



Carsten Maurer, B.Eng.

Dielektrische Untersuchung der Eignung von Esterflüssigkeiten in Barriersystemen bei Hochspannungstransformatoren

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz
Institut für Hochspannungstechnik und Systemtechnik

Dipl.-Ing(FH) M. Eng. MAS ETH MTEC Philipp Schmitt
Weidmann Electrical Technology

Graz, Juni 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

1. Juni 2016

Datum

Unterschrift

Vorwort

Diese Masterarbeit entstand im Rahmen eines Praktikums im Zeitraum von Mai bis November 2015 bei der Firma Weidmann Electrical Technology in Rapperswil, welche mir großzügig ein Hochspannungslabor und die erforderliche Infrastruktur zur Durchführung der Untersuchungen zur Verfügung stellte.

Mein besonderer Dank gilt den Kollegen, welche mir mit Rat und Tat zu Seite standen, insbesondere meinem firmenseitigen Betreuer Herrn Philipp Schmitt!

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Rudolf Woschitz bedanken, welcher die fachliche Betreuung und Beurteilung der Arbeit seitens des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz übernommen hat!

Kurzfassung

Alternative Isolierflüssigkeiten mit hohem Brennpunkt und einer hohen Umweltverträglichkeit werden bereits seit einigen Jahrzehnten erfolgreich in Verteiltransformatoren zur Substitution von Mineralöl eingesetzt. Für große Übertragungstransformatoren gibt es dagegen nur einige Pilotprojekte. Die Gründe für den zögerlichen Einsatz liegen in der nicht hinreichenden Kenntnis für die dielektrische Dimensionierung, welche für eine zuverlässige und wirtschaftliche Auslegung unabdingbar ist. Eines der Hauptthemen spielt dabei die dielektrische Dimensionierung. Um weitere Kenntnisse über die eingesetzten Materialien zu bekommen, wurde mittels elektrischer Feldstudien ein Versuchsaufbau entwickelt, welcher Teile eines Barrierensystems nachbildet. Mit diesem Versuchsaufbau wurden im Hochspannungslabor anhand eines dazu entworfenen Prüfprogramms Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit verschiedenen Analyseverfahren ausgewertet, um die Eignung der Isolationsflüssigkeiten für den Einsatz in Barrierensystemen zu überprüfen.

Schlüsselwörter: Öl-Zellulose-Isolationssystem; natürliche und synthetische Esterflüssigkeiten; Barrierensysteme; Transformator; HVAC

Abstract

Alternative liquid insulation with high burning point and a high environmental sustainability impact are used successfully to substitute the mineral oil which has been used for decades in distribution transformers. However, for large transmission transformers, only a few pilot projects are under investigation. It could be due to the inadequate knowledge about the dielectric dimensioning, which is essential for a reliable and economical design. As already mentioned, one of the most influential index in proper design of the barrier system, is the dielectric dimensioning. To achieve deep knowledge about the properties of the used materials, a test setup was developed by electrical field studies, which recreates parts of a barrier system. Various assessment and evaluation has been performed by the mentioned experimental set-up in the high voltage laboratory. In order to implement the examinations, a test procedure was developed. Finally, in order to verify the suitability of the liquid insulation for using in barrier systems, the results were evaluated with various analysis methods.

Keywords: Oil-cellulose insulation systems, natural and synthetic ester liquids; barrier system; transformer; HVAC

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Vorwort.....	II
Kurzfassung	III
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	2
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Dielektrische Beanspruchung mit AC	3
2.1.1 Elektrische Festigkeit	3
2.1.2 Entladung in Flüssigkeiten	3
2.1.3 Öl-Design Kurven	4
2.1.4 Erhöhung der dielektrischen Festigkeit durch Barrierensysteme	5
2.2 Isolationsflüssigkeiten	6
2.2.1 Mineralöl	7
2.2.2 Ester.....	7
2.2.3 Gegenüberstellung der Isolierflüssigkeiten	9
2.3 Transformerboard	12
2.4 Methode der statistischen Auswertung mit Vorgeschichte.....	14
3 Präzisierung der Aufgabenstellung.....	16
Projektbeschreibung	16
4 Parameterstudien zur Entwicklung und Optimierung des Versuchsaufbaus.....	17
4.1 Verlängerung der Erdelektrode.....	19
4.2 Änderung der Radien des Erddoms	21
4.3 Entwicklungsschritte hin zum Versuchsaufbau	23
4.4 Ermittlung der idealen Länge der Distanzierungsstücke	27
4.5 Festgelegter Versuchsaufbau	29
4.5.1 Resultierende Veränderungen.....	29
5 Versuchsprogramm.....	32
6 Vorbereitung und Handhabung der Prüflinge	36
6.1 Montage	36
6.2 Trocknung.....	36
6.3 Imprägnierung.....	36
6.4 Einbau der Prüflinge	37
Protokollierung der Versuchsbedingungen	39

6.4.1	Bezeichnung der Prüflinge	39
6.4.2	Durchschlagsspannung	39
6.4.3	Ölfeuchte und Temperatur	39
6.4.4	Luftfeuchte und -temperatur	40
7	Durchgeführte Untersuchungen	41
7.1	Bestimmung der Permittivitäten	41
7.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung der Messung	41
7.1.2	Ergebnisse	42
7.2	Versuchsaufbau im Hochspannungslabor	44
7.2.1	Prüfanlage	44
7.2.2	Prüfkessel	46
7.3	Dielektrische Untersuchungen	46
7.3.1	Teilentladungsmessung	46
7.3.2	Allgemeines Prüflingsverhalten und Optimierungen am Versuchsaufbau	47
8	Auswertung	49
8.1	Ausbau und Dokumentation der Prüflinge	49
8.2	Analyse der Lokalität der Schwachstelle	51
8.3	Schema zur Auswertung der Teilentladungen	52
8.3.1	Mineralöl MO	54
8.3.2	Synthetisches Ester SE	54
8.3.3	Natürliches Ester	54
8.4	Statistische Auswertung	55
8.4.1	Berechnung des statistischen Teilentladungseinsatzes	55
8.4.2	Statistische Unabhängigkeit	55
8.5	Histogramme	57
8.5.1	Große Ölspaltweite	57
8.5.2	Kleine Ölspaltweite	58
8.5.3	Resümee	58
8.6	Elektrische Feldstärken in Abhängigkeit der Ölspaltweite	59
8.6.1	Ermittlung der auftretenden elektrischen Feldstärken	59
8.6.2	Elektrische Feldstärken des einprozentigen Teilentladungseinsatzes	61
9	Schlussfolgerung und Ausblick	62
10	Zusammenfassung	63
	Abbildungsverzeichnis	64
	Literaturverzeichnis	66
	Anhang	69
	Anhang A: Report des Prüfaufbaus der 8 mm Ölspaltweite	69

Anhang B: Prüflingskennblätter	74
Anhang C: Übersichtsdarstellung der Teilentladungen - chronologisch.....	104

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Koeffizient zur Berechnung der Öl-Design-Kurven	
AC	Wechselstrom, engl. alternating current	
a _w	relativer Wassergehalt in der Isolierflüssigkeit	
D	Dielektrische Verschiebungsdichte	C/m ²
D(x)	Dichtefunktion	
E	elektrische Feldstärke	kV/mm
E _d	Durchschlagsfeldstärke	kV/mm
E _{pd}	Teilentladungseinsetzfeldstärke	kV/mm
F(x)	Verteilungsfunktion	
GND	Erde, engl. Low Voltage	
H	Haltewahrscheinlichkeit	
HV	Hochspannung, engl. High Voltage	
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission, engl. International Electrotechnical Commission	
j	Zählindex	
k	Weibull-Exponent	
MO	Mineralöl	
n	Zählindex	
NE	natürliches Ester	
P	Wahrscheinlichkeit	
ppm	Teile pro Million, engl. parts per million	
s	Streuung	
SE	synthetisches Ester	
tanδ	Verlustfaktor	
TE	Teilentladung	
U	Spannung	kV
U _{1%}	Spannung mit der Ausfallwahrscheinlichkeit ≤ 1 %	
φ	Exponent	

1 Einleitung

Durch das Verbot im Rahmen der Stockholmer Konvention 2001 von Polychlorierte Biphenyle PCB als brandhemmende Substanz in Isolierölen, war eine neue ungiftige, schwer entflammbare und umweltverträgliche Alternative gefragt. Dies führte mit zur Entwicklung alternativer Isolationsflüssigkeiten. Eine Möglichkeit dazu war teures Silikonöl zu verwenden, da dies einen hohen Brennpunkt aufweist. Jedoch ist es wie auch Mineralöl MO als wassergefährdend eingestuft und kaum biologisch abbaubar. Weiter lässt sich Silikonöl nur bedingt in Stufenschaltern einsetzen, da es nur eine geringe Schmierfähigkeit aufweist, nicht tolerierbare Eigenschaften unter Lichtbogenbelastung und unter starken elektrischen Feldern aufweist. Unter starken elektrischen Feldern bilden sich gelartige Ablagerungen aus Siliziumoxid, die zur Brückenbildung in der Isolierstrecke führt. Dadurch wird die Spannungsfestigkeit herabgesetzt. Ferner setzt unter der Belastung durch Schaltlichtbögen die pyrolytische Zersetzung ein, welche Siliziumsand erzeugt, der sich katastrophal auf die mechanische Lebensdauer beweglicher Teile auswirkt [Fro13].

Die Forschung und Entwicklung führte zur Entwicklung von synthetischen und natürlichen Esterflüssigkeiten. Diese werden schon Jahrzehnte erfolgreich in Verteiltransformatoren eingesetzt. Da auch für Leistungstransformatoren aufgrund der guten Umwelteigenschaften und der erhöhten Brandsicherheit das Interesse besteht Ester einzusetzen wurden um Betriebserfahrungen zu sammeln schon einige Pilotanlagen realisiert. Die Versprechungen welche damit erhofft werden, sind durch besseren Brandschutz und Umweltverträglichkeit auch urbane und ökologische sensible Gebiete (Wasserschutzgebiet) mit höheren Spannungsebenen zu erschließen zu können. Damit könnte man mit den mittlerweile verfügbaren Komponenten wie GIS, GIL, Kabel etc. ein neues Layout in der Netztopologie realisieren, was ein verlustarmes Verteilen elektrischer Energie in Megacities ermöglichen würde. Durch die komplett gekapselten Komponenten ohne Freiluftkomponenten in den Schaltfeldern wäre es machbar große Hochspannungsanlagen unauffällig ins Stadtbild einzufügen. Die Abwärme könnte an thermische Verbraucher abgegeben werden und somit die Effizienz weiter zu erhöhen. Ein weiterer Verwendungszweck sind auf Offshore Anlagen wie sie zur Übertragung von der auf offenem Meer installierter Windenergieanlagen eingesetzt werden. Dort ist es wichtig auf Umweltverträglichkeit und hohen Brandschutz zu achten.

Um neue Transformatoren auf Esterflüssigkeiten auszulegen zu können, ist es notwendig das chemisch physikalische Verhalten genauer zu untersuchen und zu studieren. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem dielektrischen Verhalten im Mischdielektrikum Isolierflüssigkeit-Transformerboard dem Barriensystem. Dazu war ein geeigneter Versuchsaufbau eines möglichst realitätsgetreuen Modells eines Barriensystems anhand elektrischer Feldstudien zu entwickeln. Limitierende Faktoren waren dabei das Einhalten des gegebenen Kostenrahmens, der praktischen Umsetzbarkeit bezüglich der Fertigung.

2 Stand der Technik

2.1 Dielektrische Beanspruchung mit AC

2.1.1 Elektrische Festigkeit

Unter der elektrischen Festigkeit wird der Wert verstanden, an dem das Isolationssystem die angelegte Spannung gegenüber fremden Potentialen noch sicher isolieren kann. Die Grenze der elektrischen Festigkeit einer Isolierung wird mit dem Erreichen der Durchschlagsfeldstärke an beliebiger Stelle erreicht. Die Folgen davon sind der partielle oder gar vollständige Verlust des Isoliervermögens, dabei werden zwischen temporärem und bleibendem Verlust entsprechend selbst- oder nicht-selbstheilende Isolierungen unterschieden. Bei flüssigen und gasförmigen Isolierstoffen ist die Regeneration durch Konvektion und damit verbundener Vermischung gegeben, im Gegensatz zu festen Isolierstoffen bei denen es zu einer Dauerhaften Schädigung kommt. Diese Grenze kann je nach Temperatur, Spannungsform, Beanspruchungsdauer und Geometrie der Anordnung variieren [Kin78].

Die Ermittlung der sich ergebenden elektrischen Feldverteilung zur Konstruktion von Isolationskomponenten ist daher von großer Bedeutung. Dies erfolgt mittels Feldsimulationsprogrammen. Die Auslegung kann anhand in der Literatur bekannten Werte, basierend auf eigener Messungen und Betriebserfahrung erfolgen. Abhängig von der Schwankung in der Materialbeschaffenheit und der Fertigung kann es auch zu Fehlstellen wie Partikel, Gaseinschlüssen, scharfkantigen Stellen, floatenden Potentialen etc. kommen. Diese erhöhen zusätzlich das Risiko einer durch Teilentladungen verursachten schleichenden Erosion des Isolierstoffes. Durch kontinuierliche Qualitätskontrollen können diese Faktoren eingedämmt werden. Da für die Betriebspraxis die Kenntnis über die sicher isolierende Spannung sehr wichtig ist, muss ein Nachweis unter praktischen Bedingungen erfolgen. Dies kann in Form von Prototypentests im Labor, Typentests in der Fabrik oder in Form von vor Ort-Prüfungen geschehen.

Im mittleren Bereich des verwendeten Prüfaufbaus sind die Dielektrika aus Pressboard und Öl parallel zur Elektrodenoberfläche geschichtet, daher verläuft die Grenzfläche zwischen den Dielektrika quer zum elektrischen Feld. Die Normalkomponente der Verschiebungsflussdichte \mathbf{D} verläuft stetig

$$D_{2n} = D_{1n} \quad (2-1)$$
$$\varepsilon_2 \cdot E_{2n} = \varepsilon_1 \cdot E_{1n}$$

und die Normalkomponenten von \mathbf{E} verhalten sich

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2-2)$$

umgekehrt proportional zum Verhältnis der Permittivitäten. Das bedeutet am konkreten Beispiel des Board-Öl Mischdielektrikum mit der Permittivität im Öl von $\varepsilon_{r\text{Öl}} = 2,2$ und im Board von $\varepsilon_{r\text{Board}} = 4,4$, dass im Öl aufgrund der Feldverdrängung die doppelte elektrische Feldstärke vorhanden ist. Man bezeichnet dies Feldverdrängung ins Medium mit der geringeren Permittivitätszahl.

2.1.2 Entladung in Flüssigkeiten

Da es für den Flüssigkeitsdurchschlag noch keine umfassende geschlossene Theorie gibt, wurde aufgrund der Ähnlichkeiten der Entladungen in Gasen und Flüssigkeiten bisher oft die Theorie der Gasentladungen angewandt. Jedoch ist in idealen Flüssigkeiten die direkte Ausbildung von Elektrolawinen durch Stoßprozesse aufgrund der zu geringen freien Weglänge nicht möglich.

Reale Flüssigkeiten enthalten jedoch Bereiche niedriger Dichte, sogenannte „Mikrobläschen“ in denen Entladungen eher gezündet werden [Sin90].

Die Modelerweiterung der Perkolationsstheorie nach Kist besagt, dass es an den Elektroden durch hohe Feldstärken zur Bildung von Bereichen kommt, in denen ein elektronischer Ladungstransport durch quantenmechanischer Prozesse (Hopping, Tunneln) stattfindet. Durch Ladungsnachschub aus den Elektroden können sich weitere besser leitfähige Bereiche mit hoher Stromdichte bilden. Diese breiten sich durch die lokale Erwärmung und niedriger Dichte in Kanälen bäumchenartig weiter aus, es wird quasi die Struktur zur weiteren Ausbreitung selbst geschaffen. Die Struktur dieser Primärstreamer ist stark polaritätsabhängig. Weiter reichende sich schneller ausbreitende Sekundärstreamer wachsen kanalförmig zur Gegenelektrode an und mündet im selbstleuchtenden Teritärstreamer (Leader), der Hauptentladung welche zum Durchschlag führt [Kis99].

2.1.3 Öl-Design Kurven

Bei der Auslegung von Öl-Board Isolationssystemen wird auf bereits bekanntes statistisch abgesichertes Wissen über die Festigkeit der Isolierstoffe zurückgegriffen. Da die elektrische Festigkeit von imprägniertem Transformerboard bei Wechselspannungsbelastung weit über der von den verwendeten flüssigen Isolierstoffe liegt und die Belastung aufgrund der Feldverdrängung vom Board ins Öl, konzentriert man sich bei der Auslegung vor allem auf die Ölkanäle. Das Ziel der Auslegung ist, Betriebsmittel mit einer geringen Wahrscheinlichkeit für Teilentladungen (1%) zu entwerfen. Als Kriterium dazu wird die elektrische Feldstärke E_{pd} (pd:engl. „partial discharges“ für Teilentladungen) herangezogen, diese gilt für die Stehspannungsprüfung bei 50 Hz und 1 min. Mit zunehmender Ölspaltweite nimmt die elektrische Festigkeit, aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit von ausgedehnten Schwachstellen ab. Zur Berücksichtigung der Abnahme der Festigkeit bei blanken Elektroden und gasgesättigtem Öl werden für die unterschiedlichen Szenarien eigene Festigkeitsbereiche festgelegt. Die Kennwerte dazu ist die jeweilige Festigkeit bei 1 mm Ölspaltweite. Die Abnahme mit zunehmender Spaltweite wird durch den Exponenten a festgelegt. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel.

$$E_{pd}(d) = E_{pd}(1\text{mm}) \cdot \left(\frac{d}{\text{mm}}\right)^{-a} \quad (2-3)$$

In Abbildung 2-1 sind die für Mineralöl festgelegten Festigkeitsbereiche dargestellt:

- **Graph 1** gilt für entgasetes Öl zwischen Transformerboard-Barrieren;
($E_{pd}(1\text{ mm}) = 21,5\text{ kV/mm}$, $a = 0,37$)
- **Graph 2** gilt für gasgesättigtes Öl zwischen Transformerboard-Barriere
($E_{pd}(1\text{ mm}) = 18,5\text{ kV/mm}$, $a = 0,37$)
- **Graph 3** gilt für entgasetes Öl zwischen blanken Elektroden wie z.B. Wicklungen
($E_{pd}(1\text{ mm}) = 17,5\text{ kV/mm}$, $a = 0,37$)
- **Graph 4** gilt für gasgesättigtes Öl zwischen blanken Elektroden
($E_{pd}(1\text{ mm}) = 14\text{ kV/mm}$, $a = 0,37$)

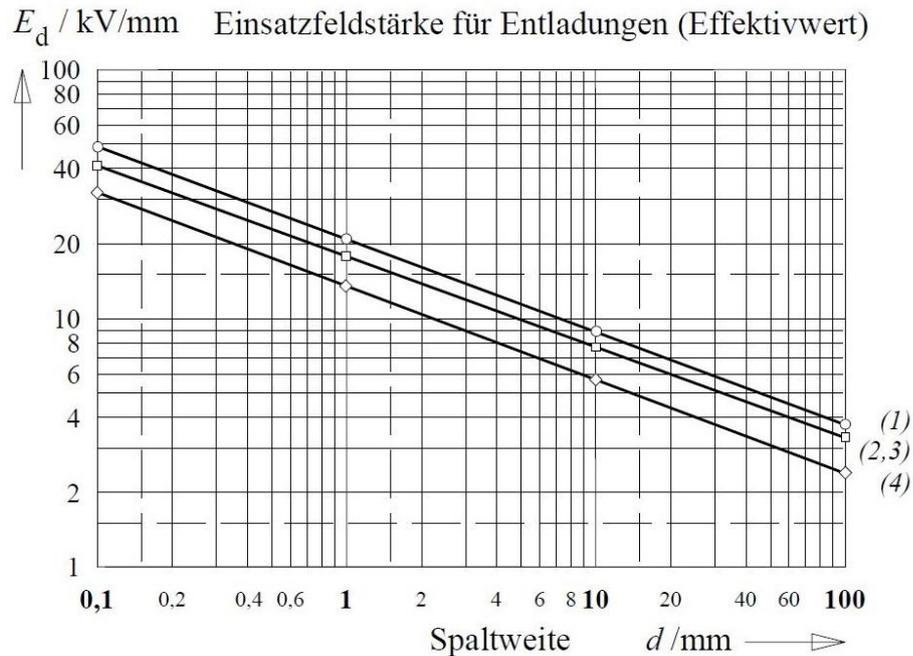


Abbildung 2-1 – Öl-Designkurven zur Bestimmung von Ölspaltweiten [Küc09]

Zur Überprüfung, ob die Designkurven welche für Mineralöl vorgesehen sind auch auf andere Isolierflüssigkeiten zutreffen ist es sinnvoll mindestens zwei unterschiedliche Ölspaltweiten für praktische Versuche zu wählen. Damit kann ein Trend erkannt werden, ob die Messpunkte sich gut mit der Kurve decken oder sehr davon abweichen. Abweichungen könnten zu einer Änderung der Höhe $E_{pd}(1 \text{ mm})$ und auch zur Veränderung des Exponenten der Steigung a führen, was ggf. korrigiert werden müsste.

2.1.4 Erhöhung der dielektrischen Festigkeit durch Barrierensysteme

Ölkanäle mit blanken Elektroden weisen eine geringe elektrische Festigkeit auf als beschichtete, daher sollten Elektroden mit fester Isolation umformt werden. In langen Ölkanälen sinkt die elektrische Festigkeit mit zunehmenden Abstand durch [Volumeneffekt: mehr Störstellen wie Fasern, Gasblasen, etc.]. Eingehend mit einer hohen statistischen Streuung des Entladungseinsatzes ist so eine Zuverlässige Auslegung des Isolationssystems sehr schwierig und erfordert hohe Sicherheitsfaktoren. Indem der einzelne Ölkanal in mehrere engere Einzelvolumen aufgeteilt wird, verringert sich die Streuung in den einzelnen Kanälen und somit auch die Streuung der gesamten Isolationsstrecke. In Abbildung 2-2 wird der Zusammenhang verdeutlicht wie bei gleichbleibender Spannung durch Beschichtung der Elektroden mit Transformerboard die Isolationsabstände reduziert werden können und durch Einsatz von Barrieren dieser Abstand noch weiter reduziert werden kann, um damit das benötigte Volumen, das Gewicht und letztendlich die damit verbundenen Kosten zu verringern. Durch das Verhältnis der Permittivitäten $E_B/E_{Öl} = \epsilon_B / \epsilon_{Öl} = 0,5$ sind die Boardbarrieren nur gering belastet und nehmen somit nur einen geringen Anteil am Spannungsabfall ein. Deshalb sind die Barrierendicken aus elektrischer Sicht möglichst dünn zu gestalten. Vom Prinzip her würde schon eine Isolierpapierstärke genügen, jedoch ist auch die mechanische Festigkeit wichtig, um die Formstabilität im Normalbetrieb und Extrembelastungen wie Kurzschlüssen, Erdbeben, Transport, etc. zu gewähren. Eine Dicke von 2 mm erscheint daher als guter Kompromiss [WEI]. Da die elektrische Feldstärke im Zylinderfeld proportional zu $1/r$ abfällt, werden die Ölspaltweiten nach außen hin verbreitert, die elektrische Festigkeit zweckmäßig an die lokale elektrische Feldstärke anzupassen (siehe Abbildung 2-3). Eine zu Breite Wahl der Dicke würde auch zu viel Volumen in

Anspruch zu nehmen, besser ist es daher das gewonnene Volumen für eine Erhöhung der Barrierenanzahl zu verwenden. Eine Barriere hat den Zweck Entladungskanäle in der Ausbreitung zu hindern. Der Hauptzweck besteht jedoch darin bereit die Zündung zu verhindern. Dies erfolgt durch das Verhindern der Ausbildung von Strukturen, welche die Zündung von Entladungen begünstigen (Perkolationsbereiche, Faserbrücken) [WEI]

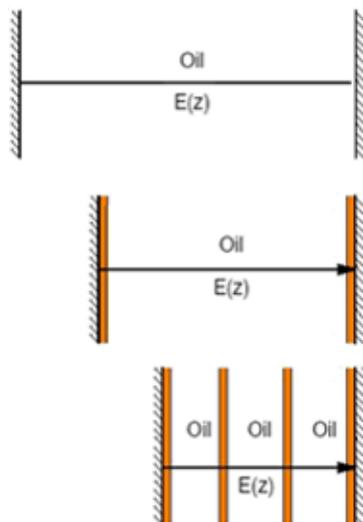


Abbildung 2-2 – Reduktion der Isolationsabstände durch Umformung der Elektroden und dem Einsatz von Barrieren

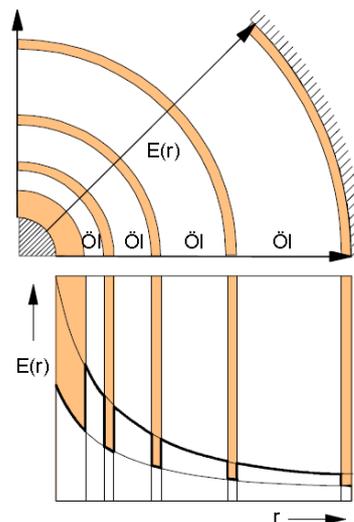


Abbildung 2-3 – Anpassung der elektrischen Festigkeit und der Spaltweite an die lokale Feldstärke in einem inhomogenen Feld [WEI]

2.2 Isolationsflüssigkeiten

Die drei Hauptaufgaben von im Transformator eingesetzten Flüssigkeiten sind die Spannungsfestigkeit der Isolation herzustellen, die in den Wicklungen entstehende Wärme abzuführen und mechanisch bewegliche Teile im Stufenschalter zu schmieren. Weitere Anforderungen ergeben sich aus der Materialkompatibilität zu den im Transformator verwendeten Stoffe, Sicherheitsaspekten, der Umweltverträglichkeit und auch der Alterungsstabilität. In den nächsten Abschnitten wird die Zusammensetzung von Mineralöl und den Esterflüssigkeiten dargestellt und erläutert wie sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Flüssigkeiten im Transformator auswirken.

