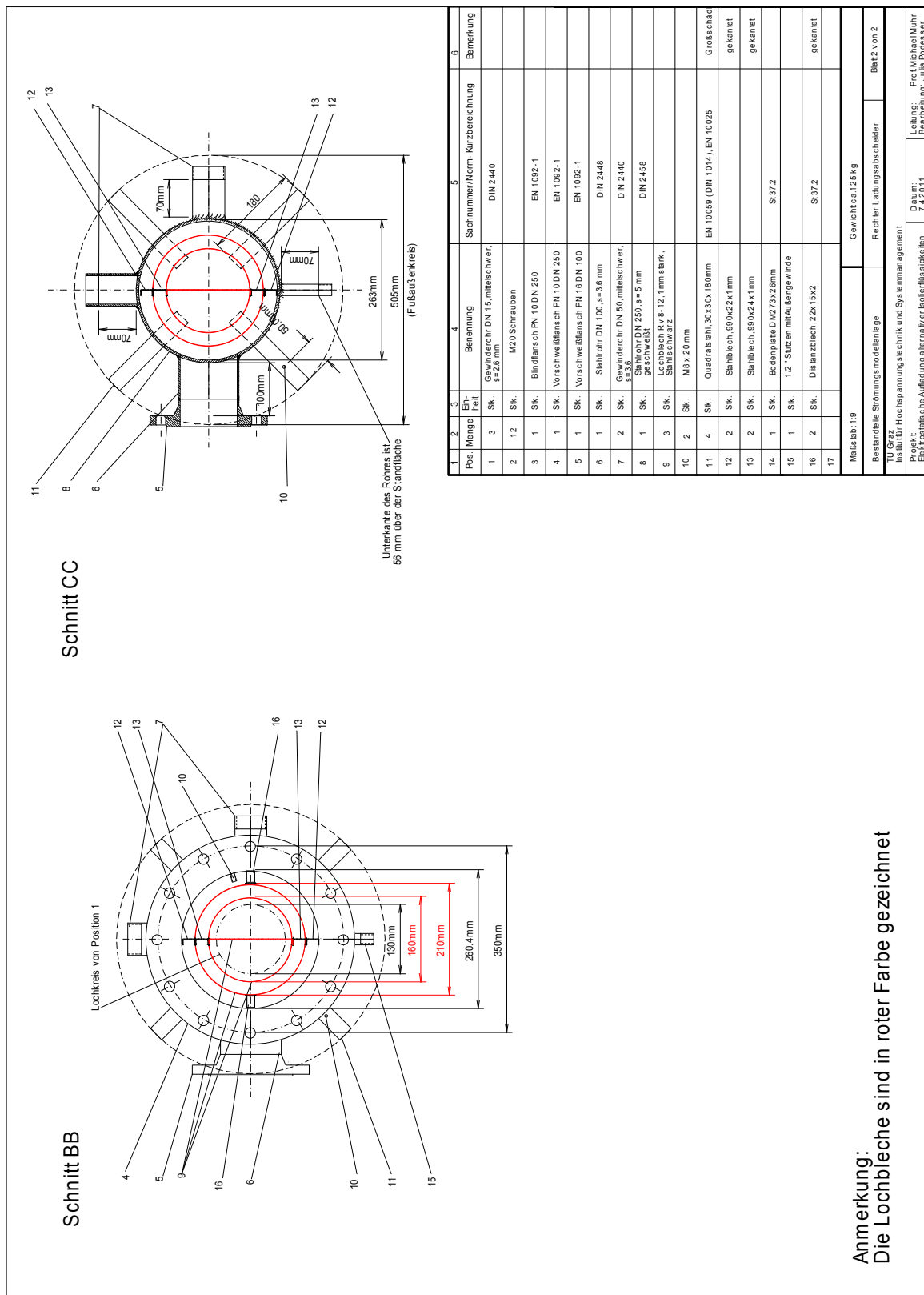


Abbildung A-4: Konstruktionszeichnung Ladungsabscheider 1, Teil 1



Anmerkung:  
Die Lochbleche sind in roter Farbe gezeichnet

Abbildung A-5: Konstruktionszeichnung Ladungsabscheider 1, Teil 2

Ladungsabscheider 2:

