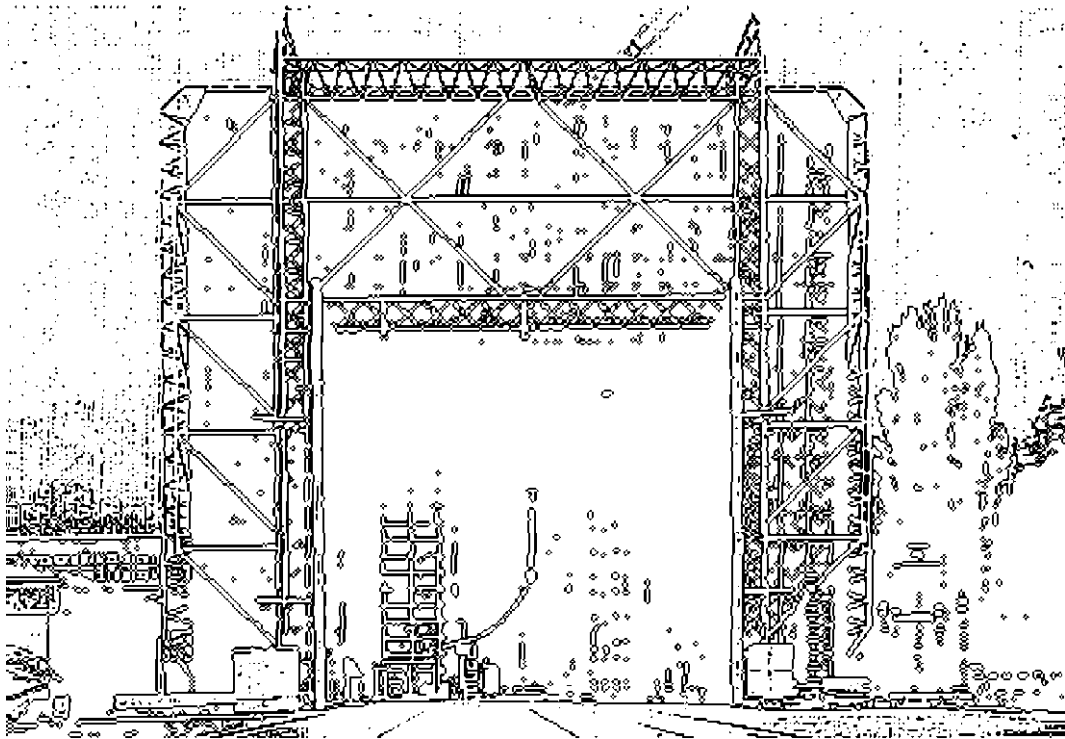


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

**DISSERTATION**



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK  
UND SYSTEMMANAGEMENT



# Dielektrische Kennwerte von Isolierstoffen bei Gleichspannungsbeanspruchung

Leitfähigkeits- und Teilentladungsverhalten von  
mineralischem Isolieröl und Transformer-Board

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

„Doktor der technischen Wissenschaften“

genehmigt von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

an der Technischen Universität Graz

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Jürgen Fabian**

Begutachter:

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

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz

**Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach**

Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Leibniz Universität Hannover

Supervisor:

**Dr.-Ing. Wolfgang Exner**

Weidmann Electrical Technology AG, Rapperswil, Schweiz

Graz, im Mai 2012

## **DIELEKTRISCHE KENNWERTE VON ISOLIERSTOFFEN BEI GLEICHSPANNUNGSBEANSPRUCHUNG**

*Leitfähigkeits- und Teilentladungsverhalten von mineralischem Isolieröl  
und Transformer-Board*

## **DIELECTRIC PARAMETERS OF INSULATING MATERIALS AT HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC)**

*Conductivity and Partial Discharge Behaviour of Mineral Insulating Oil  
and Transformer-Board*

© Jürgen Fabian 2012

Die Buchdeckel dieses Werkes bestehen aus *TRANSFORMERBOARD T I* der werkseigenen Produktion der Firma *WEIDMANN Electrical Technology AG*, Rapperswil, Schweiz.

Die Abkürzung *DC* bezeichnet einen elektrischen Strom, welcher seine Stärke sowie Richtung nicht ändert (Gleichstrom, *engl. direct current*). Synonym dazu verwendet man das Kürzel *DC* ebenfalls für die einen Gleichstrom verursachende Gleichspannung. Analog gilt dies auch für das Akronym *AC* (*engl. alternating current*, Wechselstrom).

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz in Kooperation mit der Firma Weidmann Electrical Technology AG, Rapperswil, Schweiz. Unter anderem konnten durch die Mitarbeit in der Cigré JWG A2/D1.41 (HVDC transformer insulation – Oil conductivity) sowie der Arbeitsgruppe IEC TC 82 WG2 (subgroup partial discharge) wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, welche ebenfalls in dieses Werk einfließen.

Fachliche Unterstützung, Anregungen sowie Motivation sind für die Erstellung einer Dissertation unentbehrlich. Daher ergeht mein herzlicher Dank an alle, welche an der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit Anteil haben.

Mein besonderer Dank gilt an erster Stelle dem Institutsleiter, Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. *Michael Muhr* für die Anregung dieses Themas und seine wertvolle Unterstützung im Verlauf dieser Arbeit. Für seine großzügige und offene Art, wie man es sich von seinem Doktorvater nur wünschen kann, danke ich in ganz besonderer Weise. Vor allem bedanke ich mich für die Zeit beratender Gespräche, welche ganz nach dem Motto „Wissenschaft kennt keine Wochenenden“ jeden Sonntagvormittag stattfanden.

Großer Dank ergeht an Herrn Prof. Dr.-Ing. *Ernst Gockenbach*, Leiter des Fachgebietes Hochspannungstechnik am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik (Schering-Institut) an der Leibniz Universität Hannover, für die freundliche Übernahme der Begutachtung und sein Interesse an dieser Dissertation.

Darüber hinaus bedanke ich mich für die großzügige finanzielle Unterstützung durch die Firma Weidmann Electrical Technology AG, namentlich bei Herrn Vizpräsident Dr.-Ing. *Wolfgang Exner*, dessen Anregungen und Ideen stets förderlich und hilfreich beigetragen haben. Durch ihn wurde es mir ermöglicht, dieses hoch spannende Thema aufzugreifen und ausführlich zu behandeln.

Ein großer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. *Stefan Jaufer* für die tatkräftige Mithilfe in Sachen Messtechnik und statistischer Datenauswertung sowie für die Motivation zum Durchhalten auf Durststrecken. Ganz besonders möchte ich die moralische Unterstützung hervorheben, mit welcher er diese Arbeit förderte und mir jederzeit hilfreich zur Seite stand.

Herrn Dipl.-Ing. *Christoph Krause* möchte ich für seine ziel- und lösungsorientierten Vorschläge sowie für seine fachliche Unterstützung meinen herzlichen Dank aussprechen. Sein fundiertes Wissen sowie seine Ratschläge waren stets willkommen!

Weiters gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. *Ugo Piovan*, Trafoexperts GmbH, für seine Unterstützung. Dear Ugo, thanks a lot for everything, especially for teaching me always to ask open questions as well as that hope and engineering doesn't fit together.



I specially want to express my deepest gratitude to all members of the Cigré working group JWG A2/D1.41 [JWG A2/D1.41] for their valuable support and help. Dem Convenor dieser Arbeitsgruppe, Herrn Prof. Dr.-Ing. *Andreas Küchler*, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, möchte ich für die kompetenten Ratschläge, welche die Arbeit stets vorantrieben, aufrichtig danken.

Meinen Beratern in allen chemischen Fragen, Herrn Dipl.-Ing. *Hans Peter Gasser* (Weidmann Electrical Technology AG), Herrn *Stefan Müller*, MSc (Institut für Anorganische Chemie, Technische Universität Graz) sowie Herrn Dipl.-Ing. *Ernst Pagger* (Verbund Umwelttechnik GmbH) sei neben ihren fachlichen Ratschlägen für ihre unverwüsthliche gute Laune gedankt, mit welcher sie mir die Technische Chemie näher bringen konnten.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. *Robert Schwarz*, Siemens Transformers Austria, welcher durch seine wertvolle Beratung und sein Engagement ebenso zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen hat.

Ebenfalls darf ich allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes danken, welche sich durch anregende Gespräche und zahlreiche Diskussionen in diese Arbeit eingebracht haben. Nicht unerwähnt bleiben sollen auch alle Studierenden, welche ich auch sehr gerne zu meinem Freundeskreis zähle, die im Rahmen ihrer hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten sowie Diplomarbeiten zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen und mich unterstützt haben. Namentlich seien hier (in alphabetischer Reihenfolge) Herr Dipl.-Ing. *Christian Auer*, Herr *Franz Holzinger*, BSc, Herr *Bernhard Jocham*, Herr *Bernhard Nader*, BSc, Herr *Alexander Pirker*, Herr Dipl.-Ing. *Jürgen Plesch*, Herr *Philipp Pretis*, BSc, Frau *Angelika Straka*, BSc, Herr *Michael Tieber*, BSc sowie Frau *Bettina Wieser* genannt.

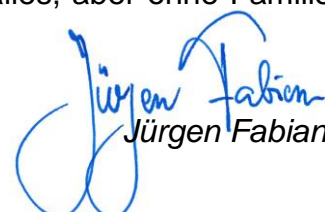
Danken möchte ich an dieser Stelle Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. *Wolfgang Bauer* und seinem Team für die offene und herzliche Aufnahme im Rahmen des Universitätslehrganges Pulp and Paper Technology – in die für Elektrotechniker fachfremde Welt – am Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik.

Ebenso möchte ich Herrn Ing. *Hartmuth Schröttner*, Institut für Elektronenmikroskopie und Feinstrukturforschung (FELMI-ZFE), für seine Unterstützung bei den raster-elektronenmikroskopischen Untersuchungen und für den Einblick in die atomare Welt danken.

Für die kritische Durchsicht der Arbeit aus der Sicht einer Germanistin bedanke ich mich sehr bei Frau Mag. *Jutta Ritsch*. Ebenfalls danken möchte ich für die unzähligen Korrekturen meiner internationalen Publikationen in englischer Sprache Frau Mag. *Katharina Barth*.

Meiner Familie danke ich in ganz besonderem Maße für den Rückhalt, die moralische Unterstützung und ihre Liebe, mit der sie immer für mich da war und ist. Sie gaben mir die nötigen Wurzeln und Flügel. Familie ist nicht alles, aber ohne Familie ist alles nichts.

Graz, im Mai 2012



Jürgen Fabian  
Jürgen Fabian





**Meiner Familie gewidmet.**



## Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am 02.04.2012

  
.....  
Jürgen Fabian

## 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.

April 2<sup>nd</sup>, 2012

  
.....  
Jürgen Fabian



## Kurzfassung

Das Isoliersystem von Leistungstransformatoren wird bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts mit mineralischem Isolieröl imprägnierten Papierisolierungen erfolgreich ausgeführt, seit den 1960er Jahren als geschichtete Öl-Board-Isolierung. Dabei stellt dieses Isoliersystem ein Mischdielektrikum dar, welches aus reinen Ölstrecken, unterteilt durch Board-Barrieren, besteht. Besondere Aufmerksamkeit erfordert bei HGÜ-Stromrichter-Transformatoren die Grenzfläche zwischen Isolieröl und Board wegen des entsprechenden Feldverlaufs und der entstehenden Grenzflächenpolarisation. Je nach Topologie des Konverters wird das Isoliersystem eines Transformators mit einer Mischgröße (Wechselspannung mit Gleichanteil) beansprucht. Das elektrische Feld bildet sich im Falle von Wechselspannung entsprechend der Dielektrizitätskonstanten der verwendeten Isoliermaterialien aus und stellt ein quasistationäres Verschiebungsfeld dar. Die relativen Permittivitäten bleiben über die gesamte Lebensdauer eines Transformators praktisch unverändert.

Bei einer Beanspruchung mit Gleichspannung bestimmen die Leitfähigkeiten der Isoliermaterialien die Feldverteilung, wobei es sich hierbei um ein stationäres Strömungsfeld handelt. Anforderungen an den Bau von HGÜ-Stromrichter-Transformatoren ergeben sich aus der Tatsache, dass sich die Leitfähigkeit während des Betriebs durch kontinuierliche Alterung und Verfeuchtung deutlich verändern kann. Dies wirft die Frage auf, welche Aussagekraft eine bestandene Werksprüfung im Neuzustand des Stromrichtertransformators aufweist.

Die „IEC-gerechte“ Teilentladungsdiagnose nach genormten Verfahren dient zur Qualitätssicherung elektrischer Betriebsmittel. Die Analyse der Teilentladungsmessungen basiert bei Wechselspannung primär auf der Interpretation von so genannten phasenaufgelösten Fingerprints. Handelt es sich jedoch bei der Prüfspannung um eine Gleichspannung, so fehlt die Phaseninformation, und eine Bewertung muss über ein definiertes Zeitintervall erfolgen. Für weiterreichende Untersuchungen sind neue daher Ansätze und Interpretationsverfahren zu suchen, welche auch einzelne Teilentladungsereignisse von externen Störungen unterscheiden können. Hauptaugenmerk wird auf die elektrische Messung von Teilentladungen gelegt, da nur diese Methode kalibrierbar ist.

Inhalt dieser Dissertation sind praktische Messungen von Teilentladungsvorgängen sowie die experimentelle Untersuchung des Leitfähigkeitsverhaltens von Öl-Board-Isoliersystemen bei Gleichspannungsbeanspruchung. Daraus folgt eine Empfehlung für die zweckmäßige Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit sowie zur Teilentladungsmessung bei hoher Gleichspannungsbeanspruchung.

## Schlüsselwörter:

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), Stromrichtertransformator, Gleichspannung, Mischspannung, Leitfähigkeit, Teilentladung, Öl-Board-Isoliersystem



## Abstract

Since the beginning of the last century the insulation system of power transformers has been built up successfully with oil-impregnated cellulose, and since the 1960's as layered oil-board-insulation. The oil-board-insulation represents a hybrid system consisting of oil-filled gaps divided by board barriers. Because of the specific field distribution within converter transformers and resulting polarization effects, a special focus must be set on the insulation interfaces of oil and board.

According to the different converter types, the insulation system is stressed with pulsating currents (alternating current with direct current component). In the case of AC, the electric field distributes in accordance with the materials dielectric constants and represents a quasi-stationary displacement field. However, relative permittivities are not changing over the lifetime of a transformer and remain almost constant.

If stressed with DC, the materials conductivities are dominant and therefore influence the field distribution. The resulting field distribution is known as a steady-state flow field. The DC behaviour in insulating systems differs significantly from AC behaviour and is much more challenging for the design engineer to master. Due to the fact that material properties determine the field distribution to a large extent, it is essential to have detailed knowledge about the materials parameters and its factors of influence. This raises the question of the significance of the acceptance test of new transformers.

The "IEC-conform" measurement of partial discharges according to the standard is used to guarantee the quality and safety of any electrical equipment. The analysis of partial discharge measurements at AC is based on the interpretation of so-called phase-resolved fingerprints. However, if the test voltage is DC, the information about the phase angle is missing. Therefore, an evaluation has to be done over the measuring time. Further investigations acquire new interpretation methods, which also distinguish partial discharges from the test object from external disturbances. A special focus was set on the electrical measurement method, as this is the only method which can be calibrated.

This thesis deals with practical measurements of partial discharge mechanisms as well as experimental investigations of conductivity changes within the oil-board-insulation system at DC stress. Hence, a recommendation how to appropriately determine the electrical conductivity and partial discharges at DC stress is made.

### Keywords:

High Voltage Direct Current (HVDC), converter transformer, direct current, pulsating current, conductivity, partial discharge, oil-board-insulation system





## Resumen

Desde los comienzos del siglo 20 la forma principal del aislamiento de los transformadores de alta potencia se hizo eficientemente de “oil-impregnated cellulose,” (celulosa impregnada con aceite) y desde los años 60 como “layered oil-board-insulation”(aceite estratificado por separación de placas de celulosa). Este aceite estratificado por separación de board representa un sistema dieléctrico híbrido de capas de aceite y de board de los transformadores de convertidores de enlace de corriente, por medio de la distribución del campo y la formación de la polarización del límite.

Según la topología del convertidor, el aislamiento de un transformador está aplicado a una mezcla de tensiones (tensión alterna con un componente de tensión directa). En el caso de tensión alterna, el campo eléctrico se forma dependiendo de la constante dieléctrica de los materiales y ofrece un campo de desplazamiento cuasi-estacionario. Las permisividades relativas están prácticamente sin cambios a lo largo de la vida de un transformador.

Cuando hay una tensión continua aplicada, la conductividad de los materiales aislantes determina el esparcimiento del campo, siendo aquí un campo estacionario. Los requisitos para la construcción de transformadores de convertidores de enlace de corriente, surgen del hecho de que la conductividad puede cambiar durante la operación de manera significativa a través de la humedad y envejecimiento continuo. Esto crea la interrogante sobre qué significado tiene la inspección del transformador del convertidor aprobado en el estado nuevo.

Los resultados del “IEC-conform” pronostican las descargas parciales de acuerdo con los estándares de procedimiento, son utilizados para garantizar la calidad de los equipos eléctricos. El análisis de las medidas de descargas parciales para tensión alterna tiene su base en la interpretación de la denominada “phase-resolved fingerprints”. Sin embargo, si la tensión del voltaje examinado es una tensión continua, la información de la “phase angle” (fase angular) falta y debe llevarse a cabo una evaluación en un intervalo de tiempo definido. Esto significa que para estudios más amplios es necesario buscar nuevos métodos de interpretación que puedan separar eventos de descargas parciales de las perturbaciones externas. El énfasis principal se pone en la medida eléctrica de descargas parciales, ya que sólo este método se puede calibrar.

El contenido de esta tesis son las medidas prácticas de los procesos de descarga parcial y la investigación experimental de los cambios de conductividad en el sistema de aislamiento de aceite y board en condiciones con tensión directa. Le sigue una recomendación para la determinación correcta de la conductividad eléctrica; así como para la medida de descargas parciales en condiciones con tensión directa.

### Palabras clave:

Enlace de alta tensión continua (HVDC), transformador de convertidor de corriente, tensión continua, conductividad eléctrica, descarga parcial, aceite de aislamiento, sistema de aislamiento de aceite



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund und Motivation der Arbeit	1
1.2	Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit	1
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Technologieentwicklung</b>	<b>3</b>
2.1	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)	4
2.2	Isoliersysteme von HGÜ-Stromrichter-Transformatoren	7
<b>3</b>	<b>Dielektrisches Verhalten der Öl-Board-Isolierung bei Gleichspannungsbeanspruchung</b>	<b>9</b>
3.1	Gegenüberstellung Wechsel- zu Gleichspannungs-beanspruchung	9
3.2	Statische, stationäre und quasistationäre elektrische Felder in Isolierstoffen	11
3.3	Statische, stationäre und quasistationäre elektrische Felder in mehrlagigen, geschichteten Isolierstoffen	12
<b>4</b>	<b>Leitfähigkeitsuntersuchungen bei hoher Gleichspannung</b>	<b>17</b>
4.1	Anwendungsfeld und Ziele der Leitfähigkeitsmessung	17
4.2	Stand der Normung	17
4.3	Theoretische Grundlagen von Leitfähigkeitsmechanismen	23
4.4	Leitfähigkeit in flüssigen Isolierstoffen	26
4.5	Bestimmung der Ölleitfähigkeit gemäß Cigré JWG A2/D1.41	31
4.6	Leitfähigkeit in festen Isolierstoffen	35
4.7	Leitfähigkeit des Öl-Board-Isoliersystems	41
4.8	Messaufbau und Versuchsplanung	43
<b>5</b>	<b>Teilentladungsdiagnose bei hoher Gleichspannung</b>	<b>47</b>
5.1	Anwendungsfeld und Ziele der Teilentladungsmessung	47
5.2	Stand der Normung	48
5.3	Theoretische Grundlagen von Teilentladungen	48
5.4	Wirkung und Diagnosegrößen von Teilentladungen	54
5.5	Verhalten von Teilentladungen bei Wechsel- und Gleichspannung	55
5.6	Elektrische Messung nach IEC 60270	60
5.7	Messaufbau und Versuchsplanung	62
<b>6</b>	<b>Resümee und Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>71</b>
6.1	Leitfähigkeitsmessungen von Isolieröl	71
6.2	Leitfähigkeitsmessungen von Board	72
6.3	Teilentladungsverhalten von Isolieröl	74
6.4	Teilentladungsverhalten von Board	75
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>77</b>
7.1	Weiterführende Untersuchungen	79



---

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>81</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>84</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>Anhang A: Leitfähigkeitsmessungen von Isolieröl</b>	<b>95</b>
A1. Round Robin Test Cigré JWG A2/D1.41	95
A2. Leitfähigkeitsmessungen mittels Tettex Messzelle	104
A3. Einfluss des Wassergehalts auf den spezifischen Widerstand mittels Ölprüfgerät BAUR DTL	108
<b>Anhang B: Leitfähigkeitsmessungen von Board</b>	<b>111</b>
B1. Transformerboard T I	112
B2. Transformerboard T IV	114
B3. Pressspan TD 12	116
B4. Nomex Type 994	118
<b>Anhang C: Teilentladungsmessungen unter Isolieröl</b>	<b>121</b>
C1. Hohe Wechselspannung	121
C2. Hohe Gleichspannung	128
<b>Anhang D: Teilentladungsmessungen Öl-Board-Gleitanordnung</b>	<b>141</b>
D1. Hohe Wechselspannung	141
D2. Hohe Gleichspannung	148
<b>Anhang E: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen</b>	<b>161</b>
E1. Materialanalyse mittels ZEISS DSM 982 Gemini	161
E2. Topologie-Analyse mittels Zeiss Ultra 55	163
E3. Spezifikation der Rasterelektronenmikroskope	174
<b>Anhang F: Datenblätter</b>	<b>177</b>
F1. Nynas Nytro 4000X	177
F2. Shell Diala S3 ZX-I	178
F3. Shell Diala S3 ZX-IG	179
F4. Transformerboard T I	180
F5. Transformerboard T IV	181
F6. Pressspan TD 12	182
F7. Nomex Type 994	183
<b>Anhang G: Geräteverzeichnis</b>	<b>185</b>
G.1 Leitfähigkeitsmessungen für Isolieröl	185
G.2 Leitfähigkeitsmessungen für Board	186
G.3 Teilentladungsmessungen	187
<b>Über den Autor</b>	<b>189</b>



*„Das größte Problem mit dem Fortschritt: Auch die Nachteile entwickeln sich weiter.“ – Ernst Ferstl (österreichischer Lehrer und Schriftsteller)*

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Motivation der Arbeit

Das Öl-Board-Isoliersystem von Leistungstransformatoren ist seit Jahrzehnten im Einsatz und hat sich auf Grund seiner ausgezeichneten elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften erfolgreich bewährt. Der Trend zu weiterhin höheren Spannungsebenen zur Übertragung großer Mengen elektrischer Energie über sehr weite Distanzen lässt die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) immer attraktiver werden. Hier erfährt das stromrichterseitige Isolationssystem eines HGÜ-Transformators eine erhöhte Beanspruchung, welche sich aus Wechselspannungs- und Gleichspannungskomponenten sowie repetierenden impulsförmigen Spannungsbeanspruchungen zusammensetzt.

Stromrichtertransformatoren bedürfen daher einer speziellen Betrachtung. Entscheidend für die Konstruktion und Dimensionierung eines solchen Transformators sind dessen Materialparameter und Materialeigenschaften. Diese verhalten sich unter Wechselspannung entsprechend den gut bekannten relativen Dielektrizitätszahlen. Bei Gleichspannungsbeanspruchung jedoch sind die elektrischen Felder entsprechend den weniger gut bekannten und zeitlich veränderlichen elektrischen Leitfähigkeiten ausgeprägt.

## 1.2 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Leitfähigkeits- sowie Teilentladungsmessungen sind bereits seit vielen Jahren in Verwendung und werden ständig weiter entwickelt und verbessert. Für Anwendungen mit Wechselspannungen sind die Erscheinungen weitgehend erforscht und interpretierbar. Im speziellen Fall der Gleichspannung gilt dies jedoch nicht. Viele Phänomene, welche unter dem Anliegen von Gleichspannung auftreten, sind bis heute noch nicht vollständig untersucht bzw. verstanden. Dies liegt in der Vielzahl an beeinflussenden Parametern wie beispielsweise der Feuchte sowie Temperatur begründet, welche sich gegenseitig beeinflussen als auch überlagern können.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Messmethode zu finden, welche eine möglichst praxisnahe Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. des Teilentladungsverhaltens unter verschiedenen Einflussparametern ermöglicht. Aus der Vielzahl an durch-

geführten Versuchen soll eine Empfehlung zur zweckmäßigen Charakterisierung der Isolierstoffe Mineralöl und Board erfolgen<sup>1</sup>.

Für die Messung der Leitfähigkeit wurden Langzeitmessungen von 24 Stunden durchgeführt, da auf die Bestimmung des stationären Endwertes sowie auf den zeitlichen Verlauf der Leitfähigkeit besonderer Wert gelegt wurde. Bei mineralischem Isolieröl wurden lediglich Polarisationsstrommessungen durchgeführt, da auf Grund der geringen Polarisierbarkeit von Flüssigkeiten kein wesentlicher Depolarisationsstrom zu erwarten ist. Für feste Isolierstoffe, wie z. B. Transformerboard<sup>2</sup>, wurde zusätzlich zum Polarisierungsstrom auch der Depolarisationsstrom (PDC-Analyse) über eine Zeitdauer von 24 Stunden gemessen. Weiterführend zur PDC-Analyse kam die so genannte Charge Difference Method (CDM) zum Einsatz, um hier zusätzliche Schlussfolgerungen ableiten zu können.

Zur Untersuchung des Teilentladungsverhaltens bei Isolieröl auf Mineralölbasis sowie bei einer Öl-Board-Gleitanordnung wurden neben der elektrischen Messung ebenfalls eine optische Detektion der Teilentladungen und eine rasterelektronenmikroskopische Vermessung der Elektroden vor und nach der Versuchsdurchführung vorgenommen. Als charakteristische Werte zur Teilentladungsinterpretation wurden die Teilentladungseinsetz- und Teilentladungsaussetzspannung sowie der NQS-Wert (kumulierter scheinbarer Ladungswert bezogen auf die Zeit, energetische Betrachtung) herangezogen.

Einflussparameter, wie die elektrische Feldstärke, der Feuchtegehalt, die Temperatur sowie der Board-Typ, welche die elektrische Leitfähigkeit bzw. das Teilentladungsverhalten verändern können, wurden vielfältig variiert und während den Versuchen durchgehend mitprotokolliert, um zu gewährleisten, dass sich innerhalb der Versuchsdauer relevante Umgebungsbedingungen nicht verändert haben. Für diese Arbeit wurden ausschließlich neuwertige Isoliermaterialien verwendet, wobei ein signifikanter Alterungsprozess<sup>3</sup> auf Grund der sowohl verhältnismäßig kleinen Belastung als auch kurzen Beanspruchungszeit ausgeschlossen werden kann.

---

<sup>1</sup> Leistungstransformatoren, welche mit SF<sub>6</sub>-Isoliergas (vorwiegend in Japan) betrieben werden, sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

<sup>2</sup> Transformerboard ist der eingetragene Markenname der Firma WEIDMANN

<sup>3</sup> Charakteristische Änderungen des Verlustfaktors bzw. der Farbzahl des Isolieröls konnten nicht beobachtet werden.



*„Ein Lächeln kostet weniger als Elektrizität und bringt mehr Licht.“*  
Abbé Pierre (französischer katholischer Priester)

## 2 Stand der Technik und Technologieentwicklung

Zurzeit befindet sich die Elektrizitätsversorgung Europas im umfassendsten Wandlungsprozess seit ihrem Aufbau. Aus diesem derzeitigen Wandel nach technischen, wirtschaftlichen, politischen, gesellschaftlichen sowie ökologischen Gesichtspunkten ergeben sich neue Herausforderungen an die Stromversorgung der Zukunft. Als Grund dafür sind der ansteigende internationale Stromhandel, die zunehmende Einspeisung dezentraler Erzeugungsanlagen, besonders von dargebotsabhängigen Windkraftwerken, wie auch die langwierigen Genehmigungsverfahren für neue Übertragungsleitungen aufzuzählen. Durch die voranschreitende Industrialisierung nimmt der Bedarf an elektrischer Energie weiterhin zu, wobei allerdings mit der Endlichkeit von fossilen Rohstoffen ein Umdenken in Richtung umweltfreundlicher und erneuerbarer Ressourcen zur Energieumwandlung stattfindet. Überdies wird durch politische Entscheidungen hinsichtlich der voranschreitenden Liberalisierung des Strommarktes sowie des nachhaltigen Klimaschutzes die Situation noch weiter verschärft.

Um alle Anforderungen an die Elektrizitätsversorgung, elektrische Energie sicher, ausreichend, kostengünstig und umweltfreundlich zu liefern, zu bewerkstelligen, erscheint eine mit einem Netzausbau einhergehende Netzoptimierung langfristig Erfolg versprechend zu sein. Dazu müssen durch den ständig ansteigenden Energiebedarf neben einer ausreichenden Energieerzeugung ebenso genügend Übertragungskapazitäten bereitgestellt werden. Deswegen sind sowohl der weitere Ausbau des Übertragungsnetzes als auch eine optimierte Netzregelung unerlässlich, um Versorgungsengpässe und die Überlastung von Übertragungsleitungen sowie von Transformatoren zu vermeiden.

Zur Zielsetzung der Netzbetreiber, diesen oben genannten Einschränkungen abzu- helfen, können kurz- bis mittelfristig sowohl Phasenschiebertransformatoren als auch leistungselektronische Steuerungsgeräte wie FACTS (Flexible AC Transmission Systems) und die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) eingesetzt werden. Sowohl für die Übertragung großer Energien über weite Entfernungen (> 1000 km) als auch für Seekabelanwendungen hat sich die HGÜ bereits weltweit bewehrt (siehe Abb. 2.1, Seite 4) [FAB10<sup>1</sup>], [OED04], [SCH06].

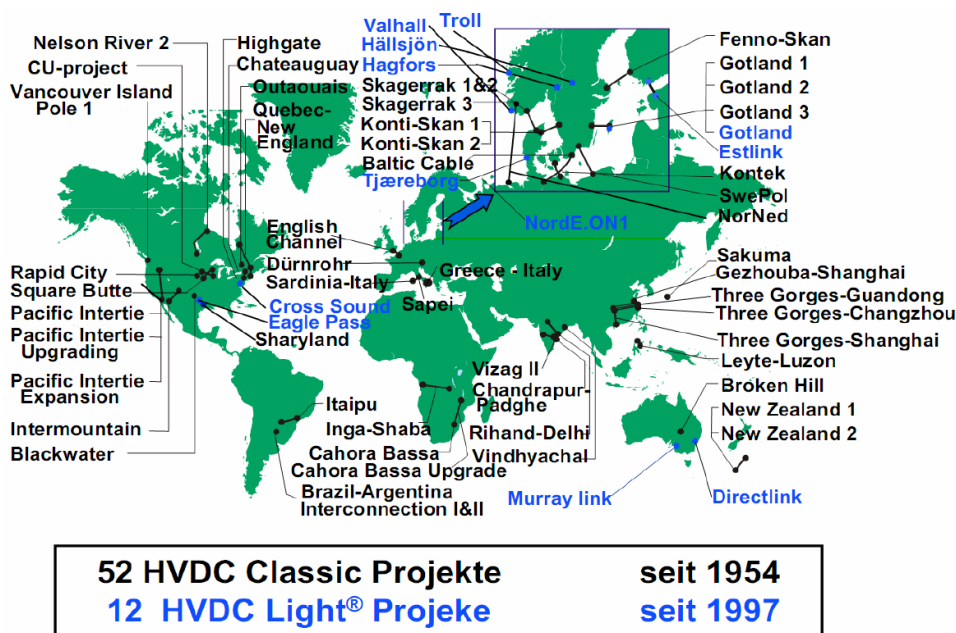


Abb. 2.1: HGÜ-Projektbeispiele<sup>4</sup> weltweit, Stand 2009, aus [STA09]

In diesem Zusammenhang sei hier das Konzept eines so genannten „*Supergrid*“ angeführt, welches die beiden Technologien Solaranlagen („*Desertec*“) bzw. Offshore-Windenergie und HGÜ vereint. Dieses Supergrid – ein Synonym für zukünftige transeuropäische Übertragungsnetze – macht es europäischen Ländern möglich, sowohl multilateralen Energiehandel zu betreiben als auch erneuerbare Energien aus Europa nachhaltig zu nutzen. Als langfristiges Ziel lässt sich eine Entwicklung zu einem „*smarten Gesamtsystem*“, in technischer wie wirtschaftlicher Hinsicht, abzeichnen. Es ist daher künftig mit einem zunehmenden Trend von HGÜ-Anlagen zu rechnen [DES03], [FAB10<sup>1</sup>].

## 2.1 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Vor über 50 Jahren wurde die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung mit der Motivation einer hohen Energieeffizienz entwickelt, da die Übertragungsverluste bei Gleichstrom geringer sind, verglichen mit jenen bei Wechselstrom gleicher Übertragungsleistung. Ausschlaggebend für diese Technologie sind die niedrigeren Energie-transportkosten sowie die gute Netzstabilität, wohingegen bei langen Wechselspannungsfreileitungen erhöhte Stromwärmeverluste infolge des Skin-Effektes sowie Stabilitätsprobleme auftreten können.

Der im englischen Sprachraum verwendete Begriff lautet HVDC, eine Abkürzung für *High Voltage Direct Current*.

<sup>4</sup> „HVDC Light®“ ist der Markenname der Firma ABB, während „HVDC Plus“ die Bezeichnung der Firma Siemens AG ist.

### 2.1.1 Aufbau und Komponenten von HGÜ-Anlagen

Ausgeführt wird die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung grundsätzlich als Punkt-zu-Punkt-Verbindung, bestehend aus zwei Kopfstationen, welche als Vier-Quadranten-Stromrichter aufgebaut sind. Wahlweise können je nach Lastflussrichtung die Vier-Quadranten-Stromrichter als Gleichrichter oder Wechselrichter betrieben werden. Sie sind zur Verringerung der Welligkeit aus jeweils zwei gesteuerten 6-Puls-Brücken aufgebaut, womit sich ein 12-pulsiger Stromrichter ergibt. Bei netzgeführten Stromrichtern mit Thyristorventilen verwendet man zusätzlich Glättungs-drosseln am Anfang und Ende der Gleichstromleitung, um die Welligkeit des Gleichstromes abzusenken. Ebenfalls dienen die Drosseln der Kurzschlussstrombegrenzung im Fehlerfall auf der Gleichstromleitung. Bei der Ausführung mit IGBTs sind Kondensatoren zur Spannungsglättung notwendig, da hier mit einer eingepprägten Spannung gearbeitet wird. Ergänzend können auf der Gleichstromseite weitere Filter vorgesehen werden. Um Rückwirkungen in Form von Oberschwingungen vom Stromrichter auf das Drehstromnetz gering zu halten, werden Filterkreise auf der Drehstromseite eingesetzt. Beide Kopfstationen sind mittels Gleichstromleitung verbunden, wobei diese symmetrisch (bipolar) oder unsymmetrisch (monopolar) betrieben werden kann.

Die Isolation der Einphasen-Transformatoren, welche den Stromrichtern vorgeschaltet sind, muss für die kombinierte Beanspruchung von Gleich- sowie Wechselfeldern dimensioniert werden. Diese ist durch die Gleichstromvormagnetisierung des Kernes sowie Zusatzverluste von Schaltvorgängen im Eisenkreis stärker belastet. Bei neueren Anlagen bestehen die Stromrichterventile aus der Serienschaltung vieler wassergekühlter Thyristoren mit einer Stromtragfähigkeit von 4 kA bei einer Sperrspannung bis zu 8 kV. Üblicherweise werden mehr Ventile eingesetzt als für die gesamte Sperrspannung notwendig wären, um einen Betrieb nach Ausfall einzelner Ventile bis zur Revision zu ermöglichen [GOC10<sup>2</sup>], [SCH06], [SCH09].

### 2.1.2 Technische Besonderheiten der HGÜ und Stand der Technik

Im eingeschwungenen Zustand erfolgt bei Gleichstrom<sup>5</sup> keine Umladung zwischen magnetischer und elektrischer Energie, welche in den Leitungsinduktivitäten und Leitungskapazitäten gespeichert ist. Deswegen wird bei der HGÜ ausschließlich Wirkleistung übertragen, da unabhängig vom Belastungszustand keine Blindleistung aufgenommen wird. Ferner wird die Übertragungsleistung entsprechend der Differenzspannung zwischen beiden Leitungsenden vorgegeben, d. h. es gibt definitionsgemäß keine natürlich Leistung und somit auch über große Distanzen hinweg keine

---

<sup>5</sup> Praktisch gesehen besteht auch nach der Glättung und Filterung eine gewisse Restwelligkeit.

Stabilitätsprobleme. HGÜ-Systeme können gegenüber der Drehstromübertragung folgende Vorteile bieten:

- der Leistungsfluss einer HGÜ lässt sich exakt und vollständig steuern, womit HGÜ-Leitungen nicht überlastet werden können,
- Netze mit unterschiedlichen Frequenzen können gekuppelt werden,
- ein Netzwiederaufbau (Schwarz-Start) ist möglich (nur mit VSC-Technologie),
- auch über weite Distanzen keine Stabilitätsprobleme,
- bei Gleichstrom gibt es keine Stromverdrängung im Leiter, d. h. der Leiterquerschnitt kann vollständig ausgenutzt werden,
- bei Gleichstrom sind anstelle von drei stromführenden Leitern lediglich zwei (bipolare Ausführung) oder ein Leiter (monopolare Ausführung) notwendig,
- der Isolationsaufwand kann bei Gleichstromkabeln verglichen mit Drehstromkabeln kleiner gehalten werden (Spannungsfestigkeit bei Wechselspannung muss auf den Scheitelwert ausgelegt werden).

Der Transport elektrischer Energie mittels HGÜ macht bei großen Entfernungen nur dann Sinn, wenn sowohl technische als auch wirtschaftliche Vorteile gegenüber der Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung überwiegen. Einerseits müssen die Einsparungen beim Leitungsbau und den Leitungsverlusten verglichen mit den anfallenden Kosten der beiden Stromrichterstationen günstiger sein. Andererseits kann bei Seekabelverbindungen auf Grund der bei Drehstrom auftretenden kapazitiven Ladeleistung bei Übertragungstrecken von mehr als 40 km die Energieübertragung ausschließlich mit Gleichstrom erfolgen (Blindleistungskompensationsanlagen sind im offenen Meer nicht installierbar). Weiters gilt es zu beachten, dass zum derzeitigen Stand der Technik eine Energieentnahme längs der herkömmlichen Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Leitung nicht möglich ist [FAB10<sup>1</sup>], [HAN05], [KER10], [OED04], [SCH06].

Lange Zeit war es, bedingt durch die vielseitigen hochspannungstechnischen Anforderungen, nicht möglich, HGÜ-Systeme mit Betriebsspannungen von mehr als  $\pm 500$  kV zu errichten. Erst im Jahr 2010 gelang es in China, sämtliche Herausforderungen an die Übertragungsfähigkeit zu meistern und eine neuartige Übertragungsebene von  $\pm 800$  kV einzuführen. Wenn auch derzeit Nennströme von zirka 4 kA und somit Leistungen mehrerer GW je Pol übertragbar sind, bestehen Überlegungen, noch größere Leistungen zu übertragen, womit wiederum noch höhere Gleichspannungen erforderlich wären [BÄR10].

Eine aktuelle Trendentwicklung in China ist aus Abb. 2.2 zu entnehmen, worin geplante Projekte eine zusätzliche Summenleistung von über 217 GW umfassen und fünf dieser Projekte bereits mit  $\pm 1000$  kV realisiert werden sollen [HÄU10].



Abb. 2.2: Geplante HGÜ-Projekte in China von 2010 bis 2020, aus [HÄU10]

## 2.2 Isoliersysteme von HGÜ-Stromrichter-Transformatoren

Stromrichter in verschiedenen Schaltungsvarianten ermöglichen die Umformung elektrischer Energie hinsichtlich der Spannungshöhe, der Spannungsform wie auch der Frequenz und stellen somit unverzichtbare Stellglieder in der Elektro-Energietechnik dar. In vielen Fällen ist der Einsatz eines Transformators dabei zweckmäßig bzw. notwendig, wobei dieser sowohl zur Spannungsanpassung als auch zur Potentialtrennung dient.

Im Prinzip entspricht der Aufbau eines Stromrichtertransformators jenem eines Leistungstransformators, jedoch sind bei HGÜ-Transformatoren einige Besonderheiten auf Grund des an die Stromrichterschaltung angepassten Wicklungsaufbaus zu berücksichtigen. Zusätzlich kommt es in HGÜ-Anlagen zu verschiedenartigen Spannungsformen, welche neben der betriebsfrequenten Eingangsspannung (50 bzw. 60 Hz) überlagerte impulsförmige Spannungen durch Schaltheftungen sowie die auf der Gleichspannungsseite überlagerte Welligkeit der Gleichspannung aufweisen. Weiters führt ein Zuschalten oder Umpolen der Gleichspannung zu einem transienten Ausgleichsvorgang, welcher eine hohe elektrische und mechanische Beanspruchung des Isolationsystems bewirkt. Stromrichtertransformatoren sind verglichen

mit konventionellen Leistungstransformatoren höheren elektrischen, mechanischen und auch thermischen Beanspruchungen ausgesetzt.

Gegensätzlich zum Dauerbetrieb bei Leistungstransformatoren zeichnet sich der Betrieb von Stromrichtertransformatoren durch schnelle Lastspiele, kurze Einschaltzyklen wie auch kurzzeitige Überlastungen aus. Es resultieren daraus erhöhte axiale und radiale Kräfte, womit eine geeignete mechanische Festigkeit der Wicklungen erforderlich ist. Hier hat sich die Anwendung der so genannten Bandwicklung für die Unterspannungsseite bewährt.

In einigen Gleichrichterschaltungen kommen in den ventiltseitigen Transformatorwicklungen Gleichstromkomponenten (Mischströme) vor und verursachen damit eine Vormagnetisierung des Kernes.

Kapazitiv übertragene Störimpulse aus dem Drehstromnetz können mit Hilfe von metallisierten Schilden unterdrückt werden, um eine elektrische Beeinträchtigung der Stromrichterventile zu verhindern. Zu diesem Zweck werden Schirmzylinder zwischen der Unter- und Oberspannungswicklung eingebaut, wobei deren leitfähiger Belag für eine hohe Strombelastung ausgelegt sein muss.

Die von Seiten der Stromrichterschaltung verursachten Oberschwingungen führen zu Zusatzverlusten in den Wicklungen, im Eisenkern sowie in ferromagnetischen Konstruktionsteilen. Mittels bewusst gesetzter Maßnahmen, wie beispielsweise der Vergrößerung der Kühlflächen oder die Verwendung geringerer Stromdichten in der Wicklung, kann die thermische Belastung gesenkt werden [BAI10], [FAB10<sup>2</sup>], [GOC10<sup>2</sup>].

„Nur wenige wissen, wie viel man wissen muss, um zu wissen, wie wenig man weiß.“  
Werner Heisenberg (deutscher Physiker und Nobelpreisträger)

### 3 Dielektrisches Verhalten der Öl-Board-Isolierung bei Gleichspannungsbeanspruchung

Die Kombination der Isoliermedien Öl und Zellulose<sup>6</sup> erreicht eine sehr gute elektrische Isolationsfestigkeit und bildet ein untrennbares Isolationssystem eines jeden Leistungstransformators. Bei Öl wird nicht nur die ausgezeichnete Isoliereigenschaft ausgenutzt, man erreicht durch die Kühleigenschaft des Öls eine gute Ableitung der inneren Wärme nach außen. Dieses Isolationssystem wurde vor Jahrzehnten für Transformatoren im Wechselspannungsbetrieb entwickelt, bei Gleich- bzw. Mischfeldbeanspruchung, wie sie bei HGÜ-Stromrichter-Transformatoren auftritt, ergibt sich jedoch eine höhere elektrische, mechanische und thermische Beanspruchung.

#### 3.1 Gegenüberstellung Wechsel- zu Gleichspannungsbeanspruchung

Gegensätzlich zur Wechselspannungsbeanspruchung erfolgt bei Anlegen einer Gleichspannung eine ausgeprägte Verschiebung der elektrischen Belastung vom höher leitfähigen Öl hin zum geringer leitfähigen Board. Begründet ist dies durch die Tatsache, dass bei einer Gleichspannungsbeanspruchung nach Abklingen der Polarisationsvorgänge die Leitfähigkeiten dominieren. Daher ist das Hauptaugenmerk bei der Dimensionierung von Barrierensystemen für Gleichspannungszwecke diesem Sachverhalt gewidmet, weil das Board elektrischen stärker belastet wird. Zwischen den Leitfähigkeiten von Board und Isolieröl können einige Zehnerpotenzen liegen. So weist die Leitfähigkeit von Board typischerweise Werte von ca.  $10^{-15}$  S/m auf, während die Leitfähigkeit eines (trockenen und neuwertigen) Mineralöls bei  $10^{-13}$  S/m (Raumtemperatur) liegt. Daraus resultiert ein Unterschied um den Faktor 100. Dies hat im Fall einer Beanspruchung mit Wechselspannung praktisch keinen Effekt, da sich das elektrische Feld entsprechend den relativen Permittivitäten einstellt. Diese liegen bei neuem Isolieröl auf Mineralölbasis in der Größenordnung 2,2 und für neuwertiges Board bei 3,6 bis 4,4 (Raumtemperatur und trockene Materialien). Somit ergibt sich eine Aufteilung der Feldbeanspruchung bei Wechselspannung im ungefähren Verhältnis von 2:1 [DAH98], [KÜC09].

<sup>6</sup> Hauptbestandteile aus Zellstoff und Lignin, wobei Zellstoff für Papiere höherer Qualität dient.

Man kann im Allgemeinen folgende Einflussfaktoren auf die Eigenschaften des Öl-Board-Isoliersystems auflisten: Spannungsform, Feldstärke, Zeitdauer der Beanspruchung, Feuchtigkeit, Temperatur, Spaltgase/Sauerstoff/Oxidantien, Zellulosequalität, Alterungsprodukte, Säuren und Verunreinigungen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Kenngrößen von Wechselspannung und Gleichspannung erläutert sowie deren Anwendungsgebiete innerhalb der Hochspannungstechnik vorgestellt.

### 3.1.1 Beanspruchung mit Wechselspannung

Der Transport, die Übertragung sowie die Verteilung elektrischer Energie erfolgt in hierarchisch gestaffelten Spannungsebenen, den so genannten Netzen. Unter dem Begriff Netz wird im Allgemeinen die Gesamtheit aller elektrisch angeschlossenen Betriebsmittel mit gleicher Nennspannung verstanden. Man unterscheidet in der elektrischen Energieversorgung (länderspezifisch) zwischen [KÜC09], [SCH06]:

- Transportnetzen; Höchstspannungsbereich ( $U_m \geq 300 \text{ kV}$ ),
- Übertragungsnetzen; Hochspannungsbereich ( $52 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$ ),
- Mittelspannungsnetzen; Mittelspannungsbereich ( $1 \text{ kV} \leq U_m < 52 \text{ kV}$ ),
- Niederspannungsnetzen; Niederspannungsbereich ( $U_m < 1 \text{ kV}$ ).

Zur verlustarmen Energieübertragung mit Drehstrom muss die Übertragungsspannung entsprechend hoch gewählt werden. Es erfolgt also eine Beanspruchung der Betriebsmittel und Isoliersysteme mit betriebsfrequenter hoher Wechselspannung von 50 bzw. 60 Hz. Grundlage zur Bemessung einer Isolierung in ein- bzw. dreiphasigen Wechselstromnetzen ist die dauernd zulässige höchste Betriebsspannung  $U_m$  für ein Betriebsmittel. Diese Spannung  $U_m$  wird als Effektivwert der verketteten Spannung, d. h. jener Spannung zwischen den Leitern des Drehstromsystems, angesehen. Während des Netzbetriebs soll die Spannung  $U_m$  nicht überschritten werden.

Sowohl Überspannungen als auch der elektrische Durchschlag eines Dielektrikums werden unter anderem durch den Scheitelwert gekennzeichnet. Es erfolgt daher bei sinusförmiger Spannung eine Beanspruchung der Isolierung mit Wurzel zwei mal der Betriebsspannung. Bezieht man nun diesen Scheitelwert der Betriebsspannung gegen Erde, so erhält man

$$\hat{U}_{LE} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_m}{\sqrt{3}} \quad 3.1$$

$U_{LE}$  Leiter-Erde-Spannung (in kV)

$U_m$  dauernd zulässige höchste Betriebsmittelspannung (in kV).



Im Allgemeinen kann bei Betriebsmittelisolierungen meist ein quasistationäres elektrisches Feld, welches sich als dielektrisches Verschiebungsfeld betrachten lässt, angenommen werden. Für gebräuchliche Dielektrika mit geringer Leitfähigkeit stellt sich somit eine Feldverteilung auf Grund der relativen Dielektrizitätszahlen ein [BEY86], [KÜC09].

### **3.1.2 Beanspruchung mit Gleichspannung**

Wenn eine Energieübertragung von großen Mengen elektrischer Energie über sehr lange Strecken erforderlich ist, geht man von der Drehstrom-Übertragung – u. a. auf Grund von Stabilitätsproblemen und zur Senkung der Verlustleistung – auf die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung über.

Je nach technischer Anwendung hängt das Ausbilden eines stationären Strömungsfeldes stark von der zeitlichen Anlegedauer der Spannung ab. In der Praxis handelt es sich jedoch meist nicht um eine reine Gleichspannungsbeanspruchung, sondern um eine mit einem Wechselanteil überlagerte Mischspannung (siehe 3.1.3) [KÜC09].

### **3.1.3 Beanspruchung mit Mischspannung**

Stromrichter-Transformatoren, welche in HGÜ-Anlagen eingesetzt werden, werden von Umrichterschaltungen gespeist und gleichspannungsseitig in Serie geschaltet. Daher ergibt sich für das Isoliersystem des Transformators eine gemischte Beanspruchung aus Wechsel- und Gleichspannung.

Weiters muss die Isolierung für transiente Übergangsvorgänge ausgelegt sein, welche beim Ein- und Ausschalten als auch beim Umpolen der Gleichspannung (engl. Polarity Reversal) auftreten. Im Prüflabor werden daher HGÜ-Komponenten einer speziellen Gleichspannungsprüfprozedur unterzogen, wobei die Hauptbeanspruchung bei den Polaritätswechseln der Gleichspannung liegt.

Für eine Berechnung bzw. Simulation der Feldstärken und deren Verläufe muss man unter Umständen dem vorherrschenden stationären Strömungsfeld ein zusätzliches dielektrisches Verschiebungsfeld überlagern, gemäß der Amplitude der Spannungsschwankungen [KÜC09]. Die Beanspruchungsarten von HGÜ-Isoliersystemen sind unter Kapitel 3.3 näher beschrieben.

## **3.2 Statische, stationäre und quasistationäre elektrische Felder in Isolierstoffen**

Für die Untersuchung bzw. Bemessung von Isolierungen sind die Kenntnis der elektrischen Feldstärke sowie ihre räumliche Verteilung maßgeblich. Häufig ist ledig-

lich das elektrostatische Feld von Interesse, welches quasistationär und somit von Ladungsträgerbewegungen unabhängig ist. Dessen Ladungsverteilung wird einzig von der Elektrodengeometrie beeinflusst. Sofern sich elektrische Felder in einem Dielektrikum langsam veränderlich, stationär und statisch verhalten, können sie als Quellenfelder angesehen werden. In weiterer Folge treten induzierte elektrische Wirbelfelder nicht auf bzw. diese können vernachlässigt werden.

Wenn der zu untersuchende Feldraum aus einem einzelnen und homogenen Medium besteht (z. B. ein ideales Vakuum oder ein einheitlicher Isolierstoff), wird die Verteilung des elektrischen Feldes nicht von dessen Materialeigenschaften wie der Dielektrizitätszahl und der Leitfähigkeit beeinflusst. Die Feldberechnung kann auf analytischem Wege (Auswertung der Feldgleichungen) oder grafisch (qualitatives Feldbild) ausgewertet werden [BEY86], [KÜC09]. Man bezeichnet ein homogenes Isoliermaterial als Einstoffsystem und setzt dabei Isotropie der relativen Dielektrizitätszahl sowie der Leitfähigkeit voraus. Jedoch treten in der Regel Anisotropien auf, die dementsprechend einberechnet werden müssen [KAH89], siehe Kapitel 3.3.

### 3.3 Statische, stationäre und quasistationäre elektrische Felder in mehrlagigen, geschichteten Isolierstoffen

Befindet sich allerdings Materie im elektrischen Feldraum, so hat diese aus folgenden Gründen einen maßgeblichen Einfluss auf die Feldverteilung [KÜC09]:

- Durch die Verschiebungspolarisation von Ladungsträgern (Atome und geladene Moleküle) sowie die Orientierungspolarisation von Dipolen im elektrischen Feld entstehen zusätzliche entgegen gerichtete Felder.
- Durch eine Ladungsträgerbewegung innerhalb eines elektrischen Feldes entsteht ein Strömungsfeld, welches in der Leitfähigkeit des Dielektrikums berücksichtigt wird.

Beide Feldgrößen, sowohl die dielektrische Verschiebungsstromdichte  $D$  als auch die Stromdichte  $J$ , sind materialabhängig. Somit ist in weiterer Folge auch die Kapazität der Elektrodenanordnung von der Permittivität abhängig:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\oiint D dA}{U} = \varepsilon \frac{\oiint E dA}{U} \quad 3.2$$

$C$  Kapazität (in As/V bzw. F)

$Q$  Ladung (in As bzw. C)

$U$  Spannung (in V)

$\varepsilon$  Permittivität (in As/(Vm) bzw. F/m)

$D$  Verschiebungsstromdichte (in A/m<sup>2</sup>)

$E$  elektrische Feldstärke (in V/m)

$A$  Fläche (in m<sup>2</sup>).

So hängt der ohmsche<sup>7</sup> Widerstand  $R$  beziehungsweise der dazu inverse Leitwert  $G$  der Elektrodenanordnung von der Leitfähigkeit ab:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{\iint J dA}{U} = \sigma \frac{\iint E dA}{U} \quad 3.3$$

$G$	elektrischer Leitwert (in S)	$J$	elektrische Stromdichte (in A/m <sup>2</sup> )
$R$	ohmscher Widerstand (in $\Omega$ )	$\sigma$	Leitfähigkeit (in S/m)
$I$	elektrischer Strom (in A)	$E$	elektrische Feldstärke (in V/m)
$U$	elektrische Spannung (in V)	$A$	Fläche (in m <sup>2</sup> ).

Daraus folgt für die so genannte „Eigenentladezeitkonstante“ eines Dielektrikums

$$\tau = R \cdot C = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad 3.4$$

$\tau$	Entladezeitkonstante (in s)	$\varepsilon$	Permittivität (in As/(Vm) bzw. F/m)
$R$	ohmscher Widerstand (in $\Omega$ )	$\sigma$	Leitfähigkeit (in S/m)
$C$	Kapazität (in As/V bzw. F)		

Wie in Abb. 3.1 ersichtlich ist, kommt es im Falle des Verschiebungsfeldes zu einer mäßigen Feldverdrängung in jenes Material mit der geringeren Permittivität (Verhältnis 2:1). Hier wird die Isolierflüssigkeit stärker belastet. Anders verhält es sich im Falle des Strömungsfeldes, wo sich eine extreme Feldverdrängung in das Material mit der geringeren Leitfähigkeit ergibt (Verhältnis 1:100). Das Isolieröl erfährt hier praktisch gesehen eine vollkommene Entlastung, während das Board hingegen sehr stark beansprucht wird. Verursacht wird das elektrische Strömungsfeld im Board durch die an der Grenzfläche angesammelten Ladungsträger, welche eine starke Flächenladungsdichte aufweisen.

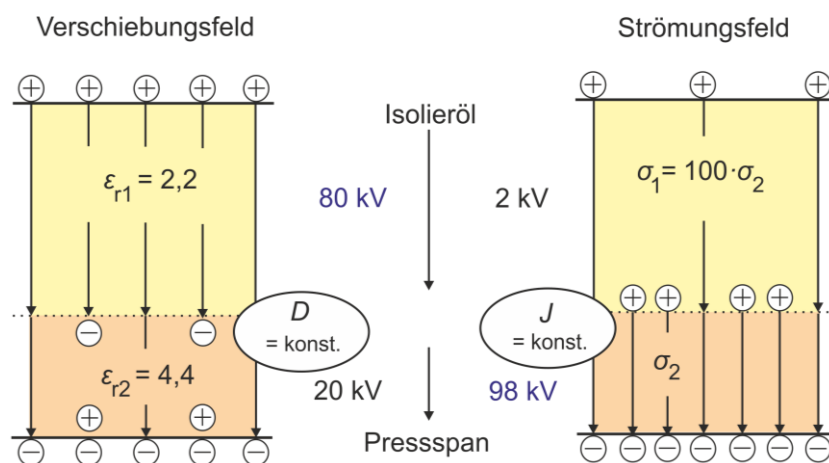


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Feld- sowie Spannungsverteilung des quasistationären Verschiebungsfeldes (links) und stationären Strömungsfeldes (rechts) für eine Öl-Board-Isolieranordnung, nach [BÄR10]

<sup>7</sup> Georg Simon Ohm (1789-1854), deutscher Physiker

Dies veranschaulicht verständlich, dass bei zeitlich veränderlicher bzw. bei stationärer Beanspruchung die Feldverteilung extrem unterschiedlich sein kann. Weiters ist die Leitfähigkeit wenig konstant und schwer bestimmbar, wobei auch Flächenladungen (respektive Raumladungen) einen wesentlichen Einfluss darstellen. Somit ergeben sich für die Dimensionierung sowie Konstruktion des Isolationssystems neue Herausforderungen, wobei dieses gegebenenfalls für beide Beanspruchungsarten ausgelegt sein muss.

In mehrlagigen Isoliersystemen sind die Verläufe transients Beanspruchungen wesentlich unübersichtlicher und schwieriger zu erfassen, dargestellt in Abb. 3.2. Daher kann es vorkommen, dass lokale Belastungsspitzen auftreten, welche höher sind als jene im Anfangszustand (Verschiebungsfeld), respektive jenen, welche im Endzustand (Strömungsfeld) vorherrschen [BÄR10], [PIO04].

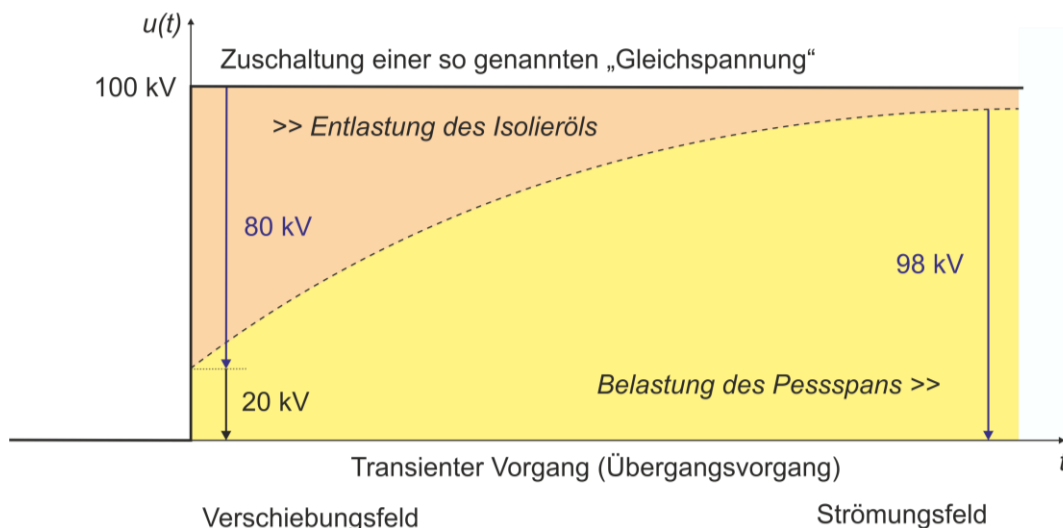


Abb. 3.2: Übergangsvorgang beim Einschalten einer Gleichspannung für ein Öl-Board-Isoliersystem gemäß dem Beispiel aus Abb. 3.1, nach [BÄR10]

Die folgenden Beanspruchungsarten können bei HGÜ-Isoliersystemen in Erscheinung treten [BÄR10]:

- I. Es bilden sich bei Stoßspannungen sowie Wechselspannungen dielektrische Verschiebungsfelder entsprechend den relativen Permittivitäten (Dielektrizitätszahlen) aus.
- II. Wird eine elektrische Gleichspannung zugeschaltet, ergeben sich vorläufig wegen der schnellen Spannungsänderung ebenfalls dielektrische Verschiebungsfelder.
- III. Bei weiterhin über längere Zeit angelegter Gleichspannung geht das Isoliersystem in den Zustand eines stationären Strömungsfeldes über, welches von

den elektrischen Leitfähigkeiten dominiert wird. Dieses Strömungsfeld kann sich grundlegend in seiner Verteilung vom dielektrischen Verschiebungsfeld unterscheiden.

- IV. Während die Gleichspannung anliegt, ist der Wechsel zwischen dem dielektrischen Verschiebungsfeld zum stationären Strömungsfeld ein zeitlich gesehen sehr langer dynamischer Ausgleichsvorgang. Hier wird die transiente Feldverteilung nicht nur von den Permittivitäten, sondern auch von den Leitfähigkeiten vorgegeben und wird weiters noch von Ladungsträgerdriftbewegungen sowie von Polarisationsmechanismen beeinflusst. Es kommt dadurch zum Auf- als auch Umbau von Flächen- und Raumladungen. Diese Vorgänge sind bis heute lediglich qualitativ begriffen.
- V. Bei HGÜ-Stationen erfolgt eine Leistungsflussumkehr mittels Spannungsumpolung bei gleichbleibender Stromflussrichtung. Die starke Spannungsänderung zieht eine Überlagerung eines dielektrischen Verschiebungsfeldes mit sich. Nach dem transienten Ausgleichsvorgang nimmt das Isolationssystem einen neuen stationären Zustand an. Man bezeichnet diesen Vorgang mit dem englischen Fachbegriff Polarity Reversal (PR).
- VI. Ebenso können Änderungen in der Höhe der Gleichspannung als Überlagerung eines zusätzlichen Verschiebungsfeldes des bestehenden Feldbildes hin zu einem neuen stationären Endwert aufgefasst werden.
- VII. Weiters ergeben sich in den Transformatorwicklungen eines Stromrichtertransformators Mischfeldbeanspruchungen, welche aus der Überlagerung von induzierten Wechselfeldern und Gleichspannungen resultieren.

Bei diesen so genannten Gleichspannungsbeanspruchungen gilt es daher zwischen dem dielektrischen Verschiebungsfeld als auch dem stationären Strömungsfeld zu unterscheiden. Wesentlich ist dabei das Verständnis bei transienten Ausgleichsvorgängen. Hier sind material- und werkstofftechnische Fachdisziplinen stark eingebunden, speziell was die Bestimmung von Dielektrizitätszahlen, Leitfähigkeiten, Bewegung von Ladungsträgern, Polarisationsmechanismen, Oberflächen- und Volumeneigenschaften sowie Inhomogenitäten betrifft. Jedoch sind diese aufgezählten Größen (außer den Dielektrizitätszahlen) maßgeblich von schwierig zu kontrollierenden Parametern signifikant abhängig, wie beispielsweise der Feldstärke, der Temperatur, dem Alterungszustand, der Feuchte und der Verschmutzung. Verglichen mit zeitlich veränderlichen Spannungsbeanspruchungen führt eine Gleichspannung zu andersartigen Feldbildern, im Speziellen zu Flächen- sowie Raumladungsphänomenen als auch zu gegensätzlichen Teilentladungs- und Lichtbogeneigenschaften [BÄR10].



„Messen ist Wissen.“  
Werner von Siemens (deutscher Erfinder)

## 4 Leitfähigkeitsuntersuchungen bei hoher Gleichspannung

### 4.1 Anwendungsfeld und Ziele der Leitfähigkeitsmessung

Für die Dimensionierung und den optimalen Entwurf von HGÜ-Anlagen wird die exakte Kenntnis der Materialeigenschaften gefordert. Dazu ist es notwendig, die vollständigen dielektrischen Systemeigenschaften in Abhängigkeit der Parameter Temperatur, Feldstärke, Wassergehalt, Zeit und Alterungszustand zu erfassen. Im Speziellen kann sich die elektrische Leitfähigkeit durch ihre schwierig bestimmbaren Parameter um viele Zehnerpotenzen verändern und lässt sich damit kaum vorhersagen.

Materialersatzschaltbilder, bestehend aus einer Kapazität (repräsentiert die Dielektrizitätszahl) und einem Widerstand (repräsentiert die Leitfähigkeit), lassen sich durch konventionelle Messungen bestimmen, sind jedoch in erster Näherung meist ungenügend. Dielektrika sind polarisierbar und können sowohl Ladungen aufnehmen als auch abgeben. Daher fügt man in zweiter Näherung RC-Glieder dem Ersatzschaltbild hinzu, welche die einzelnen Polarisationsmechanismen wiedergeben sollen. Damit lassen sich feste Isolierstoffe gut abbilden. Eine verbesserte und vollständige Abbildung schließt die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten ein, welche insbesondere für flüssige Isolierstoffen bedeutsam sind.

Wegen dieser komplexen Zusammenhänge sind gebräuchliche standardisierte Messverfahren meist unbefriedigend. In der Praxis werden daher Materialwerte verwendet, die mittels verschiedener Methoden bzw. unter nicht vergleichbaren Parametern oder unter Umständen unbekanntem Bedingungen bestimmt wurden [KÜC10].

### 4.2 Stand der Normung

Gemäß IEC 60247 [IEC 60247] wird die Leitfähigkeit von Isolierölen bereits nach extrem kurzer Zeit ( $60 \pm 2$  s) sowie sehr geringen Feldstärken (250 V/mm, wobei praktische Werte in der Größenordnung von einigen kV/mm liegen) ermittelt. Entsprechend IEC 61620 [IEC 61620] wird der Anfangswert der Ölleitfähigkeit gemessen, welche sich aber durch die Gleichspannungsbeanspruchung auf Grund der Ionenbewegung schnell ändert.

Insbesondere wegen der Nichtlinearität(en) des (flüssigen) Dielektrikums sind normgerechte Messungen erschwert. Daher ist es sinnvoll, die Leitfähigkeiten unter praxisrelevanten Bedingungen zu testen, für welche die Isoliermaterialien dann eingesetzt werden. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um die Einflussparameter Feldstärke, Temperatur, Wassergehalt und Partikel, wie sie unter Kapitel 4.3 genauer beschrieben werden [KÜC10].

Auf Grund mangelnder Erfahrung und unvollständigen Wissens über die komplexen Zusammenhänge kann auch die Normung hier keine standardisierte Lösung anbieten. Daher wurde in der Cigré eine Arbeitsgruppe<sup>8</sup> gegründet (Start Februar 2010, Endbericht Dezember 2013), welche sich mit der Ölleitfähigkeit auseinandersetzt und einen Normenvorschlag für die IEC liefern soll.

#### **4.2.1 Begriffsdefinitionen der spezifischen Leitfähigkeit und des spezifischen Gleichstrom-Widerstandes**

Die Begriffe der spezifischen Leitfähigkeit bzw. dessen Kehrwert, der spezifische Gleichstrom-Widerstand, werden in den verschiedenen Normen unterschiedlich definiert. Tabelle 1 (Seite 20f) gibt dazu eine Übersicht zur Bestimmung der Leitfähigkeit für Isolieröle, während Tabelle 2 (Seite 22) für feste Isolierstoffe gilt.

##### **Anfangsleitfähigkeit:**

In der internationalen Norm IEC 61620 wird empfohlen, die spezifische Leitfähigkeit in sehr kurzer Messzeit bei sehr geringen Feldstärken zu erfassen, um ein thermodynamisches Gleichgewicht zu garantieren. Dabei werden gemäß IEC 60247 elektrische Feldstärken von 250 V/mm und eine Messzeit von einer Minute bereits als hohe elektrische Belastung und lange Beanspruchung gewertet. Allerdings beabsichtigt IEC 61620 nicht eine Leitfähigkeitsbestimmung im eigentlichen Sinne, vielmehr wird sie lediglich als Hilfsgröße zur Ermittlung des Verlustfaktors herangezogen.

##### **Stationäre Leitfähigkeit:**

IEC 60247 beschreibt den spezifischen Gleichstrom-Widerstand des Volumens, welcher den Kehrwert der spezifischen Leitfähigkeit darstellt. Dabei wird der spezifische Volumenwiderstand als Quotient der Feldstärke eines elektrischen Gleichfeldes und der konstanten Stromdichte innerhalb des Isolierstoffes definiert.

---

<sup>8</sup>JWG A2/D1.41 (HVDC transformer insulation – Oil conductivity), Convenor Prof. Andreas Küchler, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Deutschland



Demgegenüber steht jedoch die Tatsache, dass weder Isolieröle noch feste Isoliermedien in dieser vorgeschlagenen kurzen Messzeit die stationäre Leitfähigkeit erreichen, sondern sich innerhalb eines transienten Übergangsbereiches befinden.

### Scheinbare Leitfähigkeit:

Die amerikanischen Normen ASTM D1169 (für Isolierflüssigkeiten) und ASTM D257 (für Feststoffe) beziehen sich auf den Gleichstrom-Widerstand bei konstanter Stromdichte nach einer festgelegten Messzeit. Für flüssige Isoliermedien sind die Messzeiten geringer als bei festen Stoffen, und ein stationärer Endwert stellt sich früher ein. Nachdem für feste Isolierstoffe oftmals sehr lange andauernde Polarisationsmechanismen im Gange sind und sich den Leitfähigkeitsströmen überlagern, kann man hier nur von einer so genannten „scheinbaren“ Leitfähigkeit sprechen.

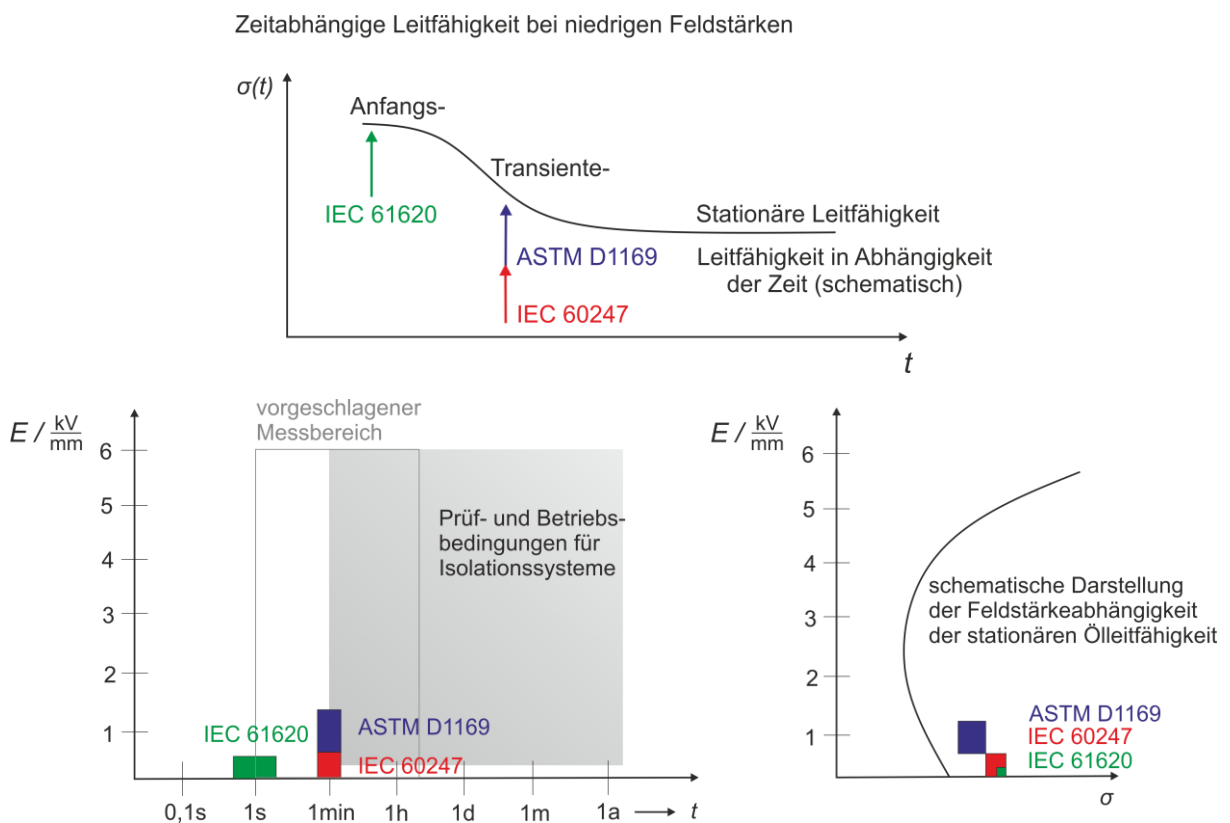


Abb. 4.1: Leitfähigkeit in Abhängigkeit der zeitlichen Belastung und elektrischen Feldstärke, nach [JWG A2/D1.41]

Tabelle 1: Gebräuchliche Normen zur Messung des spez. Gleichstrom-Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit von Isolierflüssigkeiten

Norm	IEC 60247:2004 (Deutsche Fassung EN 60247:2004) [IEC 60247]	IEC 61620:1998 (Deutsche Fassung EN 61620:1999) [IEC 61620]	ASTM D1169-09
<b>Titel</b>	Isolierflüssigkeiten – Messung der Permittivitätszahl, des dielektrischen Verlustfaktors ( $\tan \delta$ ) und des spezifischen Gleichstrom-Widerstandes	Bestimmung des Permittivitäts-Verlustfaktors durch Messung der Konduktanz und Kapazität	Standard Test Method for Specific Resistance (Resistivity) of Electrical Insulating Liquids
<b>Anwendungsbe- reich</b>	Für alle Isolierstoffe, die bei der Prüftemperatur flüssig sind. Die Verfahren dienen vor allem für Referenzmessungen ungebrauchter Flüssigkeiten.	Für ungebrauchte sowie gebrauchte Isolierflüssigkeiten, im Besonderen für hochisolierende Flüssigkeiten.	Für ungebrauchte sowie gebrauchte Isolierflüssigkeiten.
<b>Bestimmte/ berechnete Größen</b>	Verlustfaktor, Permittivitätszahl, spezifischer Gleichstrom-Widerstand	Verlustfaktor, spezifische Leitfähigkeit	Spezifischer Widerstand
<b>Messgrö- ße(n)</b>	Verlustfaktor, Kapazität, Stromstärke	Gleichzeitige Messung des Leitwertes (Konduktanz) $G$ und der Kapazität $C$	Stromstärke
<b>Messzeit</b>	60 ± 2 Sekunden	Keine Angabe	1 Minute (pro Polarität) / 5 Minuten Kurzschluss / 1 Minute entgegengesetzte Polarität
<b>Prüftempe- ratur</b>	Sofern nicht anders festgelegt, werden 90 °C empfohlen. Auflösungsgenauigkeit: 0,25 °C	Sofern nicht anders festgelegt, wird die Umgebungstemperatur (z. B. 25 ± 1 °C) empfohlen.	Nach Vereinbarung; Abnahmeprüfungen i.Allg. 100 °C, Routinetests i.Allg. bei Raumtemperatur, 85 oder 100 °C)
<b>Prüfspan- nung bzw. Feldstärke</b>	Sofern nicht anders festgelegt, muss eine Beanspruchung der Flüssigkeit mit 250 V/mm erfolgen. Spannungsform: Gleichspannung	Rechteckspannungsmethode: 10 bis 100 V; 1 bis 1 Hz; Welligkeit <1 %; Anstiegszeit 1 bis 100 ms	0,2 bis 1,2 kV/mm (obere Grenze zur Vermeidung von Ionisation). Spannungsform: Gleichspannung
<b>Be- richt/Doku- mentation</b>	Elektrische Beanspruchung, Anlegezeit der Spannung, Prüftemperatur	Kennzeichnung der Proben, Prüftemperatur, gemessene Werte von $G$ und $C$ berechnete Werte von $\tan \delta$	Spezifischer Widerstand, Zellentyp, Messprozedur (Referenz oder Routine), durchschnittlicher Spannungsgradient, Temperatur der Probe, Raumtemperatur und Raumfeuchte
<b>Präzision</b>	Bei zwei hintereinander folgenden Befüllungen darf sich der höhere der beiden Messwerte nicht mehr als um 35 % unterscheiden.	Wiederholpräzision $r$ , Vergleichspräzision $R$ gemäß ISO 5725-1 bis ISO 5725-4	Zwei hintereinander folgende Prüfungen (Mittelwert zweier Füllungen) sollten sich nicht um mehr als 5,7 % des Durchschnittswerts unterscheiden.

Tabelle 1 (Fortsetzung): Gebräuchliche Normen zur Messung des spez. Gleichstrom-Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit von Isolierflüssigkeiten

Norm	IEC 60247:2004 (Deutsche Fassung EN 60247:2004) [IEC 60247]	IEC 61620:1998 (Deutsche Fassung EN 61620:1999) [IEC 61620]	ASTM D1169-09
<b>Prüfzelle</b>		Prüfzellen mit drei Klemmen gemäß den Empfehlungen IEC 60247 i.Allg. geeignet.	Anmerkung: Zelle muss allgemeine Bedingungen erfüllen; Annex A1 enthält beispielhaft technische Skizzen
<b>Prüfzellen-Material</b>	Nichtrostender Stahl, Legierungen <sup>9</sup>	Nichtrostender Stahl	Nichtrostender Stahl
<b>Elektrodenabstand</b>	$d = 1-2$ mm (Beispiel)	$d = 1-4$ mm	$d = 2,54$ mm (Beispiel)

<sup>9</sup> Sofern vergoldete, vernickelte oder rhodinierte Oberflächen gut beschichtet sind und unbeschädigt bleiben. Rhodiniertes Invarstahl (Vorteil einer geringen Wärmemausdehnung), vernickelte oder vergoldete Messing-Legierungen sowie vernickelter nichtrostender Stahl sind ebenso in Verwendung.