2.2.1 Mineralöl

Die in Transformatoren eingesetzten Mineralöle bestehen vorwiegend aus vier verschiedenen Kohlenwasserstoffgruppen, der Paraffine, Naphthene, Aromaten und Olefine (siehe Abbildung 2-4). **Paraffine** auch Alkane genannt sind doppelbindungs-freie Ketten-moleküle, besitzen diese Verzweigungen werden sie auch „Iso-Paraffine“ genannt. Ihr freies Fließen wird bei Kälte beeinträchtigt, daher ist die Eignung als Isolierflüssigkeit bei tiefen Temperaturen nicht mehr gegeben. Weitere Einschränkungen sind die geringe thermische Stabilität, sowie das geringe Feststoff- und Wasserlösungsvermögen, welches zur Verschlammung beiträgt. **Naphthene** (Cyclo-Paraffine) sind ringförmige Kohlenwasserstoffe ohne Doppelbindungen, sie besitzen ein besseres Stofflösungsvermögen und besseres Tief-temperaturverhalten. **Aromate** sind ringförmige Moleküle aus sechs Kohlenstoff-atomen mit abwechselnden Doppel- und Einzelbindungen. Monocyclische Aromaten besitzen eine gute Gaslösemöglichkeit und eine oxidationsstabilisierende Wirkung. Jedoch sind sie nur beding alterungsbeständig, daher werden sie vorzugsweise in Kondensatoren eingesetzt. Dort wird die Gaslösefähigkeit ausgenutzt. Polycyclische Aromaten sind gesundheitsschädlich (krebserregend) und haben elektrisch betrachtet ungewünschte Eigenschaften, wie das Herabsetzen der elektrischen Festigkeit, vor allem bei Stoßspannung und die Eignung sich bei vorhandener Strömung (statisch) aufzuladen. Aus diesen Gründen werden diese Aromaten bereits während des Produktionsprozesses entfernt. **Olefine** werden eigentlich auch zu den Paraffinen gezählt, jedoch haben diese Doppelbindungen und sind dadurch teilweise ungesättigt, dies macht sie chemisch angreifbar und setzt die Alterungs- und Oxidationsstabilität herab. Aus diesem Grund enthalten heutige Isolieröle nur noch einen geringen Anteil an Olefinen [Ebe11]. Um eine hohe Alterungsbeständigkeit zu gewährleisten, wird neben spezieller Raffinationsverfahren auf Additive zurückgegriffen. Die Hauptbestandteile dabei sind Antioxidantien und Metallpassivatoren [Hem04]. Das in den Untersuchungen verwendete Mineralöl ist das Nytro 4000A von der Fa. Nynas [Nyn].

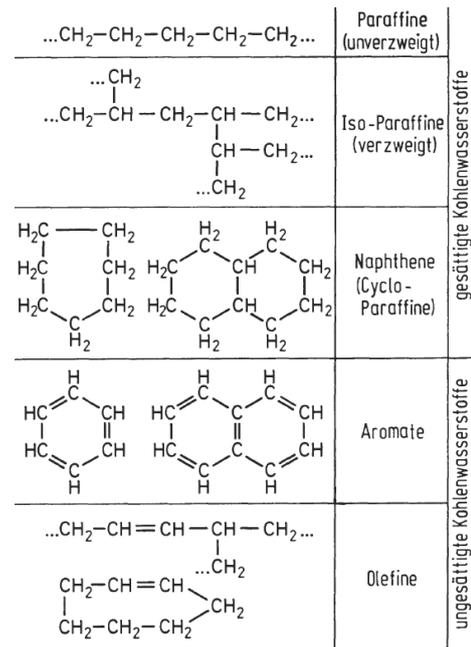


Abbildung 2-4 – Molekülstrukturen von Mineralöl [Bey86]

2.2.2 Ester

Durch die chemische Reaktion von Alkoholen mit anorganischen und organischen Säuren bildet sich Wasser und Ester (Veresterung). Umgekehrt können unter dem Einfluss von Wasser manche Ester wieder in ihre Alkohol- und Säurekomponenten zerfallen, dieser hydrolytische Prozess wird auch als Verseifung bezeichnet (siehe Abbildung 2-5). Es wird zwischen synthetischem Esterflüssigkeiten und natürlichem Fetten und Ölen die branchenüblich als „Natürliche Ester“ bezeichnet werden unterschieden [Ebe11] [Puk10].

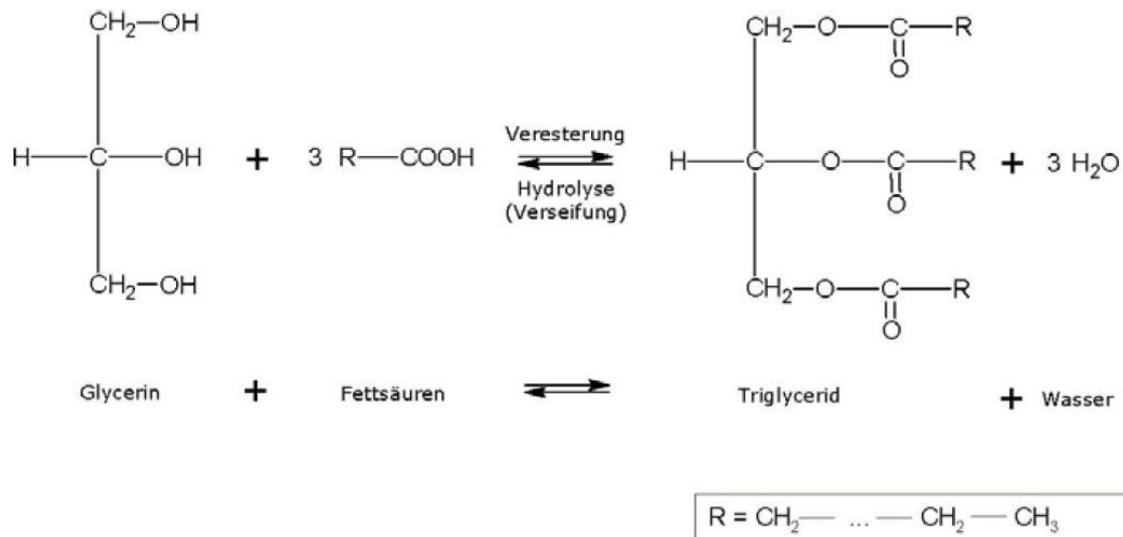


Abbildung 2-5 – Reaktionsgleichung für die Entstehung von Rapsöl [Hem04]

Synthetisches Ester

Als synthetischer Ester SE wurde in den Untersuchungen das MIDEL 7131 von der Fa. M&I ausgewählt. Es wird künstlich durch die nahezu vollständige Veresterung der Moleküle des Alkohols Pentaerythrit hergestellt. Dadurch werden die Seitenketten gegen eine hydrolytische Spaltung abgeschirmt und es ergeben sich aufgrund der kontrollierbaren Moleküllängen hervorragende Werte der Viskosität, auch bei tiefen Temperaturen. Wie schon beim MO erwähnt werden auch beim SE Additive zur Verbesserung der Eigenschaften hinzugegeben [Dum99]. Für die Materialkompatibilität gibt es gegenüber MO einige Einschränkungen, welche der Hersteller auf der Homepage [Mid] bekannt gibt. Beispielsweise betrifft dies den Kunststoff PVC, der Weichmacher an das MIDEL 7131 abgibt und mit der Zeit brüchig wird oder bestimmte Kautschukrezepturen z.B. für Dichtungen deren Zusatzstoffe nicht mit MIDEL 7131 kompatibel sind werden hart und brüchig [Fro13].

Natürliches Ester

In der vorliegenden Arbeit wurde für natürliches Ester FR3 vom Hersteller Cargill verwendet. Es besteht vorwiegend aus Sojaöl und wurde noch mit Antioxidantien und grünem Farbstoff versehen. Hauptsächlich bestehen Pflanzenöle aus Triglyceridmolekülen mit drei veresterten Fettsäuren. Diese unterscheiden sich je nach verwendeter Pflanze, was sich wiederum in der Kettenlänge und im Sättigungsgrad bemerkbar macht. Sind die Valenzelektronen über die gesamte Kette mit Wasserstoff besetzt und gibt es keine Doppelbindung zwischen Kohlenstoffmolekülen, so spricht man von gesättigten Fettsäuren. Der hohe Sättigungsgrad macht die Fettsäuren unempfindlich gegen Oxidation, erhöhen die Viskosität und den Stockpunkt (Pourpoint). Je nach Anzahl an vorkommenden Doppelbindungen spricht man von einfach, doppelt oder mehrfach ungesättigten Fettsäuren. Hierbei sind gegenteilige Effekte wie bei gesättigten Fettsäuren festzustellen. Brechen Ketten an ihren Doppelbindungen auf und verkürzen sich sinkt die elektrische Festigkeit. Die verbleibenden Reste der Kette als Säuren schädigen die Zellulose und erhöhen die Depolymerisation. In der Praxis einigt man sich auf den Kompromiss bezüglich Alterung und Zähflüssigkeit und Polymerisation und setzt einen möglichst hohen Anteil ungesättigter Fettsäuren ein. Durch Luftabschluss des Transformators kann die Oxidation gering gehalten werden [Ebe11].

2.2.3 Gegenüberstellung der Isolierflüssigkeiten

Nachfolgend wird auf die wesentlichen Eigenschaften der in Transformatoren verwendeten Isolierflüssigkeiten eingegangen. Die einzelnen Werte in Tabelle 2-1 stellen sich aus Literaturangaben zusammen und unterliegen der dort vorgefundenen Bandbreite, da sich sonst ein zu lückenhaftes Bild der Datenlage ergäbe.

- **Durchschlagsspannung**

Bei Verwendung von Isolierflüssigkeiten in Transformatoren ist deren Isolationsfestigkeit wichtig. Gasblasen, Verunreinigungen wie z.B. Partikel, Zersetzungsprodukte und eine zu hohe Feuchtigkeit setzen die zu isolierende Spannung herab. Daher kann die Durchschlagsspannung nicht als feste Eigenschaft festgelegt werden, sondern ist aufgrund ihres stochastischen Charakters in Form einer Messreihe mit mehreren Messpunkten festzustellen.

In dieser Arbeit erfolgte die Angabe der Durchschlagsspannung nach der Messmethode mit Kugelkalotten und einem definierten Abstand von 2,5 mm nach IEC 60156. Der verwendete Durchschlagstester Baur DTA 100 C führte nach einfüllen der Flüssigkeit und Auswahl des Programms die Messung vollautomatisch durch und lieferte die einzelnen Messpunkte, den Mittelwert, die Standardabweichung und den Mittelwert der Standardabweichung als Protokoll. Laut Datenblatt unterscheiden sich das MO, das SE und das NE mit ca. 70 kV kaum voneinander, jedoch ergaben sich für die Ester in der Praxis höhere Streuungen.

- **Permittivität**

Die etwas höheren Permittivitäten der Esterflüssigkeiten von 3,x ergeben gegenüber Mineralöl mit 2,2 ein kleineres Epsilon Verhältnis von Board zur Isolierflüssigkeit. Dies wirkt sich positiv auf die Feldstärkenverteilung im Zweischichtdielektrikum Flüssigkeit-Board aus. Durch die gleichmäßigere Feldverteilung wird der Ester entlastet.

- **Verlustfaktor**

Die Verluste, welche in einem Dielektrikum auftreten, werden durch den Verlustfaktor beschrieben. Diese Verluste stellen die im resistiven Anteil in Wärme umgesetzte Energie dar. Indem der verlustbehaftete Realteil zum verlustfreien Imaginärteil ins Verhältnis gesetzt wird, erhält man den Verlustfaktor, dieser ist gleich dem Tangens des Verlustwinkels δ zwischen der komplexen Größe und ihrem Imaginärteil. Vor allem bei festen Isolierstoffen besteht noch die Gefahr eines thermischen Durchgehens. Darunter versteht man die Verkettung, dass mit ansteigender Temperatur auch der Verlustfaktor ansteigt und dadurch die Temperatur ungehindert weiter bis zur Überhitzung des Materials ansteigt. Wird diese Kette nicht vor dem Kippunkt unterbrochen führt dies zur Zerstörung des Materials.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Dauerhaften Verluste, welche die Wirtschaftlichkeit verringern. Im Sinne eines möglichst störungsfreien und eines ertragreichen Betriebes ist daher auf einen geringen Verlustfaktor bei der Auswahl der Isolierstoffe zu achten.

- **Viskosität**

Die Viskosität von Isolierflüssigkeiten beeinflusst im Transformator vor allem das Fließverhalten und das damit verbundene Imprägnier- und Kühlverhalten. Für die Kühlung bedeutet eine höhere Viskosität wie sie bei Esterflüssigkeiten gegenüber Mineralöl vorhanden ist, dass die passive Umwälzung bei gleichem Querschnitt langsamer erfolgt oder dass mehr Energie für die aktive Umwälzung benötigt wird, da der hydraulische Strömungswiderstand proportional mit

der Viskosität steigt [Puk12]. Am stärksten beeinflusst wird die Viskosität durch die Temperatur, fällt diese so steigt die Viskosität bis zum Erreichen des Stockpunktes. Der Vorteil von Estern bei tiefen Temperaturen ist, dass die Wicklungstemperatur schneller erreicht wird [Hem04]. Ein weiterer Aspekt ist, dass durch die höhere Viskosität bei Estern es ca. dreimal länger dauert bis vorhandene Gasblasen wieder aufsteigen. Ab einer gewissen Höhe der Viskosität bleiben vor allem kleinere Bläschen in einem Gleichgewichtszustand in der Flüssigkeit stehen. Die dynamischen Gleichungen für die Gleichgewichtsbedingungen dafür, lassen sich nach den Abhandlungen in [Dum99] genauer berechnen.

Für die Imprägnierung bedeutet eine höhere Viskosität, dass die Flüssigkeit langsamer die Zellulose durchdringen kann. Dem kann entgegen gewirkt werden, indem bei Estern die Temperaturen während des Imprägniervorganges angehoben werden.

- **Wärmeleitung**

Mit eine der Hauptaufgaben von Isolierflüssigkeiten ist das zuverlässige Kühlen des Betriebsmittels. Um die entstehende Verlustwärme schnell abführen zu können ist eine gute Wärmeleitung wichtig. Dabei weisen die Ester tendenziell etwas höhere Werte auf, was aus thermischer Sicht eine höhere Leistungsdichte und damit kleinere Bauformen zulässt.

- **Thermische Kapazität**

Durch eine hohe Wärmekapazität lässt sich die abzuführende Verlustwärme über temporäre Zeiträume zwischenspeichern. Damit lässt sich ein zu schnelles Erwärmen des Betriebsmittels, welches zur Überhitzung führen könnte abfangen. Je höher die thermische Kapazität und die Flammpunkttemperatur sind, desto eher ist ein Brand des Betriebsmittels auszuschließen. Bei SE und auch NE ist diese Kombination hervorragend, wodurch sich eine hohe Brandsicherheit ergibt.

- **Wärmeausdehnung**

Die thermische Expansion der Isolierflüssigkeit ist für die Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes entscheidend, da sich dort der Füllstand bei Temperaturschwankungen nur in den vorgesehenen Grenzen bewegen soll. Zum Tragen kommt dieser Effekt auch bei einer Substitution von Mineralöl durch Esterflüssigkeiten.

- **Flamm- und Brennpunkt**

Der Flammpunkt ist die Temperatur bei der sich über der Flüssigkeit Dämpfe in einer ausreichenden Menge bilden, um durch Fremdzünden entflammt zu werden. Der Flammpunkt liegt bei Mineralöl beginnend bei 138°C deutlich unter den Esterflüssigkeiten, welche bei den SE bei min. 250 °C und bei den NE bei min. 330 °C liegen. Der Brennpunkt dagegen ist die Temperatur bei dem sich der Brand durch ausreichende Gasungsmenge selbst erhält, dieser ist daher etwas höher als der Flammpunkt. Die Vorteile die sich durch die höheren Flamm- und Brennpunkte ergeben sind eine schwächere Rauchentwicklung im Brandfall und geringerer Aufwand an baulicher Trennung. Damit lassen sich große Leistungstransformatoren leichter in urbanen Gebieten integrieren und führen aufgrund der geringeren Gefährdung mit zu einer besseren Versicherungseinstufung [Dum99] [Hem04].

Material- und Umweltverträglichkeit

- **Ressourcenschonung**

Durch die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen bei der Herstellung von Esterflüssigkeiten, wird die Importabhängigkeit von ölfördernden Ländern verringert und die Wertschöpfung in den jeweiligen Ländern kann erhöht werden. Das geschieht durch die Verwendung von natürlichen Ressourcen aus nachhaltiger Landwirtschaft. Nachhaltig bedeutet hier, dass keine Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln, durch übermäßigen Beanspruchung von Agrarflächen hergestellt wird.

- **Biologische Abbaubarkeit**

Bei Verwendung von Isolierflüssigkeiten ist auch auf deren Umwelteinwirkungen zu achten. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist, welchen möglichen toxischen und schädigenden Auswirkungen die Umwelt im Falle eines Austretens dadurch ausgesetzt ist. Je nach Ausfall dieser Bewertung erfolgt eine Einstufung in Wassergefährdungsklassen nach Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe [VwVwS1999] und deren Anhang [VwVwS2005]. Von wichtiger Bedeutung ist dabei auch wie schnell sich der Stoff biologisch durch Bakterien und Mikroorganismen abbauen lässt, um bleibende Schäden in Natur und Umwelt abwenden lässt. In Abbildung 2-6 ist die biologische Abbaubarkeit innerhalb von 30 Tagen prozentual dargestellt. Auffallend dabei ist, dass sich Silikonöle kaum und Mineralöle nur wenig abbauen lassen und dadurch als wassergefährdend WGK1 oder gar stark wassergefährdend WGK2 eingestuft werden. Dagegen lassen sich natürliche und synthetische Ester sehr gut innerhalb eines Monats zum großen Teil abbauen. Dies führt dazu, dass diese als nicht wassergefährdend eingestuft werden WGK0. In der Praxis bedeutet dies, dass auf große Auffangwannen unter den Betriebsmitteln verzichtet werden kann und ebenso auf aufwändige Ölabscheider. Dies ermöglicht auch eine Verwendung in ökologisch sensiblen Umweltschutzgebieten und Hochwassergebieten.

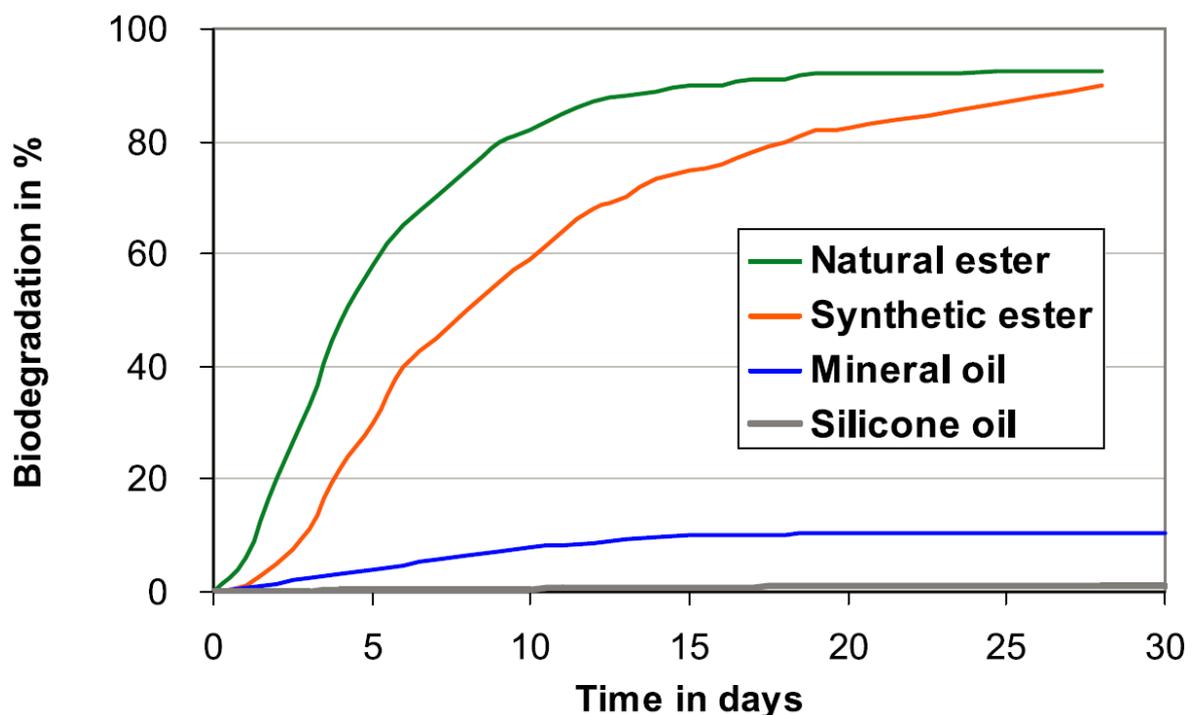


Abbildung 2-6 – Biologische Abbaubarkeit verschiedener Isolierflüssigkeiten [Puk12]

- **Wasserlösungsvermögen**

Durch das hohe Wasseraufnahmevermögen ergibt sich für Esterflüssigkeiten bei tiefen Temperaturen weniger Probleme durch Wasserabgabe der Flüssigkeit, dadurch wird die Zellulose trockengehalten. Hat die Zellulose dennoch bereits Feuchtigkeit gezogen, so fällt es leichter durch das hohe Wasserlösungsvermögens des Esters diese durch Umlauftrocknung wieder zu trocknen. Durch trocken halten der Zellulose verlangsamt sich zudem die Reaktion der Depolymerisation, wodurch diese länger ihre mechanische Stabilität beibehält und somit die Lebensdauer verlängert.

Tabelle 2-1 – Eigenschaften der verwendeten Isolationsflüssigkeiten [Nyn] [Mid] [Car] [Pag13] [Dum99] [Hem04]

** Nur Mineralöle mit einem Aromatengehalt unter 5 % fallen in die WGK 1

Eigenschaften	Einheit	Test-methode	MO	SE	NE
elektrische					
Durchschlagsspannung	kV	IEC 60296 IEC 60156	70	>75	73
Permittivitätszahl ϵ (25 °C, 50 Hz)		IEC 60247	2,2	3,3	3,2
Verlustfaktor $\tan \delta$ (90 °C, 50 Hz)		IEC 60247	<0,010	<0,008	0,02
physikalische					
Stockpunkt	°C	ISO 3016	-57	-60	-18 bis -23
Flammpunkt	°C	ISO 2719	138-150	250-275	330
Brennpunkt	°C	ISO 2592	165-170	300-332	360
Heizwert	MJ/kg		-	31,6	-
kin. Viskosität, 40 °C	mm ² /s	ISO 3104	9,2	28	32-34
Dichte, 20 °C	kg/dm ³	ISO 12185	0,872	0,97	0,92
Wärmeleitfähigkeit	W/mK		0,14-0,17	0,16-0,25	0,18
spez. Wärmekapazität	kJ/kg*K		1,85-1,88	1,82-2,09	1,82-1,93
Wärmeausdehnung	1/K		$6,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	
Wasserlösungsvermögen			55	2700	1100
Wassergefährdungsklasse			1 oder 2**	0	0

2.3 Transformerboard

Das Ausgangsmaterial für Trasformerboard ist ungebleichte Sulfatzellulose aus langsam und dicht gewachsenen Zellen, bevorzugt aus nördlichen Breiten. Daraus lässt sich Zellulose für mechanisch hoch beanspruchtes Transformatorenpressboard extrahieren.

Die für die Papierherstellung benötigte Alpha-Zellulose ist ein aus Glucoseeinheiten bestehendes, kettenförmiges hochpolymeres Kohlehydrat mit einem Polymerisationsgrad von ca. 2000. Der zweite wichtige Komponentenanteil der pflanzlichen Rohstoffe sind die Hemi-Zellulosen. Diese haben einen Polymerisationsgrad kleiner als 200 und erleichtern bei einem geringen Anteil die Bildung der für die mechanische Festigkeit verantwortlichen Wasserstoffbrücken. Erhöht sich der Anteil über 10 Prozent, so nimmt die Festigkeit wieder ab. Die restlichen im Holz vorhandenen Substanzen wie Lingin, welche die Faser miteinander verkitten müssen getrennt und schonend ausgewaschen werden.

Im Herstellungsprozess (siehe Abbildung 2-7) werden mehrere Lagen nasser Zellulose auf eine Walze aufgetragen bis zum Erreichen der gewünschten Nassstoffdicken. Dann die Schicht mit Nasserstoff aufgeschnitten, um den Bogen zu entnehmen und in der Presse zu pressen und damit zu verfestigen. Die Dichte des zu erhaltenden Pressboards unterscheidet sich im verwendeten Trocknungsverfahren. Die Unterschiede liegen dabei, ob die Trocknung in einer geheizten Presse oder erst im Anschluss erfolgt. Bei gleichzeitiger Pressung und Trocknung erhält man höherdichtes Material.

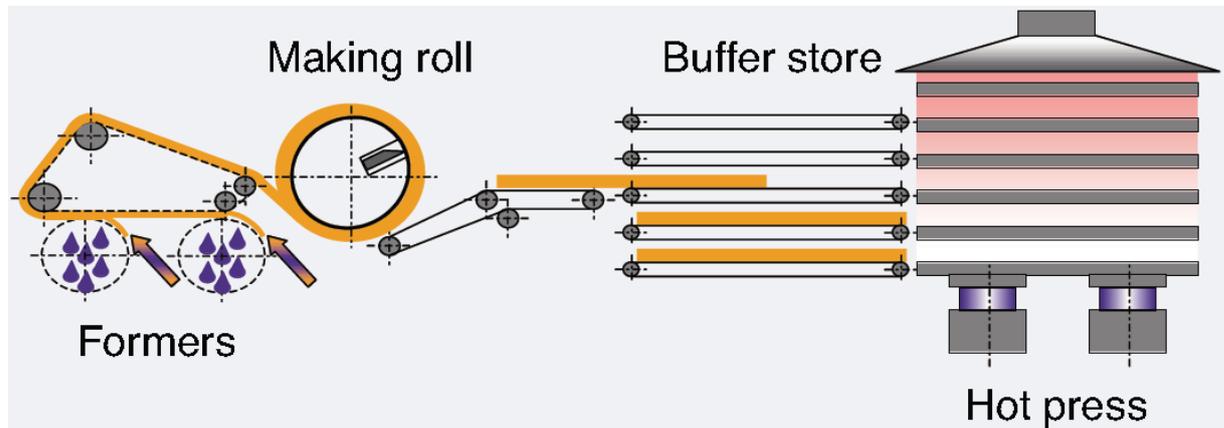


Abbildung 2-7 – Herstellungsprozeß von Transformerboard [Wei09]

Durch Imprägnierung mit Isolierflüssigkeiten und der damit eingehenden Verdrängung der Luft aus den kleinen Hohlräumen (Poren), erhält das Pressboard seine hohe elektrische Festigkeit. Denn die Zellstofffasern haben dabei eine barrierenhafte Wirkung, die das Volumen in viele kleine Volumina (Poren) mit hoher elektrischer Festigkeit unterteilt.