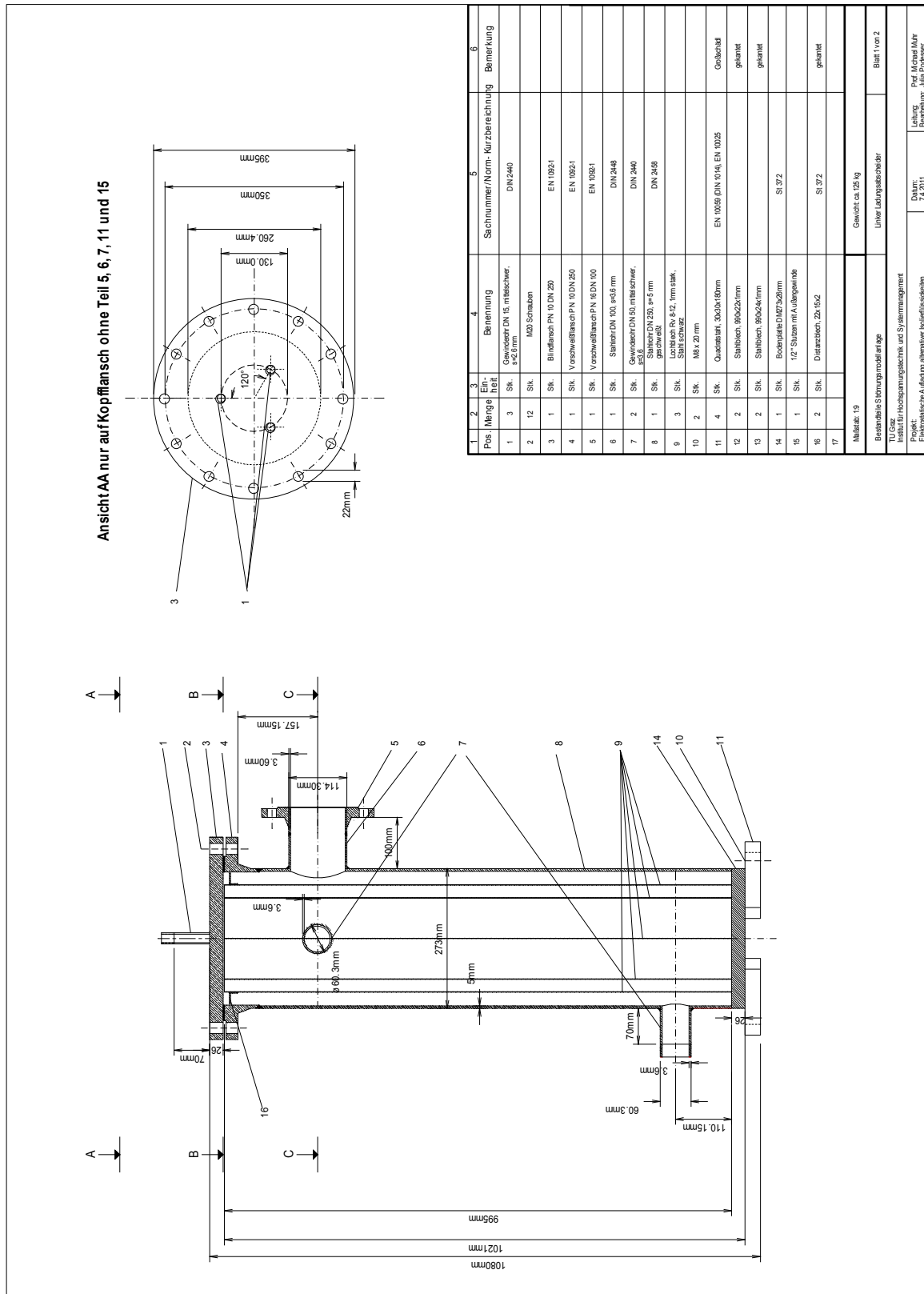