Tabelle 2: Gebräuchliche Normen zur Messung des Volumen-Widerstandes bzw. der Volumen-Leitfähigkeit von festen Isolierstoffen

Norm	IEC 60093:1980 (Deutsche Fassung HD 429 S1:1983) [IEC60093]	ASTM D257-07
<b>Titel</b>	Prüfverfahren für Isolierstoffe – Spezifischer Durchgangswiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand von festen, elektrisch isolierenden Werkstoffen	Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials
<b>Anwendungsbe- reich</b>	Für feste, elektrisch isolierende Werkstoffe	Für feste, elektrisch isolierende Werkstoffe
<b>Bestimmte/be- rechnete Größen</b>	Bestimmung des Durchgangs-/Oberflächenwiderstandes Berechnung des spezifischen Durchgangs-/Oberflächenwiderstandes	Durchgangs-/Oberflächenwiderstand
<b>Messgröße(n)</b>	Direkte oder vergleichende Verfahren: Stromstärke	Stromstärke
<b>Messzeit</b>	Durchgangswiderstand: Werte bei 1, 2, 5, 10, 50, 100 min. aufnehmen (Abnahmeprüfung 1 min.) Oberflächenwiderstand: 1 min.	1 min.
<b>Prüftemperatur</b>	Gemäß Konditionierung; Vermerk bezüglich Empfindlichkeit auf Temperaturänderungen	Gemäß Konditionierung
<b>Prüfspannung bzw. Feldstärke</b>	i.Allg. 100, 250, 500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000 V am häufigsten sind 100, 500 und 1.000 V in Verwendung	i.Allg. 100, 250, 500, 1.000, 2.500, 5.000, 10.000, 15.000 V
<b>Bericht/Doku- mentation</b>	Beschreibung und Kennzeichen des Werkstoffes; Gestalt und Maße des Probekörpers; Typ, Werkstoff und Maße der Elektroden und der Schutzmaßnahme; Konditionierung des Probekörpers; Prüfbedingungen; Messverfahren, angelegte Spannung; spez. Durchgangswiderstand; spez. Oberflächenwiderstand	
<b>Präzision</b>	± 10 % für Widerstände unter $10^{10} \Omega$ ± 20 % für höhere Widerstandswerte	
<b>Konfiguration</b>	Empfohlen wird eine Dreielektrodenanordnung (Schutzelektrode)	Empfohlen wird eine Dreielektrodenanordnung (Schutzelektrode)
<b>Elektroden- Material</b>	Leitende Silberfarbe, Sprühmetall, aufgedampftes oder zerstäubtes Metall, flüssige Elektroden, kolloidaler Graphit, leitender Gummi, Metallfolien	Verschiedene Materialien möglich
<b>Elektrodenab- stand</b>	Je nach Probenkörper	Je nach Probenkörper

### 4.3 Theoretische Grundlagen von Leitfähigkeitsmechanismen

Metalle und Halbleiter haben die elektrische Eigenschaft, im Werkstoff Elektronen zu besitzen, welche sich nahezu frei bewegen können. Hingegen sind bei Isolatoren (Dielektrika) die Valenzelektronen sehr fest und eng an die Atome gebunden, womit eine elektrische Leitfähigkeit so gut wie nicht in Erscheinung tritt. Die Bandstruktur von Halbleitern und Isolatoren ist gleichermaßen aufgebaut, jedoch ist die Breite der verbotenen Zone bei Isolierstoffen beträchtlich größer. Für gute Isolatoren gilt näherungsweise, dass in jedem Kubikzentimeter ein einziges freies Elektron vorhanden ist. Mit diesem geringen Wert ist jedoch keine Elektrizitätsleitung möglich. Legt man nun ein elektrisches Feld an das Dielektrikum an, kann kein Elektronenstrom fließen. Stattdessen werden die Ladungen im Atom um eine minimale Distanz gegenläufig im Feld verschoben. Auf diese Weise entsteht ein atomarer Dipol, nachdem die Ladungsschwerpunkte jetzt nicht mehr zusammenfallen. Dieser Prozess wird als Polarisation bezeichnet [FAS05].

Ein elektrisches Feld bildet sich entsprechend den dielektrischen Eigenschaften des Isolierstoffes aus, welche verschiedene Polarisationsmechanismen zu Grunde liegen. Beschrieben werden diese Polarisationserscheinungen durch die dielektrischen Kenngrößen Dielektrizitätszahl sowie Verlustfaktor und werden durch die Leitfähigkeit wesentlich mitbestimmt [KÜC09].

Unter dem Fachbegriff Isolierstoffe versteht man verschiedene Materialien, welche alle die gemeinsame Eigenschaft aufweisen, eine geringe Leitfähigkeit zu besitzen. In Abb. 4.2 ist dies anschaulich dargestellt.

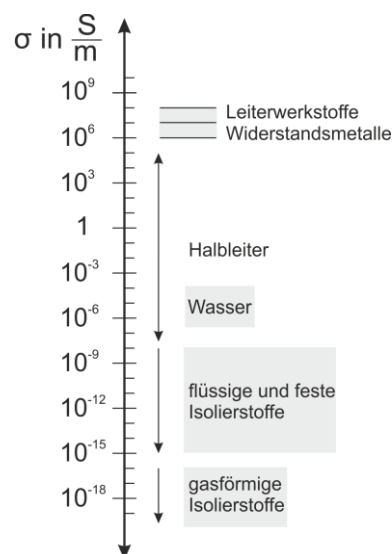


Abb. 4.2: Elektrische Leitfähigkeit für Isolierstoffe, Halbleiter und Leiterwerkstoffe, nach [KÜC09]

Zur Beurteilung des dielektrischen sowie elektrischen Verhaltens von Isolierstoffen wird im Folgenden auf ihre Polarisations- und Leitungsmechanismen sowie ihre Einflussparameter näher eingegangen. Es lassen sich nichtlineare Korrelationen zwischen der elektrischen Leitfähigkeit, der Permittivität (Polarisation) sowie den dielektrischen Verlusten im Allgemeinen durch die folgenden Effekte beschreiben [BÄR08], [BEY86], [KAH89]:

Einfluss der Frequenz und Zeit:

- Raumladungen
- Orientierung von aufgeladenen Partikel, Ladungsträgern und Dipolen
- Trägheit der Dipole, Resonanz- und Relaxationsverhalten
- Wärmedurchschlag
- Elektrische sowie chemische Alterung

Einfluss von Belastungs- und Zustandsänderungen:

- Steigende Gleichstromleitfähigkeit sowie steigende Verluste mit Zunahme der Feuchte
- Irreversible oder reversible Änderungen der Werkstoffstruktur durch mechanische Beanspruchungen

Einfluss der Feldstärke:

- Ionisation in Fluiden und Hohlräumen von festen Stoffen
- Dissoziation bei flüssigen Isolierstoffen (Wien<sup>10</sup>-Effekt) sowie bei Feststoffen
- Emission an den Elektroden (Schottky<sup>11</sup>-Effekt)
- Tunnel-Effekt an den Korngrenzen
- Polarisation
- Elektronen-Erzeugung aus dem Valenzband (Bändermodell)
- Haftschalentheorie (Poole<sup>12</sup>-Frenkel<sup>13</sup>-Effekt)

Einfluss der Temperatur:

- Erzeugung von Ladungsträgern, Steigerung der Ladungsträgerdichte (Bändermodell, Van't Hoff'sches<sup>14</sup> Gesetz)
- Verringerung der Relaxationszeit von Dipolen mit der Temperatur
- Geringerer Orientierungszustand von Dipolen
- Veränderungen in der Stoffstruktur (beispielsweise dem Kristallisationsgrad)

---

<sup>10</sup> Max Karl Werner Wien (1866-1938), deutscher Physiker

<sup>11</sup> Walter Schottky (1886-1976), gebürtiger Schweizer, Physiker und Elektrotechniker

<sup>12</sup> Horace Hewitt Poole (1886-1962), irischer Physiker

<sup>13</sup> Yakov Il'ich Frenkel (1894-1952), russischer Physiker

<sup>14</sup> Jacobus Henricus van 't Hoff (1852-1911), niederländischer Chemiker und erster Nobelpreisträger für Chemie (1901)

Einfluss der Werkstoffstruktur:

- Füllstoffgrad (Perkolationseffekt, Varistoreffekt)
- Korn- und Molekülorientierung (anisotrope Strukturen).

Es zeigt sich ein außerordentlich komplexes Verhalten, wenn Dielektrika mit einem elektrischen Feld beansprucht werden. Jener elektrische Strom, welcher unverzüglich nach Einschalten eines Spannungssprungs zu fließen kommt, nimmt zeitlich gesehen häufig ab und strebt einen stationären Endwert an. Für ein beliebiges nicht ideales Isoliermedium kann die Stromdichte  $J$  mit Gleichung 4.1

$$J = \sigma \cdot E + \frac{\partial D}{\partial t} + \rho_R \cdot v \quad 4.1$$

$J$	Stromdichte (in $A/m^2$ )	$\frac{\partial D}{\partial t}$	Verschiebungsstromdichte (in $A/m^2$ )
$\sigma$	elektrische Leitfähigkeit (in $S/m$ )	$\rho_R$	Raumladungsdichte (in $As/m^3$ )
$E$	elektrische Feldstärke (in $V/m$ )	$v$	Ladungsträgersgeschwindigkeit (in $m/s$ )

angegeben werden. Der erste Term von Gleichung 4.1 charakterisiert den Leitungsstrom. Die dielektrische Verschiebungsstromdichte (gebundene Ladungsträger werden durch Polarisierungseffekte im Isoliermedium verschoben) wird durch den zweiten Term ausgedrückt. Term drei beschreibt die Diffusionsstromdichte, welche im Zusammenhang mit Raumladungen auftritt.

Streng genommen wird die elektrische Leitfähigkeit ausschließlich durch den Leitungsstrom definiert. Sofern nur der Leitungsstrom zur Stromdichte beiträgt, gilt

$$J = \sigma \cdot E \quad 4.2$$

$J$	Stromdichte (in $A/m^2$ )	$E$	elektrische Feldstärke (in $V/m$ ).
$\sigma$	elektrische Leitfähigkeit (in $S/m$ )		

Unter bestimmten Bedingungen sind in realen Isolierstoffen freie oder durch ihre Wirkung quasifreie Ladungsträger gegenwärtig. Diese Ladungsträger erfahren eine gerichtete Kraft im elektrischen Feld, woraus eine Bewegung resultiert. Generell gesehen können alle Ladungsträgerarten zum Ladungstransport beitragen. Das sind – vom Dielektrikum abhängig – im Speziellen Elektronen, Defektelektronen (Löcher) sowie negative und positive Ionen. Allgemein gilt nach Gleichung 4.3 für die spezifische elektrische Leitfähigkeit

$$\sigma = \sum_i q_i \cdot n_i \cdot b_i \quad 4.3$$

$q_i$	Ladung (in $As$ )	$n_i$	Dichte (in $1/m^3$ )	$b_i$	Beweglichkeit (in $m^2/(Vs)$ ).
-------	-------------------	-------	----------------------	-------	---------------------------------

Dabei sind die Ladungsträgerdichte  $n_i(r)$  als auch die elektrische Feldstärke  $E(r)$  von der Ortskoordinate  $r$  abhängig. Wenn ein Gleichfeld an ein Dielektrikum angelegt wird, sinkt die Ladungsträgerdichte, und es kommt zu einer typischen Verringerung

der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit über der Zeit. Durch Einführen einer transienten Gleichstromleitfähigkeit lässt sich dieser Effekt beschreiben, wobei es allerdings eine Superposition mit weiteren transienten Stromanteilen anderer physikalischer Ursachen gibt und somit der transiente Leitungsstrom nicht direkt messbar ist.

Weil bei einer Wechselspannungsbeanspruchung (50 bzw. 60 Hz) die Ladungsträger im Durchschnitt keine gerichtete Kraft bzw. Bewegung erfahren, kann nach Vernachlässigen der Elektrodeneffekte davon ausgegangen werden, dass die Ladungsträgerdichte verglichen mit dem feldfreien Fall nicht veränderlich ist. Die so genannte Wechselstromleitfähigkeit ist auf Grund der zeitlich unveränderten hohen Ladungsträgerdichte verglichen mit der Gleichstromleitfähigkeit maßgeblich größer.

Als elektrische Leitfähigkeit wird jener Gleichstromleitfähigkeitswert bezeichnet, welcher sich nach dem Abklingen aller Stromtransienten stationär einstellt. Definiert wird diese spezifische Größe als Quotient der Feldstärke eines Gleichfeldes und der konstanten Stromdichte innerhalb des Isoliermediums. Bei konstanter elektrischer Leitfähigkeit wird von einer so genannten ohmschen Leitfähigkeit gesprochen [BÄR08], [BEY86], [KAH89], [BÖT73], [BÖT78].

#### **4.4 Leitfähigkeit in flüssigen Isolierstoffen**

In Flüssigkeiten wird die elektrische Leitfähigkeit auf Grund von Ionen, Elektronen und durch die Bewegung aufgeladener makroskopischer Teilchen oder Molekülverbände verursacht. Welche Ladungsträger überwiegend auftreten, hängt unter anderem von der Zusammensetzung der Isolierflüssigkeit ab. Jene Ionen, welche am Ladungsträgertransport mitwirken, entstehen vorwiegend durch Dissoziation von Alterungsprodukten sowie Verunreinigungen. Der Wassergehalt wirkt weiters auf die Leitfähigkeit beeinflussend. Flüssige Isolierstoffe weisen eine spezifische Leitfähigkeit von  $\geq 10^{-10}$  S/m auf. Durch gründliche elektrische und mechanische Reinigung (z. B. Filtrieren und Zentrifugieren) können Leitfähigkeitswerte von  $10^{-18}$  S/m erreicht werden.

Die in der Hochspannungstechnik verwendeten Isolieröle haben meist schwachpolaren oder vollständig apolaren Charakter. Dadurch resultiert eine schwache Dissoziation, was sowohl für Eigenmoleküle als auch für Verunreinigungen geltend ist. Allerdings sind Dissoziation, Ionisation und die Aufladung von Partikeln maßgeblich von Beimischungen abhängig. Durch das Anlegen schwacher elektrischer Felder ist die elektrische Leitfähigkeit hauptsächlich eine Ionenleitfähigkeit, d. h. mit einem Materialtransport gekoppelt.



Bestimmende Größen der Leitfähigkeit sind die Ladungsträgerdichte und die Beweglichkeit, womit Dissoziation, Ionisation und die Bewegung von Ladungsträgern im Potentialfeld der Moleküle des flüssigen Isolierstoffes bestimmend sind. Insgesamt ist die isolierende Flüssigkeit durch die Potentiale der Atome und ihrer Potentialmulden charakterisiert, siehe Abb. 4.3 [KAH89].

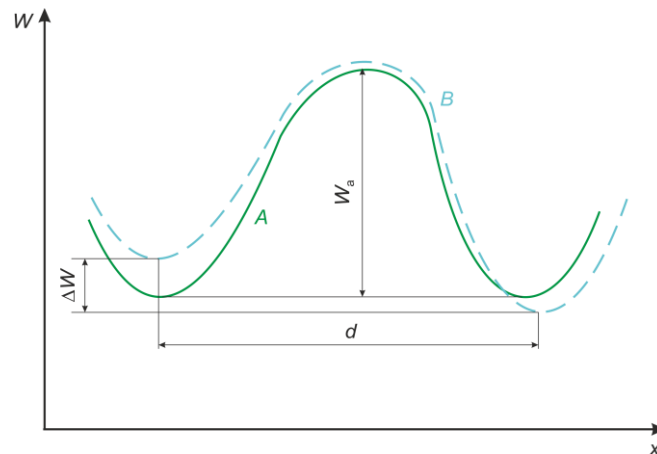


Abb. 4.3: Schematische Potentialdarstellung einer Isolierflüssigkeit, nach [KAH89]

A	ohne elektrisches Feld
B	mit elektrischem Feld
$W_a$	Aktivierungsenergie
$\Delta W$	Energieänderung eines Teilchens im elektrischen Feld
d	Abstand zwischen zwei Potentialminima

Die Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Potential wird als Aktivierungsenergie bezeichnet. Das ist jene Energie, welche den Elektronen und Ionen zugeführt werden muss, um über die Potentialberge einer Isolierflüssigkeit hinweg zu kommen. Infolge eines elektrischen Feldes erfolgt eine Anhebung der potentiellen Energie der Ionen.

Bei schwachen elektrischen Feldern wirken sich Elektronen auf Grund der kleinen freien Weglänge kaum auf die Leitfähigkeit aus. Jedoch verringert sich die Leitfähigkeit bei Anlegen einer Gleichspannung durch den Transport von Ionen sowie aufgeladenen mikroskopischen Partikeln und deren Neutralisierung an den Elektroden. Ebenfalls können die Ionen in schwachen elektrischen Feldern rekombinieren.

Unter den im Transformator vorherrschenden realen Feldstärken ergibt sich für die elektrische Leitfähigkeit häufig eine markante Abweichung vom ohmschen Gesetz. Bei mehr als 10 kV/mm ist ein exponentieller Zusammenhang des Isolationsstroms in Abhängigkeit der Feldstärke merkbar. Dies lässt sich in Übereinstimmung mit der Theorie von Onsager<sup>15</sup> durch eine erhöhte Dissoziation erklären:

<sup>15</sup> Lars Onsager (1903-1976), norwegischer Physikochemiker und theoretischer Physiker, Nobelpreis für Chemie 1968

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{F}{k \cdot T}\right) \quad 4.4$$

$\sigma$	elektrische Leitfähigkeit (in S/m)
$F$	Aktivierungsenergie (Stoffkonstante, in eV)
$k$	Boltzmannkonstante ( $8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K)
$T$	absolute Temperatur (in K)

Eine andere Ursache lässt sich von der Ionenbeweglichkeit herleiten, welche sich im Potentialmodell mit periodischer Verteilung ergibt:

$$J = n \cdot e \cdot \mu \cdot E = \frac{n \cdot e \cdot d_p \cdot \nu}{3} \exp\left(-\frac{W_a}{k \cdot T} \sinh \frac{e \cdot E \cdot d_p}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad 4.5$$

$n$	Ladungsträgerzahl (in $1/\text{cm}^2$ )	$d_p$	Barrierenabstand im periodischen Potentialmodell (in m)
$e$	Elementarladung ( $1,6 \cdot 10^{-19}$ As)	$k$	Boltzmannkonstante ( $8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K)
$\mu$	Ionenbeweglichkeit (in $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ )	$T$	absolute Temperatur (in K)
$E$	elektrische Feldstärke (in V/m)	$W_a$	Aktivierungsenergie (in J).
$\nu$	Schwingungsfrequenz (in 1/s)		

Für die Energieübertragung auf die Ladungsträger mit großer Feldenergie ergibt sich

$$J = J_0 \cdot \exp\left(\frac{e \cdot E \cdot d}{2 \cdot k \cdot T}\right), \text{ wenn } e \cdot E \cdot d \gg 2 \cdot k \cdot T. \quad 4.6$$

Sind die Isolierflüssigkeiten sehr gründlich gereinigt, können die Feldstärken dementsprechend hoch sein, dass sich eine Injektion von Elektronen von der Kathode nach Fowler-Nordheim (ohne elektrischen Durchschlag) ergibt:

$$J = A \cdot E^2 \cdot \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \quad 4.7$$

$A, B$  Konstanten.

Die Elektronen können in weiterer Folge zur Stoßionisation im Isolieröl führen. Der Anstieg der Stromdichte  $J$  lässt sich mittels

$$J = J_0 \cdot \exp \alpha_F \cdot d \quad 4.8$$

$\alpha_F$	Ionisationskoeffizient (in $1/\text{cm}$ )
$d$	Elektrodenabstand im homogenen Feld (in cm)

beschreiben. Es gilt dabei zu beachten, dass jedes flüssige Isoliermedium einen spezifischen Ionisationskoeffizienten entsprechend der Ionisationsenergie der Atome sowie dem molekularen Aufbau aufweist [KAH89]. Laut [KÜC09] überwiegt in Flüssigkeiten die Ionenleitung. Es bilden sich durch Dissoziation von Verunreinigungen negative und positive Ionen. Bei geringen Feldstärken rekombinieren freie Elektronen

mit positiven Ionen bzw. werden an Moleküle gebunden. Erst bei höheren Feldstärken spielen auch freie Elektronen eine Rolle.

Bei Sprungantwortmessungen in flüssigen Isoliermedien ergibt sich ein Stromverlauf, wie in Abb. 4.4 dargestellt. Es handelt sich dabei jedoch nicht um Polarisationsvorgänge, sondern um eine zeitliche Veränderung der Leitfähigkeit, verursacht durch Ionendrift. Dies kann durch Depolarisationsstrommessungen nachgewiesen werden, wobei typische Öle bereits nach wenigen Sekunden sehr kleine Ströme liefern. Das bedeutet, dass das Öl keine Ladung speichert und der gemessene Strom bei angelegter Spannung nach wenigen Sekunden auf die Leitfähigkeit schließen lässt.

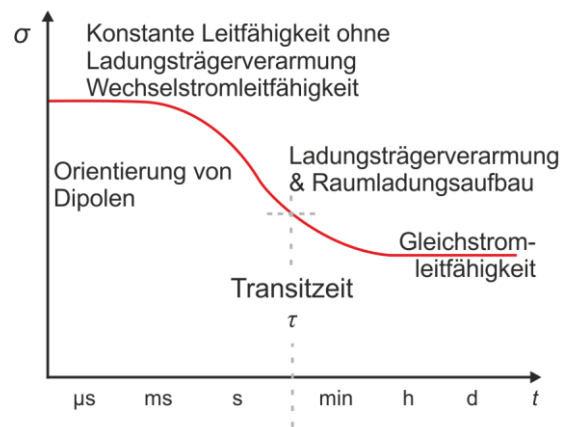


Abb. 4.4: Leitfähigkeit in Abhängigkeit der zeitlichen Beanspruchung, modifiziert nach [KÜC09]

Bei niedriger Feldstärke zeigt sich bereits eine Anfangsleitfähigkeit, welche sich aus einem Gleichgewicht aus Erzeugung und Rekombination von Ladungsträgern einstellt. Weil in einem Wechselfeld summa summarum kein Abtransport von Ladungsträgern erfolgt und die Anfangsleitfähigkeit erhalten bleibt, spricht man in Anlehnung daran von einer Wechselstromleitfähigkeit.

Legt man eine Gleichspannung an, so beginnen die Ladungsträger zu den Elektroden hin zu wandern, wobei die Leitfähigkeit und die Ladungsträgerdichte abnehmen. Es lässt sich in Abhängigkeit der Ionenbeweglichkeit  $\mu$ , der Feldstärke  $E$  sowie der Ölsplattweite  $d$  eine Zeitkonstante, nämlich die so genannte Transitzeit  $\tau$ , wie folgt berechnen:

$$\tau = \frac{d}{\mu \cdot E} \quad 4.9$$

$\tau$	Zeitkonstante (in s)	$d$	Ölsplattweite (in mm)
$\mu$	Ionenbeweglichkeit (in $\text{mm}^2/(\text{Vs})$ )	$E$	elektrische Feldstärke (kV/mm)

Die Leitfähigkeit einer Isolierflüssigkeit ist von der Temperatur (über die Ionenbeweglichkeit), der Feldstärke, von der Zeit sowie der Ölpaltweite abhängig. Bei einer anliegenden Gleichfeldstärke stellt sich nach Abzug der Ionen ein neues Gleichgewicht ein. Dieses auf einem niedrigeren Leitfähigkeitsniveau liegende Gleichgewicht wird auch mit Gleichstromleitfähigkeit bezeichnet.

Dabei ist der Leitfähigkeitsendwert extrem von der Feldstärke abhängig, weil bei höheren Feldstärken über ungefähr 2 bis 3 kV/mm eine stark erhöhte Ladungsträgererzeugung bewirkt wird, siehe Abb. 4.5. Ein Leitfähigkeitsminimum ergibt sich aus den gegenläufigen Effekten der Ladungsträgererzeugung von freien Ladungsträgern bei steigender Feldstärke mit einer Ladungsträgerverarmung [KÜC09].

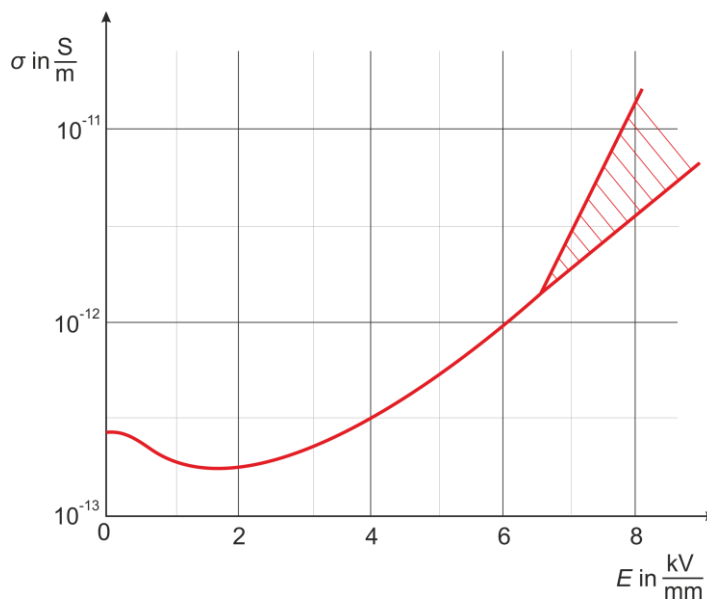


Abb. 4.5: Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Feldstärke von Transformatoröl bei Raumtemperatur, modifiziert nach [JWG A2/D1.41], [KÜC09]

Sind die Feldstärken gering, so ist die Leitfähigkeit überwiegend durch Ionenleitung bestimmt. Dabei hängt die Ladungsträgerbeweglichkeit mit der Viskosität zusammen, wobei beide mit steigender Temperatur exponentiell zunehmen. Für Feldstärken, welche in der Praxis vorkommen, ergibt sich häufig eine signifikante Abweichung vom ohmschen Verhalten. Übersteigen die elektrischen Feldstärken einen Wert von 10 kV/mm, steigt auf Grund von Dissoziationsprozessen (Wien-Effekt) die Ladungsträgerdichte, und infolgedessen steigt die spezifische elektrische Leitfähigkeit exponentiell mit der Wurzel der Feldstärke an [BÄR08]. In diesem Feldstärkebereich ergibt sich für die elektrische Leitfähigkeit ein größeres Streuungsband gemäß Abb. 4.5, welches es für die Auswertung von Öl-Leitfähigkeitsmessungen zu berücksichtigen gilt [JWG A2/D1.41].

## **4.5 Bestimmung der Ölleitfähigkeit gemäß Cigré JWG A2/D1.41**

Gemäß der Tatsache, dass es derzeit keine gültige Norm für das Prüfen von Isolierölen bei Gleichspannungsbeanspruchung gibt, wurde die neue Cigré-Arbeitsgruppe JWG A2/D1.41 „HVDC transformer insulation – Oil conductivity“ gegründet. Ziele der Arbeitsgruppe sind Empfehlungen für eine entsprechende Probenaufbereitung und Reinigungsprozedur sowie eine Anleitung zur Messung und Interpretation der Ölleitfähigkeit. Zu diesem Zweck wurde ein Round Robin Test von 16 Laboratorien innerhalb der Arbeitsgruppe gestartet, um einen Vergleich der verschiedenen Messmethoden anhand von zwei neuwertigen Ölproben zu erhalten. Um eine entsprechende Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde eine einheitliche Ölprobenbehandlung sowie Reinigungsprozedur der Testzellen vorgeschrieben. Auf der Basis eines einheitlichen Messprotokolls wurden alle als relevant angesehenen Daten erhoben und in weiterer Folge ausgewertet. Zunächst werden die Messergebnisse, welche am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz erzielt wurden, vorgestellt und anschließend alle Ergebnisse der 16 teilnehmenden Laboratorien in Diagrammen grafisch veranschaulicht.

### **4.5.1 Leitfähigkeitsmessung von neuen Isolierölen (TU Graz)**

Zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von reinem Isolieröl wurden die beiden neuwertigen Ölsorten Shell Diala S3 ZX-I (E-1001780) sowie Shell Diala S3 ZX-IG (E-1001611) zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen umfassten dabei 24-Stunden-Langzeitmessungen des Polarisationsstroms von zwei identischen Messzellen der Marke Tettex 2903. Eine Messzelle wurde bei Raumtemperatur (25 °C), die andere Messzelle mit vorgegebener Temperatur von 60 bzw. 90 °C beheizt, wobei eine Feldstärkevariation von 100 V/mm, 250 V/mm und 1 kV/mm durchgeführt wurde und der Wassergehalt des Öls zu Beginn 5 ppm ± 2 ppm und nach den Messungen 11 ppm ± 4 ppm betrug. Der Strom wurde dabei alle 300 ms rechnergestützt ausgelesen und protokolliert. Durch den wechselnden Messbereich der Elektrometer (z. B. Zuschalten der Gleichspannung) benötigt das Messgerät ca. 10 Sekunden, um wieder einen stabilen Messbereich zu finden. Der gesamte Messaufbau fand in der voll geschirmten TE-Messzelle statt. Die Spannungsversorgung erfolgte über ein elektrisches Filter sowie einen Trenntransformator.

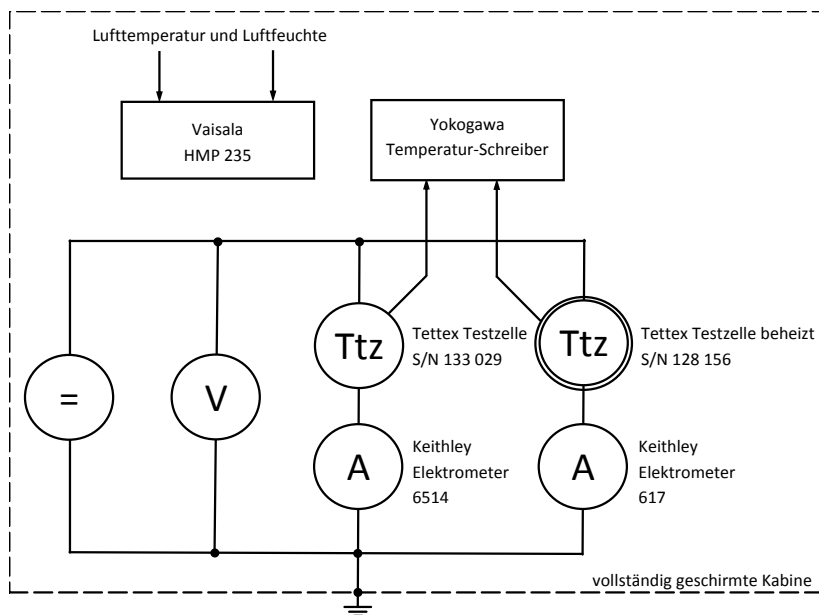


Abb. 4.6: Schematisches Ersatzschaltbild des Messaufbaues zur Leitfähigkeitsbestimmung mittels Tettex-Messzellen

Um den Einfluss der Feuchtigkeit auf mineralisches Isolieröl zu bestimmen, wurden mittels Ölprüfgerät BAUR DTL verschiedene Feuchtegehalte des Isolieröls Shell Dia-la S3 ZX-I untersucht. Dabei wurden drei Messwiederholungen mit jeweils frischem, verfeuchtetem Öl angestellt, wobei die Ölprobe direkt aus der Aluminiumflasche entnommen wurde, in der das Öl mit destilliertem Wasser befeuchtet wurde. Die Messzelle des BAUR DTL wurde zwischen den einzelnen Messungen einmal und vor jeder neuen Messserie dreimal mit neuem Öl gespült.

Die Ölfeuchte wurde mittels coulometrischer Karl Fischer-Titration bestimmt, wobei eine gezogene Ölprobe zweimal<sup>16</sup> vermessen wurde und daraus der Mittelwert des Wassergehaltes berechnet wurde. Eine Probenentnahme erfolgte vor Beginn jeder Messung aus dem Prüfgefäß des BAUR DTL sowie zu Ende jeder Messung aus dem Ablauf des Ölprüfgeräts BAUR DTL.

Die detaillierten Messergebnisse sind den Diagrammen in Anhang A (siehe Seite 81ff) zu entnehmen.

#### 4.5.2 Round Robin Test zur Bestimmung der Leitfähigkeit von neuen Isolierölen (Cigré JWG A2/D1.41)

Die folgenden Ergebnisse wurden mit freundlicher Genehmigung und Unterstützung durch die Cigré-Arbeitsgruppe JWG A2/D1.41 [JWG A2/D1.41] (Convenor Prof. Andreas Küchler) zur Verfügung gestellt, wobei die Auswertung am Institut für

<sup>16</sup> optional dreimal bei stark verfeuchtetem Öl, sofern eine größere Messabweichung gegeben war

Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der Technischen Universität Graz stattfand. Anschließend wurden die erhobenen Messdaten grafisch in Diagrammgruppen zusammengefasst und analysiert.

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Parameter zur Bestimmung der Leitfähigkeit (Die Messzeit ist in Sekunden angegeben. Sofern eine andere Methode als DC-Sprung verwendet wurde, so ist dies in einer Anmerkung angegeben.)

		Feldstärke in V/mm														
		0,5	1,33	2,5	3	10	20	50	100	250	300	1k	3k	6k	7k	10k
Temperatur in °C	25	FDS (1) 3600s ges. Spektrum (1mHz to 1kHz)	AC 0,01Hz 200s ges. Spektrum (100Hz to 0,01Hz)	Rect. 0,5Hz 30s	FDS (2) 240s ges. Spektrum (0,01Hz bis 100Hz)	1000s  Recht. 0,5Hz 3600s	Recht. 0,5Hz 60s	Recht. 20s	1000s 10800s 86400s	60s (6) 86400s	1000s 10800s	AC 50Hz 60s (3)  1000s 10800s 86400s	1000s 10800s	1000s 10800s	AC 0,1Hz  AC 0,01Hz	10800s
	30									60s						
	40	FDS (1)														
	50				FDS (2)		Recht. 0,5Hz 60s			60s						
	55	FDS (1)														
	60								86400s	86400s		86400s				
	70	FDS (1)								60s						
	75				FDS (2)		Recht. 0,5Hz 60s									
	90	FDS (1)	AC 0,01Hz 200s ges. Spektrum (100Hz bis 0,01Hz)		FDS (2)	1000s  Recht. 0,5Hz 3600s	Recht. 0,5Hz 60s		1000s 10800s 86400s	60s (6) 86400s	10800s	AC 50Hz 60s (3)  1000s 10800s 86400s	1000s 10800s	1000s 10800s	AC 0,1Hz  AC 0,01Hz	10800s

Um eine weitere Auswertung dieser schwach besetzten Matrix anzustellen, wurde diese in Kategorien unterteilt. Dazu wurden zwei Temperaturklassen (25 °C und 90 °C) sowie vier Feldstärkeklassen ([0 bis < 0,1 kV/mm], [0,1 bis < 1 kV/mm], [1 bis < 4 kV/mm] und [> 4 kV/mm]) eingeteilt. Für die verschiedenen Methoden bedeuten die folgenden Abkürzungen (siehe Diagramme Anhang A, Seite 81):

- ◆ DC Gleichspannung
- AC LF niederfrequente Wechselspannung (0,1 bzw. 0,01 Hz)
- ✗ FDS Frequency Domain Spectroscopy
- Rect. Rechteckige Spannungsform (0,5 Hz)
- ▲ Median Median-Wert (gerechnet)

Im Folgenden werden die verwendeten Methoden kurz vorgestellt:

**Polarisationsstrom-Depolarisationsstrom-(PDC-)Analyse:**

Nach Anlegen einer Gleichspannung lassen sich mit dieser Messmethode die Sprungantwort eines Dielektrikums sowie der zeitliche Verlauf des Polarisationsstromes aufzeichnen. In einer anschließenden zweiten Phase wird der zu vermessende Isolierstoff kurzgeschlossen und entlädt sich wieder, wobei der Depolarisationsstrom zum Fließen kommt. Man erhält durch Messung des Depolarisationsstroms ebenso die Eigenschaften des Isolierstoffes, ausgenommen jene über den Gleichstromwiderstand, weil dieser während der Entladephase kurzgeschlossen bleibt.

**Ladungsdifferenzmethode (Charge Difference Method, CDM):**

Auf Grund der Gleichartigkeit des Polarisations- sowie Depolarisationsstromes lässt sich erkennen, dass redundante Informationen über Polarisationsmechanismen im Isolierstoff vorhanden sind. Durch die Leitfähigkeit eines Isolierstoffes stellt sich nach einer bestimmten Transitzeit ein stationärer Gleichstrom ein, welcher mit der Differenz  $i_p - i_d$  angenähert werden kann. Durch Integration der Ströme erhält man weiters eine Störungsunterdrückung. Durch diese Näherung ergibt sich die Möglichkeit, die elektrische Leitfähigkeit bereits bei geringen Messzeiten zu bestimmen.

Da sich Isolierflüssigkeiten jedoch schlecht polarisieren lassen und damit der Depolarisationsstrom sehr klein ausfällt und von kurzer Dauer ist, bewährt sich diese Methode besser bei festen Isolierstoffen, siehe dazu Kapitel 4.6. Die CDM kam innerhalb des RRT nicht zur Anwendung, ist hier aber der Vollständigkeit halber erwähnt.

**Niederfrequente Wechselspannung (0,1 bzw. 0,01 Hz):**

Sofern die Frequenz einer Wechselspannung sehr klein gehalten wird (Größenordnung  $\leq 0,1$  Hz), kann die angelegte Spannung als so genannte „pulsierende Gleichspannung“ angesehen werden, da sich hier ebenso „Gleichspannungsphänomene“ wie die Ausbildung von Raumladungen einstellen.

**Frequenzbereichsanalyse (Frequency Domain Spectroscopy, FDS):**

Bei der FDS-Analyse handelt es sich ebenso wie bei der PDC-Analyse um eine dielektrische Messmethode zur Feststellung des Isolationszustandes eines elektrischen Isoliermediums. Dabei wird eine in der Frequenz variierende sinusförmige Wechselspannung mehrere Periodendauern angelegt und in weiterer Folge der Verlustfaktor sowie die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ermittelt.

**Rechteckige Spannungsform (0,5 Hz):**

Gemäß IEC 60620 [IEC 60620] können der Verlustfaktor sowie die Kapazität und der Widerstand aus den entsprechenden Stromanteilen (Verschiebungs- und Leitungstrom), welche sich durch Anlegen einer Rechteckspannung ergeben, bestimmt wer-



den. Die elektrische Leitfähigkeit kann aus den messtechnisch ermittelten Parametern weiterführend berechnet werden.

Eine grafische Übersicht der einzelnen Messungen innerhalb des Round Robin Tests ist in den Diagrammen in Anhang A (siehe Seite 95ff) gegeben.

## 4.6 Leitfähigkeit in festen Isolierstoffen

Bei der technischen Anwendung von Gleichspannung bzw. Mischspannung sowie bei sehr niedriger Frequenz als auch bei hoch leitfähigen Isolierstoffen gilt es, neben den elektrostatischen Feldern ebenso das Strömungsfeld zu berücksichtigen. Dabei sind nur unter bestimmten Bedingungen die elektrischen Leitungsverluste für die Änderung der Mikrofeldverteilung sowie für die innere Erwärmung ausschlaggebend. Für die elektrische Alterung und den Durchschlagsmechanismus ist bei hochisolierenden Isolierstoffen die Ausprägung innerer Felder durch Raumladungen signifikant. Dazu ist die Sachkenntnis über den Leitungsmechanismus abhängig von der chemischen Zusammensetzung, der Stoffstruktur und den physikalischen Einflussparametern notwendig [KAH89].

Im Wesentlichen treten in Feststoffisolierungen dieselben Leitungs- und Verlustmechanismen wie in flüssigen Dielektrika auf. Zusätzlich zu den Leitungs- und Polarisationsverlusten kommen noch die Ionisationsverluste in festen Isolierstoffen dazu, welche bei den flüssigen Isoliermedien nur geringfügig bedeutsam sind. Folgeschwere Auswirkungen haben bei den festen Dielektrika bei fehlender Konvektion und Wärmeabfuhr die dielektrischen Verluste, welche bis zur Zerstörung der Feststoffisolierung führen können.

Gleichermaßen wie jede Isolierflüssigkeit (siehe Kapitel 4.4) weisen auch Feststoffe eine bestimmte Konzentration an Ladungsträgern auf. Diese Ladungsträger können unter dem Einwirken eines elektrischen Feldes innerhalb des Isolators verschoben werden und bewirken damit eine (extern messbare) Leitfähigkeit. Dabei ist der Prozess nicht an das Vorhandensein freier und beweglicher Ladungsträger angewiesen, sondern er entsteht vielmehr durch die Ladungsverschiebung bzw. durch die Dipolausrichtung im elektrischen Feld.

Wird eine Gleichspannung am festen Isolierstoff angelegt, so setzt sich der auftretende Strom aus mehreren einzelnen überlagerten Mechanismen zusammen, welche in Summe die spezifische Leitfähigkeit bestimmen:

$$\sigma = \sum_i q_i \cdot n_i \cdot b_i \quad 4.10$$

$q_i$  Ladung (in As)

$n_i$  Dichte (in  $1/m^3$ )

$b_i$  Beweglichkeit (in  $m^2/(Vs)$ ).

Entsprechend der jeweiligen Ladungsträgerbeweglichkeit enden nach gewissen Zeitkonstanten einzelne Mechanismen und haben keinen weiteren Anteil zur Gesamtleitfähigkeit, siehe Abb. 4.7 [BEY86].

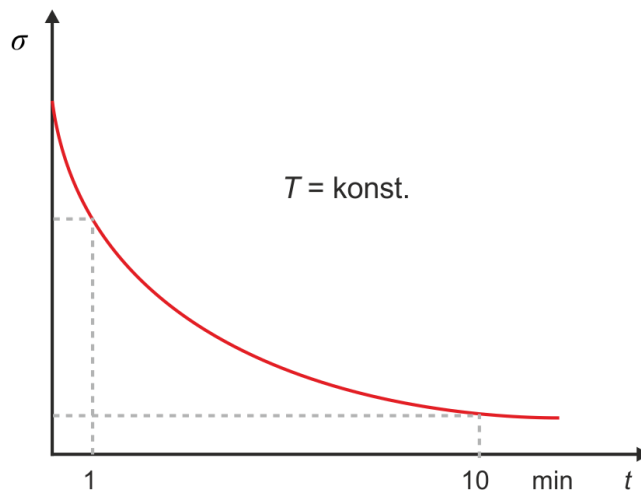


Abb. 4.7: Spezifische Gleichstromleitfähigkeit als Funktion der Zeit einer Feststoffisolierung, nach [BEY86]

Entsprechend dem zeitlichen Verlauf von Abb. 4.7 differenziert man bei festen Dielektrika zwischen einer stationären und transienten Leitfähigkeit. Der stationäre Endwert wird abhängig vom Isoliermaterial, dessen Reinheitsgrad, der Feldstärke sowie der Temperatur zwischen wenigen Sekunden bis hin zu mehreren Monaten erreicht.

Verallgemeinert kann gesagt werden, dass sich der stationäre Zustand umso schneller einstellt, je höher die Temperatur, je höher die Feldstärke und umso höher die spezifische Leitfähigkeit ist. Die transienten Anteile setzen sich zeitlich betrachtet aus folgenden Prozessen zusammen [BEY86]:

- Deformationspolarisation: Verschiebung der negativen bzw. positiven Ladungsschwerpunkte von anfänglich neutralen bzw. unpolaren Atomen, Molekülen und Molekülgruppen (Zeitdauer: Bruchteile einer Pikosekunde)
- Orientierungspolarisation: Ausrichtung von neutralen polaren Molekülen und Molekülgruppen (permanente Dipole wie beispielsweise  $\text{H}_2\text{O}$ ) in Richtung des elektrischen Feldes (Zeitdauer bis zu mehreren Stunden)
- Grenzflächen- und Volumenpolarisation: Verschiebung von negativen sowie positiven Ladungsträgern im Bereich begrenzter Volumen bis zur nachfolgenden unüberwindbaren Gefügegrenzschicht (Zeitdauer bis zu mehreren Tagen)

- Randschichtpolarisation, in Verbindung mit dem Ausbilden von heteropolaren Raumladungen: Verschiebung von Ladungsträgern innerhalb des ganzen Volumens bis zum Elektroden-Randbereich (Zeitdauer bis zu Wochen)
- Verarmung von Ladungsträgern: Abwanderung von Ladungsträgern in die Elektroden bzw. durch Rekombinieren im Dielektrikum (Zeitdauer bis zu Monaten)
- Anreicherung von Elektronen, in Verbindung mit dem Ausbilden einer homopolaren Raumladung vor der Kathode: Elektronen dringen aus der Kathode in das Dielektrikum ein und werden gespeichert („raumladungsbegrenzter Strom“, Zeitdauer bis zu Monaten)

Im Unterschied dazu wird der stationäre Anteil der Leitfähigkeit von freien Ladungsträgern – das sind Elektronen, Defektelektronen (Löcher) und Ionen – verursacht. Wenn so viele Ladungsträger aus dem Leitungsprozess durch Rekombination oder durch Entladen an den Elektroden ausscheiden wie fortwährend durch eine gleich große neue Anzahl ersetzt werden, stellt sich ein stationärer Zustand ein. Ein Erzeugen neuer Ladungsträger geschieht im Fall von Ionen durch Dissoziation von Fremdmolekülen wie beispielsweise Verunreinigungen und Feuchte, aber auch durch thermisch angeregte Gitterschwingungen, durch Strahlung (Molekularstöße) sowie durch Elektronenstoßionisation. Neue Elektronen werden annähernd nur durch Injektion aus der Kathode zur Verfügung gestellt [BEY86]. Beim Ionentransport gibt es allerdings Unterschiede zum Mechanismus des Elektronen- und Löchertransports. Während Ionen sowohl durch Platzwechselforgänge als auch durch Bewegungen im freien Volumen unter Einwirkung eines elektrischen Feldes wandern, ist die Verschiebung von Elektronen bzw. Löchern an das Leitungs- bzw. Valenzband gebunden und damit von der Überlappung der Potentialfunktionen der einzelnen Atome im festen Dielektrikum abhängig [BÄR08], [KAH89].

Anhand der vorangegangenen beschriebenen einzelnen Prozesse wird leicht einsichtig, dass eine integrative Leitfähigkeitsmessung keine Information über die einzelnen verursachenden Mechanismen und ihre beteiligten Ladungsträgerarten enthält. Eine Unterscheidung der stationären und transienten Leitfähigkeit ist selbst bei geringen Feldstärken und Raumtemperatur nahezu nicht möglich, da – bis alle transienten Vorgänge abgeschlossen sind – eine Zeitspanne von mehreren Monaten benötigt würde. Bei der Anwendung von genormten Messverfahren mit einer Minute Prüfzeit gilt es, dies unbedingt zu berücksichtigen. Zur Verifizierung einzelner Mechanismen werden zusätzlich zur „klassischen“ Leitfähigkeitsmessung weitere bedeutend auf-

wendigere Verfahren benötigt. Beispielsweise seien hier das Aufzeichnen von Nachladeströmen und thermisch sowie strahlungsstimulierten Strömen genannt [BEY86].

Wird die Leitfähigkeit in der Größenordnung von 100 V/mm gemessen, so ist nur mit Ionenprozessen zu rechnen. Neben der stationären Ionenleitung können ebenfalls Grenzflächen- sowie Randschichtpolarisation und transiente Dipolorientierung vorkommen. Im Falle sehr hoher Beanspruchung mit Feldstärken unweit der elektrischen Festigkeitsgrenze ergibt sich ein anderer Sachverhalt. Hier kann angenommen werden, dass zur Gesamtleitfähigkeit größtenteils Elektronen als Ladungsträger beitragen, d. h. die Ionenleitung vergleichsweise vernachlässigbar ist. Dementsprechend vereinfacht sich Gleichung 4.10 zu

$$\sigma = n_e \cdot b_e \cdot e \quad 4.11$$

$n_e$	Elektronendichte (in $1/\text{m}^3$ )
$b_e$	Elektronenbeweglichkeit (in $\text{m}^2/(\text{Vs})$ )
$e$	Elementarladung ( $1,6 \cdot 10^{-19}$ As).

Nachdem es sich bei der Elementarladung um eine konstante Größe handelt, ist bei hohen Feldstärken die spezifische Gleichstromleitfähigkeit einzig durch das Produkt aus Elektronendichte und Elektronenbeweglichkeit vorgegeben.

Aus der zumeist metallischen Kathode werden bei ausreichend elektrisch und/oder thermisch zugeführter Energie ständig Elektronen in das Isoliermedium abgegeben. Somit ist die Kathode die Quelle für Ladungsträger, welche die stationäre Leitfähigkeit im Hochfeldbereich erhält.

Für den Übergang der Elektronen aus der metallischen Kathode ist einerseits die felderleichterte thermische Injektion (Richardson<sup>17</sup>-Schottky-Injektion) und andererseits die reine Feldinjektion (Fowler<sup>18</sup>-Nordheim<sup>19</sup>-Injektion) verantwortlich [BEY86].

Die Kathoden-Stromdichte  $J_{KR}$  ergibt sich gemäß dem Richardson-Schottky-Mechanismus zu:

$$J_{KR} = A_R \cdot T_{(-)}^2 \cdot \exp\left(-\frac{W_0 - W_A - B \cdot E_{(-)}^{0.5}}{k \cdot T_{(-)}}\right) \quad 4.12$$

$$\text{mit } B = C_W \cdot \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}} \text{ und } C_W = \frac{1}{1,6} \cdot 10^{19} \frac{\text{eV}}{\text{Ws}}.$$

Nach Fowler-Nordheim lässt sich die kathodische Stromdichte beschreiben mit:

<sup>17</sup> Sir Owen Willans Richardson (1879-1959), britischer Physiker, Nobelpreis für Physik 1928

<sup>18</sup> Ralph Howard Fowler (1889-1944), britischer Physiker und Astronom

<sup>19</sup> Lothar Nordheim (1899-1985), gebürtiger Deutscher, theoretischer Physiker

$$J_{KF} = 1,55 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{E_{(-)}^2}{W_0 - W_A} \cdot \exp\left(-\frac{6,9 \cdot 10^7 \cdot W_0 - W_A^{3/2}}{E_{(-)}}\right) \quad 4.13$$

$J_{KR}$	Kathoden-Stromdichte nach Richardson-Schottky (in $A/cm^2$ )
$J_{KF}$	Kathoden-Stromdichte nach Fowler-Nordheim (in $A/cm^2$ )
$A_R$	Richardson-Konstante ( $120,175 A/cm^2K^2$ )
$k$	Boltzmann <sup>20</sup> -Konstante ( $8,62 \cdot 10^{-5} eV/K$ )
$T_{(-)}$	absolute Temperatur der Kathode (in K)
$W_0$	Elektronenaustrittsarbeit des Kathodenmaterials im Vakuum (in eV)
$W_A$	Elektronenaffinität des Isolierstoffs (in eV)
$E_{(-)}$	Effektivwert der Kathodenfeldstärke (in V/cm)

Bei Feldstärken in der Größenordnung von 2 bis 3 kV/mm ist die elektrisch unterstützte thermische Injektion gemäß Richardson-Schottky überwiegend, wobei bei höheren Feldstärken die so genannte „kalte Feldemission“ gemäß Fowler-Nordheim vorherrscht.

Abb. 4.8 zeigt den Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Feldstärke bei konstanter Temperatur sowie konstanter Messzeit.

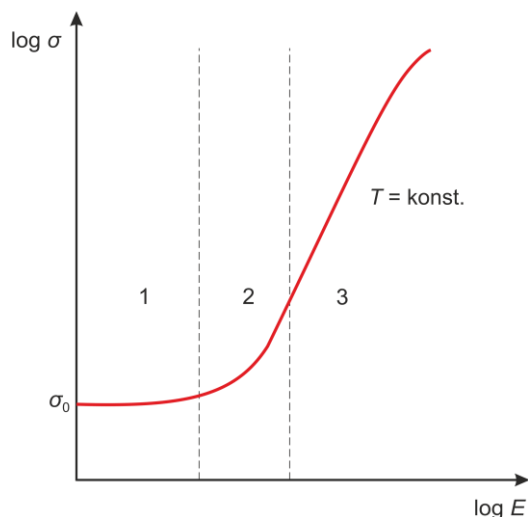


Abb. 4.8: Gleichstromleitfähigkeit in Abhängigkeit der Feldstärke, nach [BEY86]

Bereich I gilt für geringe Feldstärken, in welchem die Leitfähigkeit von der Feldstärke unabhängig ist. Ursache für die Leitfähigkeit sind in diesem Bereich ausschließlich unterschiedliche Polarisationsmechanismen und/oder Ionenleitung.

Im Bereich II werden zur anfänglichen Ionenleitung durch die ansteigende Feldstärke zusätzliche elektronische Prozesse überlagert. Dabei ist der Übergang vom Dielektrikum, dessen Reinheit sowie der Temperatur abhängig und beginnt ungefähr bei 1 kV/mm.

<sup>20</sup> Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), österreichischer Physiker und Philosoph

Die Leitfähigkeit  $\sigma$  im Bereich III gehorcht einem Potenzgesetz entsprechend

$$\sigma \sim E^m, \quad 4.14$$

$E$  elektrische Feldstärke (in V/m)  
 $m$  Zahl, wobei  $m > 0$

welche in Abb. 4.8 durch die doppelt-logarithmische Darstellung als Gerade erscheint. In diesem Bereich wird die Leitfähigkeit nahezu nur durch elektronische Prozesse vorgegeben, wobei es sich um den so genannten Hochfeldbereich handelt. Jenseits des Hochfeldbereichs stellt sich ein Sättigungsgebiet ein, welches sich durch elektronisch verursachte Phänomene wie beispielsweise feldverändernde Raumladungen erklären lässt.

Weiters wirkt neben der Feldstärke die Temperatur als Einflussparameter auf den Leitungsmechanismus im festen Dielektrikum. Es gilt analog zu flüssigen Dielektrika für bestimmte Bereich von Feldstärke sowie Temperatur das Van't Hoffsche Gesetz

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{F}{k \cdot T}\right) \quad 4.15$$

$\sigma$  elektrische Leitfähigkeit (in S/m)  
 $k$  Boltzmann-Konstante ( $8,62 \cdot 10^{-5}$  eV/K)  
 $T$  absolute Temperatur (in K)  
 $F$  Aktivierungsenergie (Stoffkonstante, in eV).

Gegensätzlich zum Feldstärkeeinfluss behandelt Gleichung 4.15 sowohl die Polarisations- sowie Ionenprozesse als auch die elektronischen Prozesse im Hochfeldbereich. Grund dafür ist, dass die molekulare Ladungsträgerbeweglichkeit von „freien“ Ionen sowie Elektronen und ihre Anzahl exponentiell mit der Temperatur zunehmen. Sofern es sich um Ionen handelt, liegt dies in der thermischen Dissoziation begründet, während sich bei Elektronen ein Zusammenhang entsprechend der Gleichungen 4.12 und 4.13 einstellt.

Jedoch kann über die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur keine Aussage über die am Leitungsprozess vorherrschende Ladungsträgerart (Elektronen oder Ionen) getroffen werden. Hierzu müssen zusätzlich Versuche mit unterschiedlichen Feldstärken durchgeführt werden [BEY86].

Ein ausgeprägtes Kennzeichen fester Isolierstoffe sind die langsam abklingenden Polarisations- und Depolarisationsströme, wobei sich die beiden Kurvenformen allerdings gering voneinander unterscheiden. An Grenzflächen und in Molekülen wird auf Grund von Polarisationsvorgängen ausgeprägt viel Ladung gespeichert, welche anschließend durch Entladung der RC-Glieder mit entsprechend unterschiedlichen Zeitkonstanten abfließen [KÜC03], [KÜC07].

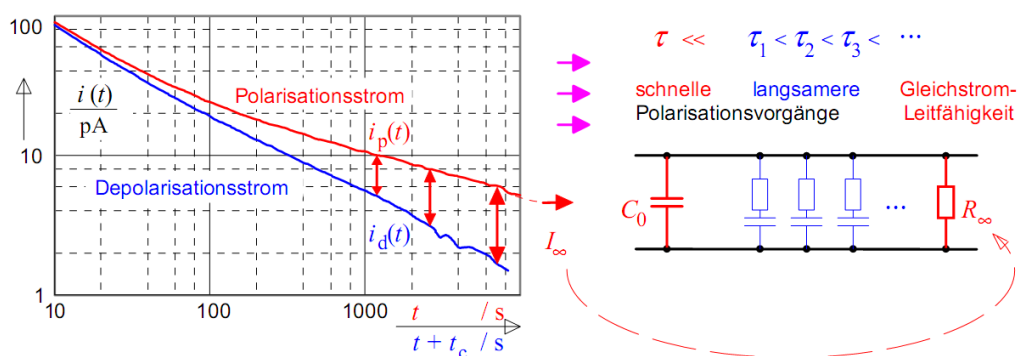


Abb. 4.9: PDC-Messung und dielektrisches Ersatzschaltbild einer ölprägnierten Transformerboard-Probe, aus [KÜC07], die Ströme weisen unterschiedliche Polaritäten auf und sind entsprechend ihrer Amplituden betragsmäßig dargestellt

## 4.7 Leitfähigkeit des Öl-Board-Isoliersystems

Bei trockenen Materialien sind ermittelte Leitfähigkeiten zwischen 1 und 20 kV/mm nur gering feldstärkeabhängig. Eine Leitfähigkeitszunahme um etwa 20 % konnte bei Feldstärken über 20 kV/mm beobachtet werden, welche vom nichtlinearen Verhalten des Isolieröls verursacht wurde. Ebenso konnten Nichtlinearitäten unter 1 kV/mm festgestellt werden.

Bei mit Öl imprägnierter Zellulose nimmt die Leitfähigkeit mit dem Wassergehalt zu. Laut [KÜC09] kommt es zu einer Stromleitung entlang befeuchteter Fasern und zu einer Grundleitfähigkeit auf Grund ölfüllter Kapillaren. Es zeigte sich inzwischen, dass eventuell die Leitfähigkeit von der Verteilung der Feuchte in der Probe oder der Art der Befeuchtung abhängig ist. Weiters wurde aufgezeigt, dass Leitfähigkeiten und Polarisationsströme in ölprägnierter Zellulose durch Alterungsprodukte stark erhöht werden können.

Für unterschiedliche Materialien lässt sich die Größenordnung der Leitfähigkeit allgemein nur ungenau angeben, siehe dazu Abb. 4.10. Sie ist von den Parametern Feldstärke, Feuchtigkeit, Temperatur, Zeitdauer, Material und Reinheit abhängig. Deswegen kann unter scheinbar ähnlichen Bedingungen die Leitfähigkeit über mehrere Zehnerpotenzen variieren. Bei der Feldberechnung von HGÜ-Anlagen stellt die Verwendung realitätsnaher Leitfähigkeitswerte ein bedeutendes Problem dar [GOC10<sup>1</sup>], [KÜC09].

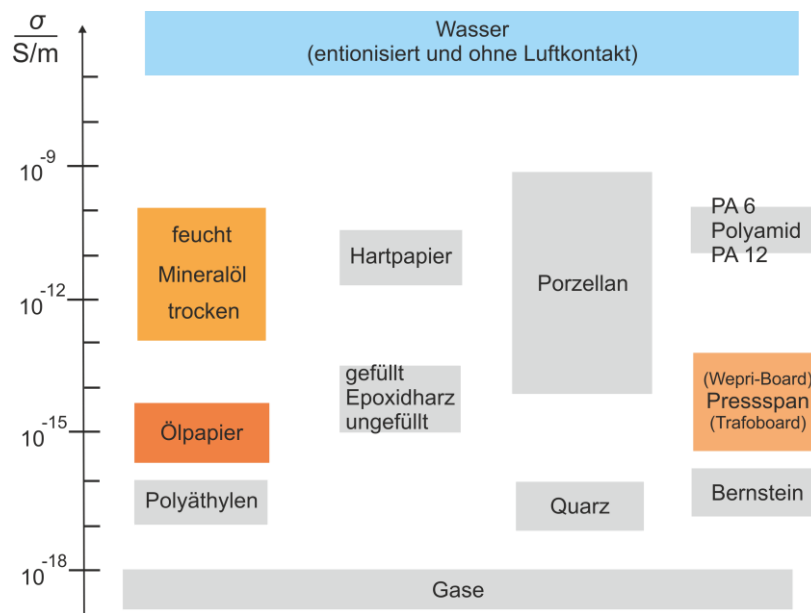


Abb. 4.10: Leitfähigkeiten verschiedener Materialien bei Raumtemperatur, ohne Berücksichtigung verschiedener Einflussparameter, nach [KÜC09]

Untersuchungen nach [KOC05] betrachten die Rahmenbedingung für das richtige Messen der Ölleitfähigkeit unter Berücksichtigung der Ölfeuchte, des Alterungszustandes und der Messspannung. Wasser liefert durch ionisierbare Substanzen die Basis für elektrolytische Dissoziation und ändert damit, wenn auch indirekt, die Leitfähigkeit des Isolieröls. Bisher lassen sich mittels elektrischer Netzwerke linearer Elemente die Leitungsmechanismen der Ionenleitung im Öl sowie Diffusionseffekte der Ladungsträger an der Öl-Board-Grenzschicht in erster Näherung beschreiben. Laut [KOC05] sind bei trockenem und/oder neuem Öl eine niedrige Feldstärke und Einschränkung auf ein Zeitfenster notwendig, um Messungen ohne verzerrende Störeinflüsse zu erhalten.

Grundsätzlich erfassen dielektrische Messungen eine Überlagerung unterschiedlicher physikalischer Phänomene, wobei die Polarisierung an der Öl-Board-Grenzfläche eine große Rolle spielt. Dabei unterliegt diese Art der Polarisierung mehreren Einflussparametern: unter anderem dem geometrischen Aufbau der Grenzschicht, der angelegten Spannung, der Temperatur des Isolationssystems, der Leitfähigkeit sowie dem Leitungsmechanismus im Isolieröl. Aus mehreren Veröffentlichungen geht hervor, dass es bei der Modellierung der dielektrischen Antwort an geschichteten Isolationssystemen Schwierigkeiten gibt. Die bisherige Nachbildung erfolgte mit RC-Gliedern und bietet nur eine erste Näherung des tatsächlichen Verhaltens. Nichtlinearitäten ergeben sich aus dem Verhalten der Ölleitfähigkeit, siehe dazu auch [LIE09], [SCH10], [ZER10].



Gleich wie in Feststoffisolierungen liegen der Volumenleitfähigkeit flüssiger Isolieröle Verunreinigungen zu Grunde. Reines Isolieröl weist weder Ionen noch freie Elektronen auf. Rückstände aus dem Raffinationsprozess, Verunreinigungen während der Montage oder Alterungsprodukte stellen negativ oder positiv geladene Ionen zur Verfügung, welche den dominierenden Ladungsträgertyp darstellen. Erst jetzt kann es durch äußeres Wirken eines elektrischen Feldes bzw. durch einen entsprechenden Konzentrationsgradienten der Ionen zum Fließen eines elektrischen Stromes kommen. Mit der Ionenbewegung mitinbegriffen ist auch stets ein Materialtransport.

Man bezeichnet die Trennung von Ionen unter dem Einfluss von Wasser als elektrolytische Dissoziation. Reinstes Wasser besitzt eine Leitfähigkeit von  $\sigma = 6 \cdot 10^{-6}$  S/m bei 25 °C. Wasser tritt im Isolieröl jedoch nur in geringen Anteilen auf (einige  $\mu\text{g/g}$ ), d. h. die Leitfähigkeit wird überwiegend von Säuren (verschiedene Karbonsäuren) beeinflusst. Sie sind in geringen Mengen auch in neuwertigem Isolieröl zu finden, entstehen aber vorwiegend während der Alterung gesättigter Kohlenwasserstoffe. Falls vorhanden, dissoziieren auch Basen sowie Salze und verursachen eine elektrische Leitfähigkeit. Laut [LIN66] können Makromoleküle, welche durch Polykondensation und Polymerisation entstehen können, ebenfalls zur Leitfähigkeit beitragen.

Einerseits wird von unterschiedlichen Autoren berichtet, dass der Wassergehalt keinen Einfluss auf die Ölleitfähigkeit habe, andererseits berichten andere Autoren, Gegenteiliges herausgefunden zu haben. Laut [KOC05] ist zu schließen, dass Wasser in jedem Fall wegen dessen Dissoziation die Leitfähigkeit von Isolieröl erhöht, dieser Effekt allerdings wegen der geringen Wassermenge sowie geringen Ionenkonzentration unterhalb der Messbarkeitsschwelle liegt. Befinden sich Säuren in der Isolierflüssigkeit, ändern auch sie, sofern diese nicht dissoziieren können, die Leitfähigkeit nicht. Zur Dissoziation ist jedoch Wasser nötig. Fazit: Für eine messbare Erhöhung der Ölleitfähigkeit müssen sowohl Wasser als auch Säuren vorhanden sein. Beide entstehen bei der Alterung des Öl-Board-Isoliersystems.

## 4.8 Messaufbau und Versuchsplanung

Um die verschiedenen Einflussparameter auf die Leitfähigkeit zu quantifizieren, wurden gemäß Abb. 4.11 eine Variation der Temperatur, der elektrischen Feldstärke sowie der Board-Proben durchgeführt. Eine Langzeitmessung von 24 Stunden des Polarisationsstromes sowie eine anschließende 24-Stunden-Messung des Depolarisationsstromes wurden angestellt.

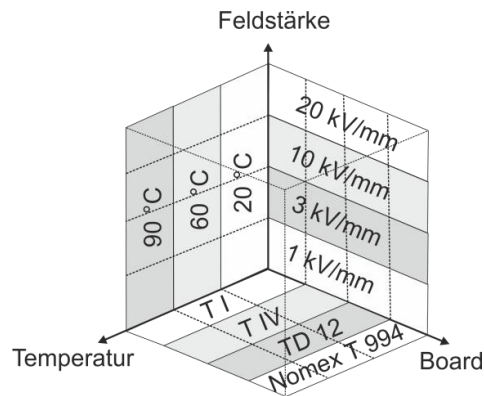


Abb. 4.11: Prüfmatrix der verschiedenen Parameter zur Bestimmung der Leitfähigkeit des Öl-Board-Isoliersystems

Zusätzlich wurde für den Board-Typen Transformerboard T I (kalandriert) eine Variation der absoluten Board-Feuchte von 1, 2 und 4 % bei 25 und 60 °C durchgeführt. Die Befeuchtung der Board-Proben fand am Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik der Technischen Universität Graz statt. Zunächst erfolgte die Bestimmung des Trockengewichts nach 24-stündiger Trocknung der Board-Probe im Trockenschrank bei 105 °C mittels Präzisionswaage. Die anschließende Befeuchtung wurde in einem Klimaschrank bei definierter Luftfeuchte (30 %rH) und Temperatur (30 °C) durchgeführt. Durch permanentes Abwiegen der Board-Probe wurde solange gewartet, bis sich das gewünschte Gewicht der Board-Probe durch die Befeuchtung eingestellt hatte. Nach den durchgeführten Versuchen wurden die Board-Proben mittels Karl Fischer Titration auf ihren Feuchtegehalt vermessen, um zu verifizieren ob die Board-Proben während der Versuchsdauer ausgetrocknet sind. Eine Austrocknung konnte lediglich bei der Befeuchtung von 4 % am Rand der Board-Probe festgestellt werden, wobei unter der Elektrodenfläche die Board-Feuchte erhalten geblieben ist.

Für die Auswertung der Messergebnisse wurden die Temperatur und der Wassergehalt des Öles mitprotokolliert. Um möglichst genaue Prüfbedingungen zu erhalten, musste der Sensor so nah wie möglich am Prüfling Öltemperatur und Wassergehalt erfassen. Da es sich um eine kapazitive Feuchtigkeitsmessung handelte und einstreue Felder die Messung verfälschen, wurde der Sensor in einem feldfreien Raum platziert. Der neu konstruierte Prüfkessel zur Leitfähigkeitsmessung sowie die Elektrodenanordnung sind in Abb. 4.12 schematisch wiedergegeben.

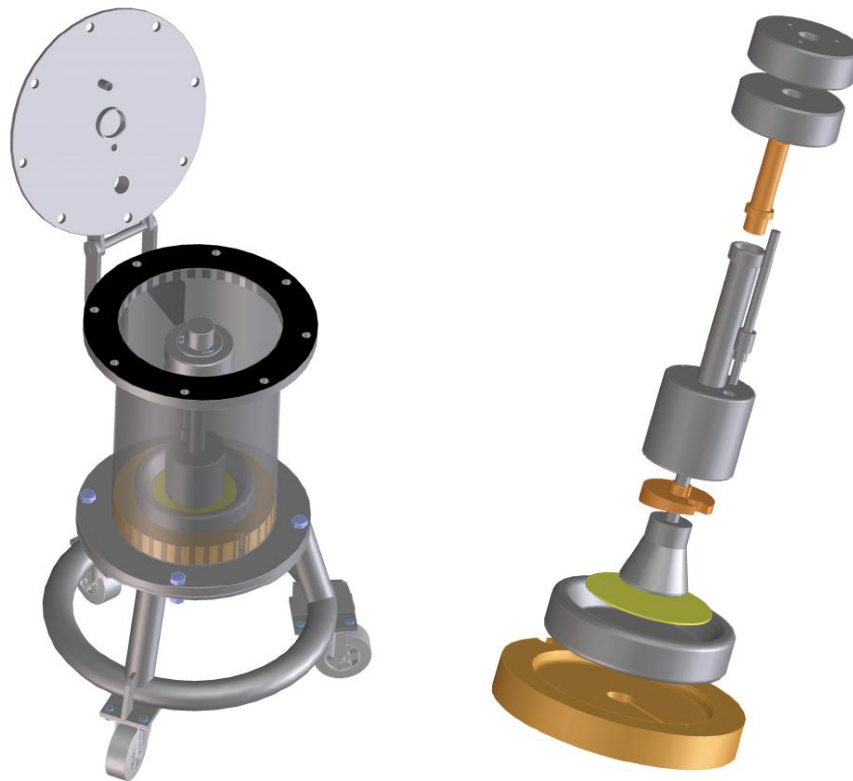


Abb. 4.12: Schematische Darstellung des Kessels (Kesselwand transparent gezeichnet) zur Leitfähigkeitsmessung von Board-Proben (links); Explosionszeichnung der Elektrodenanordnung zur Leitfähigkeitsmessung (rechts)

Damit einstreuende Felder auf die Messelektrode verhindert werden, soll der Schutzring eine möglichst gute Abschirmung zwischen Messelektrode und Spannungselektrode gewährleisten. Um die Schirmwirkung des Schutzringes zu erhöhen, wird die Messelektrode vollständig in den Schutzring eingebettet. Der Schutzring erzeugt in Verbindung mit der Beschwerungs­masse (Elektrodenanpressdruck gemäß IEC 60554 [IEC 60554] mindestens  $20 \text{ kPa}^{21}$ ) eine Schirmung der Messelektrode bis zur elektrischen Anschluss­stelle. Die Messelektrode und Schutz­elektrode werden mit Kunststoff­ringen auf Distanz gehalten, um galvanisch entkoppelt zu sein.

Um Luftbläschen in der Elektrodenanordnung zu verhindern, wurden Maßnahmen, insbesondere für den Bereich zwischen Messelektrode und Schirmelektrode, getroffen, um ein Aufsteigen der Luftblasen zu ermöglichen. Die Formgebung des sich dort befindlichen Distanzstückes soll in Verbindung mit Bohrungen für eine optimale Ölverteilung ohne Lufteinschlüsse sorgen. Weiters wurde nach jedem Board-Probenwechsel sehr kurzfristig (Größenordnung einige Minuten) ein Vakuum an den Prüfkessel angelegt, um Gasblasen im Öl sowie das (feuchte) Raumluf­tvolumen in-

<sup>21</sup>  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$

nerhalb des Kessels abzusaugen und mit getrockneter Luft (über einen Behälter mit Silicagelkugeln) zu befüllen.

In Abb. 4.13 wird überblicksmäßig der Mess- und Prüfaufbau dargestellt, wobei zusätzlich zur Strommessung alle Messgeräte eingezeichnet sind, welche zum Monitoring der relevanten Einflussparameter (Spannungsmessung sowie Umgebungsbedingungen in Öl und Luft) benötigt wurden.

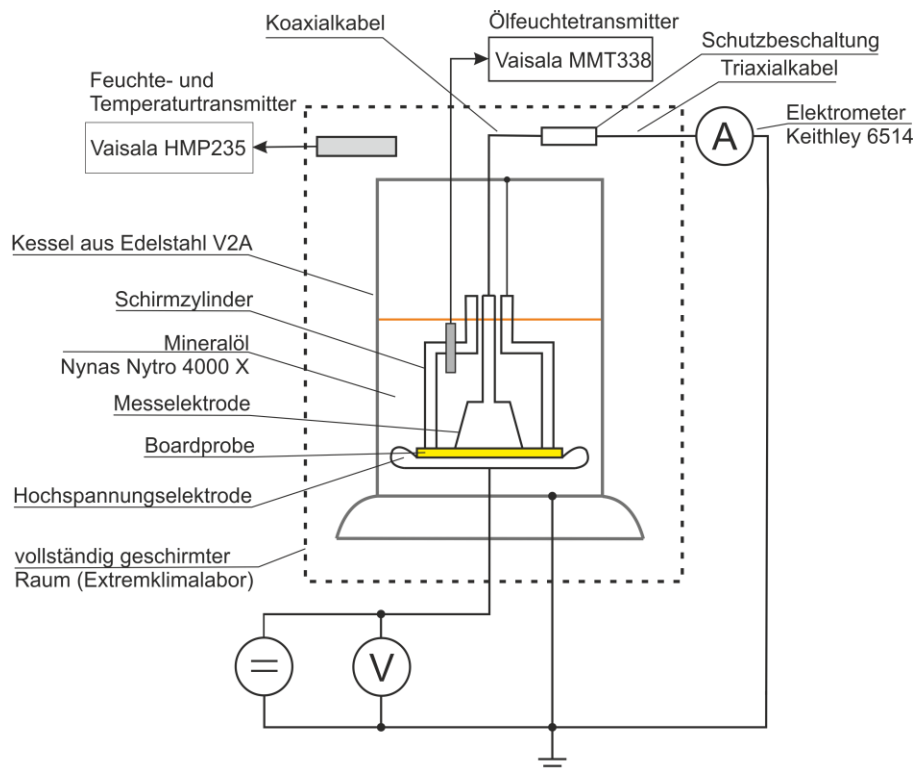


Abb. 4.13: Schematisches Ersatzschaltbild zum Mess- und Prüfaufbau

Die verwendete Schutzbeschaltung soll im Falle eines Durchschlages das hoch sensible Elektrometer vor Beschädigung bewahren. Diese wurde in Anlehnung an das Buch „Low Level Measurement Handbook“ [LLM04] entworfen und konstruiert. Die Diagramme zu den einzelnen Versuchen sind dem Anhang B (siehe Seite 111ff) zu entnehmen.

*„Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig: Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuwerfen.“*

Albert Einstein (deutscher Physiker und Nobelpreisträger)

## 5 Teilentladungsdiagnose bei hoher Gleichspannung

### 5.1 Anwendungsfeld und Ziele der Teilentladungsmessung

Beim Betrieb elektrischer Betriebsmittel gilt es, Teilentladungen (TE) speziell für feste sowie Mischisolierungen weitgehend zu verhindern, zumindest möglichst gering zu halten. Teilentladungen sind bezüglich der elektrischen Alterung als kritischste Beanspruchung zu erachten. Daher wird häufig bei Werkprüfungen vor der Inbetriebnahme die Isolierung auf Teilentladungsfreiheit geprüft. Weil jedoch auch Alterungsprozesse während des Betriebs Teilentladungen begünstigen können, sind bei wichtigen elektrischen Betriebsmitteln kontinuierlich Teilentladungsdiagnosen angebracht [KAH89]. In der Hochspannungstechnik werden zur zerstörungsfreien Diagnostik von Isolationssystemen und Werkstoffen weltweit Teilentladungsmessungen angewendet. Während das Durchschlagsverhalten von Isolierstoffen weitgehend erforscht ist, lässt die höchst komplexe Interpretation von Teilentladungsmessungen Spielraum offen. Obwohl sich im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte Fachwissen angesammelt hat, sind die Teilentladungsmechanismen selbst bisher noch wenig verstanden.

Bei Wechselspannung werden üblicherweise zur Beurteilung der Messdaten phasenaufgelöste Diagramme, welche in Relation zur Frequenz der Prüfspannung stehen, herangezogen. Die so genannten „Fingerprints“, welche in dieser phasenaufgelösten Darstellung generiert werden, können dann in weiterer Folge von Experten und Expertensystemen analysiert werden. Eine Zuordnung in „innere“ und „äußere“ Teilentladungen erfolgt hier über den Phasenwinkel, bei dem die Teilentladung detektiert wird. Im Fall von Gleichspannung fehlt jedoch die Information der Phase, und somit ist keine Zuordnung der Teilentladungen möglich. Erschwerend kommt hinzu, dass externe Störer schwieriger von Teilentladungen, welche vom Prüfling kommen, zu unterscheiden sind. Durch den ansteigenden Bedarf an elektrischer Energie ist ein weiterer Ausbau der Gleichspannungsübertragung zu noch höheren Betriebsspannungen zu erwarten. Im Speziellen werden Teilentladungsmessungen bei Betriebsmitteln wie Stromrichtertransformatoren für HGÜ-Anlagen, bedingt durch die extrem hohen elektrischen Feldstärken, immer bedeutsamer [POR96], [RET09].