In der Praxis lässt sich daraus eine hohe Bandbreite von Verwendungen ableiten, einige davon sind die händische Umformung von Elektroden zum Aufbau von Barriersystemen. Dies ist jedoch aufgrund des Verfahrens recht kostenintensiv. Daher greift man bei geeignetem Einsatzzweck gerne auf Zylinder aus Transformerboard zurück. Diese werden aus auf Maß geschnittene Tafeln gefertigt, indem die Kanten angeschliffen und verklebt werden. Dabei ist die Überlappung so gewählt, dass der Kriechweg kleiner als die Durchschlagspannung durch das Material ist [Mos79]. Die Vorteile davon sind

- leicht zu trocknen
- gute mechanische Eigenschaften
- geringe Herstellungskosten
- rasche Liefermöglichkeit
- freie Wahl des Durchmessers, da kein Wickeldorn benötigt wird
- Formstabilität

2.4 Methode der statistischen Auswertung mit Vorgeschichte

Bei Prüflingen, welche aufgrund eines hohen materialen und zeitlichen Aufwandes nur in geringer Anzahl geprüft werden können, werden spezielle Auswertungsverfahren benötigt, um auch bei geringer Stichprobenanzahl eine statistische Aussagekraft über die Qualität der Isolation zu bekommen. Zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit wird daher nicht nur die Durchschlagsspannung des Prüflings berücksichtigt, sondern auch die zuvor erfolgreich bestandenen Spannungsstufen. Nach Kachler/Jakov wird zur Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeiten die Weibull-Verteilung bei verschiedenen Prüfspannungshöhen V_P herangezogen. Durch entsprechende Parameterwahl wird im Streubereich $\pm 2s$ (2% bis 98%) um den Mittelwert V_{50} eine Identität mit der Gaußverteilung hergestellt. Für sehr kleine Ausfallwahrscheinlichkeiten eignet sich die nach unten begrenzte dreiparametrische Weibullverteilung

$$P(V) = 1 - e^{-\varphi(V)} \tag{2-4}$$

mit dem Exponenten $\varphi(V) = \left(\frac{V-V_0}{V_{63}-V_0}\right)^k$

und den Parametern

$k = 3,5$	(Weibull-Exponent)
$V_0 = V_{50} - 3,17 \cdot s \cdot V_{50}$	(Anfangswert / sichere Stehspannung)
$V_{63} = V_{50} + 0,35 \cdot s \cdot V_{50}$	(63%-Wert)

besser als die unbegrenzte Gaußsche Normalverteilung.

Von Vorteil ist dabei die Rückführung der Weibull-Parameter auf die experimentell einfach bestimmbar Kennwerte des Mittelwerts V_{50} und der Streuung in Prozent s . Durch Bezug aller Spannungswerte auf den Mittelwert ergeben sich universell für alle Fälle anwendbare Kurven.

Für die Hypothese einer Einzel-Ausfallwahrscheinlichkeit (z.B. $P_1 = 1\%$) wird aus Gl.(2-4) der zugehörige Referenzspannungswert (z.B. $V_R = 0,666 V_{50}$ bei $s = 15\%$) ermittelt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit bei abweichender Prüfspannung z.B. $V_P = 1,2 V_R = 0,800 V_{50}$) ergibt sich dann wieder aus Gl.(2-4), im Beispiel gilt dann $P_1(V_P) = 9,7\%$. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2-8 schematisch erläutert.

Bei Durchführung von n Prüfungen bei gleicher Spannung V_P ergibt sich die Haltewahrscheinlichkeit $H_n(V_P)$ aus der Multiplikation der Einzel-Haltewahrscheinlichkeiten zu

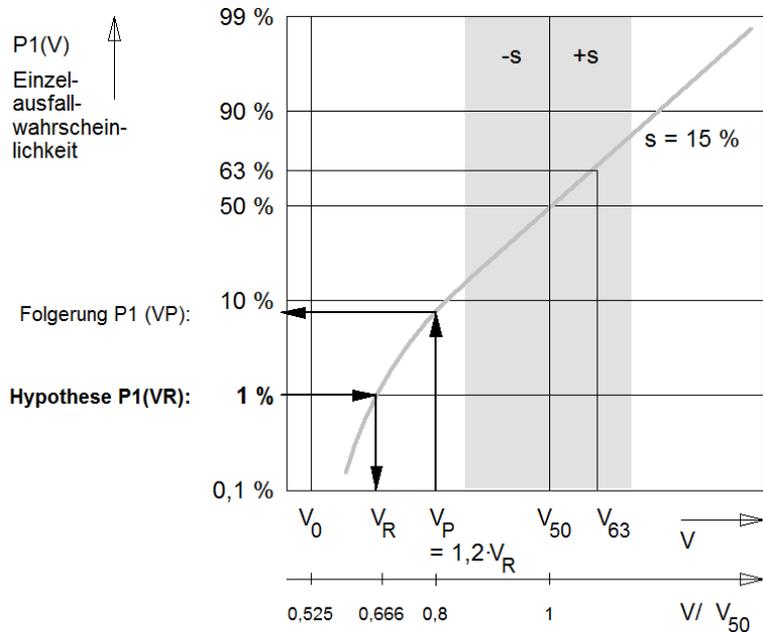


Abbildung 2-8 – Anwendung der Weibull-Verteilung (schematisch) [Küc]

$$H_n(V_P) = [1 - P_1(V_P)]^n = e^{-n \cdot \varphi(V_P)} \quad (2-5)$$

Für die Gesamt-Ausfallwahrscheinlichkeit folgt

$$P_n(V_P) = 1 - H_n(V_P) = 1 - e^{-n \cdot \varphi(V_P)} \quad (2-6)$$

Eine wichtige Voraussetzung für die Verwendung von Gl. (2-5) und Gl. (2-6) ist die statistische Unabhängigkeit der Einzelprüfungen. Das bedeutet, dass die beschriebene Theorie nur dann korrekte Ergebnisse, wenn die Prüfungen nicht durch vorhergehende Prüfungen beeinflusst wird.

- Hier noch mehr Input zur Unabhängigkeit

Die Gesamt-Haltewahrscheinlichkeit H_N für alle N Einzelprüfungen ergibt sich aus dem Produkt der Haltewahrscheinlichkeiten in den einzelnen Stufen:

$$H_N(V_{P1}, V_{P2}, \dots) = H_{n1}(V_{P1}) \cdot H_{n2}(V_{P2}) \cdot H_{n3}(V_{P3}) \dots \cdot H_{nj}(V_{Pj}) \quad (2-7)$$

Die Gesamt Ausfallwahrscheinlichkeit P_N des Zyklus mit N Einzelprüfungen ergibt sich zu

$$P_H = 1 - H_H \quad (2-8)$$

Auch hier wird angenommen, wenn sich bei einer Rechnung eine Gesamt-Ausfallwahrscheinlichkeit von P_N von 90 % ergibt, so wird aus einer bestandenen Prüfung gefolgert, daß die Hypothese von z.B. $P_1(V_R) \leq 1\%$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % zutrifft.

Mit einer eigens dazu erstellten Excel Kalkulationstabelle von Prof. Kuchler können die Hypothesen der Ausfallwahrscheinlichkeiten von $< 1\%$ mit 99 %-iger Sicherheit nachgewiesen werden.

In den Werten enthalten sind die Vorgeschichte des Prüflings in Form der vorangegangenen Prüfsequenzen auf den verschiedenen Spannungsstufen bis zum Eintritt des Über- / Durchschlags oder vorzeitiger Abbruch der Prüfung durch anhaltende starke Entladungen. Für die Berechnung der verwendeten Versuchsanordnung wurde eine Streuung s von 10 % gewählt die laut Kachler [Kac77] für große Versuchsanordnungen geeignet ist.

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

Projektbeschreibung

Die bisherige Verwendung von Esterflüssigkeiten in Transformatoren als Substitution für Mineralöle, konzentriert sich momentan noch hauptsächlich auf Verteilnetztransformatoren. Die Verwendung in großen Leistungstransformatoren ist momentan noch auf einige wenige Anwendungen erster Pilotanlagen beschränkt. Um dem zukünftigen Bedarf an umweltfreundlichen Großtransformatoren gerecht zu werden, ist noch weiterer Forschungsbedarf erforderlich. Die vorliegende Arbeit widmet sich dabei dem Isolationsverhalten des Barrierensystems, um bei der Auslegung Überdimensionierungen auf ein minimales Level zurückzufahren. Durch die dadurch ermöglichte kompaktere Bauweise wird Material eingespart, der Transport vereinfacht und die Leistungsdichte erhöht, etc. womit auch die Gesamtwirtschaftlichkeit positiv beeinflusst wird.

Das Ziel der Arbeit war es somit Esterflüssigkeiten in ihrem dielektrischen Verhalten in einem möglichst realitätsnahen Model einer Transformatorenausleitung zu untersuchen. Zur Referenz wurde der bisher dominierende flüssige Isolierstoff – das Mineralöl als vergleichender Maßstab herangezogen.

In der Ausgangslage diente ein bereits vorhandener Versuchsaufbau als Basis, welcher anhand elektrischer Feldstudien auf seine Weiterverwendung bei einer Ölspaltweite von 8 mm und 20 mm untersucht und ggf. durch neue Teile für seinen zukünftigen Verwendungszweck angepasst werden sollte. Im Labor sollte dann der praktische Nachweis, der vollen Funktionstüchtigkeit erfolgen. Aus den gewonnenen Messdaten waren statistische Auswertungen zu erstellen, um daraus die resultierenden Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zu ziehen.

4 Parameterstudien zur Entwicklung und Optimierung des Versuchsaufbaus

Die Bestrebungen der Entwicklung eines Versuchsaufbaus lagen darin, für die vorgegebenen Ölpaltweiten von 8 und 20 mm eine Möglichkeit zu finden diverse Isolierflüssigkeiten vergleichend in ihrer dielektrischen Festigkeit zu untersuchen. In der Ausgangslage konnte auf einen bereits vorhandenen Versuchsaufbau, welcher dem Test von Distanzhaltern diente zurückgegriffen werden. Dieser Aufbau hatte eine Ölpaltweite von 26,5 mm und war mit Prüfspannungen bis zu 290 kVAC erprobt. Mit den vorzunehmenden Anpassungen, sollten auch einige grundlegende Details im Grunddesign verbessert werden. Dazu gehört das Entfernen der Sandwichkonstruktion, um die etwas zu kurzen Pressboardzylinder zu kompensieren und gleichzeitig das Verlängern der Boardzylinder um Überschläge an den Radien zu verringern. Weiter waren Entlüftungslöcher in den Distanzierungsringen vorzusehen, um dort eine Gasansammlung zu vermeiden.

Der Aufbau wurde in einem zylindrischen Plexiglassessel eingebaut. Dessen Dimensionen betragen 1 m in der Höhe und 1 m im Durchmesser. In Abbildung 2-1 ist die Modelldarstellung aus dem Feldberechnungsprogramm ElecNet aufgezeigt. Mit Nutzen der Rotationssymmetrie genügte die einseitige spiegelbildliche Darstellung.

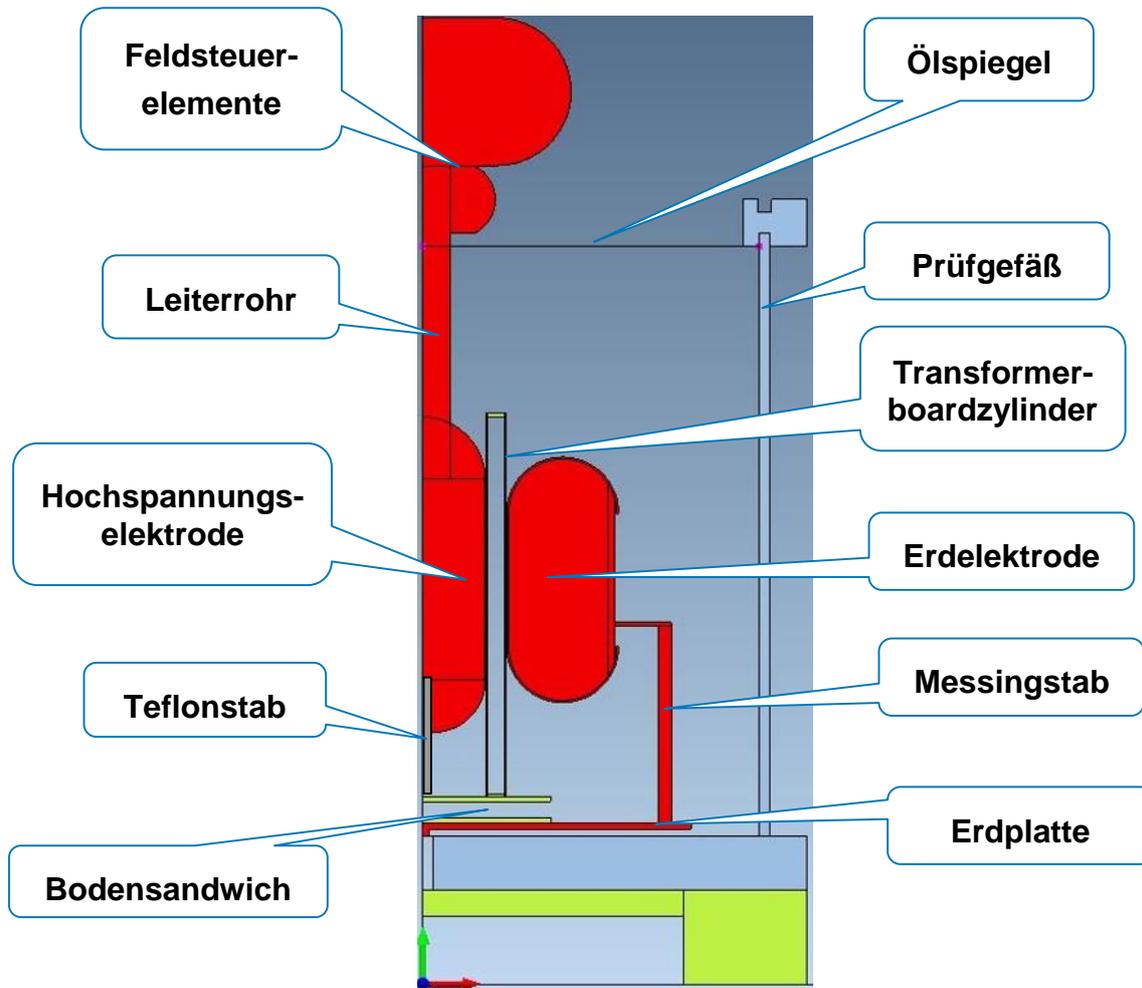


Abbildung 4-1 – Ausgangslage des Versuchsaufbaus

Bei den verwendeten Prüflingen handelte es sich um Pressboardzylinder, welche aus Plattenmaterial rundgeformt und an ihren angeschliffenen Kanten verklebt waren. Gegenüber einer

handumformten Elektrodenanordnung hatte es den Vorteil, dass die Prüflinge ohne Sonderanfertigung von Formen kostengünstig in höherer Stückzahl in jedem gewünschten Durchmesser herzustellen waren. Es hatte jedoch auch den Nachteil, dass die Radien der Elektroden nicht umformt waren und sich somit eine potentielle Schwachstelle zum Entladungsansatz ergab.

Der Versuchsaufbau wurde in Draftsight einem CAD-Programm gezeichnet. Durch Ausnützen der Rotationssymmetrie, war es möglich nur eine Hälfte zu zeichnen. Die Trennung der Einzelkomponenten erfolgte durch benutzen von verschiedenen Layer, somit war es möglich nach Materialtyp und später vorzugebenden Randbedingungen zu unterscheiden. Die fertige Zeichnung wurde als *.dxf Datei abgespeichert und konnte so mit dem betriebsinternen Übertragungsprogramm D2E2 und dort vorzugebenen Randbedingungen in Feldsimulationsprogramm ElecNet überspielt werden. Die vorzugebenen Randbedingungen waren die Potentiale der Hochspannung und der geerdeten Teile. Das Hochspannungspotential wurde auf die im Labor maximal mögliche Prüfspannung von 400 kVAC normiert. Dadurch wurden Verwechslungen durch unterschiedliche vorgegebene Pegel massiv reduziert und eine normierte Rückrechnung war weiterhin jederzeit möglich.

Von den Materialparametern wurde für die Permittivität der Isolierflüssigkeit die des Mineralöls von 2,2 angenommen. Dies stellt den Fall für das ungünstigste Verhältnis bei der elektrischen Feldverteilung von Board zur Isolierflüssigkeit dar. Ein weiterer Grund war, dass zu diesem anfänglichen Zeitpunkt noch keine verlässlichen Daten für die Permittivitäten der Esterflüssigkeiten und vor allem von damit imprägniertem Transformerboard vorhanden waren. Ein noch weiterer Grund war, dass in den betriebseigenen Programmen zur Bewertung von Feldlinien bisher nur Designkurven für Mineralöl hinterlegt sind, da bisher auch noch keine weiteren Design-Kurven für Ester vorhanden sind und das Programm bei veränderten Permittivitäten für die Isolierflüssigkeit, die Bewertung anhand der Designkurven für Mineralöl nicht zulässt.

Um ein Gespür davon zu bekommen, wie sich Veränderungen an der Geometrie in Veränderung der elektrischen Feldverteilung auswirken, wurde eine Parameterstudie vorgenommen. Dabei war es das Ziel möglichst viele Teile des bestehenden Versuchsaufbaus weiter verwenden zu können, um Kosten und Zeit einzusparen. Die vorhandenen vier Hochspannungselektroden bestanden aus vorgefertigten standardisierten Grundformen wie Halbkugeln und Rohren. Diese brachten den Vorteil mit sich, dass sie eine sehr gute Formgenauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit vorwiesen auf welche nur ungerne verzichtet worden wäre. Weshalb im ersten Schritt nur Veränderungen auf der Erdseite getätigt wurden. Es wurden der Abstand der Elektroden, die Höhe des Erddoms und dessen Radien variiert. Zur Berechnung in ElecNet wurde die maximale Maschenweite im Board mit 0,5 mm vorgegeben, damit sich ein kontinuierlicher Verlauf der Feldstärke entlang den Elektrodenoberflächen ergibt. Die Auswertungen erfolgten, indem die Feldstärken entlang der Kontur der Hochspannungselektrode und der Erdelektrode ausgelesen wurden. Diese Daten wurden dann in Excel zur Weiterverarbeitung übertragen. Dies geschah in Form von vergleichenden Diagrammen. Als Bezugspunkt für das eingeführte Koordinatensystem war jeweils der in die Mitte der Elektroden hineingelegte Koordinatenursprung. Die positive Richtung wurde nach oben zeigen angenommen und die negative Richtung nach unten zeigend. Dies erlaubte einen ausgewählten Blick auf den interessierenden Elektrodenbereich, unabhängig von vorgenommenen Längen- und Radienänderungen an der Erdelektrode.

4.1 Verlängerung der Erdelektrode

Die durchgeführte Änderung umfasst die Verlängerung der Erdelektrode bei einer Ölkanalweite des Modells von 26,5 mm. Zudem sind hochspannungsseitig Abstandstreifen von 1 mm und auf der Erdseite von 0,5 mm aufgeklebt. Die Streifen beginnen im unteren Bereich jeweils 50 mm und im oberen Bereich jeweils um 10 mm eingezogen. Bei der Veränderung wurden die Streifen konstant gelassen und nicht mit verändert.

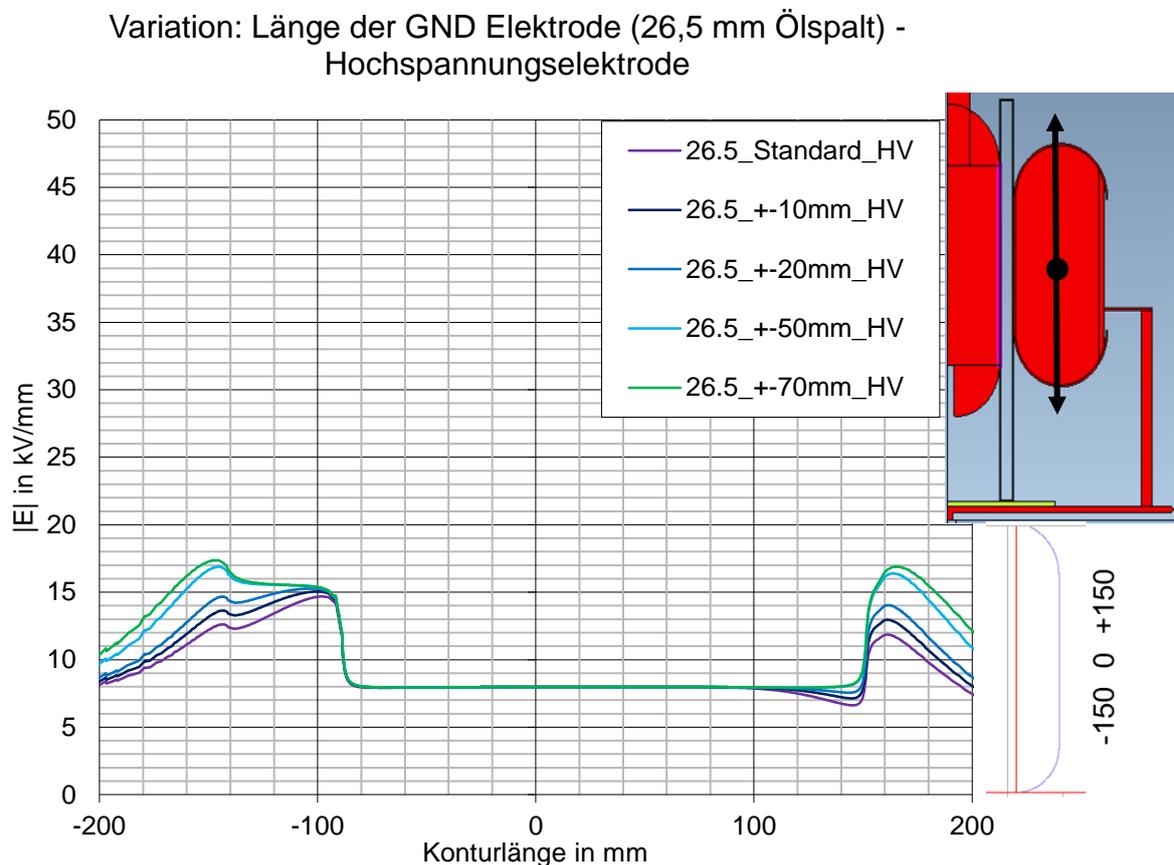


Abbildung 4-2 – Variation: Länge der GND Elektrode (26,5 mm Ölspalt) - Hochspannungselektrode

Mit der symmetrischen Veränderung der Erdelektrode ausgehend von einer Länge im geraden Bereich von 200 mm führte dies auf der Hochspannungselektrode zu einer Anhebung der Feldstärken im unteren Bereich der aufgeleimten Abstandstreifen (50 mm eingezogen) und im Bereich der Radien

Im oberen Bereich der Radien liegt der Sprung der Feldstärke aufgrund der kürzer eingezogenen Abstandstreifen nahe mit dem Peak des Radius zusammen. Hier ist die Zunahme der Feldstärke von dem ursprünglich schwächeren Wert am deutlichsten zu vernehmen

Mit zunehmender Verlängerung der Erdelektrode kann man auf der Hochspannungselektrode hauptsächlich im Bereich der Radien eine durchgängige Zunahme der Feldstärke feststellen. Aus Sicht der Hochspannungselektrode ist daher von dieser Verlängerung abzuraten.

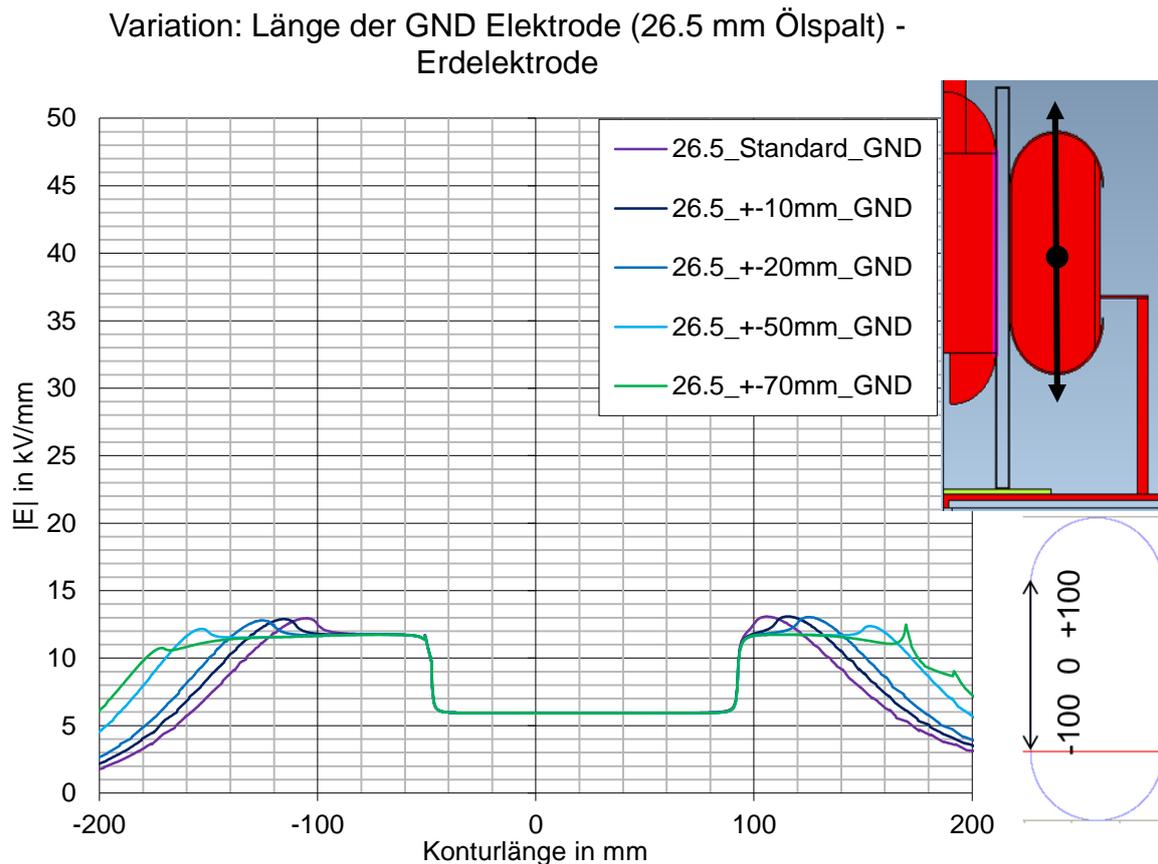


Abbildung 4-3 – Variation: Länge der GND Elektrode (26.5 mm Ölspalt) - Erdelektrode

Im unteren Bereich ist eine Verschiebung des geringen Peaks der Feldstärke nach unten wahrzunehmen der erst ab einer Verlängerung von 50 mm abfällt

Im oberen Bereich ergibt sich ebenfalls eine Verschiebung, welche mit der Verlängerung nach oben geht und wieder ab 50 mm abfällt. Jedoch ergibt sich bei 70 mm ein spitzer Peak

Da nur eine geringe Reduktion der Spitzenwerte der Feldstärke gegeben ist, kann auf die Verlängerung der Erdelektrode verzichtet werden. Diese würde vor allem durch die größeren Dimensionen, Änderungsbedarf und eine gewisse Unhandlichkeit mit sich bringen, ohne wesentlich erhöhten Nutzen.