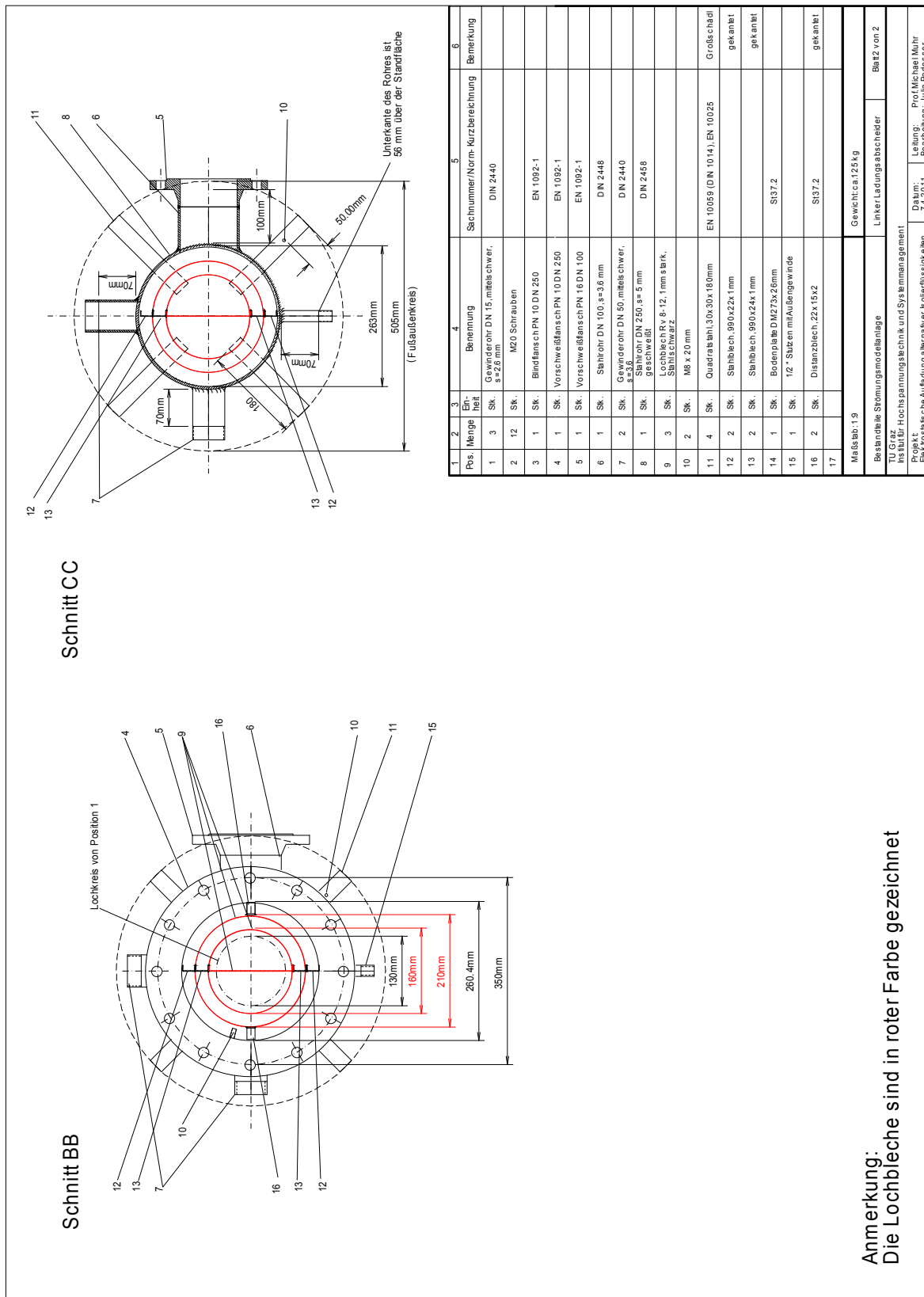