## 5.2 Stand der Normung

Die Teilentladungsmessung bei hohen Gleichspannungen wird in den fach einschlägigen Normen (z. B. IEC 60270) nur sehr oberflächlich abgehandelt. Daher werden meist in Absprache zwischen Hersteller und Abnehmer die Prüfbedingungen sowie der Prüfpegel definiert, wobei die Prüfung das Teilentladungsverhalten bei der Gleichspannungsbeanspruchung dokumentiert [KÖN93].

Gemäß der Norm IEC 60270 [IEC 60270]<sup>22</sup> gilt: *„Die Verfahren, die für Wechselspannung beschrieben sind, um die TE-Einsetz- und TE-Aussetzspannungen zu bestimmen, sind im Allgemeinen für Prüfungen mit Gleichspannung nicht anwendbar, da die Beanspruchung des Dielektrikums während des Spannungsanstieges und -abfalls unterschiedlich zu der ist, wenn die Spannung konstant bleibt.*

*Es gibt kein allgemein anerkanntes Verfahren, die Teilentladungsgrößen bei Prüfungen mit Gleichspannung zu bestimmen. Welches Verfahren auch immer angewendet wird, es ist wichtig zu wissen, dass sich bei konstanter Prüfspannung die Stärken in Bezug zu Teilentladungen zu Beginn der Spannungsbeanspruchung von den Stärken nach einer beträchtlichen Zeitspanne unterscheiden können.“*

Daher ist in der IEC-Arbeitsgruppe<sup>23</sup> ein Anhang zur Gleichspannungsmessung in Bearbeitung.

## 5.3 Theoretische Grundlagen von Teilentladungen

Bei der Spannungsbeanspruchung von Isolierstoffen wird zwischen so genannten *vollkommenen* und *unvollkommenen* Durchschlägen unterschieden. Während beim vollkommenen Durchschlag die Isoliereigenschaft des Isoliermediums verloren geht, bricht beim unvollkommenen Durchschlag hingegen nur ein Teil der Isolierstrecke zusammen. Ein solcher Teildurchschlag wird in der Fachterminologie als Teilentladung bezeichnet, wobei die restliche Isolierstrecke der Spannungsbeanspruchung weiterhin standhält [KÖN93].

Die Ursache von Teilentladungen ist in lokalen Feldstärkenüberhöhungen und durch Minderungen der elektrischen Festigkeit begründet. Feldstärkenüberhöhungen resultieren aus leitfähigen Spitzen oder durch Feldverdrängung, eine Minderung der elektrischen Festigkeit kann beispielsweise durch Gasblasen im Isolieröl verursacht werden. Das Entladungsverhalten selbst hängt von der Art der Beanspruchung wie Stoß-, Wechsel- oder Gleichspannung stark ab [KÜC09]. Bei Beanspruchung mit

<sup>22</sup> Deutsche Fassung EN 60270:2011, August 2001

<sup>23</sup> IEC 60270, Convenor Prof. Michael Muhr, Technische Universität Graz

Gleichspannung sind Teilentladungen in der Feststoffisolierung beträchtlich von der Leitfähigkeit abhängig [KAH89].

In Isolierölen können stationäre Teilentladungen im stark inhomogenen Feld auftreten, wobei sich die Streamer durch Raumladungen stabilisieren und somit kein Durchschlag stattfindet. Als ein wesentlicher Indikator für den Verschmutzungsgrad, den Feuchte- sowie Gasgehalt einer Isolierflüssigkeit ist die Teilentladungseinsatzfeldstärke bei einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung zu nennen. Weiters führen leitfähige Partikel zu einer lokalen Feldüberhöhung, begründet durch ihre Spitzenwirkung.

Gasschichten und Blasen sind meist der Auslöser für Teilentladungen im Öl. Dabei wird die Feldstärke im Gas durch Feldverdrängung erhöht. Durch das Erhöhen der Spannung kommt es nach Erfüllen der Townsend'schen<sup>24</sup> Zündbedingung bereits bei verhältnismäßig kleinen Spannungen im Gas zu Teilentladungen. Ebenfalls führen Teilentladungen selbst zur Gasbildung, wobei die entstehenden Spaltgase (auch als „Schlüsselgase“ bezeichnet) durch eine Gas-in-Öl-Analyse (DGA) analysiert werden können. Lösen sich Spaltgase im Isolieröl, so wirkt das freie Gas förderlich für Teilentladungen, merkbar an einer zunehmenden TE-Intensität.

Bei der Befüllung eines Betriebsmittels mit Isolieröl kann durch ungenügende Entgasung oder ungenügend angelegtes Vakuum so genanntes freies Gas im Öl entstehen. Weiters führen Verwirbelungen bzw. Strömungen innerhalb einer gashaltigen Isolierflüssigkeit ebenfalls zur Gasbläschenbildung. Befindet sich dieses freie Gas im Öl, so hat dies einen maßgeblichen Festigkeitsverlust zur Folge (vgl. Gasaufnahmevermögen). Analog dazu gilt es, freies Wasser in ölgefüllten Betriebsmitteln zu vermeiden, weil die elektrische Festigkeit auf Werte weit unterhalb der technischen Ölfestigkeit sinken kann [KÜC09], [PUK08].

Teilentladungen lassen sich aus verschiedenen Betrachtungswinkeln beurteilen. Dementsprechend unterscheidet man Teilentladungen nach ihrer Erscheinungsform, ihrem zeitlichen Auftreten, den Zünd- sowie Löschbedingungen, der Teilentladungseinsatz- sowie -aussetzspannung und weitere. Die Einsatz- und Aussetzspannung bzw. die dazugehörigen Feldstärken sind verantwortlich für das Zünden und Löschen der Teilentladungen, wobei die TE im Bereich der Höchstfeldstärke  $E_h$  gezündet wird.

Man differenziert je nach Homogenitätsgrad (Schwaiger'scher<sup>25</sup> Ausnutzungsfaktor, siehe auch Kapitel 5.7.1) zwischen stabilen und instabilen Teilentladungen. Ist der Homogenitätsgrad  $\eta$  kleiner als 0,1, erfolgt kein Durchschlag im beanspruchten Vo-

<sup>24</sup> John Sealy Townsend (1868-1957), britischer Physiker

<sup>25</sup> Anton Schwaiger (1879-1954), deutscher Elektrotechniker

lumen zwischen den Elektroden, während für höhere Homogenitätsgrade ein sofortiger Durchschlag eingeleitet wird. Um eine TE zu zünden, wird eine bestimmte kritische Strecke  $x_{kr}$  benötigt, welche maßgeblich von der Feldverteilung vorgegeben ist. Im Folgenden zeigt dazu Abb. 5.1 den schematischen Verlauf [KAH89].

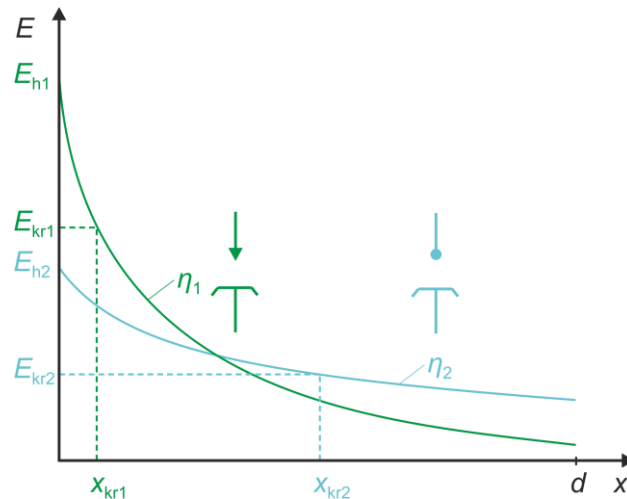


Abb. 5.1: Darstellung der kritischen Feldstärke  $E_{kr}$  sowie der kritischen Wege  $x_{kr}$  für die Zündung von Teilentladungen innerhalb inhomogener Felder ( $\eta < 1$ ), nach [KAH89]

Bei bestehenden Teilentladungen konnten je nach Polarität der inhomogenen Elektrode verschiedene Raumladungsansammlungen entsprechend der jeweiligen Elektronen- bzw. Ionenbeweglichkeit festgestellt werden. Dabei führten die Raumladungsansammlungen zur Bildung eines Gegenfeldes und somit in weiterer Folge zur Abschwächung der Entladungsbedingungen. Der Entladungsstrom wird abgebremst, bis hin zur vollständigen Unterbindung der Entladung durch das Gegenfeld.

Abb. 5.2 veranschaulicht den veränderten Feldverlauf sowie den Raumladungsaufbau bei einer Nadel-Platte-Elektrodenanordnung.

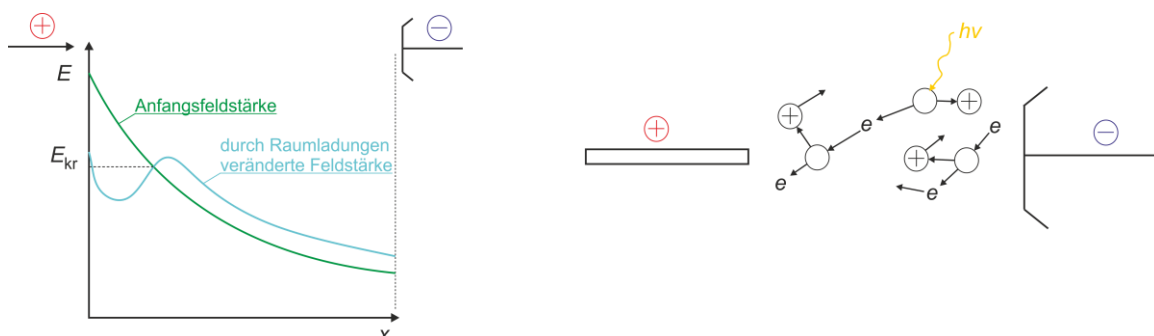


Abb. 5.2: Veränderter Verlauf des Feldes bei Teilentladungsaufbau (links), räumlicher Ladungsaufbau einer Nadel-Platte-Elektrodenanordnung (rechts), nach [KAH89]

Wegen ihrer geringen Beweglichkeit als auch der Laufrichtung im divergierenden Feld bilden die positiven Ionen vor der Nadelspitze eine Raumladung positiver Polari-



tät aus. Dabei verlaufen die Aufbauprozesse von Teilentladungen und Raumladungen in sehr kurzer Zeit [KAH89].

Vergleicht man unterschiedliche Beanspruchungsfälle bezüglich der Spannungsform, so muss in Teilgebieten der Isolierung mit Verunreinigungen eine unterschiedliche Feldstärke angenommen werden, siehe Abb. 5.3. Im Falle einer Gleichspannungsbeanspruchung kommt es durch Inhomogenitäten der Elektroden als auch durch Ladungsträgerkonzentrationen (Leitfähigkeitserhöhung) im Isolierstoff zu einer verminderten Lokalfeldstärke. Bei pulsierenden unipolaren Beanspruchungen (Vollweggleichrichtung ohne Glättung) ergibt sich durch dielektrische Störungen jedoch eine Felderhöhung. Neben der lokalen Feldstärkenenerhöhung an der Fehlstelle bilden sich außerdem Raumladungen aus, im Besonderen vor der Momentankathode, welche in Randschichten des Isoliermediums die Feldstärke an der Fehlstelle weiter erhöhen [KAH89].

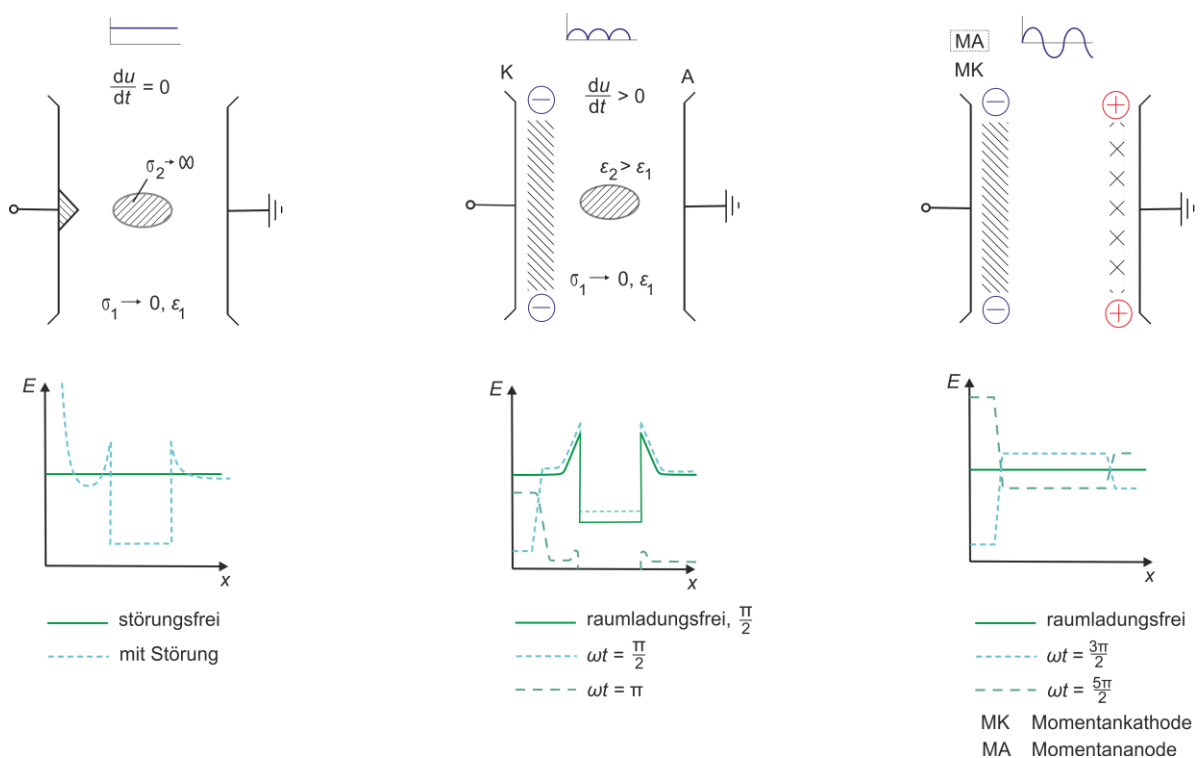


Abb. 5.3: Veranschaulichte Feldverhältnisse bei Gleichspannung mit leitfähiger Verunreinigung (links), Vollweggleichrichtung (ohne Glättung) mit dielektrischer Verunreinigung (mittig), Wechselfspannung (rechts), nach [KAH89]

Trotz der starken örtlichen Begrenzung von Teilentladungen weisen diese sehr komplexe Phänomene auf, welche chaotische, nicht stationäre oder zeitabhängige Charakteristiken zeigen. Begründen lässt sich dies durch die Vielzahl unterschiedlicher geometrischer Anordnungen sowie unterschiedlichster Materialeigenschaften, wobei festgestellt wurde, dass die Wirkung von Teilentladungen das physikalische und

chemische Entladungsverhalten selbst beeinflusst und sich so das nicht stationäre Verhalten erklären lässt. Das stochastische Verhalten erschwert die Interpretation, Quantifizierung und Ortung der Teilentladungsimpulse maßgeblich.

Gemäß der Tatsache, dass viele Entladungstypen unterschieden werden, ist es schwierig, eine sinnvolle und exakte Definition zu finden. Analog zur Beschreibung des Phänomens „Wetter“ ist es leicht, eine Aussage wie „sonnig“ oder „bewölkt“ zu treffen, aber eine Vorstellung von „teilweise bewölkt“ bzw. „überwiegend sonnig“ wird sehr subjektiv aufgefasst. Daher scheint sich eine exakte Beschreibung nur mathematisch als sinnvoll zu erweisen. In der Praxis haben sich auf Grund der komplexen mathematischen Beschreibung jedoch auch qualitative Größen eingebürgert.

Abb. 5.4 stellt im Überblick die komplexen chemischen und physikalischen Zusammenhänge dar, wobei Abb. 5.5 unter Berücksichtigung des Alterungsprozesses gilt.

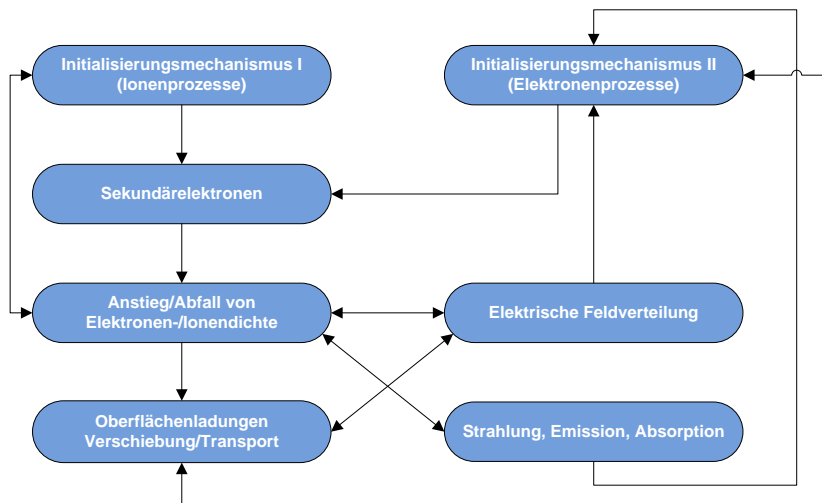


Abb. 5.4: Blockdiagramm zur Darstellung des Teilentladungsmodells bei TE-Einsatz, TE-Steigerung und TE-Abfall für kurze Zeiten ohne Alterungseinfluss, nach [BRU94]

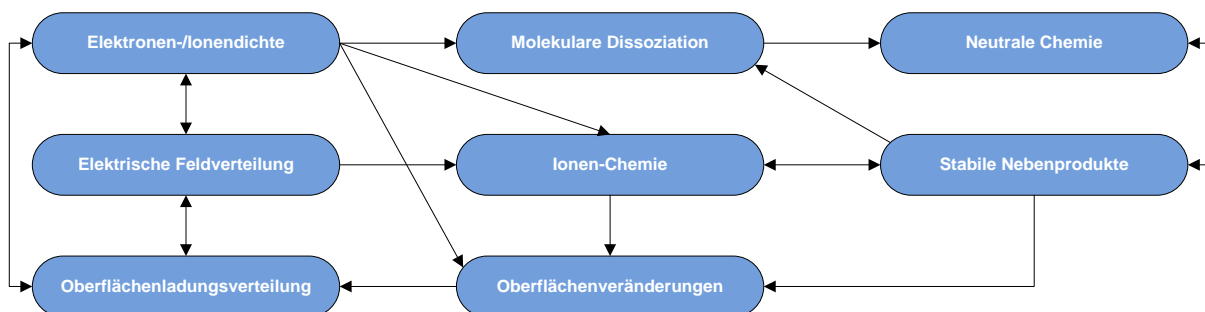


Abb. 5.5: Blockdiagramm zur Darstellung des Teilentladungsmodells unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen Veränderungen bei Alterungseinfluss, nach [BRU94]

Das Phänomen der Teilentladung kann mittels Differentialgleichungen mathematisch beschrieben werden. Es kann behauptet werden, dass für alle verschiedenen Typen

von Entladungserscheinungen dieselben Gleichungen gültig sind. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Entladungsarten lassen sich durch Anfangsbedingungen (z. B. Druck, Oberflächenleitfähigkeit) sowie Randbedingungen (z. B. Elektrodengeometrie, Materialdicke, angelegte Spannung) berücksichtigen. Im Allgemeinen sollten die aufgestellten Teilentladungsmodelle sowohl die physikalischen als auch chemischen Prozesse beinhalten. Dabei seien folgende physikalische Prozesse beispielsweise genannt: Ionisation, Elektronenanlagerung, Diffusion von neutralen und geladenen Ladungsträgern. Chemische Prozesse sind zum Beispiel chemische Reaktionen, welche an Oberflächen durch neutrale oder geladene Ladungsträger ablaufen. Ungeachtet dessen lassen sich physikalische und chemische Prozesse nicht unabhängig voneinander betrachten, da diese in Wechselwirkung zueinander stehen. So beeinflusst die Ionenformation durch Elektronenkollision jene Ionen und Moleküle, welche für die Formation von stabilen bzw. quasi-stabilen molekularen Nebenprodukten verantwortlich sind.

Die Differentialgleichungen werden im Folgenden anhand des Beispiels für Sauerstoff gemäß dem Modell nach *Morrow* für ein Modell negativer Koronaimpulse aufgestellt, welche aber für das Verständnis dieser Arbeit nicht benötigt werden.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = n_e \alpha |\vec{v}_e| - n_e \eta |\vec{v}_e| - n_e n_p \beta_1 - \nabla \cdot \vec{v}_e n_e + \nabla^2 D_e n_e \quad . \quad 5.1$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = n_e \alpha |\vec{v}_e| - n_e n_p \beta_1 - n_n n_p \beta_2 - \nabla \cdot \vec{v}_p n_p + \nabla^2 D_p n_p \quad . \quad 5.2$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} = n_e \eta |\vec{v}_e| - n_n n_p \beta_2 - \nabla \cdot \vec{v}_n n_n + \nabla^2 D_n n_n \quad . \quad 5.3$$

$n_e, n_p, n_n$	Elektronen-, positive Ionen-, negative Ionendichte (in $1/m^3$ )
$v_e, v_p, v_n$	Driftgeschwindigkeit der Elektronen, positiven Ionen, negativen Ionen (in m/s)
$\alpha, \eta, \beta_1$	Elektronenionisations-, Elektronenanlagerungs-, Elektronenrekombinationskoeffizienten
$D_p, D_n, \beta_2$	Diffusionskoeffizienten für positive und negative Ionen sowie Ionen-Rekombinationskoeffizient (in $m^2/s$ )

Die oben genannten drei Gleichungen lassen sich zu einer dreidimensionalen Poisson<sup>26</sup>-Gleichung für das elektrische Feld zusammenfassen:

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}) = \frac{e}{\epsilon_0} [n_p(\vec{r}) - n_n(\vec{r}) - n_e(\vec{r})] \quad . \quad 5.4$$

Sofern feste Dielektrika vorhanden sind, verkomplizieren sich die Oberflächen-Randbedingungen, und das elektrische Feld wird zusätzlich orts- und zeitabhängig.

<sup>26</sup> Siméon Denis Poisson (1781-1840), französischer Physiker und Mathematiker

Das elektrische Feld auf der Oberfläche eines Isolators hängt von dessen Oberflächenladungsdichte  $\sigma$  ab, diese ergibt sich zu

$$\sigma(\vec{r}', t) = \left[ \varepsilon_2 \vec{E}_-(\vec{r}', t) - \varepsilon_1 \vec{E}_+(\vec{r}', t) \right] \cdot \vec{n} \quad 5.5$$

mit  $\vec{n}$  als Einheitsvektor normal zur Oberfläche.

## 5.4 Wirkung und Diagnosegrößen von Teilentladungen

Bedingt durch die Tatsache, dass Teilentladungen im Allgemeinen örtlich sehr begrenzt sind, wird in einem kleinen Gebiet des Dielektrikums eine große Leistung in der Größenordnung von 1 bis 10 W/cm<sup>3</sup> umgesetzt. Vergleicht man diese Leistung mit den – durch den Leitungsmechanismus sowie Polarisierung hervorgerufenen – dielektrischen Verlusten von ungefähr 0,01 W/cm<sup>3</sup>, so ist der Energieeintrag von Teilentladungen auf diese kleinen örtlich beschränkten Gebiete beträchtlich größer [POR96].

Es lassen sich die folgenden von TE verursachte Wirkungen aufzählen [POR96]:

- Die stetige Zufuhr von Energie führt zu einer Erwärmung sowie Druckerhöhung an der Entladestelle. Die daraus resultierende Druckwelle kann in weiterer Folge zur mechanischen Zerstörung führen, genauer gesagt zur Spaltflächenbildung durch so genanntes „*Treeing*“ in vorwiegend spröden Isoliermaterialien. Die entstehenden Druckwellen können zur akustischen Ortung verwendet werden.
- Gleichermaßen entsteht in der elektrischen Entladung eine Strahlung sowohl im sichtbaren als auch UV-Bereich. Somit lassen sich auch über ein optisches TE-Messsystem Fehlstellen orten.
- Entladungen im Gasraum (z. B. Gasblasen oder Lufteinschlüsse) führen zu chemischen Reaktionen. Zusammen mit Feuchtigkeit können sich aggressive Verbindungen bilden, welche zur Werkstoffkorrosion führen können.
- Bei flüssigen Isoliermedien führt eine chemische Zersetzung zur Bildung von niedermolekularen Verbindungen, welche meist gasförmig oder teilweise in der Flüssigkeit gelöst vorkommen. Diese setzen bei permanenter Akkumulation die elektrische Festigkeit herab und können beispielsweise mit der Gas-in-Öl-Analyse (DGA) untersucht werden.
- Ferner können durch die Teilentladung generierte Ladungsträger in das Isoliermaterial eindringen und sich dort als Raumladungen ausbilden. Diese

Raumladungen können örtlich sowie zeitlich erhöhte Feldstärken bewirken, welche einen elektrischen Durchschlag begünstigen.

- Durch das Nachladen bzw. Umladen der Kapazitäten im Prüfkreis werden in der Zuleitung sehr kurzzeitige Stromimpulse und damit verbundene elektromagnetische Strahlung verursacht. Für die konventionelle Erfassung von Teilentladungen wird diese elektrische Wirkung ausgenutzt.

Um Teilentladungen zu beschreiben, gilt es, die nachstehenden Messgrößen zu erfassen bzw. deren abgeleitete Größen zu berechnen [IEC 60270], [KAH89]:

- die am Isoliermedium angelegte Spannung (Spannungsform und Scheitelwert)
- Teilentladungseinsetzspannung  $U_i$  und Teilentladungsaussetzspannung  $U_e$
- Phasenwinkel  $\varphi_i$
- Impulsamplitude, maximale Impulsamplitude in einem festgelegten Bewertungszeitraum
- Impulswiederholrate  $n$  (Verhältnis zwischen gewähltem Zeitintervall der auftretenden TE-Impulse und der Dauer des Zeitintervalls)
- Impulswiederholfrequenz  $N$  (Anzahl an äquidistanten TE-Impulsen pro Sekunde, Verwendung bei der Kalibrierprozedur)
- scheinbare Ladung  $q_s$  (Impulsladung, maximale Impulsladung)
- Summenimpulsladung (maximale Summenimpulsladung)
- mittlerer Teilentladungsstrom  $I = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n |q_i|$
- Teilentladungsleistung über die Teilentladungsimpulse  $P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n |q_i \cdot u_i|$
- quadratische Ladungsgröße  $D = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n |q_i^2|$
- größte wiederholt auftretende Teilentladungsstärke<sup>27</sup>.

## 5.5 Verhalten von Teilentladungen bei Wechsel- und Gleichspannung

### 5.5.1 Interpretation bei Wechselspannung

Die verschiedenen Ursachen von Teilentladungen zeigen verschiedene Erscheinungen mit speziellen charakterisierenden Eigenschaften, wodurch oft auf den Ort und die Fehlerart geschlossen werden kann. Jedoch versagen sogar moderne Diagnosesysteme auf Grund der großen Anzahl möglicher Fehlerquellen sowie an den

<sup>27</sup> nicht auf Gleichspannungsprüfungen anwendbar

Kombinationen und der Komplexität der Isoliersysteme als auch an der Superposition von unterschiedlichen Teilentladungsquellen.

Da anstatt der wirklichen Ladung lediglich die so genannte „scheinbare Ladung“ messtechnisch erfasst werden kann, ist die Intensität der Teilentladungen nur gering aufschlussreich und somit für die Fehlerdiagnostik alleine nicht ausreichend. Vielmehr hilfreich sind die folgenden Parameter, vor allem die Kombination aller Informationen:

- Phasenlage
- Polarität
- Impulshäufigkeit und Impulsregelmäßigkeit
- die Relation von Einsetz- zu Aussetzspannung (Hysterese)
- Änderung der Intensität mit der Prüfspannung [KÜC09].

Bei der Darstellung mittels phasenaufgelöster Diagramme gilt es, die Abhängigkeit der Spannungsform zu berücksichtigen, weil durch Oberschwingungen Verzerrungen entstehen, welche zu einer falschen Darstellung führen.

Um eine Analyse der auftretenden TE durchführen zu können, bedient man sich verschiedener Bewertungsschemata, wobei die Messgrößen mit klassischen TE-Messgeräten erfasst werden können. Im Folgenden werden dazu der Hystereseversuch, der Spannungssteigerungsversuch und der Dauerversuch vorgestellt.

Beim Hystereseversuch wird das Verhältnis von Einsetz- zu Aussetzspannung gebildet, wobei die Spannung jedoch nicht sonderlich weit über die TE-Einsetzspannung hinaus erhöht werden muss. Aus diesem Versuch heraus lassen sich äußere Teilentladungen von Oberflächen- bzw. Hohlraumentladungen differenzieren.

Über das Vorhandensein von Oberflächenentladungen sowie die Größe von Hohlräumen gibt der Spannungssteigerungsversuch Aufschluss, siehe Abb. 5.6.

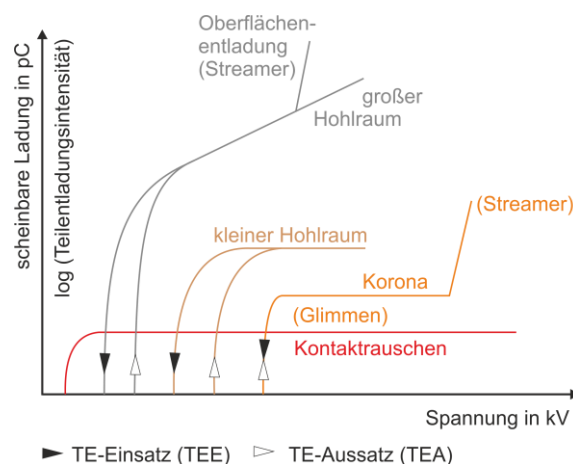


Abb. 5.6: Spannungssteigerungsversuch, nach [KÜC09]

Der Dauerversuch, welcher bei konstanter Spannung durchgeführt wird, lässt Rückschlüsse auf das Entladungsverhalten insofern zu, dass sich während des Betriebs durch die TE-Wirkung z. B. Gasbläschen bilden bzw. auflösen können.

Jedoch wird die klassische Teilentladungsinterpretation oftmals dadurch maßgeblich erschwert, dass sich Effekte von mehreren Störstellen überlagern. Deshalb sind die oben genannten Versuche im Allgemeinen nur auf eine (dominierende) Fehlerart bzw. auf die Superposition gleichartiger Störer anwendbar. Eine Differenzierung zwischen ähnlichen, aber nicht gleichen Störungen ist daher meist unmöglich. Heutzutage ermöglichen computergestützte Interpretationswerkzeuge weiterführende Datenauswertungen [KÜC09].

### 5.5.2 Interpretation bei Gleichspannung

Da sich bei Gleichspannung kein Phasenbezug herstellen lässt, entfällt eine grafische Darstellung wie sie im Falle der Wechselspannung beschrieben wurde. Generell ist die Interpretation von Teilentladungserscheinungen bei Gleichspannung noch wesentlich weniger entwickelt als bei Wechselspannung. Besonders die Unterscheidung von externen Störungen ist bei Gleichspannung erschwert, da es sich bei Störimpulsen zumeist um einzelne Ereignisse handelt.

Eine bis jetzt gebräuchliche Darstellung bei Gleichspannung ist das Aufzeichnen der Teilentladungsimpulse über der Zeit. Diese Impulse treten zwar selten, dafür jedoch regelmäßig auf, da ein Nachladen bei inneren Entladungen über oft sehr große Isolationswiderstände erfolgen muss.

Zur TE-Interpretation bei Gleichspannung verwendet man daher die so genannte  $\Delta t, Q, N$ -Darstellung. Zusätzlich lässt sich die Impulsform interpretieren, wobei diese auf dem Pfad von der Teilentladungsquelle zum Sensor hin möglicherweise gedämpft und verzerrt wird. Für die Ortung von TE-Impulsen ist die synchrone Mehrkanalmessung sowohl bei Wechsel- als auch Gleichspannung eine wesentliche Erleichterung, wenngleich auch ein Rückschluss auf die Fehlerart unter Umständen offen bleibt [KÜC09].

Verglichen mit dem konventionellen Ersatzschaltbild für Teilentladungen ergibt sich das Ersatzschaltbild für Gleichspannung nach [KRE95] unter Berücksichtigung der Leckwiderstände gemäß Abb. 5.7.

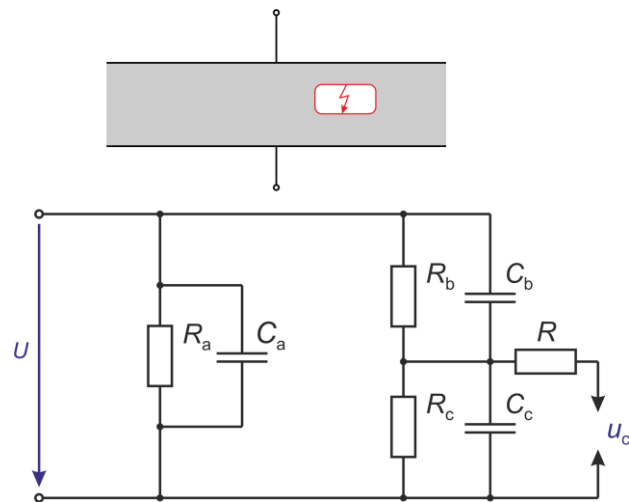


Abb. 5.7: Klassisches Ersatzschaltbild für innere Teilentladungen unter Berücksichtigung der Leckwiderstände, modifiziert nach [KRE95]

Sofern diese Widerstände linear angenommen werden können, ergibt sich die Spannung  $u_c$  zu:

$$u_c = \frac{R_c}{R_b + R_c} \cdot 1 - e^{-t/\tau} \cdot U \quad 5.6$$

wobei  $U$  die anliegende Gleichspannung ist und  $\tau$  die Zeitkonstante, welche in Abb. 5.8 angegeben ist.

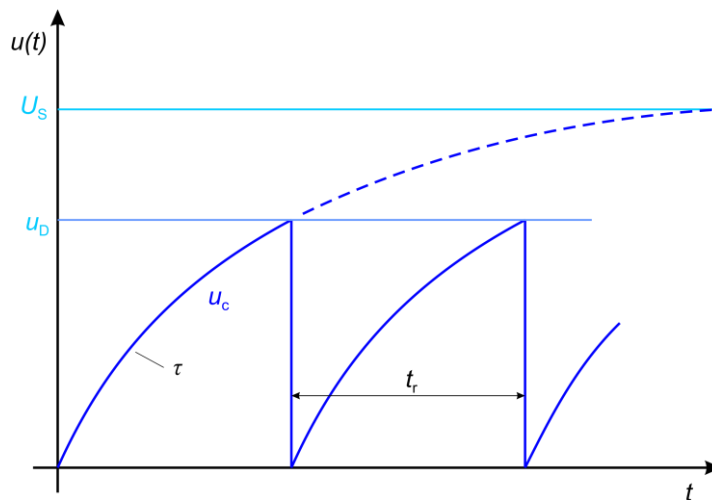


Abb. 5.8: Wiederholrate der Teilentladungen bei gegebener Gleichspannung, nach [KRE95]

Wenn die Spannung  $u_c$  die Durchschlagsspannung  $u_D$  der Fehlstelle erreicht, wird eine Teilentladung ausgelöst, und der Aufladevorgang beginnt erneut, wie in Abb. 5.8 gezeigt. Davon abgeleitet kann die so genannte Erholungszeit  $t_r$  (engl. recovery time) wie folgt angegeben werden:



$$t_r = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{u_D}{U_s}\right) \text{ mit } \tau = \frac{R_b \cdot R_c}{R_b + R_c} \cdot (C_b + C_c). \quad 5.7$$

Für den Fall, dass die Spannung  $u_c$  den Durchschlag nicht ergibt, stellt sich der asymptotische Verlauf gemäß

$$U_s = \frac{R_c}{R_b + R_c} \cdot U. \quad 5.8$$

ein. Gleichung 5.6 zeigt damit, dass eine „Einsetzspannung“ für Gleichspannungsbeanspruchung damit nicht existiert. Würde die Spannung  $U_s$  die Durchschlagsspannung erreichen, würde es zu einer Teilentladung kommen, die Erholungszeit jedoch unendlich lange sein. Im Falle einer anliegenden Gleichspannung sollte daher lange genug gewartet werden, bis die Spannung ausreichend hoch ist, Teilentladungen ständig zu zünden. Daher kann für die Definition einer Einsetzspannung unter Gleichspannung eine willkürliche Grenze festgelegt werden. In manchen Spezifikationen wird die Einsetzspannung so festgelegt, dass keine TE innerhalb einer Minute auftreten darf. Da diese Grenze keine scharfe Abgrenzung ermöglicht, ist es teilweise sehr schwierig, eine Teilentladung innerhalb einer Minute von einem Störimpuls zu unterscheiden.

Substituiert man den Ausdruck  $U_s/u_D$  aus 5.7 mit  $x$ , erhält man sinngemäß

$$\begin{aligned} x &= \frac{\text{asymptotische Spannung } U_s \text{ über der Fehlstelle}}{\text{Durchschlagsspannung } u_D \text{ über der Fehlstelle}} = \\ &= \frac{\text{angelegte Spannung über einer (Material-)Probe}}{\text{Einsetzspannung einer (Material-)Probe bei } t_r = \infty}. \end{aligned} \quad 5.9$$

Man erhält in weiterer Folge

$$t_r = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) \quad 5.10$$

$$\text{und mit } -\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) = \frac{1}{x} + \frac{1}{2 \cdot x^2} + \frac{1}{3 \cdot x^3} + \dots$$

ergibt sich für große Werte von  $x$

$$t_r \approx \frac{\tau}{x}, \quad 5.11$$

wobei ab  $x = 5$  Glieder der Fehler geringer als 10 % ist.

Sofern Fehlstellen keine Leitfähigkeit aufweisen, d. h.  $R_c = \infty$ , nähert sich die Spannung  $(R_c / (R_b + R_c)) \cdot U \rightarrow U$ , und diese Spannung erreicht annähernd die angelegte Spannung am Isoliermedium. Die Entladungsfrequenz bzw. Wiederholrate  $n$  ist umgekehrt proportional zur Erholungszeit  $t_r$ :

$$n \approx \frac{x}{\tau}. \quad 5.12$$

Die Entladungsfrequenz steigt näherungsweise linear mit der angelegten Spannung am Isoliermedium an. Die Zeitkonstante  $\tau$  ist hierbei

$$\tau = \frac{R_b \cdot R_c}{R_b + R_c} \cdot (C_b + C_c), \quad 5.13$$

bzw. im Falle eines nicht leitfähigen Defektes ( $R_c = \infty$ ) ergibt sich

$$\tau = R_b \cdot (C_b + C_c). \quad 5.14$$

Weiters ergibt sich die Wiederholrate zu

$$n \approx \frac{x}{C_b + C_c \cdot R_b} \quad 5.15$$

[KRE64], [KRE95].

## 5.6 Elektrische Messung nach IEC 60270

Zur Erfassung der hochfrequenten Teilentladungsimpulse werden eine spezielle Messtechnik sowie ein geeigneter Prüfaufbau benötigt, welcher in Kapitel 5.6.1 näher erläutert wird. Der gesamte Prüfaufbau muss teilentladungsfrei gehalten werden, d. h. jede einzelne verwendete Komponente (Prüftransformator, Koppelkondensator) muss Teilentladungsfreiheit aufweisen. Elektrische Verbindungsleitungen (flexible Schläuche) müssen über einen entsprechend hohen Durchmesser verfügen, wobei zusätzliche Schirmelektroden zu einer verbesserten Feldsteuerung beitragen.

### 5.6.1 Teilentladungsprüfkreise

Teilentladungen sind hochfrequente Impulse, welche der Prüfspannung überlagert sind, und müssen für die messtechnische Erfassung aus dem Prüfkreis ausgekoppelt werden. In Abb. 5.9 werden die Impulse über den Koppelkondensator  $C_k$  hin zur Messimpedanz  $Z_m$  ausgekoppelt. Der Prüfling ist vereinfacht als Kapazität  $C_a$  im Ersatzschaltbild abgebildet. Ein Filter  $Z$  sorgt dafür, dass Netzstörungen vom Prüfkreis ferngehalten werden [KÖN93].

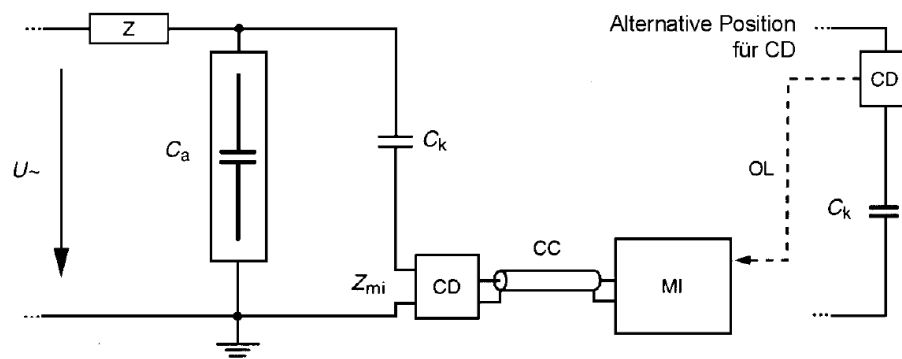


Abb. 5.9: Kopplungseinheit CD in Serie mit dem Koppelkondensator  $C_k$  (Prüfling geerdet), aus [IEC 60270]

$U_{\sim}$	Hochspannungsversorgung	CD	Koppeleinheit
Z	Filter	CC	Verbindungskabel
$C_a$	Prüfling	MI	Messgerät
$C_k$	Koppelkondensator	OL	Lichtwellenleiterstrecke
$Z_{mi}$	Eingangsimpedanz des Messsystems		

Im Falle der Erzeugung einer hohen Wechselspannung wurde besonders darauf geachtet, eine Spannungsform zu erhalten, welche möglichst sinusförmig ist. Oberschwingungen führen zu Verzerrungen, welche im phasenaufgelösten Histogramm zu einer verfälschten Darstellung führen. Dies lässt sich leicht bewerkstelligen, indem der Hochspannungstransformator leicht kapazitiv belastet wird, was beim vorhandenen Prüfaufbau gegeben ist. Der Prüfaufbau ist in Abb. 5.9 dargestellt.

Aus Abb. 5.10 ist der Prüfkreis zur Erzeugung der hohen Gleichspannung zu entnehmen. Um Teilentladungsfreiheit für den gesamten Prüfkreis zu garantieren, wurden die Bauteile des Hochspannungs-Baukastensystems als Spannungsteiler aufgebaut, um die jeweiligen Bauteile von der elektrischen Beanspruchung zu entlasten.

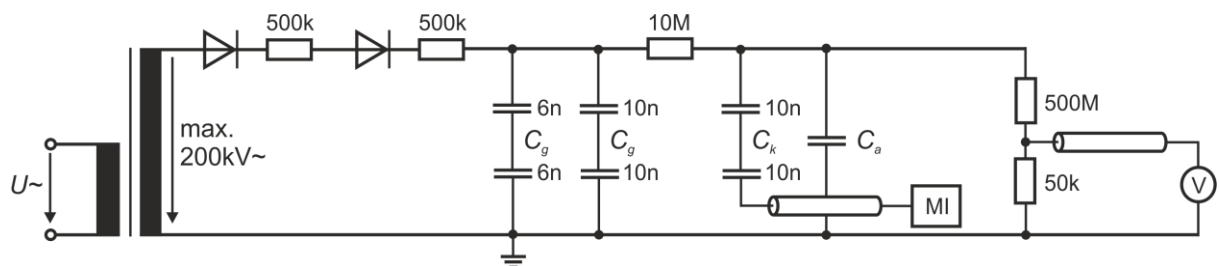


Abb. 5.10: Teilentladungs-Prüfkreis bei hoher Gleichspannung, Hochspannungsbaukastensystem, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz

Gemäß IEC 60060-1 soll der so genannte Überlagerungsfaktor für Prüfungen bis 1 Minute nicht größer als 1 % und bei Prüfungen über 1 Minute nicht größer als 3 % sein. Durch entsprechende Glättungsmaßnahmen konnte im vorliegenden Prüfkreis ein Überlagerungsfaktor von kleiner als 1 % erreicht werden.

## 5.7 Messaufbau und Versuchsplanung

Bei der Teilentladungsmessung mit hoher Wechselfspannung lassen sich einzelne oder repetierende Störungen feststellen, die eliminiert werden können. Bei Gleichspannungsmessungen zeigt sich jedoch eine wesentlich höhere Störanfälligkeit gegen äußere Störimpulse und Störer im Messaufbau. Da es keine Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen Störimpulsen und Teilentladungen des Prüflings gibt, muss ein entsprechend hoher Abschirm- und Entstörungsaufwand für Gleichspannungsmessungen betrieben werden.

Der Prüfaufbau für die Versuchsdurchführung erfolgte im vollständig geschirmten Klimaraum des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz. Der Grundstörpegel beträgt innerhalb des Labors maximal 0,5 pC. Die Spannungsversorgung wird mittels Netzfilter gesäubert. Der Prüfaufbau zur Erzeugung der hohen Gleichspannung wurde mit Schirmelektroden versehen, um Störungen von Seiten des Prüfaufbaus so gering wie möglich zu halten. Durch entsprechende Schirmelektroden konnte der Prüfaufbau bis 70 kV Effektivwert der Wechselfspannung und 100 kV Gleichspannung TE-frei<sup>28</sup> betrieben werden.

Die Spannungssteigerungsgeschwindigkeit, mit welcher die einzelnen Spannungstufen angefahren wurden, lag in der Größenordnung von 0,3 kV/s. Diese wurde so klein wie möglich gehalten, um eine Beeinflussung des Gleichspannungsverhaltens weitgehend zu vermeiden. Eine Spannungstoleranz bis zu 0,1 kV konnte bei den jeweiligen Spannungstufen festgestellt werden, welche als vernachlässigbar klein angesehen werden kann.

Der Prüfkessel zur Teilentladungsmessung wurde zwischen den einzelnen Wiederholungen für eine halbe Stunde geerdet, um sicher zu stellen, dass keine etwaigen Restladungen des vorangegangenen Versuches den Folgeversuch beeinflussen. Der dazu verwendete Prüfkessel ist in Abb. 5.11 (Seite 63) dargestellt. Die eingesetzten Doppel-Tori dienen der Schirmung des Prüfkessels zum homogenisieren des elektrischen Feldes nach außen und somit zur Vermeidung von äußeren Teilentladungen. In Abb. 5.12 (Seite 63) ist die Nadel-Platte-Anordnung, wie sie für die Öl-Board-Gleitentladung verwendet wurde, zu sehen.

---

<sup>28</sup> Messzeit fünf Minuten, in welcher kein Teilentladungsimpuls größer 2 pC auftreten darf

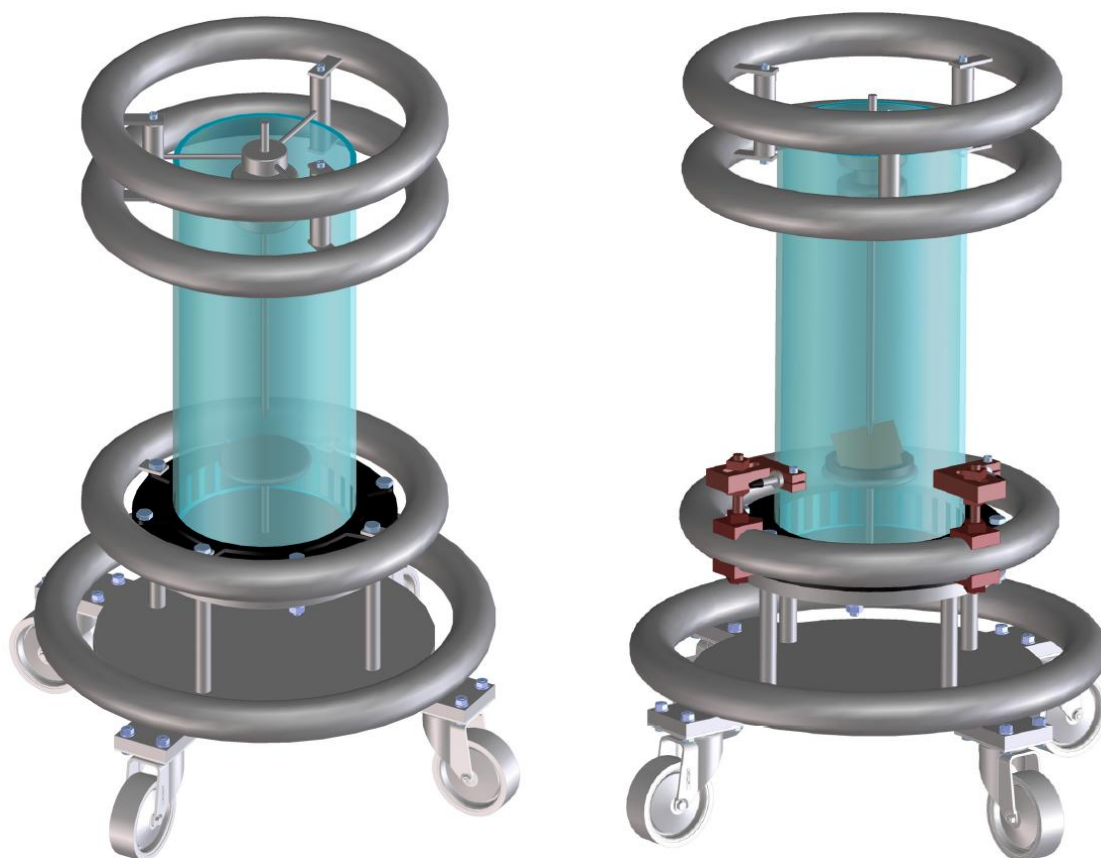


Abb. 5.11: Prüfkessel zur Teilentladungsmessung: Spitze-Platte-Elektroden in mineralischem Isolieröl (links), Öl-Board-Gleitanordnung mit optischen Sensoren (rechts)

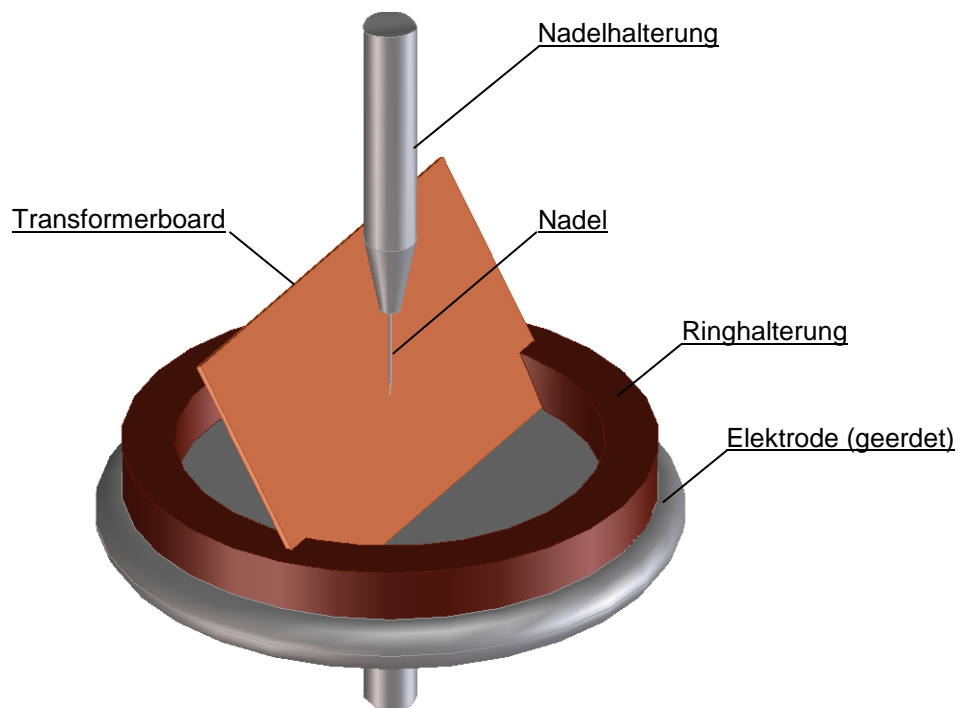


Abb. 5.12: Schematische Darstellung der Nadel-Platte-Anordnung (hier: Öl-Board-Gleitentladung)

### 5.7.1 Elektrodenanordnung und Homogenitätsgrad

1922 führte Anton Schwaiger den nach ihm benannten Ausnutzungsfaktor in die Hochspannungstechnik ein, um die elektrische Feldgüte bzw. Qualität einer Elektrodenanordnung mathematisch zu beschreiben und somit geometrisch unterschiedliche Elektrodenanordnungen vergleichen zu können. Man bezeichnet den Faktor  $\eta$  als so genannten Homogenitätsgrad bzw. als Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger, dessen Reziprokwert als Inhomogenitätsgrad bekannt ist. In homogenen Feldern ist  $E_0 = E_{\max}$  und der Homogenitätsgrad mit  $\eta = 1$  maximal. Für sehr stark inhomogene Felder ergibt sich  $E_{\max} \gg E_0$ , wobei der Homogenitätsgrad Werte für  $\eta \ll 1$  annimmt.

Eine Elektrodenanordnung, welche in der z-Ebene dargestellt ist, lässt sich mittels Ausnutzungsfaktor  $\eta$  folgendermaßen berechnen:

$$\eta = \frac{U}{|E_z| \cdot s} \quad 5.16$$

$\eta$	Homogenitätsgrad	$E_z$	elektrische Feldstärke in z-Richtung (in kV/m)
$U$	elektrische Spannung (in kV)	$s$	Schlagweite (in m)

Weil der Term  $U/s$  die Feldstärke eines homogenen Feldraumes beschreibt, lässt sich die obige Formel mit der Homogenfeldstärke eines Plattenfeldes  $E_0$  umschreiben zu:

$$\eta = \frac{|E_0|}{|E_z|} \quad 5.17$$

Die Abstandsfeldstärke  $E_z$  ist längs jener Feldlinie wirksam, welche der Elektroden-Abstandsverbindung entspricht. In der Regel ist die Abstandsfeldstärke kleiner als die auftretende Maximalfeldstärke, wobei in geometrischen Sonderfällen der Elektrodenabstand mit der Maximalfeldstärke  $E_z = E_{\max}$  zusammenfallen kann [PRI69].

Bei stark inhomogenen Elektrodenanordnungen mit einem Schwaiger'schen Ausnutzungsfaktor  $\eta$  zwischen 0,1 und 0,2 können vor dem vollkommenen Durchschlag immer Teilentladungen beobachtet werden. Um inhomogene Felder zu erzeugen und somit Störstellen nachzubilden, wird zumeist eine Nadel-Platte-Elektrodenanordnung verwendet. Mit dieser Anordnung lassen sich selbst bei niedrigen Spannungen sehr hohe Feldstärken erzeugen. Weiters lässt sich durch die definierte Form der Nadel-elektrode als Hyperboloid das elektrische Feld der Nadel-Platte-Konfiguration exakt berechnen [BEY86].

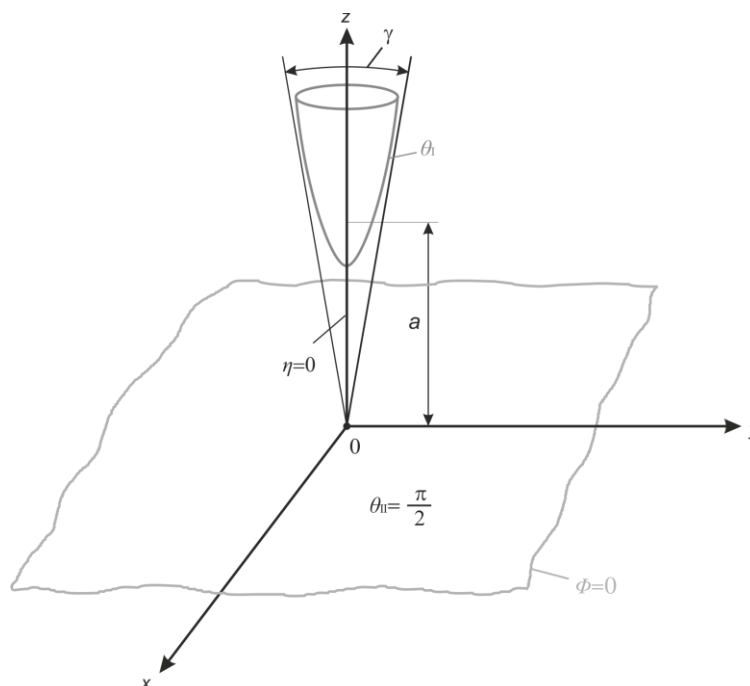


Abb. 5.13: Elektrodenanordnung Hyperboloidspitze-Ebene, nach [PRI69]

$\Theta$  Potential  
 I, II Randwertindizes

Im folgenden Abschnitt soll mathematisch die Elektrodenanordnung „Hyperboloidspitze-Ebene“ näher betrachtet werden. Nadelspitzen, welche für die Versuchsdurchführung verwendet wurden, lassen sich dadurch gut charakterisieren. Für die Feldstärke lässt sich Gleichung 5.18 formulieren [PRI69]:

$$E = \frac{U}{a \cdot \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta} \cdot \sin \theta \cdot \ln \cot \frac{\theta_1}{2}} \quad 5.18$$

$a$  halber Brennpunktsabstand (in mm)

für die Maximalfeldstärke ( $\theta = \theta_1, \eta = 0$ ) folgt

$$E_{\max} = \frac{U}{a \cdot \sin^2 \theta \cdot \ln \cot \frac{\theta_1}{2}} \quad 5.19$$

mit  $s_1 = s \cdot \cos \theta_1$  erhält man weiters für den Ausnutzungsfaktor

$$\eta = \sin \theta_1 \cdot \tan \theta_1 \cdot \ln \cot \frac{\theta_1}{2} \quad 5.20$$

bzw. mit  $\theta_1 = \frac{\gamma}{2}$

$$\eta = \sin \frac{\gamma}{2} \cdot \tan \frac{\gamma}{2} \cdot \ln \cot \frac{\gamma}{4} \quad 5.21$$

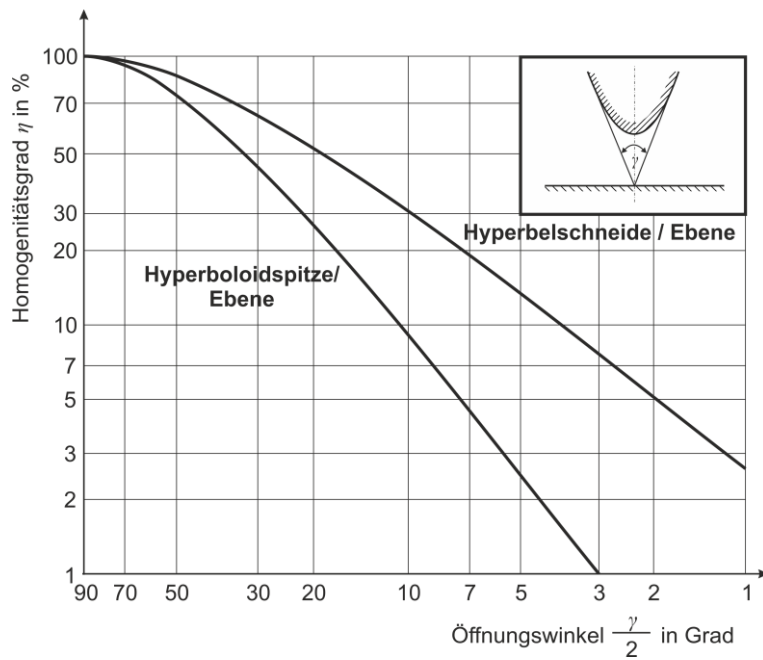


Abb. 5.14: Ausnutzungsfaktor  $\eta$  in Abhängigkeit des halben Öffnungswinkels  $\gamma$  einer Hyperboloidspitze-Ebene-Elektrodenanordnung, nach [PRI69]

Die genauen Zahlenwerte sind aus [PRI69] aus Tafel 16 zu entnehmen.

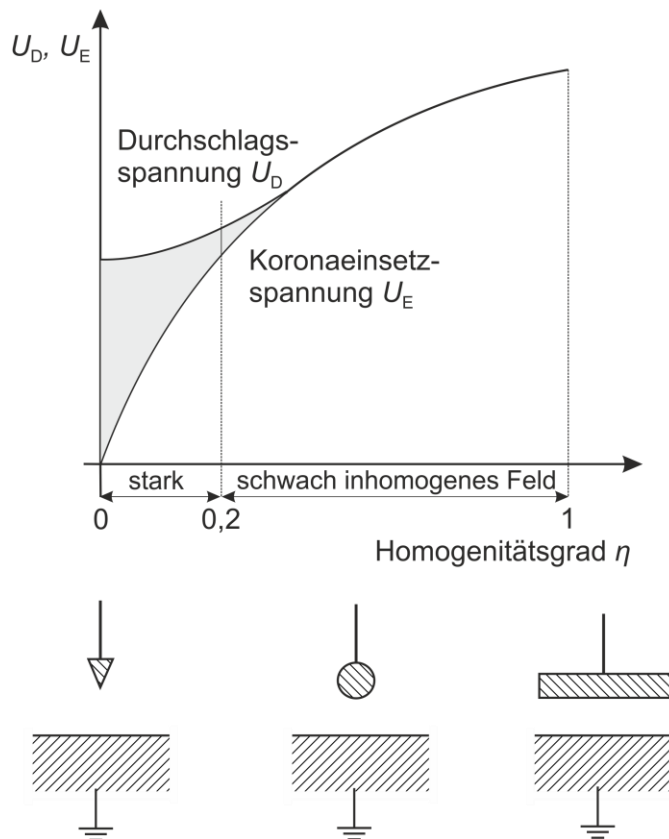


Abb. 5.15: Einsetz- sowie Durchschlagsspannung im stark inhomogenen, quasi-homogenen und homogenen idealisierten elektrischen Feld (konstanter Elektrodenabstand), nach [KÜC09]



Gemäß [BEY86] ist bei isolierenden Flüssigkeiten im Allgemeinen kein Zusammenhang zwischen dem Inhomogenitätsgrad und der elektrischen Festigkeit von verschiedenen Elektrodenanordnungen zu erkennen. Mit zunehmendem Inhomogenitätsgrad lässt sich eine Abschwächung der Gesamtanordnung feststellen, welche sich durch eine ansteigende Flüssigkeitsströmung innerhalb der Elektrodenstrecke und dadurch verbundene erschwerte Raumladaungsbildung im Nahbereich der Elektroden erklären lässt. Somit werden erste Ionisationsprozesse beeinträchtigt, und es kommt zu einem Verfestigungseffekt. Zusätzlich zu diesem Bewegungseffekt ist ein Volumeneffekt überlagert, welcher mit vergrößertem Volumen eine elektrische Festigkeitsabnahme innerhalb der hochbeanspruchten Elektrodenstrecke bewirkt. Der Volumeneffekt beschreibt eine leicht sinkende Durchschlagsfestigkeit mit steigendem Flüssigkeitsvolumen, weil damit die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Fehlstellen ansteigt.

### 5.7.2 Volumeneffekt

Untersuchungen im quasihomogenen Feld zeigten, dass das Volumen zwischen zwei kugelförmigen Elektroden elektrisch gleichermaßen belastet wurde, während bei einer Spitze-Platte-Anordnung nur das Gebiet unmittelbar vor der Nadelspitze hoch beansprucht wurde (Volumeneffekt). Berechnungen ergaben, dass bereits eine Vergrößerung des Abstandes um den doppelten Wert des Spitzenradius die elektrische Feldstärke um 20 % der Maximalfeldstärke absenkt [BEY86].

### 5.7.3 Polaritätseffekt

In stark inhomogenen Feldern wirkt sich der Teilentladungseinsatz bei negativer und positiver Spitze verschieden aus. Bei negativer Nadelspitze ist der Teilentladungseinsatz begünstigt, während dieser bei positiver Nadelspitze bei gleich hoher Spannung vergleichsweise erschwert ist. Dieser Effekt wird in der Fachliteratur als Polaritätseffekt bezeichnet. Dieses konträre Verhalten lässt sich durch die Ausbildung von positiven Raumladungen vor der Nadelspitze erklären [KÜC09].

Abb. 5.16 stellt diesen Sachverhalt anhand einer Spitze-Platte-Anordnung dar, wobei ein extrem inhomogenes elektrisches Feld zugrunde gelegt wird.

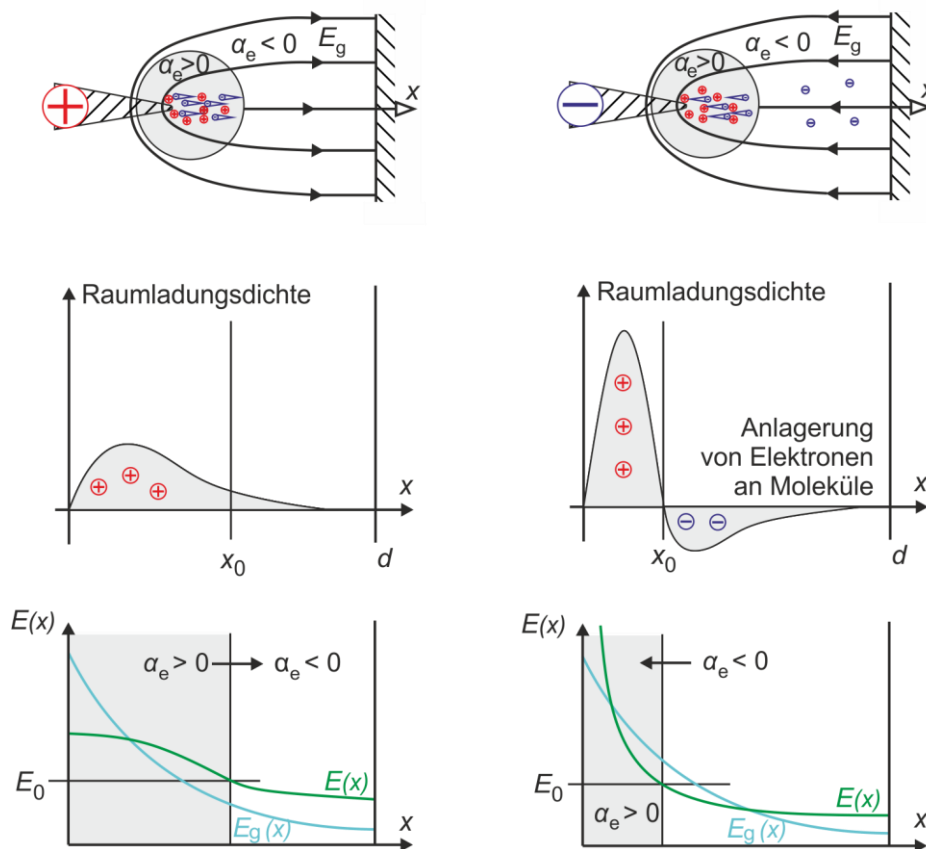


Abb. 5.16: Polaritätseffekt anhand positiver (links) und negativer Spitze (rechts), nach [KÜC09] Oben: Streamerausbreitung im Gebiet hoher elektrischer Feldstärke bei positivem effektiven Ionisationskoeffizienten, Mitte: Raumladungsausbildung durch zurückgebliebene positive Ionen (links sowie rechts), Raumladungsausbildung durch Elektronenanlagerung im feldschwachen Gebiet (rechts), Unten: Verlauf der Feldstärke entlang der  $x$ -Achse als raumladungsfreies Grundfeld  $E_g(x)$  als auch raumladungsbeschwertes resultierendes Feld  $E(x)$  mit Verschiebung der Ionisationsgrenzen

### 5.7.4 Versuchsplanung

Da Teilentladungen im homogenen Feld nicht auftreten, wurden inhomogene Anordnungen nachgebildet. Dazu wurden die Spitze-Platte-Anordnung sowie eine Öl-Board-Gleitanordnung untersucht. Als Referenz zu den Gleichspannungsversuchen wurden die gleichen Versuche mit Wechselspannung durchgeführt, siehe Tabelle 4 auf der folgenden Seite.

Tabelle 4: Übersicht über die verschiedenen Prüfparameter

<b>Anordnung</b>	<b>Spitze-Platte / Öl-Board-Gleitanordnung</b>
<b>Spannungsform</b>	AC
	DC (positiv, negativ)
<b>Abstand in cm</b>	1
	3
	5
<b>Spitzenradius</b>	Größenordnung 50 µm
	Größenordnung 100 µm
<b>Ölsorte</b>	Nynas Nytro 4000X
<b>Ölfeuchte</b>	trocken (5 bis 10 ppm)
	feucht (20 bis 25 ppm)
<b>Wiederholungen</b>	3

Für die Versuchsdurchführung wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Methode: Spannungsstufen, Messdauer je 5 Minuten, 3 Wiederholungen
- Erfassung der max. scheinbaren Ladung, Anzahl der Impulse, NQS-Wert
- Ermittlung der TE-Einsetz- und TE-Aussetzspannung.

Die detaillierten Messergebnisse sind dem Anhang C (Teilentladungsmessungen unter Isolieröl, siehe Seite 121ff) und Anhang D (Teilentladungsmessungen Öl-Board-Gleitanordnung, siehe Seite 141ff) zu entnehmen.



„Folge nicht dem ausgetretenen Pfad. Gehe stattdessen dorthin,  
wo es noch keinen Pfad gibt und hinterlasse eine Spur.“  
Ralph Waldo Emerson (amerikanischer Dichter und Philosoph)

## 6 Resümee und Diskussion der Ergebnisse

In der Hochspannungstechnik sieht man sich vor die Herausforderung gestellt, kleinste Ströme bei sehr hohen Spannungen zu messen. So finden sich im Bereich der Isolierstofftechnik elektrische Ströme in der Größenordnung pA ( $10^{-12}$  A) wieder, bzw. im Falle von Teilentladungen Ladungen in der Größenordnung pC ( $10^{-12}$  As).

Diese Anforderungen erheben höchste Ansprüche an die Messtechnik sowie an einen entsprechenden Prüfaufbau mit geeignetem Schirmkonzept. Daher wurde eine Neukonstruktion des Prüfkessels vorgenommen und alle Versuche in einem voll geschirmten Hochspannungslabor unter Einsatz modernster Messtechnik erfolgreich durchgeführt.

Die wesentlichsten wissenschaftlichen Erkenntnisse aus den praktischen Versuchen seien im Folgenden zusammengefasst:

### 6.1 Leitfähigkeitsmessungen von Isolieröl

- Die verschiedenen Messmethoden (siehe Kapitel 4.5), welche im Round Robin Test der Cigré JWG A2/D1.41 zur Anwendung gekommen sind, stellen Möglichkeiten dar, um die elektrische Leitfähigkeit in *verschiedenen Feldstärkebereichen* sowie *zeitlichen Zuständen* (Anfangsleitfähigkeit, transiente Leitfähigkeit, stationäre Leitfähigkeit) zu erfassen. Praktisch gesehen ist es für Entwicklungsingenieure wichtig zu wissen, wie sich die Leitfähigkeiten in einem weiten Feldstärkebereich ( $\leq 0,1$  bis  $\geq 5$  kV/mm) unter Raumtemperatur als auch unter Betriebstemperatur (-20 bis 90 °C) verhalten. Entscheidend dabei ist, einen breiten Bereich der Feldstärke und Temperatur abzudecken, da sich im Betrieb des Transformators die Ölleitfähigkeit ortsabhängig je nach *Feldstärkeverteilung* sowie *Temperaturverteilung* einstellt. Hinsichtlich der Zeitabhängigkeit der Leitfähigkeit wird empfohlen, Messpunkte im *Sekundenbereich* (Einschaltvorgänge, Polaritätsumkehr) bis hin zu *mehreren Stunden* (stationäre Leitfähigkeit) zu messen.
- Durch Evaluierung der Messdaten in den verschiedenen oben genannten Bereichen kann das Isolierölverhalten in einfacher Weise charakterisiert werden. Dazu wird empfohlen, die folgenden *drei Bereiche* näher zu betrachten:

- Der *Anfangswert der Leitfähigkeit* beschreibt den feldfreien Gleichgewichtszustand. Das angelegte elektrische Feld und die Messdauer müssen klein gehalten werden ( $E \leq 0,1$  kV/mm bei Messzeiten von wenigen Sekunden).
- Der Bereich um etwa 2 kV/mm charakterisiert das *Feldstärkeminimum* einer Isolierflüssigkeit. Dieser Stützpunkt stellt ebenfalls eine wichtige Information für die Dimensionierung des Isolationssystems dar.
- Der Feldstärkebereich ab 5 kV/mm stellt *höher beanspruchte Ölspalte* dar. Hier muss allerdings beachtet werden, dass auf Grund überlagernder Effekte, wie beispielsweise Elektroneninjektion aus dem Elektrodenmaterial<sup>29</sup> sowie elektrohydrodynamische Kräfte (EHD), höhere Streuungen der Messergebnisse auftreten können.
- Als maßgebliche Einflussgrößen auf die elektrische Leitfähigkeit sind die *Ölaufbereitung*, die *Reinigungsprozedur der Messzelle*<sup>30</sup>, das *Elektrodenmaterial* sowie *Temperaturschwankungen* zu nennen. Bezüglich der Temperaturschwankungen wird empfohlen, ein Temperaturmonitoring mittels Transientenschreiber vorzunehmen. Nachdem der *Wassergehalt* des Öls die Leitfähigkeit ebenfalls beeinflusst, muss *vor* sowie *nach* der Messung der Wassergehalt bestimmt werden. Der Wassergehalt soll nach Möglichkeit während der gesamten Messzeit konstant gehalten werden, beispielsweise durch geeignete Dichtungsringe und somit hermetischen Verschluss der Messzelle.
- Im Falle des *Ölprüfgeräts BAUR DTL* zur Bestimmung des spezifischen Widerstands von *feuchten Isolierflüssigkeiten trocknet* auf Grund der geringen Flüssigkeitsmenge und der verhältnismäßig großen Oberfläche der Prüfzelle das Öl aus (siehe Anhang B), wodurch für eine sinnvolle Messung feuchter Isolieröle eine Neukonstruktion bzw. Modifikation der Prüfzelle notwendig wird.

## 6.2 Leitfähigkeitsmessungen von Board

- Die vier untersuchten unterschiedlichen Board-Typen (jeweils 1 mm Dicke) weisen vom zeitlichen Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit einen ähnlichen Charakter auf, wobei Transformerboard T I und T IV nahezu deckungsgleiche Kurven erkennen lassen. Pressspan TD 12 zeigt eine leicht geringere Leitfähigkeit

<sup>29</sup> Verwendung von blanken Elektroden im Gegensatz zu mit ölprägnierten Zellulosepapier umwickelten (Kupfer-)Leitern im Transformator.

<sup>30</sup> In dieser Arbeit wurde eine Zelle der Marke *Tettex 2903 (Precision Test Cell for Liquid Insulants)* verwendet. Eine modifizierte Messzelle *Tettex 2905 (Pilot Cell for Liquid Insulating Materials)* ist derzeit im Pilotbetrieb.

als die beiden zuvor genannten Board-Typen, und Nomex Type 994 (polymerer Kunststoff aus Aramidfasern) besitzt eine noch weit geringere Leitfähigkeit.

- Das hochisolierende Material Nomex Type 994 weist am Ende der Polarisierungsphase ein typisches *Raumladungsverhalten* auf, welches sich durch die sehr langsam abfließenden Ladungsträger erklären lässt.
- Eine *Feldstärkeabhängigkeit für trockenes Board* (bis ca. 1 % absolute Feuchte) ist bis 20 kV/mm praktisch *nicht gegeben*. Für befeuchtetes Board (ab ca. 2,5 %) geht die absolute Boardfeuchte jedoch als Einflussparameter<sup>31</sup> ein, da Wasser eine ausgeprägte Polarisierbarkeit aufweist.
- Bei der Messung des Depolarisationsstromes gilt es zu beachten, dass nach Abschalten der Hochspannung die *Spannungsquelle nicht sofort entladen* ist, weshalb in den ersten 30 Sekunden der *Depolarisierungsstrom betragsmäßig größer* als der Polarisierungsstrom ist. Sprünge im Verlauf des betragsmäßig dargestellten Depolarisationsstromes lassen sich durch eine *Messbereichsumschaltung* des Elektrometers sowie durch den Übergang ins *Messrauschen* begründen.
- Eine Auswertung mittels Ladungsdifferenzmethode (CDM) lässt folgende Schlussfolgerungen zu:
  - Bei trockenem Board (bis ca. 1 % absolute Feuchte) ergeben sich Polarisations- sowie Depolarisationsladungen unter Raumtemperatur in derselben Größenordnung. Bei erhöhten Temperaturen wird die Polarisationsladung dominant.
  - Bei steigender Feuchte und steigender Feldstärke wird ebenfalls zunehmend die Polarisationsladung dominant.
  - Bei befeuchtetem Board (ab ca. 2,5 % absolute Feuchte) ist auch bei geringeren Feldstärken und Raumtemperatur die Polarisationsladung dominant.
  - Bei zusätzlichem Temperatureinfluss (60 °C) ist die Depolarisationsladung gegenüber der Polarisationsladung zu vernachlässigen. Im Falle einer absoluten Boardfeuchte von 3 % und einer Feldstärke von 20 kV/mm konnten hier die größten Ladungswerte festgestellt werden (Größenordnung 1 As verglichen mit  $10^{-7}$  As bei trockenem Board bei 25 °C und 1 kV/mm). Durch die hohe Empfindlichkeit dieser Methode (Spanne über sieben

---

<sup>31</sup> Einfluss der Feldstärke auf die Board-Leitfähigkeit erkennbar, jedoch nicht derart stark ausgeprägt wie bei der Öl-Leitfähigkeit.