4.2 Änderung der Radien des Erddoms

Um zu testen, ob noch Optimierungsbedarf an den Radien erforderlich war, wurden diese ausgehend vom bestehenden Versuchsaufbau (R83) schrittweise am Erddom verändert. Da die maximalen Veränderungen bei der später gewünschten kleinen Ölkanalweite von 8 mm zu erwarten waren, wurde diese Variante auch für das Model herangezogen.

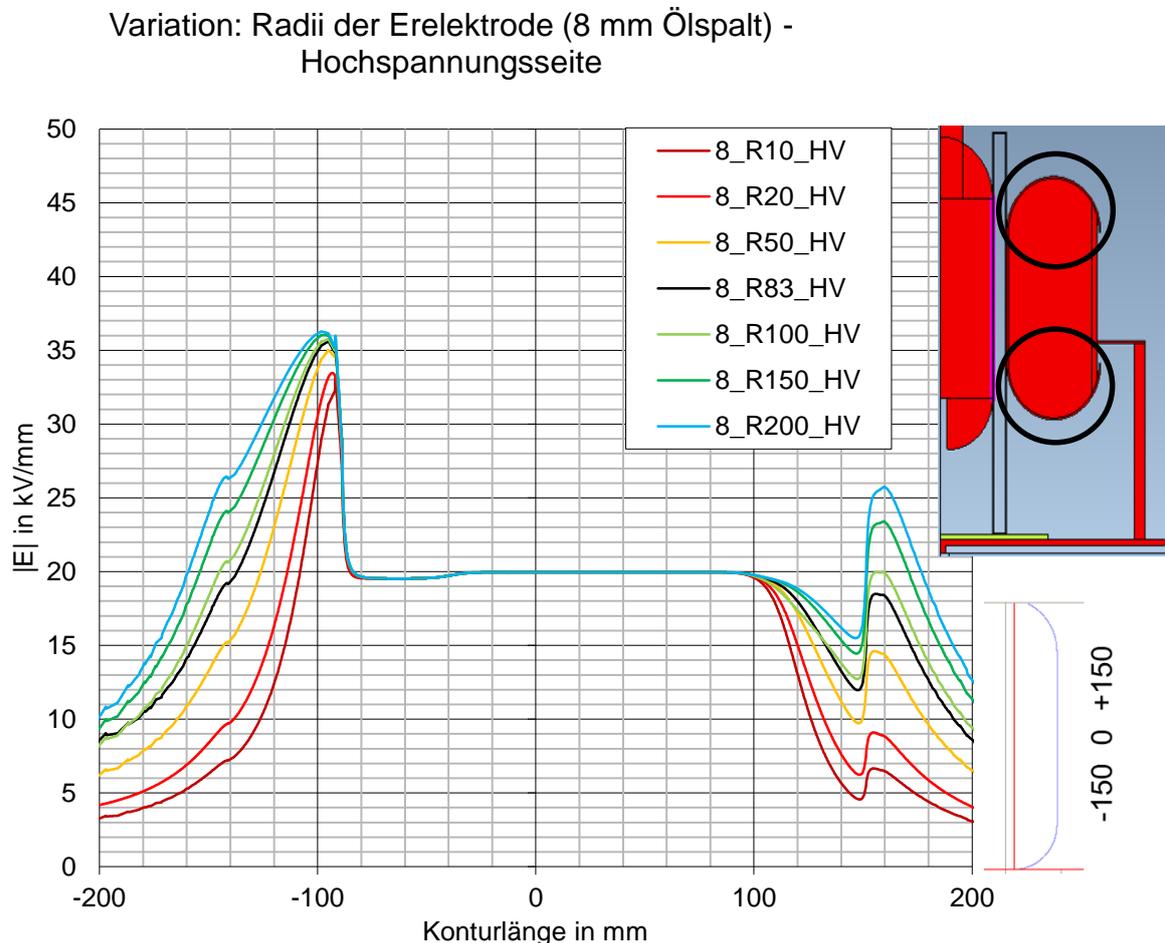


Abbildung 4-4 – Variation: Radii der Erdelektrode (8 mm Ölspalt) - Hochspannungsseite

Eingehend mit der Vergrößerung der Radien ist im unteren Bereich der Hochspannungselektrode eine verhältnismäßig leichte Zunahme festzustellen, wobei eine Verringerung der Radien eine schon etwas stärkere Abnahme nach sich zieht. Doch auch hier ist anzumerken, dass der Peak mehr und mehr spitzwinkliger wird. Die Peaks sind hier mit allen Veränderungen bei Weitem nicht unter die Werte im Bereich der Streifen zu bekommen.

Im oberen Bereich nimmt die Feldstärke bei großen Radien wie gehabt zu und bei kleineren wieder ab. Dabei ist bei kleinen Radien ein weites Absinken unter den Wert im geraden (homogenen) Bereich festzustellen

Da die Vergrößerung der Domradien für die Hochspannungselektrode betrachtet nur eine unerwünschte Anhebung mit sich bringt, ist davon abzusehen. Eine Verkleinerung im unteren Bereich hingegen brachte auch keine massive Absenkung unter den homogenen Wert und somit auch keine wesentliche Verbesserung. Im oberen Bereich war der Ausgangswert von R83 schon im gewünschten Bereich und somit keine sinnvollen Verbesserungen mehr möglich.

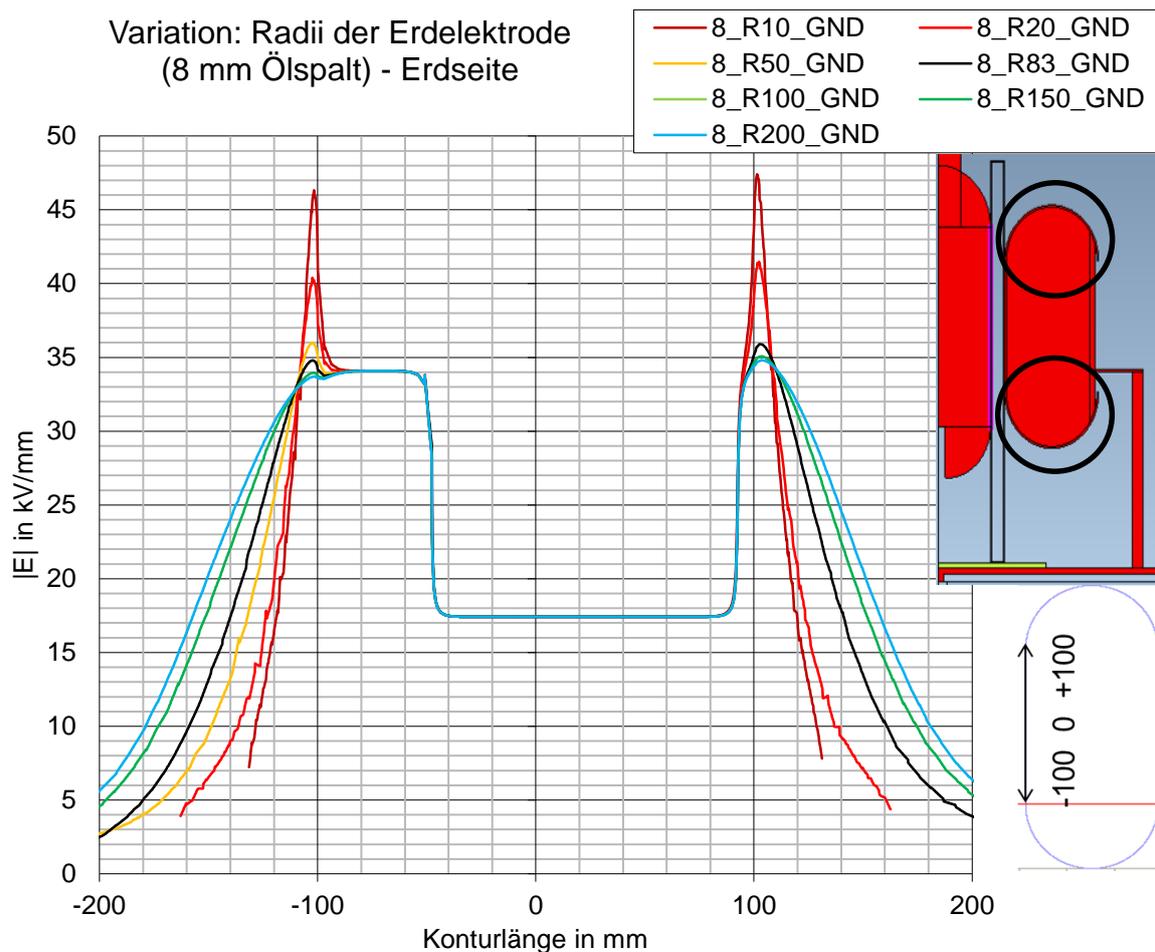


Abbildung 4-5 – Variation: Radii der Erdelektrode (8 mm Ölspalt) - Erdseite

Die Verkleinerung der Domradien verursachte vor allem bei R10 und R20 oben wie auch unten massive und kritisch einzustufende Peakwerte. Bei R50 war im unteren Bereich noch eine geringe Anhebung festzustellen.

Eine Vergrößerung der Radien verursachte eine Abnahme bis auf den Wert leicht über dem homogenen Bereich. Die maximale Ausbeute ist hier mit R100 schon fast komplett erreicht und eine weitere Vergrößerung macht nur wenig Sinn. In Kombination würde für das Gesamtbild die Wahl auf R100 fallen, da diese der gewünschten Anforderung der möglichst geringen Feldanhebung über das Grundlevel am besten erfüllt. Eine Rücksprache mit den Kollegen aus der Spenglerei ergab jedoch, dass eine Vergrößerung der Radien aus fertigungstechnischen Gründen zu vermeiden. Daher wurde der Kompromiss mit der praktikabel besseren Umsetzung im Praxisbetrieb mit R83 gewählt.

4.3 Entwicklungsschritte hin zum Versuchsaufbau

Wählt man die nahe liegende Variante, die Boardzylinder direkt anliegend an die Elektroden zu platzieren, so gibt sich am Tripelpunkt (Spickel) ein recht spitzer Peak des Feldverlaufs.

Bedingt durch die schwankenden Produktionstoleranzen musste jedoch zusätzlich ein Weg gefunden werden, diese auszugleichen. Dies geschah am vorangegangenen Versuchsaufbau durch die aufgeleimten Distanzierungstreifen. Dadurch fällt jedoch im homogenen Versuchsbereich die Feldstärke durch die Feldverdrängung aus dem Board ab und hinterlässt im Bereich der Radien, welche durch Öl umgeben sind massive Feldspitzen.

Der Anschaulichkeit halber wurde der obere Bereich des Radius der Hochspannungselektrode in der Übersichtsdarstellung Abbildung 4-6 markiert und im Detail in Abbildung 4-7 dargestellt.

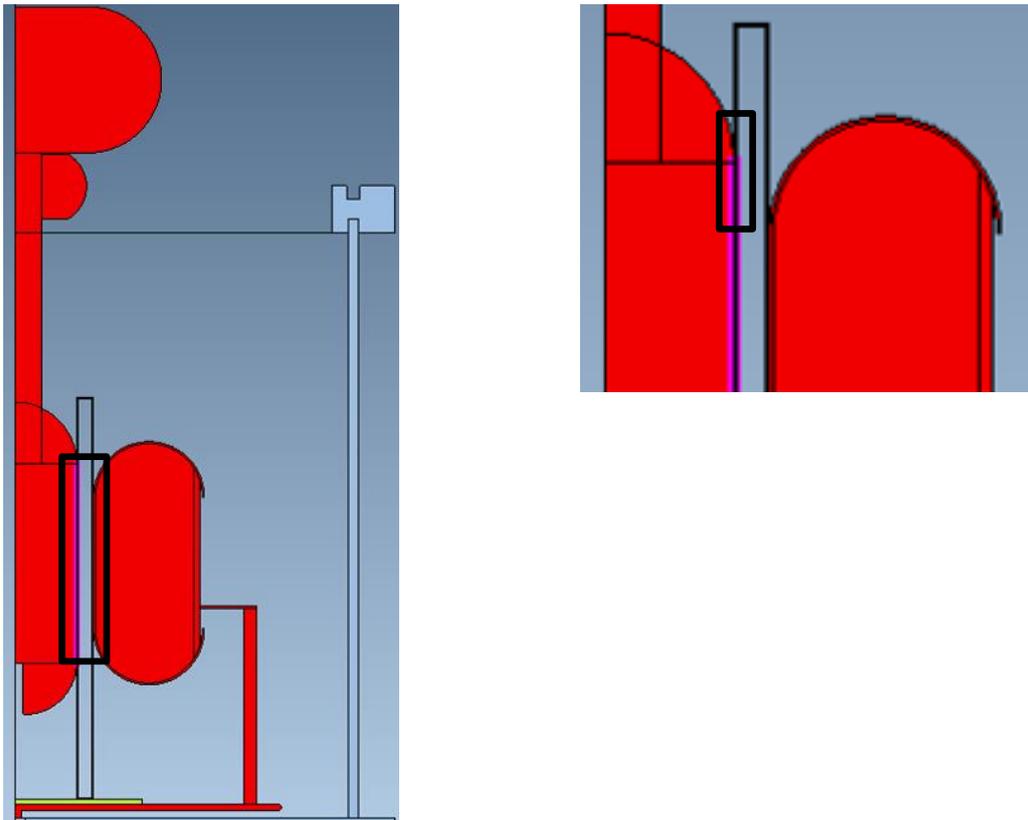


Abbildung 4-6 – Übersichtsdarstellung mit markiertem homogenen Prüfbereich (links) – markierter oberer Radienabschnitt (rechts)

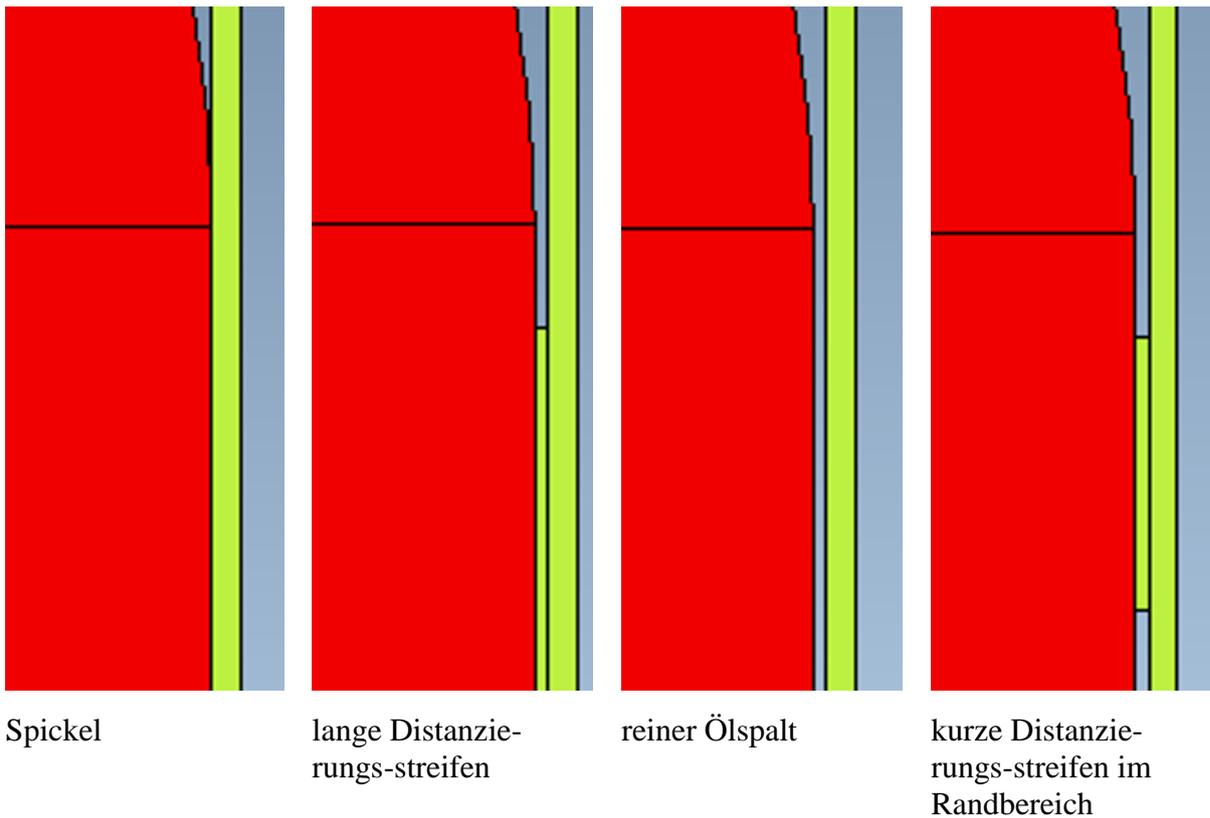


Abbildung 4-7 – Darstellung des oberen Radienabschnitts der Hochspannungselektrode

Durch Überlegung und auch Anschauung, wie die Feldstärke zwischen den Distanzierungsstreifen verläuft, ergeben sich hochspannungsseitig ein 1 mm und erdseitig ein 0,5 mm Ölpalt. Damit steigt die Feldstärke aus den äußeren Bereichen langsam und kontinuierlich bis zum Höchstwert im homogenen Bereich an. Dies widerspiegelt den eigentlich gewünschten Verlauf der Feldstärke für die Untersuchung. Der Haken an der Sache ist dabei die konstruktive Umsetzung des definierten Ölpaltes. In der Praxis benötigt man dafür zumindest ein paar wenige Arretierungspunkte, die ein Verrutschen der Anordnung vermeiden. Indem die Distanzierungsstreifen nur in den Randbereichen und mittig unterbrochen angebracht werden, kann der Effekt weitgehendstes beibehalten werden. Somit war schon mal eine Grundlage für eine Optimierung gefunden.

Entwicklungsgeschichte Distanzierungsstücke (8 mm Ölspalt) - Hochspannungsseite

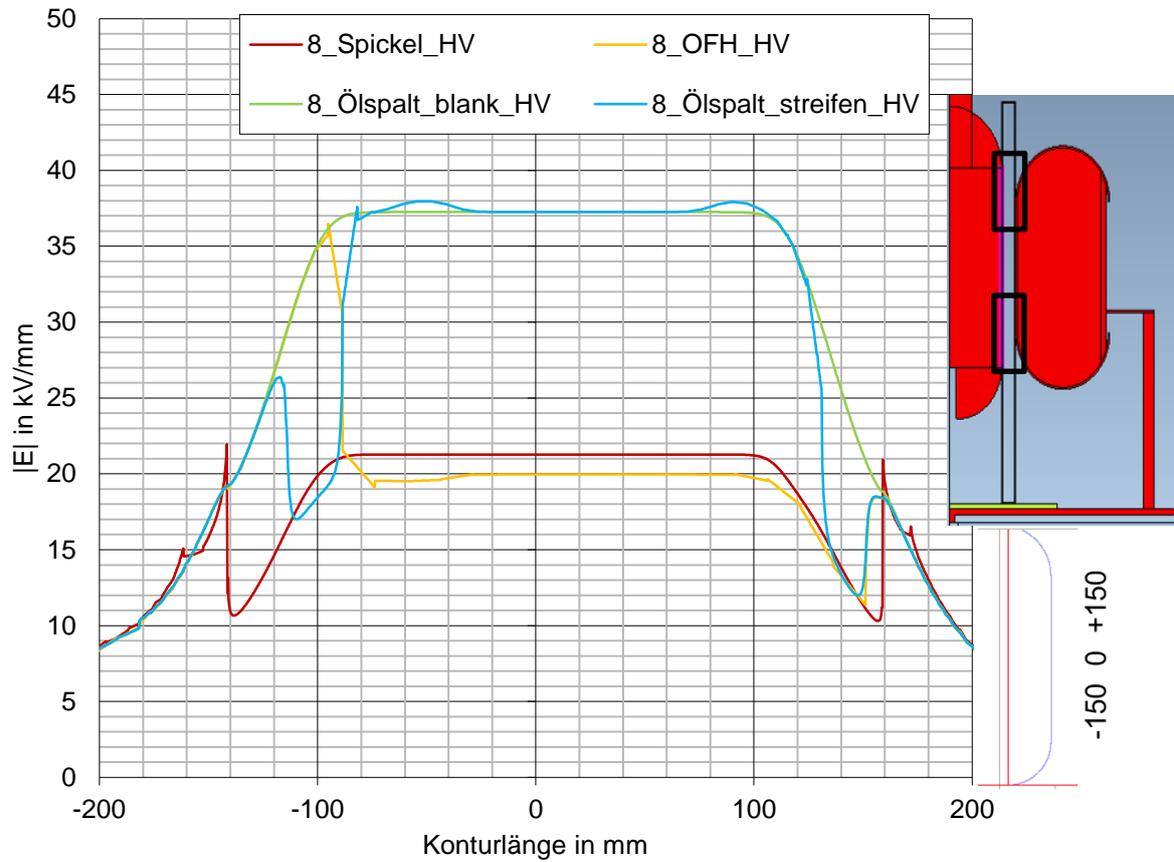


Abbildung 4-8 – Entwicklungsgeschichte Distanzierungsstücke (8 mm Ölspalt) - Hochspannungsseite

Entwicklungsgeschichte Distanzierstücke (8 mm Ölspalt) - Erdseite

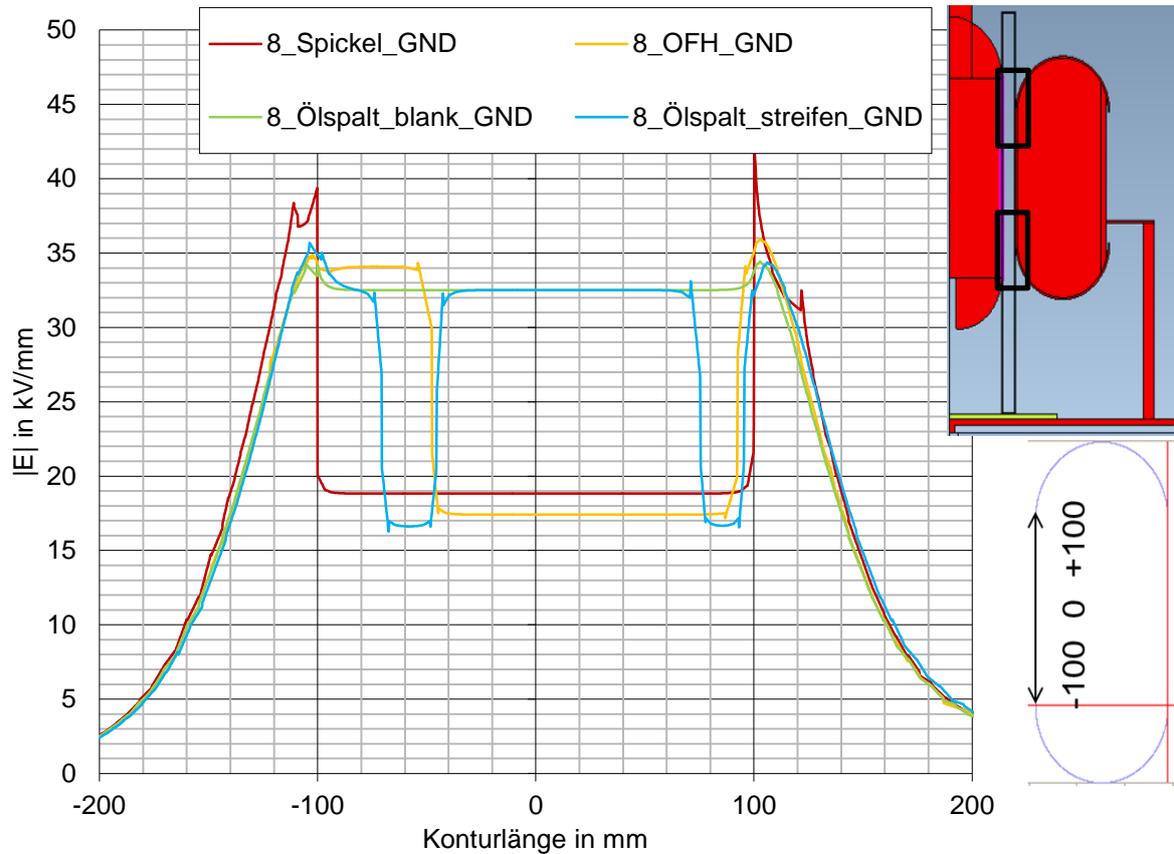


Abbildung 4-9 – Entwicklungsgeschichte Distanzierstücke (8 mm Ölspalt) - Erdseite

Im nächsten Schritt musste noch die passende Länge der Streifen durch eine durchgeführte Längenvariation ermittelt werden.

4.4 Ermittlung der idealen Länge der Distanzierungsstücke

Zur Ermittlung in welchen Dimensionen die Distanzierungsstücke zu verwenden sind, wurden verschiedene Längen in der Simulation ausprobiert. Einheitlich waren diese 10 mm nach Ende der Radi eingezogen. Da der gewünschte Untersuchungsbereich im homogenen mittleren Teil lag, war es erwünscht dort einen möglichst homogenen Verlauf der Oberflächenfeldstärke zu erzielen.