Abbildung A-6: Konstruktionszeichnung Ladungsabscheider 2, Teil 1



Anmerkung:  
Die Lochbleche sind in roter Farbe gezeichnet

Abbildung A-7: Konstruktionszeichnung Ladungsabscheider 2, Teil 2

Schirmhülle:

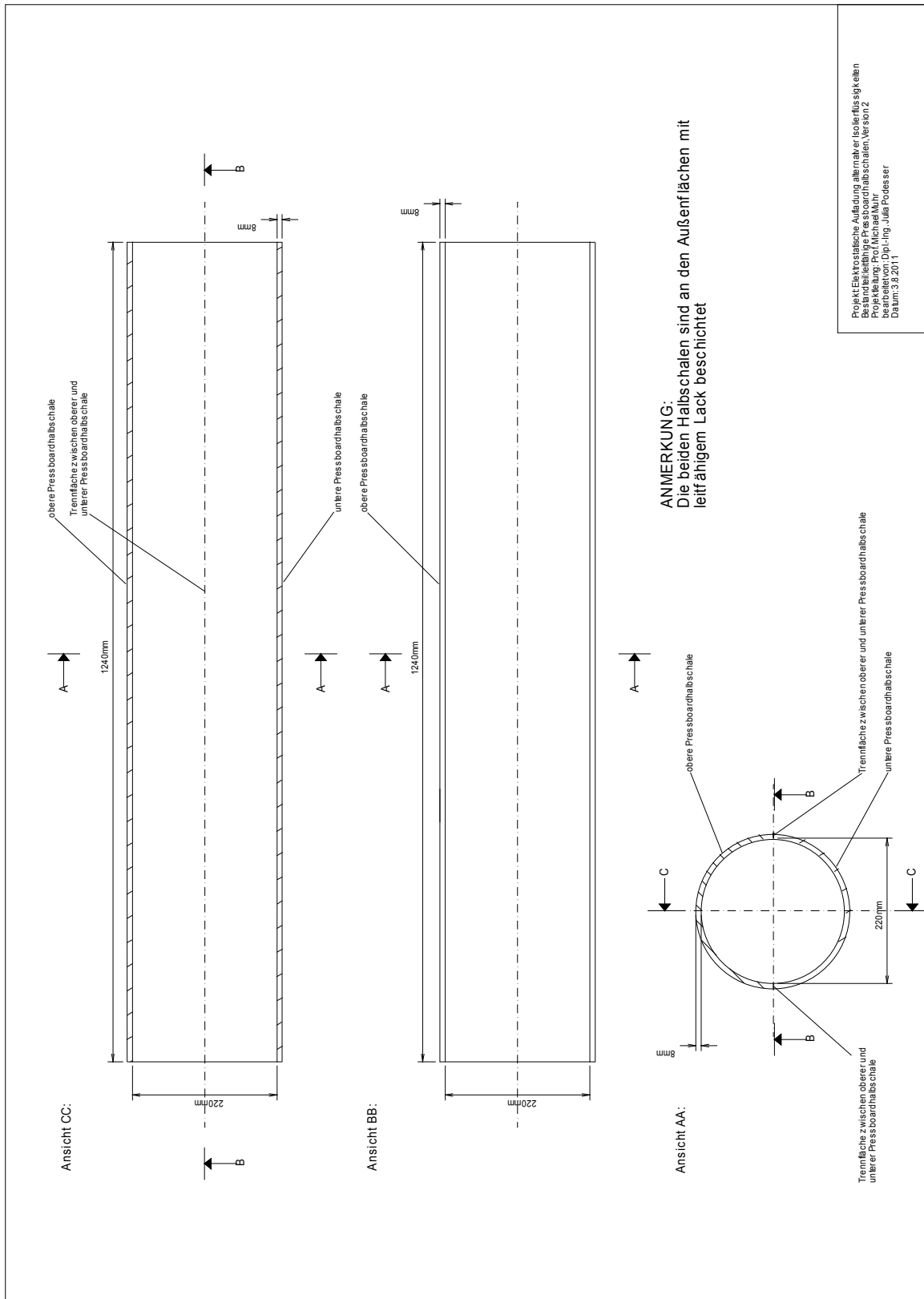


Abbildung A-8: Konstruktionszeichnung Schirmhülle

Umlufthülle:

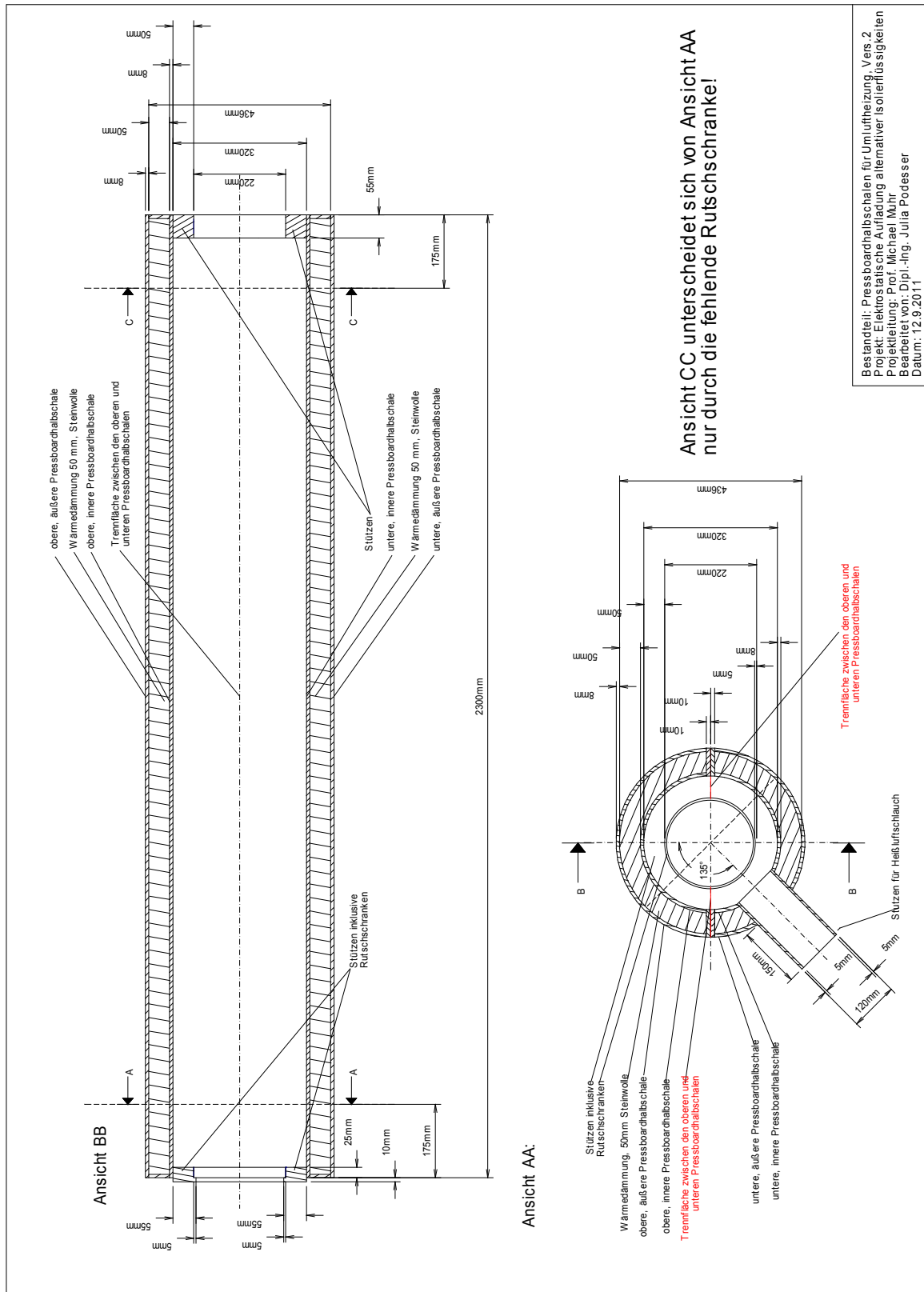


Abbildung A-9: Konstruktionszeichnung Umlufthülle



Elektroverteiler:

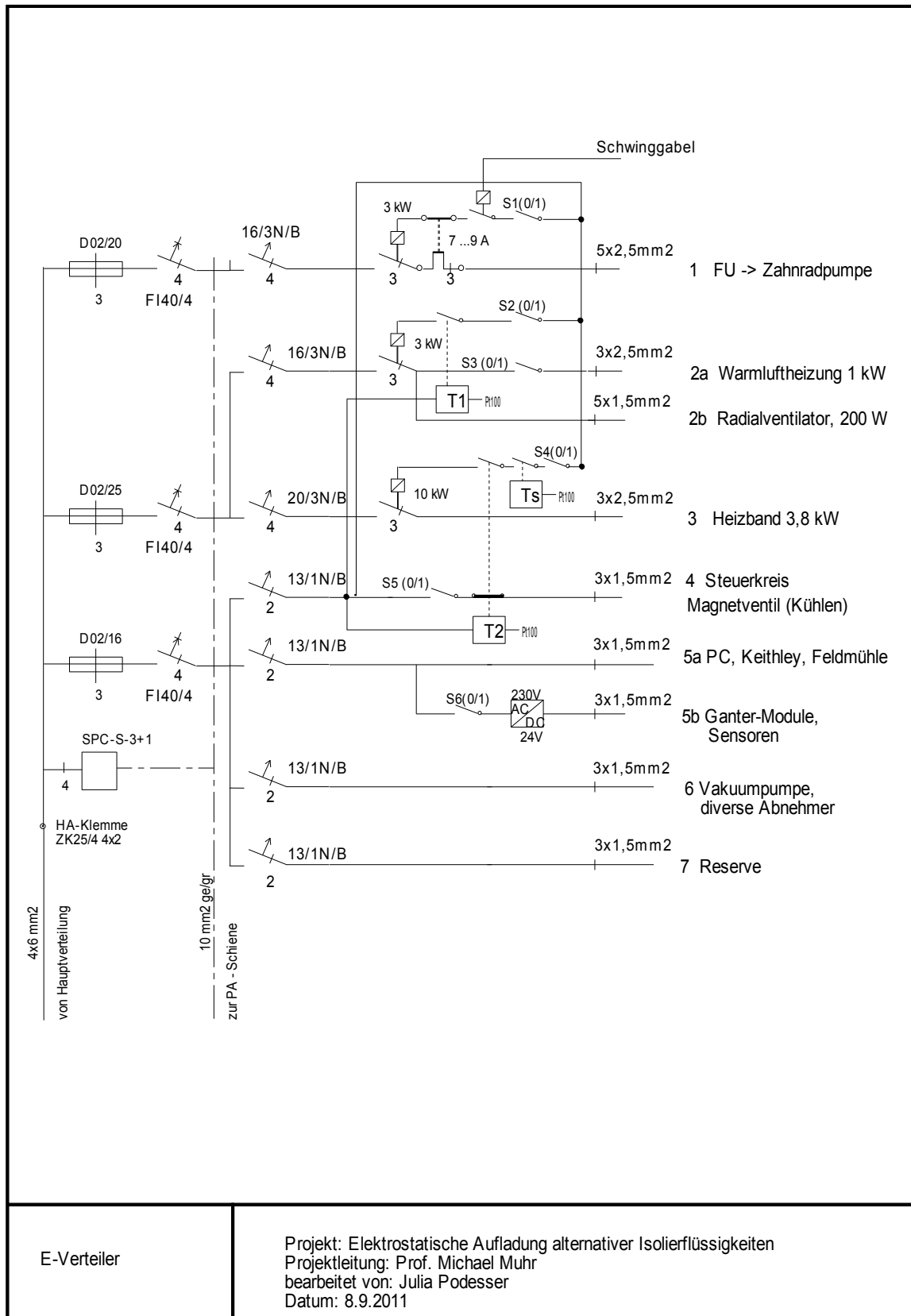


Abbildung A-10: Plan der Elektroinstallation der Strömungsmodellanlage

## Anhang B Zusätzliche Messergebnisse

Die Oberflächenbeschaffenheit der Feststoffe aus den Aufladungsuntersuchungen mit einer *spinning disc* in [Sch14] und [Riz14] wurde am Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik der Technischen Universität Graz vermessen. Die folgenden Abbildungen zeigen den ermittelten Oberflächendatensatz.

### Nomex® 993:

Diese Feststoffprobe wurde in [Sch14] bezüglich elektrostatischer Aufladung vermessen.

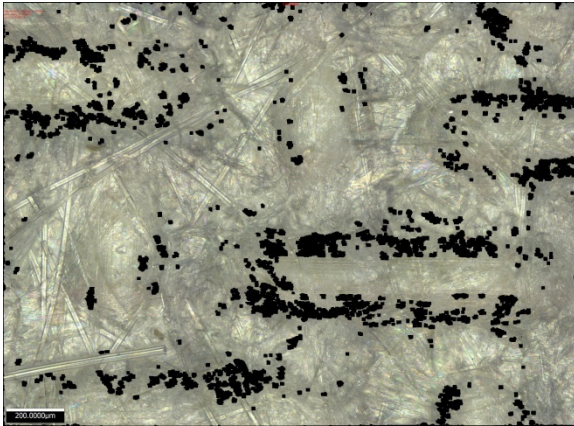


Abbildung B-1: Echtfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Nomex® 993

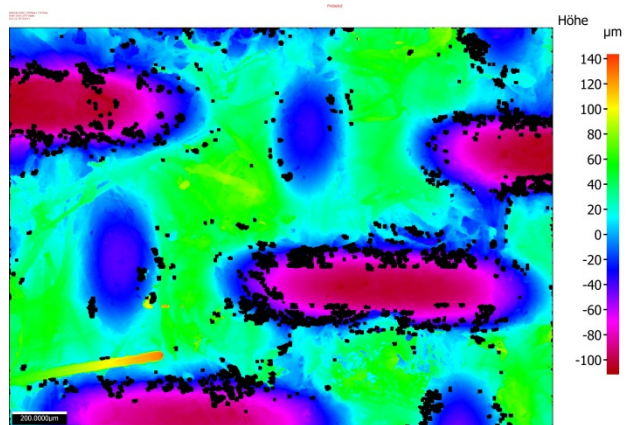


Abbildung B-2: Falschfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Nomex® 993

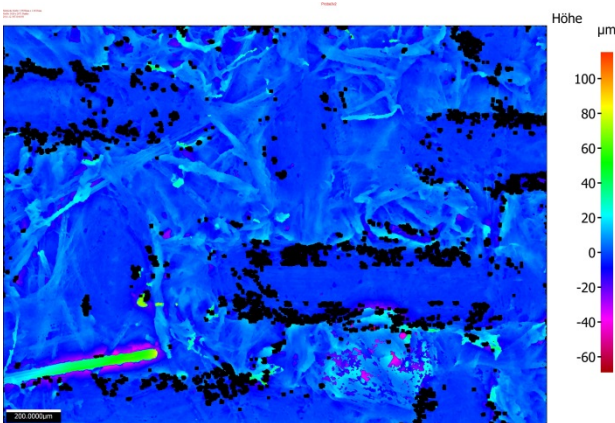


Abbildung B-3: Falschfarbandarstellung des Rauheitsdatensatzes von Nomex® 993,  
 $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$