Zehnerpotenzen), kann angeregt werden, die Ladungsdifferenzmethode für ein online-Monitoring-System einzusetzen.

- Die Ladungsdifferenzmethode lässt Aussagen bezüglich der Leitfähigkeit anhand der Steigung der Differenzladung  $q_p - q_d$  bereits bei geringeren Messzeiten vor Versuchsende zu. Nachteilig erweist sich jedoch durch den integrativen Charakter dieser Methode, dass Informationen im zeitlichen Kurvenverlauf nicht wiedergeben werden (Störungsunterdrückung).
- Weitere *Einflussparameter* sind analog der Ölleitfähigkeit unter anderem die *Temperatur*. Es gilt daher, die Temperatur über den Messzeitraum möglich konstant zu halten, was im vorliegenden Fall des großen Prüfkessels auf Grund seiner thermischen Trägheit (ungefähr 30 Liter umgebendes Ölvolumen) sowie der thermischen Isolierung sehr gut bewerkstelligt werden konnte. Sowohl die Mess- und Hochspannungselektroden als auch der gesamte Kessel wurden aus *Edelstahl* WNr. 1.4301 (X5CrNi18-10, V2A)<sup>32</sup> gefertigt, um einen möglichst geringen Einfluss auf die Leitfähigkeit (vgl. *Ladungsträgeremission* auf Grund von Materialreaktionen) zu verursachen.

### 6.3 Teilentladungsverhalten von Isolieröl

- Teilentladungen, welche bei Gleichspannung einer konstanten Spannungsstufe gemessen wurden, wiesen ein *zufälliges Auftreten und Erlöschen* auf („Ladungswolken“). So ist innerhalb der ersten Minuten eine erhöhte TE-Aktivität festzustellen, welche stetig abklingt. Hier handelt es sich um das Einstellen des neuen Feldzustandes vom transienten zum stationären Strömungsfeld entsprechend der Transitzeit. Weiters ergibt sich durch die Bildung von Raumladungen der Effekt, dass sich die Spitze-Platte-Anordnung zu einer Kugel-Platte-Anordnung homogenisiert, wobei sich die Raumladungen wieder durch Teilentladungen sowie eine Flüssigkeitsströmung abbauen können. Ein ausgeprägter Hysterese-Effekt wie bei Wechselfspannung konnte nicht beobachtet werden.
- Durch das typische *Raumladungsverhalten*<sup>33</sup> bei Gleichspannungsbeanspruchung lässt sich eine Teilentladungseinsatzfeldstärke nicht sinnvoll definieren. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass die *Messzeit als wesentlicher Parameter* in die Bewertung von Teilentladungen eingeht und somit über das Bestehen oder das Nichtbestehen einer Hochspannungsprüfung mitentscheidend ist.

<sup>32</sup> Nichtrostender, austenitischer, säurebeständiger Stahl mit geringen Kohlenstoffgehalt bis 600 °C temperaturbeständig.

<sup>33</sup> Sowohl die Verteilung der Raumladungswolke als auch dessen Betrag sind zeitlich veränderlich und nicht bekannt.



- Ein zweckmäßiger Ansatz zur Beurteilung der Teilentladungsaktivität bei Gleichspannungsbeanspruchung stellt eine *energetische Betrachtung* dar. Je nachdem, wie viel Leistung bzw. Energie von den Teilentladungen umgesetzt worden ist, desto stärker wird die Isolierung beansprucht. Dies spiegelt der so genannte *NQS-Wert* (N: number, Q: charge, S: per second) wieder, welcher die kumulierte scheinbare Ladung auf die Zeit bezieht (durchschnittlicher Entladestrom).
- Der *Feuchtegehalt des Isolieröls* stellt bezüglich der Teilentladungsaktivität einen großen Einflussparameter dar, wobei bei zunehmender Feuchte die TE-Aktivität deutlich ansteigt. Besonders bei kleineren Abständen unter höchster Feldbeanspruchung macht sich der Feuchteeinfluss signifikant bemerkbar (*Volumeneffekt*).
- Es konnte beobachtet werden, dass bei positiver Gleichspannung die Entladungen häufiger mit kleineren Entladungswerten auftreten als bei negativer Gleichspannung (*Polaritätseffekt*) sowie mit wesentlich kleineren Entladungswerten verglichen mit jenen bei Wechselfeldbeanspruchung (für die in dieser Arbeit verwendete Spitze-Platte-Anordnung und deren Nadelradien).
- Bei angelegter Gleichspannung konnte eine *Elektrofilter-Wirkung* beobachtet werden, indem nach jedem Ölwechsel zunächst kurz die Hochspannung eingeschaltet wurde und nach Abschaltung angesammelte Fasern und Partikel von der Hochspannungselektrode entfernt wurden (vgl. *Faserbrückendurchschlag*).

## 6.4 Teilentladungsverhalten von Board

- Bei Wechselfeldbeanspruchung stellt sich das elektrische Feld entsprechend den relativen Dielektrizitätszahlen von Öl und Board im ungefähren Verhältnis von 2:1 ein. Die Feldbeanspruchung für die Öl-Board-Gleitanordnung ist daher geringer verglichen mit jener der reinen Ölstrecke. Das typische Wechselfeldverhalten bleibt jedoch vom Board unbeeinflusst, ein Hystereseeffekt ist auch hier deutlich zu erkennen.
- Bei einer Gleichspannungsbeanspruchung hingegen dominieren die Leitfähigkeiten der Materialien, und das Board nimmt hier eine *feldschirmende Wirkung* ein, d. h. die Feldbelastung findet hauptsächlich im Board statt. Die *Entladungsaktivität* bei einer Öl-Board-Gleitanordnung ist deswegen *extrem gering* bis gar *nicht* vorhanden.
- Weitere Versuche beinhalten die *optische TE-Messung* mittels Fotodetektoren. Hier konnten bezüglich der elektrischen Messung die gleichen Erkenntnisse ge-

troffen werden, dass eine starke Teilentladungsaktivität bei reinem Isolieröl festzustellen war und nur sehr stark vereinzelt bei einer Öl-Board-Gleitanordnung. Im Falle der Gleitanordnung ist es aus der Beobachtung heraus als sehr wahrscheinlich anzusehen, dass lediglich jene Entladungen detektiert wurden (elektrisch als auch optisch), welche sich im Isolieröl ereigneten.

- Zusätzliche *rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen* des Elektrodenmaterials konnten den spezifischen Materialabtrag an der Nadeloberfläche aufzeigen. Vorwiegend war eine *Kraterbildung* im Falle der Versuche bei Verwendung der Elektroden in reinem Isolieröl ersichtlich, jedoch konnte festgestellt werden, dass auch jene Elektroden, welche für die Öl-Board-Gleitanordnung verwendet wurden, eine leichte *Veränderung der Oberflächentopologie* aufwiesen. In einem speziellen Fall konnte gezeigt werden, dass einzelne *Boardfasern* mit der metallischen Elektrodenoberfläche „*verschmolzen*“ waren. Daher liegt es nahe, dass Entladungen im Falle der Gleitanordnung oberflächlich über das Board abfließen, jedoch an der Auflagefläche einen so genannten „Hot Spot“ bilden.

„So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären,  
wenn man nach Zeit und Umständen das Möglichste getan hat.“  
Johann Wolfgang von Goethe (deutscher Dichter)

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den fortschreitend steigenden Energiebedarf wird es immer wesentlicher, große Mengen an elektrischer Energie über sehr weite Strecken verlustarm zu übertragen. Die Bedeutung der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) nimmt dadurch immer stärker zu. Wesentliche Erkenntnisse in Bezug auf die Problematik mit der Gleich- sowie Mischspannungsbeanspruchung von HGÜ-Komponenten sind im Folgenden zusammengefasst.

In *Kapitel 2* wird der aktuelle Stand der Technik und der Technologieentwicklung dargestellt. Die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ist in China seit 2010 zur Ultra-Hochspannungs-Ebene (UHV) angewachsen, mit Spannungen von derzeit  $\pm 800$  kV, wobei bereits weitere Projekte mit  $\pm 1000$  kV bis 2020 in Planung sind. Stromrichtertransformatoren stellen dabei eine wichtige Schlüsselrolle in der Energieübertragungskette dar. Beanspruchungen durch elektrische Felder werden von den Materialeigenschaften des Isoliersystems vorgegeben, was durch den Einsatz von sehr hohen Gleichspannungen zu neuen Herausforderungen beim Isolationsdesign von normalerweise nicht gegebenem Schwierigkeitsgrad führt. Bei Verwendung von Gleichspannung treten im Isoliersystem elektrische Vorgänge auf, welche den Entwicklungsingenieuren meist nicht geläufig bzw. teilweise noch ungenügend erforscht sind.

*Kapitel 3* behandelt das dielektrische Verhalten von Öl-Board-Isoliersystemen bei Gleich-, Wechsel- und Mischspannungsbeanspruchung. Die elektrische Feldverteilung ist bei zeitlich veränderlicher Beanspruchung gegenüber einer stationären Beanspruchung extrem unterschiedlich. So kommt es bei einer Wechselspannungsbeanspruchung zu einem Verschiebungsfeld mit einer Feldverdrängung in jenes Isoliermaterial mit der geringeren relativen Dielektrizitätszahl. Im Falle eines Öl-Board-Isoliersystems wird hier die Isolierflüssigkeit stärker belastet. Anders verhält es sich bei Anlegen einer Gleichspannung und dem sich damit einstellenden Strömungsfeld entsprechend den Leitfähigkeiten des Materials. Es stellt sich bei einem Öl-Board-Isoliersystem eine Feldverteilung gemäß den unterschiedlichen Leitfähigkeiten des festen und flüssigen Isoliermediums ein (mehrere Zehnerpotenzen möglich), wobei das Isolieröl praktisch vollständig entlastet und das Board hauptsächlich beansprucht wird.

Des Weiteren ist die elektrische Leitfähigkeit nur wenig konstant und äußerst schwer bestimmbar. Zusätzlich stellen Flächen- und Raumladungen einen maßgeblichen Einfluss dar. Es ergeben sich somit für die Dimensionierung und Konstruktion des Isolationssystems neue Herausforderungen, wobei dieses im Allgemeinen für beide Beanspruchungsarten ausgelegt sein und darüber hinaus ebenfalls impulsförmigen Beanspruchungen standhalten muss.

*Kapitel 4* der vorliegenden Dissertation beinhaltet die zweckmäßige Bestimmung der Leitfähigkeit von Öl-Board-Isoliersystemen bei Anlegen von Gleichspannung. Durch die Konstruktion eines neuen Prüfkessels zur Messung des Polarisationsstromes und in weiterer Folge zur Bestimmung der Leitfähigkeit sollen bisherige unerwünschte Effekte, wie das Eindringen von Feuchtigkeit in den Kessel, vermieden werden. Die Neukonstruktion des Kessels zur Leitfähigkeitsmessung kann sowohl zur Bestimmung der Ölleitfähigkeit als auch zur Leitfähigkeitsbestimmung von Board herangezogen werden. Eine Automatisierung des Prüfstandes zur Leitfähigkeitsmessung wurde realisiert. Die Auslesung der Messdaten erfolgte dabei über das Programm LabView und wurde Matlab zur weiteren Verarbeitung zugeführt. Eine grafische Visualisierung am Prüfstand selbst wurde ebenfalls implementiert.

Dieses Werk beinhaltet ebenfalls die Leitfähigkeitsmessungen des Round Robin Tests der Cigré JWG A2/D1.41 bei reinem neuwertigen mineralischen Isolieröl. Innerhalb dieser Arbeitsgruppe wird zurzeit eine neue messtechnische Methode erarbeitet, um das elektrische Leitfähigkeitsverhalten eines Isolieröles zu charakterisieren.

Weiters werden in dieser Arbeit Sprungantwortmessungen (PDC-Analysen) von vier verschiedenen Boardtypen bei vier unterschiedlichen Feldstärken und drei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Dabei wurde bewusst auf realistische Prüfbedingungen Wert gelegt, um charakteristische dielektrische Systemeigenschaften zu erhalten. Besonderes Augenmerk wurde auf den stationären Endwert der Leitfähigkeit gelegt.

In *Kapitel 5* wird das Teilentladungsverhalten unter hoher Gleichspannung bei einer Nadel-Platte-Elektrodenanordnung unter mineralischem Isolieröl sowie einer Öl-Board-Gleitanordnung untersucht. Dazu wurden die Ölfeuchte, der Abstand zwischen Nadel und Platte sowie der Spitzenradius der Nadel variiert. Die Nadeln wurden vor und nach der Messung einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung unterzogen.

Als Referenz zur Gleichspannungsbeanspruchung wurden die Versuche ebenfalls mit hoher Wechselspannung durchgeführt. Teilentladungen werden sowohl bei

Wechselspannung als auch Gleichspannung durch hohe elektrische Feldstärken hervorgerufen, haben aber auf Grund der unterschiedlichen Feldverteilungen verschiedene Erscheinungsformen. Dies macht sich vor allem in der Entladungstätigkeit bemerkbar, wobei die Gleichspannungsbeanspruchung einen wesentlich unregelmäßigeren Charakter aufweist. Die Entladungserscheinungen wurden auf drei verschiedene Methoden untersucht: (1) elektrische Messung mit einem konventionellen Teilentladungsmesssystem, (2) mittels optischer Sensoren über Lichtwellenleiter zu Fotodetektoren, (3) elektronenrastermikroskopische Analyse der Topologie des Elektrodenmaterials.

In *Kapitel 6* werden die neuwertigen wissenschaftlichen Erkenntnisse aufgezeigt und erläutert. Die vorliegende Dissertation beinhaltet auszugsweise Ergebnisse von insgesamt 66 Leitfähigkeitsmessungen für Öl (jeweils 24-Stundenmessungen des Polarisationsstroms), 139 Messungen zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes von mineralischem Isolieröl (gemäß IEC 60247, Kurzzeitmessung von einer halben Stunde je Messzyklus) und 80 Leitfähigkeitsmessungen für Board (jeweils 48-Stundenmessungen des Polarisations- und Depolarisationsstroms) sowie 3685 konventionelle Teilentladungsmessungen (je Zyklus bestehend aus 8 bis 13 Spannungsstufen bei zwei bis drei Stunden Messzeit und jeweils drei Wiederholungen). Weiters wurden optische Teilentladungsmessungen sowie eine Materialanalyse jeder Elektrode mittels Rasterelektronenmikroskopie angestellt.

Diese Vielzahl an verschiedenen durchgeführten Messungen nach Prüfkesselneukonstruktion sowie neustem Stand der Technik trägt wesentlich zum Verständnis des dielektrischen Verhaltens der Isolierstoffe Öl und Board bei. Die grundlegende Kenntnis über das Verhalten der Materialeigenschaften bei Gleich- und Mischspannungsbeanspruchung unter den verschiedenen Einflussparametern Temperatur, Feldstärke, Feuchte und Beanspruchungsdauer lässt die Isolierstoffe Öl und Board zweckmäßig beschreiben und dient dem Entwicklungsingenieur als wertvolle Konstruktionsgrundlage.

## 7.1 Weiterführende Untersuchungen

- Weiterhin ergeben sich zusätzlich zum stationären Betrieb (Gleich- und Mischfeldbeanspruchung) weitere Beanspruchungen durch Umpolen (Polarity Reversal) der Gleichspannung. Der *transiente Übergangsvorgang* zieht hohe dielektrische Verschiebungsströme mit sich, welche in weiterer Folge zu einer kritischen Belastung des Betriebsmittels führen können. Durch die Möglichkeit einer Polaritätsumkehr der Gleichspannungsquelle können weitere Versuche dieses besonders beanspruchenden Betriebszustandes durchgeführt werden.

- Weitere Verbesserungen ergeben sich durch ein Re-Design des Prüfkessels zur Teilentladungsmessung. Für weiterführende Untersuchungen wird ein *hermetisch dichter Prüfkessel* empfohlen, um einen Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebungsluft auszuschließen und somit den *Wassergehalt im Öl konstant* zu halten. Ebenfalls vorteilhaft an einem geschlossenen Prüfkessel ist das *verhinderte Eindringen von Staub- und Schmutzpartikeln*. Ferner kann für ein Re-Design eines neuen Prüfkessels eine *Bodenheizung* angeregt werden, um die bisherig durchgeführten Versuche bei Raumtemperatur auch bei erhöhter Temperatur umsetzen zu können.
- Ferner lässt sich durch die mikroprozessorgesteuerte Regelung der Heizmanschette ein *Temperaturverlauf* bei gleichzeitiger Messung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. der Messung von Teilentladungen nachbilden. Damit lassen sich beispielsweise Lastschwankungen (Tag-/Nachtzyklus) oder auch das Hochfahren eines Leistungstransformators simulieren.
- Auf Grund ihres hohen Flammpunktes ( $> 250\text{ °C}$ ) sowie ihrer guten Umweltverträglichkeit (biologisch abbaubar), erfreuen sich Esterflüssigkeiten zunehmender Beliebtheit auch beim Einsatz in Leistungstransformatoren. Wegen der im Vergleich zu Mineralöl anderen chemischen Struktur macht eine ausführliche Untersuchung des Isolierverhaltens von diesen so genannten „alternativen Isolierflüssigkeiten“ Sinn.
- Anknüpfende Aufgabenstellungen werden in den folgenden Diplomarbeiten am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der Technischen Universität Graz derzeit durchgeführt:
  - Dimensionierung eines Prüfkessels zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Öl-Board-Isoliersystems unter Einfluss der Feldstärke, Temperatur sowie Boardfeuchte (Arbeitstitel, in Bearbeitung) [NAD12]
  - Numerische Feldsimulation des dielektrischen Verhaltens von Öl-Board-Isolieranordnungen unter hohen Gleich- und Wechselspannungen (Arbeitstitel, in Bearbeitung) [JOC12]
  - Neue Interpretationsansätze für die Teilentladungsmessung bei hoher Gleichspannungsbeanspruchung (Arbeitstitel, in Bearbeitung) [BAU12]
  - Teilentladungsverhalten von mineralischen und alternativen Isolierölen bei Wechselspannung und Gleichspannung (Arbeitstitel, in Bearbeitung) [WIE12]
  - Möglichkeiten der chemischen und physikalischen Analyse von festen und flüssigen Isolierstoffen (Arbeitstitel, Literaturstudie in Bearbeitung)



## Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>engl. Alternating Current</i> (Wechselstrom)
AsB	<i>engl. Angle Selective Backscatter Detector</i> (Materialkontrastabbildungen mittels RE-Aufnahme)
ASTM	<i>engl. American Society for Testing and Materials</i> (internationale Standardisierungsorganisation, Sitz in West Conshohocken, Pennsylvania, USA)
CC	Verbindungskabel
CD	Koppeleinheit
CIGRÉ	<i>frz. Conseil International des Grands Reseaux Électriques</i> (International Council on Large Electric Systems; Gremium im Bereich der Hochspannungstechnik, Sitz in Paris, Frankreich, Europa)
CMD	<i>engl. Charge Difference Method</i> (Ladungsdifferenzmethode)
DC	<i>engl. Direct Current</i> (Gleichstrom)
DGA	<i>engl. Dissolved Gas Analysis</i> (Gas-in-Öl-Analyse)
DS	Durchschlag
eff	Effektivwert
EN	Europäische Norm
EHD	<i>engl. Electrohydrodynamics</i> (Elektro-Hydrodynamik)
EHT	<i>engl. Extra High Tension</i> (Extra-Hochspannung) (auch EHV)
EHV	<i>engl. Extra High Voltage</i> (Extra-Hochspannung)
ETG	Energietechnische Gesellschaft im VDE
FACTS	<i>engl. Flexible AC Transmission Systems</i> (flexibles Drehstromübertragungssystem)
FDS	<i>engl. Frequency Domain Spectroscopy</i> (Frequenzbereichsspektroskopie, dielektrische Spektroskopie, Impedanzspektroskopie)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HVDC	<i>engl. High Voltage Direct Current</i> (siehe HGÜ)
IEC	<i>engl. International Electrotechnical Commission</i> (internationale Normungsorganisation, Sitz in Genf, Schweiz, Europa)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (weltweiter Berufsverband von Ingenieuren der Elektrotechnik und Informatik, Sitz in New York City, New York, USA)



---

IGBT	<i>engl. Insulated-Gate-Bipolar Transistor</i> (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)
ISO	Internationale Organisation für Normung, von gr. <i>isos</i> „gleich“ (engl. International Organization for Standardization)
JWG	<i>engl. Joint Working Group</i> (gemeinsame Arbeitsgruppe)
KF	Karl Fischer Titration
MI	<i>engl. measuring instrument</i> (Messgerät)
NQS	durchschnittlicher Entladestrom (N: number, Q: charge, S: per second)
OL	Lichtwellenleiterstrecke
OVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
PA	Polyamid (chem. Symbol)
PD	<i>engl. partial discharge</i> (Teilentladung)
PDC	<i>engl. Polarization Depolarization Current</i> (Polarisations- und Depolarisationsstrommessung)
ppm	<i>engl. parts per million</i> (Teile von einer Million)
PR	<i>engl. Polarity Reversal</i> (Polaritätsumkehr)
PWM	Pulsweitenmodulation
Q	Quartil
RE	Rückstreuelektronen
REM	Rasterelektronenmikroskop
RRT	<i>engl. Round Robin Test</i> (Ringversuch)
SE	Sekundärelektronen
SE2	SE-Aufnahme mit Everhart-Thornley-Detektor
TE	Teilentladung
UHF	Ultra-Hoch-Frequenz
UHV	<i>engl. Ultra High Voltage</i> (Ultra-Hochspannung)
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VSC	<i>engl. Voltage Source Converter</i> (Spannungszwischenkreis-Umrichter)
WD	<i>engl. Working Distance</i> (Arbeitsabstand)

## Symbolverzeichnis

$a$	<i>Abstand (in m), halber Brennpunktsabstand (in mm)</i>
$A$	<i>Fläche (in <math>m^2</math>), Konstante</i>
$A_R$	<i>Richardson-Konstante (<math>120,175 A/(cm^2 K)</math>)</i>
$b$	<i>Beweglichkeit der Ladungsträger (in <math>m^2/(Vs)</math>)</i>
$B$	<i>Konstante</i>
$f$	<i>Frequenz (in 1/s bzw. Hz)</i>
$C$	<i>Kapazität (in As/V bzw. F)</i>
$C_a$	<i>Prüflingskapazität (in As/V bzw. F)</i>
$C_g$	<i>Glättungskondensator (in As/V bzw. F)</i>
$C_k$	<i>Koppelkondensator (in As/V bzw. F)</i>
$d$	<i>Abstand (in m)</i>
$d_p$	<i>Barrienabstand (in m)</i>
$D$	<i>dielektrische Verschiebungsdichte (in As/<math>m^2</math>), quadratische Ladungsgröße (in <math>A^2s</math>)</i>
$e$	<i>Elementarladung (<math>1,6 \cdot 10^{-19}</math> As)</i>
$E$	<i>elektrische Feldstärke (in V/m)</i>
$G$	<i>elektrischer Leitwert, Konduktanz (in S)</i>
$i(t)$	<i>elektrischer Strom in Abhängigkeit der Zeit (in A)</i>
$I$	<i>elektrischer Strom bzw. elektrische Stromstärke (in A)</i>
$i_d$	<i>Depolarisierungsstrom (in A)</i>
$i_p$	<i>Polarisierungsstrom (in A)</i>
$J$	<i>Stromdichte (in A/<math>m^2</math>) (in der Literatur oft auch mit S bezeichnet)</i>
$k$	<i>Boltzmann-Konstante (<math>8,62 \cdot 10^{-5}</math> eV/K)</i>
$n$	<i>Ladungsträgerdichte (in <math>1/m^3</math>), Impulswiederholrate</i>
$\vec{n}$	<i>Einheitsvektor normal zur Oberfläche</i>
$N$	<i>Anzahl an Teilentladungen, Impulswiederholrfrequenz (in 1/s)</i>

---

$P$	<i>elektrische Leistung (in W)</i>
$q$	<i>elektrische Ladung (in As bzw. C)</i>
$q_d$	<i>Depolarisierungsladung (in As bzw. C)</i>
$q_p$	<i>Polarisierungsladung (in As bzw. C)</i>
$q_s$	<i>scheinbare Ladung (in As bzw. C)</i>
$Q$	<i>elektrische Blindleistung (in var), elektrische Ladung (in As bzw. C)</i>
$r$	<i>Radius (in m), Ortskoordinate (in m), Wiederholpräzision</i>
$R$	<i>ohmscher Widerstand (in <math>\Omega</math>), Vergleichspräzision</i>
$s$	<i>Schlagweite (in m)</i>
$t$	<i>Zeit (in s)</i>
$t_r$	<i>engl. rise time (Anstiegszeit); engl. recovery time (Erholungszeit) (in s)</i>
$T$	<i>(absolute) Temperatur (in <math>^{\circ}\text{C}</math> bzw. K)</i>
$u(t)$	<i>elektrische Spannung in Abhängigkeit der Zeit (in kV)</i>
$U$	<i>elektrische Spannung (in kV)</i>
$U_e$	<i>Teilentladungsaussetzspannung (engl. extinction voltage) (in kV)</i>
$U_i$	<i>Teilentladungseinsetzspannung (engl. inception voltage) (in kV)</i>
$U_{LE}$	<i>Spannung zwischen Leiter und Erde (in kV)</i>
$U_m$	<i>höchste Spannung für Betriebsmittel (in kV)</i>
$U_N$	<i>Nennspannung (in kV)</i>
$W$	<i>Energie (in J)</i>
$W_a$	<i>Aktivierungsenergie (in J)</i>
$W_A$	<i>Elektronenaffinität des Isolierstoffs (in eV)</i>
$x, y, z$	<i>Ortskoordinate (in m)</i>
$Z$	<i>Filterimpedanz (in <math>\Omega</math>)</i>
$Z_m$	<i>Messimpedanz (in <math>\Omega</math>)</i>
$Z_{mi}$	<i>Eingangsimpedanz des Messsystems (in <math>\Omega</math>)</i>

$\alpha$	<i>Ionisationskoeffizient (in 1/cm)</i>
$\beta$	<i>Rekombinationskoeffizient (in m<sup>2</sup>/s)</i>
$\gamma$	<i>Öffnungswinkel (in Grad)</i>
$\delta$	<i>Verlustwinkel (in Grad)</i>
$\tan \delta$	<i>Verlustfaktor</i>
$\varepsilon$	<i>Permittivität (auch: dielektrische Leitfähigkeit) (in As/(Vm) bzw. F/m)</i>
$\varepsilon_0$	<i>elektrische Feldkonstante, Dielektrizitätskonstante des Vakuums (8,854187871762 · 10<sup>-12</sup> As/(Vm))</i>
$\varepsilon_r$	<i>relative Dielektrizitätszahl, relative Permittivitätszahl</i>
$\eta$	<i>Homogenitätsgrad bzw. Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger</i>
$\theta$	<i>gestreckte Ellipsoid-Koordinaten (in m)</i>
$\mu$	<i>Ionenbeweglichkeit (in mm<sup>2</sup>/(Vs))</i>
$\nu$	<i>Schwingungsfrequenz der Moleküle (in 1/s bzw. Hz)</i>
$\sigma$	<i>elektrische Leitfähigkeit (in S/m) (in der Literatur oft auch mit <math>\kappa</math> bezeichnet)</i>
$\tau$	<i>Transitzeit, Zeitkonstante (in s)</i>
$\varphi$	<i>Phasenwinkel (in Grad)</i>
$\Phi$	<i>Potential (in kV)</i>

## Literaturverzeichnis

- [BAI10] P. Baier: „Dreiphasen-Leistungstransformatoren“, VDE-Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-3117-6
- [BAU12] M. Bauer: „Neue Interpretationsansätze für die Teilentladungsmessung bei hoher Gleichspannungsbeanspruchung“, Diplomarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, in Bearbeitung
- [BÄR08] R. Bärsch, J. Kindersberger: „Nichtlineare dielektrische Funktionseigenschaften von Dielektrika“, ETG-Fachbericht Band 110 „Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften“, VDE-Verlag, 2008, ISBN 978-3-8007-3080-3
- [BÄR10] R. Bärsch, A. Küchler: „Beanspruchungen und elektrisches Verhalten von Isoliersystemen bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchungen“, ETG-Fachbericht Band 125 „Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung“, VDE-Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-3278-4
- [BEY86] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl: „Hochspannungstechnik“, Springer-Verlag, 1986, ISBN 3-540-16014-0
- [BÖT73] C. J. F. Böttcher: “Theory of Electric Polarization – Volume I: Dielectrics in static fields“, 2. Auflage, Elsevier Scientific Publishing Company, 1973, ISBN 0-444-41019-8
- [BÖT78] C. J. F. Böttcher, P. Bordewijk: “Theory of Electric Polarization – Volume II: Dielectrics in time-dependent fields“, 2. Auflage, Elsevier Scientific Publishing Company, 1978, ISBN 0-444-41579-3
- [DAH98] V. Dahinden, K. Schultz, A. Küchler: “Function of Solid Insulation in Transformers“, transform 98, München 1998
- [DES03] DESERTEC Red Paper, 3. Auflage, <http://www.desertec.org>, heruntergeladen am 28.12.2010
- [FAB10<sup>1</sup>] J. Fabian, M. Kircher, H. Renner, M. Muhr: „Anforderungen und Innovationen zur Energieübertragung an zukünftige europäische Stromnetze“, 11. Symposium Energieinnovation, Graz, Februar 2010.
- [FAB10<sup>2</sup>] J. Fabian, T. Judendorfer, A. Straka, R. Wind, R. Woschitz, M. Muhr, C. Krause, U. Piovan: „Anforderungen und Beanspruchungen des Öl-Board-Isoliersystems von HGÜ-Stromrichter-Transformatoren“, ETG-Fachbericht Band 125 „Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung“, VDE-Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-3278-4

- [FAS05] G. Fasching: „Werkstoffe für die Elektrotechnik“, Springer-Verlag, 4. Auflage, 2005, ISBN 3-211-22133-6
- [GOC10<sup>1</sup>] E. Gockenbach: “Condition Monitoring and Diagnosis for Reliable Power Transmission and Distribution“, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) 2012, Tokio, Japan, ISBN 978-4-88686-070-5
- [GOC10<sup>2</sup>] E. Gockenbach: „Spannungsformen in HGÜ-Systemen – statische und dynamische Beanspruchungen“, ETG-Fachbericht Band 125 „Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung“, VDE-Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-3278-4
- [FELMI-ZFE] Institut für Elektronenmikroskopie und Feinstrukturforschung (FELMI), Zentrum für Elektronenmikroskopie Graz (ZFE), Technische Universität Graz, Steyrergasse 17, A-8010 Graz, [www.felmi-zfe.at](http://www.felmi-zfe.at)
- [HAN05] J. Hanson: „HGÜ und FACTS – erhöhte Flexibilität bei der Leistungsübertragung“, e&i, November 2005, 122. Jahrgang
- [ICM 3.03E] ICMsystem Digital Partial Discharge Recording, User Manual, Rev. 3.03E, Power Diagnostix Systems GmbH, [www.pd-systems.com](http://www.pd-systems.com)
- [IEC 60093] Prüfverfahren für Isolierstoffe – Spezifischer Durchgangswiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand von festen, elektrisch isolierenden Werkstoffen (IEC 60098:1980); Deutsche Fassung HD 429 S1:1983, VDE 0303 – Teil 30, Dezember 1993
- [IEC 60247] Isolierflüssigkeiten – Messung der Permittivitätszahl, des dielektrischen Verlustfaktors ( $\tan \delta$ ) und des spezifischen Gleichstrom-Widerstandes (IEC 60247:2004); Deutsche Fassung EN 60247:2004, Januar 2005
- [IEC 60270] Hochspannungs-Prüftechnik – Teilentladungsmessungen (IEC 60270:2000); Deutsche Fassung EN 60270:2001, August 2001
- [IEC 60554] Zellulosepapiere für elektrotechnische Zwecke – Teil 2: Prüfverfahren (IEC 60544-2:2001); Deutsche Fassung EN 60554-2:2002, Dezember 2002
- [IEC 61620] Isolierflüssigkeiten – Bestimmung des Permittivitäts-Verlustfaktors durch Messung der Konduktanz und Kapazität, Prüfverfahren (IEC 61620:1998); Deutsche Fassung EN 61620:1999, September 1999
- [JOC12] B. Jocham: „Numerische Feldsimulation des dielektrischen Verhaltens von Öl-Board-Isolieranordnungen unter hohen Gleich- und Wechselspannungen“, Diplomarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, in Bearbeitung
- [JWG A2/D1.41] Joint Working Group A2/D1.41 der Cigré: “HVDC transformer insulation – Oil conductivity“, Convenor: A. Kuchler, Secretary: U. Pivan, Members: I. Atanasova-Höhlein, M. Berglund, G. Chen, A.

- Denat, J. Fabian, R. Fritsche, S. Gubanski, S. Ingebrigtsen, M. Kadowaki, C. Krause, A. Langens, S. Mori, B. Noirhomme, H. Okubo, C. Perrier, S. Rätzke, M. Saravolac, F. Scatiggio, J. Schiessling, P. Smith, P. Wedin, H. Yu
- [KAH89] M. Kahle: „Elektrische Isoliertechnik“, Springer-Verlag, 1989, ISBN 3-540-19369-3
- [KIN95] D. Kind, K. Feser: „Hochspannungs-Versuchstechnik“, Vieweg, 5. Auflage, 1995, ISBN 3-528-43805-3
- [KER10] T. Kern: „System- und Technologievergleich von UHV – Übertragungssystemen“, Diplomarbeit Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2010
- [KOC05] M. Koch: „Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum“, VDE-Fachtagung „Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen“, Hanau, Deutschland, 08.-09.März 2005
- [KÖN93] D. König, Y. N. Rao: „Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik“, VDE-Verlag, 1993, ISBN 3-8007-1764-6
- [KRE64] F. H. Kreuger: “Discharge Detection in High Voltage Equipment“, Temple Press Books Ltd, 1964
- [KRE95] F. H. Kreuger: “Industrial High DC Voltage“, Delft University Press, 1995, ISBN 90-407-1110-0
- [KÜC03] A. Küchler, T. Leibfried, B. Breitenbauch, J. J. Alff, V. Der Houhnessian, W. S. Zaengl: “Transformer Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Analysis“, 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Illmenau, September 2003
- [KÜC07] A. Küchler, F. Hüllmandel, K. Böhm, M. Liebschner: „Charakterisierung von Isolierstoffen und Isoliersystemen durch Polarisations- und Depolarisationsstromanalysen (PDC-Analysen)“, 1. Burghauser Isolierstoff Kolloquium, Juni 2007
- [KÜC09] A. Küchler: „Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologie – Anwendungen“, 3., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, 2009, ISBN 978-3-540-78412-8
- [KÜC10] A. Küchler, M. Liebschner, A. Reumann, R. Fritsche, M. Rösner, M. Schenk, B. Heinrich, C. Krause, A. Langens, J. Titze: „Bestimmung von Leitfähigkeiten und dielektrischen Eigenschaften hoch beanspruchter HGÜ-Isolierwerkstoffe“, ETG-Fachbericht Band 125 „Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung“, VDE-Verlag, 2010, ISBN 978-3-8007-3278-4
- [LIE09] M. Liebschner: „Interaktion von Ölspalten und fester Isolation in HVDC-Barrierensystemen“, Dissertation, Technische Universität Illmenau, 2009

- [LIN66] H. Link: „Das Temperaturverhalten der elektrischen Eigenschaften von Isolierölen, insbesondere von Haftmassen und ihren Einzelkomponenten“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1966
- [LLM04] “Low Level Measurements Handbook – Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements“, 6. Auflage, Keithley Instruments, Inc., 2004, [www.keithley.com](http://www.keithley.com)
- [MOS79] H. P. Moser: „Transformerboard“, Weidmann, 1979
- [MOS87] H. P. Moser, V. Dahinden: „Transformerboard II“, Weidmann, 1987
- [NAD12] B. Nader: „Dimensionierung eines Prüfkessels zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Öl-Board-Isoliersystems unter Einfluss der Feldstärke, Temperatur sowie Boardfeuchte“, Diplomarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, in Bearbeitung
- [OED04] D. Oeding, B. R. Oswald: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer, 6. Auflage, 2004, ISBN 3-540-00863-2
- [PIO04] U. Piovan: “HVDC Converter Transformers Polarity Reversal Impact on Dielectric Design“, IEEE/PES Transformers Committee 2004 Meeting, Las Vegas, 2004
- [POR96] R. Porzel, E. Neudert, M. Sturm: „Diagnostik der Elektrischen Energietechnik: Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnischen Betriebsmitteln“, expert verlag, 1996, ISBN 3-8169-1364-4
- [PUK08] G. J. Pukel: „Elektrische Festigkeit von Isolieröl“, Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2008
- [REH09] C. Rehtanz, A. Worgull, W. Horenkamp: „Smart Metering Technologien für den flächendeckenden Einsatz in virtuellen Kraftwerken“, ETG-Kongress 2009, Düsseldorf
- [RET09] K. Rethmeier, M. Krüger, A. Küchler, M. Liebschner, C. Krause: „Neue Ansätze zur Interpretation von Teilentladungsmessungen bei DC Prüfspannung“, ETG-Kongress, Düsseldorf, Oktober 2009
- [SCH02] R. Schwarz: „Optische Teilentladungsdiagnostik für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik“, Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2002
- [SCH06] A. J. Schwab: „Elektroenergiesysteme – Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, Springer-Verlag, 2006, ISBN 3-540-29664-6
- [SCH09] J. Schlabbach: „Elektroenergieversorgung“, 3. Auflage, VDE-Verlag, 2009, ISBN 978-3-8007-3108-4



- 
- [SCH10] P. Schmitt: „Modellierung geschichteter Isoliersysteme für HVDC-Anwendungen mit Hilfe von dielektrischen Materialparametern“, Master-Thesis, Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt, 2010
- [STA09] G. Stark: „Energieübertragung mit HGÜ Technologie und Projektbeispiele“, ABB AG, Mannheim 2009
- [TRA10] „Transformatorenölhandbuch“, Nynas Naphthenics AB, [www.nynas.com/naphthenics](http://www.nynas.com/naphthenics), Download am 28.12.2010
- [VDE96] „VDEW-Ölbuch Band 2 – Isolierflüssigkeiten“, 7. Auflage, VDEW, 1996, ISBN 978-3-8022-0496-8
- [WIE12] B. Wieser: „Teilentladungsverhalten von mineralischen und alternativen Isolierölen bei Wechselspannung und Gleichspannung“, Diplomarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, in Bearbeitung
- [ZER10] E. Zerr: „Bestimmung, Einfluss und Einsatz dielektrischer Materialeigenschaften für die Modellbildung von HVDC-Isoliersystemen“, Master-Thesis, Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt, 2010



## **Anhang**

- A Leitfähigkeitsmessungen von Isolieröl
- B Leitfähigkeitsmessungen von Board
- C Teilentladungsmessungen unter Isolieröl
- D Teilentladungsmessungen Öl-Board-Gleitanordnung
- E Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen
- F Datenblätter
- G Geräteverzeichnis



## Anhang A: Leitfähigkeitsmessungen von Isolieröl

An dieser Stelle sei vermerkt, dass es sich bei mineralischem Isolieröl um ein Naturprodukt handelt und es daher zwischen verschiedenen Ölchargen Unterschiede geben kann. Die im Folgenden vorgestellten Messwerte sind daher als Richtgrößen zu verstehen, da es sich auf Grund des geringen Stichprobenumfangs um so genannte *statistische Einzelereignisse* handelt. Daher wird dringend empfohlen, Wiederholungsmessungen für Designzwecke anzustellen. Die vorliegende Dissertation bezweckt nicht die Bereitstellung von Konstruktionsdaten, sondern vielmehr die Beschreibung des Verhaltens der Isolierstoffe.

### A1. Round Robin Test Cigré JWG A2/D1.41

Die folgenden Ergebnisse wurden mit freundlicher Genehmigung und Unterstützung durch die Cigré-Arbeitsgruppe JWG A2/D1.41 [JWG A2/D1.41] (Convenor Prof. Andreas Küchler) zur Verfügung gestellt, wobei die Auswertung am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement an der Technischen Universität stattfand. Anschließend wurden die erhobenen Messdaten grafisch in Diagrammgruppen zusammengefasst und analysiert.

In Vereinbarung mit der Arbeitsgruppe JWG A2/D1.41 sind die zu den Messdaten zugehörigen Laboratorien anonym behandelt worden. Die Veröffentlichung der gesamten erhobenen Daten erfolgt durch die entsprechende Cigré-Broschüre nach Beendigung der Arbeitsgruppe voraussichtlich Dezember 2013.

In den Diagrammen Abb. A.1 bis Abb. A.8 ist zunächst die Ölsorte Shell Diala S3 ZX-I Dried dargestellt. Die Diagramme Abb. A.9 bis Abb. A.16 illustrieren die zweite Ölsorte Shell Diala S3 ZX-IG Dried. Bei den beiden zu untersuchenden Ölsorten handelt es sich um inhibierte Mineralöle, deren spezifische Daten den Datenblättern im Anhang F zu entnehmen sind.

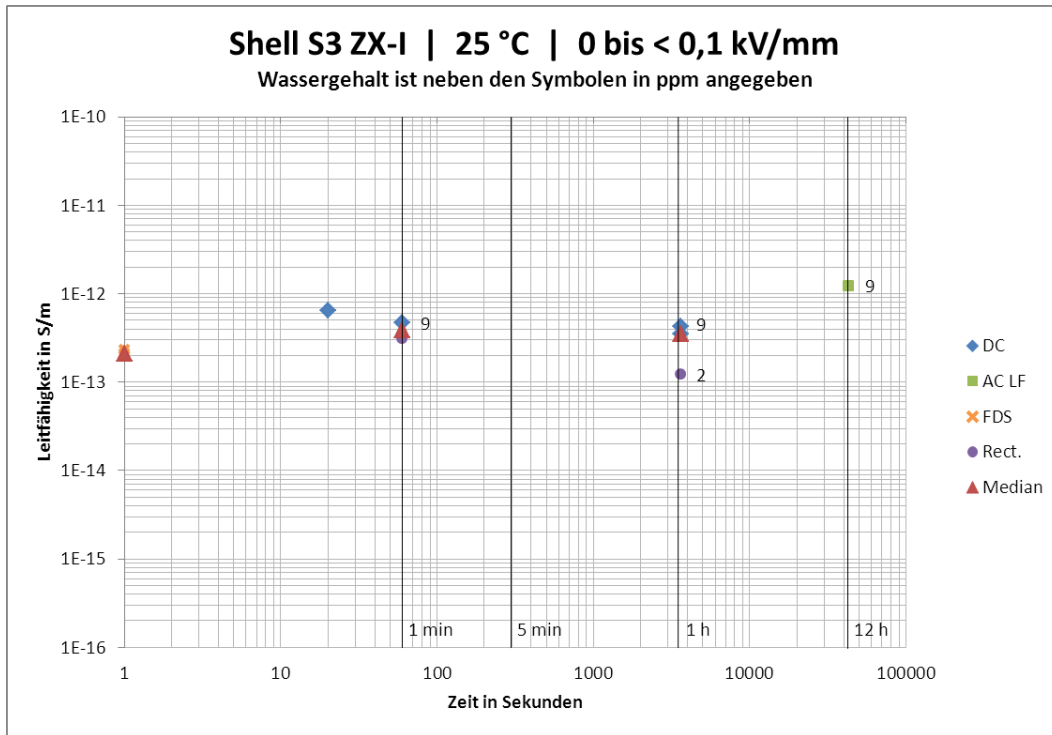


Abb. A.1: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 25 °C, 0 bis < 0,1 kV/mm

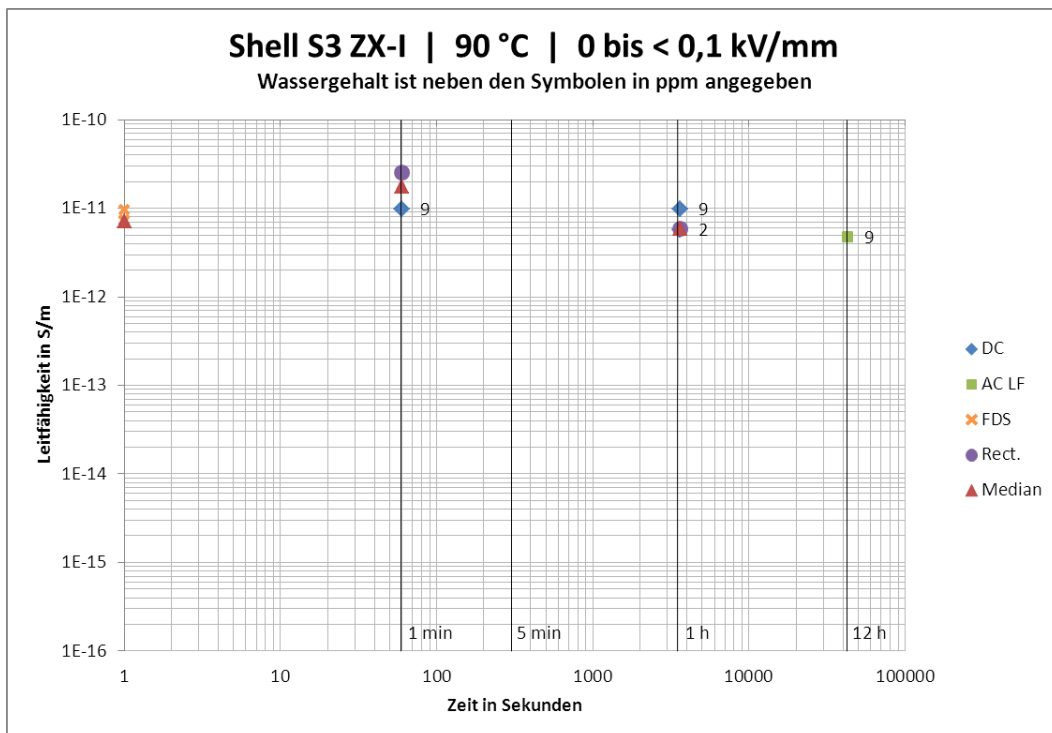


Abb. A.2: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 90 °C, 0 bis < 0,1 kV/mm

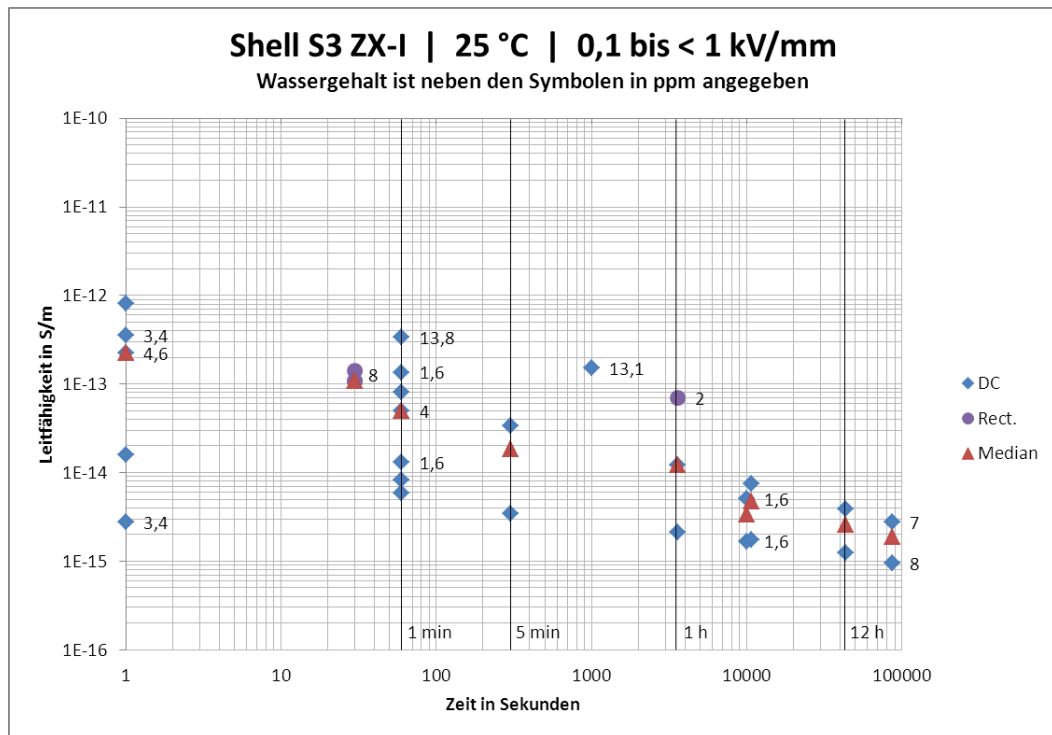


Abb. A.3: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 25 °C, 0,1 bis < 1 kV/mm

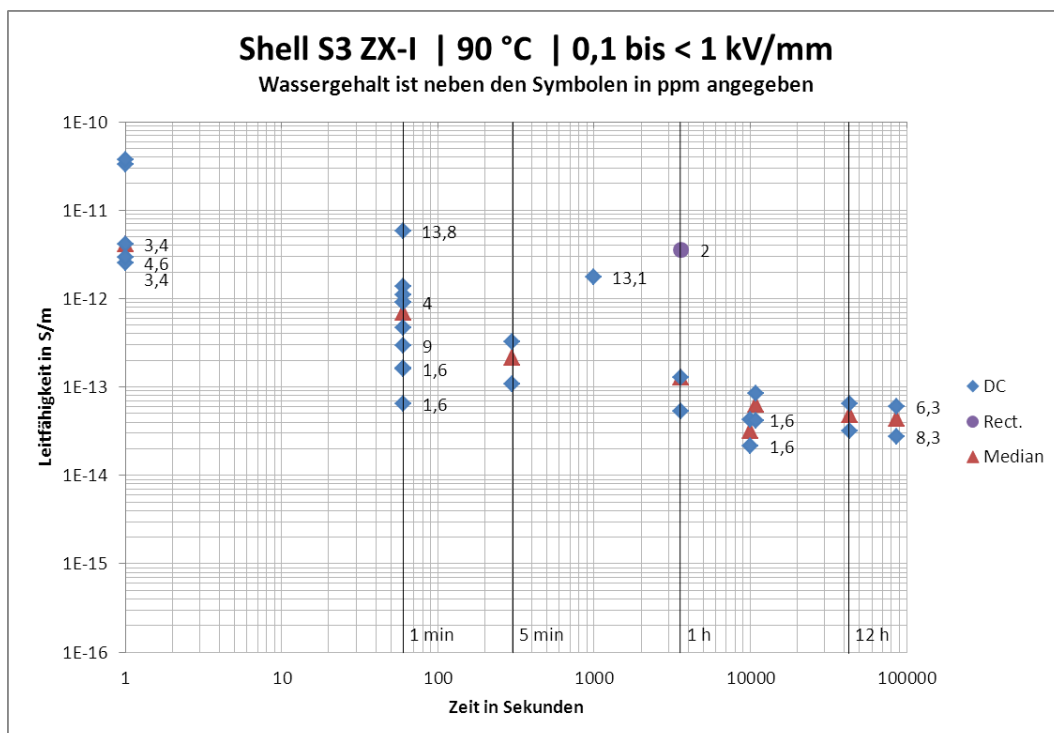


Abb. A.4: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 90 °C, 0,1 bis < 1 kV/mm

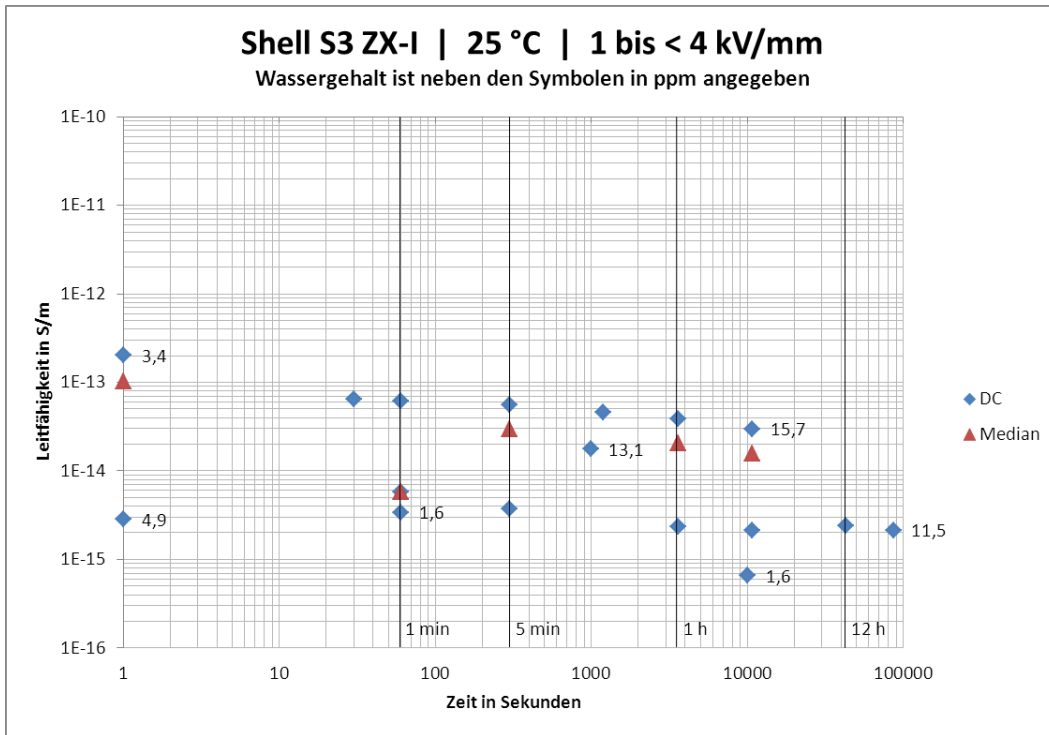


Abb. A.5: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 25 °C, 1 bis < 4 kV/mm

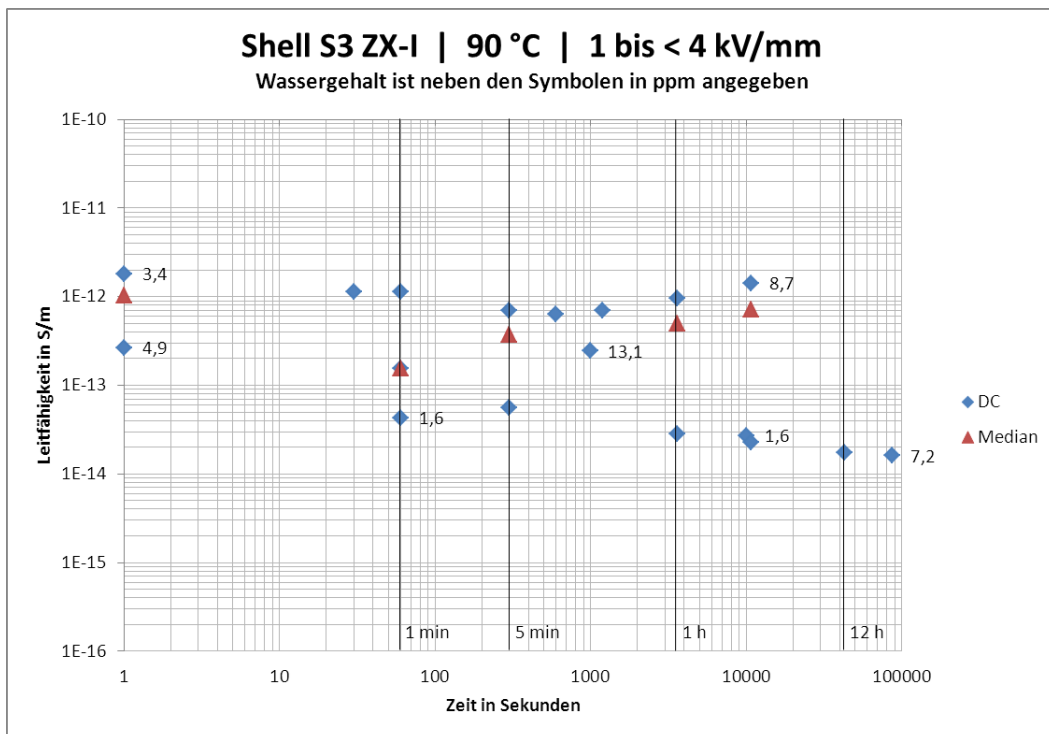


Abb. A.6: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 90 °C, 1 bis < 4 kV/mm



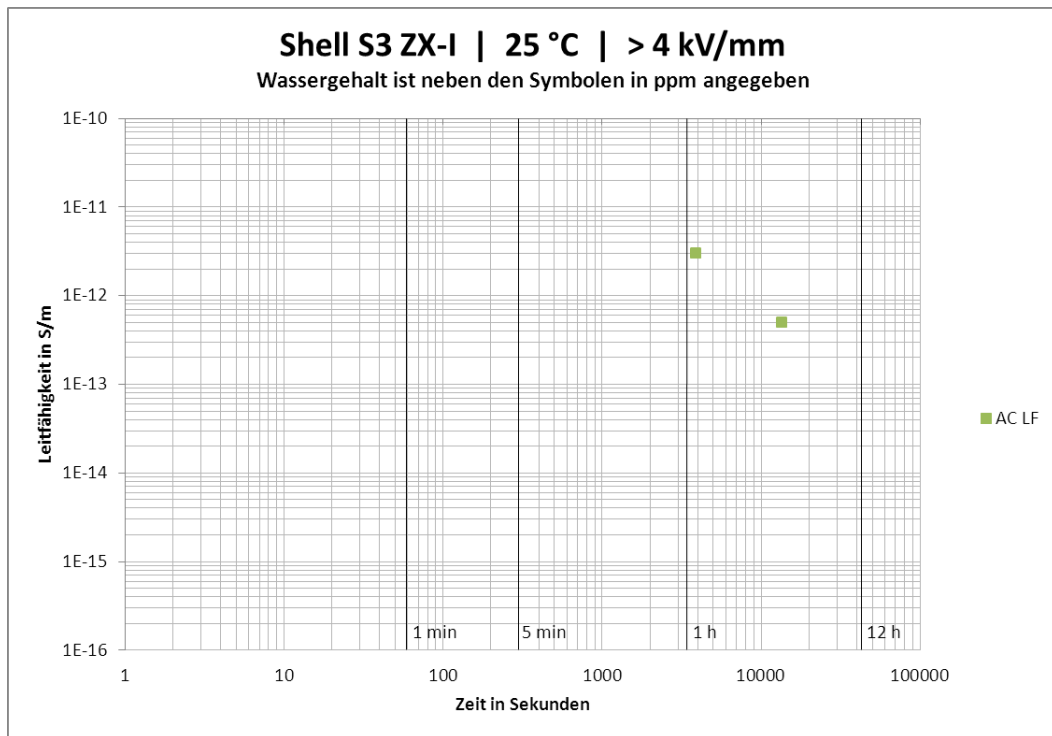


Abb. A.7: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 25 °C, > 4 kV/mm

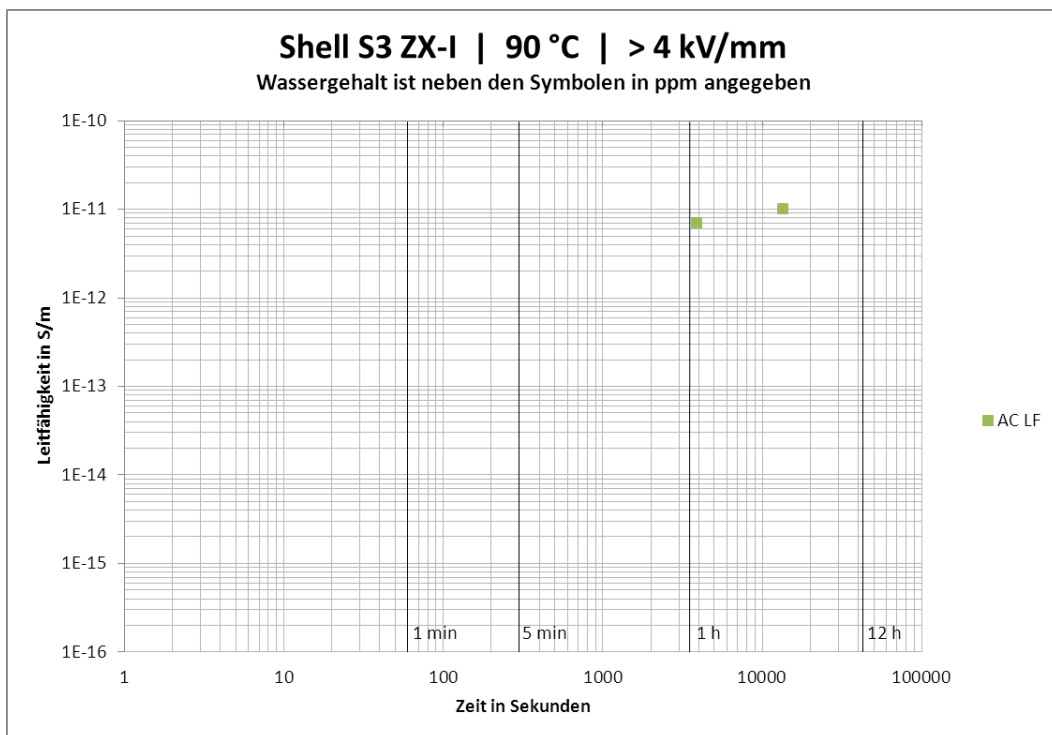


Abb. A.8: Shell Diala S3 ZX-I Dried, 90 °C, > 4 kV/mm

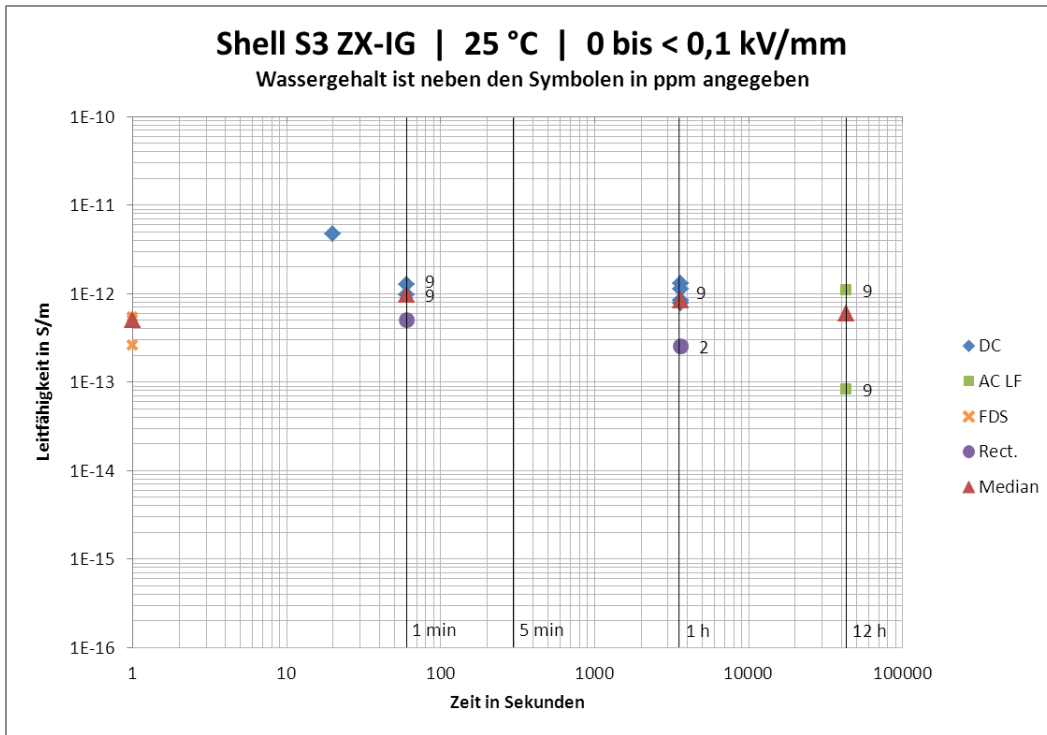


Abb. A.9: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, 25 °C, 0 bis < 0,1 kV/mm

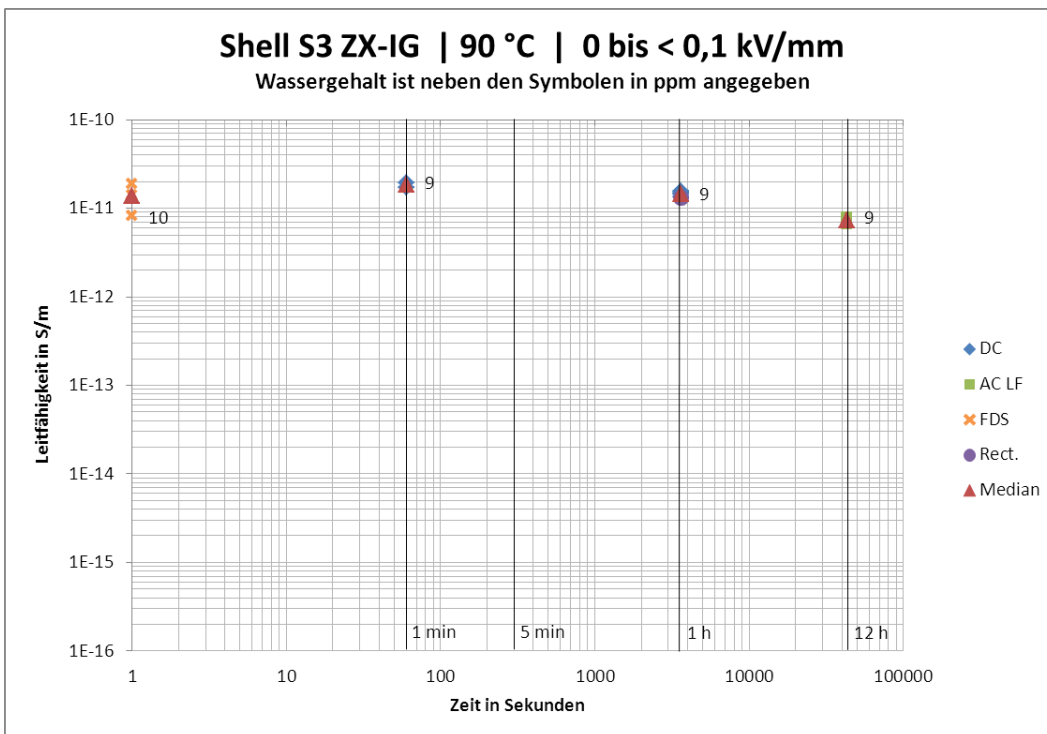


Abb. A.10: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, 90 °C, 0 bis < 0,1 kV/mm



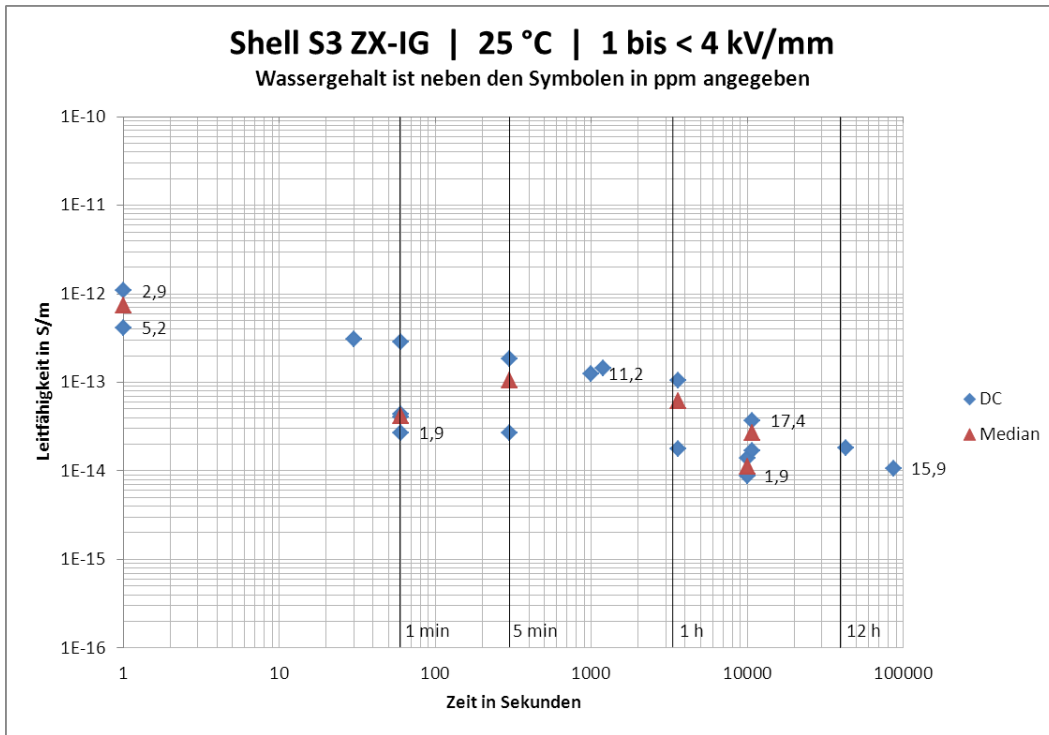


Abb. A.13: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, 25 °C, 1 bis < 4 kV/mm

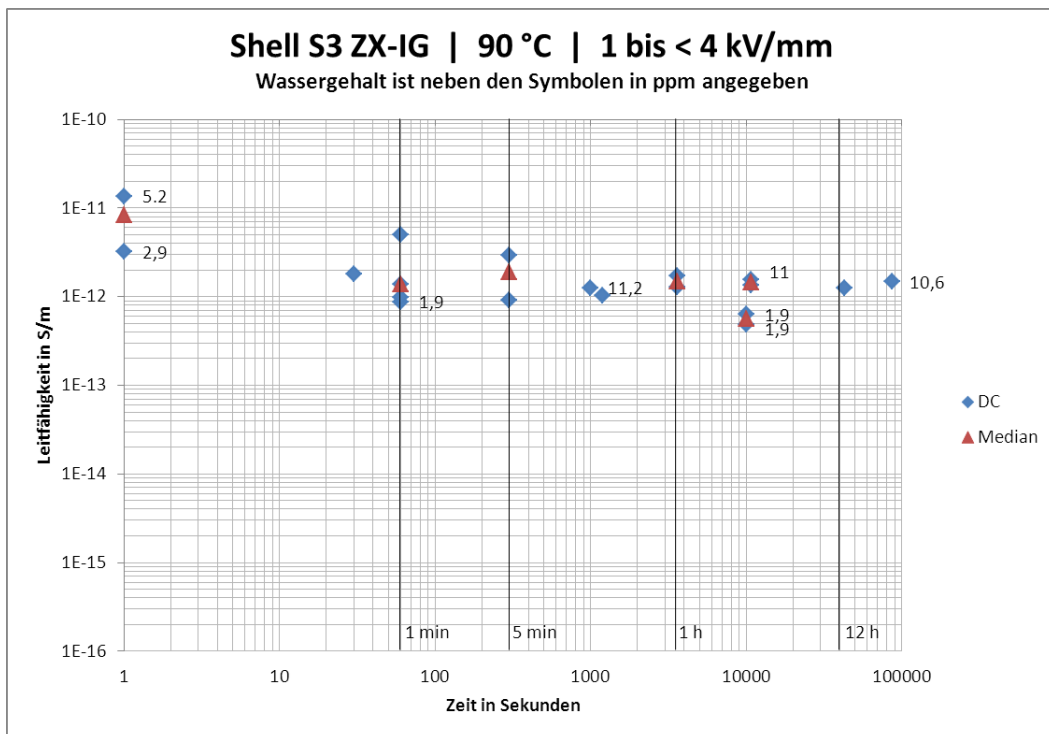


Abb. A.14: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, 90 °C, 1 bis < 4 kV/mm

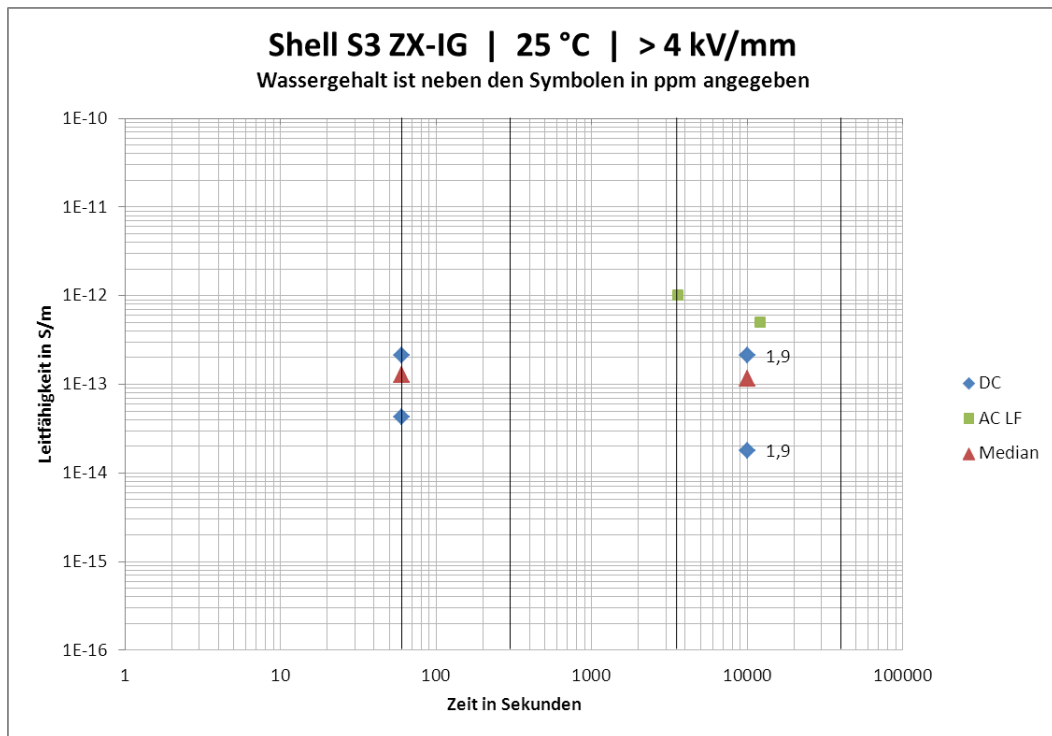


Abb. A.15: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, 25 °C, > 4 kV/mm

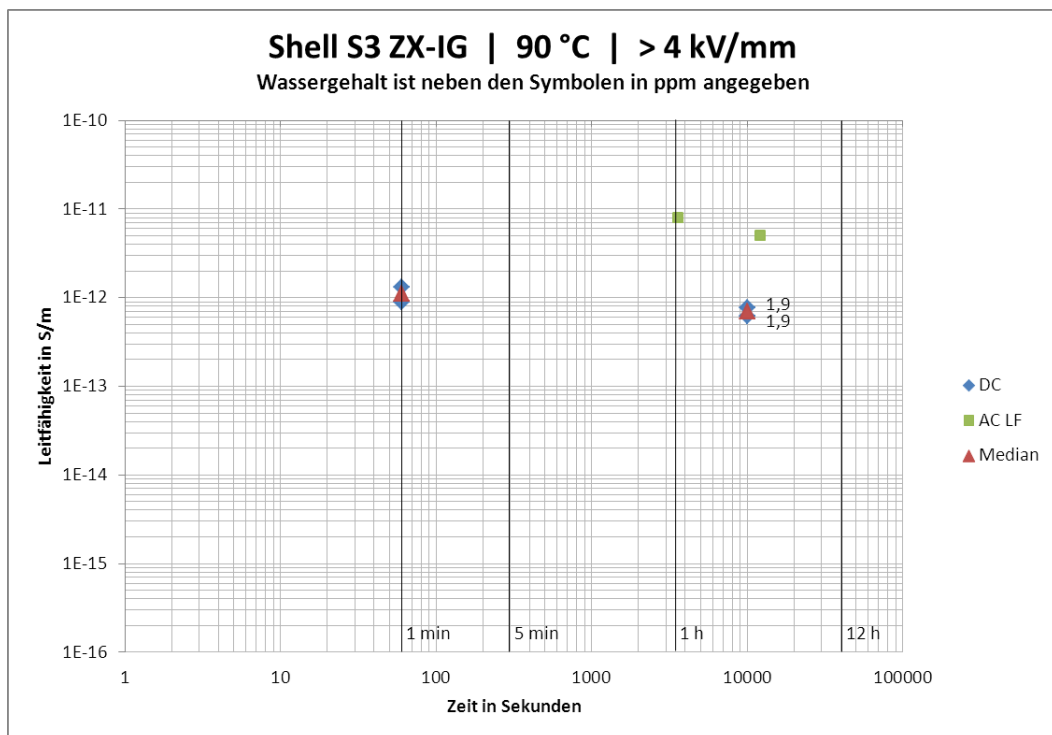


Abb. A.16: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, 90 °C, > 4 kV/mm

## A2. Leitfähigkeitsmessungen mittels Tettex Messzelle

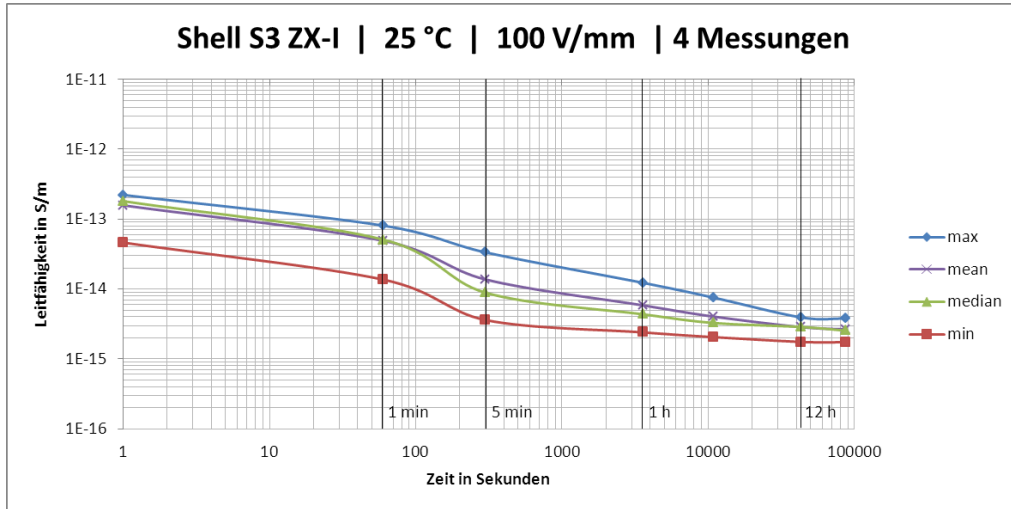


Abb. A.17: Shell Diala S3 ZX-I Dried, Tettex Messzelle, 25 °C, 100 V/mm, 4 Messungen