Variation: Länge der Distanzierungsstücke (8 mm Ölspalt) - Hochspannungsseite

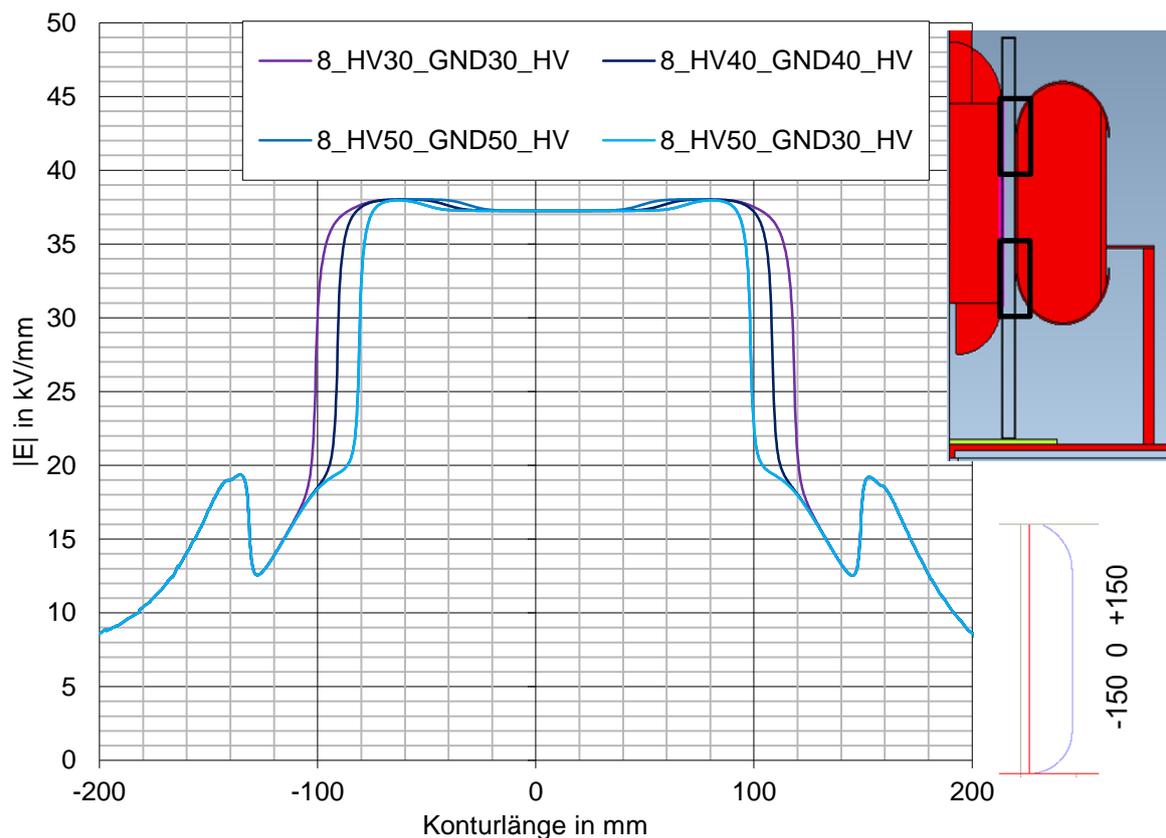


Abbildung 4-10 – Variation: Länge der Distanzierungsstücke (8 mm Ölspalt) - Hochspannungsseite

Da die Hochspannungselektrode im geraden Bereich um 100 mm länger gewählt war, wurden dort mit 50 mm etwas längere Distanzierungsstücke verwendet, um dennoch noch genügend Elektrodenfläche beizubehalten.

Variation: : Länge der Distanzierungsstücke (8 mm Ölspalt) - Erdseite

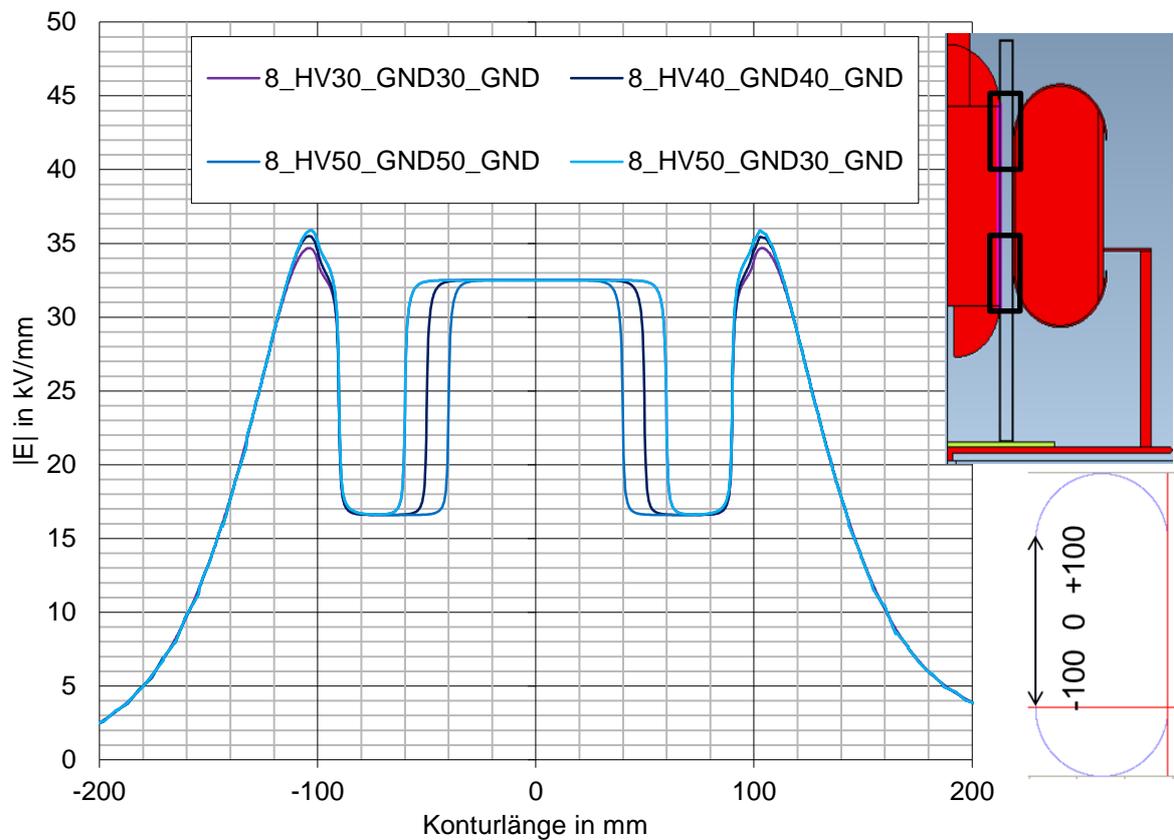


Abbildung 4-11 – Variation: Länge der Distanzierungsstücke (8 mm Ölspalt) - Erdseite

An der Erdelektrode war die verfügbare Fläche aufgrund der grundlegend kürzeren Länge schon beschränkt, weshalb hier nur 30 mm lange Streifen eingesetzt wurden.

4.5 Festgelegter Versuchsaufbau

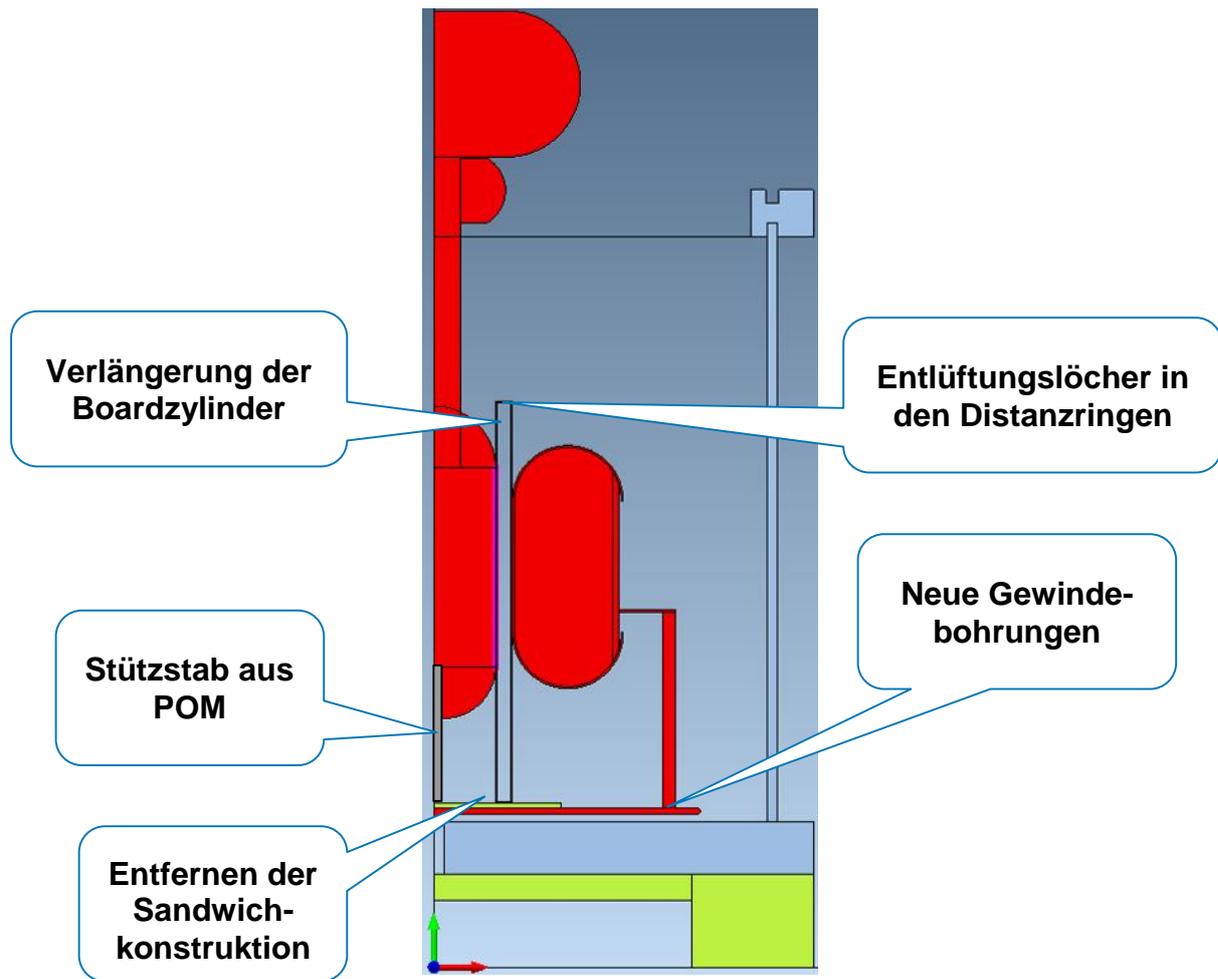


Abbildung 4-12 – Festgelegter Versuchsaufbau – resultierende Veränderungen

4.5.1 Resultierende Veränderungen

Um die ursprüngliche Sandwichkonstruktion des vorgefundenen Versuchsaufbaus zu beseitigen, wurden die Pressboardzylinder verlängert. Der begrenzende Faktor dabei waren die verwendeten Imprägniergefäße. Auch nach oben hin konnte so noch etwas an Länge zugewonnen werden, in der Absicht die Anzahl der Überschläge weiter zu reduzieren.

Die Distanzierungsstücke wurden mit Löchern versehen, damit allenfalls vorhandene Gasblasen beim Aufsteigen diese Barriere besser passieren können. Auch die Pressboardplatte zum Abdecken der metallischen Erdplatte wurde zur besseren Positionierung auf eine quadratische Form angepasst. Mit Veränderung der Ölspaltweiten, war auch eine Anpassung der Gewinde in der Erdplatte erforderlich. Zusätzlich wurden für die Untersuchungen in Esterflüssigkeiten die Stützstäbe aus Polyoxymethylen POM gefertigt, da diese eine Permittivität von 3,8 aufweisen und dadurch eine gleichmäßigere Belastung der Isolierstoffe erfolgt.

Die Boardzylinder wurden an der Hochspannungselektrode mit einer Plus-toleranz von + 2 mm und beim Erddom einer Minustoleranz – 2 mm in den Fertigungsauftrag gegeben.

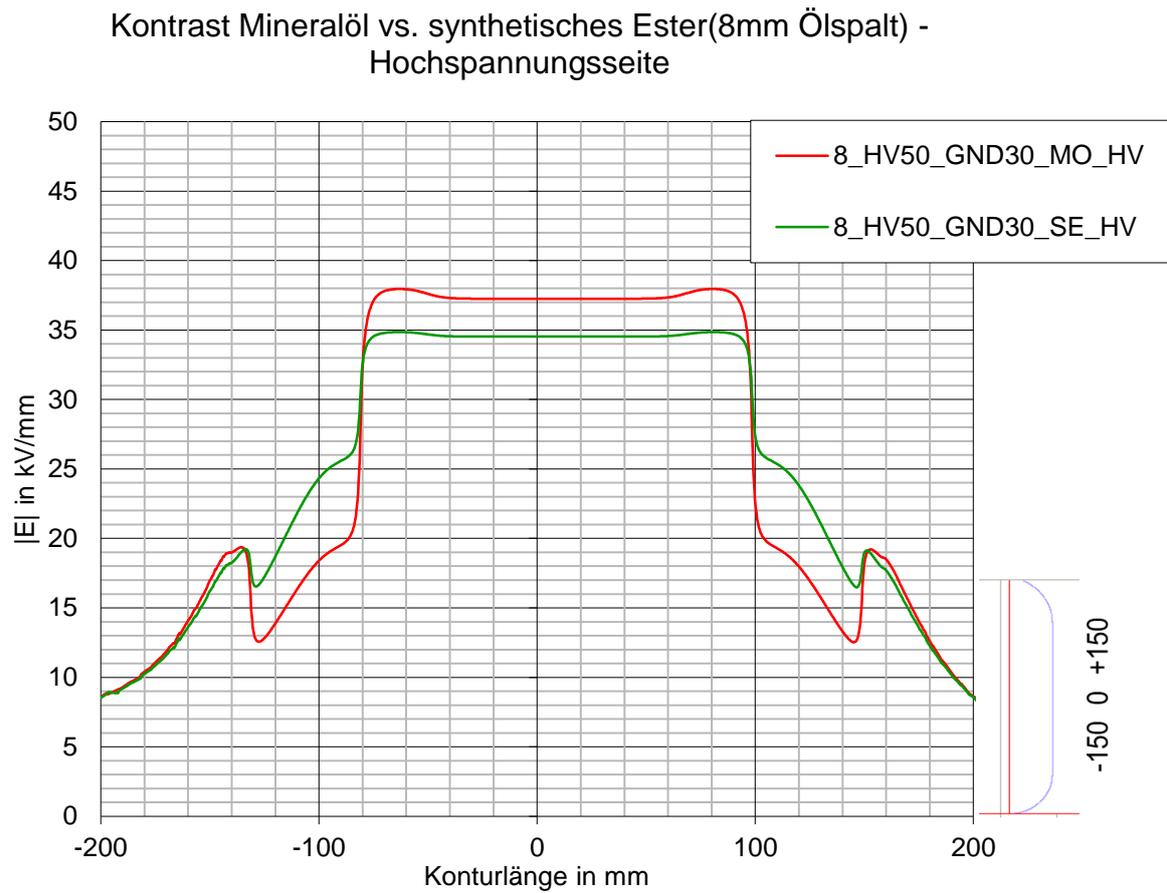


Abbildung 4-13 – Kontrast Mineralöl vs. synthetisches Ester(8mm Ölspalt) - Hochspannungsseite

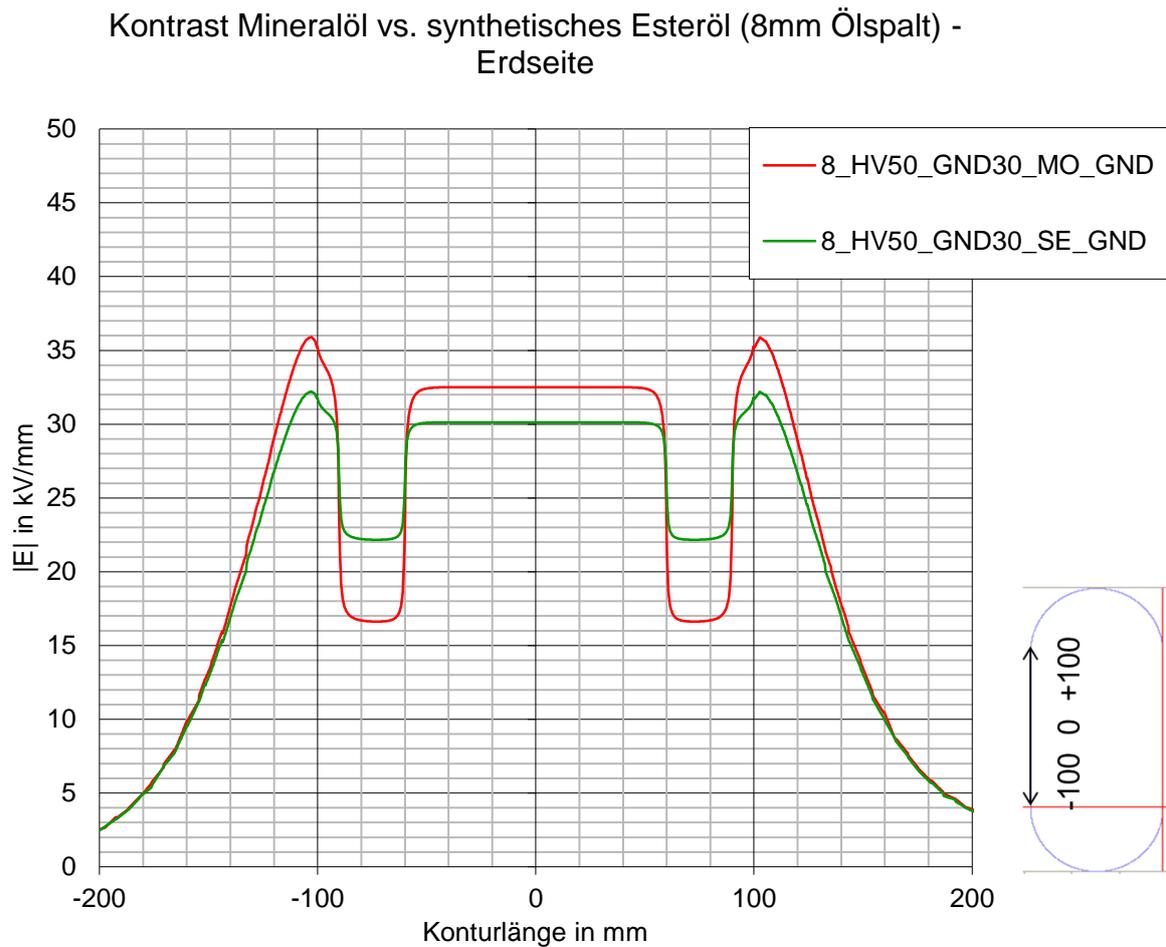


Abbildung 4-14 – Kontrast Mineralöl vs. synthetisches Esteröl (8mm Ölspalt) - Erdseite

Durch den Einsatz von Estern, hier gezeigt in Form des MIDEL 7131 verringern sich die Spitzenwerte an der Elektrodenoberfläche und es wird im Bereich der Distanzierungsstücke die elektrische Feldstärke etwas angehoben, womit sich insgesamt ein gleichmäßiger Verlauf ergibt.

5 Versuchsprogramm

Eingehend mit dem relativ hohen Aufwand in der Prüflingsbereitstellung und Handhabung, war es unbedingt erforderlich eine möglichst prüflingsschonende Untersuchungsvariante heranzuziehen, bei der eine hohe Aussagekraft der erzielten Ergebnisse gegeben war. Die Grundlage dazu lieferte ein firmeninternes Prüfprogramm für Prototypen [Hum98]. Dort wurde ein Ablauf gewählt, bei dem die Spannungshöhe stufenweise gesteigert wurde. Um einen passenden Einstiegswert zu wählen, wurde das aus der Dimensionierung bekannte Auslegeverfahren der Öl-Design-Kurven gewählt. Zum Start der Prüfung war ein Bereich des Formierens des Prüflings festgelegt, um frühzeitig Defekte wie Gasblasen oder anderweitige Ursachen ohne Zerstörung ausfindig machen zu können. Der Startwert mit 35 % des ermittelten Dimensionierungswerts gewählt, bei einer zeitlichen Beanspruchung von 15 min. So war die Chance gegeben, dass die Gasblasen in Bewegung kommen und zum Aufsteigen angeregt werden.

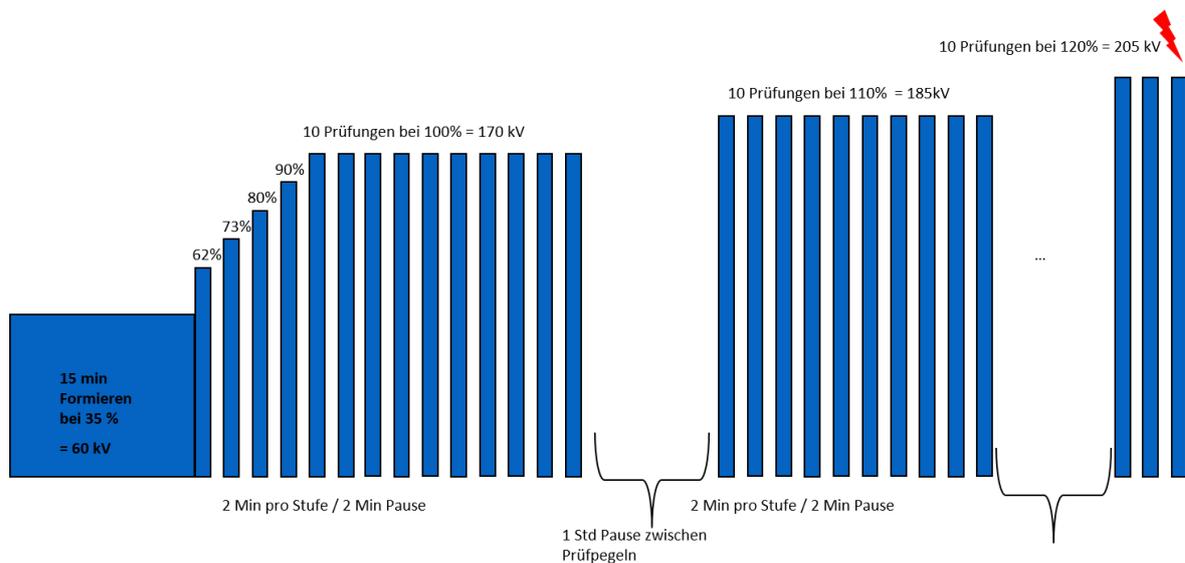


Abbildung 5-1 – Darstellung der Funktionsweise des Prüfprogramms

Danach sollten die Stufen schrittweise auf den Dimensionierungswert gesteigert werden. Dies erfolgte in zwei zusammengefassten 1 min Prüfungen, die die Teilentladungsmessung möglich machten, immer im Wechsel einer 2 minütiger Pause, bei der die Prüfspannung abgeschaltet wurde. Jede Spannungsstufe bestand aus 10 Wiederholungen. Nach Beenden jeder Stufe war eine einstündige Pause vorgesehen, damit eine Regeneration des Prüflings gegeben war. Idealerweise sollte diese Pause noch länger ausfallen, jedoch wurde hier ein Kompromiss der zeitlichen Wirtschaftlichkeit geschlossen. Die Stufen wurden in 10 %-Schritten bis zum Ausfall des Prüflings gesteigert. Die Prüfspannungswerte wurden praktikabler Weise in 5er Schritten gerundet. Die Prüfung wurde bis zum Ausscheiden des Prüflings exerziert, welches eingehend mit starken Entladungen und/oder Beschädigung am Prüfling gegeben war.

Die Ermittlung des Dimensionierungswert für die 1%-prozentige Wahrscheinlichkeit für den Einsatz von Teilentladungen, erfolgte unter zu Hilfenahme des firmeneigenen Auswerteprogramms FETool. Dazu wird das Model des Prüfaufbaus mit einer beliebigen Prüfspannung simuliert. Dann wird entlang der simulierten Kontur auf der Hochspannungselektrode mittig ein Fußpunkt A ausgewählt. Von dort wurde die zugehörige Feldlinie hin zu Punkt B auf der Erd-elektrode berechnet. Mit den hinterlegten Öl-Design Kurven wird überprüft wie groß der Abstand der Feldlinie in den einzelnen Ölkanälen zur vorgegebenen Simulationsspannung ist und korrigiert die Prüfspannung bei noch vorhandener Reserve nach oben oder begrenzt die Prüfspannung nach unten falls die Spannung im schwächsten Ölkanal bereits überschritten

wurde. Für die an den Elektroden anliegenden Ölkanäle wurde ein E_0 von 14,5 kV/mm und für den mittigen Ölkanal ein E_0 von 21,5 kV/mm. Diese Prozedur wurde für den 8 mm und auch die 20 mm Variante durchgeführt, wobei die ermittelten 100% Prüfspannungen bei 115,9 kV und bei 169,1 kV lagen.