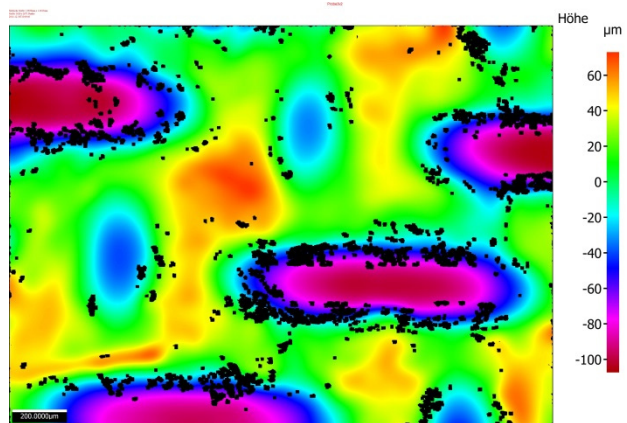


Abbildung B-4: Falschfarbandarstellung des Welligkeitsdatensatzes von Nomex® 993,  
 $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$

Transformerboard B 3.1A, gehobelt:

Diese Feststoffprobe wurde in [Riz14] bezüglich elektrostatischer Aufladung vermessen.

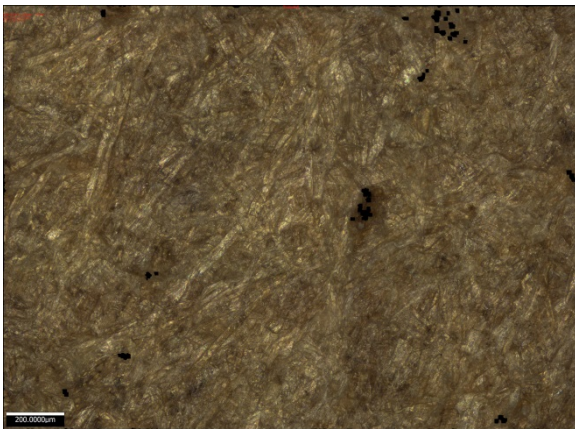


Abbildung B-5: Echtfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Transformerboard B 3.1A, gehobelt

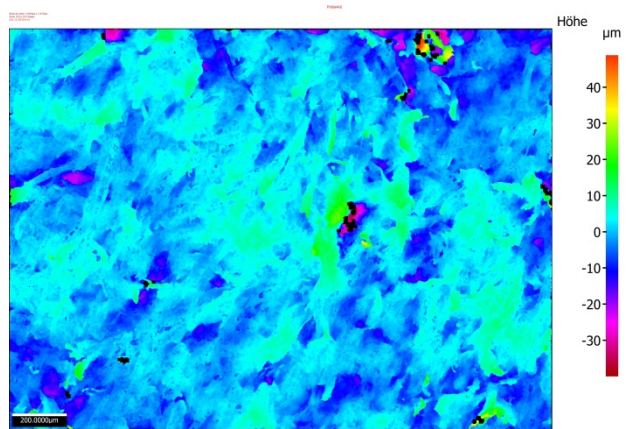


Abbildung B-6: Falschfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Transformerboard B 3.1A, gehobelt

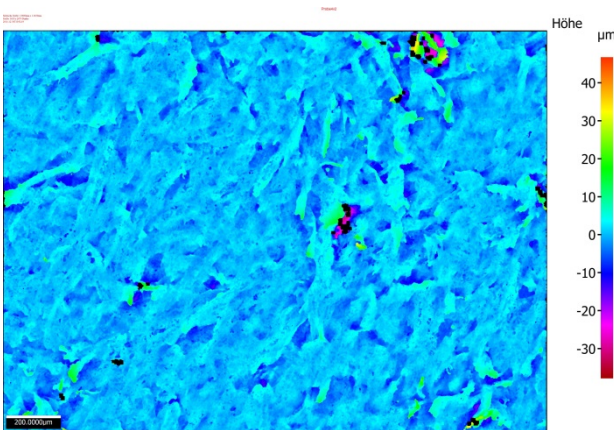


Abbildung B-7: Falschfarbandarstellung des Rauheitsdatensatzes von Transformerboard B 3.1A, gehobelt,  $\lambda_c = 150 \mu\text{m}$

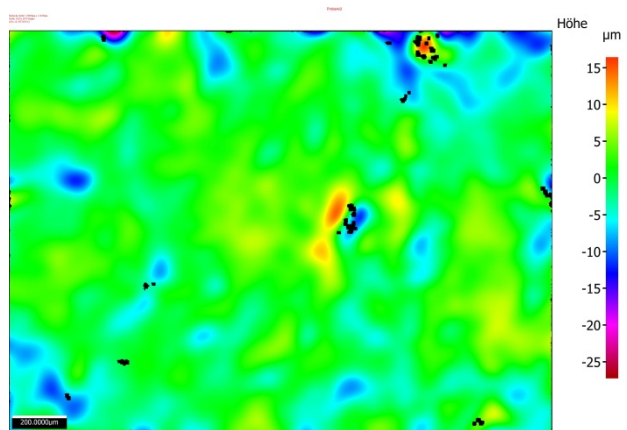


Abbildung B-8: Falschfarbandarstellung des Welligkeitsdatensatzes von Transformerboard B 3.1A, gehobelt,  $\lambda_c = 150 \mu\text{m}$

Nomex® 994, gehobelt:

Diese Feststoffprobe wurde in [Riz14] bezüglich elektrostatischer Aufladung vermessen.