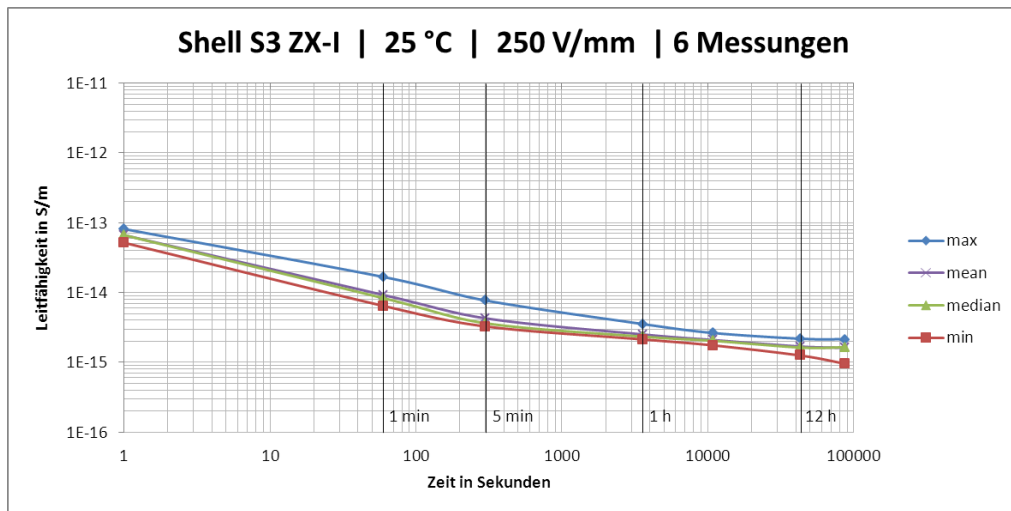


Abb. A.18: Shell Diala S3 ZX-I Dried, Tettex Messzelle, 25 °C, 250 V/mm, 6 Messungen

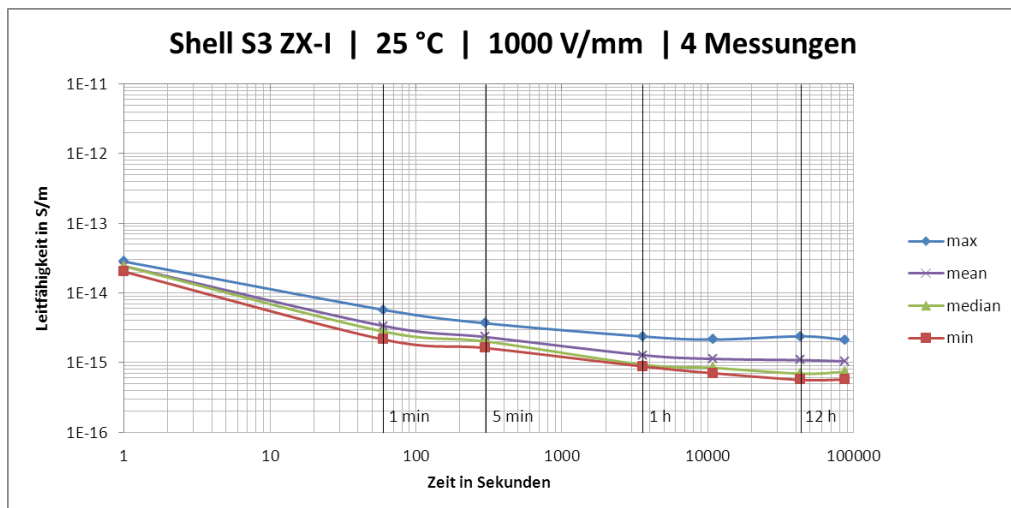


Abb. A.19: Shell Diala S3 ZX-I Dried, Tettex Messzelle, 25 °C, 1000 V/mm, 4 Messungen

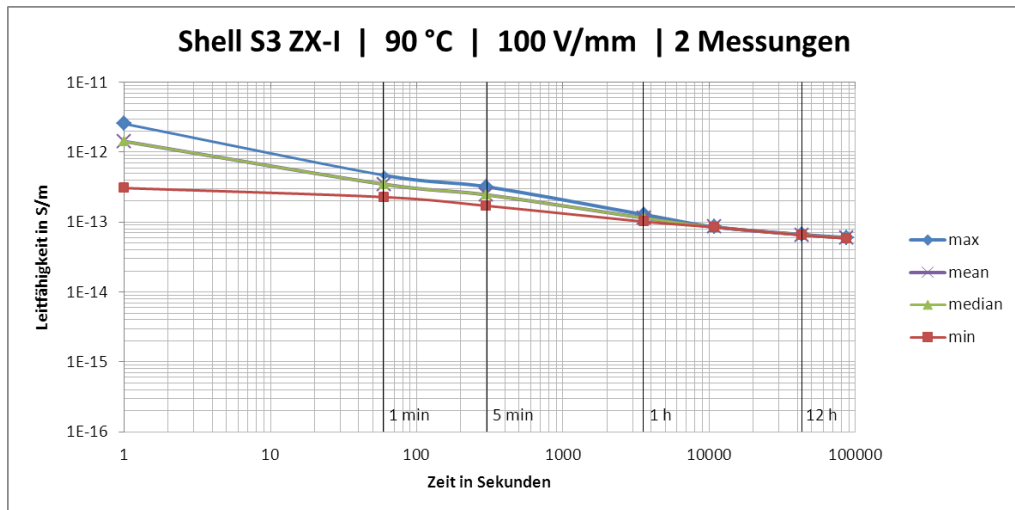


Abb. A.20: Shell Diala S3 ZX-I Dried, Tettex Messzelle, 90 °C, 100 V/mm, 2 Messungen

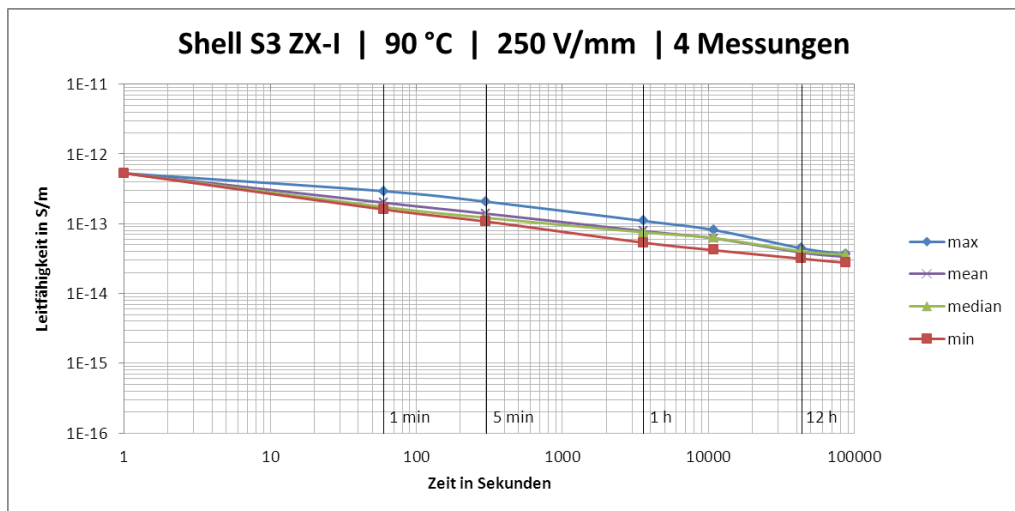


Abb. A.21: Shell Diala S3 ZX-I Dried, Tettex Messzelle, 90 °C, 250 V/mm, 4 Messungen

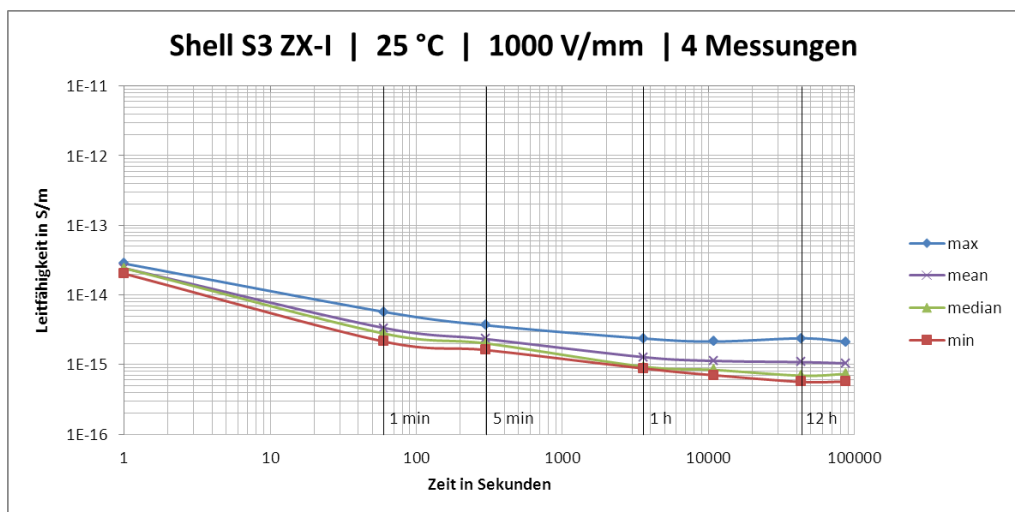


Abb. A.22: Shell Diala S3 ZX-I Dried, Tettex Messzelle, 90 °C, 1000 V/mm, 3 Messungen

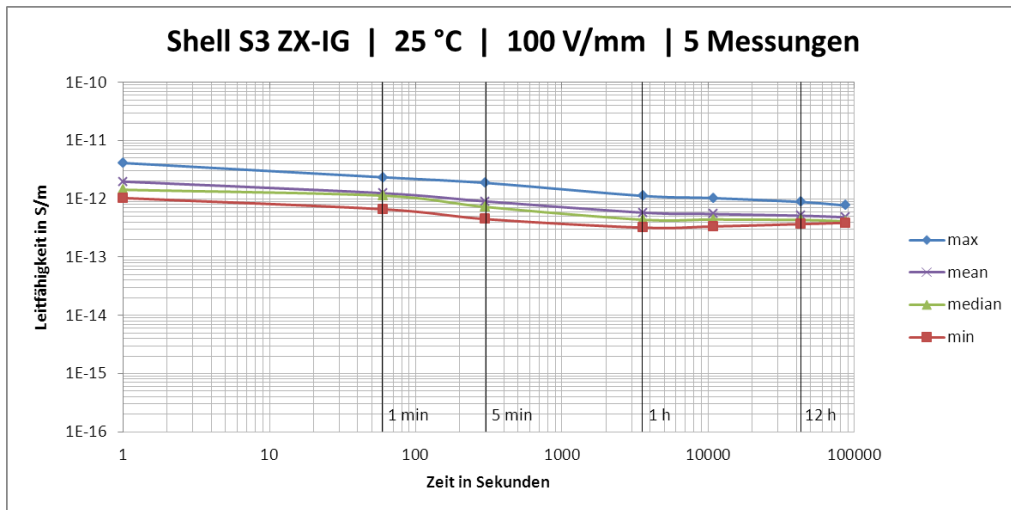


Abb. A.23: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, Tettex Messzelle, 25 °C, 1000 V/mm, 5 Messungen

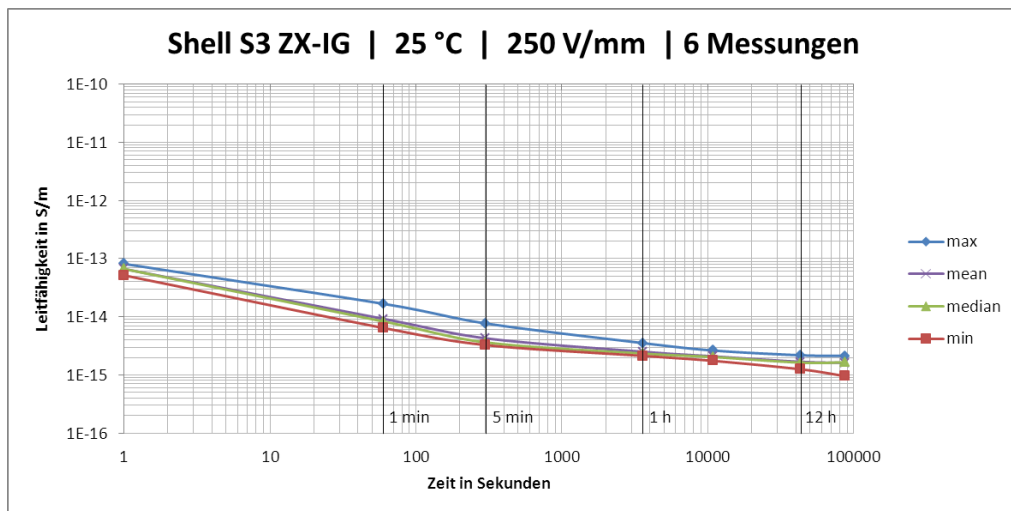


Abb. A.24: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, Tettex Messzelle, 25 °C, 250 V/mm, 6 Messungen

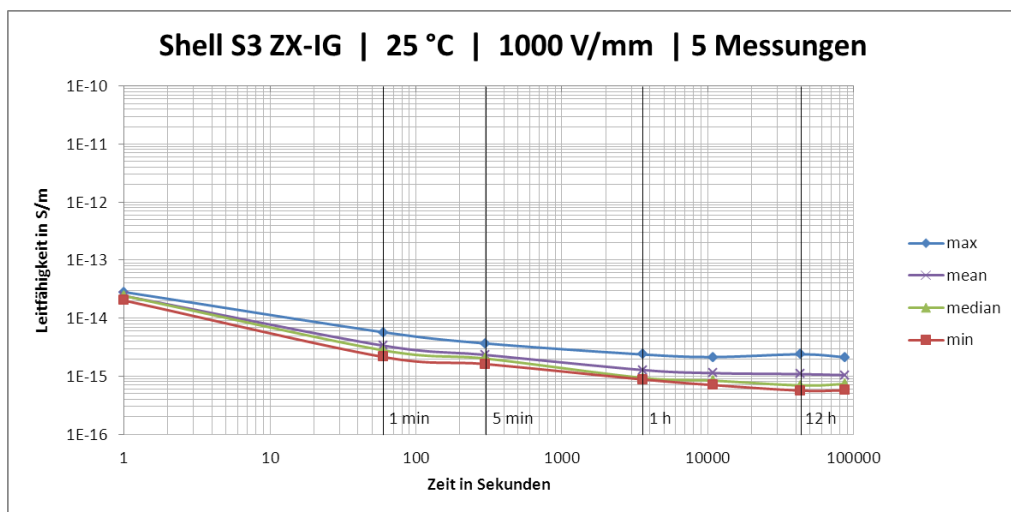


Abb. A.25: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, Tettex Messzelle, 25 °C, 1000 V/mm, 5 Messungen



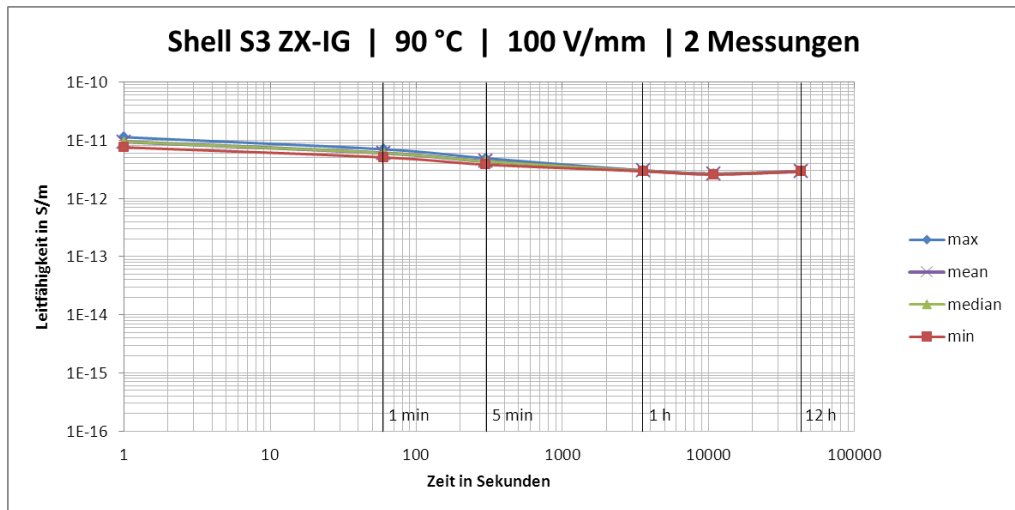


Abb. A.26: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, Tettex Messzelle, 90 °C, 100 V/mm, 2 Messungen

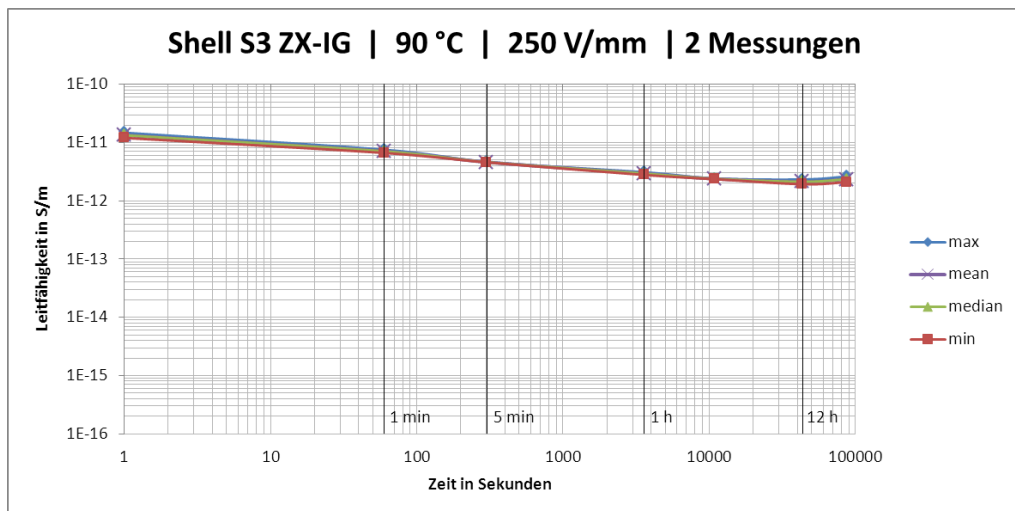


Abb. A.27: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, Tettex Messzelle, 90 °C, 100 V/mm, 2 Messungen

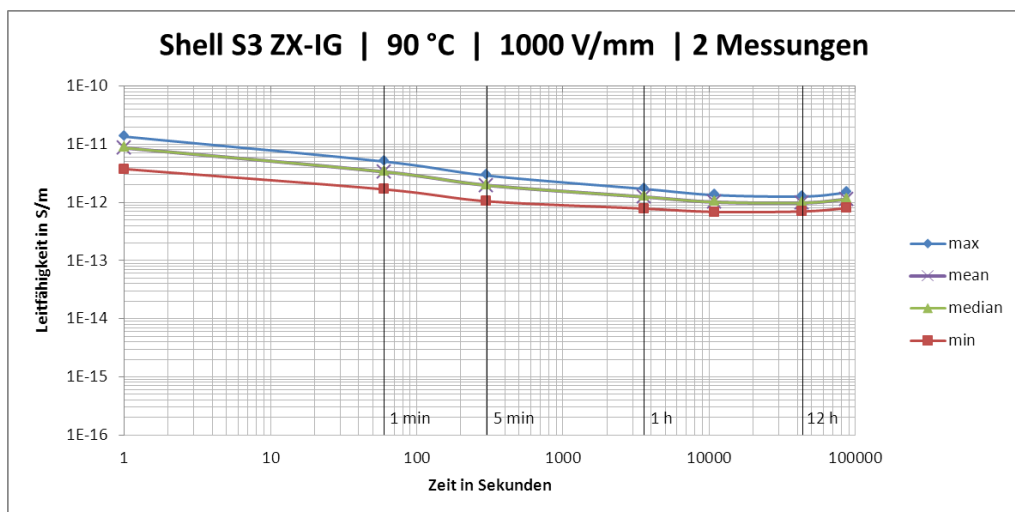


Abb. A.28: Shell Diala S3 ZX-IG Dried, Tettex Messzelle, 90 °C, 1000 V/mm, 2 Messungen

### A3. Einfluss des Wassergehalts auf den spezifischen Widerstand mittels Ölprüfgerät BAUR DTL

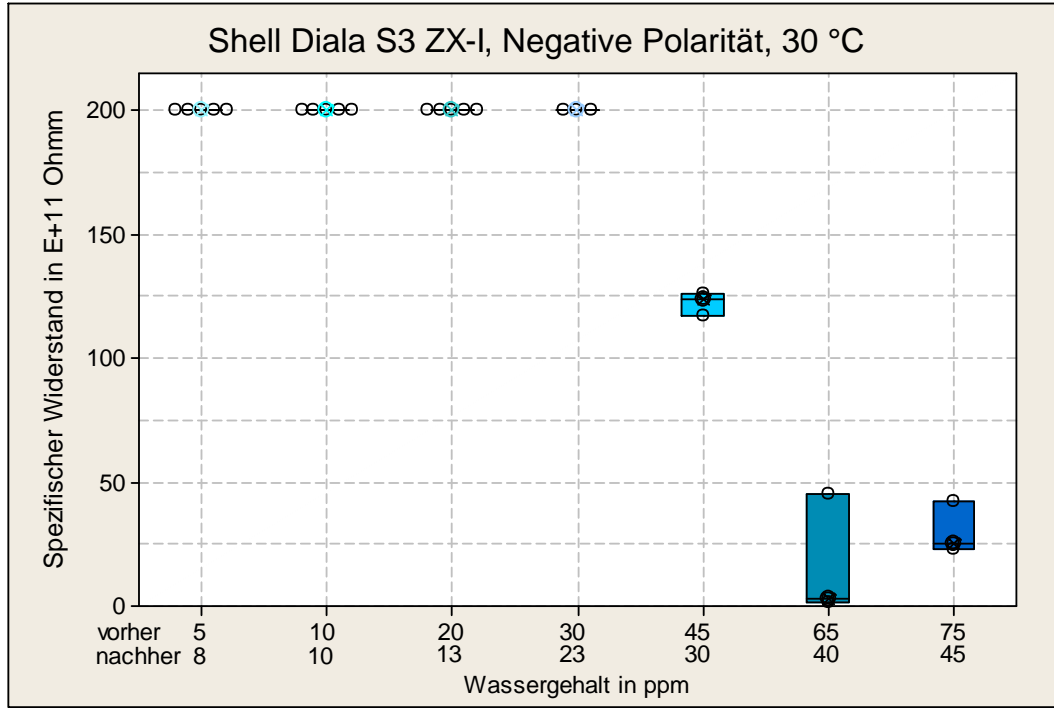


Abb. A.29: Shell Diala S3 ZX-I Dried, BAUR DTL, Negative Polarität, 30 °C

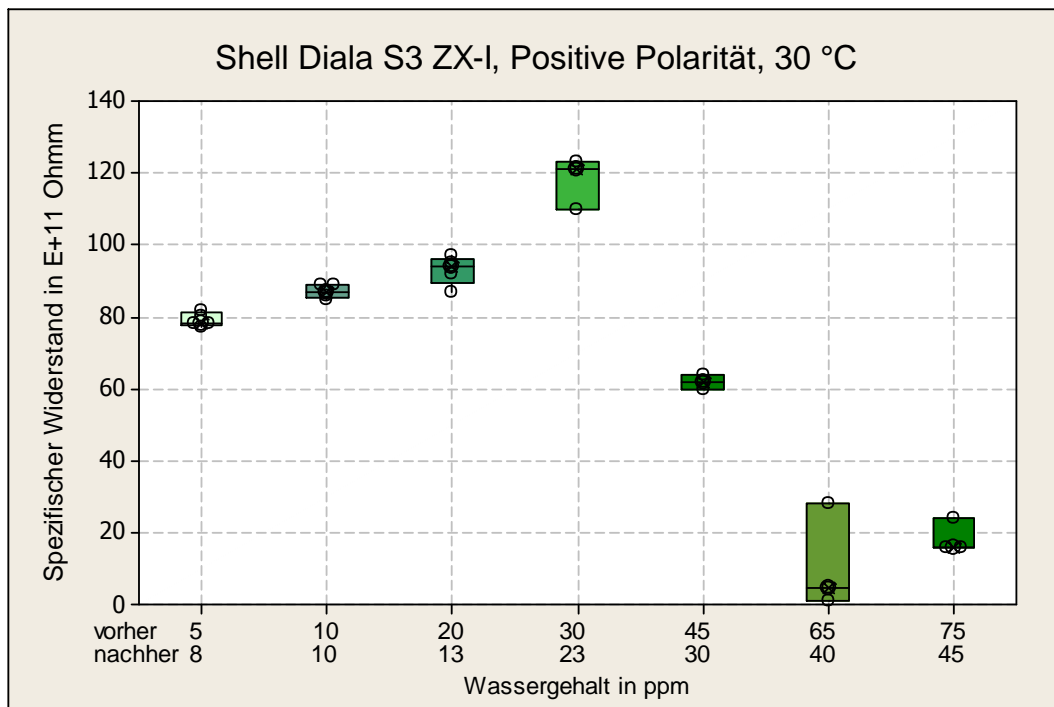


Abb. A.30: Shell Diala S3 ZX-I Dried, BAUR DTL, Positive Polarität, 30 °C

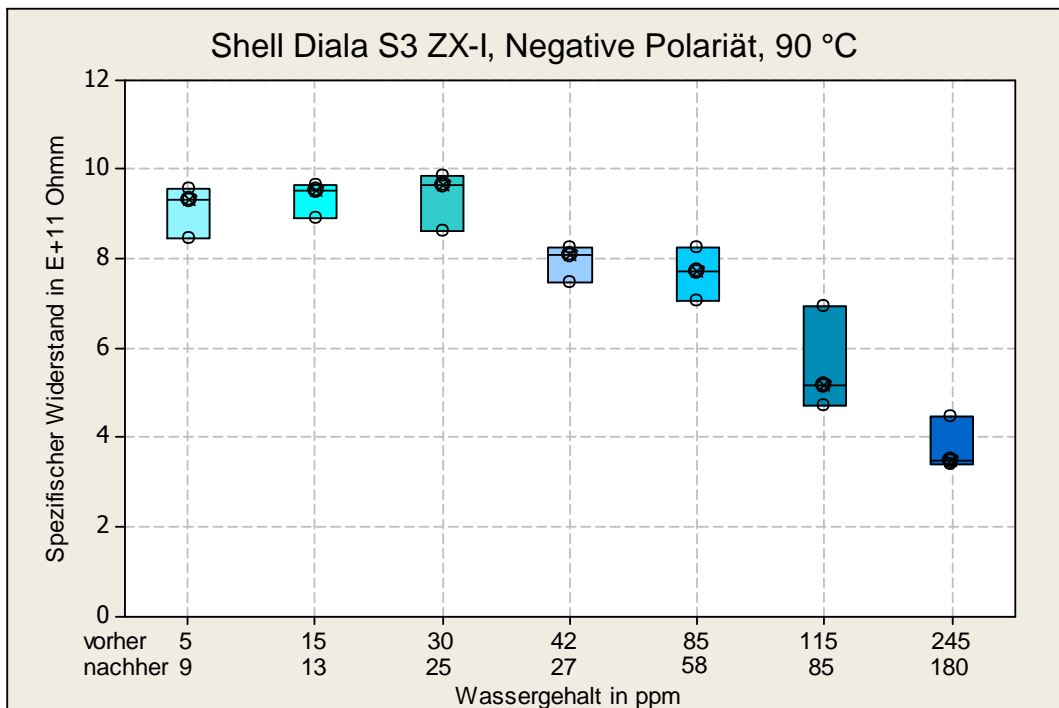


Abb. A.31: Shell Diala S3 ZX-I Dried, BAUR DTL, Negative Polarität, 90 °C

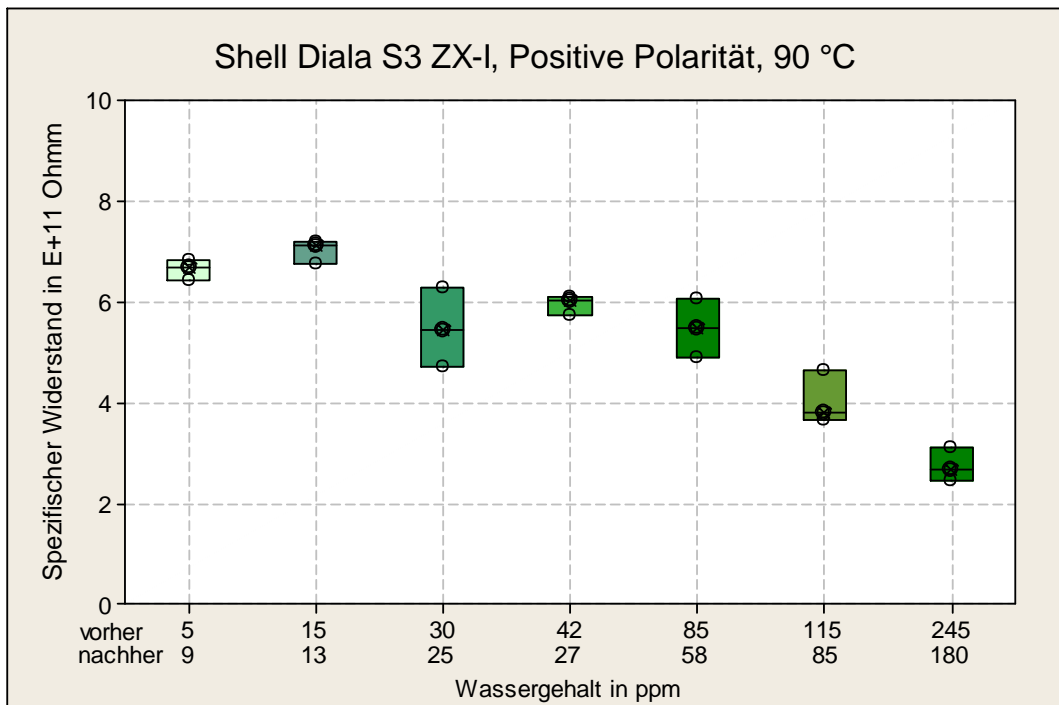


Abb. A.32: Shell Diala S3 ZX-I Dried, BAUR DTL, Positive Polarität, 90 °C



## Anhang B: Leitfähigkeitsmessungen von Board

In den folgenden Diagrammen sind die unterschiedlichen Board-Typen bezüglich ihres Leitfähigkeitsverhaltens dargestellt. In Abb. B.1 ist die Prüfmatrix für die Versuche unter Gleichspannungsbeanspruchung grafisch dargestellt.

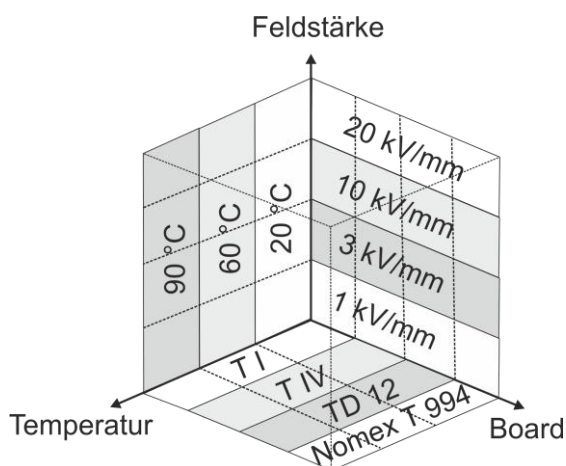


Abb. B.1: Prüfmatrix der verschiedenen Parameter zur Bestimmung der Leitfähigkeit des Öl-Board-Isoliersystems

Zusätzlich wurde für den Board-Typen Transformerboard T I (kalandriert) eine Variation der absoluten Board-Feuchte von 1, 2 und 4 % bei 25 und 60 °C durchgeführt.

Ein Messrauschen konnte bei einer Leerlaufmessung (Messelektrode in Luft) im sub-pA-Bereich in der Größenordnung  $10^{-14}$  A ermittelt werden.

## B1. Transformerboard T I

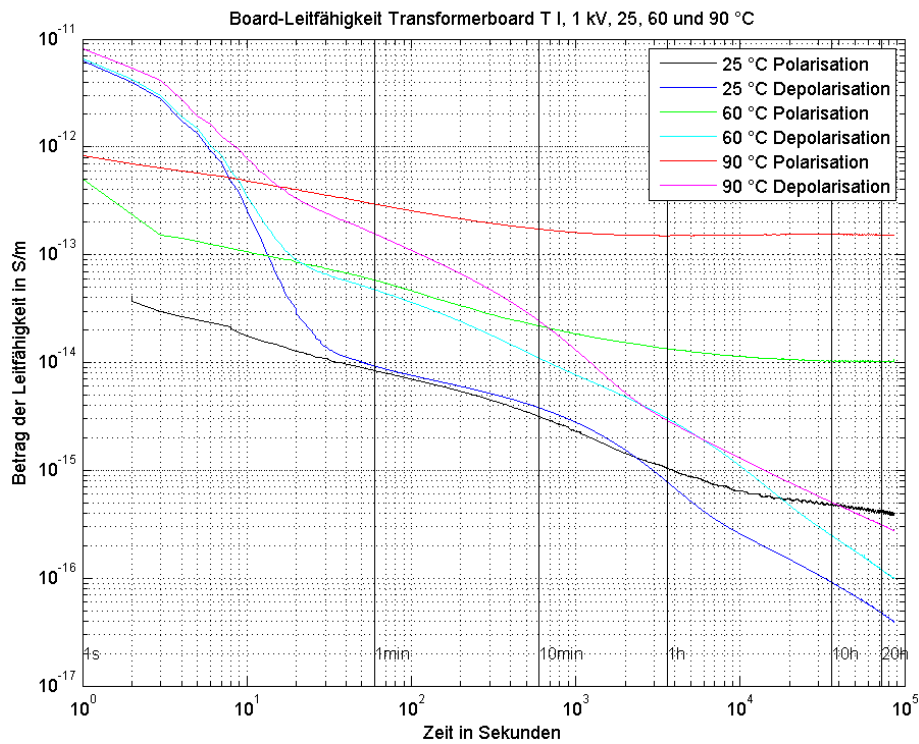


Abb. B.2: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T I, 1 kV, 25, 60 und 90 °C

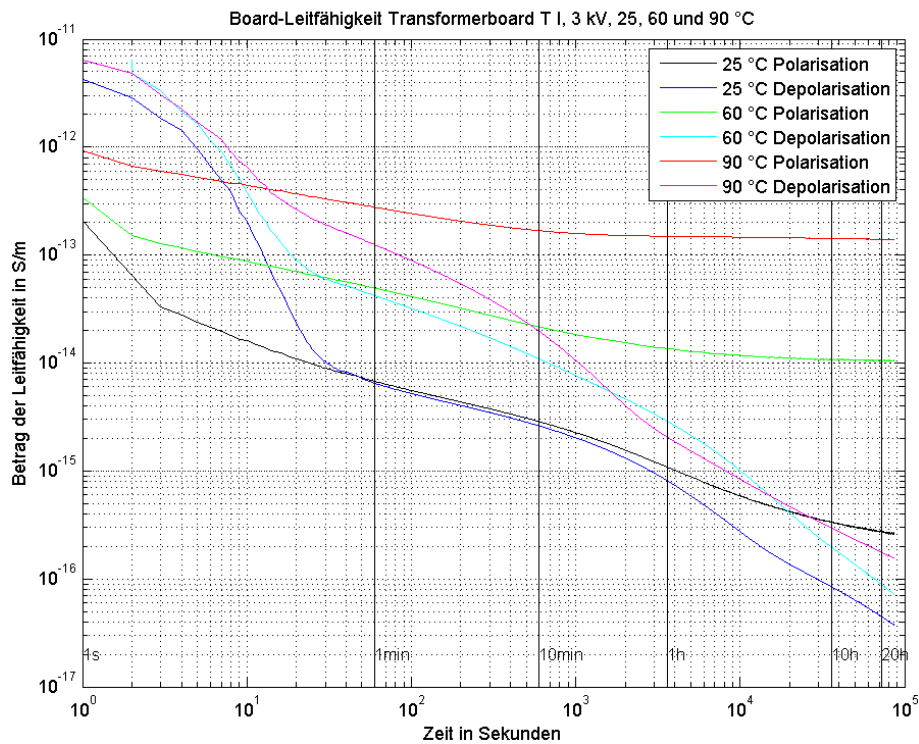


Abb. B.3: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T I, 3 kV, 25, 60 und 90 °C

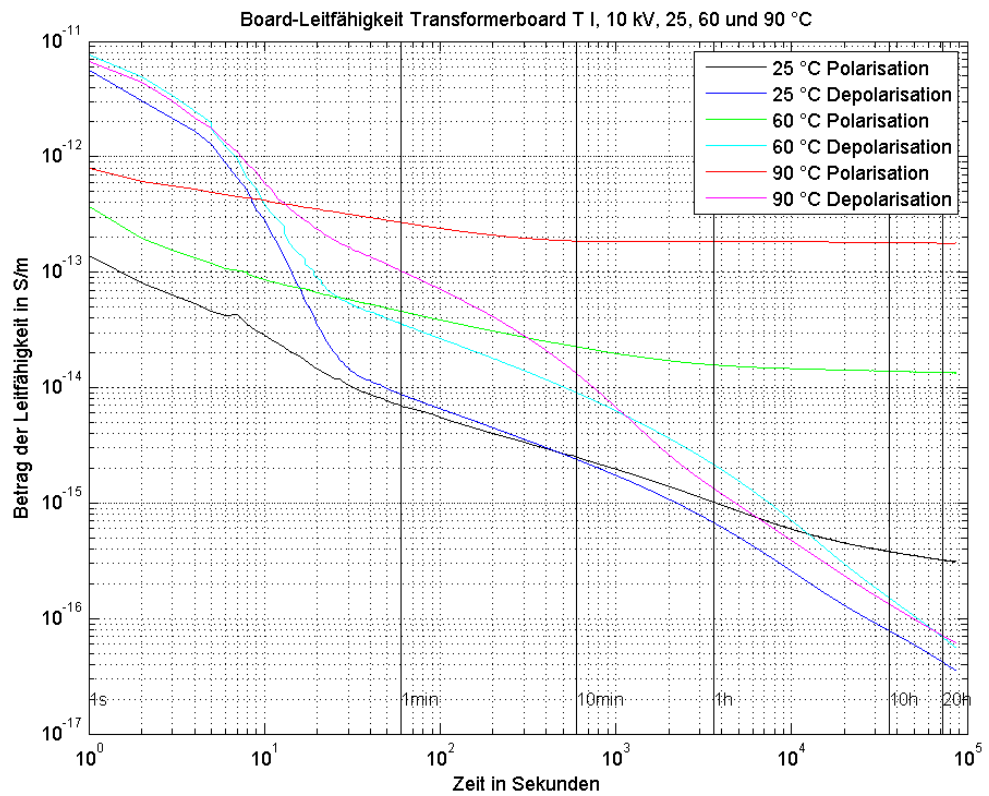


Abb. B.4: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T I, 10 kV, 25, 60 und 90 °C

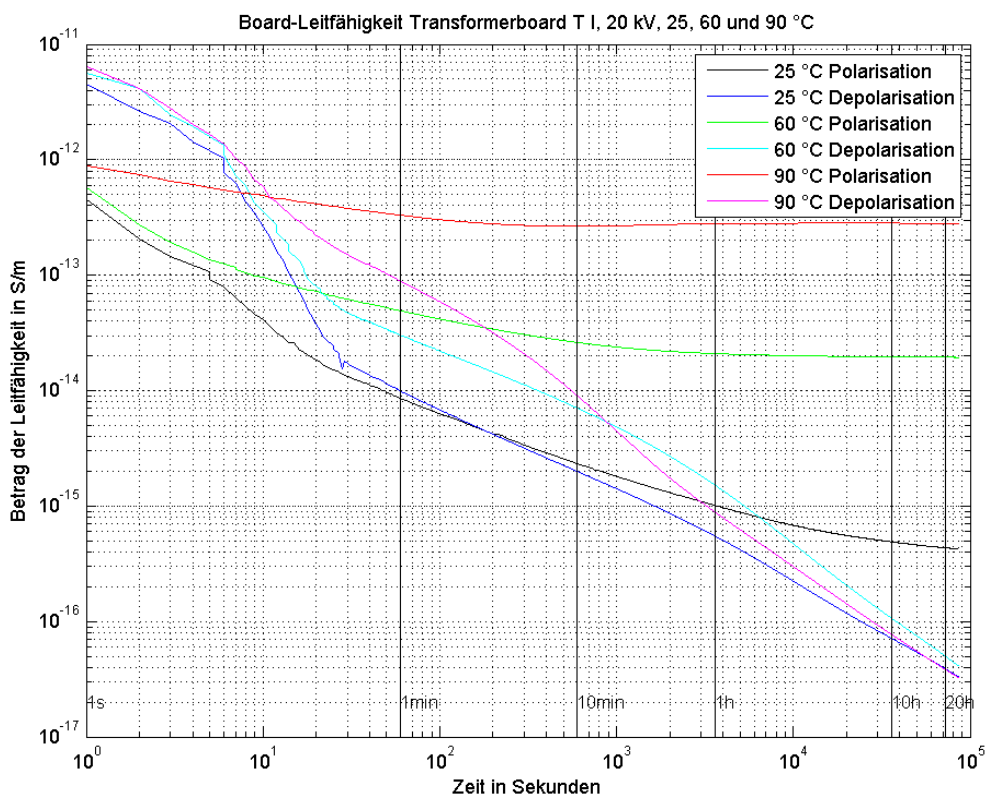


Abb. B.5: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T I, 20 kV, 25, 60 und 90 °C

## B2. Transformerboard T IV

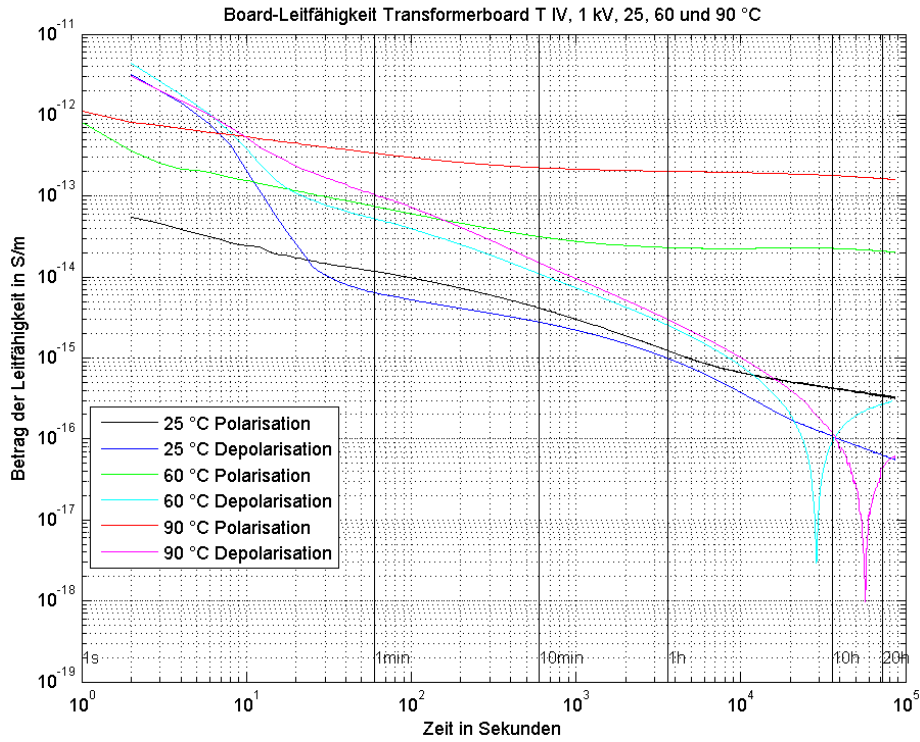


Abb. B.6: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T IV, 1 kV, 25, 60 und 90 °C

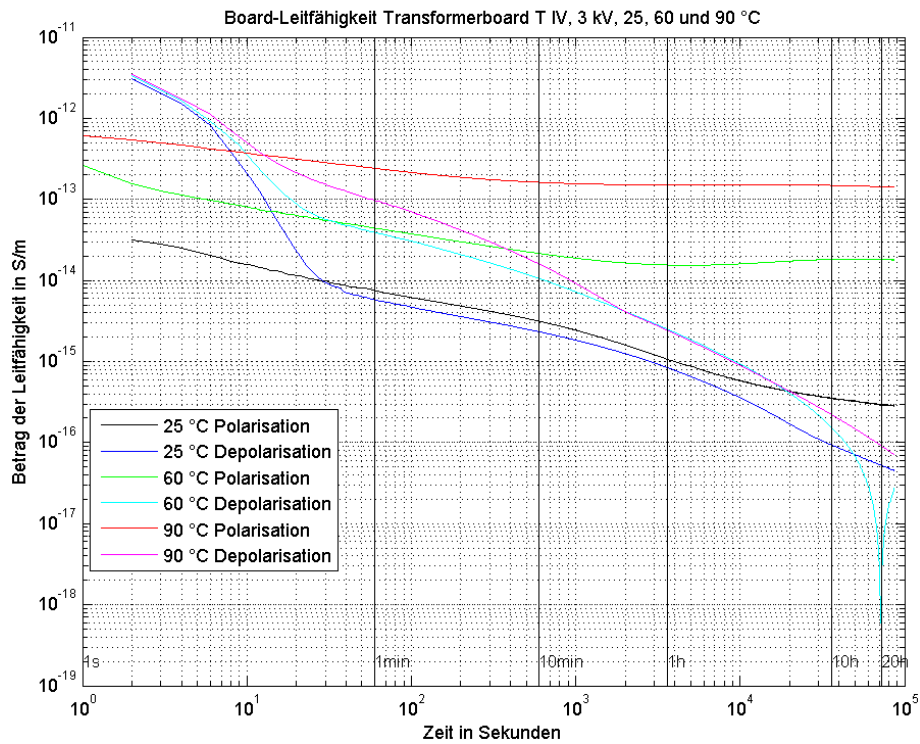


Abb. B.7: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T IV, 3 kV, 25, 60 und 90 °C



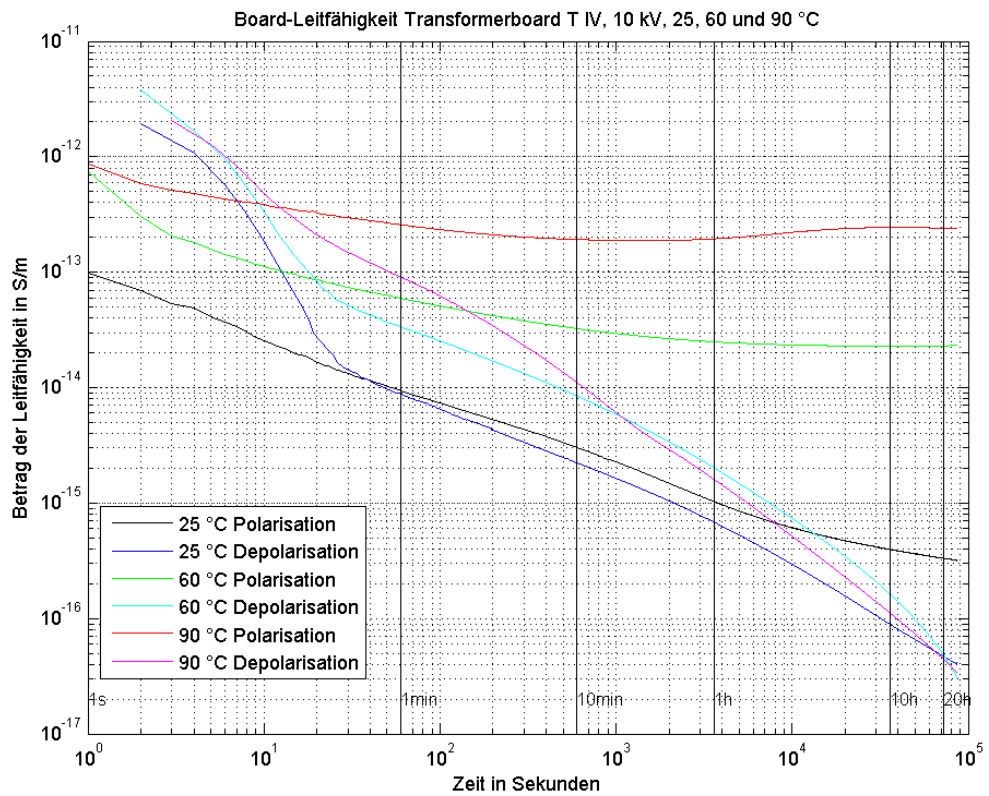


Abb. B.8: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T IV, 10 kV, 25, 60 und 90 °C

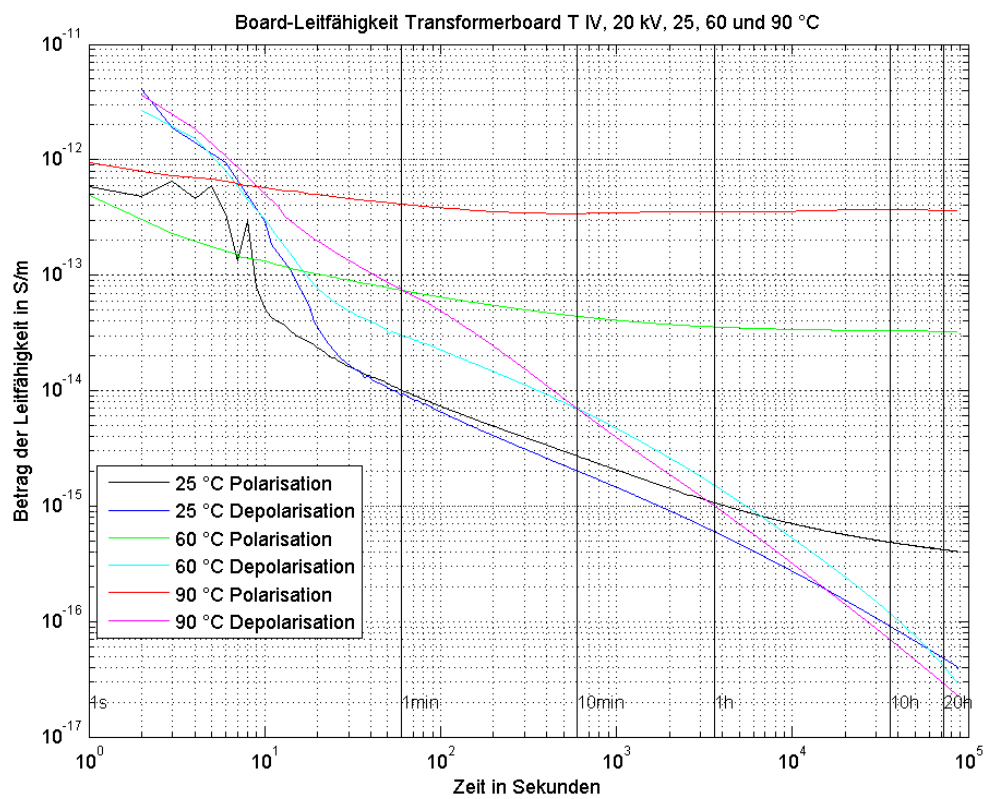


Abb. B.9: Board-Leitfähigkeit Transformerboard T IV, 20 kV, 25, 60 und 90 °C

### B3. Pressspan TD 12

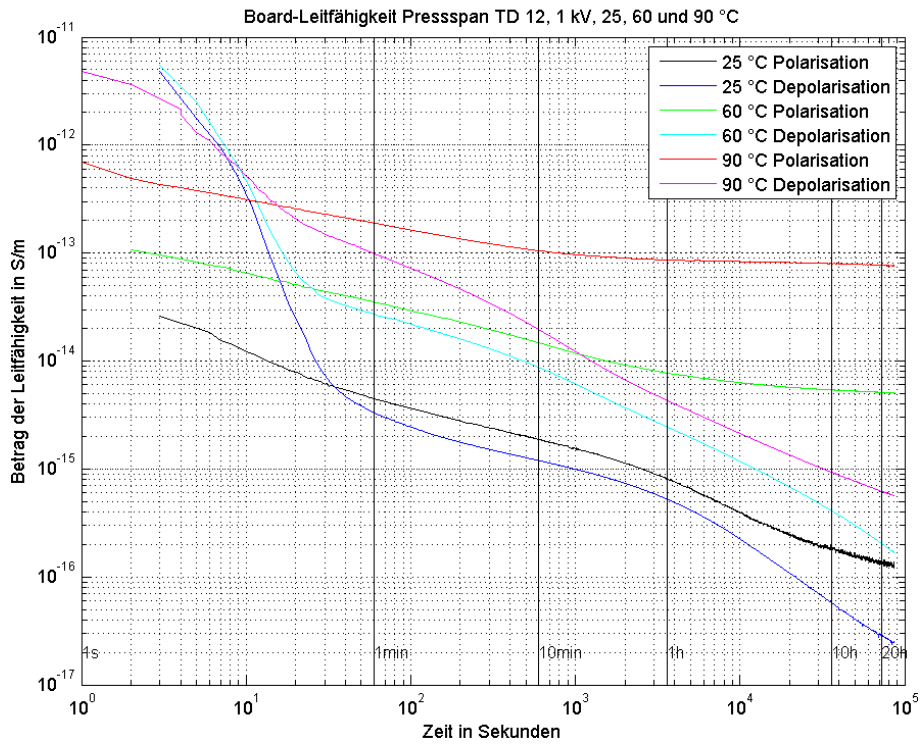


Abb. B.10: Board-Leitfähigkeit Pressspan TD 12, 1 kV, 25, 60 und 90 °C

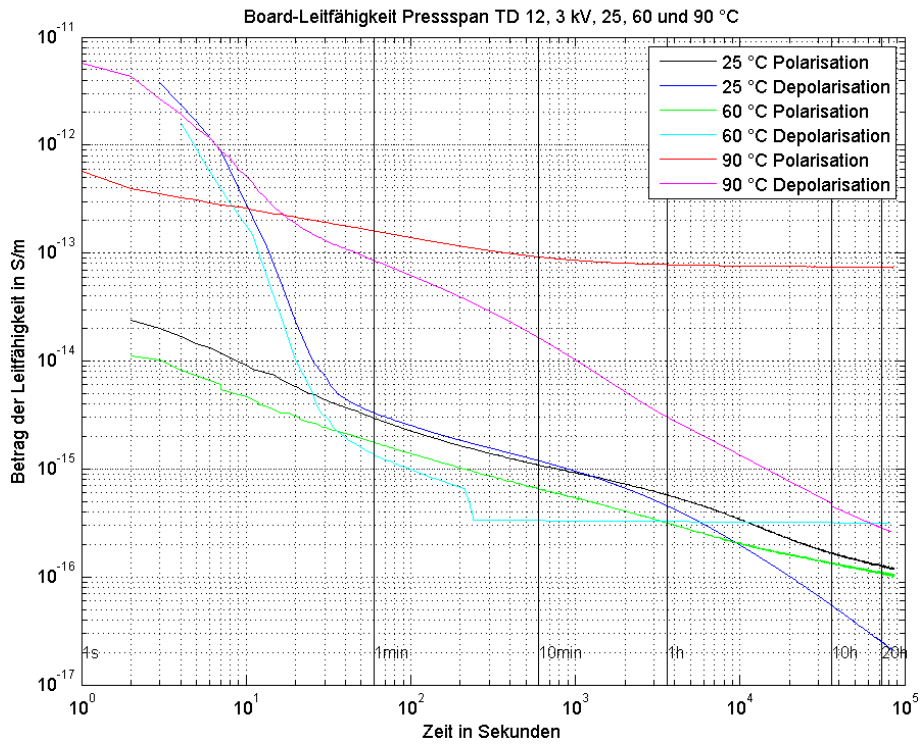


Abb. B.11: Board-Leitfähigkeit Pressspan TD 12, 3 kV, 25, 60 und 90 °C

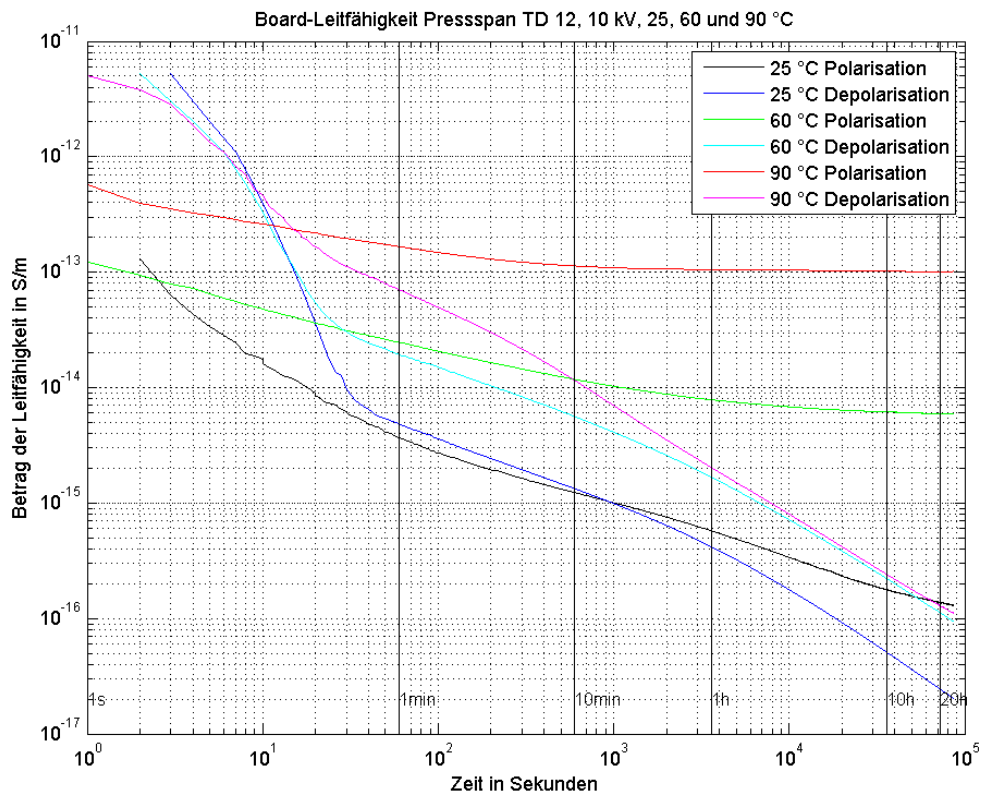


Abb. B.12: Board-Leitfähigkeit Pressspan TD 12, 10 kV, 25, 60 und 90 °C

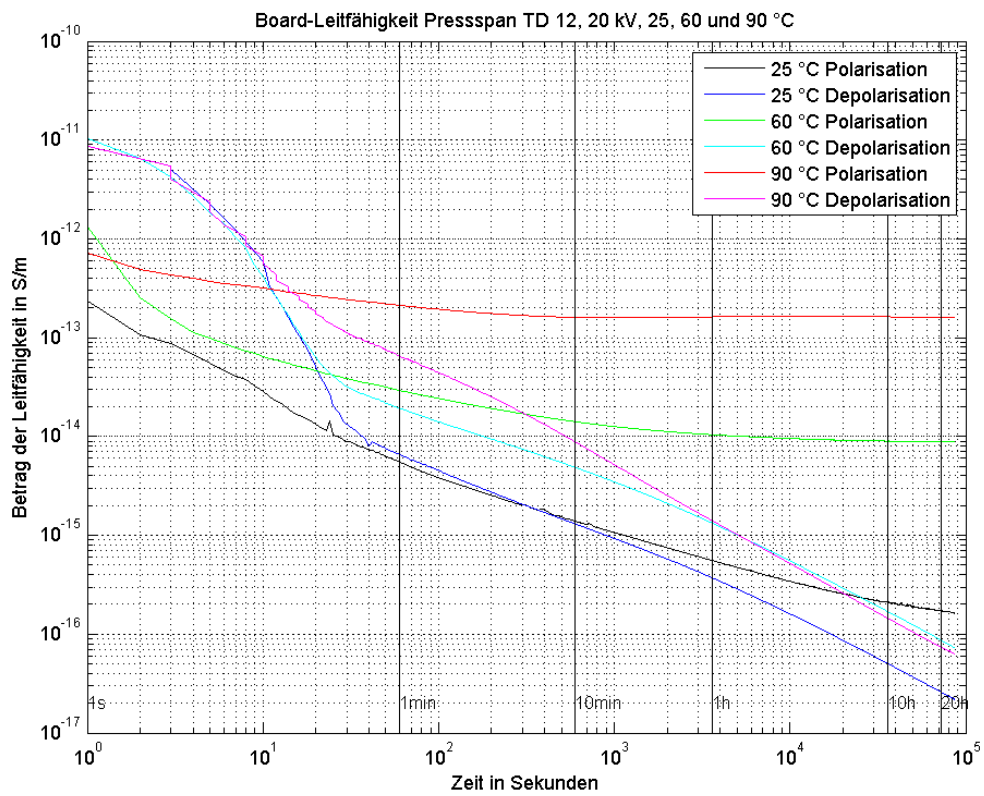


Abb. B.13: Board-Leitfähigkeit Pressspan TD 12, 20 kV, 25, 60 und 90 °C

### B4. Nomex Type 994

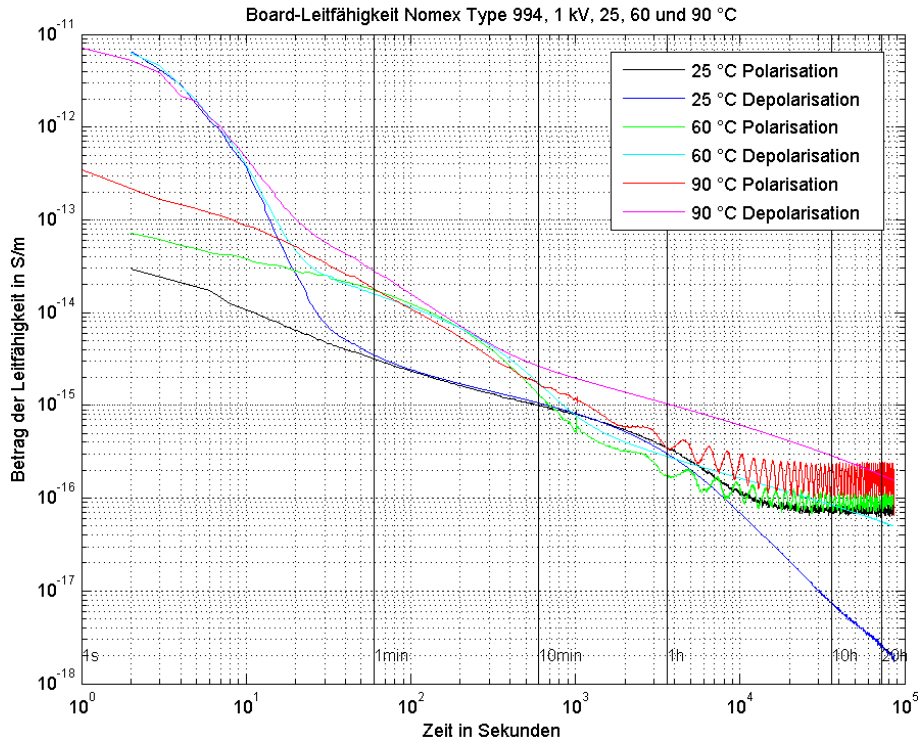


Abb. B.14: Board-Leitfähigkeit Nomex Type 994, 1 kV, 25, 60 und 90 °C

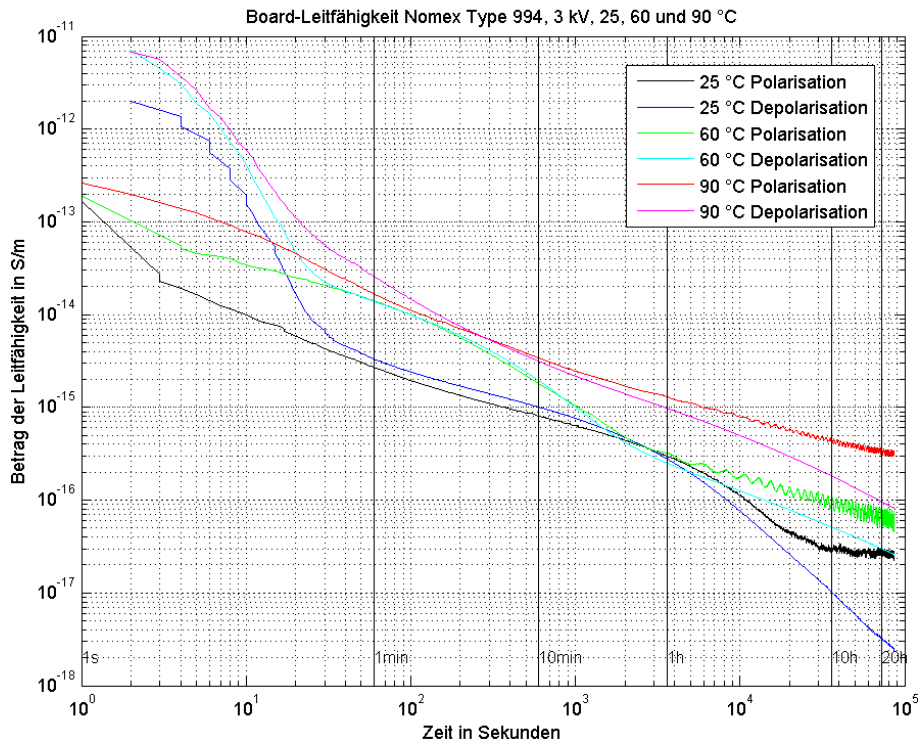


Abb. B.15: Board-Leitfähigkeit Nomex Type 994, 3 kV, 25, 60 und 90 °C

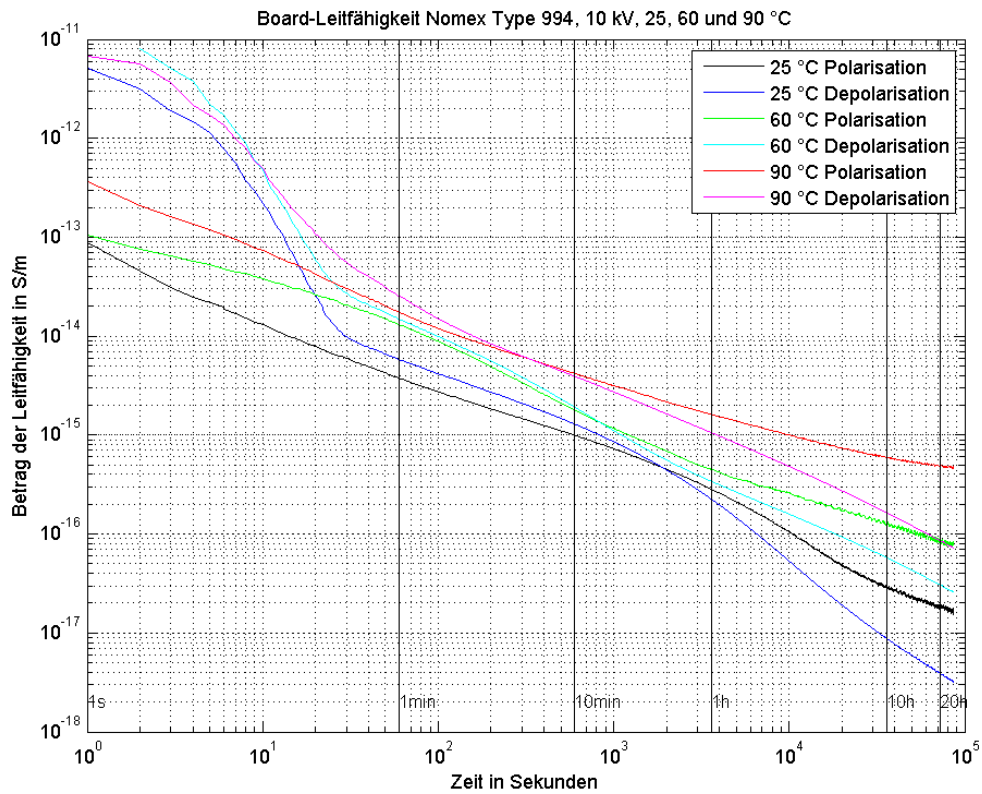


Abb. B.16: Board-Leitfähigkeit Nomex Type 994, 10 kV, 25, 60 und 90 °C

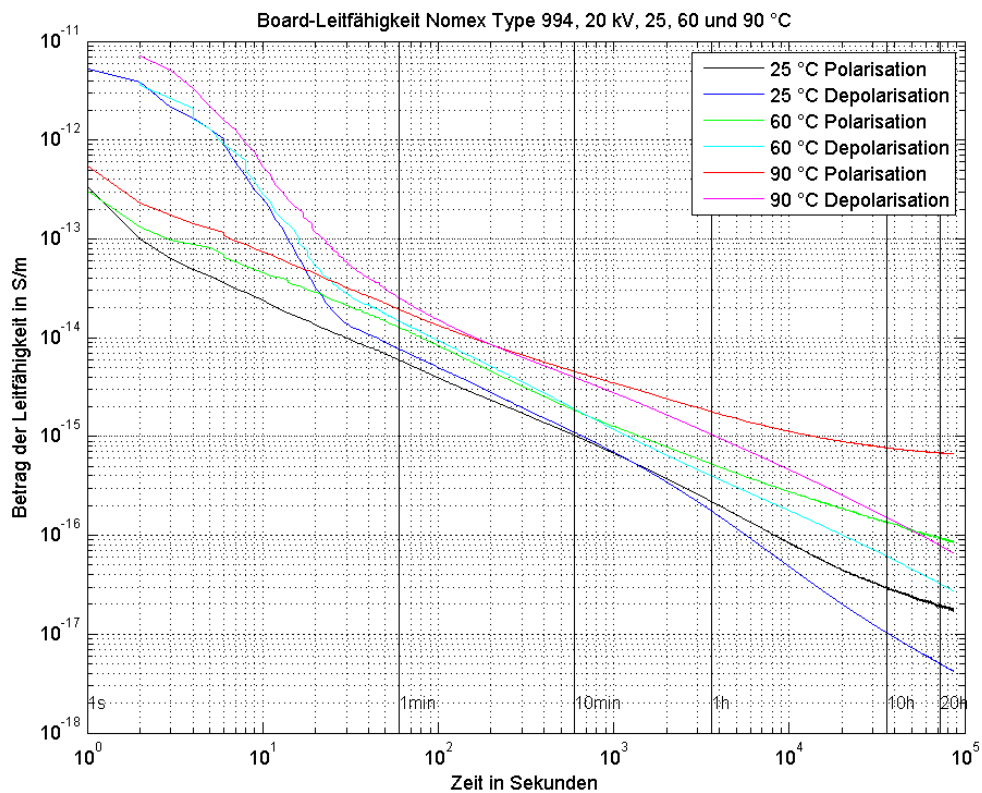


Abb. B.17: Board-Leitfähigkeit Nomex Type 994, 20 kV, 25, 60 und 90 °C



# Anhang C: Teilentladungsmessungen unter Isolieröl

## C1. Hohe Wechselspannung

In Abb. C.1 ist die Prüfmatrix für die Versuche mit reinem mineralischen Isolieröl unter Wechselspannungsbeanspruchung grafisch dargestellt.

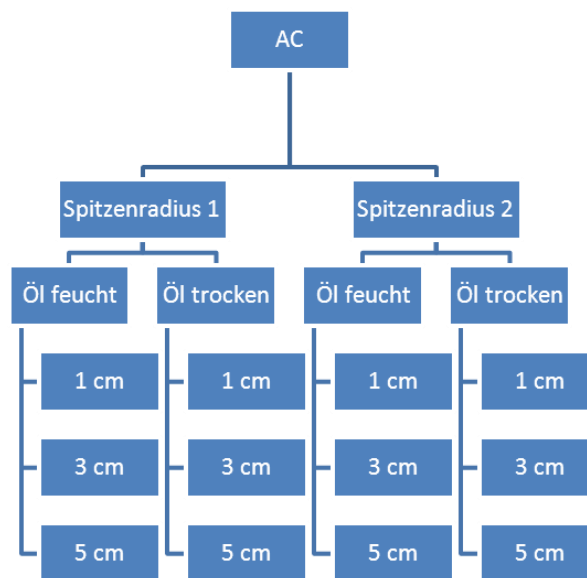


Abb. C.1: Prüfmatrix zur Teilentladungsmessung an reinem mineralischen Isolieröl unter Wechselspannungsbeanspruchung

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Anzahl der Teilentladungen sowie der NQS-Wert in Diagrammen über der Zeit dargestellt. Im Falle der Wechselspannungsbeanspruchung wurden die so genannten „Fingerprints“ über der Phase aufgenommen und zu Vergleichszwecken mit dem 5-Minutenwert der Gleichspannungsbeanspruchung ausgewertet.

Die Spitzenradien der Nadeln sind Anhang E zu entnehmen, in welchem sich auch die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen des Topologie- und Materialkontrasts der Nadeln befinden.