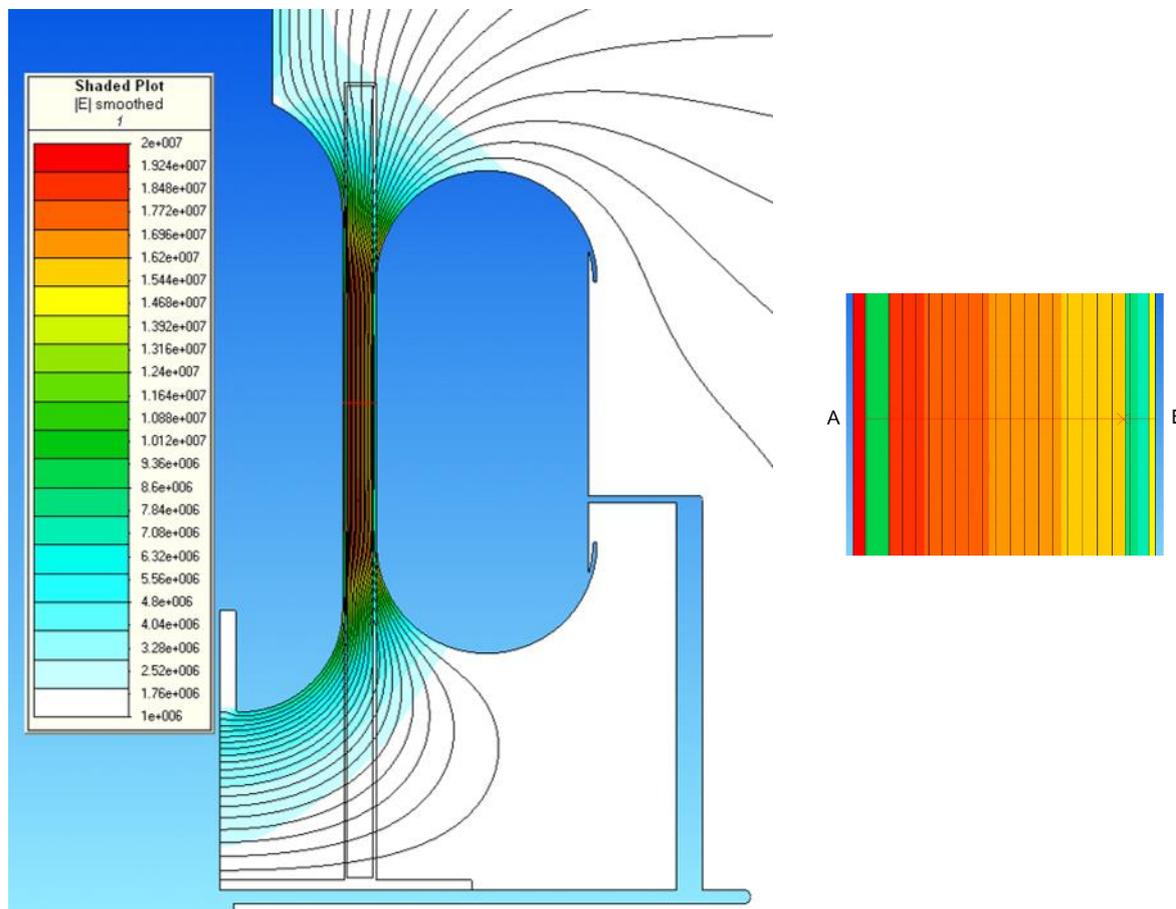


Abbildung 5-2 – links Feldbild des Prüfaufbaus mit 20 mm Öls; rechts detaillierte Darstellung des Feldlinienverlaufs von Punkt A nach B zur Ermittlung der Prüfspannung

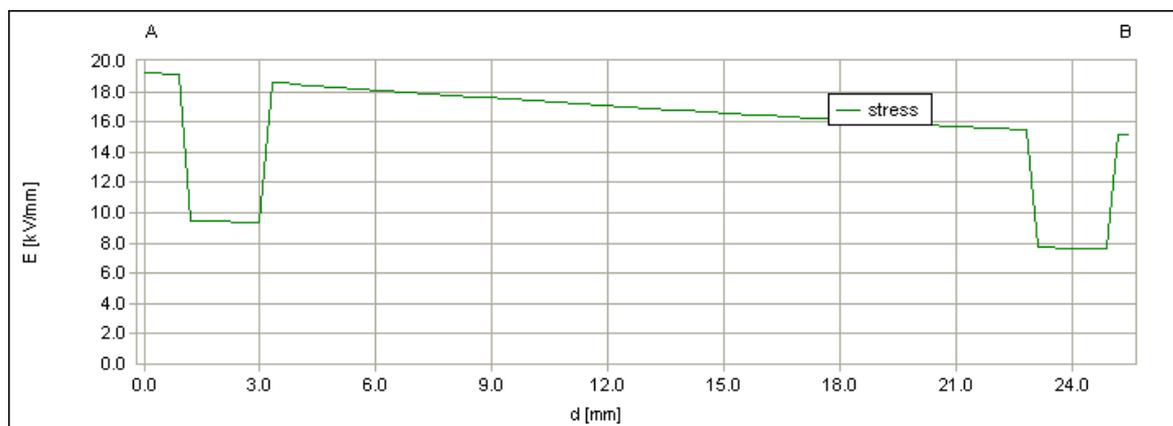


Abbildung 5-3 – Verlauf der berechneten Feldlinie von Punkt A nach B

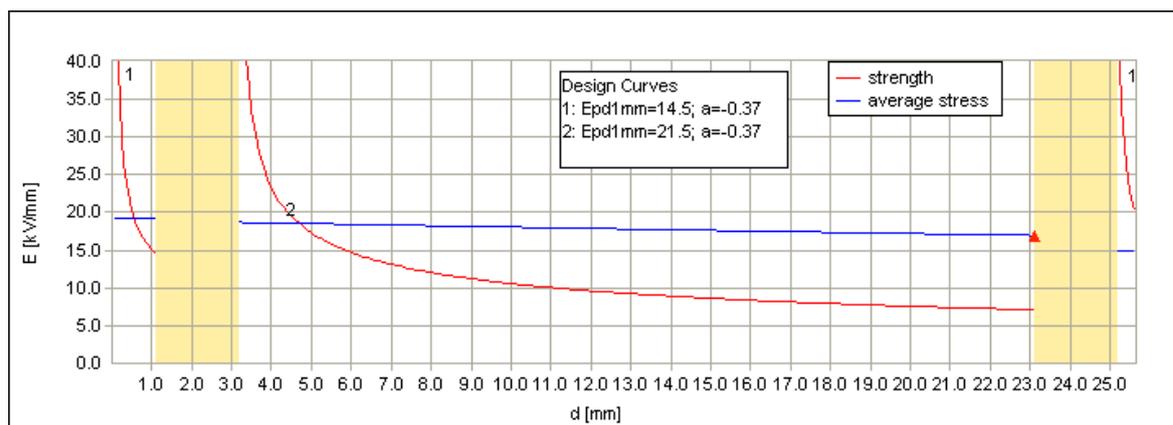


Abbildung 5-4 – Vergleich der gemittelten Feldstärke (blaue Graphen) mit den Designkurven (rote Graphen) zur Ermittlung der zulässigen Prüfspannung

Tabelle 5-1 – Berechnung der Prüfwerte bezogen auf den Designwert

	Ölspaltweite			
	8 mm		20 mm	
Prozentwert	Berechneter Wert [kV]	Prüfwert [kV]	Berechneter Wert [kV]	Prüfwert [kV]
0,55	63,75	65	93,01	95
0,62	71,86	70	104,84	105
0,73	84,61	85	123,44	125
0,8	92,72	90	135,28	135
0,9	104,31	105	152,19	150
1	115,90**	115	169,10**	170
1,1	127,49	125	186,01	185
1,2	139,08	140	202,92	205
1,3	150,67	150	219,83	220
1,4	162,26	160	236,74	240
1,5	173,85	175	253,65	255
1,6	185,44	185	270,56	270
1,7	197,03	195	287,47	285
1,8	208,62	210	304,38	305
1,9	220,21	220	321,29	320
2	231,80	230	338,20	340

2,1	243,39	245	355,11	355
2,2	254,98	255	372,02	370
2,3	266,57	265	388,93	390
2,4	278,16	280	405,84	400*
* Begrenzung durch Prüfanlage				
** Wert aus Simulation				

6 Vorbereitung und Handhabung der Prüflinge

6.1 Montage

Die angelieferten Boardzylinder waren noch zu den gewünschten Prüflingen zu montieren. Dazu wurden die Zylinder im Umluftofen bei 110 °C 24 h lang vorgetrocknet, um allzu große Schrumpfungen nach der Montage zu vermeiden. Aufgrund der vorhandenen Plustoleranzen konnten die Distanzierungsringe nicht ohne bearbeiten über die Innenzylinder gestülpt werden, sondern mussten durch Abschleifen angepasst werden. Im nächsten Schritt erfolgte die Anpassung der Ringe auf das Innenmaß der Außenzylinder.

Zu Beginn der Montagearbeiten wurde ein pneumatisches Handschleifgerät mit einem gefächerten Schleifaufsatz aus Sandpapieren verwendet, mit dem Nachteil der ungleichen Abnutzung des Schleifaufsatzes. Das hatte zur Folge, dass die Kanten der Distanzringe zu stark abgeschliffen wurden. Aufgrund der fehlenden Auflagefläche, konnten die Ringe nur abgewinkelt auf die Zylinder aufgebracht werden.

Die Abhilfe schaffte eine Schleifmaschine in der Produktion. Diese war mit einer vertikalen Schleifrolle zum Schleifen der Innenseite der Ringe und einem Schleifband zum Bearbeiten der Außenseite ausgestattet, welche ein präzises Ergebnis in kürzerer Zeit lieferte.

6.2 Trocknung

Zellulose gilt als hydrophil, wird sie bei normalen Umgebungsbedingungen gelagert nimmt sie die Luftfeuchte auf, bis sich Gleichgewichtsbedingungen einstellen. Jedoch bei Verwendung als Isolierstoff in Transformatoren ist der Einfluss jeglicher Feuchtigkeit schädlich, da diese die Alterungsprozesse beschleunigen und die elektrische Festigkeit herab setzen. Um diese Feuchte zu entfernen ist ein Trocknungsprozess erforderlich. Dieser ist in zwei Phasen unterteilt, die Umlufttrocknung und anschließende Fein-Vakuum-Trocknung. Das Transformerboard schrumpft bei der Trocknung, weshalb die Hochspannungselektrode gleich von Beginn an mit dem Zylindern in dem Umluftofen gestellt wird. Dadurch kann der Innenzylinder höchstens aufschumpfen, doch bleibt passend. Begonnen wird mit der Umluftphase bei 110 °C dies hat den Vorteil einer besseren Wärmeübertragung durch Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung. Durch die heiße Luft kann das Wasser in Form von Dampf schnell entweichen, es erfolgt eine gleichmässige Trocknung. Anfangs befindet sich der Wasserspiegel auf der Oberfläche und sinkt immer weiter ins Material hinein ab. Von da an sollte die Trocknungsgeschwindigkeit nur vom Strömungswiderstand abhängen, jedoch ist Zellulose hygroskopisch und das Wasser ist molekular an die Zellulose verbunden, wodurch große Kräfte zur Trennung erforderlich sind. Um den Gleichgewichtszustand für eine beschleunigte Trocknung anzupassen wird der Druck abgesenkt, dies erfolgt im Fein-Vakuum. Dazu ist eine Umlagerung in den Vakuumofen in spezielle Imprägniergefäße erforderlich. Der Trocknungsprozeß dauerte mindestens 24 h bei einem Enddruck kleiner 1 mBar. Das Trocknungsergebnis wurde stichprobenartig überprüft. Darüber hinaus kann durch Überwachung des Druckverlaufs festgestellt werden, wie fortgeschritten der aktuelle Trocknungsvorgang bereits ist. Ist kein weiteres Absinken des Drucks über eine längere Zeitdauer mehr wahrnehmbar, kann der Vorgang als abgeschlossen bezeichnet werden.

6.3 Imprägnierung

Bereits zu Beginn der Trocknung wurden Imprägnierschläuche in die bereits erwähnten Imprägniergefäße verlegt. Durch verbinden des Öltanks mit den äußeren Anschlüssen am Ofen war es möglich die Isolierflüssigkeiten durch das noch angelegte Vakuum in die Gefäße zu saugen bis die Prüflinge komplett mit Isolierflüssigkeit bedeckt waren. Die Überwachung der

Flüssigkeitspegel erfolgte über vorhandene Schaugläser am Ofen und der Füllstandanzeige am Tank. Nach erfolgter Füllung lief die Vakuumpumpe noch 15 min nach um sicherzustellen, dass keine Gasblasen mehr im Prüfling vorhanden sind. Danach erfolgte das Brechen des Vakuums durch Einleiten von trockener Luft über einen Silicatgeltrockner. Der nun anstehende Atmosphärendruck bewirkt, dass die Isolierflüssigkeit durch die Kapillarwirkung in die Zellulose gedrückt wird und die vorhandenen Hohlräume auffüllt. Bei Mineralöl wurde der Ofen sofort nach Einleiten des Öls abgeschaltet und bei den Estern wurde noch eine Zeit von 2 h gewährt, damit sich das Ester aufwärmt und mit der eingehenden Viskositätsabsenkung besser in die Zellulose eindringt. Die Standzeit der Prüflinge war mit 24 h bemessen und erfolgte für Mineralöl wahlweise im Ofen oder direkt nach Einbau im Prüfkessel. Für Ester erfolgte die Standzeit bis zum Auskühlen im Ofen.



Abbildung 6-1 – Vakuumofen bestückt mit den Prüflingen

6.4 Einbau der Prüflinge

In das leere und gereinigte Prüfgefäß wurde zu Beginn die Messing Bodenplatte mit dem Kranen eingesetzt und durch Schrauben in der Mitte fixiert. Die Füllung des Prüfgefäßes mit Isolierflüssigkeit erfolgte über eine Filterpumpe mit Zellofilter. Mit dem Zellofilter wurden Partikel ausgefiltert und dem Fluid die Feuchte entzogen. Das zu füllende Volumen betrug ca. 700 Liter bei einer Förderrate von ca. 3 l/min.

Das Imprägniergefäß mit den Prüflingen wurde mittels Kranen in den Prüfkessel eingesetzt. Um Luftblasen und Feuchtigkeitseintrag zu vermeiden erfolgte der komplette Einbau der Prüflinge in der Flüssigkeit. Das nachträgliche Einsetzen des Erddoms erfolgte ebenfalls mit dem Kranen, damit dieser präziser platziert werden konnte und die eingeschlossene Luft verwirbelungsfrei entweichen konnte. Danach wurde noch das Hochspannungsrohr in die Elektrode eingeschraubt. Das Hochspannungsrohr war mit einem Doppeltorroiden abgeschlossen, auf welchen zum Abschluss das Verbindungsrohr zum Koppelkondensator abgelegt wurde.

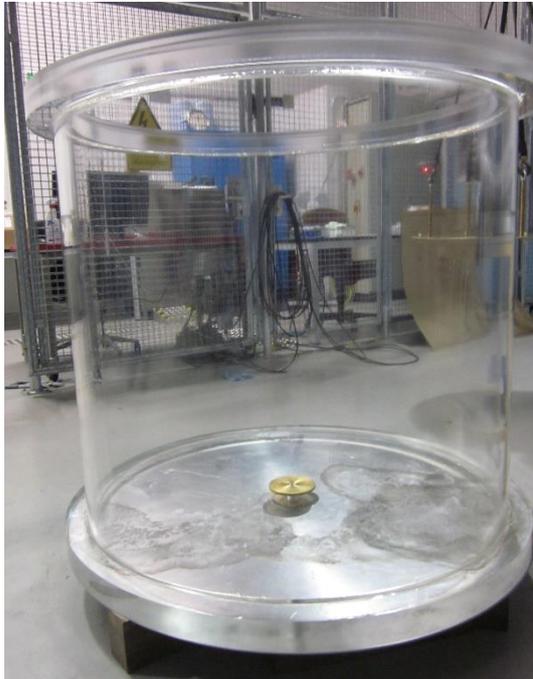


Abbildung 6-2 – leeres Prüfgefäß (links) – Erdplatte am Kran hängend (rechts)

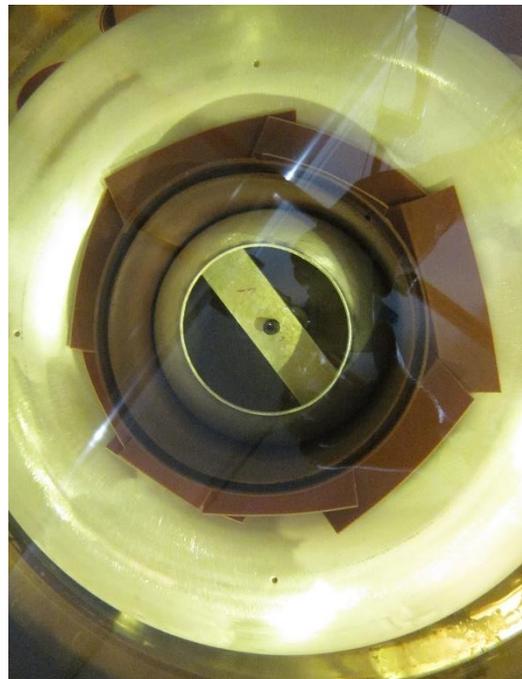


Abbildung 6-3 – Einsetzen des Imprägniergefäßes (links) – Elektrodenanordnung von oben (rechts)



Abbildung 6-4 – Eingebauter Prüfling mit Verbindung zur Prüfkaskade

Protokollierung der Versuchsbedingungen

Um im Nachhinein Rückschlüsse auf die Untersuchungen ziehen zu können und ggf. Korrelationen einzelner Parameter erkennen zu können, war es wichtig die Schwankungen der Umgebungsbedingungen und der Zustand der verwendeten Materialien zu dokumentieren.

6.4.1 Bezeichnung der Prüflinge

Die Bezeichnung der Prüflinge setzt sich aus einem **P** wie Prüfling, einer dreistelligen Laufnummer, der Bezeichnung der Isolationsflüssigkeit und der Ölspaltweite in Millimetern zusammen. Für die Isolationsflüssigkeit wurden die Abkürzungen **MO** für Mineralöl, **SE** für synthetisches Ester und **NE** für natürliches Ester verwendet.

		MO	
		SE	8
<u>P</u>	<u>001</u>	<u>NE</u>	<u>20</u>
Prüfling	laufende Nummer	Isolier- flüssigkeit	Ölspaltweite

6.4.2 Durchschlagsspannung

Vor Beginn und nach Beenden der jeweiligen dielektrischen Untersuchung jedes Prüflings, wurde eine doppelte Bestimmung der Durchschlagsspannung mit einer gezogenen Probe der Isolierflüssigkeit nach IEC 60156 durchgeführt.

6.4.3 Ölfeuchte und Temperatur

Zur Aufbereitung wurde die Isolierflüssigkeit jeweils auf 60 °C aufgeheizt, um unter Vakuum getrocknet und entgast zu werden, sowie die Partikel mit einem Zellulosefilter abgesondert. Die

Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte mit dem Vaisalla Messgerät, welches mit einer kapazitiven Sonde die relative Feuchte den a_w -Wert gemessen hat. Zusätzlich wurde auch die Temperatur der Flüssigkeit mitgemessen. Für Mineralöl konnte mit den eingestellten Parametern auch eine Umrechnung für den Wassergehalt in ppm-Werten erfolgen. Aufgrund von unbekanntem Umrechnungsparametern, konnte für die Ester keine korrekte Umrechnung erfolgen.

6.4.4 Luftfeuchte und -temperatur

Die Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, da im Labor eine Klimatisierung nicht vorhanden war, schwankte die Raumtemperatur zwischen 18 und 36 °C. Um diese Änderungen festzuhalten wurden die Temperaturen und die Luftfeuchte zu Beginn und Ende der jeweiligen Messreihen schriftlich notiert. Zur Reduktion der Luftfeuchte war ein Luftentfeuchter im kontinuierlichen Betrieb eingesetzt.

7 Durchgeführte Untersuchungen

7.1 Bestimmung der Permittivitäten

7.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung der Messung

Wird der verwendete Versuchsaufbau (siehe 7.2) mit Estern statt Mineralöl betrieben, so verändert sich aufgrund der höheren Permittivität der Ester auch die sich ergebende elektrische Feldverteilung. In der Literatur sind hierfür die Dielektrizitätszahlen für die verwendeten Flüssigkeiten bekannt, jedoch nicht für das mit Estern imprägnierte Board. Daher war eine nähere Untersuchung erforderlich, um die daraus gewonnenen Werte in der Simulation verwenden zu können. Erst damit konnte die tatsächliche Feldverteilung durch eine erneute Simulation festgestellt werden.

Zur Überprüfung wie sich die Permittivitäten und der Verlustfaktor bei den Estern im Vergleich zu Mineralöl ändern, vor allem für imprägniertes Transformerboard wurde eine elektrische Messung mit einer tanDelta Messbrücke bei 50 Hz durchgeführt.

Der verwendete Messplatz bestand aus zwei Prü fzellen ausgestattet mit Schirmelektroden, bei einer Messfläche von 80 cm² (A). Die Schirmelektroden sind geerdet, um Störeinflüsse durch Streukapazitäten zu unterbinden. Für die elektrische Messung wurde eine Kapazitäts- und Verlustfaktormessbrücke verwendet (B) mit Vergleichskapazität von 300 pF (C). Die Spannungsversorgung erfolgte mit einem Hochspannungsnetzgerät 0 bis 2kV AC (D). Zur Vorgabe und Kontrolle der Temperatur wurden eine Steuerung (E) und zwei Thermometer (F) verwendet.

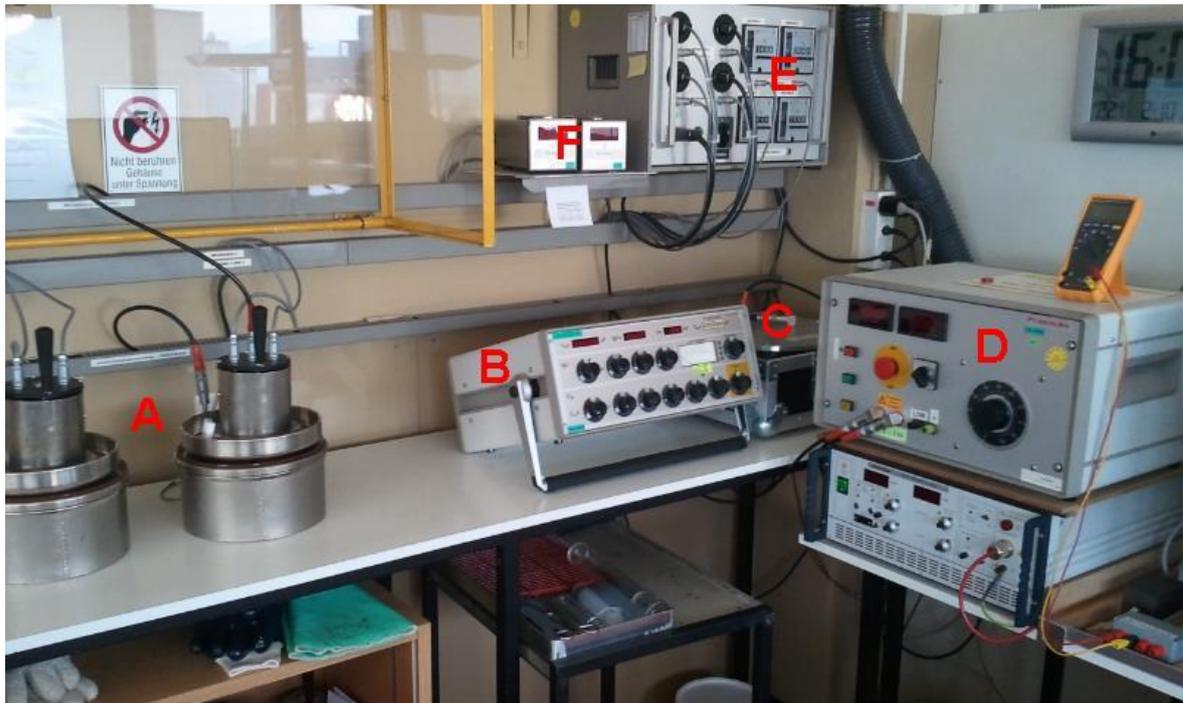


Abbildung 7-1 – Übersicht des Messplatzes zur Messung der Kapazität und des Verlustfaktors

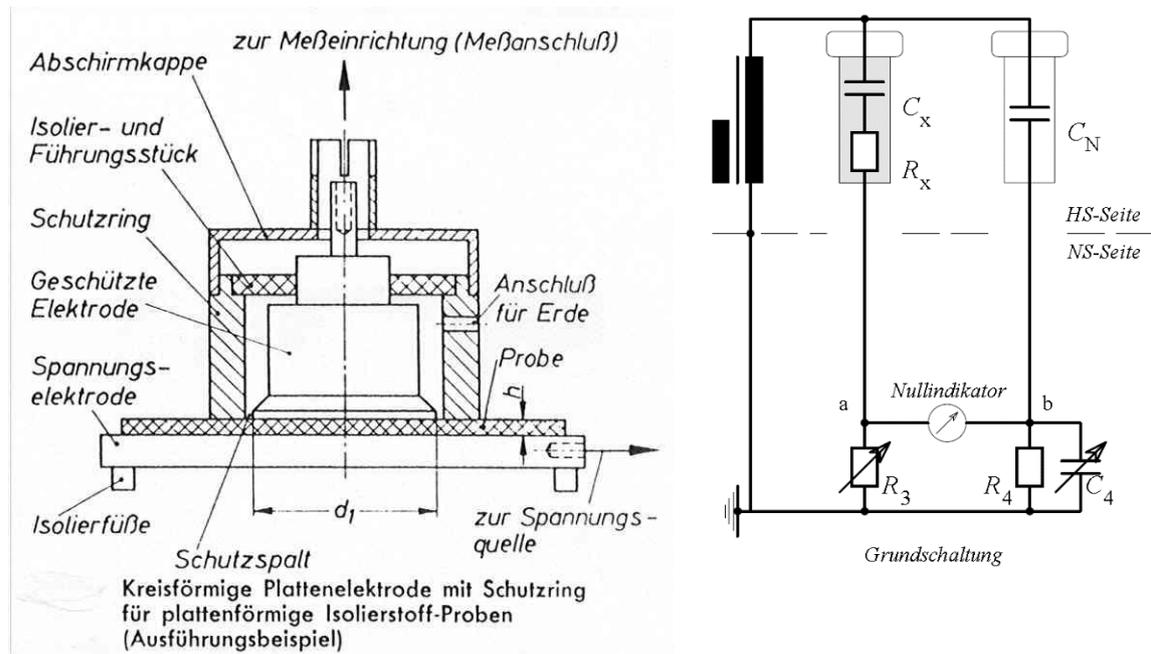


Abbildung 7-2 – links Plattenelektrode mit Schutzring; rechts tanDelta Messbrücke [Küc09]

Zu Beginn der Messung wurde die Elektrode auf einen Distanzring von 1,725 mm gesetzt, um unter Luft eine Kontrollmessung der Kapazität durchzuführen. Die Prüfspannung wurde mit 1 kV gewählt, da ab 1,4 kV mit Teilentladungen zu rechnen wäre und diese die Messergebnisse verfälschen würden. Danach wurde die zu untersuchende Flüssigkeit bis zum Bedecken der Messdistanz in die Messpfanne eingegossen, um deren Kapazität und den Verlustfaktor zu vermessen. Fortführend wurden noch die Boardproben eingelegt und vermessen. Zur Ermittlung der Permittivität war noch die exakte Dicke der Proben erforderlich. Diese wurde mit einer Schieblehre an mehreren Stellen gemessen und gemittelt. Die Dielektrizitätszahl ϵ_r berechnet sich aus dem Verhältnis der gemessenen Kapazität C_x zur Vergleichskapazität C_0 bereinigt um die Probendicke.

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (7-1)$$

Um das Verhalten auch noch bei 90 °C zu ermitteln, wurden die Pfanne durch die Heizplatte und die Elektrode mit der inneren Heizung bis zum eingeschwungenen Zustand auf Temperatur gebracht.

7.1.2 Ergebnisse

Verlustfaktor

Bei Mineralöl ist eine leichte Erhöhung des Verlustfaktors bei 90 °C festzustellen. Die Ursache dafür ist in der Abnahme der Viskosität des Mineralöls zu finden. Dadurch erhöht sich die Beweglichkeit der Ladungsträger, womit der Ionenstrom größer wird und auch der Verlustfaktor steigt [Hem04]

Für Ester ist diese Erklärung für die Zunahme des Verlustfaktors nicht zutreffend, da die Viskosität von Grund auf schon sehr viel höher liegt und der Ionenstrom daher schon geringer sein

müsste. Eine mögliche Ursache für die höheren Verluste in Ester könnte in dessen Molekülstruktur begründet sein, da die häufig vorkommenden Kohlenstoff-Sauerstoffbindungen ein permanentes Dipolmoment erzeugen und sich dies in einer starken Orientierungspolarisation auswirkt [Hem04].