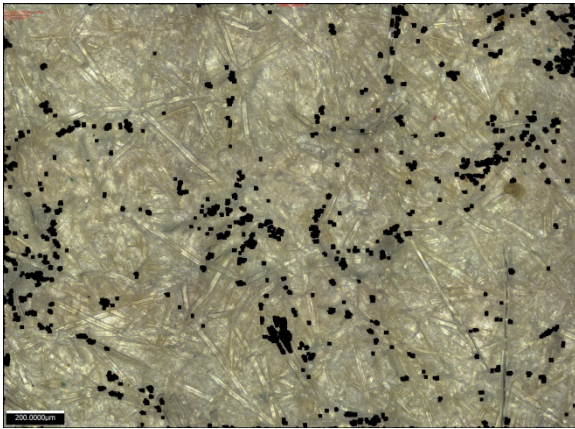


Abbildung B-9: Echtfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Nomex® 994, gehobelt

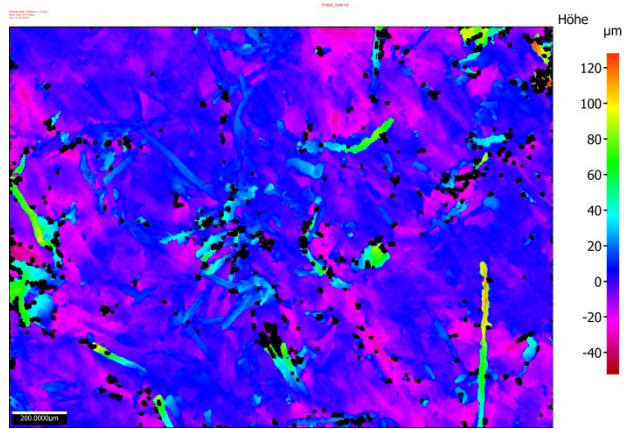


Abbildung B-10: Falschfarbandarstellung des Primärdatensatzes von Nomex® 994, gehobelt

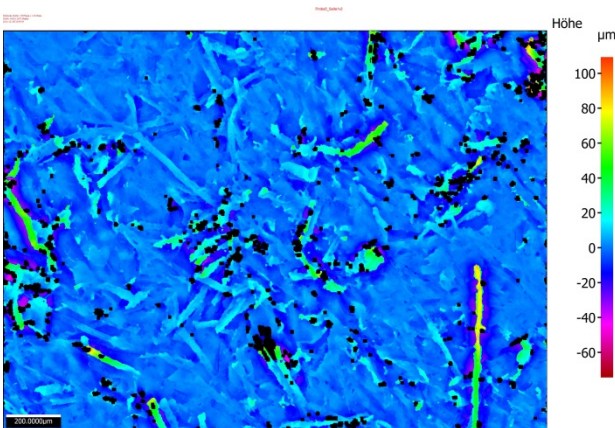


Abbildung B-11: Falschfarbandarstellung des Rauheitsdatensatzes von Nomex® 994, gehobelt,  $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$

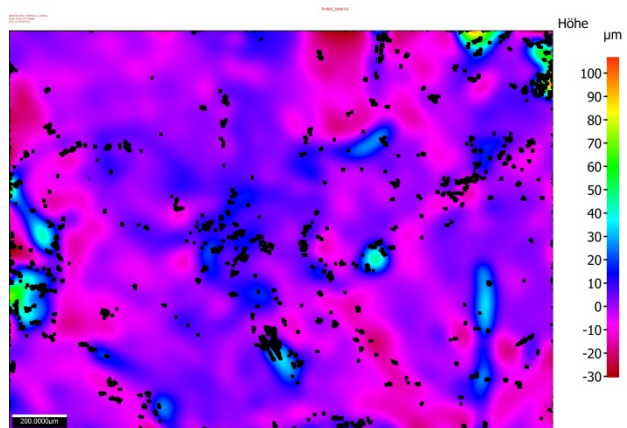


Abbildung B-12: Falschfarbandarstellung des Welligkeitsdatensatzes von Nomex® 994, gehobelt,  $\lambda_C = 150 \mu\text{m}$