AC / 5 cm / Öl trocken / Nadel 20

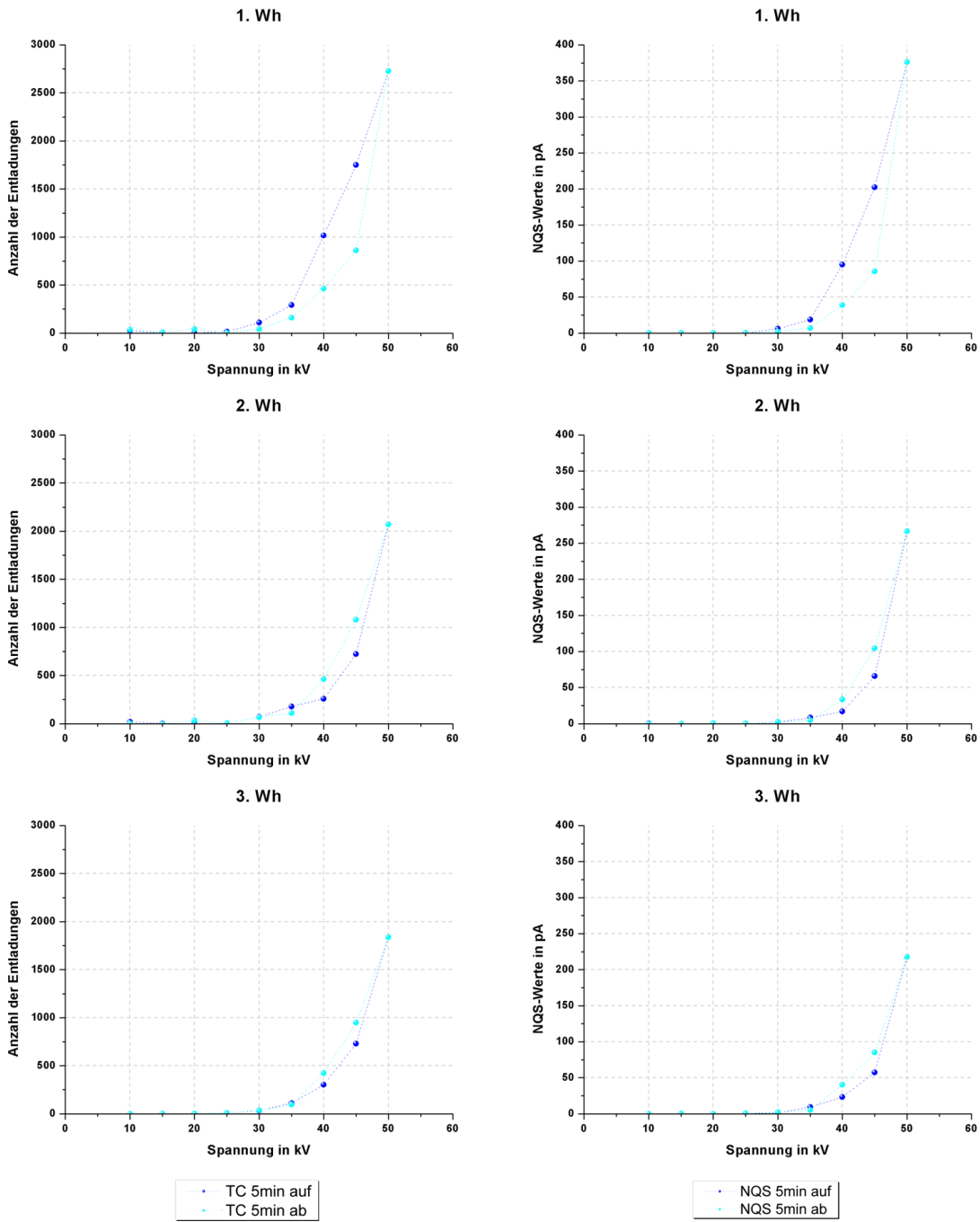


Abb. C.2: AC, 5 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 20



AC / 3 cm / Öl trocken / Nadel 20

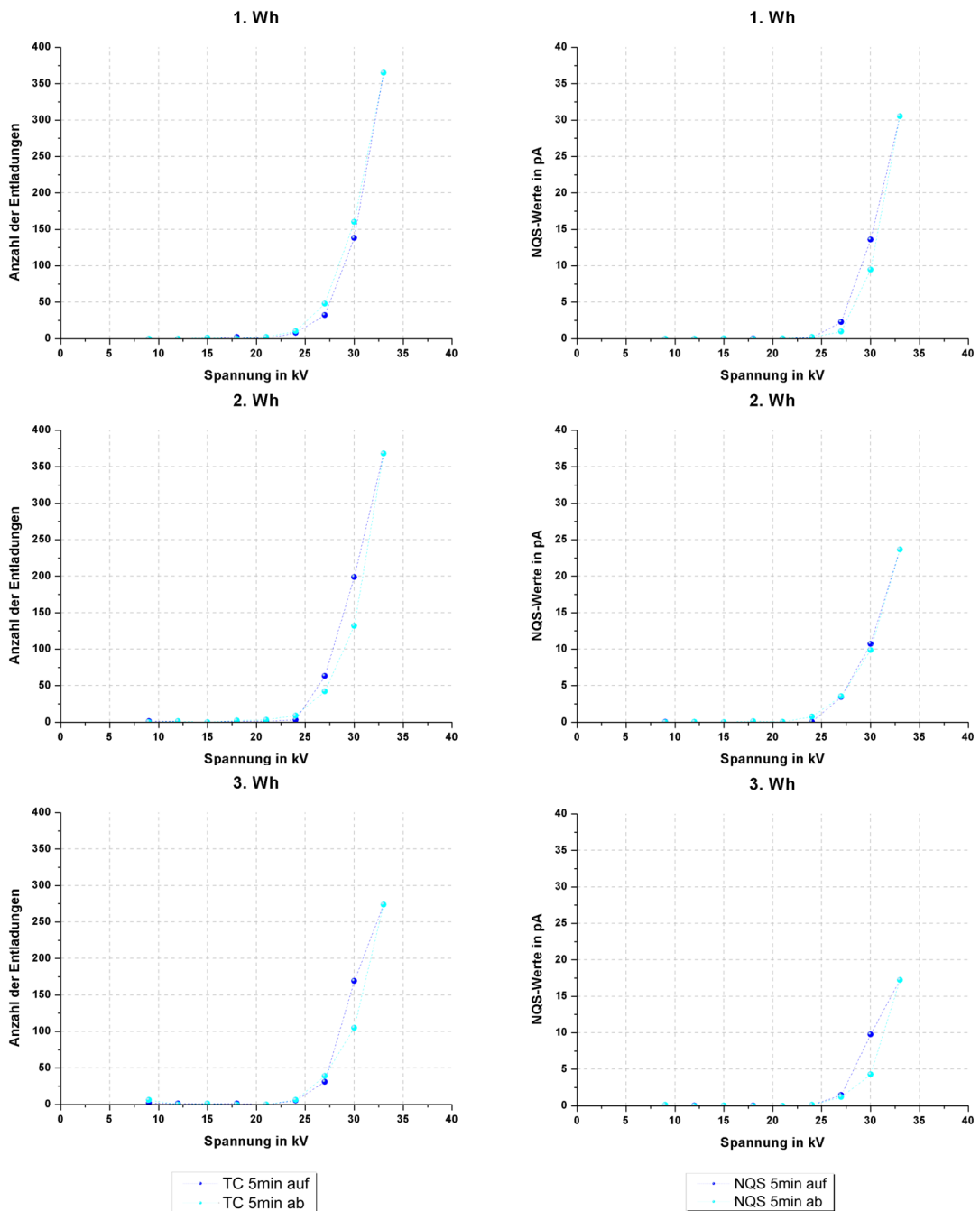


Abb. C.3: AC, 3 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 20

AC / 1 cm / Öl trocken / Nadel 20

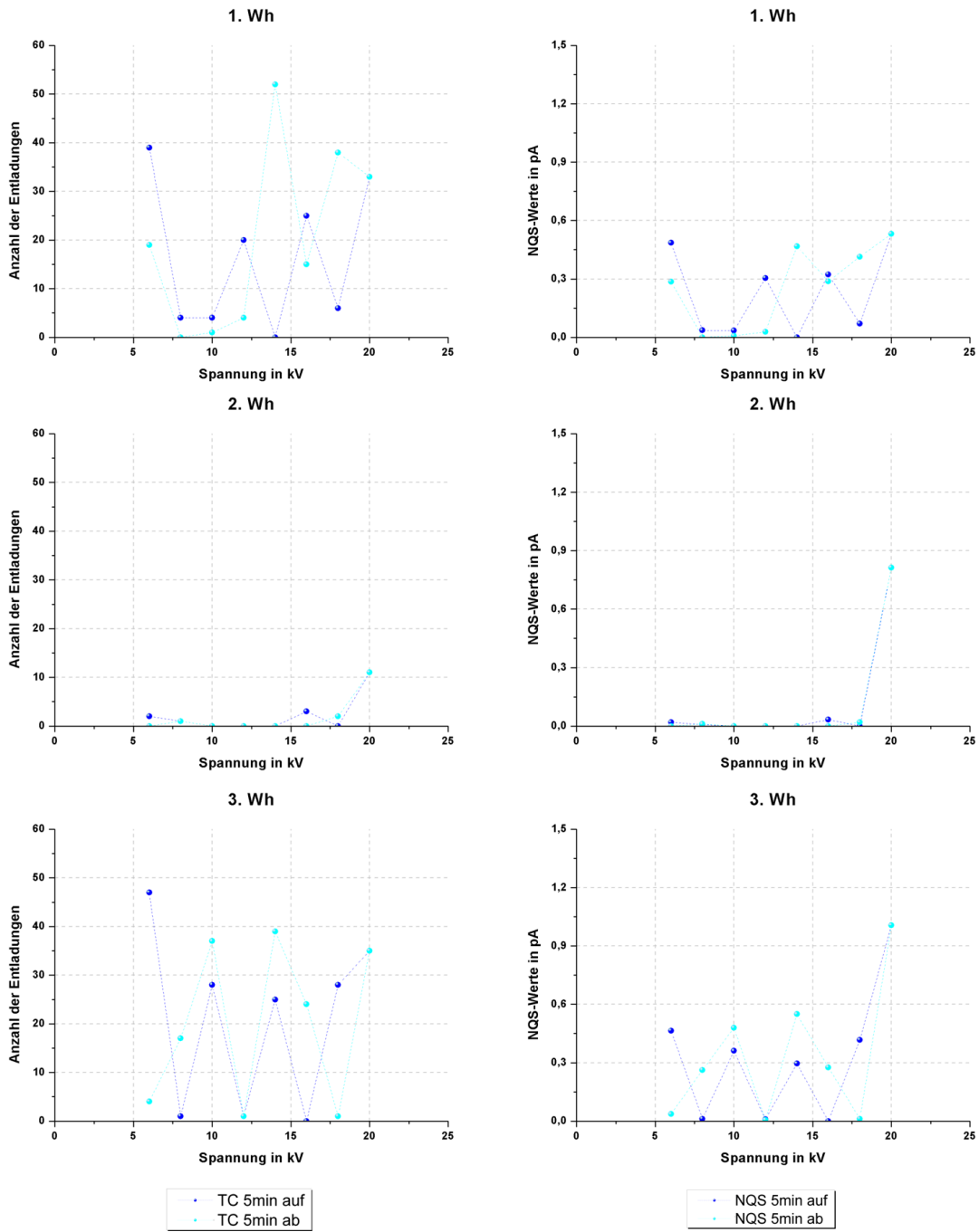


Abb. C.4: AC, 1 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 20

### AC / 5 cm / Öl feucht / Nadel 21

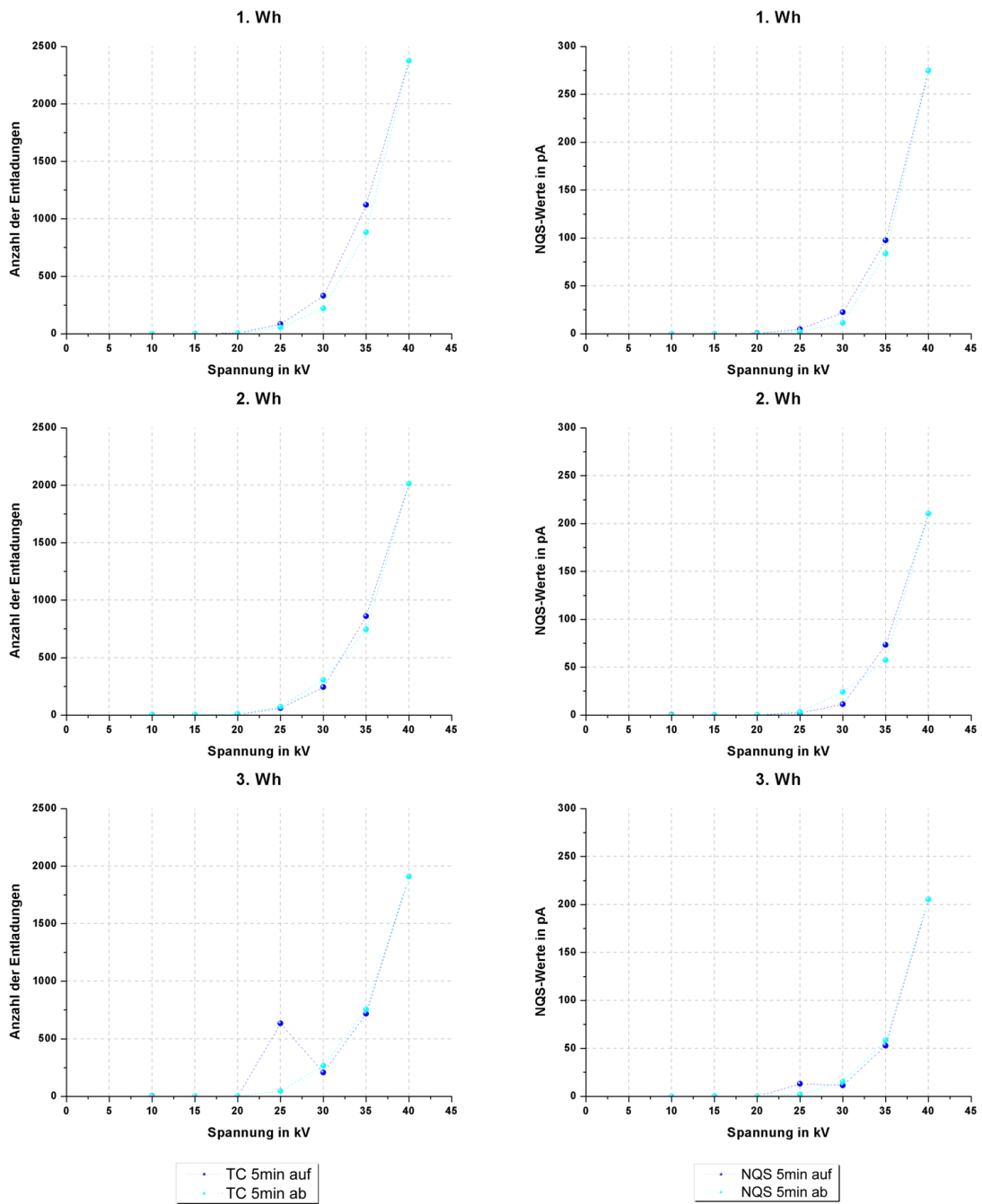


Abb. C.5: AC, 5 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 21

AC / 3 cm / Öl feucht / Nadel 21

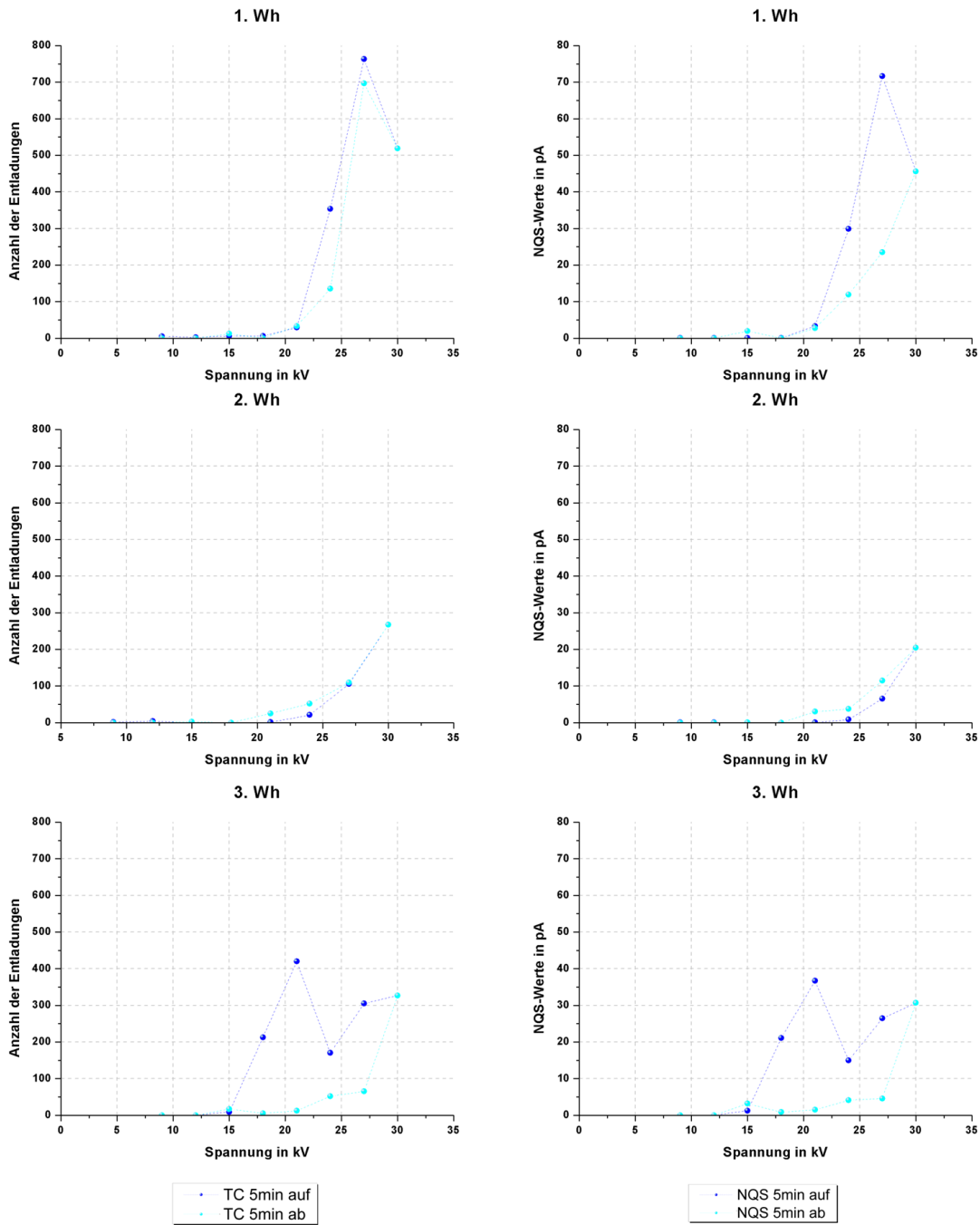


Abb. C.6: AC, 3 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 21

### AC / 1 cm / Öl feucht / Nadel 21

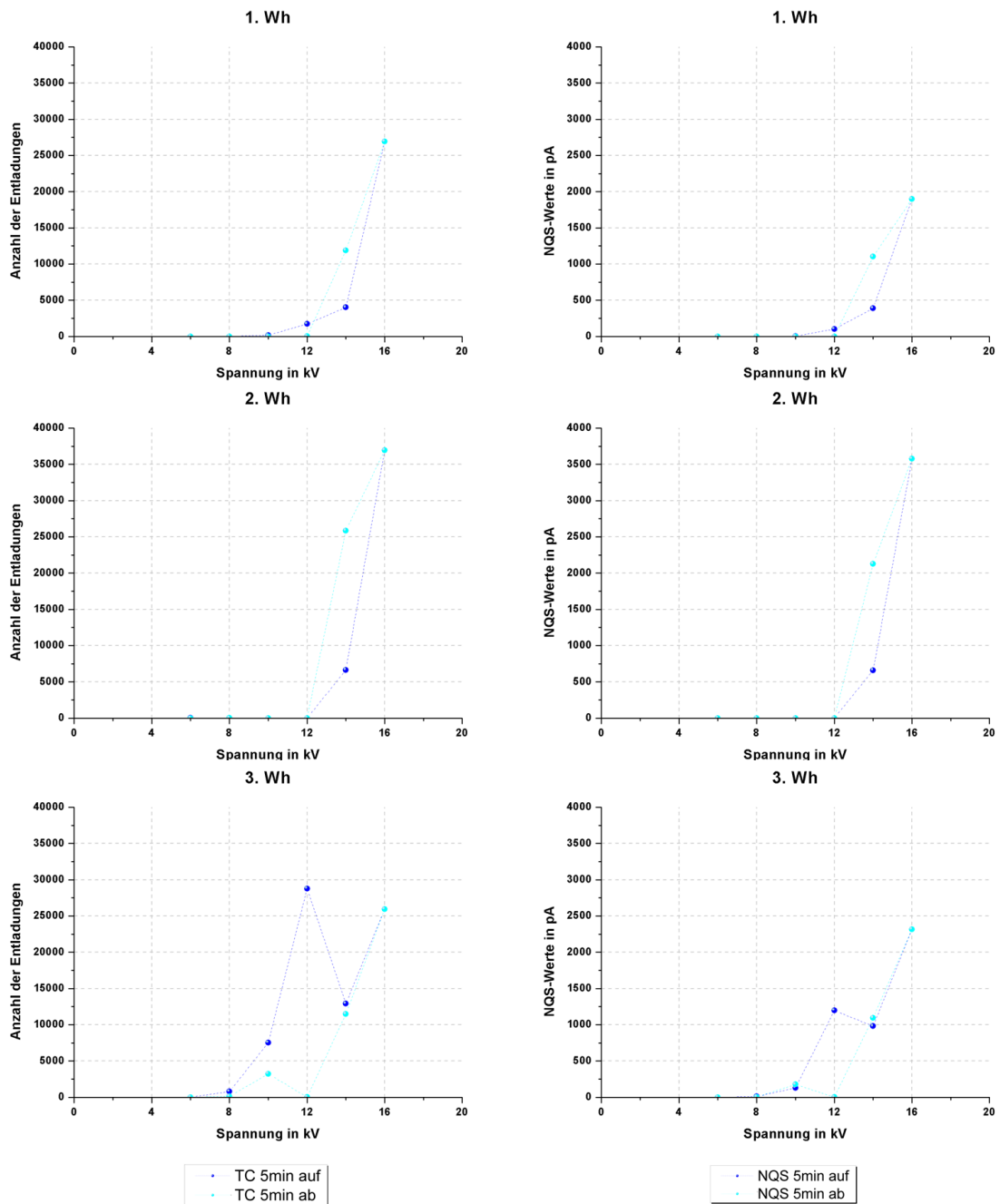


Abb. C.7: AC, 1 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 21

## C2. Hohe Gleichspannung

In Abb. C.8 ist die Prüfmatrix für die Versuche für reines mineralisches Isolieröl unter Gleichspannungsbeanspruchung grafisch dargestellt.

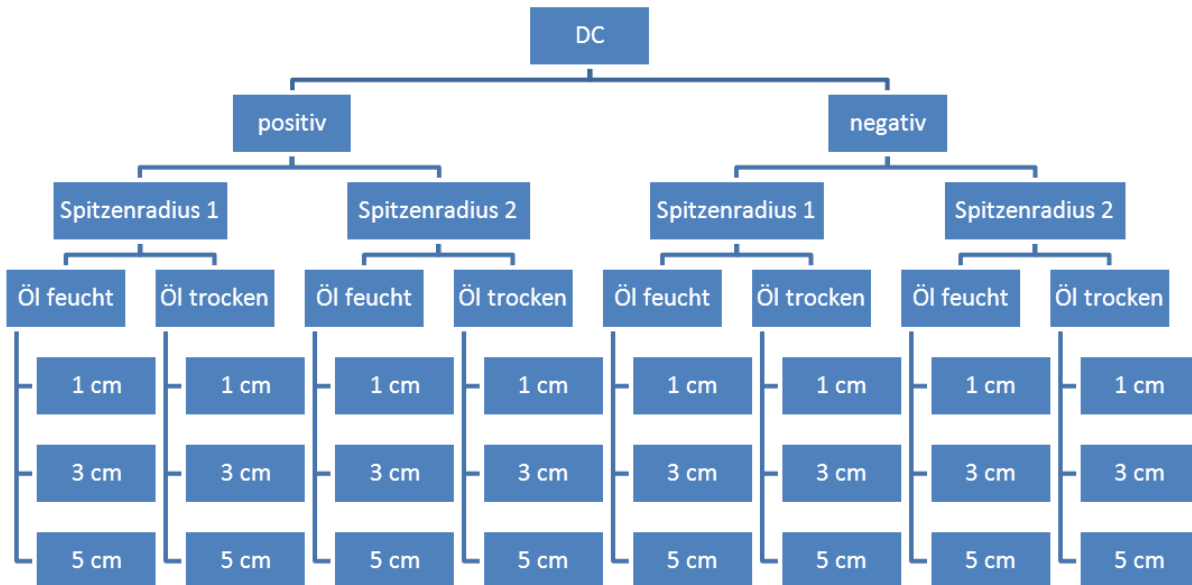


Abb. C.8: Prüfmatrix zur Teilentladungsmessung an reinem mineralischen Isolieröl unter Gleichspannungsbeanspruchung

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Anzahl der Teilentladungen sowie der NQS-Wert in Diagrammen über die Zeit dargestellt. Im Falle der Gleichspannungsbeanspruchung wurden die so genannten „Fingerprints“ über die Zeit aufgenommen und weiters als 1-, 3- und 5-Minutenwert ausgewertet.

DC+ / 2. Durchgang / 5 cm / Öl trocken / Nadel 4

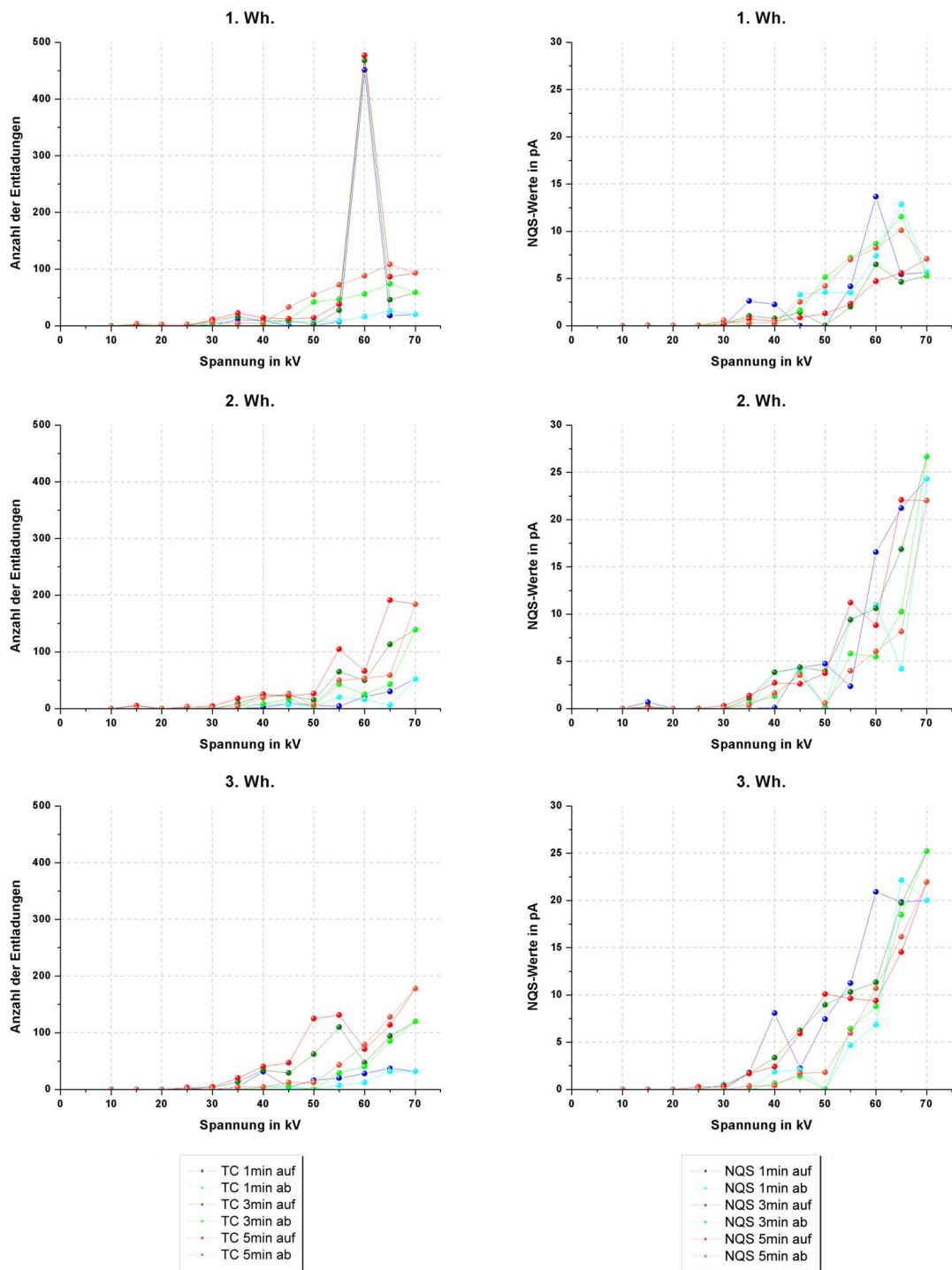


Abb. C.9: DC positive Polarität, 5 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 4

DC+ / 2. Durchgang / 3 cm / Öl trocken / Nadel 5

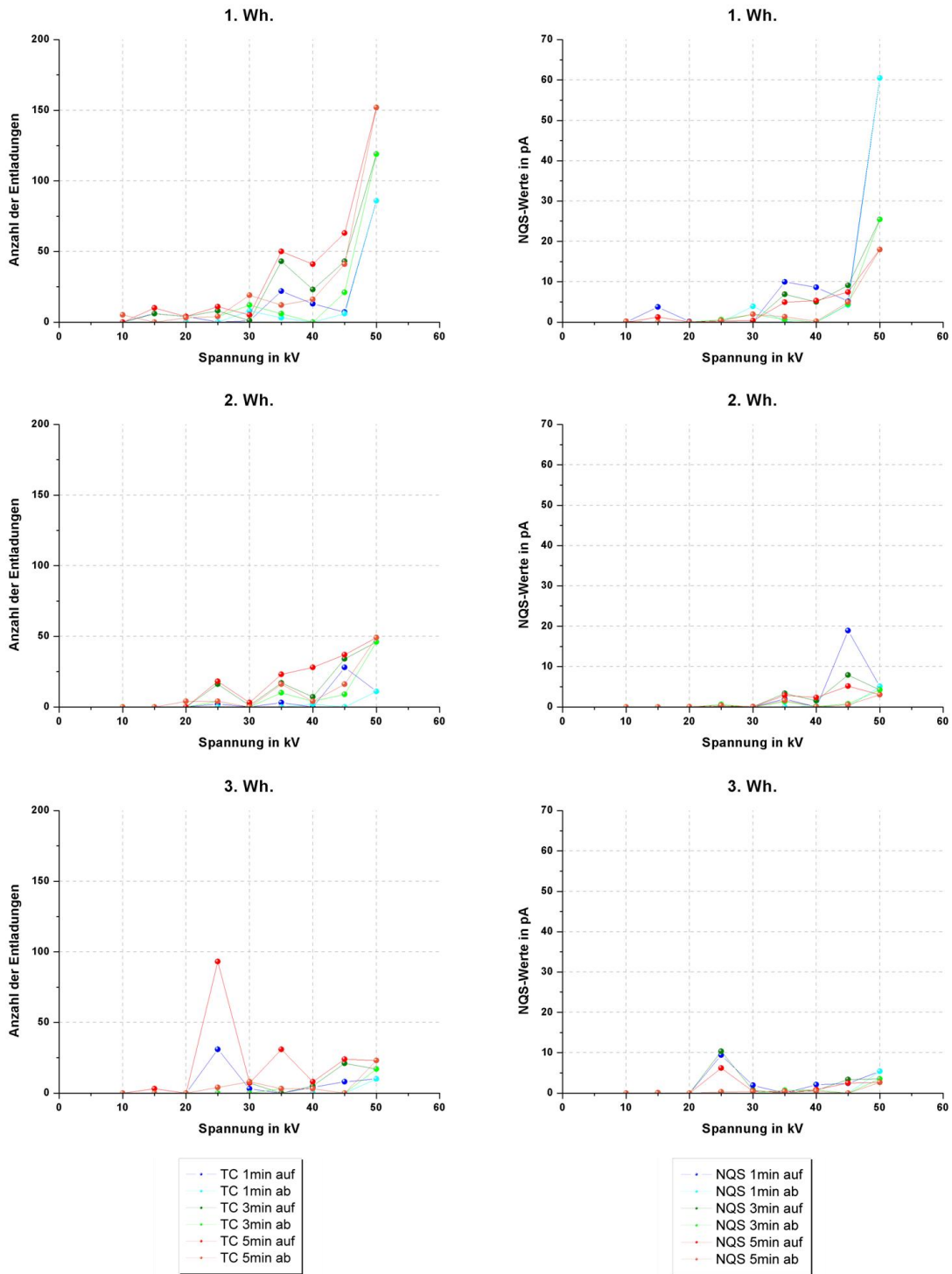


Abb. C.10: DC positive Polarität, 3 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 5



DC+ / 2. Durchgang / 1 cm / Öl trocken / Nadel 6

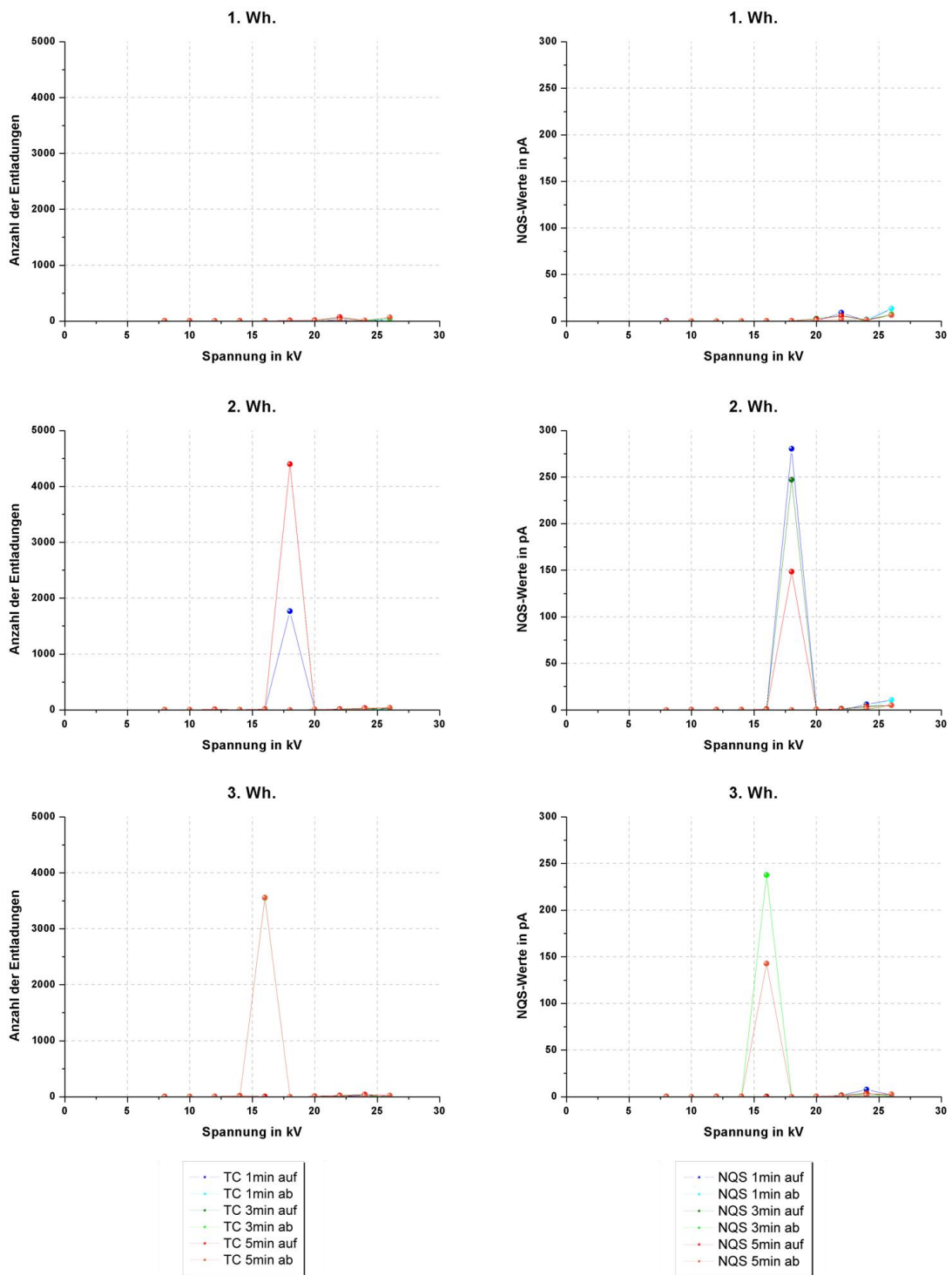


Abb. C.11: DC positive Polarität, 1 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 6

DC+ / 2. Durchgang / 5 cm / Öl feucht / Nadel 4

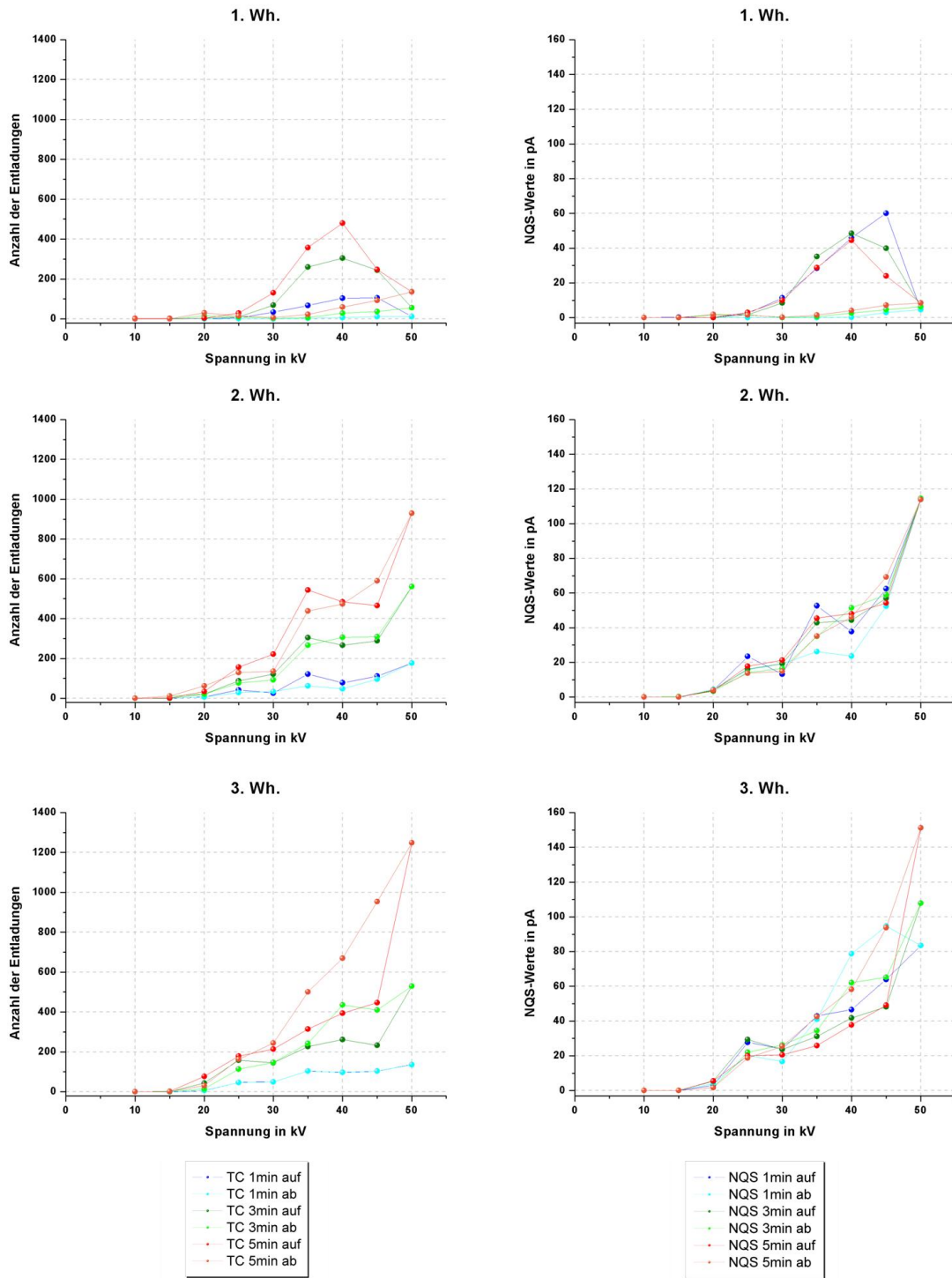


Abb. C.12: DC positive Polarität, 5 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 4

DC+ / 2. Durchgang / 3 cm / Öl feucht / Nadel 5

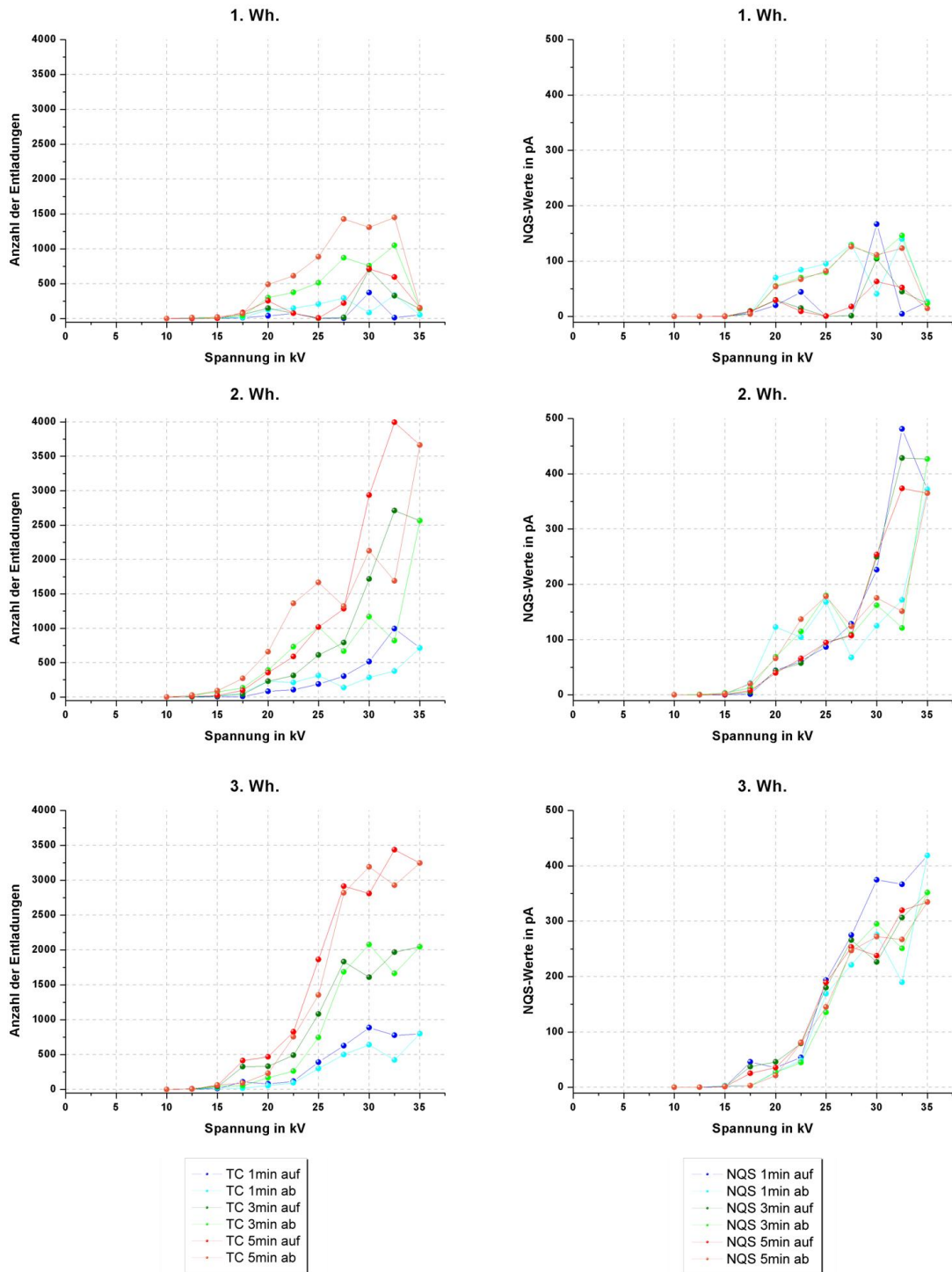


Abb. C.13: DC positive Polarität, 3 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 5

DC+ / 2. Durchgang / 1 cm / Öl feucht / Nadel 6

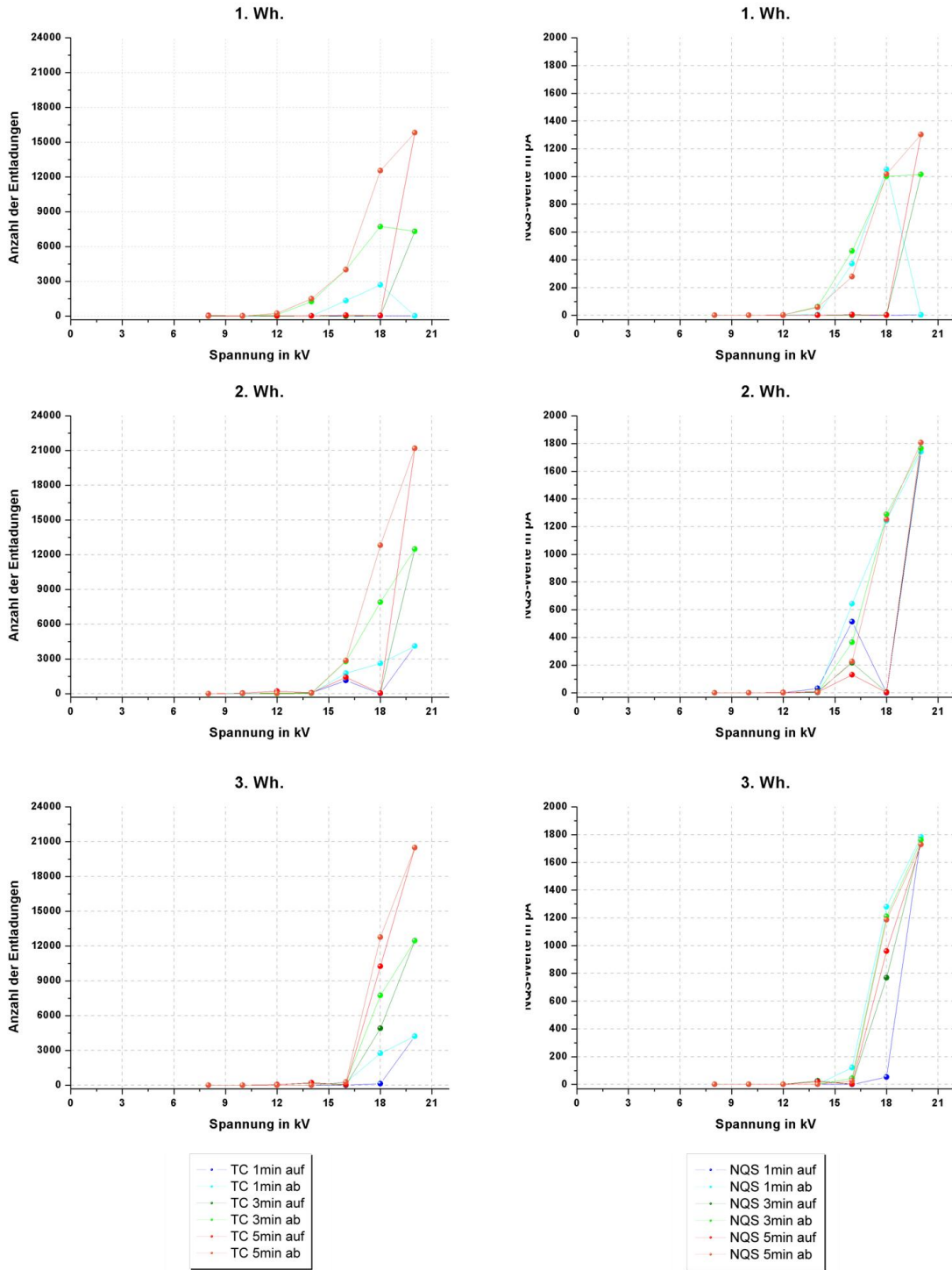


Abb. C.14: DC positive Polarität, 1 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 6

DC- / 2. Durchgang / 5 cm / Öl trocken / Nadel 4

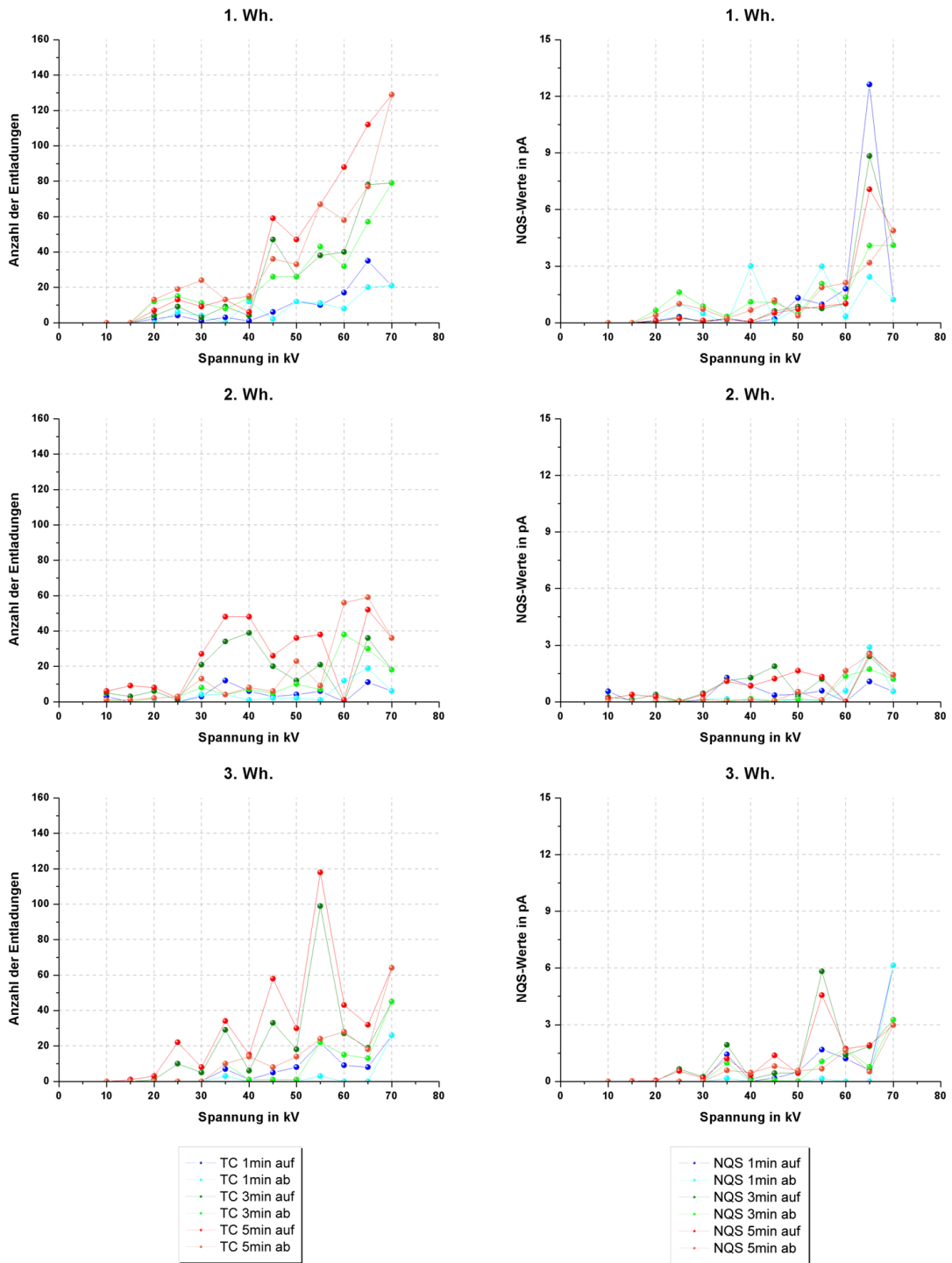


Abb. C.15: DC negative Polarität, 5 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 4

DC- / 2. Durchgang / 3 cm / Öl trocken / Nadel 5

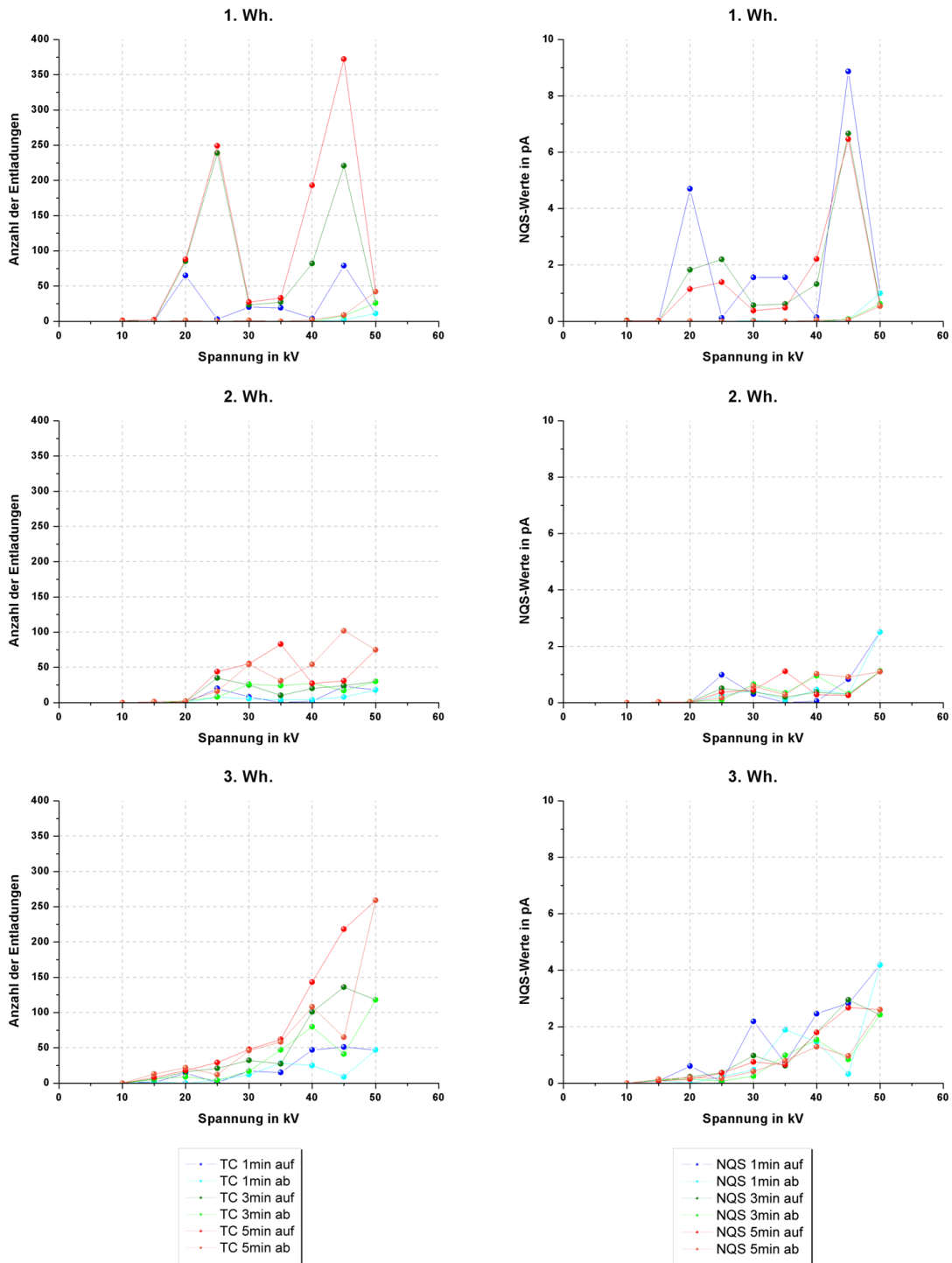


Abb. C.16: DC negative Polarität, 3 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 5

DC- / 2. Durchgang / 1 cm / Öl trocken / Nadel 6

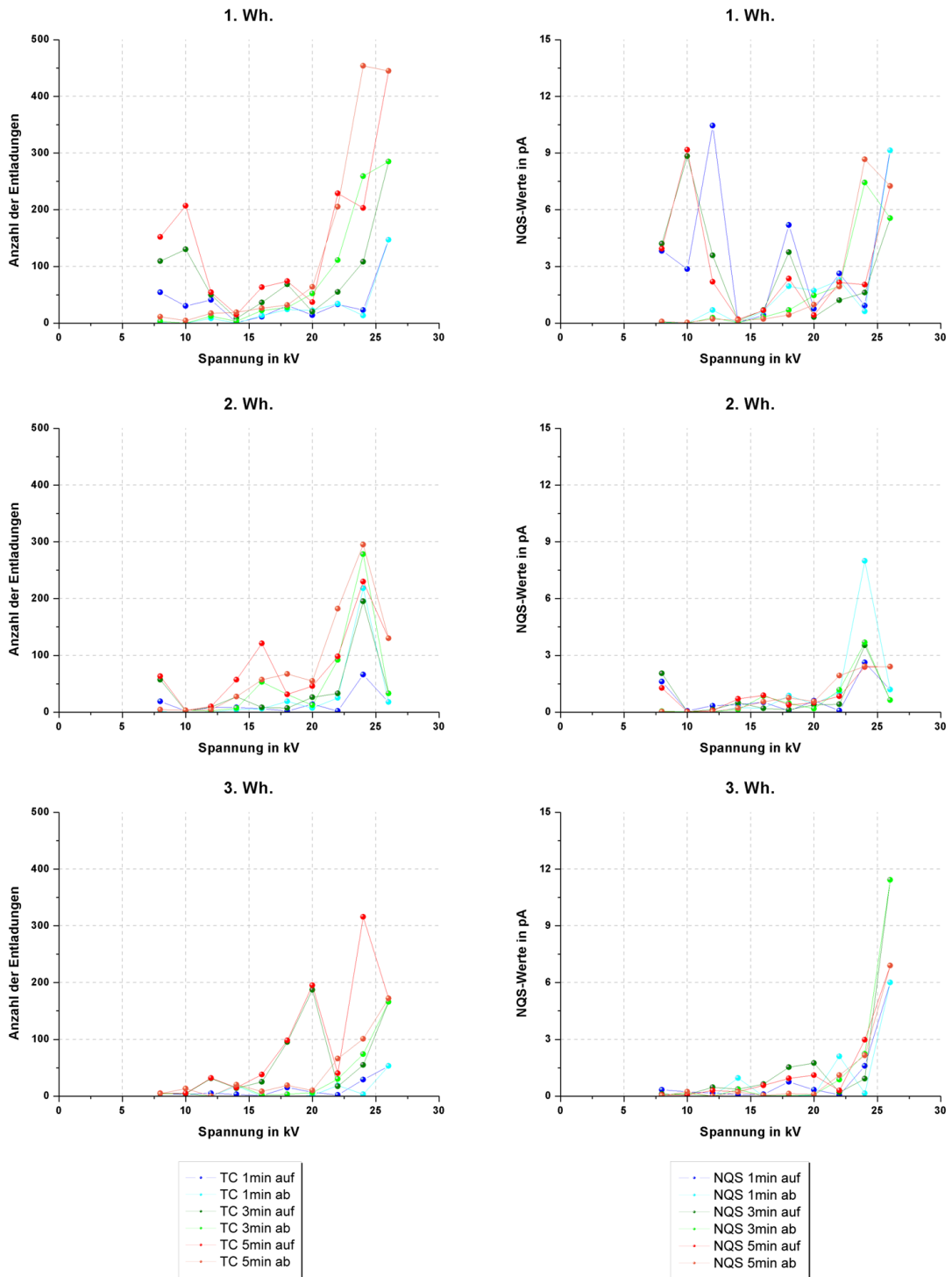


Abb. C.17: DC negative Polarität, 1 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 6

DC- / 2. Durchgang / 5 cm / Öl feucht / Nadel 4

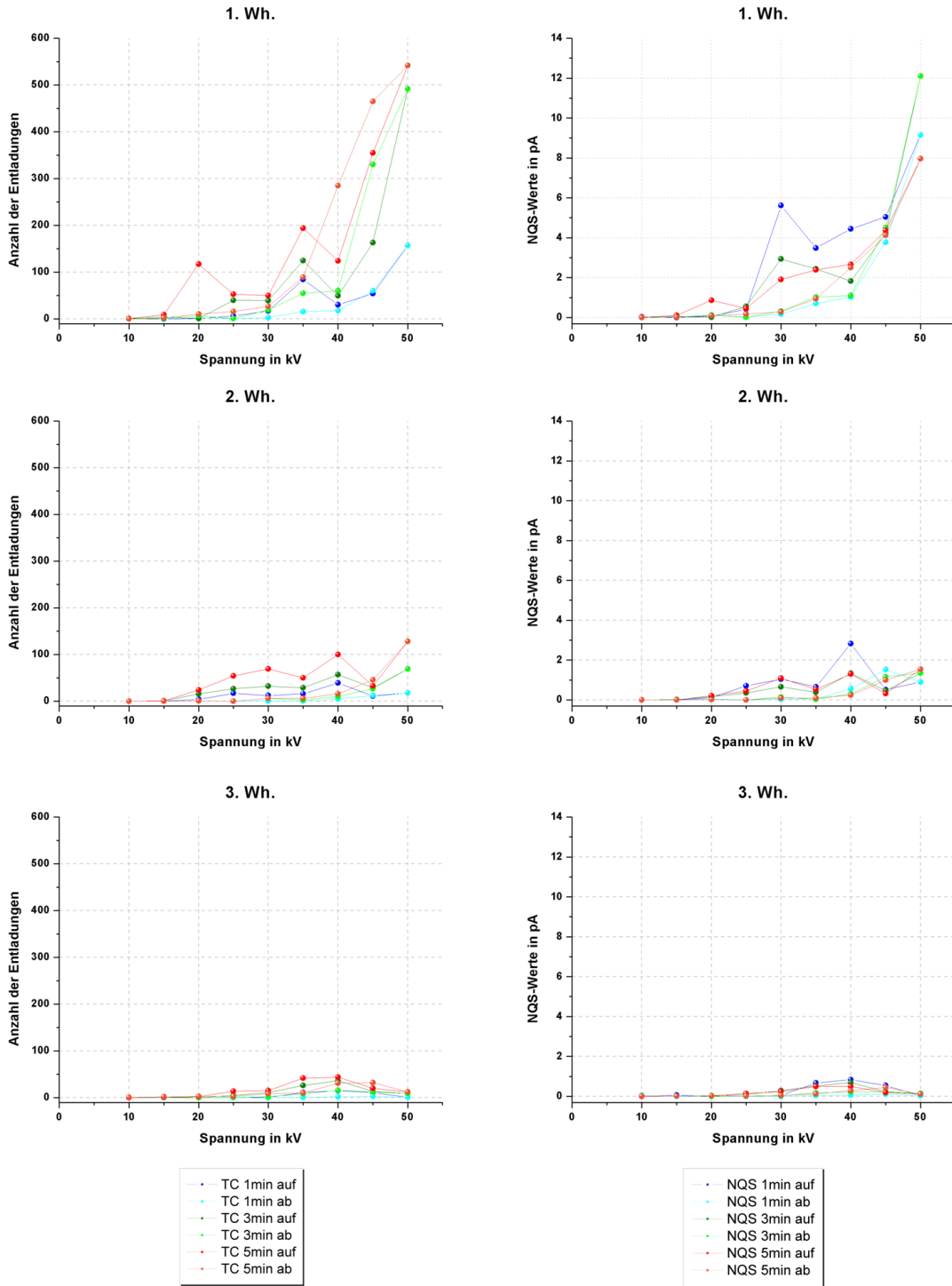


Abb. C.18: DC negative Polarität, 5 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 4



DC- / 2. Durchgang / 3 cm / Öl feucht / Nadel 5

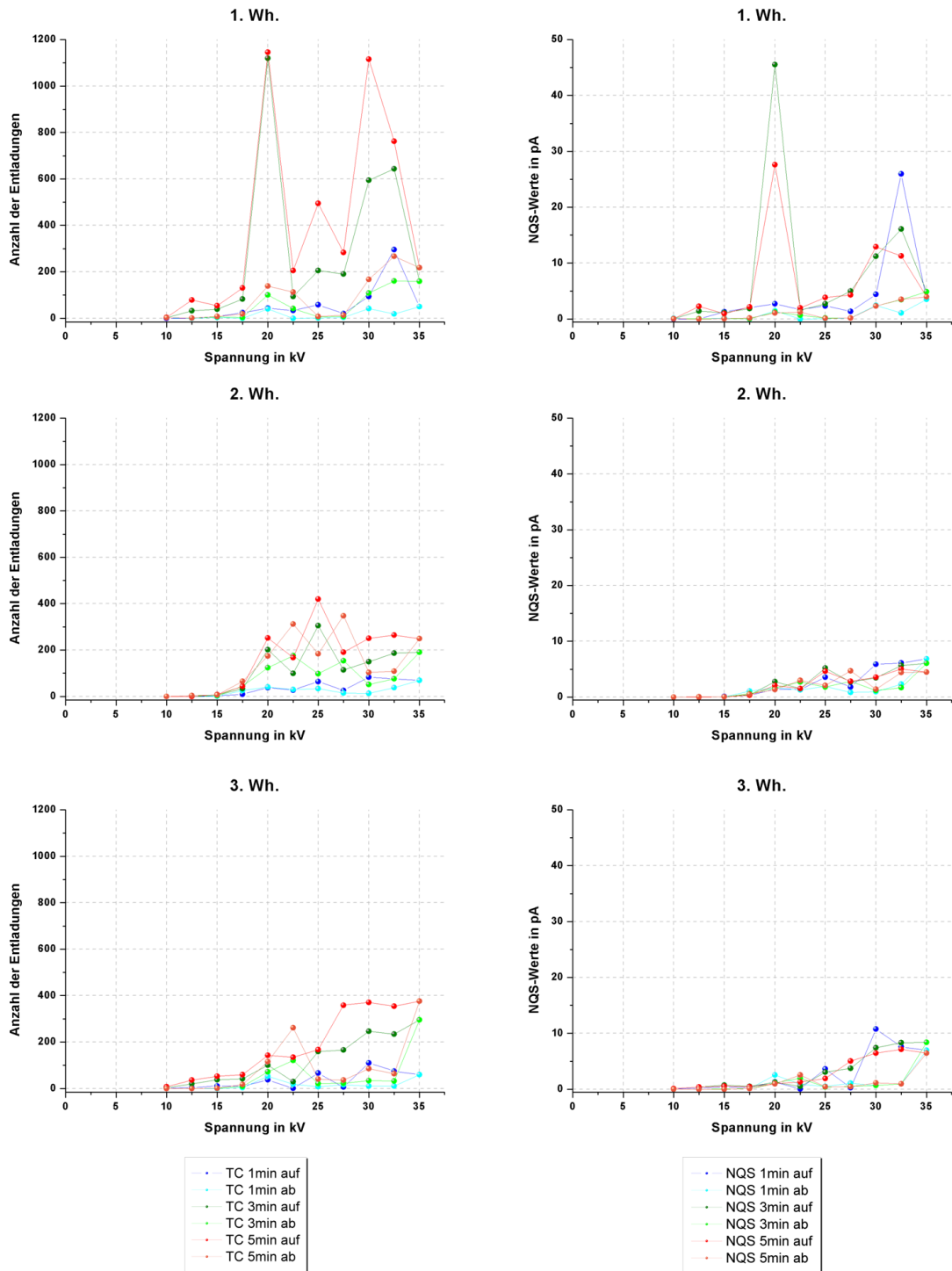


Abb. C.19: DC negative Polarität, 3 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 5

DC- / 2. Durchgang / 1 cm / Öl feucht / Nadel 6

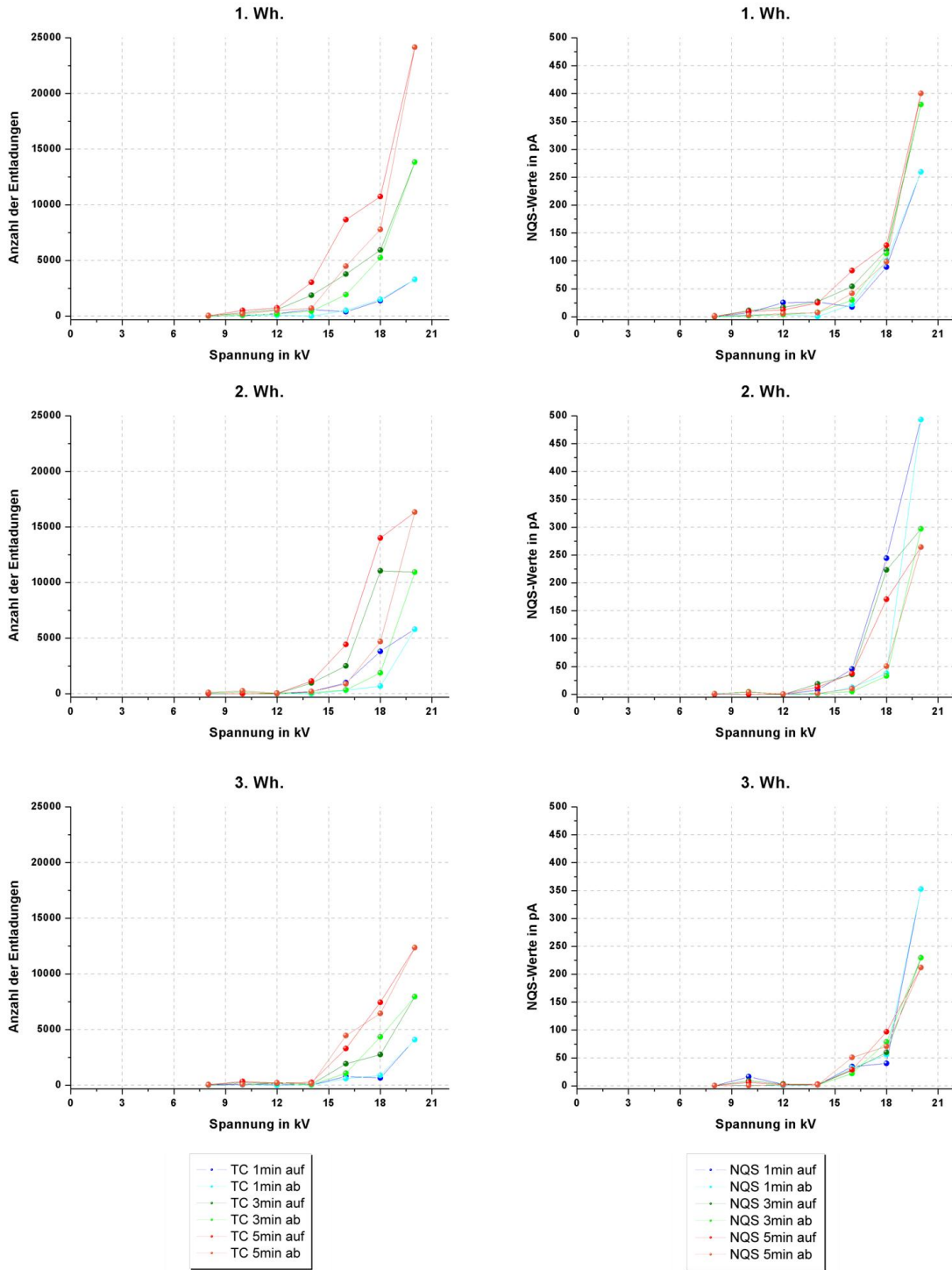


Abb. C.20: DC negative Polarität, 1 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 6

# Anhang D: Teilentladungsmessungen Öl-Board-Gleitanordnung

## D1. Hohe Wechselspannung

In Abb. D.1 ist die Prüfmatrix für die Versuche mit der Öl-Board-Gleitanordnung unter Wechselspannungsbeanspruchung grafisch dargestellt.

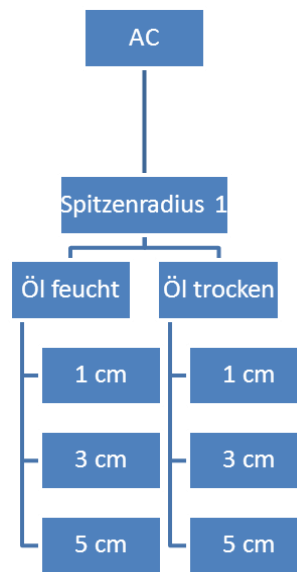


Abb. D.1: Prüfmatrix zur Teilentladungsmessung mit der Öl-Board-Gleitanordnung unter Wechselspannungsbeanspruchung

Für die Öl-Board-Gleitanordnung wurde in weiterer Folge auf eine Variation des Spitzenradius der Nadel verzichtet. Eine Auswertung der Teilentladungsdiagramme erfolgte analog Anhang C1. als 5-Minutenwert.