Permittivität

Die Messergebnisse für Mineralöl liegen im Bereich der aus der Literatur bekannten Werte, bei Zunahme der Temperatur ist ein leichtes Abnehmen der Permittivität zu vernehmen. Für mit Mineralöl imprägniertes Board hingegen liegen die Werte etwas unter den Angaben in der Literatur, jedoch ist hier bei 90 °C ein Ansteigen tendenzielles Ansteigen der Permittivität festzustellen. Bei den Estern bestätigen sich ebenfalls die Literaturangaben bezüglich der Dielektrizitätszahlen der Flüssigkeiten. Jedoch ist der Trend der Abnahme der Permittivität bei der Flüssigkeit an sich und der Zunahme der Permittivität bei imprägniertem Pressboard verstärkt festzustellen.

Der Grund für die Temperaturabhängigkeit bei den Flüssigkeiten liegt in der Wärmebewegung der Atome beziehungsweise der Moleküle. Die Überlagerung der thermischen Molekularbewegung und der durch das elektrische Feld bewirkten Polarisation stören das Ausrichten der Moleküle. Dadurch sinkt die Dielektrizitätszahl mit steigender Temperatur [Hem04].

Hingegen ist das Ansteigen der Permittivität mit der Temperatur bei imprägniertem Pressboard hauptsächlich durch die Orientierungspolarisation verursacht. Durch den Temperaturanstieg werden die zunächst „eingefrorenen“ Dipole beweglicher, so dass Orientierungspolarisation einsetzen kann. Die Dielektrizitätszahl steigt häufig in mehreren Stufen an, entsprechend dem „Auftauen“ verschiedener Polarisationsmechanismen [Küc09].

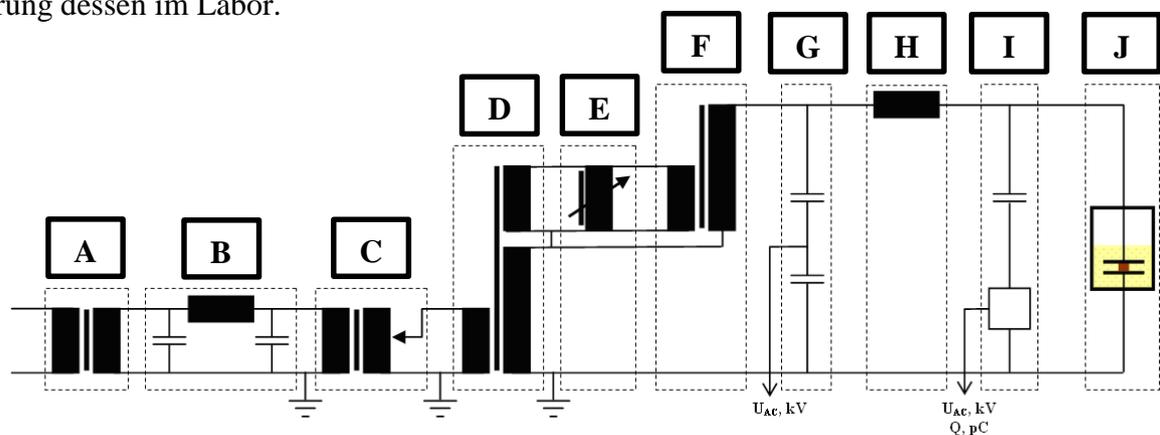
Tabelle 7-1 – Messergebnisse Untersuchung der Permittivitäten

Name Probe	Dicke in mm	Mineralöl			Synthetisches Ester			Natürliches Ester		
		ϑ in °C	VF tan δ	DZ / ε _r	ϑ in °C	VF tan δ	DZ ε _r	ϑ in °C	VF tan δ	DZ ε _r
Öl	1,725	26	0,00009	2,24	30	0,00088	3,30	26	0,00433	3,26
T IV 1	1,930	26	0,00327	4,17	30	0,00460	4,71	26	0,00410	4,68
T IV 2	1,930	26	0,00323	4,17	30	0,00427	4,70	26	0,00414	4,64
T IV 3	1,930	26	0,00328	4,18	30	0,00450	4,72	26	0,00401	4,69
Öl	1,725	90	0,00137	2,20	90	0,04101	3,11	90	0,03931	2,99
T IV 1	1,930	90	0,00404	4,27	90	0,03758	4,94	90	0,01488	4,76
T IV 2	1,930	90	0,00405	4,28	90	0,03224	4,90	90	0,01490	4,73
T IV 3	1,930	90	0,00405	4,26	90	0,03370	4,91	90	0,01311	4,75

7.2 Versuchsaufbau im Hochspannungslabor

7.2.1 Prüfanlage

Die Versuchsreihen wurden im Hochspannungslabor der Fa. Weidmann in Rapperswil durchgeführt. Als Prüfspannungsquelle wurde dabei eine Wechselspannungsprüfkaskade mit 400 kVAC verwendet. Diese war zweistufig aus zwei Testtransformatoren zu je 200 kVAC aufgebaut. Die Anbindung ans Versorgungsnetz erfolgte über einen Netztrenntransformator bei 400 V. Zur Störungsentkopplung war zusätzlich ein Niederspannungsfilter eingebaut. Mittels eines Regeltrenntransformators erfolgte die variable Spannungseinstellung, wobei die Stellgeschwindigkeit über eine Stellschraube am Regeltransformator angepasst werden konnte. Die maximal mögliche Stellgeschwindigkeit lag bei ca. 9 kV/s. Die Spannung wurde hochspannungsseitig mit einem kapazitiven Spannungsteiler gemessen. Zur Dämpfung von Störungen auf den Prüftransformator und damit der Teilentladungsstrom über den Koppelkondensator fließt war längs noch eine Sperrimpedanz verbaut. Die Teilentladungsmessung erfolgte über den parallel zum Prüfling geschalteten Koppelkondensator mit Ankoppelvierpol. In Abbildung 7-3 das Schema des Versuchsaufbaus dargestellt, und in Abbildung 7-4 die praktische Realisierung dessen im Labor.



A ...	Netztrenntrafo ü: 1:1, U:400V	F ...	Hochspannungstrafo – 2. Stufe 20 kVA, 200 kV
B ...	Niederspannungsfilter	G ...	kapazitiver Spannungsteiler 600 kV, 8000:1, 0,2 nC \pm 10 %
C ...	Regeltrenntrafo 40 kVA U1: 400 V / 100 A, U2: 0-500 V / 80 A	H ...	Sperrimpedanz 80 mH
D ...	Hochspannungstrafo – 1. Stufe 20 kVA, 200 kV	I ...	Koppelkondensator mit Ankop- pelvierpol 400 kV, 1 nC \pm 10 %
E ...	Blindleistungskompensation	J ...	Prüfgefäß

Abbildung 7-3 – Schema des Versuchsaufbaus im Hochspannungslabor

Im Labor selbst lag die Priorität der Anordnung auf einer guten Sichtbarkeit des Prüfkessels von der Schaltwarte aus. Für die hochspannungsseitige Messung der Spannung war der kapazitive Spannungsteiler über ein Verbindungsrohr parallel zur zweiten Spannungsstufe geschaltet. Der Koppelkondensator zur Teilentladungsmessung war längs über eine Sperrimpedanz angebunden. Parallel dazu wurde der Prüfkessel mit einem Rohr verbunden. Die Kugelförmigen Endabschlüsse waren jeweils auf den Schirmelementen abgelegt.

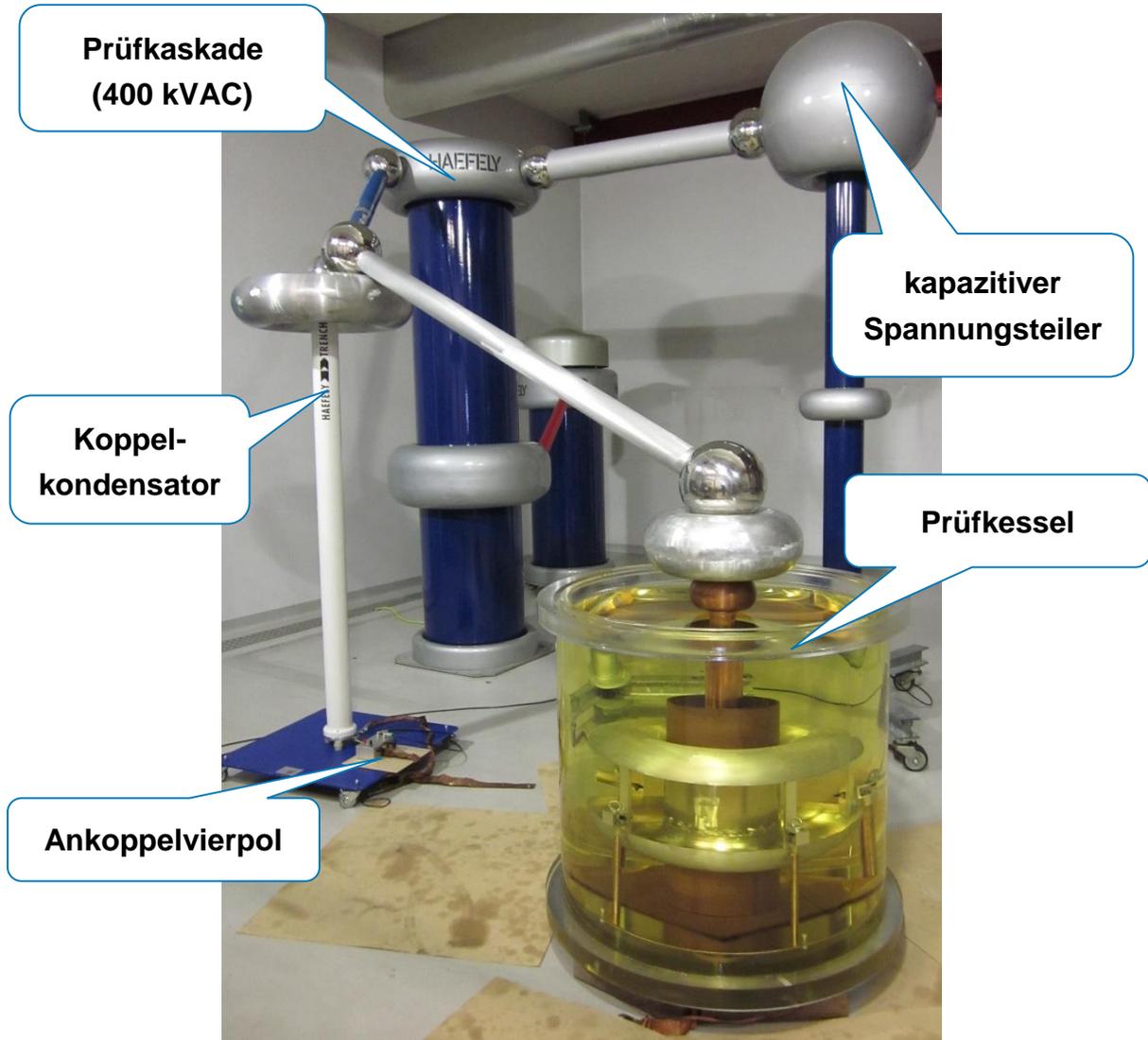


Abbildung 7-4 – Laboraufbau – Wechselspannungsprüfanlage mit Prüfling

7.2.2 Prüfkessel

Das verwendete Prüfgefäß war ein zylindrischer Behälter aus Plexiglas. Die maximale Füllhöhe lag bei ca. 1 m bei einem Durchmesser von 1 m. Zur Anbindung der Erdverbindung an den nächstliegenden Laborerdungspunkt, war eine Metallplatte mit Kupferlitze an der Bodenseite angebracht. Da die Unterseite daher nicht plan war, wurde das Gefäß auf Blockspanklötzen aufgestellt. Die Hochspannungsanbindung erfolgte über ein Verbindungsrohr, welches auf einem Schirmelement abgelegt wurde.

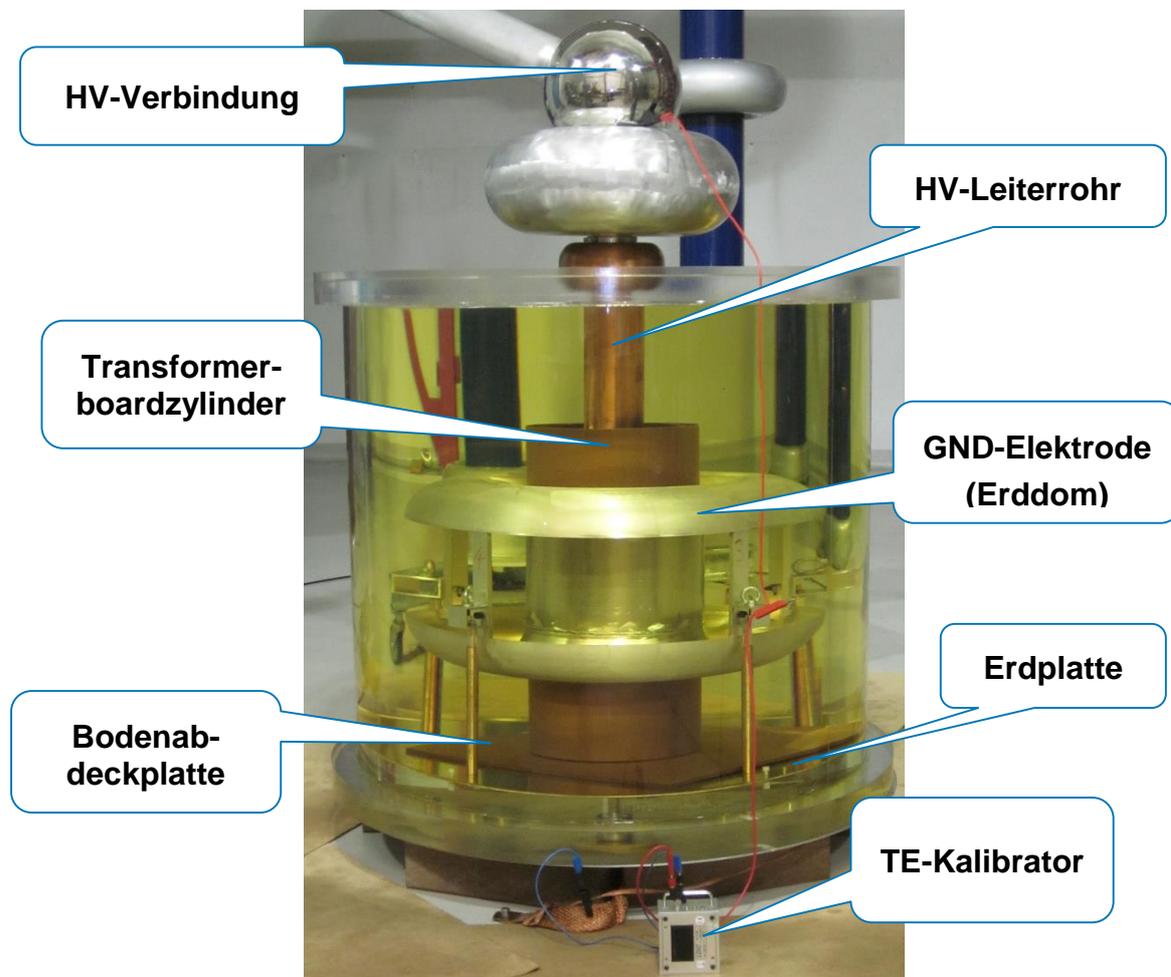


Abbildung 7-5 – Prüfkessel mit eingebautem Prüfling während TE-Kalibrierung

7.3 Dielektrische Untersuchungen

7.3.1 Teilentladungsmessung

Zur Vergleichbarkeit der Teilentladungsmessungen nach IEC 60270 wurde vor Beginn der jeweiligen Untersuchung eines Prüflings das Teilentladungsmesssystem mit 5 pC kalibriert. Dies erfolgte im nicht geerdeten Zustand, indem ein Kalibriergerät parallel zum Prüfling geschaltet wurde (siehe Abbildung 7-5), um eine definierte Pulsfolge einzuspeisen und das Messsystem darauf abzugleichen.

7.3.2 Allgemeines Prüflingsverhalten und Optimierungen am Versuchsaufbau

Während der Formierungsphase und dem Steigern der Spannung wurde stets auf Ausfälligkeiten geachtet. Als Messmethode wurde dazu hauptsächlich das TE Monitoring System verwendet. Beim Hinweis auf vorhandene Blasen wurde die Formierungsphase bei Bedarf bis zum Abflachen der Teilentladungen und damit dem Aufsteigen der Gasblasen verlängert. Zusätzlich wurde bei den Versuchen auf Geräuschbildung und sichtbare Entladungen entlang der Zylinder geachtet. Die Entladungen waren vor allem im Bereich des Domradius und nach oben vorwachsend entlang der Boardzylinder festzustellen. In Kombination dazu waren die Entladungen als Geräusch in Form von Knistern und Knacken wahrnehmbar. Um Erfahrungen zu sammeln wurden bis Prüfling P015 nur die 20 mm Variante getestet.

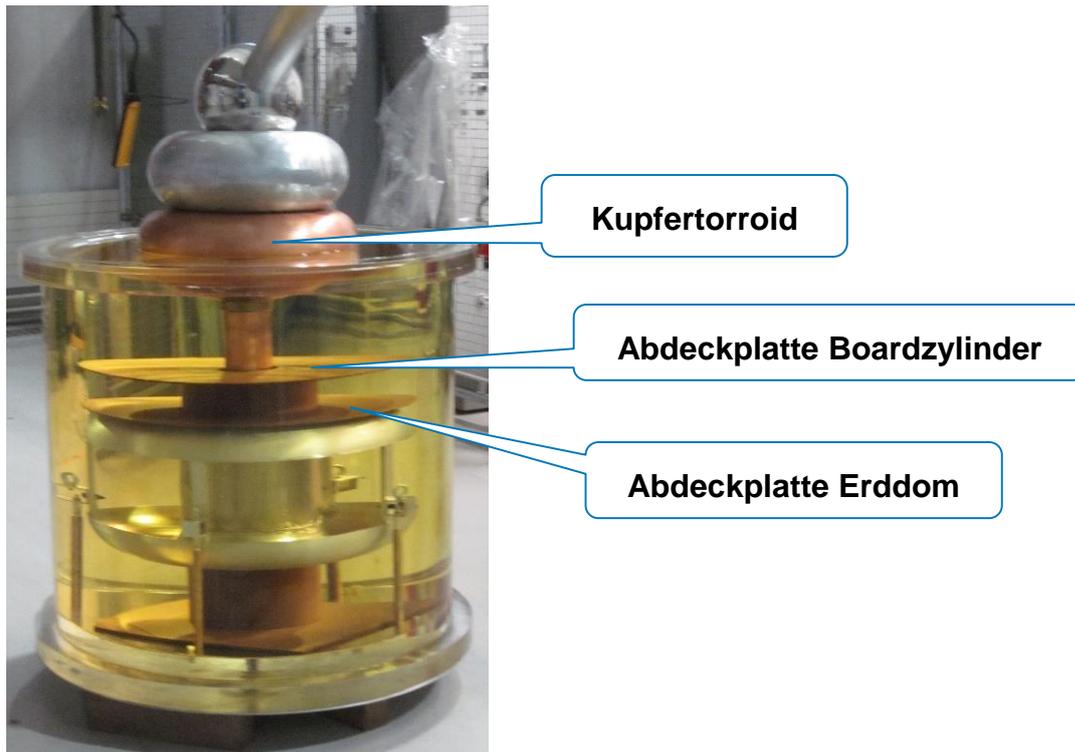


Abbildung 7-6 – Prüfling mit Abdeckplatten und Kupfertorroid

Mit laufenden Versuchen kristallisierte sich das Zünden von Entladungen im oberen Domradius mit voranwachsen der Entladung hin zum Hochspannungsrohr resultierend im Überschlag als die Hauptausfallursache heraus. Um diesen Vorgang zu erschweren wurde ab P009NE20 jeweils eine kreisrunde Abdeckplatte aus 5 mm Transformerboard auf dem Erddom abgelegt und eine Abdeckplatte auf den Zylindern. Dadurch konnten Höchstwerte von bis zu 340 kV erreicht werden. Durch die Verwendung eines neuen Hochspannungsrohrs mit einem größeren Durchmesser wurden weitere Verbesserungen erhofft. Dies wies sich bei Prüfling P013MO20 mit Mineralöl als Trugschluss, da es bereits ab dem 100%-Wert 170 kV zu starken Entladungen an der Öloberfläche kam. Das Auffällige daran war, dass zuvor bei natürlichem Ester ohne Probleme bis 255 kV getestet werden konnte. Es war somit ein erster Hinweis darauf, wie unterschiedlich sich die Isolierflüssigkeiten in der Praxis auswirken. Um die Entladungen zu unterbinden wurde das vorige 80 mm Rohr in Kombination eine weitaus größeren Kupfertorroiden verwendet.

Ab Prüfling P016MO8 wurden auch die ersten Erfahrungen mit der 8 mm Variante gesammelt. Hier stellte sich heraus, dass bereits ab der 55%-Stufe stärkere Teilentladungen einsetzen, welche nicht mehr stoppten. Um die genauere Ursache herauszufinden wurde der Prüfling bis zum erzwungenen Abbruch durch starke energiereiche Entladungen untersucht. Es waren Entladungsspuren im oberen und unteren Bereich der Domradien festzustellen. Somit war ohne weitere Maßnahmen kein Sinnvolles und aussagekräftiges Testen möglich. Für weitere 8 mm Prüflinge wurden daher Kreppwinkelringe in den oberen Domradius eingelegt. In weiteren Untersuchungen erwies sich dies als erfolgreich, so dass auch bei der 20 mm Variante dazu übergegangen wurde Kreppwinkelringe als Einlage zu verwenden.

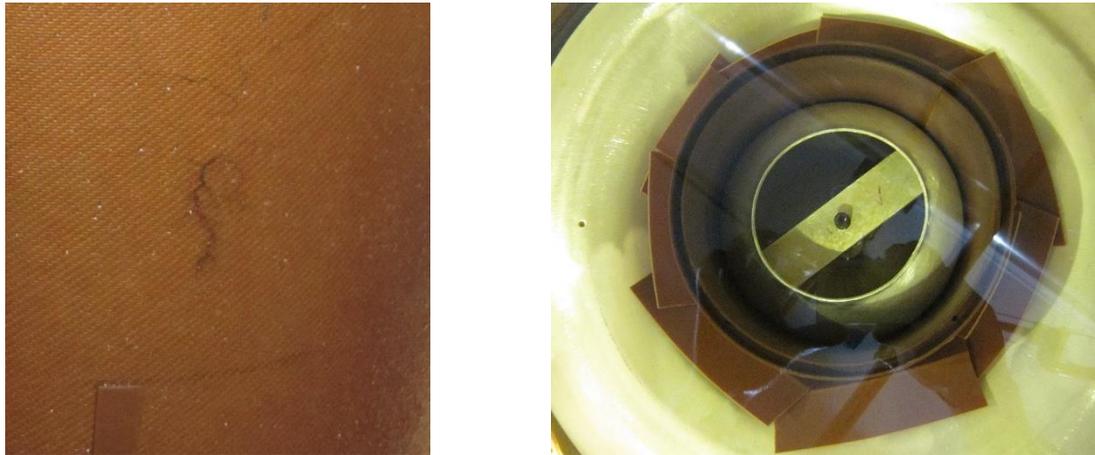


Abbildung 7-7 – Entladungsspuren im Bereich des Radius (links) – Einlage Kreppwinkelringe im Domradius (rechts)

8 Auswertung

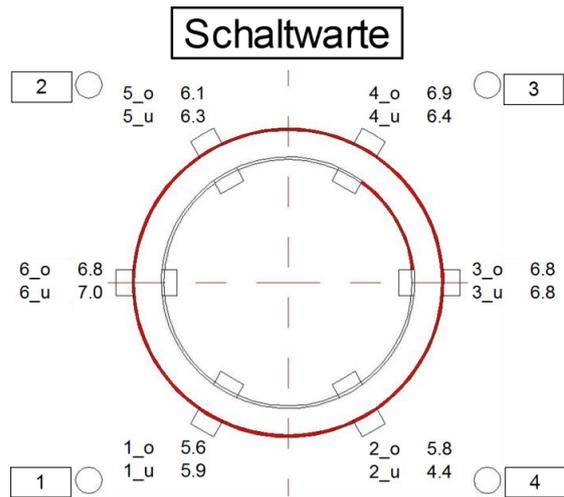
8.1 Ausbau und Dokumentation der Prüflinge

Nach Beenden der dielektrischen Untersuchung erfolgte der Ausbau der Prüflinge. Damit die entstanden Spuren richtig zugeordnet werden können, wurde die Einbaulage anhand der Richtungsorientierung im Labor festgehalten und auf den Zylindern mit einem speziellen Farbstift markiert. Als Orientierungspunkte dazu dienten die Domstreben, welche durchnummeriert und in einer festgelegten Skizze eingetragen wurden. Diese Stelle wurde gleichzeitig als Fügestelle mit einem Kreuz markiert, um nach einer Demontage die Zylinder wieder folgerichtig zusammensetzen zu können. Weiter wurde der Prüfling mit der Prüfungsnummer, dem Datum, der letzten Spannungsstufe und der Sequenz beschriftet.



Abbildung 8-1 – Skizze der Überslagsspuren (links) – Vermessung der Spuren am Boardzylinder (mittig, rechts)

Auch die Spaltweiten wurden oben und unten an den Positionierungsstellen der aufgeklebten Streifen gemessen und in einer Skizze (siehe Abbildung 8-2) notiert. Danach erfolgten noch die fototechnische Dokumentation der aus den Versuchen resultierenden Spuren und deren Vermessung. Die Spuren wurden in eine Querschnittsskizze in Abbildung 8-1 eingetragen.



P028NE8		
Zeitraum	05. - 07.10.2015	
rel. Luftfeuchte	33	%
T _{Luft}	22	°C
a _w	0,084	
T _{öl}	20	°C
H ₂ O	4	ppm
Elektrode	1	
Durch- / Überschlag	Stufe	6
	Sequenz	1
	Spannung	175 kV
		150 %
U _{1%PD}	s = 10	139 kV
	s = 15	130 kV
BAUR	Mittelwert	76,0 kV
	Stand. abw.	9,3
Ölqualität	MW. Stand. abw.	12 %
Ölspaltweite	min.	4,4
	max	7,0 mm
	mittel.	6,2

Abbildung 8-2 – Skizze mit Anordnung des Prüflings P028 im Labor und den gemessenen Ölspaltweiten (links) - Zusammenfassung der Prüflingsparameter

Die gesammelten Prüflingsparameter wurden für jeden Prüfling in einem Prüflingskennblatt zusammengefasst (siehe Anhang B: Prüflingskennblätter), um eine schnelle Übersicht zu bekommen.