AC / Öl-Board-Gleitanordnung / 5 cm / Öl trocken / Nadel 13

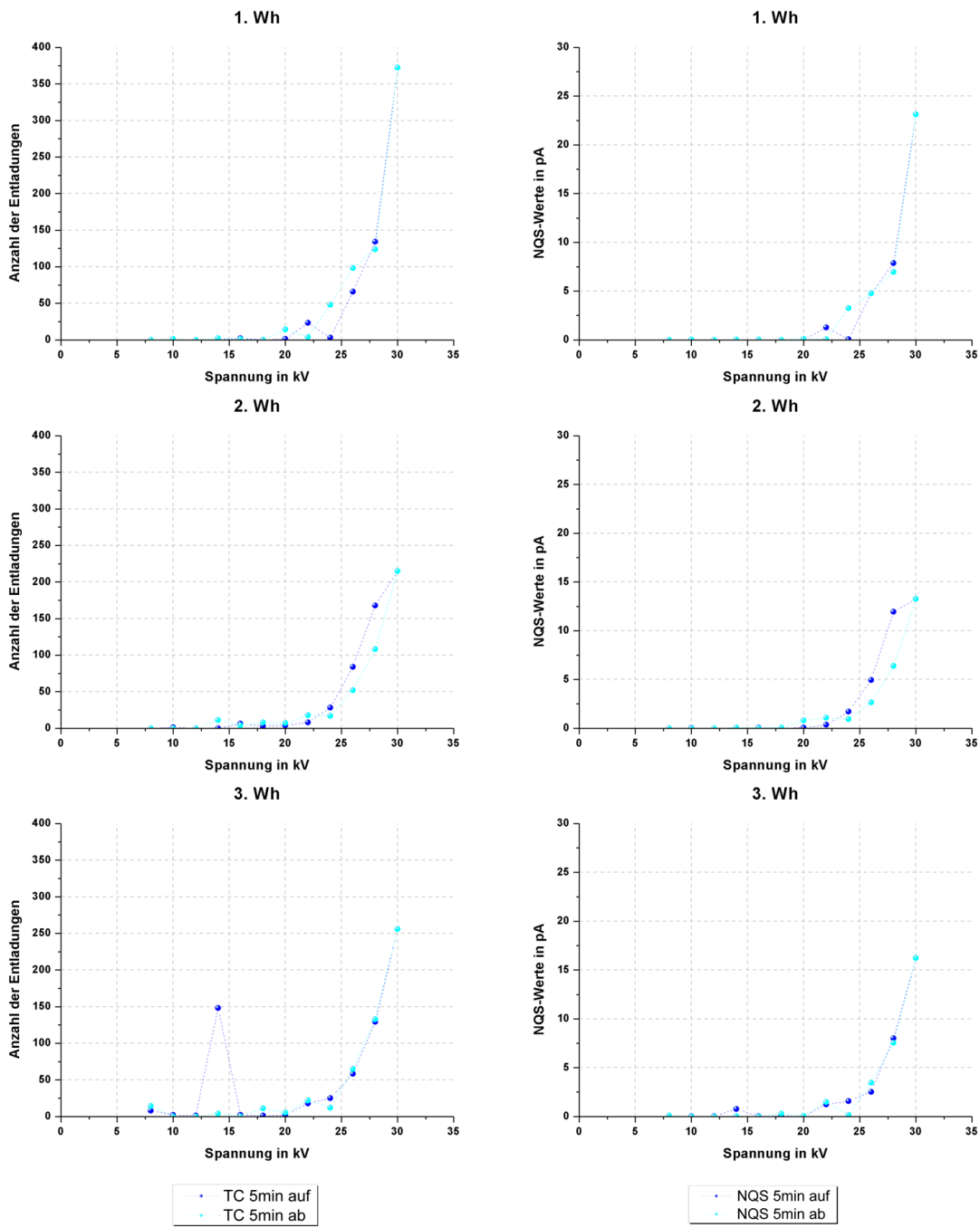


Abb. D.2: AC, Board-Gleitanordnung, 5 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 13

AC / Öl-Board-Gleitanordnung / 3 cm / Öl trocken / Nadel 13

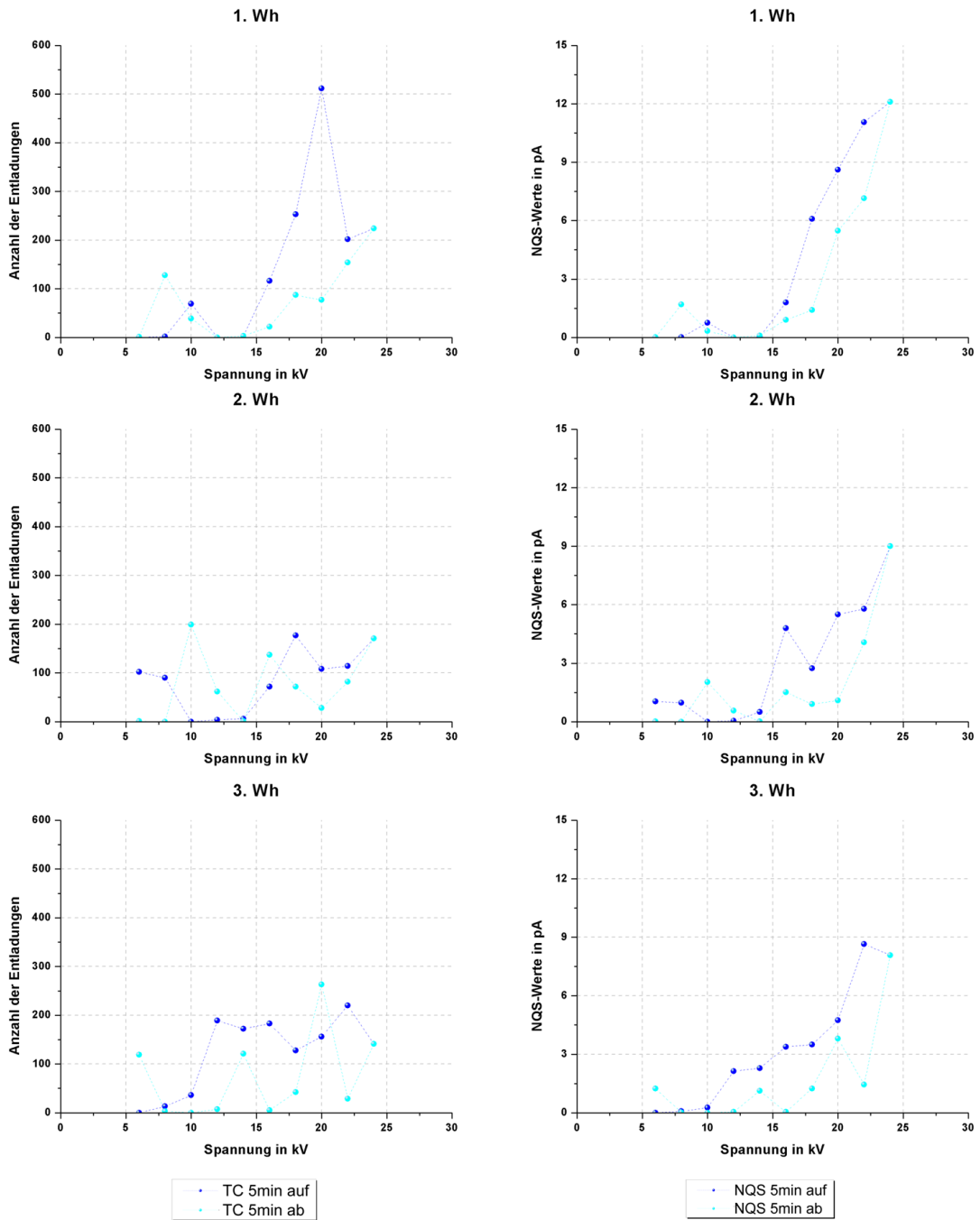


Abb. D.3: AC, Board-Gleitanordnung, 3 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 13

AC / Öl-Board-Gleitanordnung / 1 cm / Öl trocken / Nadel 13

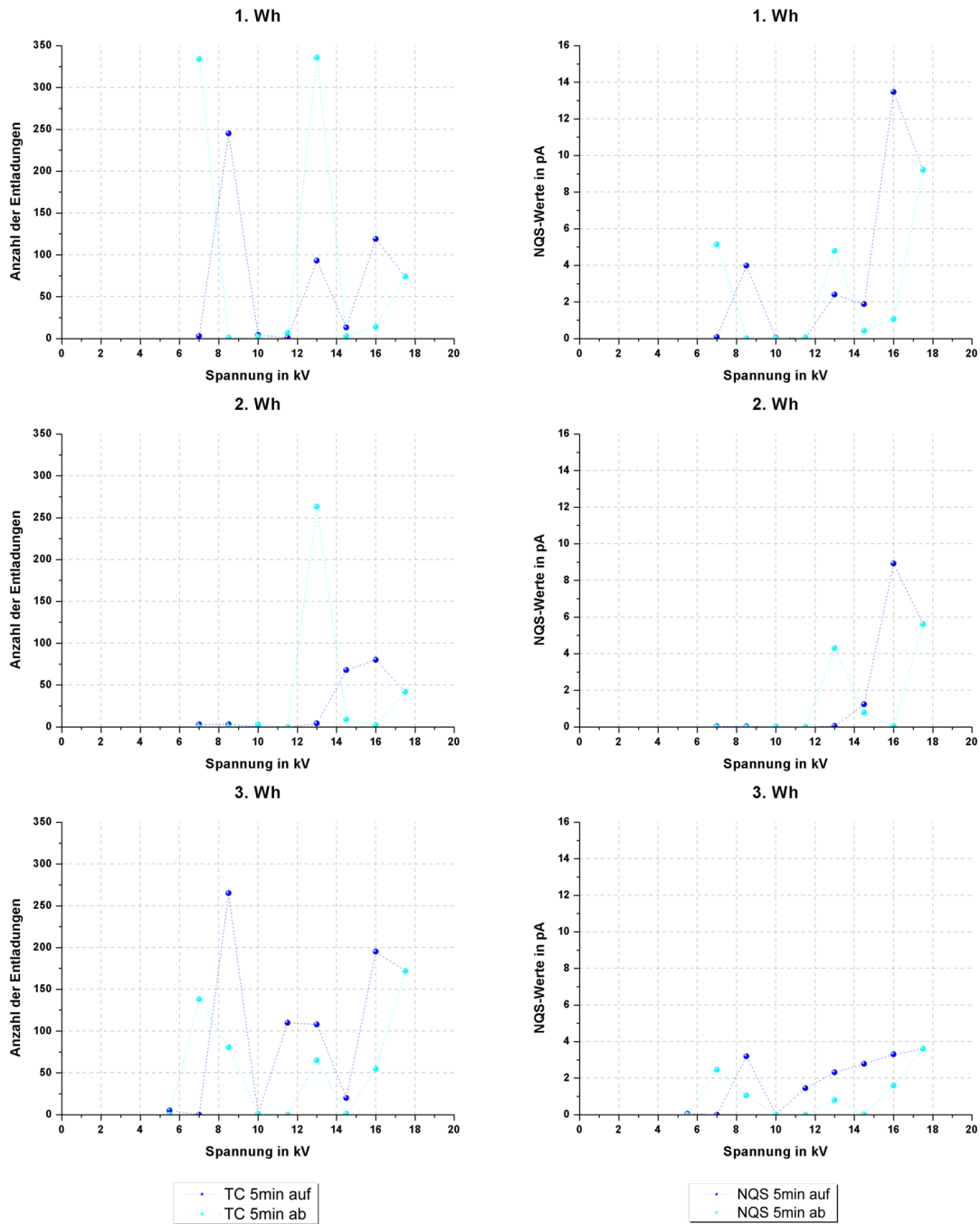


Abb. D.4: AC, Board-Gleitanordnung, 1 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 13

AC / Öl-Board-Gleitanordnung / 5 cm / Öl feucht / Nadel 5

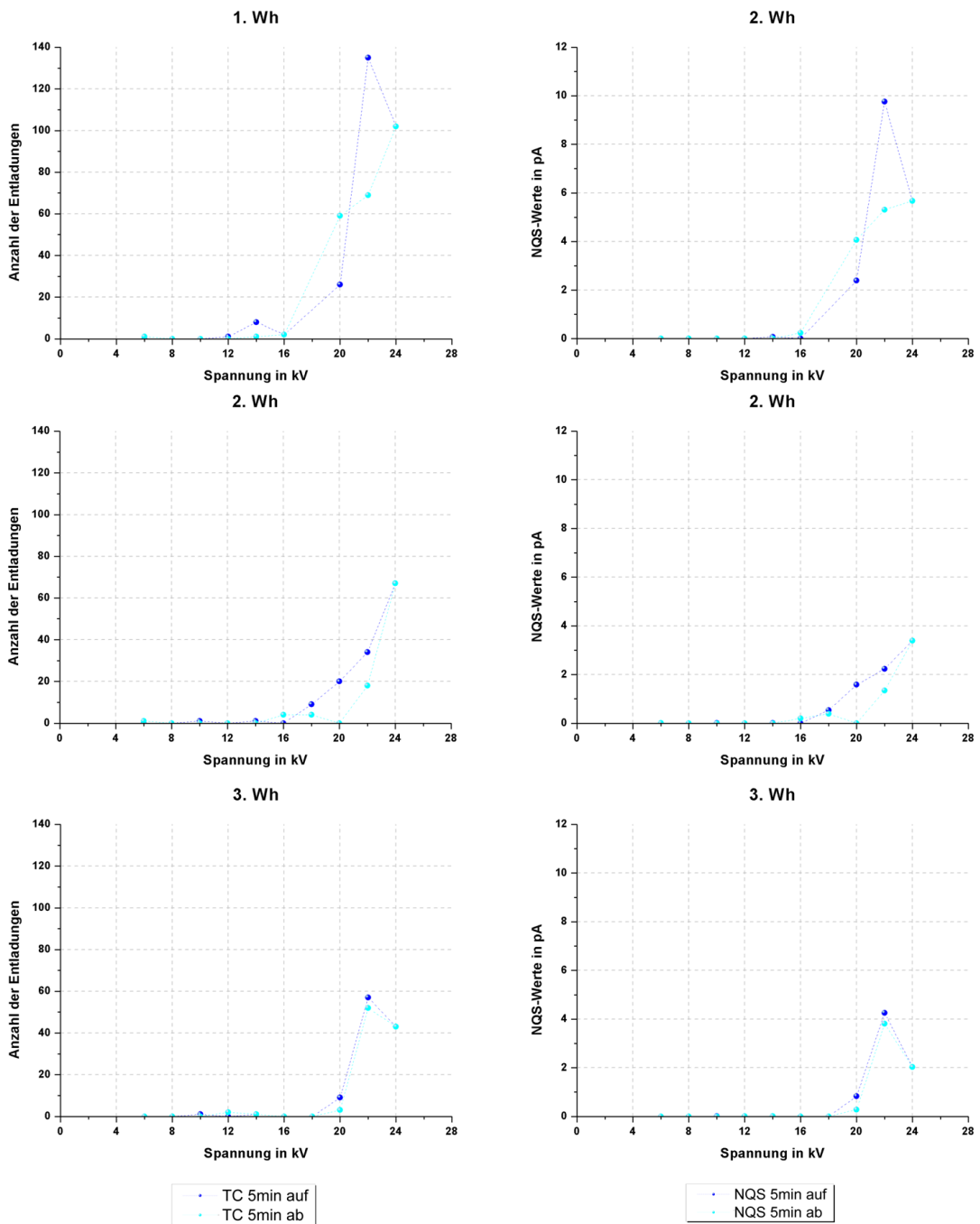


Abb. D.5: AC, Board-Gleitanordnung, 5 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 5

AC / Öl-Board-Gleitanordnung / 3 cm / Öl feucht / Nadel 5

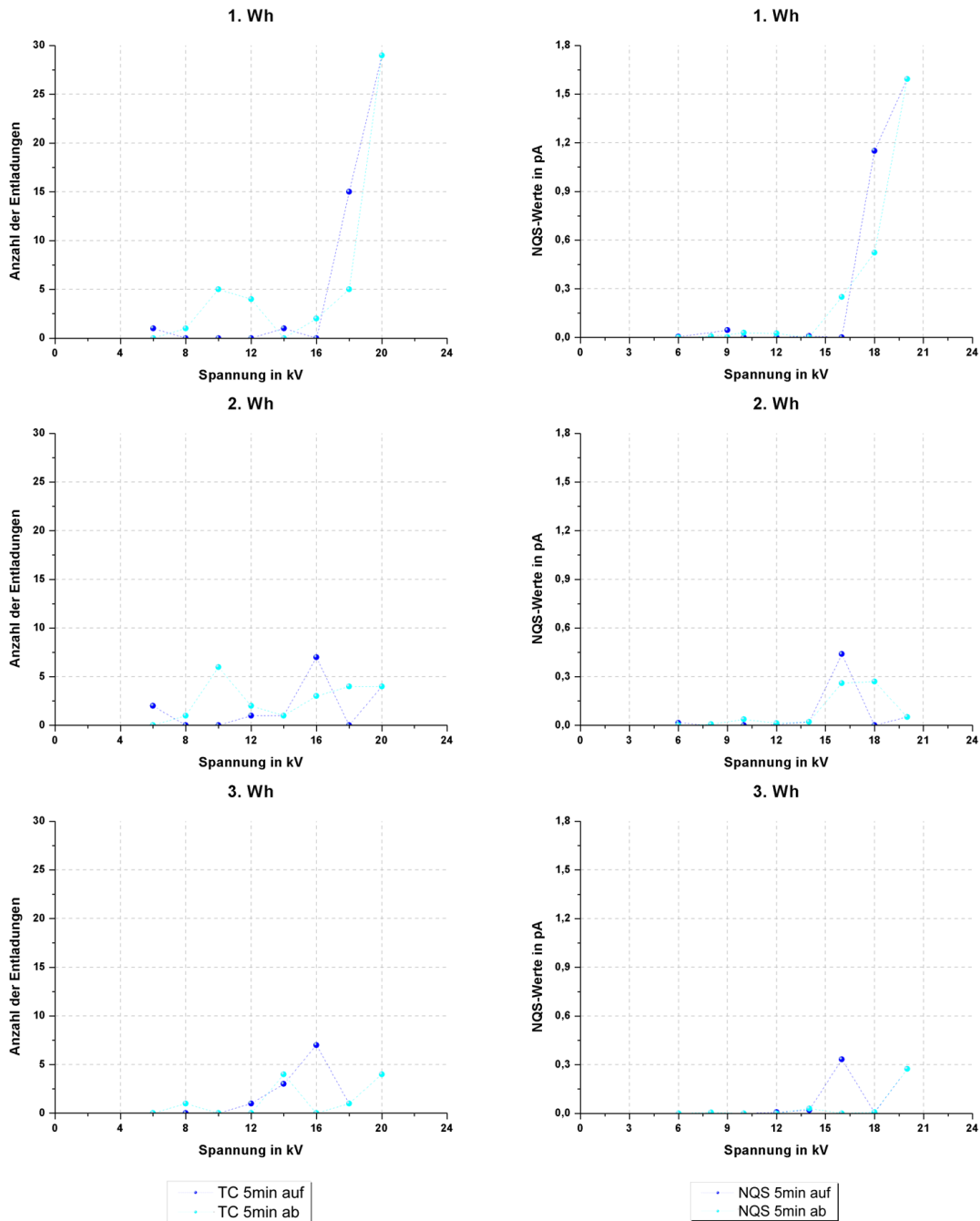


Abb. D.6: AC, Board-Gleitanordnung, 3 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 5



AC / Öl-Board-Gleitanordnung / 1 cm / Öl feucht / Nadel 5

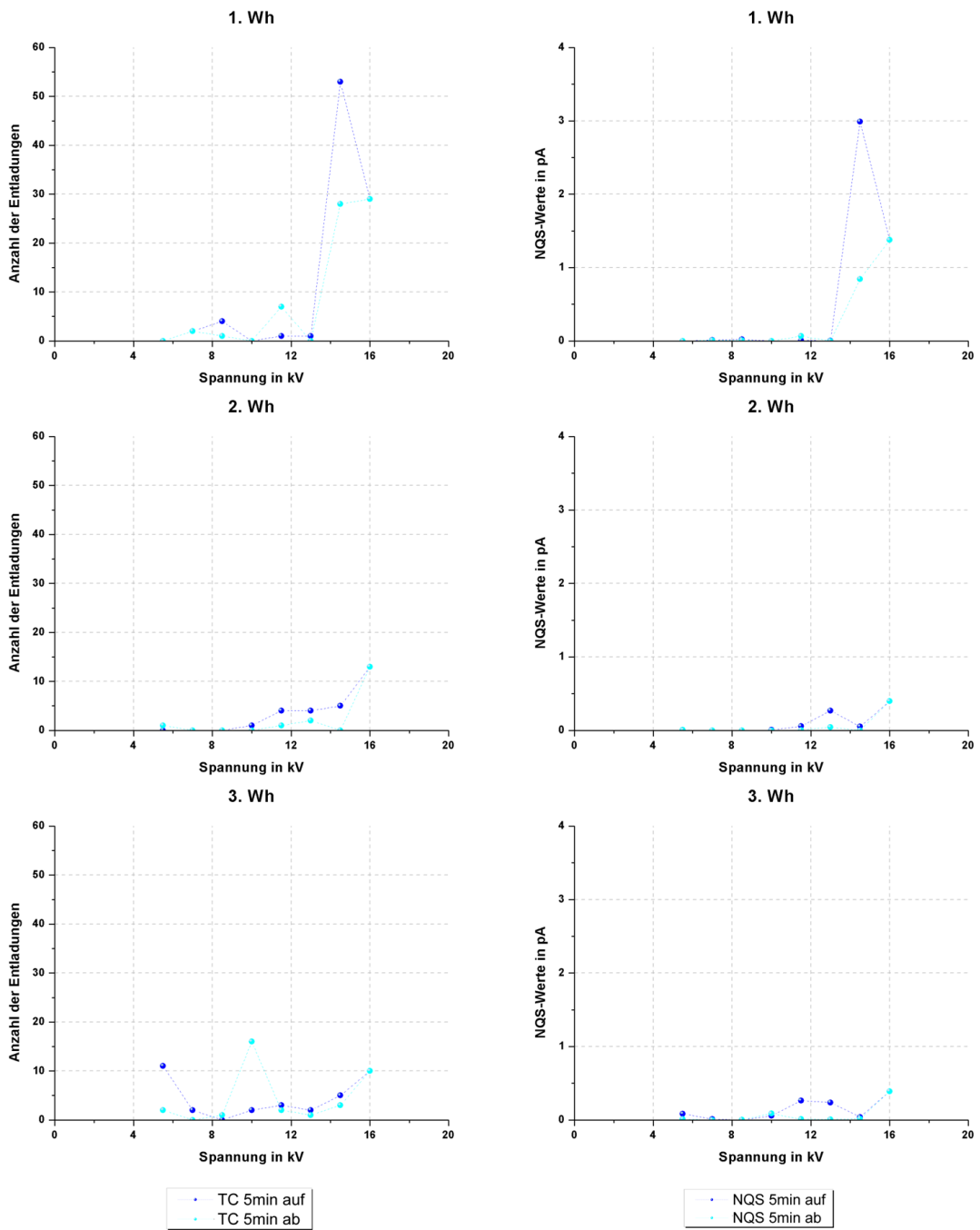


Abb. D.7: AC, Board-Gleitanordnung, 1 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 5

## D2. Hohe Gleichspannung

In Abb. D.8 ist die Prüfmatrix für die Versuche für die Öl-Board-Gleitanordnung unter Gleichspannungsbeanspruchung grafisch dargestellt.

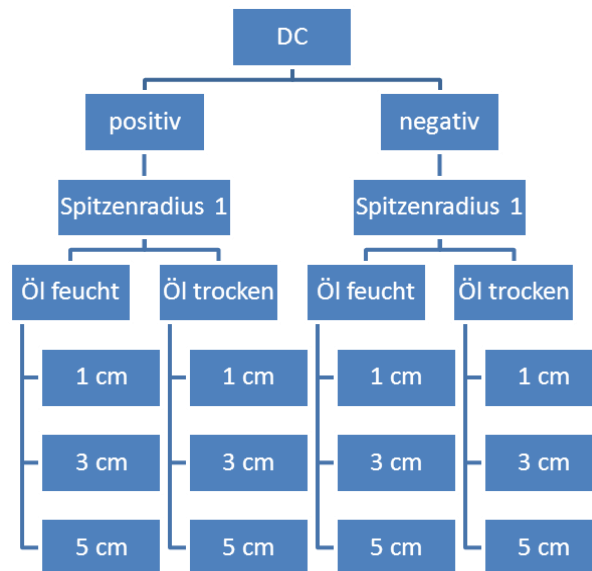


Abb. D.8: Prüfmatrix zur Teilentladungsmessung an einer Öl-Board-Gleitanordnung unter Gleichspannungsbeanspruchung

Für die Öl-Board-Gleitanordnung wurde in weiterer Folge auf eine Variation des Spitzenradius der Nadel verzichtet. Eine Auswertung der Teilentladungsdigramme erfolgte analog Anhang C2. als 1-, 3- und 5-Minutenwert.

DC+ / Öl-Board-Gleitanordnung / 5 cm / Öl trocken / Nadel 19

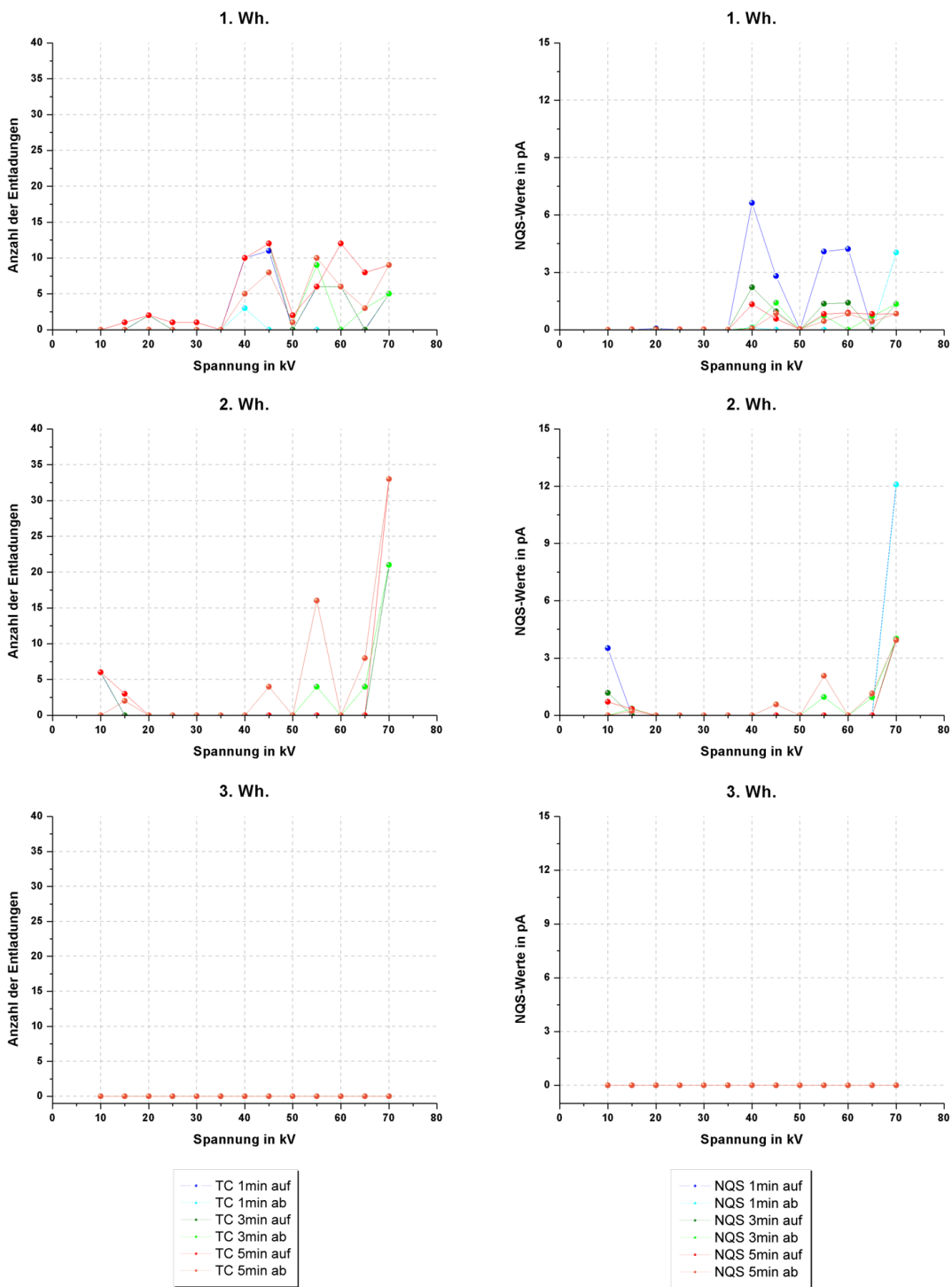


Abb. D.9: DC positive Polarität, Board-Gleitanordnung, 5 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 19

DC+ / Öl-Board-Gleitanordnung / 3 cm / Öl trocken / Nadel 19

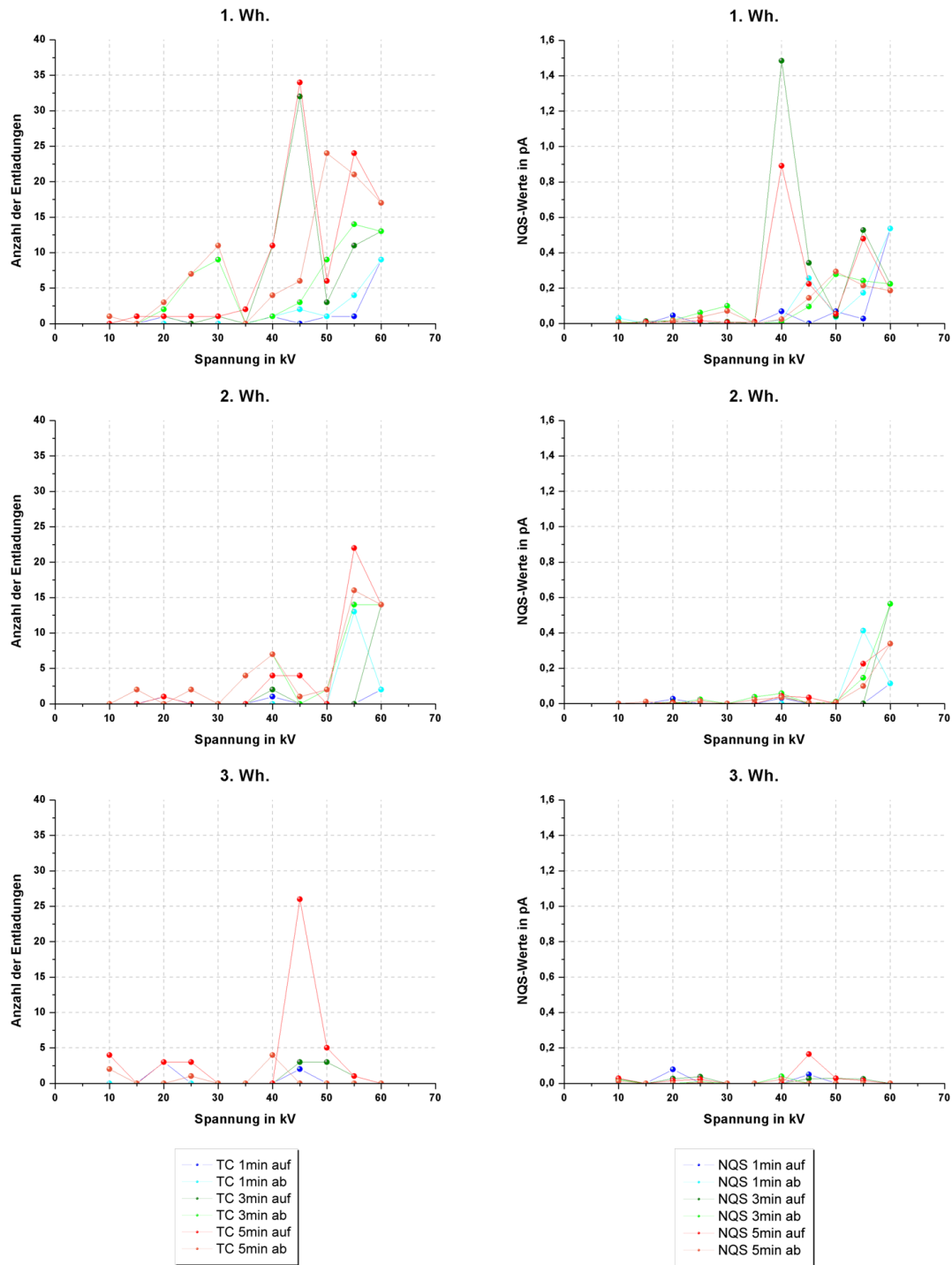


Abb. D.10: DC positive Polarität, Board-Gleitanordnung, 3 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 19

DC+ / Öl-Board-Gleitanordnung / 1 cm / Öl trocken / Nadel 19

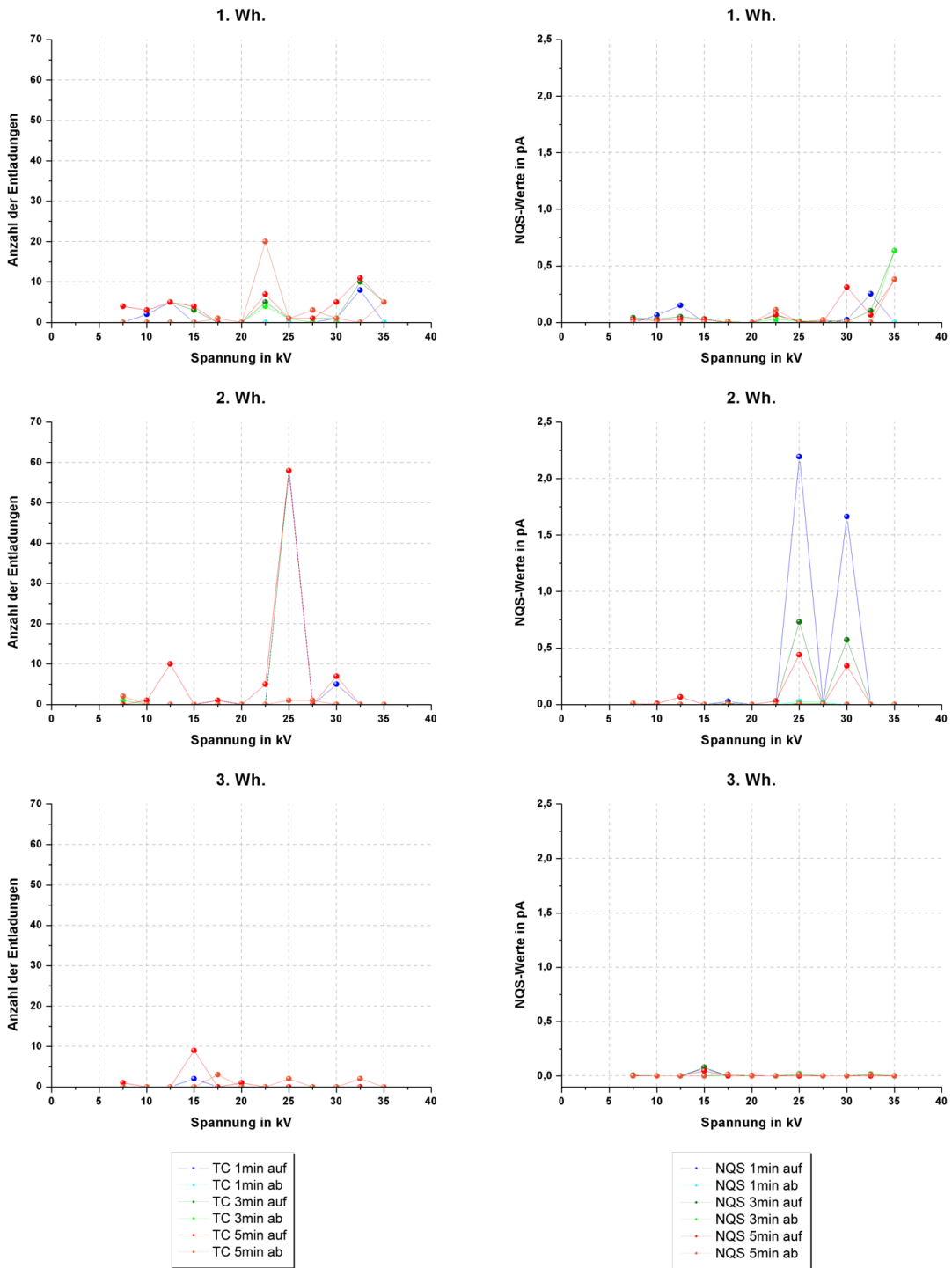


Abb. D.11: DC positive Polarität, Board-Gleitanordnung, 1 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 19

DC+ / Öl-Board-Gleitanordnung / 5 cm / Öl feucht / Nadel 30

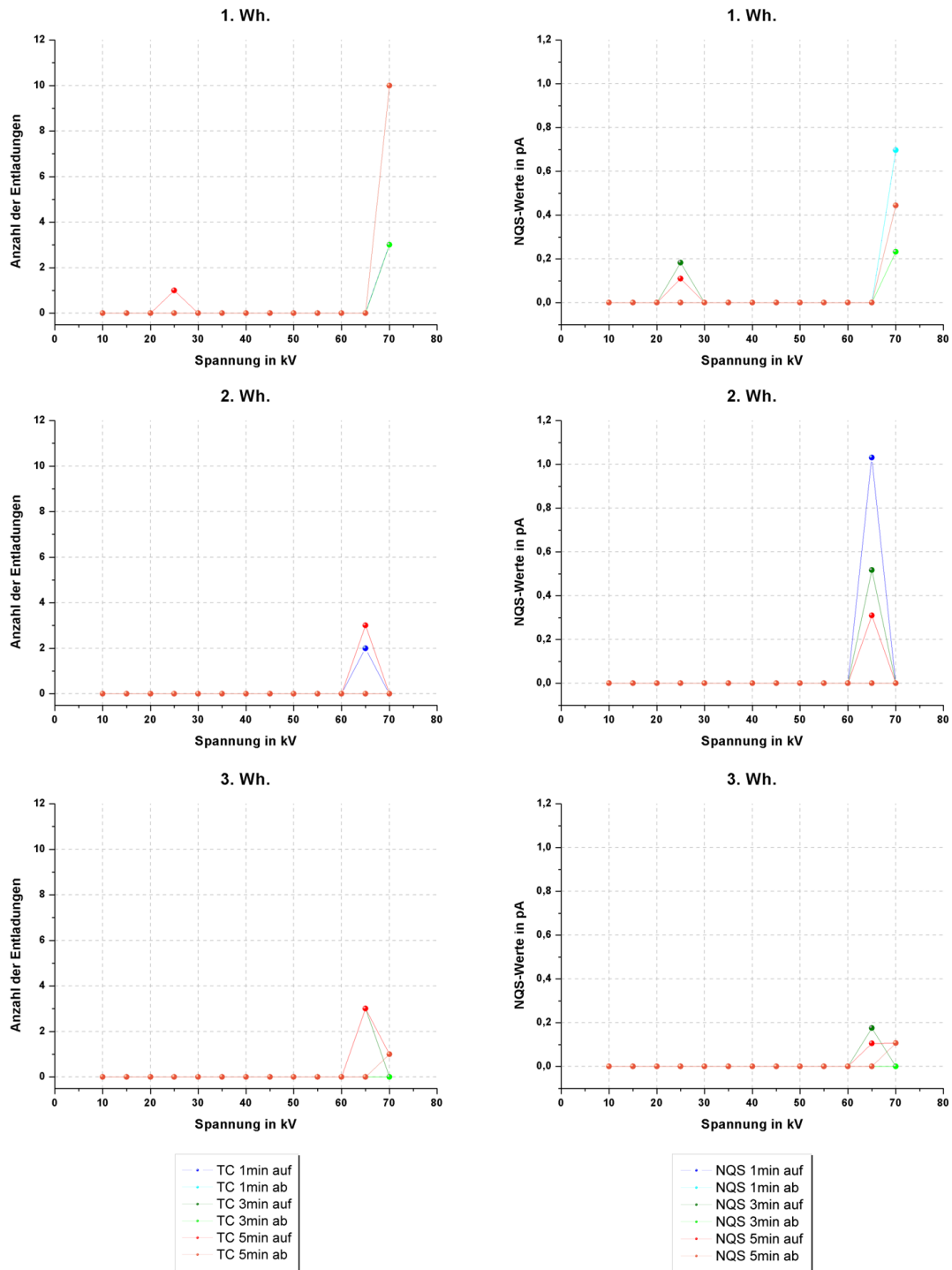


Abb. D.12: DC positive Polarität, Board-Gleitanordnung, 5 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 30

DC+ / Öl-Board-Gleitanordnung / 3 cm / Öl feucht / Nadel 30

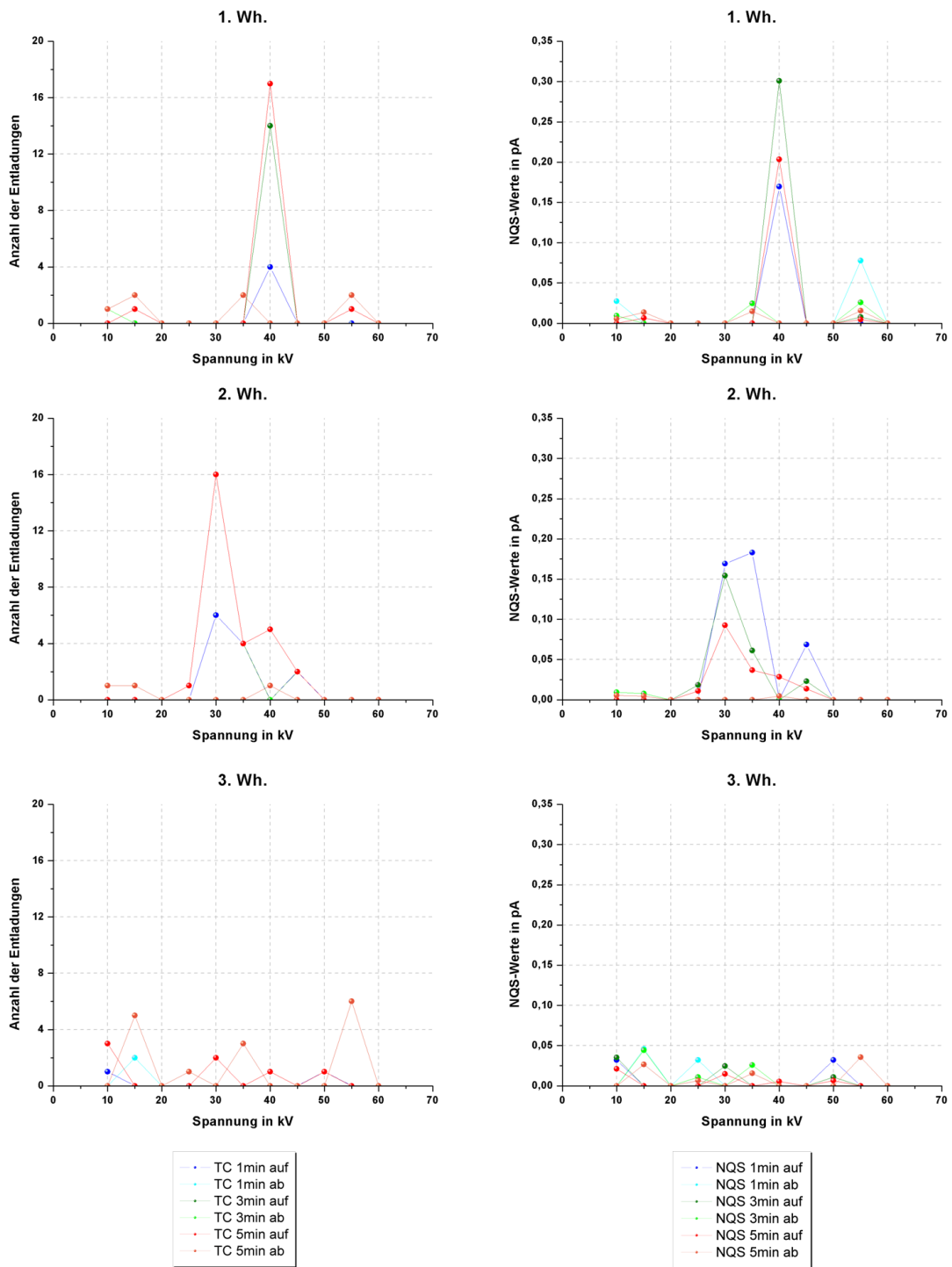


Abb. D.13: DC positive Polarität, Board-Gleitanordnung, 3 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 30

DC+ / Öl-Board-Gleitanordnung / 1 cm / Öl feucht / Nadel 30

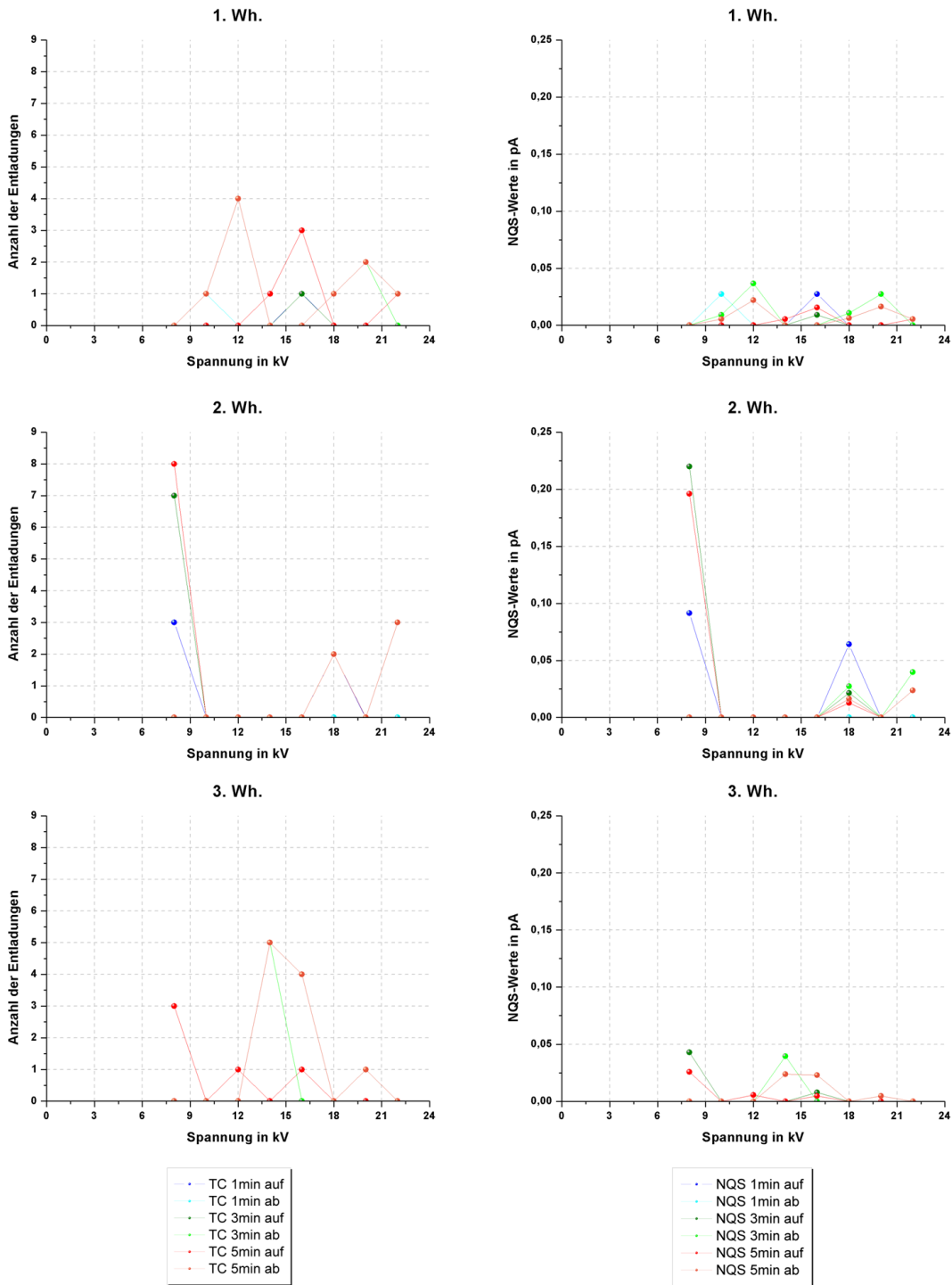


Abb. D.14: DC positive Polarität, Board-Gleitanordnung, 1 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 30



DC- / Öl-Board-Gleitanordnung / 5 cm / Öl trocken / Nadel 21

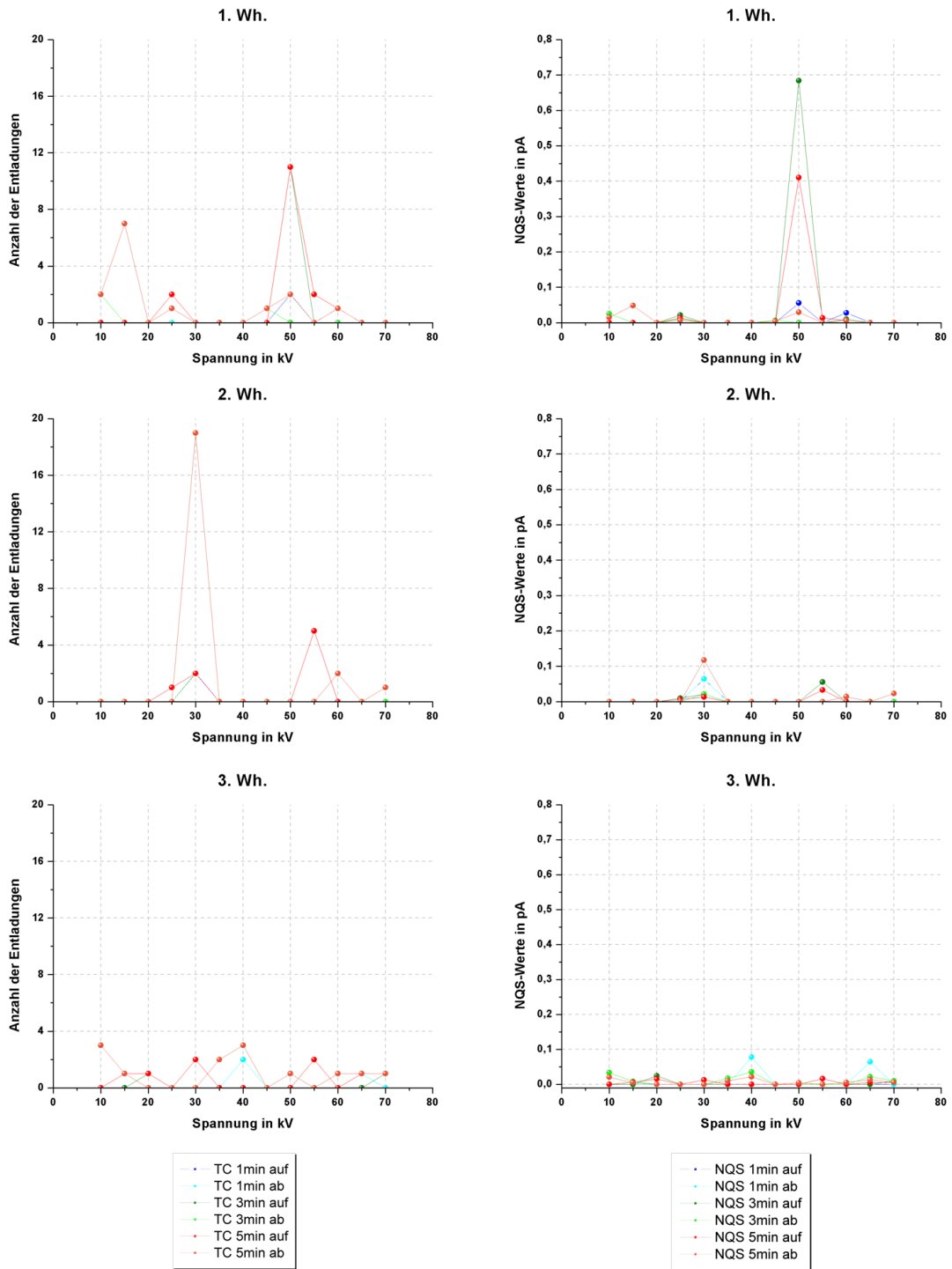


Abb. D.15: DC negative Polarität, Board-Gleitanordnung, 5 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 21

DC- / Öl-Board-Gleitanordnung / 3 cm / Öl trocken / Nadel 21

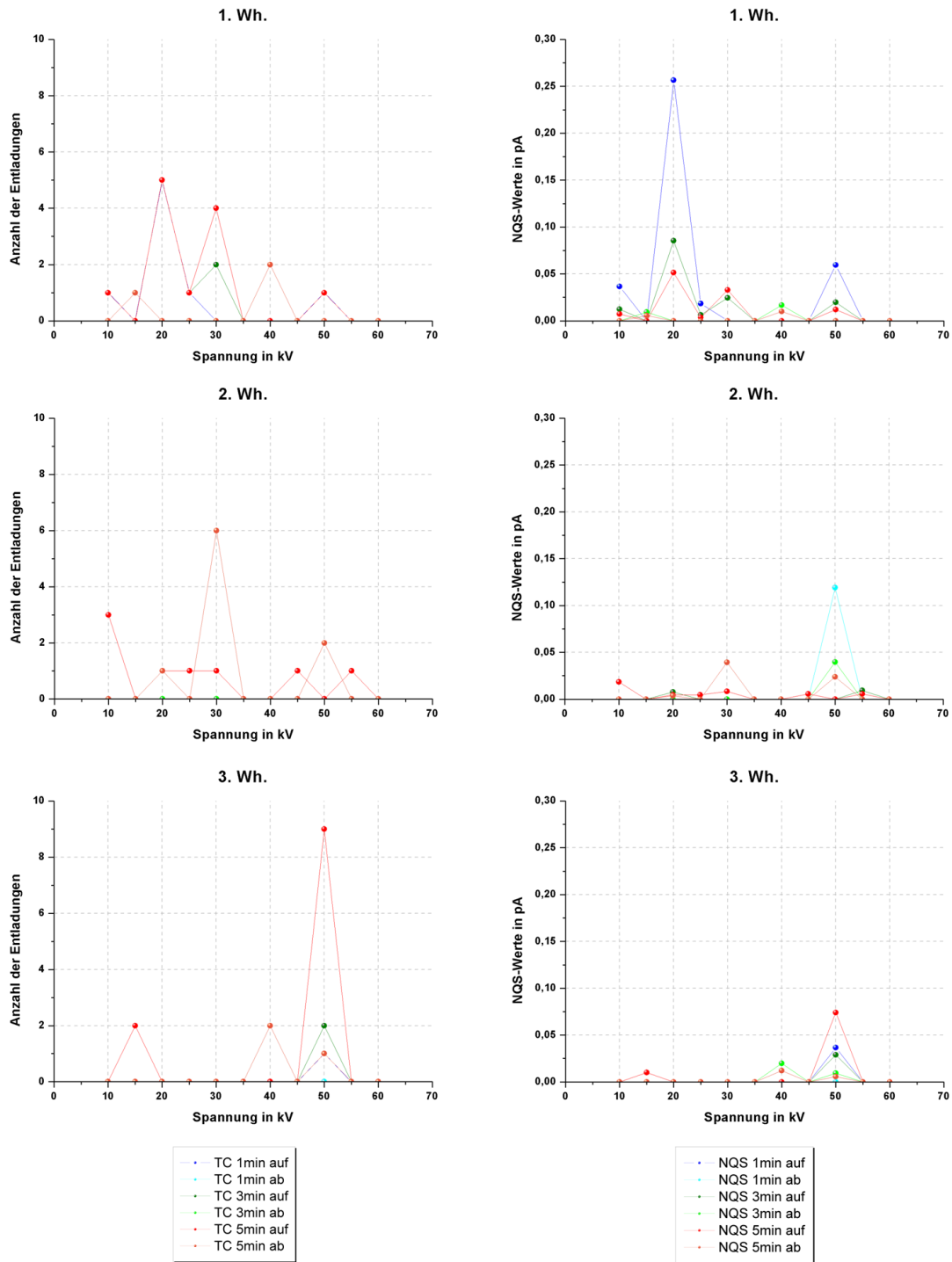


Abb. D.16: DC negative Polarität, Board-Gleitanordnung, 3 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 21

DC- / Öl-Board-Gleitanordnung / 1 cm / Öl trocken / Nadel 21

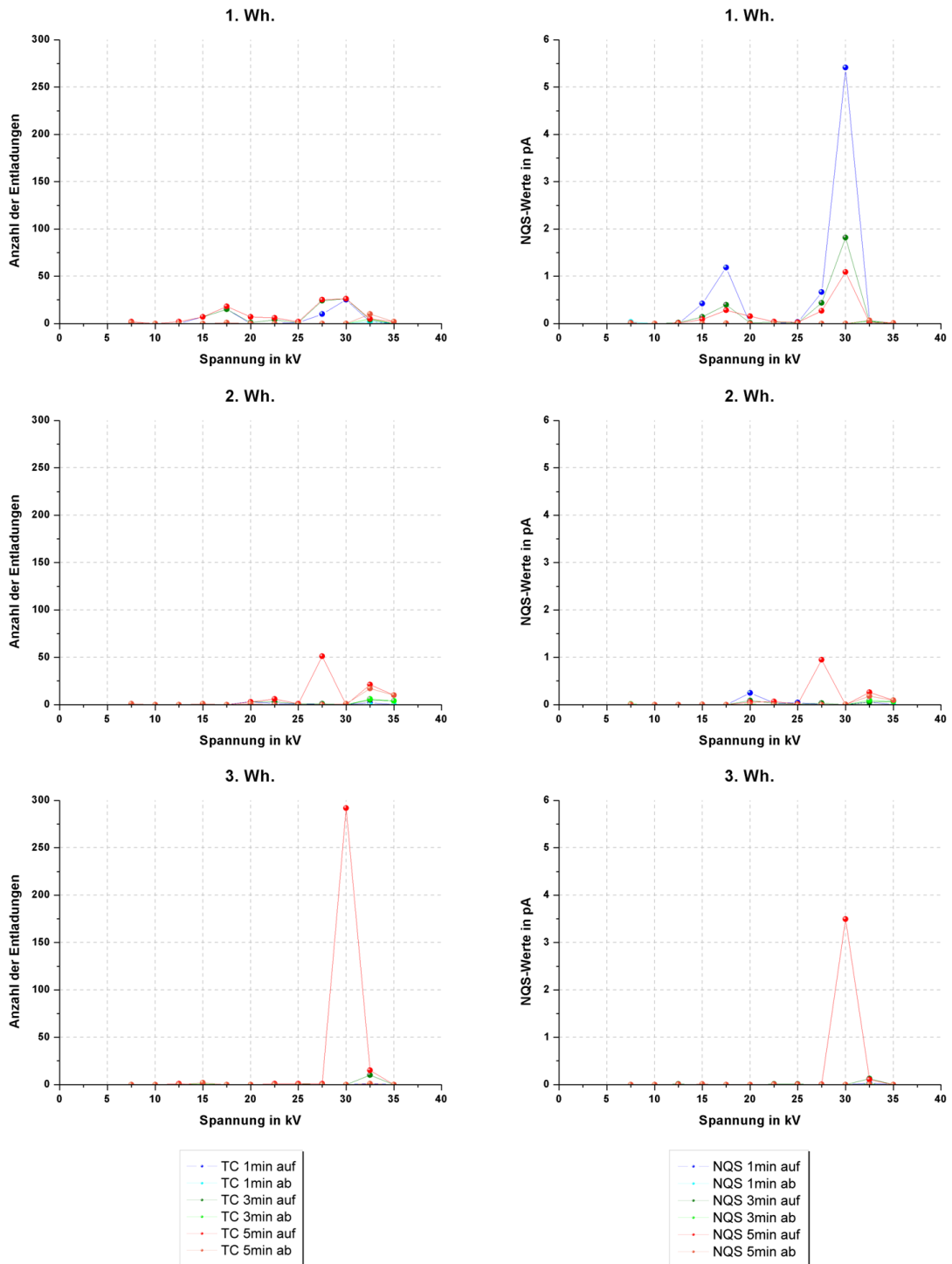


Abb. D.17: DC negative Polarität, Board-Gleitanordnung, 1 cm Abstand, Öl trocken, Nadel 21

DC- / Öl-Board-Gleitanordnung / 5 cm / Öl feucht / Nadel 33

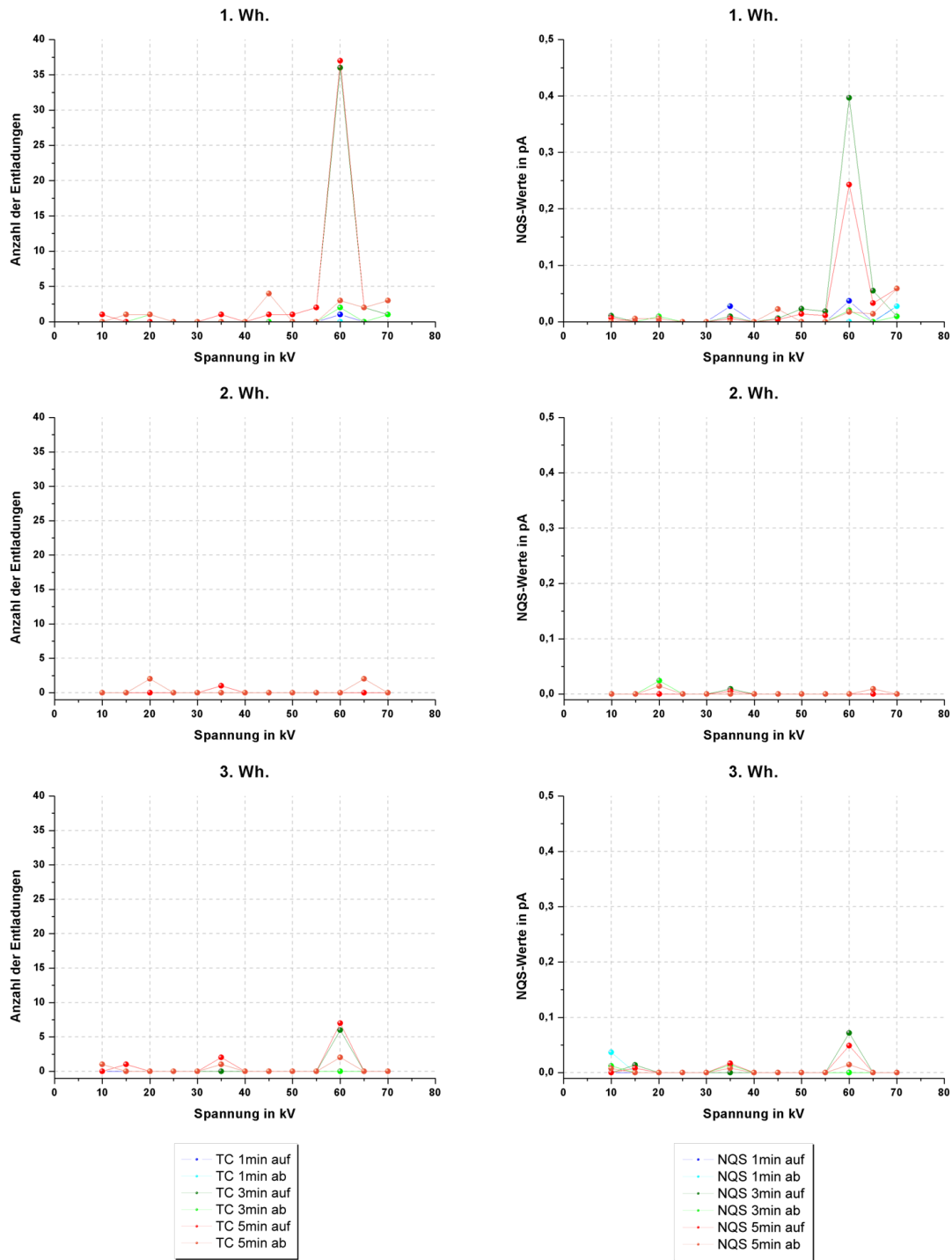


Abb. D.18: DC negative Polarität, Board-Gleitanordnung, 5 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 33

DC- / Öl-Board-Gleitanordnung / 3 cm / Öl feucht / Nadel 33

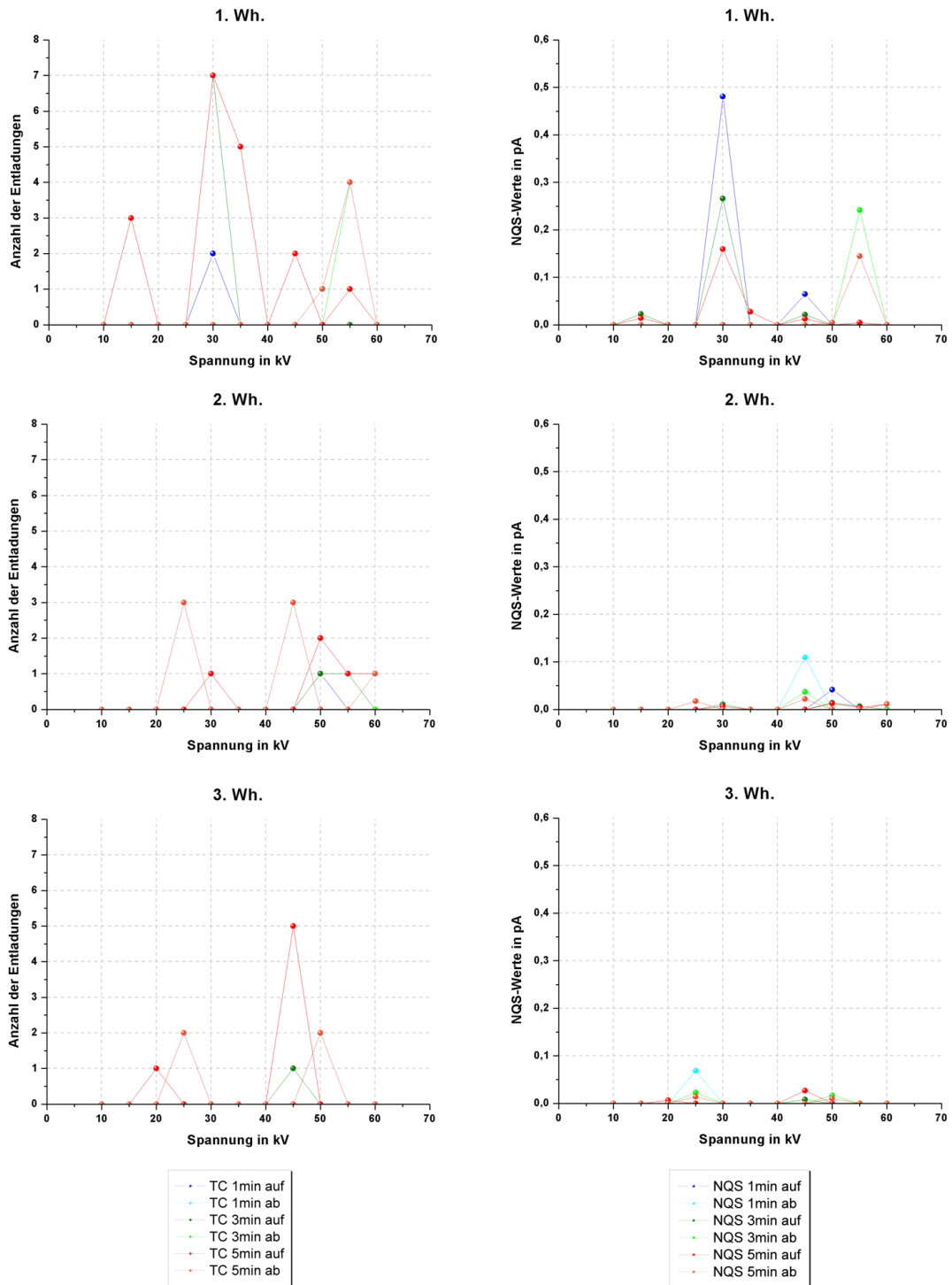


Abb. D.19: DC negative Polarität, Board-Gleitanordnung, 3 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 33

DC- / Öl-Board-Gleitanordnung / 1 cm / Öl feucht / Nadel 33

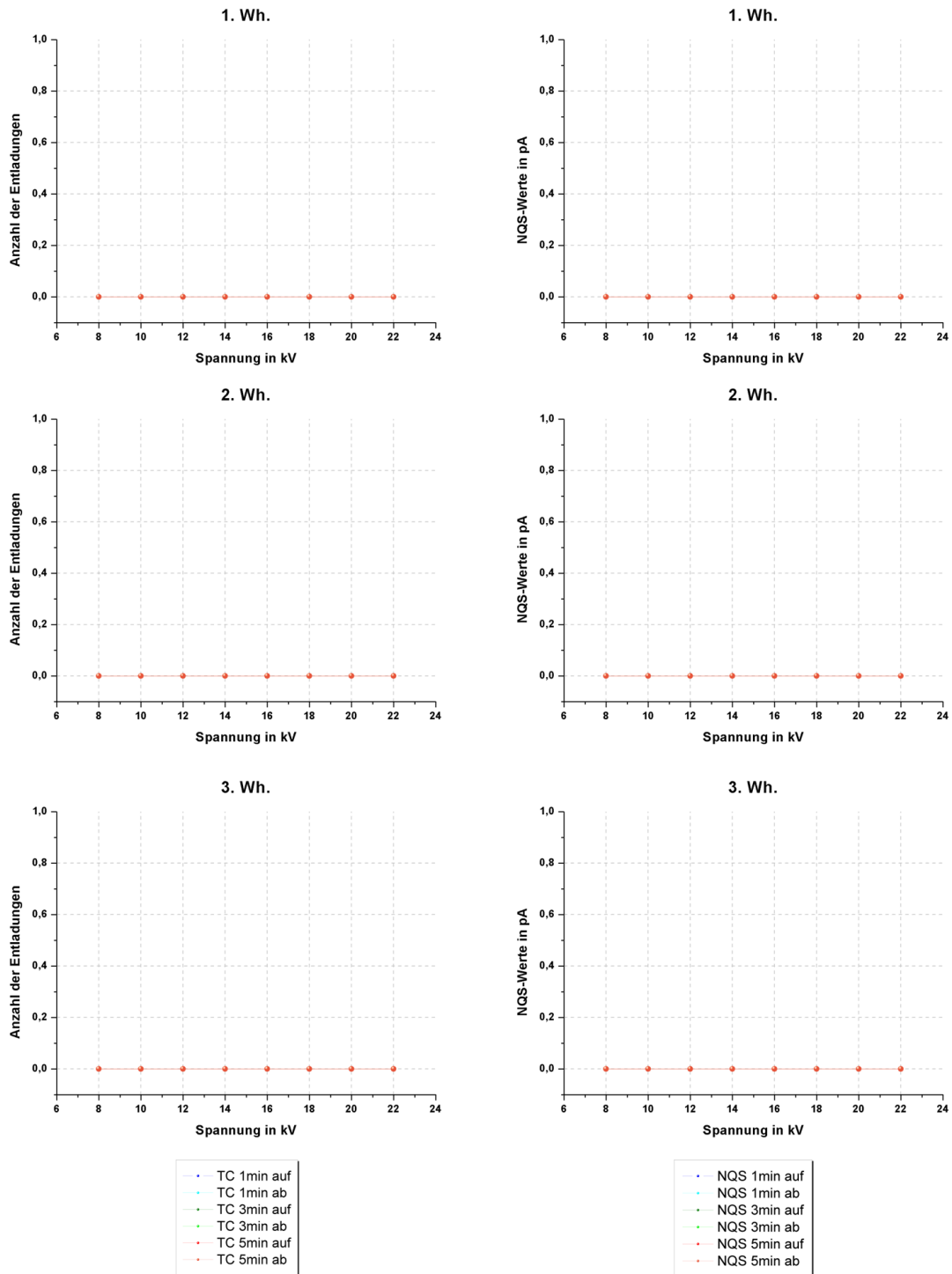


Abb. D.20: DC negative Polarität, Board-Gleitanordnung, 1 cm Abstand, Öl feucht, Nadel 33

## Anhang E: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Die rasterelektronenmikroskopischen (REM) Untersuchungen fanden von Februar bis Dezember 2011 am Institut für Elektronenmikroskopie und Feinstrukturforschung (FELMI-ZFE) unter fachlicher Begleitung von Herrn Ing. Hartmuth Schröttner statt. Im Folgenden sind die RE- sowie SE-Aufnahmen<sup>34</sup> auszugsweise nur der gebrauchten Nadeln wiedergegeben.

Die REM-Aufnahmen wurden bei 10 bzw. 15 kV Beschleunigungsspannung in einem ZEISS DSM 982 Gemini Feldemissionsrasterelektronenmikroskop aufgenommen. Als Materialanalyzesystem diente ein NORAN Voyager EDX (energie-dispersive Röntgenspektrometrie). Bei den REM-Aufnahmen handelt es sich im Regelfall um Sekundärelektronen-Abbildungen (SE-Abbildungen). Diese zeigen den Topografie-contrast. Bei den Querschliff-Untersuchungen bzw. in Einzelfällen wurden zusätzlich Rückstreuerelektronen-Abbildungen (RE-Abbildungen) aufgenommen (Materialkontrast).

### E1. Materialanalyse mittels ZEISS DSM 982 Gemini

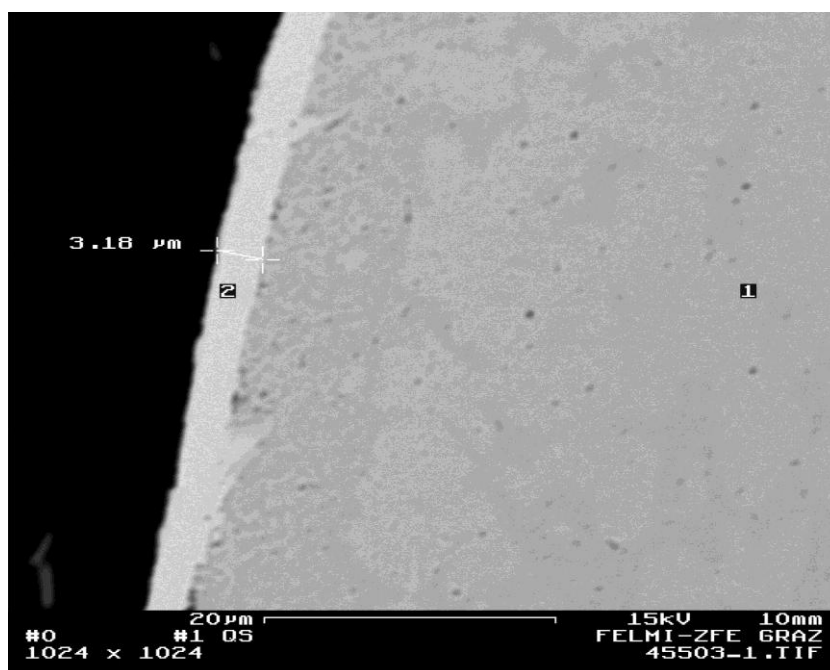


Abb. E.1: RE-Aufnahme der Nadel im Querschnitt (Draufsicht), Zeiss DSM982 Gemini, [FELMI-ZFE]

<sup>34</sup> Rückstreuerelektronen- sowie Sekundärelektronen-Aufnahmen

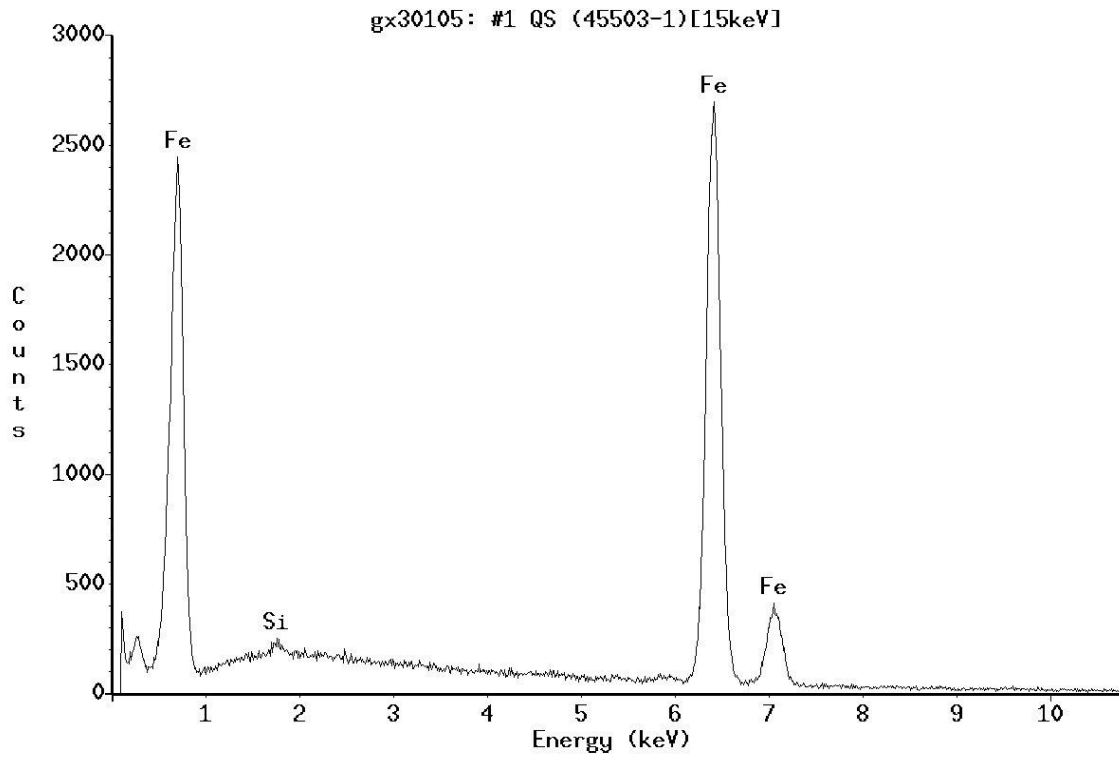


Abb. E.2: Materialanalyse der Nadel im Querschnitt (Kernmaterial), NORAN Voyager EDX, [FELMI-ZFE]

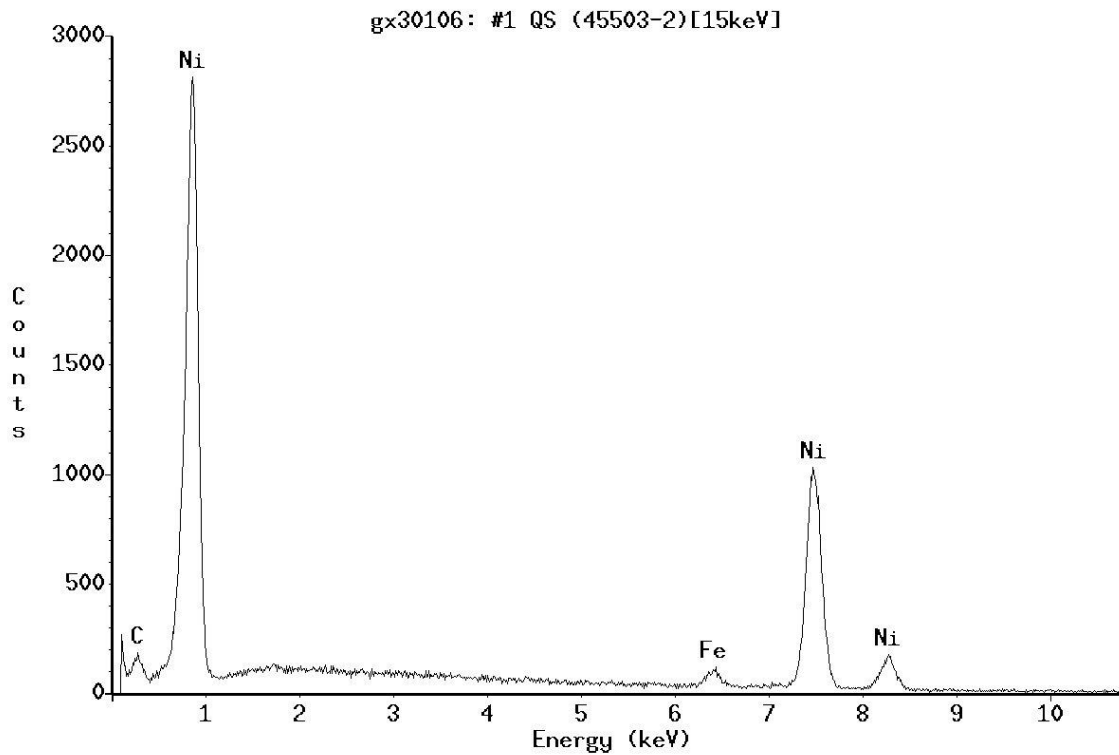


Abb. E.3: Materialanalyse der Nadel im Querschnitt (Außenschicht), NORAN Voyager EDX, [FELMI-ZFE]



## E2. Topologie-Analyse mittels Zeiss Ultra 55

Im Folgenden wurden die Nadeln zerstörungsfrei im Rasterelektronenmikroskop Zeiss Ultra 55 untersucht.

Tabelle 5: Übersicht der verwendeten Nadel vor und nach Gebrauch (Zeiss Ultra 55)

Nr. neu	Nr. nach Gebrauch	Bezeichnung	Spitzenradius in $\mu\text{m}$ (nach Gebrauch)
	1	DC+/- Öl trocken 1. DG 5 cm	163
	2	DC-/+ Öl trocken 1. DG 3 cm	78
	3	DC-/+ Öl trocken 1. DG 1 cm	198
	4	DC-/+ Öl trocken 2. DG 5 cm	53
	5	DC-/+ Öl trocken 2. DG 3 cm	57
	6	DC-/+ Öl trocken 2. DG 1 cm	63
	7	DC-/+ Öl feucht 1. DG 5 cm	98
	8	DC-/+ Öl feucht 1. DG 3 cm	98
	9	DC-/+ Öl feucht 1. DG 1 cm	114
	10	DC-/+ Öl feucht Spannungssteigerung 5 min 1. DG 5-1 cm	164
	11	DC-/+ Öl feucht Spannungssteigerung 5 min 2. DG 5-1 cm	189
	12	2. Charge (Neuzustand)	168
GEBR 4	13	DC-/+ Öl feucht 2. DG 5 cm (53 $\mu\text{m}$ )	123
GEBR 5	14	DC-/+ Öl feucht 2. DG 3 cm (57 $\mu\text{m}$ )	121
GEBR 6	15	DC-/+ Öl feucht 2. DG 1 cm (63 $\mu\text{m}$ )	130
12	16	DC-/+ Öl feucht Dauerversuch 30 min 5-1 cm (168 $\mu\text{m}$ )	344
GEBR 7	17	DC-/+ Öl trocken 2. DG 5 cm (98 $\mu\text{m}$ )	177
GEBR 8	18	DC-/+ Öl trocken 2. DG 3 cm (98 $\mu\text{m}$ )	215
GEBR 9	19	DC-/+ Öl trocken 2. DG 1 cm (114 $\mu\text{m}$ )	253
NEU 2	20	AC Öl trocken 5-1 cm (100 $\mu\text{m}$ )	261
9	21	AC Öl feucht 5-1 cm (106 $\mu\text{m}$ )	137
NEU 4	22	AC Öl feucht 5-3 cm (2xDS) (43 $\mu\text{m}$ )	65
2	23	AC Board Öl feucht 5 cm (111 $\mu\text{m}$ )	92
5	24	AC Board Öl feucht 5-1 cm (Nadel mechanisch beim Ausbau beschädigt) (121 $\mu\text{m}$ )	–
13	25	AC Board Öl trocken 5-1 cm (1cm DS) (145 $\mu\text{m}$ )	93
26	26	AC Board Öl trocken 1 cm (136 $\mu\text{m}$ )	135
19	27	DC+ Board Öl trocken 5-1 cm (76 $\mu\text{m}$ )	150
21	28	DC- Board Öl trocken 5-1 cm (74 $\mu\text{m}$ )	50
27	29	DC+ Board Öl feucht 5-1 cm (69 $\mu\text{m}$ )	118
33	30	DC- Board Öl feucht 5-1 cm (69 $\mu\text{m}$ )	77
30	31	DC+ Board Öl feucht 5-1 cm (64 $\mu\text{m}$ )	70
20	32	Optische TE-Messung DC (DS) (63 $\mu\text{m}$ )	122
17	33	Optische TE-Messung AC (62 $\mu\text{m}$ )	55

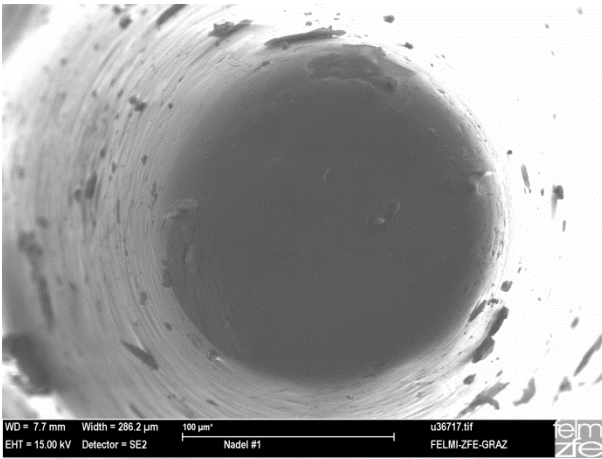


Abb. E.4: Nadel 1, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

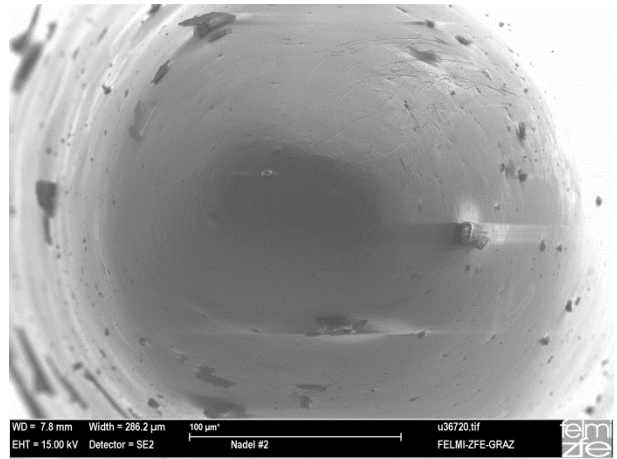


Abb. E.5: Nadel 2, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

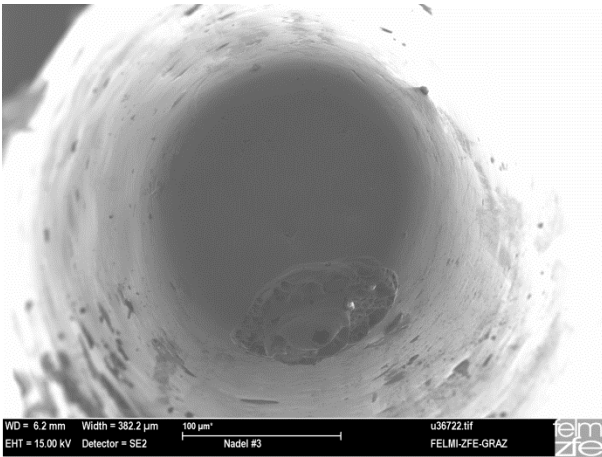


Abb. E.6: Nadel 3, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

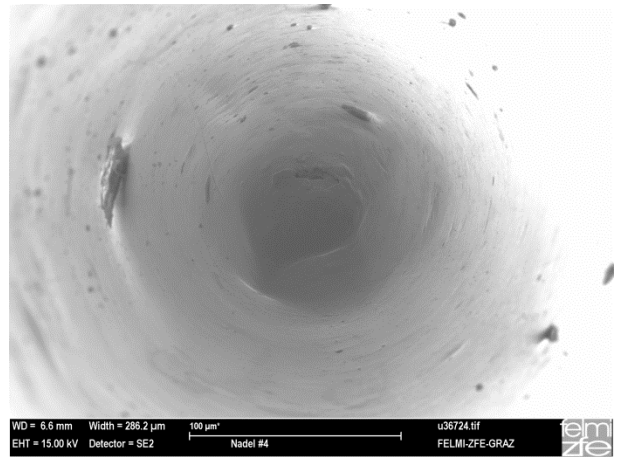


Abb. E.7: Nadel 4, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

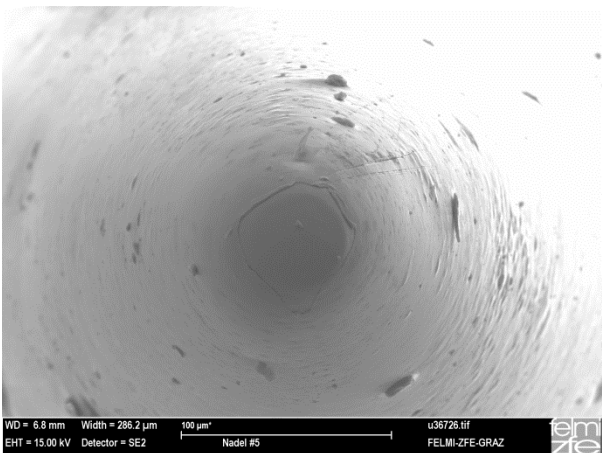


Abb. E.8: Nadel 5, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

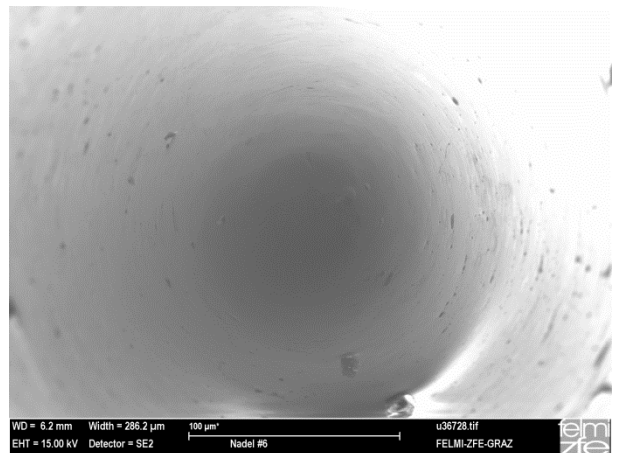


Abb. E.9: Nadel 6, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

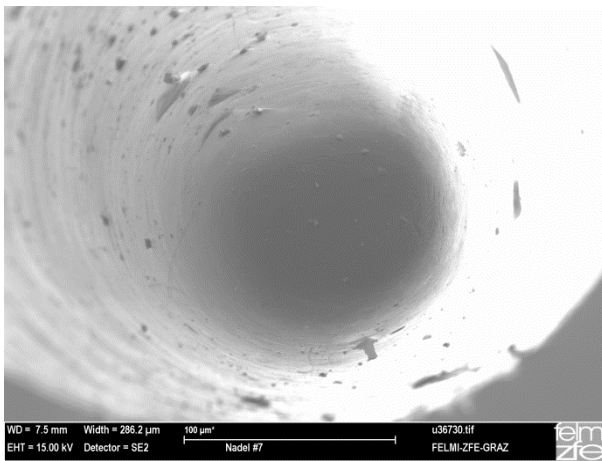


Abb. E.10: Nadel 7, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

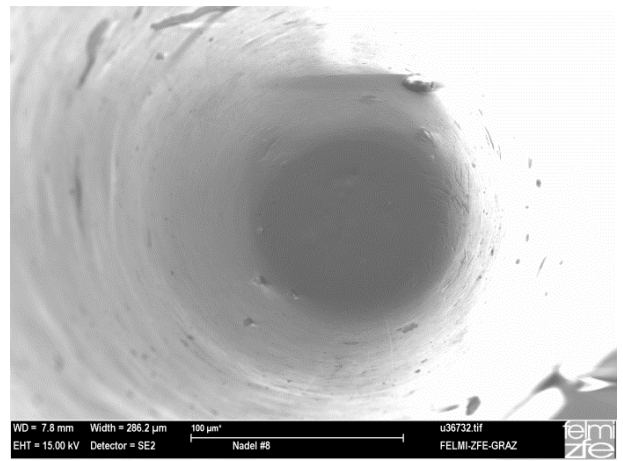


Abb. E.11: Nadel 8, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

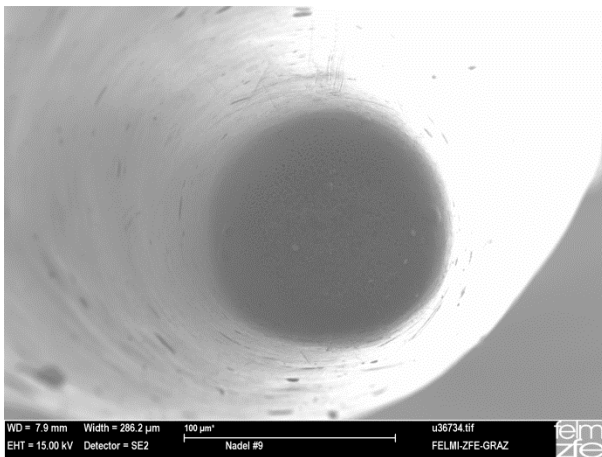


Abb. E.12: Nadel 9, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

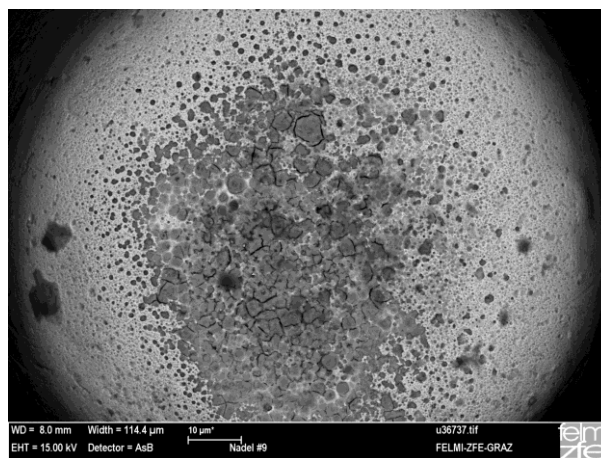
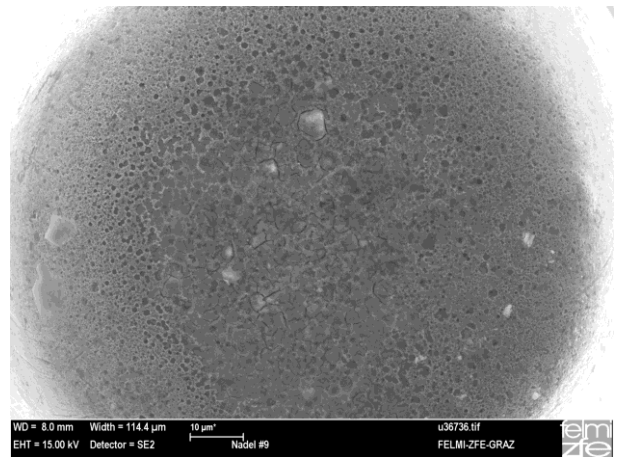


Abb. E.13: Nadel 9, RE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

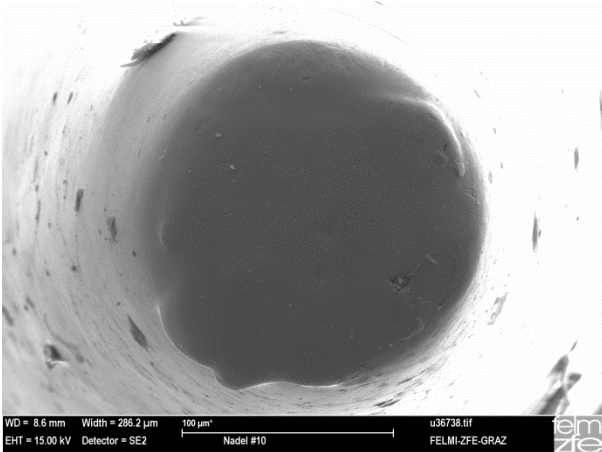


Abb. E.14: Nadel 10, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

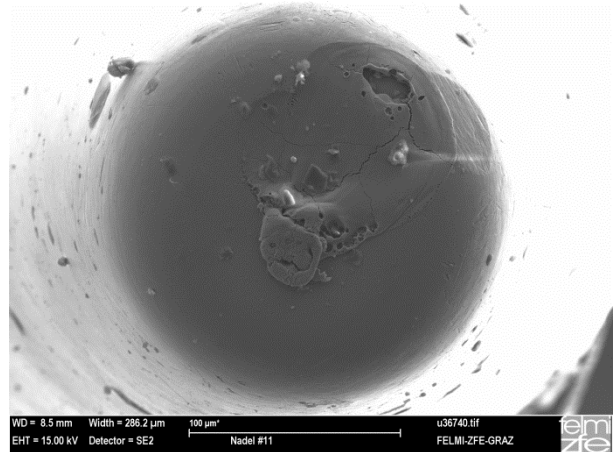


Abb. E.15: Nadel 11, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

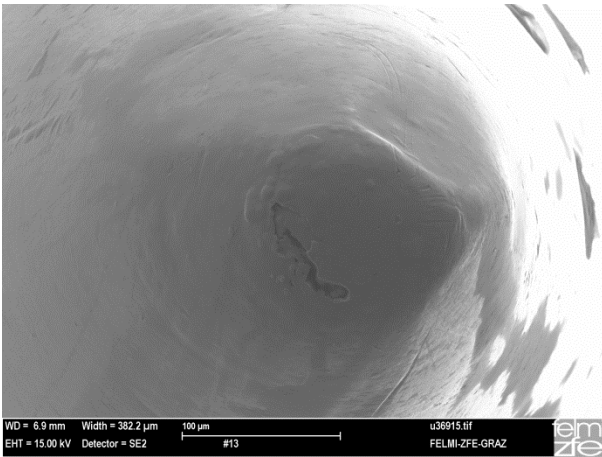


Abb. E.16: Nadel 13, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE],  
Anm.: Nadelspitze weist Delle auf, unterste Schicht kommt zum Vorschein

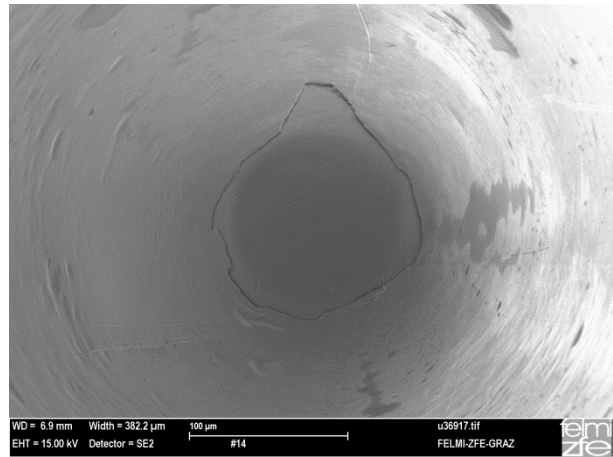


Abb. E.17: Nadel 14, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE],  
Anm.: oberer Schicht fehlt, untere Schicht mit Kratern versehen

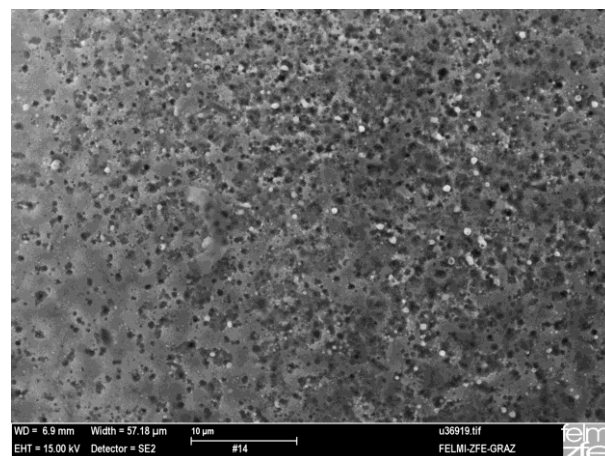


Abb. E.18: Nadel 14, Zoom, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

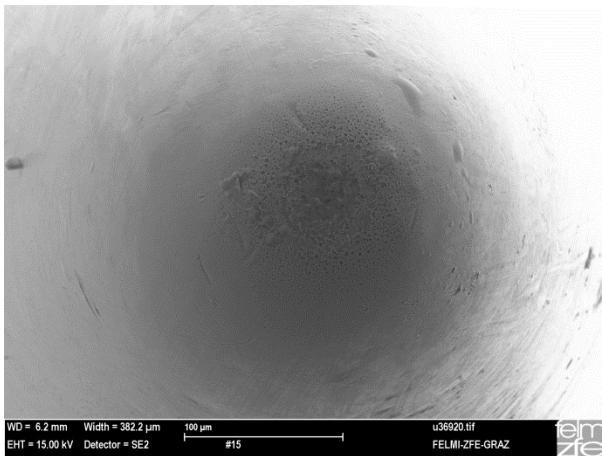


Abb. E.19: Nadel 15, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE],  
Anm.: obere Schicht intakt, jedoch mit Krater versehen

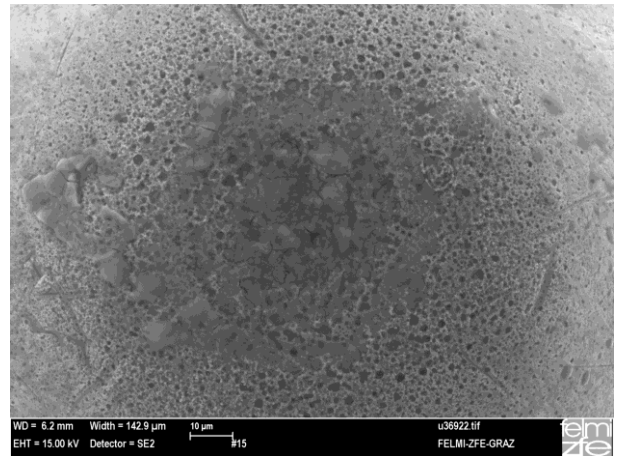


Abb. E.20: Nadel 15, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

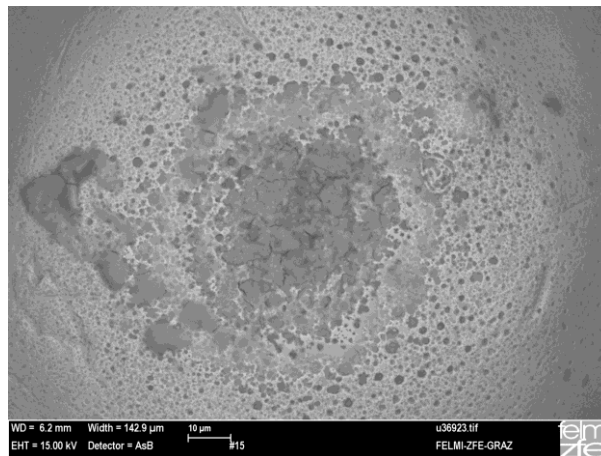


Abb. E.21: Nadel 15, RE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, AsB-Detektor (Materialkontrast), [FELMI-ZFE]

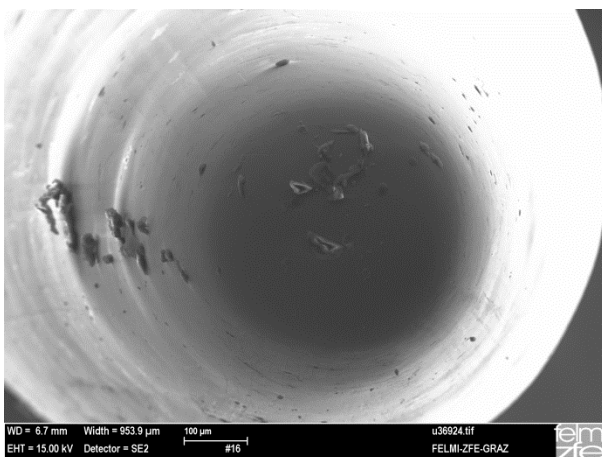


Abb. E.22: Nadel 16, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

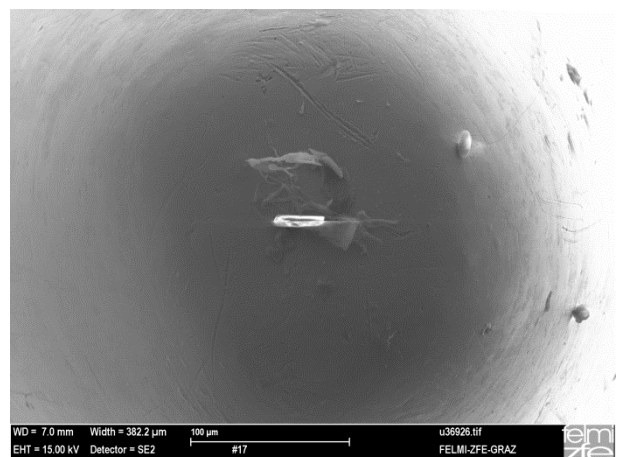


Abb. E.23: Nadel 17, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

Anm.: organische Verunreinigungen ersichtlic, negative Aufladung des nicht leitenden Rückstandes

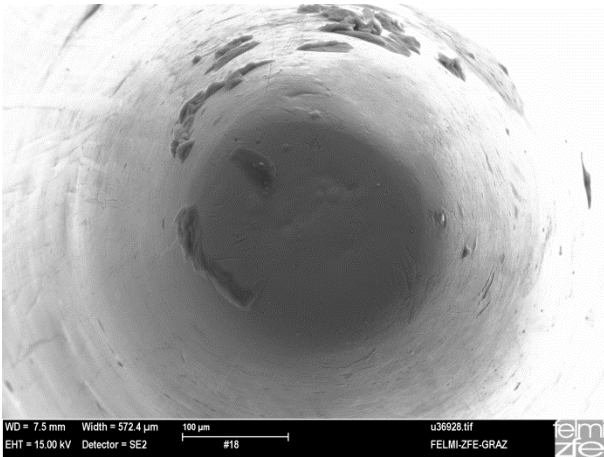


Abb. E.24: Nadel 18, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

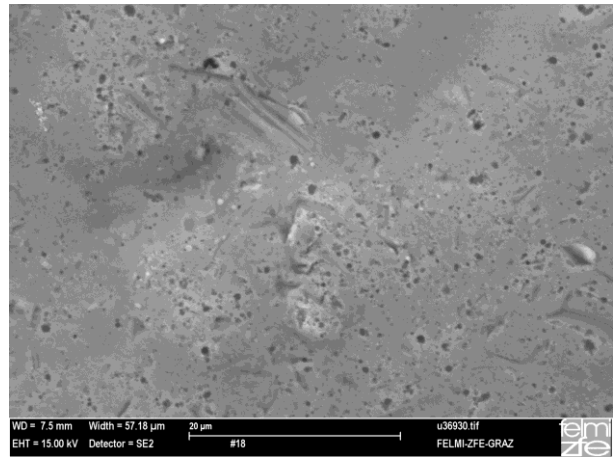


Abb. E.25: Nadel 18, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: einzelne Kratzer ersichtlich, größere Krater in der Größenordnung 1 µm, kleinere Krater in der Größenordnung 0,5 µm

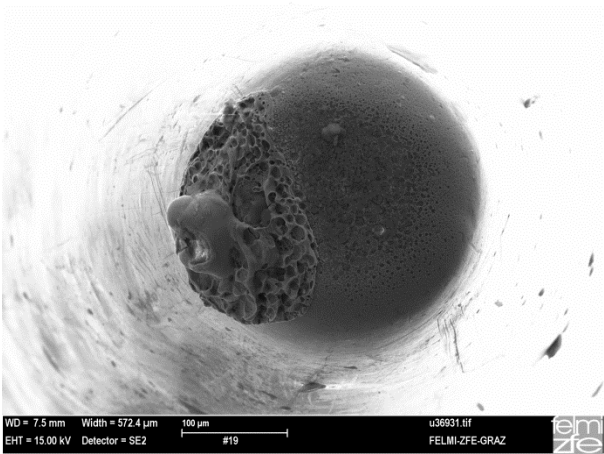


Abb. E.26: Nadel 19, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

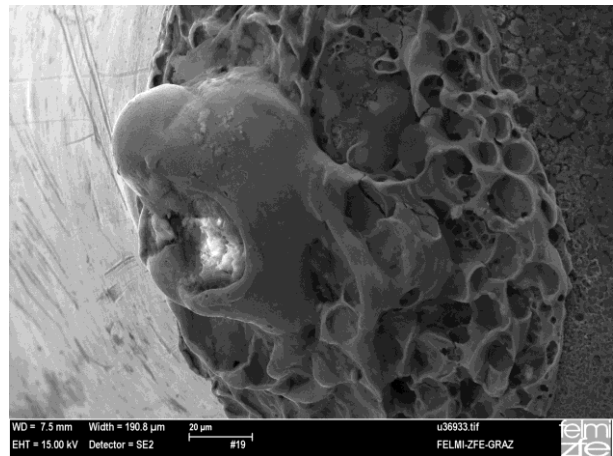


Abb. E.27: Nadel 19, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

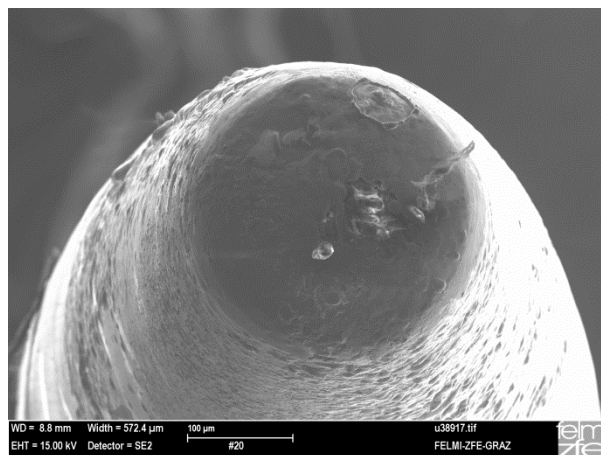


Abb. E.28: Nadel 20, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

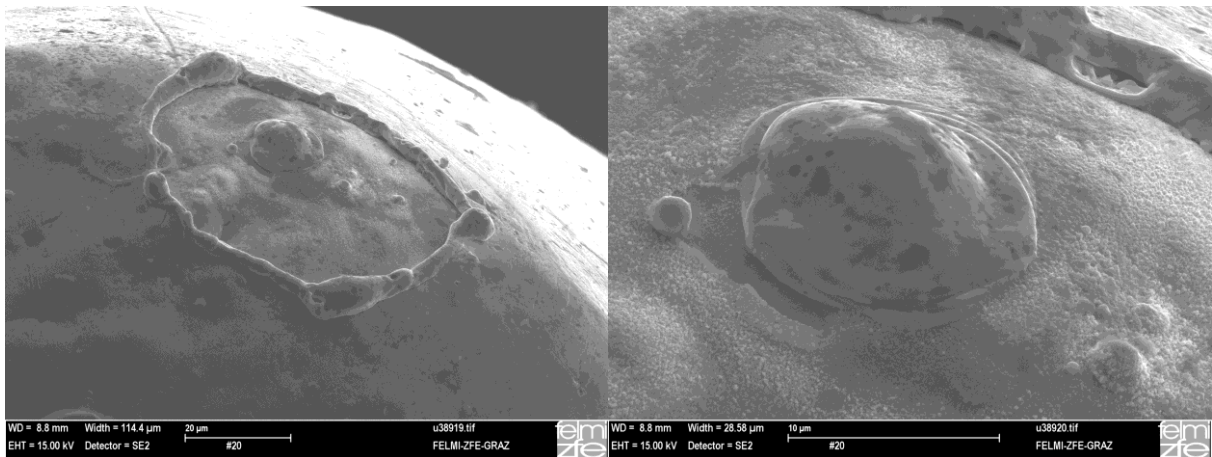


Abb. E.29: Nadel 20, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

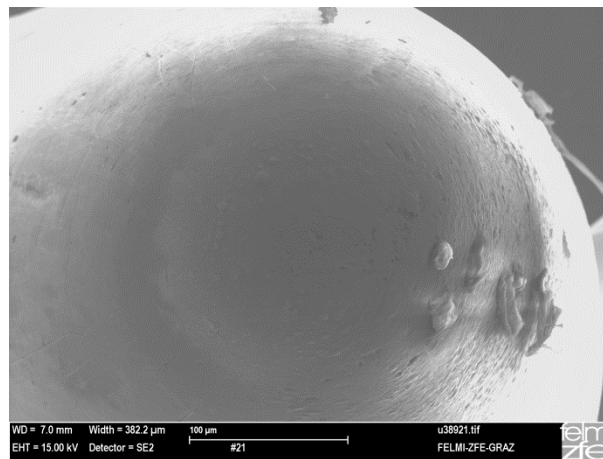


Abb. E.30: Nadel 21, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

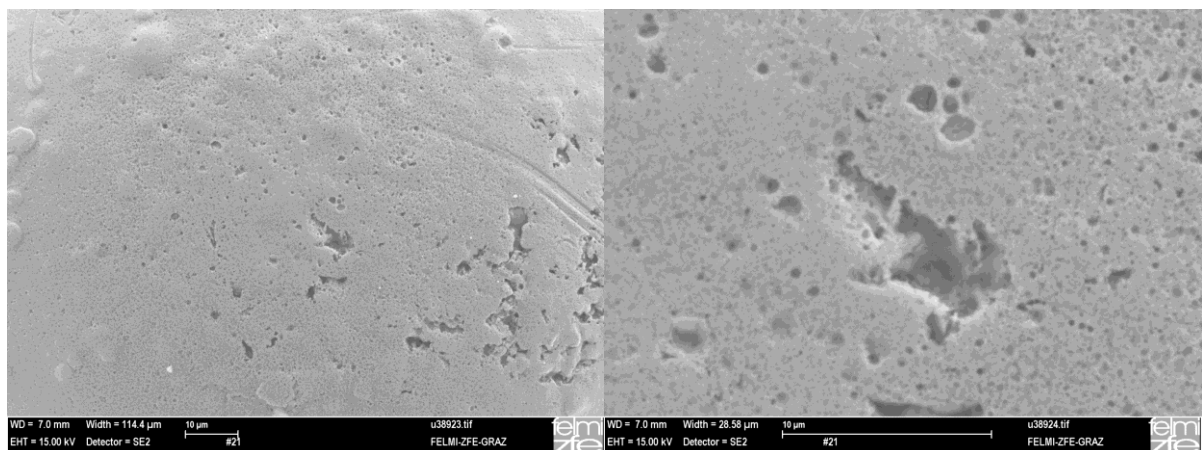


Abb. E.31: Nadel 21, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

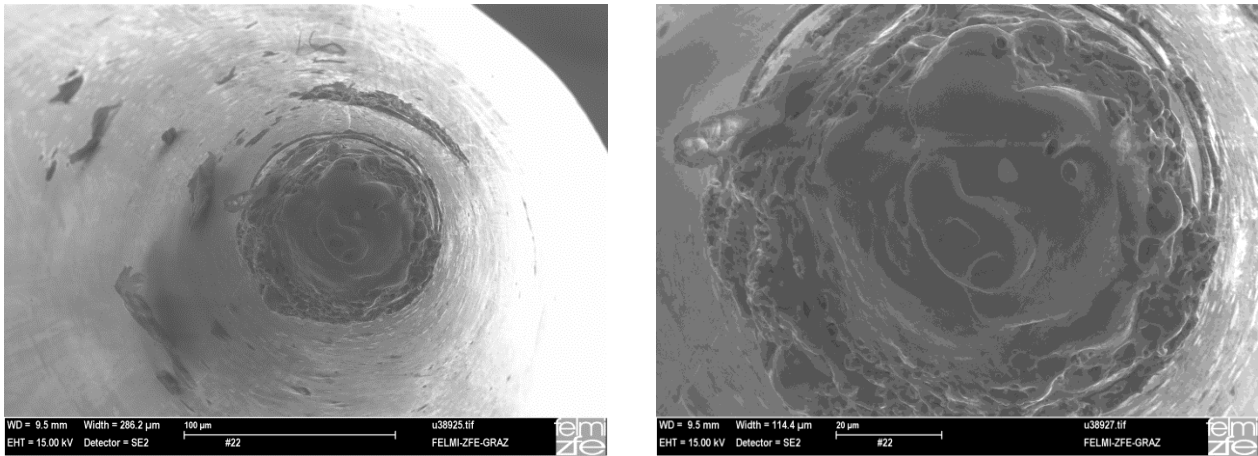


Abb. E.32: Nadel 22, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE],  
Anm.: zweifacher Durchschlag aufgetreten

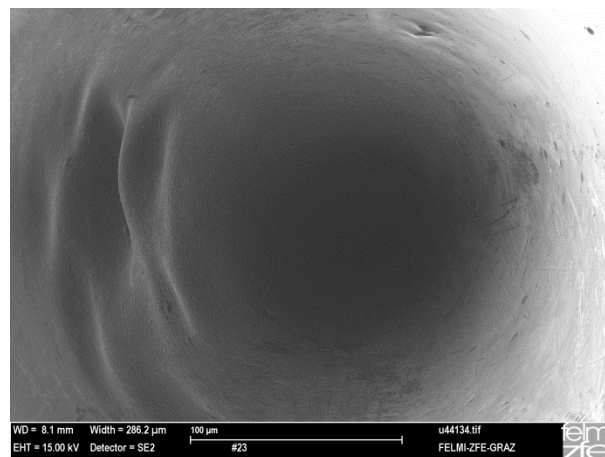


Abb. E.33: Nadel 23, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

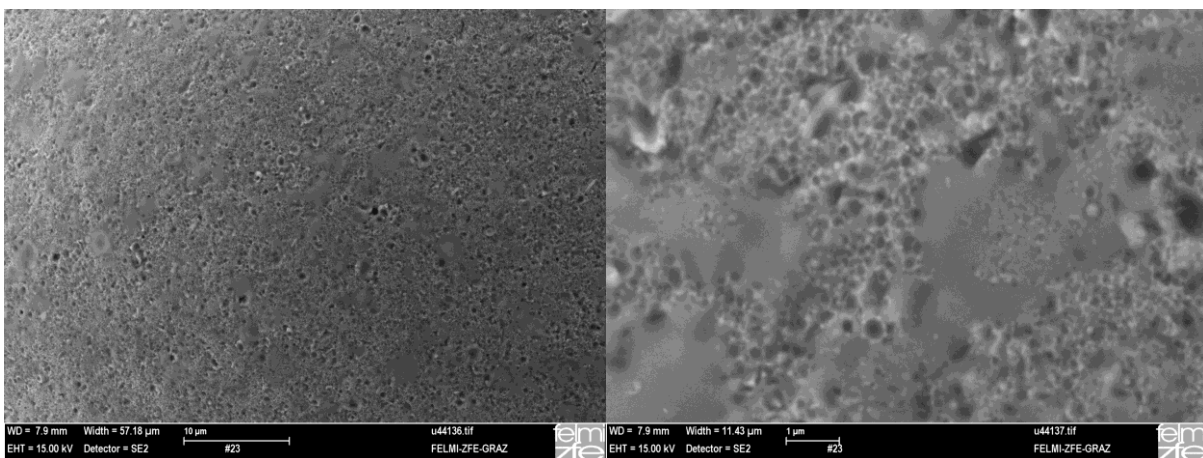


Abb. E.34: Nadel 23, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE],  
Anm.: gecrackte organische Rückstände (verschmolzen) zu erkennen



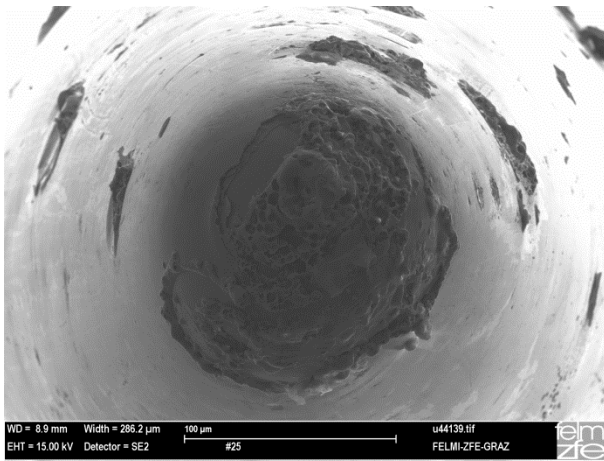


Abb. E.35: Nadel 25, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: Nadeloberfläche auch seitlich aufgeschmolzen, gleiches Material

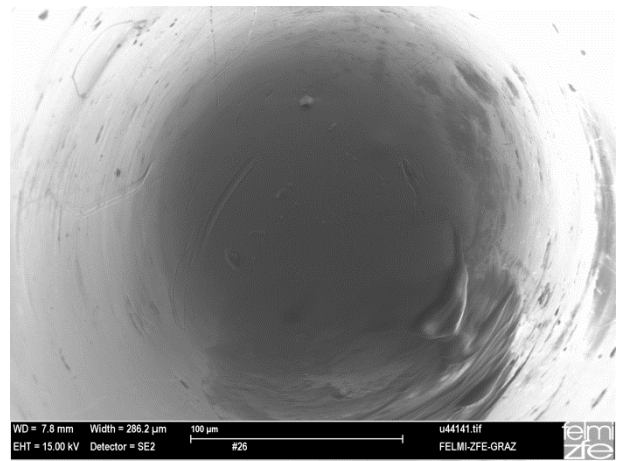


Abb. E.36: Nadel 26, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: organische Rückstände (rechts unten), Nadel fast neuwertig

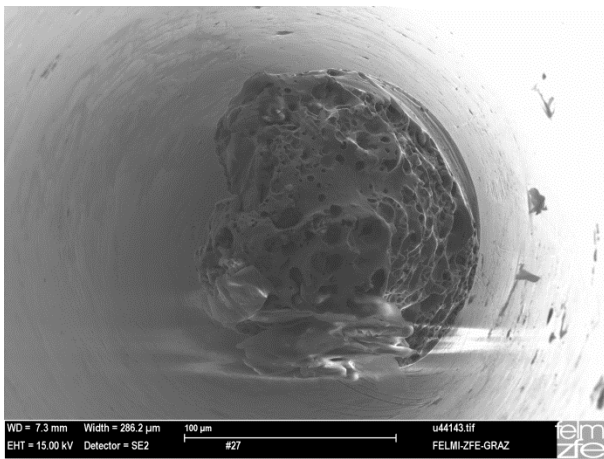


Abb. E.37: Nadel 27, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: Aufladungserscheinungen an organischen Rückständen (im Bild unten)

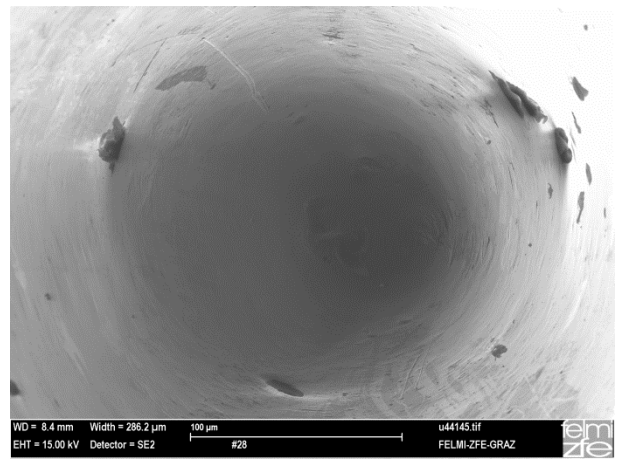


Abb. E.38: Nadel 28, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: keine Beschädigung des Elektrodenmaterials ersichtlich, mechanisch Kratzer an der Nadelspitze sind erhalten geblieben

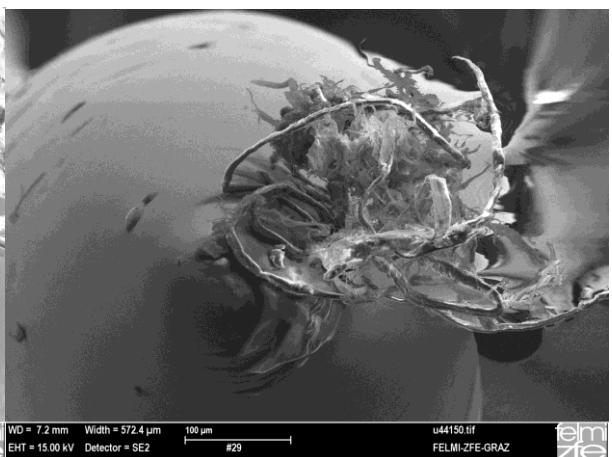
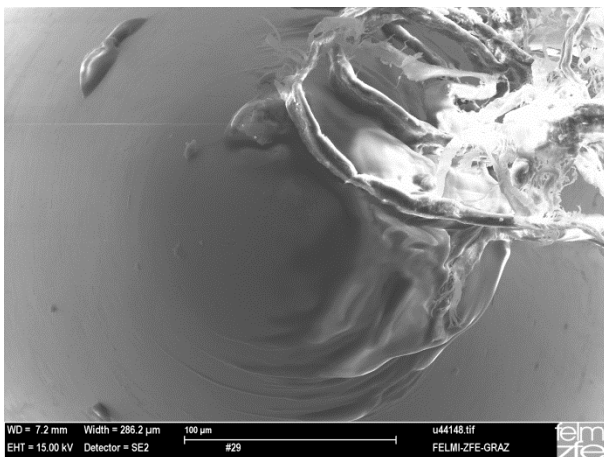


Abb. E.39: Nadel 29, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: Board-Fasern an der Nadelspitze „angeschmolzen“

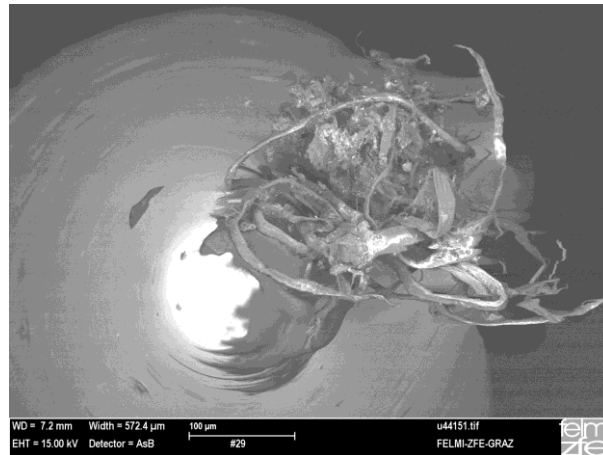


Abb. E.40: Nadel 29, Nadelspitze Draufsicht im Zoom, RE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, AsB-Detektor (Materialkontrast), [FELMI-ZFE]

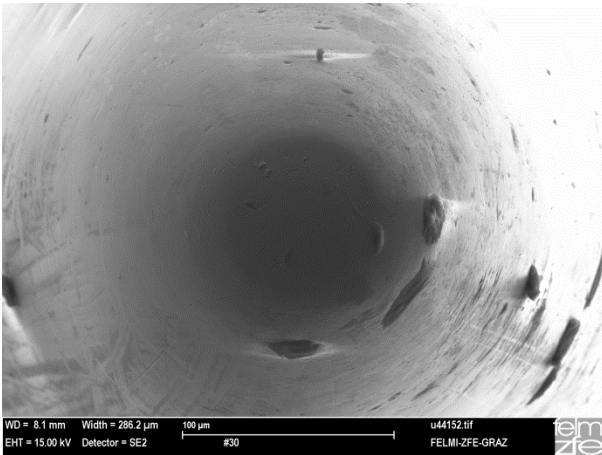


Abb. E.41: Nadel 30, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

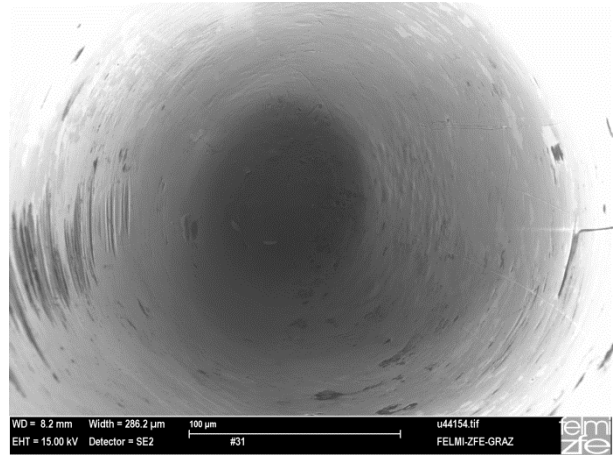


Abb. E.42: Nadel 31, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE]

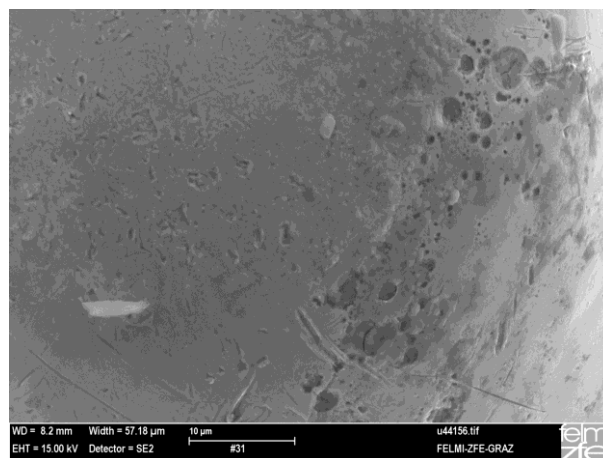


Abb. E.43: Nadel 31, Zoom, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: Zoom auf den „körnigen“ Bereich in der Mitte der Nadelspitze, Auflagefläche erkennbar, außerhalb Überschlüge ins Isoliermedium Öl (Kraterbildung ersichtlich)

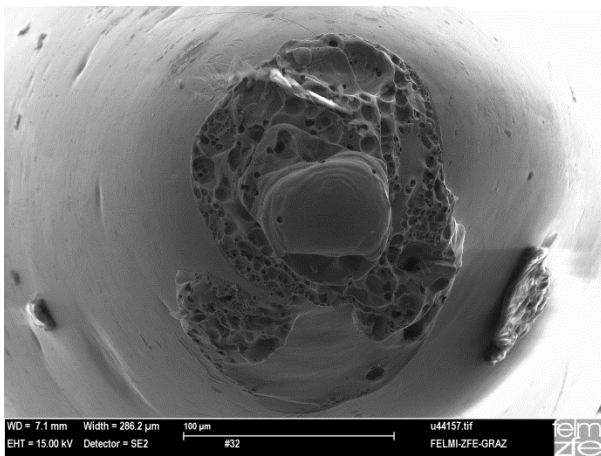


Abb. E.44: Nadel 32, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: Optische TE-Messung, zweimaliger Durchschlag aufgetreten

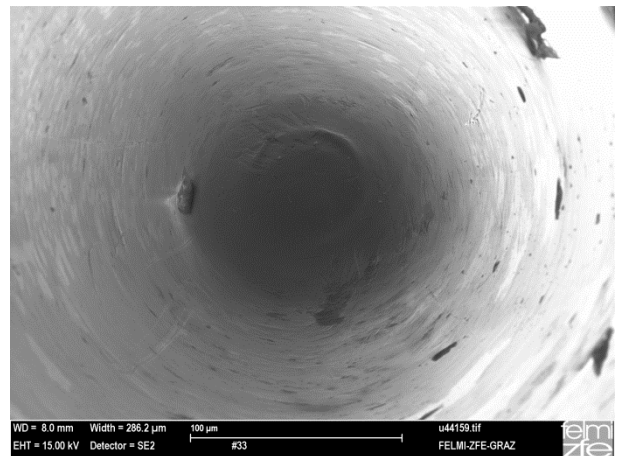


Abb. E.45: Nadel 33, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: Optische TE-Messung

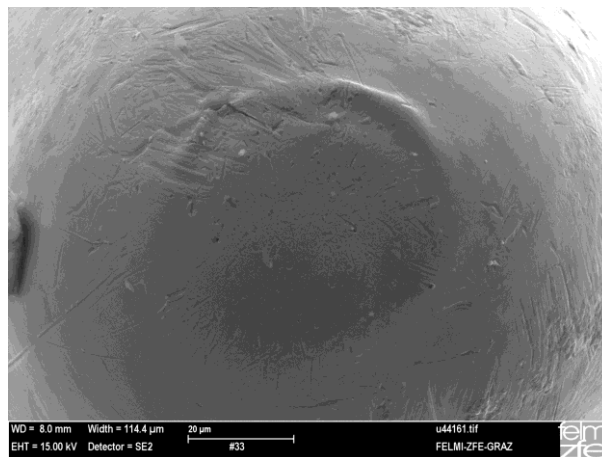


Abb. E.46: Nadel 33, SE-Aufnahme mit Zeiss Ultra 55, [FELMI-ZFE], Anm.: Optische TE-Messung, Wulst erkennbar (ev. Auflagefläche am Board)

### E3. Spezifikation der Rasterelektronenmikroskope

Die folgenden Spezifikationen der Rasterelektronenmikroskope Zeiss Gemini DSM 982 sowie Zeiss Ultra 55 sind der Homepage<sup>35</sup> des Institutes für Elektronenmikroskopie und Feinstrukturforschung wörtlich entnommen [FELMI-ZFE].

#### Zeiss Gemini DSM 982

The Gemini DSM 982 was manufactured by LEO Oberkochen (Germany) and is a very versatile scanning electron microscope enabling high resolution imaging (secondary electrons: SE, backscattered electrons: BSE) of surfaces of a great variety of materials.

#### Key Features

- Analytical high resolution scanning electron microscope
- Field emission gun (FEG)
- EDS detector for elemental analysis even enabling elemental mapping
- Optional: and cryogenic specimen transfer system (developed at FELMI-ZFE)
- EBSD detector for crystallography

#### Essential Specifications:

Resolution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 nm @ 20 kV</li> <li>• 2.5 nm @ 5 kV</li> <li>• 4 nm @ 1 kV</li> </ul>
Emitter	• Thermal Field Emission Gun (FEG)
Accelerating Voltage	• 0.1 – 30 kV
Probe Current	• Can be measured externally with a Faraday cup
Detectors	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Everhart Thornley Detector (ETD): SE, BSE</li> <li>• Solid State Backscattered Electron Detector SSD-BSD: BSE</li> <li>• EDS Detector Thermo Noran Voyager 3105A</li> </ul>
5-Axes Partially Motorised Eucentric Specimen Stage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• X = 50 mm</li> <li>• Y = 50 mm</li> <li>• Z = 25 mm</li> <li>• R = 360° (continuous)</li> <li>• T = -10 - 70° (manually)</li> </ul>
Image Processing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolution: up to 2560 x 2048 pixel</li> <li>• Dwell: 50 ns – 1 ms per pixel</li> </ul>

<sup>35</sup> <http://www.felmi-zfe.tugraz.at>, heruntergeladen am 11.01.2012

## Zeiss Ultra 55

The Ultra 55 represents the latest development in GEMINI<sup>®</sup> technology and comprises a fully integrated energy and angle selective backscattered electron (EsB) detector. The Ultra 55 offers ultra high resolution for both secondary electrons (SE) to image surface information and backscattered electrons (BSE) to present compositional information. The EsB detector features an integrated filtering grid to enhance image quality and requires no additional adjustments. The EsB detector is less sensitive for edge contrast and charging effects with enables precise imaging and measurement of boundaries, particles and features. Combined with the large multi-port analytical chamber, the fully motorised 5-axes motorised eucentric stage and the GEMINI<sup>®</sup> high current mode the ULTRA 55 also offers superb analytical capabilities.

### Key Features

- Ultra high resolution imaging at low kV
- Ideal for precise boundary, feature, and particle measurements
- High efficiency EsB detector for compositional information
- High efficiency In-lens SE detector for high contrast surface imaging
- BSE imaging with the AsB-detector (Angle Selective BSE-Det.) at very short working distances - 1mm WD
- Ultra stable high current mode for x-ray analysis and EBSD applications
- Large five axes motorised eucentric stage
- Easy operation through Windows<sup>®</sup> XP based SmartSEM<sup>™</sup> control software

### Essential Specifications:

Resolution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.0 nm @ 15 kV</li> <li>• 1.7 nm @ 1 kV</li> <li>• 4.0 nm @ 0.1 kV</li> </ul>
Emitter	• Thermal Field Emission Gun (FEG), stability > 0.2%/h
Accelerating Voltage	• 20V - 30 kV
Probe Current	• 4 pA – 30 nA with the AsB-detector (Angle Selective BSE-Det.) at very short working distances
Detectors	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EsB detector with filtering grid (grid voltage 0 - 1500V) BSE</li> <li>• High efficiency In-lens SE detector SE</li> <li>• Everhart-Thornley Secondary Electron Detector SE, BSE</li> <li>• EDS Detector EDAX Phoenix</li> </ul>
5-Axes Motorised Eucentric Specimen Stage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• X= 130 mm</li> <li>• Y= 130 mm</li> <li>• Z= 50 mm</li> <li>• T= -3 - 70°</li> <li>• R= 360° (continuous)</li> </ul>
Image Processing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolution: Up to 3072 x 2304 pixel</li> <li>• Noise reduction: Seven integration and averaging modes</li> </ul>



# Anhang F: Datenblätter

## F1. Nynas Nytro 4000X

PRODUCT DATA SHEET

Nytro 4000X

PROPERTY	UNIT	TEST METHOD IEC	GUARANTEED DATA		TYPICAL DATA
			MIN	MAX	
<b>Physical</b>					
Appearance		IEC 60296	Clear, free from sediment		complies
Density, 20°C	kg/dm <sup>3</sup>	ISO 12185		0.895	0.872
Viscosity, 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104		12.0	9.2
Viscosity, -30°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104		1800	850
Pour point	°C	ISO 3016		-40	-57
<b>Chemical</b>					
Acidity	mg KOH/g	IEC 62021		0.01	<0.01
Corrosive sulphur		DIN 51353	non-corrosive		non-corrosive
Corrosive sulphur		ASTM D 1275 B	non-corrosive		non-corrosive
Corrosive sulphur		IEC 62535	non-corrosive		non-corrosive
Sulphur content	%	ISO 14596		0.15	0.01
Aromatic content	%	IEC 60590			4
Antioxidant, phenols	Wt %	IEC 60666	0.08	0.40	0.39
Water content	mg/kg	IEC 60814		30	<20
Furfural content	mg/kg	IEC 61198		0.1	<0.1
<b>Electrical</b>					
Dielectric dissipation factor (DDF) at 90°C		IEC 60247		0.005	<0.001
Interfacial tension	mN/m	ISO 6295	40		52
Breakdown voltage					
- Before treatment	kV	IEC 60156	30		40-60
- After treatment	kV		70		>70
<b>Oxidation stability</b>					
At 120°C, 500 h		IEC 61125 C			
Total acidity	mg KOH/g			0.30	<0.01
Sludge	Wt %			0.05	<0.01
DDF/90°C				0.050	<0.010
<b>Health, safety and environment</b>					
Flash point, PM	°C	ISO 2719	135		147
DMSO extractable compounds	Wt %	IP 346		3	<3
PCB		IEC 61619	not detectable		not detectable

Nytro 4000X is an inhibited insulating oil with extremely good electrical and excellent ageing properties meeting IEC 60296 (03), special applications.

Severely Hydrotreated Insulating Oil  
Issuing date: 2011-11-14



## F2. Shell Diala S3 ZX-I



### Technical Data Sheet

#### Protect the environment

Take used oil to an authorised collection point. Do not discharge into drains, soil or water.

#### Typical Physical Characteristics

Property	Units	Method	IEC 60296 Table 2 + section 7.1	Shell Diala S3 ZX-I Dried
Appearance		IEC 60296	Clear, free from sediment and suspended matters	Complies
Density at 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 3675	-	881
Density at 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 3675	Max. 895	878
Kinematic viscosity at 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	Max. 12	8,0
Kinematic viscosity at -30 °C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	Max. 1.800	720
Flashpoint P.M.	°C	ISO 2719	Min. 135	138
Pourpoint	°C	ISO 3016	Max. -40	-60
Neutralisation value	mg KOH/g	IEC 62021-1	Max. 0,01	< 0,01
Corrosive Sulphur		DIN 51353	Not corrosive	Not corrosive
Corrosive Sulphur		IEC 62535	Not corrosive	Not corrosive
Corrosive Sulphur		ASTM D 1275 B	-	Not corrosive
Breakdown voltage As delivered After treatment	kV	IEC 60156	Min. 30 Min. 70	>60 >70
Dielectric dissipation factor (DDF) at 90 °C		IEC 60247	Max. 0,005	0,001
Oxidation Stability (500 h / 120 °C) Total acidity Sludge Dielectric dissipation factor (DDF) at 90 °C	mg KOH/g %m	IEC 61125 C	Max. 0,3 Max. 0,05 Max. 0,05	0,02 0,01 0,005
Oxidation Stability Boader (28 d / 110 °C) Neutralisation value Sludge content Dielectric dissipation factor (DDF) at 90 °C	mg KOH/g % m	DIN 51554	- - -	<0,03 <0,006 0,005

These characteristics are typical of current production.

Whilst future production will conform to Shell's specification, variations in these characteristics may occur.



## F3. Shell Diala S3 ZX-IG



Technical Data Sheet

### Protect the environment

Take used oil to an authorized collection point. Do not discharge into drains, soil or water.

### Typical Physical Characteristics

Property	Units	Method	IEC 60296 Requirement	Shell Diala S3 ZX-IG Dried
Appearance		IEC 60296	Clear, free from sediment and suspended matters	Complies
Density at 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 3675	-	890
Density at 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 3675	Max. 895	886
Kinematic viscosity at 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	Max. 12	8,0
Kinematic viscosity at -30 °C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	Max. 1.800	1.100
Flashpoint P.M.	°C	ISO 2719	Max. 135	136
Pourpoint	°C	ISO 3016	Max. -40	-57
Neutralisation value	mg KOH/g	IEC 62021-1	Max. 0,01	< 0,01
Corrosive Sulphur		DIN 51353	Not corrosive	Not corrosive
Corrosive Sulphur		IEC 62535	Not corrosive	Not corrosive
Corrosive Sulphur		ASTM D 1275 B	-	Not corrosive
Breakdown voltage As delivered After treatment	kV	IEC 60156	Min. 30 Min. 70	>60 >70
Dielectric Dissipation Factor (DDF) at 90 °C		IEC 60247	Max. 0,005	0,002
Gassing	mm <sup>3</sup> /min	IEC 60628 A	-	-14
Oxidation Stability (500 h /120 °C)		IEC 61125 C		
Total acidity	mg KOH/g		Max. 1,2	1,0
Sludge	%m		Max. 0,8	0,45
DDF at 90 °C		IEC 60247	Max. 0,5	0,12
Oxidation Stability Baader (28 d /110 °C)		DIN 51554	-	
Neutralisation value	mg KOH/g			0,1
Sludge content	%m			0,01
DDF at 90°C				0,01

These characteristics are typical of current production.  
Whilst future production will conform to Shell's specification, variations in these characteristics may occur.

## F4. Transformerboard T I

# WEIDMANN

B 50 Technische Daten

### 50.1 Technische Daten / Eigenschaften

#### 50.1.1 Technische Daten von TRANSFORMERBOARD T I

Eigenschaft	Dickenbereich	Einheit	Messwert
Dichte	< 1.6 mm	g/cm <sup>3</sup>	1.2
	> 1.6 - 3.0 mm	g/cm <sup>3</sup>	1.1
	> 3.0 mm	g/cm <sup>3</sup>	1.0
Zugfestigkeit MR	< 1.6 mm	MPa	105
	> 1.6 - 3.0 mm	MPa	97
	> 3.0 mm	MPa	85
Zugfestigkeit QR	< 1.6 mm	MPa	76
	> 1.6 - 3.0 mm	MPa	72
	> 3.0 mm	MPa	66
Dehnung MR	-	%	7.5
Dehnung QR	-	%	8.5
Schrumpfung MR	-	%	0.7
Schrumpfung QR	-	%	0.9
Schrumpfung Dicke	-	%	4.1
Spaltfestigkeit	-	N/30mm	340
Feuchtigkeitsgehalt	-	%	< 8.0
Aschegehalt	-	%	0.3
Leitfähigkeit des wässrigen Auszugs	-	mS/m	2.3
pH des wässrigen Auszugs	-	-	7.0
Ölaufnahme	< 1.6 mm	%	14
	> 1.6 - 3.0 mm	%	22
	> 3.0 mm	%	28
Elektrische Festigkeit in Öl	< 3.0 mm	kV/mm	56
	≥ 3.0 mm	kV/mm	43

Die technischen Daten für TRANSFORMERBOARD sind typische Ergebnisse unserer Routineprüfungen welche in WEIDMANN-Laboratorien nach IEC 60641-2 und IEC 60243-1 durchgeführt wurden. Diese typischen Werte sind keine Spezifikation unserer Produkte.

Technische Daten / Eigenschaften

B 50.01 - 1/5 d

Edition	Replaces	Folger
Mai 2010	April 03	Compendium/ Deutsch

WEIDMANN ELECTRICAL TECHNOLOGY AG  
 Neue Jonastrasse 60, 8640 Rapperswil, Switzerland  
 T +41 55 221 46 30, F +41 55 221 46 31, www.weidmann-electrical.com

A Member of the WINDOR Group

## F5. Transformerboard T IV

# WEIDMANN

B 50 Technische Daten

### 50.1.3 Technische Daten von TRANSFORMERBOARD T IV

Eigenschaft	Dickenbereich	Einheit	Messwert
Dichte	< 1.6 mm	g/cm <sup>3</sup>	1.1
	> 1.6 - 3.0 mm		1.2
	> 3.0 mm		1.2
Zugfestigkeit MR	< 1.6 mm	MPa	114
	> 1.6 - 3.0 mm		124
	> 3.0 mm		134
Zugfestigkeit QR	< 1.6 mm	MPa	86
	> 1.6 - 3.0 mm		92
	> 3.0 mm		102
Dehnung MR	-	%	3.9
Dehnung QR	-	%	4.6
Schrumpfung MR	-	%	0.4
Schrumpfung QR	-	%	0.5
Schrumpfung Dicke	-	%	4.4
Spaltfestigkeit	-	N/30mm	320
Feuchtigkeitsgehalt	-	%	< 6.0
Aschegehalt	-	%	0.3
Leitfähigkeit des wässrigen Auszugs	< 1.6 mm	mS/m	1.8
	> 1.6 - 3.0 mm		2.5
	> 3.0 - 6.0 mm		5.0
	> 6.0mm		6.7
pH des wässrigen Auszugs	-	-	6.8
Ölaufnahme	-	%	13
Kompressionsverhalten C	< 1.6 mm	%	7.3
	> 1.6 - 3.0 mm		4.8
	> 3.0 - 6.0 mm		3.6
	> 6.0mm		3.3
Kompressionsverhalten C <sub>rev</sub>	< 1.6 mm	%	53
	> 1.6 - 3.0 mm		60
	> 3.0 - 6.0 mm		72
	> 6.0mm		78
Elektrische Festigkeit in Öl	< 3.0 mm	kV/mm	53
	≥ 3.0 mm		51

Die technischen Daten für TRANSFORMERBOARD sind typische Ergebnisse unserer Routineprüfungen welche in WEIDMANN-Laboratorien nach IEC 60641-2 und IEC 60243-1 durchgeführt wurden. Diese typischen Werte sind keine Spezifikation unserer Produkte.

Technische Daten / Eigenschaften	B 50.01 - 3/5 d
----------------------------------	-----------------

Edition	Replaces	Folger
Mai 2010	April 03	Compendium/ Deutsch

WEIDMANN ELECTRICAL TECHNOLOGY AG  
 Neue Jonastrasse 60, 8540 Rapperswil, Switzerland  
 T +41 55 221 46 30, F +41 55 221 46 31, www.weidmann-electrical.com

A Member of the WINDOR Group

## F6. Pressspan TD 12

# WEIDMANN

B 50 Technische Daten

### 50.1.5 Technische Daten von Pressspan TD 12

Eigenschaft	Dickenbereich	Einheit	Messwert
Dichte	-	g/cm <sup>3</sup>	1.15
Zugfestigkeit MR	-	MPa	90
Zugfestigkeit QR	-	MPa	67
Dehnung MR	-	%	6.5
Dehnung QR	-	%	7.1
Spaltfestigkeit	-	N/30mm	230
Schrumpfung MR	-	%	0.6
Schrumpfung QR	-	%	0.8
Schrumpfung Dicke	-	%	4.2
Feuchtigkeitsgehalt	-	%	< 8.0
Aschegehalt	-	%	4.3
Leitfähigkeit des wässrigen Auszugs	-	mS/m	8.6
pH des wässrigen Auszugs	-	-	8.5
Ölaufnahme	-	%	17
Elektrische Festigkeit 50 in Öl	< 3.0 mm	kV/mm	51
	≥ 3.0 mm	kV/mm	41

Die technischen Daten für Pressspan TD 12 sind typische Ergebnisse unserer Routineprüfungen welche in WEIDMANN-Laboratorien nach IEC 60641-2 und IEC 60243-1 durchgeführt wurden. Diese typischen Werte sind keine Spezifikation unserer Produkte.

Technische Daten / Eigenschaften

B 50.01 - 5/5 d

WEIDMANN ELECTRICAL TECHNOLOGY AG  
 Neue Jonastrasse 60, 8640 Rapperswil, Switzerland  
 T +41 55 221 46 30, F +41 55 221 46 31, www.weidmann-electrical.com

A Member of the WICOR Group

Edition	Replaces	Folter
Mai 2010	April 09	Compendium / Deutsch

## F7. Nomex Type 994



### NOMEX® TYPE 994

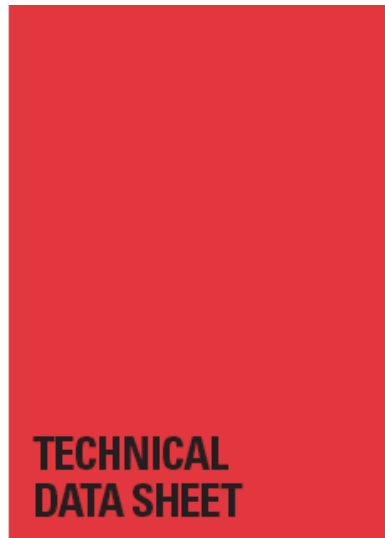
Type 994 is a densified, rigid board which has a unique combination of superior resistance to compression, even at elevated temperatures, along with relatively high oil absorption characteristics. This combination results in a product which is especially useful as spacers or other structural components in liquid-filled systems. With a specific gravity ranging from 1.1 to 1.2, Type 994 pressboard is available in 13 thicknesses from 1.0 to 9.6 mm (40 to 380 mils), as is shown in Table I.

#### Electrical properties

The typical electrical property values for Type 994 pressboard in air and oil are shown in Tables II and III. The AC Rapid Rise dielectric strength data of Table III represent voltage stress levels withstood for 10 to 20 second time periods at a frequency of 60 Hz. These values differ from long-term strength potential. DuPont recommends that continuous stresses in dry-type transformers not exceed 1.6 kV/mm (40V/mil) to minimize the risk of partial discharges (corona). The Full Wave Impulse dielectric strength data of Table III were generated on flat sheets, such as in layer and barrier applications. The geometry of the system has an effect on the actual impulse strength values of the material. The dielectric strength data are typical values and not recommended for design purposes. Design values can be supplied upon request.

The data in Tables II and III are representative of data for all thicknesses of Type 994. Type 994

pressboard will pick up 8 to 10% oil by weight, with the oil absorption being inversely related to density. This impregnability is rare among rigid insulating materials. As with Type 410 paper, the values for the properties listed will vary somewhat with changes in thickness and density. The effects of temperature on dielectric strength and dielectric constant are shown for Type 410 paper in Figure 1 of the Type 410 data sheet. Since Type 994 pressboard is chemically identical to Type 410 paper, its electrical properties will react similarly to temperature changes.



**PLEASE NOTE:**  
The properties in this data sheet are typical, or average values and should not be used as specification limits. Unless otherwise noted, all properties were measured in air under "standard" conditions (in equilibrium at 23°C, 50% relative humidity). Note that, like other products of boardmaking technology, NOMEX® brand pressboards have somewhat different properties in the boardmaking machine direction (MD) compared to the cross direction (XD). In some applications it may be necessary to orient the board in the optimum direction to obtain its maximum potential performance.

Table I – TYPICAL PROPERTIES

Nominal (mm)	1.0	1.5	2.0	3.0	3.2	4.0	4.8	5.0	6.0	6.4	7.0	8.0	9.6
Thickness (mil)	40	60	80	120	125	160	190	200	240	250	275	315	380
Typical <sup>1)</sup> (mm)	1.00	1.49	2.00	3.01	3.18	4.01	4.78	5.01	6.00	6.34	7.01	8.02	9.62
Thickness (mil)	39	59	79	118	125	158	188	197	236	250	276	316	379
Basis													
Weight <sup>2)</sup> (kg/m <sup>2</sup> )	1.15	1.71	2.31	3.45	3.66	4.55	5.48	5.69	6.77	7.15	8.04	9.07	11.07
Density <sup>3)</sup> (g/cc)	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.14	1.15	1.14	1.13	1.13	1.15	1.13	1.15

<sup>1)</sup> ASTM D-374; Method D, using 17 N/cm<sup>2</sup>  
<sup>2)</sup> ASTM D-3394  
<sup>3)</sup> Calculated using basis weight and thickness

Table II – TYPICAL ELECTRICAL PROPERTIES IN AIR

Nominal Thickness (mm)	3.2	6.4
Dielectric Constant <sup>1)</sup> at 60 Hz	3.5	3.5
Dissipation Factor <sup>1)</sup> at 60 Hz (x10 <sup>-2</sup> )	7	10
Volume Resistivity <sup>2)</sup> (ohm-m)	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>
Surface Resistivity <sup>2)</sup> (ohm/square)	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>

Values shown above were measured at 23°C after drying at 120°C until bone dry  
<sup>1)</sup> ASTM D-150  
<sup>2)</sup> ASTM D-257





## Anhang G: Geräteverzeichnis

### G.1 Leitfähigkeitsmessungen für Isolieröl

Tabelle 6: Verwendete Messgeräte für die Leitfähigkeitsmessungen in Isolieröl

Messgerät	Hersteller/Type	Beschreibung/Messbereich
<b>DC Spannungsquelle</b>	danbridge DB 604 megohmmeter	50 V bis 5 kV in 1 V Schritten Genauigkeit: $\pm 2\%$ des Wertes od. $\pm 1\text{ V}$
<b>Elektrometer</b>	Keithley 617 Programmable Electrometer	<i>Bereich</i> <i>Auflösung</i> <i>Genauigkeit</i>
		2 pA            100 aA $\pm 1,6\%$ rdg + 66 counts
		20 pA           1 fA $\pm 1,6\%$ rdg + 7 counts
		200 pA          10 fA $\pm 1,6\%$ rdg + 1 counts
		2 nA            100 fA $\pm 0,25\%$ rdg + 5 counts
20 nA           1 pA $\pm 0,25\%$ rdg + 1 counts		
<b>Elektrometer</b>	Keithley 6514 System Electro- meter	<i>Bereich</i> <i>Auflösung</i> <i>Genauigkeit</i>
		20 pA           100 aA $\pm 1\%$ rdg + 30 counts
		200 pA          1 fA $\pm 1\%$ rdg + 5 counts
		2 nA            10 fA $\pm 0,2\%$ rdg + 30 counts
		20 nA           100 fA $\pm 0,2\%$ rdg + 5 counts
<b>Voltmeter</b>	Keithley 195A Digi- tal Multimeter	<i>Bereich</i> <i>Auflösung</i> <i>Genauigkeit</i>
		200 mV        1 $\mu\text{V}$ $\pm 0,01\%$ rdg + 6 counts
		2 V            10 $\mu\text{V}$ $\pm 0,01\%$ rdg + 8 counts
<b>Tastkopf</b>	Tektronix P6015	1000X 3 pF 100 M $\Omega$
<b>Temperatur-Schreiber</b>	Yokogawa DX1006- 1-4-2	DAQstation
<b>Tettex Messzelle</b>	Tettex AG Instru- ments	S/N 133 029
<b>Tettex Messzelle beheizt</b>	Tettex Zürich AG	S/N 128 156
<b>BAUR DTL</b>	BAUR DTL oil tester	Spezifischer Widerstand $\rho_+$ / $\rho_-$ 2,5 M $\Omega\text{m}$ bis 20 T $\Omega\text{m}$ $\pm 3\%$
<b>Lufttemperatur- und Luftfeuchte- Sensor</b>	Vaisala HMP 235	-40 °C bis +180 °C $\pm 0,1\text{ °C}$ 0 bis 100 %rH $\pm 2\%$ rH
<b>Coulometrische Karl Fischer Titra- tion</b>	831 KF Coulometer, 728 Stirrer, Metrohm	Wassergehalt (in ppm)
<b>Analysenwaage</b>	GR-300-EC, A&D Instruments LTD	Abwiegen der Ölprobe (in g) 10 mg bis 310 g, +10 °C bis +30 °C Auflösung: 0,1 mg

Tabelle 7: Technische Daten BAUR DTL [Datenblatt Ident.Nr. 812-079, 01/698]

<b>Verlustfaktor</b>	Bereich	0,00001 bis 4,910 (50 Hz)
	Auflösung	$1 \cdot 10^{-5}$
<b>Relative Dielektrizitätszahl</b>	Bereich	1 bis 30
	Auflösung	$\pm 1 \%$
<b>Spezifischer Widerstand <math>\rho^+</math> / <math>\rho^-</math></b>	Bereich	2,5 M $\Omega$ m bis 20 T $\Omega$ m
	Auflösung	$\pm 3 \%$
<b>Prüfspannung</b>	AC	500 bis 2000 V $\pm 0,5 \%$
	DC (+/-)	125 bis 500 V $\pm 0,2 \%$
<b>Temperatur</b>	Bereich	11 °C bis 110 °C $\pm 0,4 \%$
	Auflösung	0,1 °C
<b>Prüfzelle MC2A</b>	Material	V2A Edelstahl
	Aufbau	Testzelle mit Schutzring, drei Elektroden und Quarzglas- ringen; Prüfzelle entsprechend IEC 60247
	Probeninhalt	ca. 45 ml
	Elektrodenabstand	2 mm
	Effektive Leerkapazität	68,5 bis 71,5 pF

## G.2 Leitfähigkeitsmessungen für Board

Tabelle 8: Verwendete Messgeräte für die Leitfähigkeitsmessungen von Board

<b>Messgerät/Komponente</b>	<b>Beschreibung/Bezeichnung</b>
<b>DC-Spannungsquelle</b>	FuG
<b>Elektrometer</b>	Keithley 6514 System Electrometer
<b>Voltmeter</b>	Keithley 2001
<b>Hochspannungstastkopf HVP-40</b>	AC 28 kV, DC 40 kV, Conrad Electronics GmbH
<b>Ölfeuchtetransmitter</b>	Vaisala MMT338
<b>Feuchte- und Temperaturtransmitter für Raummessungen</b>	Vaisala HMP235



### G.3 Teilentladungsmessungen

Tabelle 9: Verwendete Messgeräte/Komponenten für die Teilentladungsmessung

Messgerät/Komponenten	Beschreibung/Bezeichnung
TE-Messsystem	ICMsystem, Power Diagnostix Systems [ICM 3.03E]
Ankoppelvierpol CIL4L	C = 0,6 - 2,5 nF, I = 50 mA max.
Vorverstärker RPA1	Eingangsimpedanz: 10 k $\Omega$ /50 pF Bandbreite: 20 kHz - 1 MHz (mit ICMsystem 40 - 800 kHz) Dämpfung: 40 dB/Dekade Eingangsempfindlichkeit: <200 $\mu$ V Power Diagnostix Systems [ICM 3.03E]
Spannungsmessung HST1	Eingangsimpedanz: 10 M $\Omega$ /200 pF Eingangsbereich: 100 V <sub>RMS</sub> (200 V <sub>peak</sub> ) Bandbreite: 30 - 400 Hz Power Diagnostix Systems [ICM 3.03E]
Kalibrator CAL1D	Gemäß IEC 60270 Bereich: 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 pC Power Diagnostix Systems [ICM 3.03E]
Multimeter	Keithley 2000 Votcraft M-4660M
Oszilloskop (DC-Welligkeit)	Yokogawa DL 1620 200 MS/s, 200 MHz, 2 Kanäle
Oszilloskop (Impulsverhalten)	Yokogawa DL 9040, 5 GS, 500 MHz, 4 Kanäle
optisches TE-Messsystem	Eigenbau Univ.-Doz. Dr. Robert Schwarz [SCH02]
Pressgaskondensator 1:1000	Hochspannungsbaukastensystem
Widerstandsteiler 1:10.000	Eigenbau Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz
Feuchte- und Temperaturtransmitter für Raummessungen	Vaisala HMT333



*„Nimm die Welt von der leichten Seite, dann bleibt der Geist frei von jeder Last.“ – Laotse*

## Über den Autor

Jürgen Fabian wurde am 21. August 1983 in Graz geboren, Mutter Handelsangestellte, Vater Optiker. Nach erfolgreichem Abschluss der Höheren Technischen Bundes-Lehr- und Versuchsanstalt für Maschinenbau und Elektrotechnik (HTBL u. VA BULME Graz-Gösting) in der Fachrichtung Energietechnik und industrielle Elektronik mit verstärkter Englischausbildung (mit ausgezeichnetem Erfolg bestanden), widmete sich Herr Fabian dem Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Graz. Hier vertiefte er weiterführend seine Ausbildung im Studienschwerpunkt Elektrische Anlagentechnik, welche er ebenfalls mit ausgezeichnetem Erfolg abschloss. Seit 2008 wendete sich Herr Dipl.-Ing. Fabian innerhalb seines Doktoratsstudiums intensiv der Hochspannungstechnik zu, worin er schließlich seine Berufung fand.



In seiner Anstellung als Universitätsassistent konnte Herr Fabian durch die Abhaltung von Lehrveranstaltungen sowie die Betreuung von Studierenden als auch das Publizieren von Fachartikeln und durch die Teilnahme an internationalen Kongressen und Tagungen seinen Horizont vielfältig erweitern. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH konnte er viele praktische Erkenntnisse sowie Erfahrungen sammeln. Ebenso wertvoll war die Zeit als Schaltwart im E-Werk Gösting, in welcher Herr Fabian während seines Diplomstudiums neben den technischen Aufgaben ebenfalls in der Kundenbetreuung tätig war. Zurzeit besucht er den Universitätslehrgang „Pulp and Paper Technology“.

In seiner bisherigen wissenschaftlichen Karriere wurde Herr Dipl.-Ing. Jürgen Fabian für seine Diplomarbeit 2009 mit dem „Young Energy Award“ sowie 2011 mit der Erfinder-Ehrung der Technischen Universität Graz ausgezeichnet.

Im Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE) engagiert sich Herr Fabian äußerst aktiv in seiner Funktion als Mitbegründer und Vorsitzender der OVEyoungEngineers, einer Plattform für junge Absolventinnen und Absolventen. Er ist weiters Mitglied in einer Arbeitsgruppe der Cigré sowie einer Arbeitsgruppe des IEC, als auch innerhalb des VDE und IEEE tätig.

Der begeisterte Kampfsportler (1. Dan Taekwondo) erholt sich privat gerne beim „Triathlon“: Swimmingpool, Whirlpool und Sauna.