8.2 Analyse der Lokalität der Schwachstelle

Im Verlauf der durchgeführten Untersuchungen stellte sich der Bereich der Radien an den Elektroden als hauptsächliche Schwachstelle heraus. Daher wurde dieser Bereich einer genaueren Analyse unterzogen. Es wurden die elektrischen Feldlinien ausgehend von der Hochspannungselektrode in Abbildung 8-3 dargestellt und die schwächste Stelle mit einem Kreuz markiert und da diese nur schwer zu erkennen sind mit einem roten Kreis eingehüllt. Es bestätigen sich die Schwachstellen aus den praktischen Untersuchungen im Bereich der Radien. Im homogenen Bereich dagegen ist die von der Theorie der Öl-Design-Kurven zu erwartende Teilentladungseinsetzspannung geringer, dies war jedoch im Labor nie die Ausfallursache. Daraus lässt sich schließen, dass die Unebenheiten und Oberflächeneigenschaften durch die händische Formung nicht in der Simulation abgedeckt sind. Es bestätigt sich auch, dass in größeren Ölspalten mit blanken Elektroden die höchste Wahrscheinlichkeit des Zündens einer Teilentladung besteht. Daraus kann sich eine lokale Gleitentladung entwickeln und diese verursachen eine Erosion der Zellstoffoberfläche, wodurch sich mit der Zeit karbonisierte Spuren bilden, welche sich tangential entlang der Oberfläche fortsetzen und letztendlich in einer starken vollständigen Entladung münden [Mos87].

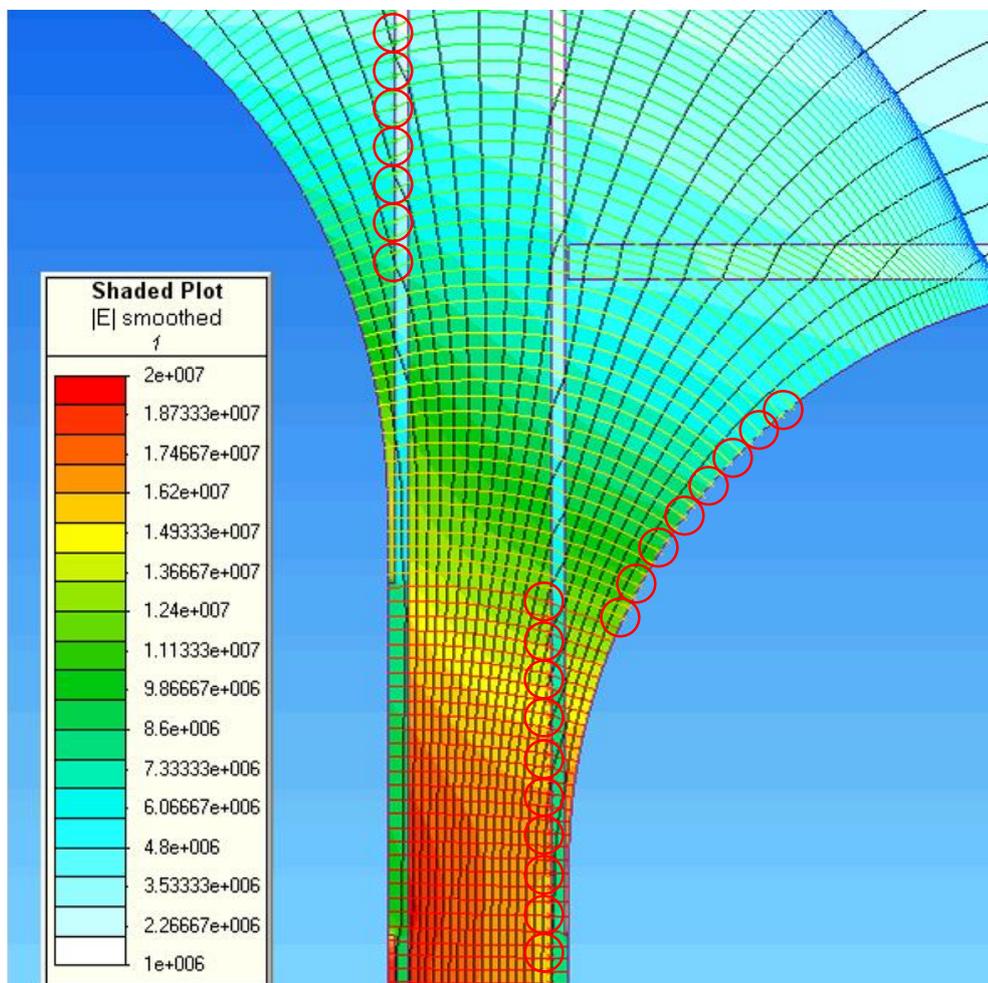


Abbildung 8-3 – Schwachstellenanalyse

8.3 Schema zur Auswertung der Teilentladungen

Zur Bewertung der Teilentladungen wurde mit Fachkollegen eine Einordnung der Teilentladungslevel festgelegt. Zur schnellen optischen Einordnung würden die verschiedenen Bereiche farblich unterschiedlich mit Signalfarben eingefärbt.

Bis zu einem Level <5 pC waren diese als unkritisch und somit grün einzustufen. Darüber war der teilkritische Bereich mit >5 pC bis <10 pC mit einer gelben Markierung angesiedelt. Als höchst kritische Stufe war der Bereich ≥ 10 pC mit einer roten Markierung vorgesehen. Zusätzlich war noch eine farbliche Markierung für einen Abbruch der Untersuchung aufgrund zu starker Entladungen, aber noch keinem Über- oder Durchschlag mit blauer Farbe vorhanden. Eine irreversible Beschädigung durch einen Über- und / oder Durchschlag und somit ebenfalls Abbruch und Beenden der Untersuchung war schwarz markiert. Als Beispiel ist Abbildung 8-4 P013MO20 dargestellt. Die weiteren Darstellungen der Prüflinge sind im Anhang B: Prüflingskennblätter zu finden.

Stufen			Sequenz									
Nr.	20 mm kV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-				
10	320	190%	5,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	3,5	0,5	0,5	0,5
9	305	180%	10,0	15,0	11,0	3,0	0,1	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1
8	285	170%	9,5	4,0	4,0	1,5	1,5	6,5	4,0	3,0	2,5	3,0
7	270	160%	6,0	7,0	4,5	7,5	6,5	5,5	6,0	6,5	4,5	5,0
6	255	150%	4,0	5,0	7,0	7,0	8,0	7,0	7,5	4,5	4,5	4,5
5	240	140%	3,0	1,0	1,0	2,5	3,0	2,0	2,0	2,5	6,0	7,0
4	220	130%	4,5	4,0	14,0	11,0	7,5	7,0	7,0	4,0	5,0	5,0
3	205	120%	4,9	5,5	5,5	5,0	1,5	2,0	5,0	6,0	4,0	4,9
2	185	110%	6,5	6,0	5,0	4,5	5,0	20,5	8,5	6,0	0,1	0,1
1	170	100%	5,0	5,0	4,0	4,0	4,5	5,0	5,0	5,0	4,9	5,0
0	150	90%	3,0									
0	135	80%	2,0									
0	125	73%	2,0									
0	105	62%	0,1									
0	95	55%	0,1									
0	60	35%	1,5									

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC

Abbildung 8-4 –Schema zur übersichtlichen Bewertung von Teilentladungen am Beispiel P013MO20

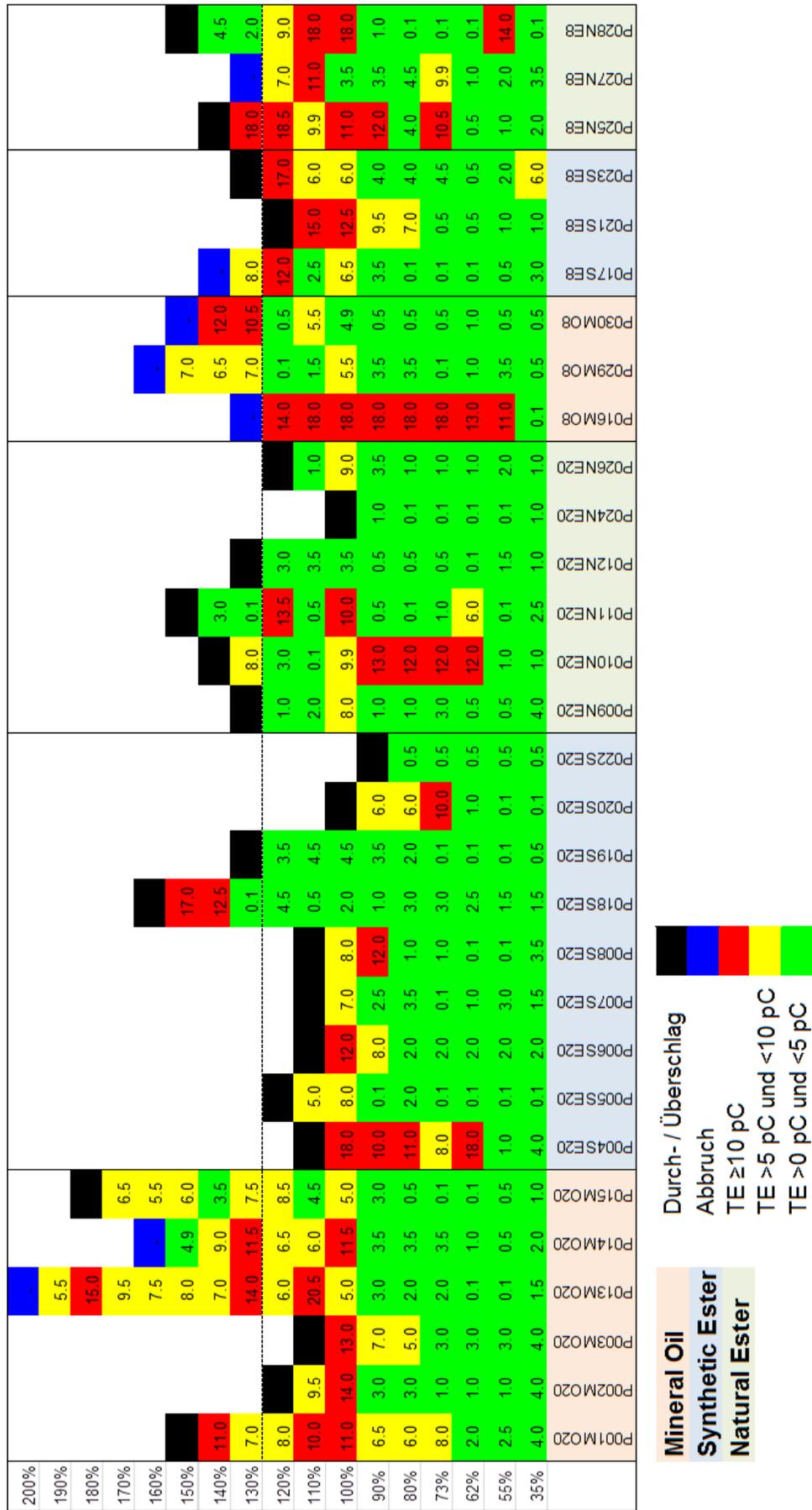


Abbildung 8-5 – Übersichtsdarstellung der Teilentladungen – Sortiert nach Variante

8.3.1 Mineralöl MO

20 mm-Variante mit Mineralöl (MO20)

Da P001 bis P003 aufgrund verkehrter Einbaulage der Distanzierungsstücke außer Wertung stehen, weisen die weiteren Untersuchungswerte eine geringe Streuung auf. Es ist jedoch ein relativ frühes Einsetzen von Teilentladungen bei allen Prüflingen bereits ab 100% der Prüfspannung festzustellen. Obwohl bei MO20 die Teilentladungen schon recht früh einsetzen, ist dies bei weitem kein eindeutiges Zeichen, welches einen baldigen Über-/Durchschlag ankündigt. Es eine bemerkenswerte Resistenz festzustellen, welche den Überschlag noch lange hinauszögern kann und zu hohen Testwerten bis zu 200 % der Prüfspannung führte.

8 mm-Variante mit Mineralöl (MO8):

Die Teilentladungen setzen gegenüber der 20 mm Variante erst später ein. Gleichzeitig ist die Spanne bis starke Gleitentladungen auftreten und damit den Abbruch der Untersuchungen einleiten ist merklich kleiner. Dies mag auch an der Einlage der Kreppwinkelringe liegen ohne die kein entladungsfreies Testen im Prüfbereich nicht möglich gewesen wäre. Die Untersuchung musste immer durch Einsatz von starken Gleitentladungen beendet werden.

8.3.2 Synthetisches Ester SE

20 mm-Variante mit synthetischem Ester (SE20):

Es konnten mitunter recht hohe Prüfwerte bis 160% der Prüfspannung erreicht werden, jedoch lagen die überwiegenden Werte sehr tief, womit eine sehr große Streuung gegeben war. Die Teilentladungen setzten meist erst kurz vor einem Überschlag ein. In manchen Fällen gab es vor dem Überschlag überhaupt keine TE, welche einen Hinweis geben könnte. Die Überschläge kamen somit sehr überraschend und insgesamt endeten die Untersuchungen immer mit einem Überschlag.

8 mm-Variante mit synthetischem Ester (SE8):

Bei den 8 mm Prüflingen sind die Unterschiede der verschiedenen Isolierflüssigkeiten nicht so deutlich wahrzunehmen, was vor allem am Einsatz der Krepp-Winkelringe liegen mag. Tritt eine TE auf, so arbeitet sich diese erst durch das Material hindurch. Das bringt aber auch den Nachteil, dass wenn eine TE aufgetreten ist diese stetig weiter arbeitet und nicht mehr so schnell erlischt. Die Teilentladungen kündigen sich beim Einsatz von Kreppwinkeln an, die Spanne zwischen TE Einsatz und ein Ausfall des Prüflings wird größer, womit der Ausfall besser voraus zu sehen ist.

8.3.3 Natürliches Ester

20 mm-Variante mit natürlichem Ester (NE20):

Ausfall kündigt sich wie schon bei SE20 nur schlecht an, was auch zu überraschenden Ereignissen führt. Die mittleren Werte liegen höher als bei SE20, jedoch fallen die Extrempunkte nach oben und unten nicht so massiv aus. Daraus ergibt sich insgesamt ein recht stabiles Verhalten.

8 mm-Variante mit natürlichem Ester (NE8):

Wie auch schon bei den anderen 8 mm Varianten treten mit dem Einsatz der Kreppeinlage keine allzu überraschenden Ereignisse auf. Die TE liegen teilweise schon im roten Bereich, was ein grundsätzliches Problem dieser Anordnung sein mag. Es lassen sich dennoch recht akzeptable Werte mit natürlichem Ester erzielen.

8.4 Statistische Auswertung

8.4.1 Berechnung des statistischen Teilentladungseinsatzes

Zur Berechnung der einprozentigen TE-Einsatzspannung wurde für jeden Prüfling das Schema zur Beurteilung der Teilentladungen herangezogen. Damit die Ergebnisse nicht durch einzelne frühzeitige TE-Einsätze zu weit abgewertet wurden, war auch eine Erholung der Prüflinge zugelassen. In die Bewertung flossen daher die Werte bis zum höchst erreichten Prüfspannungswert mit einem Teilentladungspegel 5 pC (grün) mit ein. Mit diesen Daten erfolgte eine Bestimmung der einprozentigen Teilentladungseinsatzspannung $U_{1\%PD}$ nach dem unter Abschnitt 2.4 beschriebenen Methode zur Einbeziehung der Vorgeschichte. Die Berechnungen wurden für eine Streuung von $s = 10$ und $s = 15$ durchgeführt.

8.4.2 Statistische Unabhängigkeit

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Prüfwerte chronologisch aufgetragen, um Trends über den Zeitraum der Untersuchungen zu erkennen. Die schwarze Linie bei 100% stellt die jeweilige Referenzprüfspannung dar, die farblichen Punkte die höchst erreichten Prüfwerte und die gelbe Kurve die errechneten statistischen einprozentigen TE-Einsatzspannungen für $s = 10$.

Es wurden die Resultate zudem auf die Abhängigkeit einzelner Parameter wie Ölqualität, Temperatur und Feuchte geprüft, wobei keine Auffälligkeiten festzustellen waren.

Chronologische Übersicht der Prüflinge

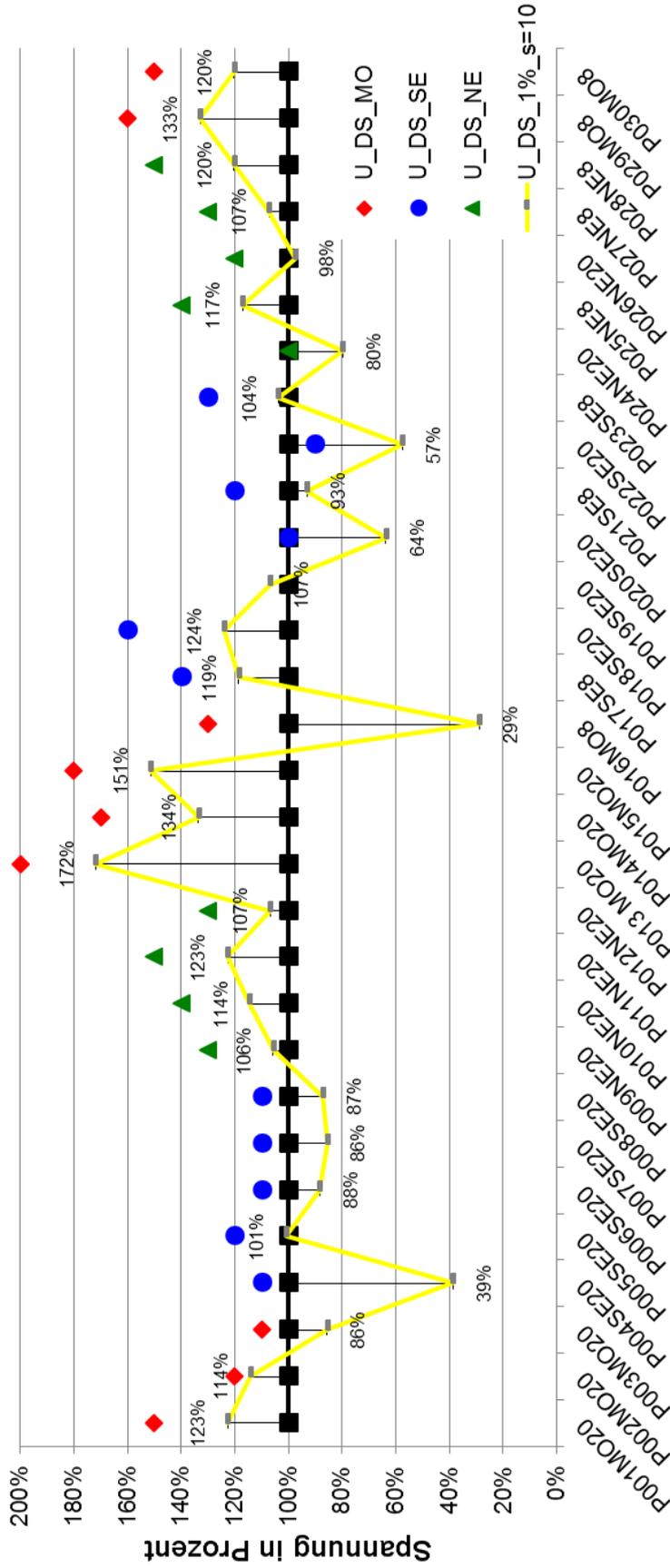


Abbildung 8-6 – Chronologische Übersicht der Prüflinge mit einprozentiger statistischer TE-Einsatzspannung

8.5 Histogramme

Zur Veranschaulichung wie unterschiedlich die einzelnen Prüflingsvarianten in den Untersuchungen verhalten haben, wurden die jeweilig gehaltenen Prüflingsequenzen als gehaltene Dauer über den Spannungsstufen aufgetragen. Aufgrund von Anwendungsfehlern, wie dem verkehrten Einbau der Prüflinge wurden folgende Prüflinge aus der Auswertung gestrichen P001MO20, P002MO20, P003MO20, P020MO20. Des Weiteren wurde der erste 8 mm Prüfling P016MO8 als Testprüfling verwendet und P004MO20 starke TE von Beginn an ebenfalls aussortiert.

8.5.1 Große Ölspaltweite

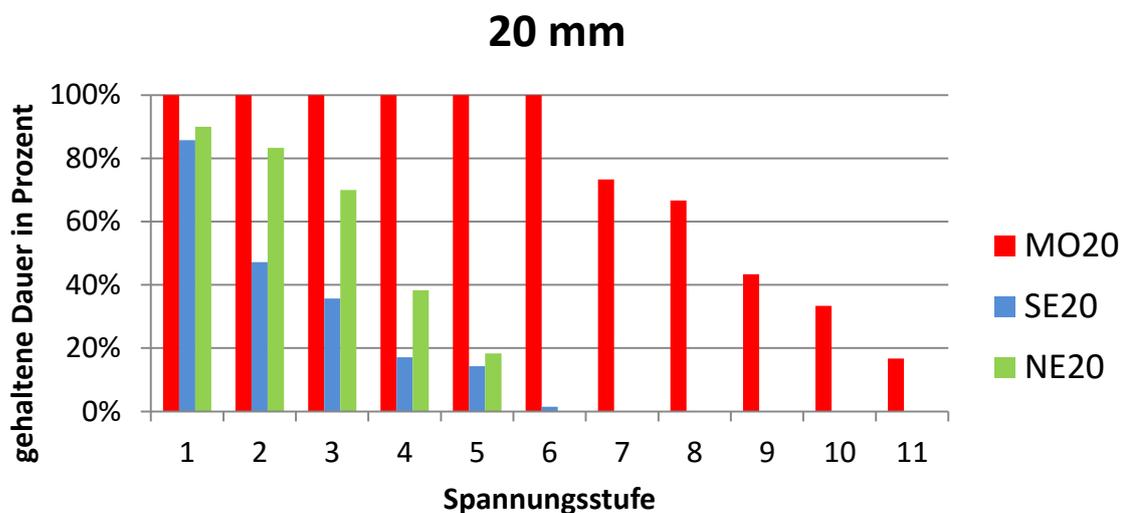


Abbildung 8-7 – Histogramm der Prüflinge mit 20 mm Ölspaltweite

Die gehaltenen Werte liegen für MO20 deutlich am höchsten, es konnten selbst bei 150% der Prüfspannung alle Spannungsbeanspruchungen gehalten werden. Die Abnahme der gehaltenen Spannungswerte nimmt in den höheren Spannungsstufen relativ langsam ab. Die zweite Platzierung erhält das NE20 es konnten jedoch bei weitem keine so hohen Werte erreicht werden. Abgeschlagen dahinter liegt das SE20.

8.5.2 Kleine Ölspaltweite

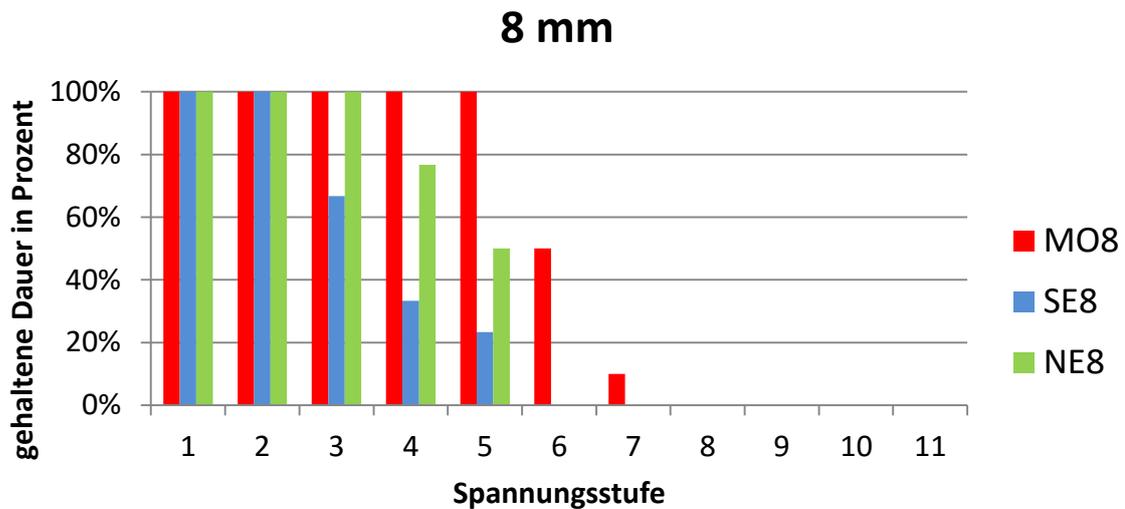


Abbildung 8-8 – Histogramm der Prüflinge mit 8 mm Ölspaltweite

Absolut betrachtet konnten mit der 8 mm Variante nicht so hohe Spannungsstufen, wie bei der 20 mm Variante erreicht werden. Dafür liegen die Ergebnisse der einzelnen Isolierflüssigkeiten enger beieinander. Die Reihenfolge ist gleichbleibend, angefangen mit den höchsten Werten von MO8, gefolgt von NE8 und zuletzt SE8. Die Werte fallen jedoch für die Ester weitaus besser aus, denn mit der großen Ölspaltweite.

8.5.3 Resümee

Auffallend ist, dass bei großen Ölspaltweiten der Abstand von Mineralöl in den erreichten Spannungsstufen zu den Estern besonders groß ist. Dadurch entsteht eine merkliche Schwachstelle, welche zu einem frühen und teilweise unerwarteten Ausfall des Prüflings führen kann.

8.6 Elektrische Feldstärken in Abhängigkeit der Ölspaltweite

8.6.1 Ermittlung der auftretenden elektrischen Feldstärken

Da sich für die elektrische Belastung bei Befüllung der Versuchsaufbauten mit Esterflüssigkeiten eine unterschiedliche elektrische Feldverteilung ergibt, wurde eine separate Simulation für diese durchgeführt. Für die Permittivitäten wurden die gemessenen Werte aus Tabelle 7-1 verwendet, wobei die Esterflüssigkeiten vereinheitlicht wurden. Die Dielektrizitätszahl ϵ_r für reine Esterflüssigkeit betrug somit 3,3 und die für das imprägnierte Transformerboard 4,7. Die jeweils auf 400 kV durchgerechneten Aufbauten, wurden mit den jeweiligen 100 %-Prüfspannungen normiert, um die elektrischen Feldstärken bei einer 100%-Prozentigen Belastung zu erhalten. Diese sind in Abbildung 8-9 für den Aufbau mit einer Ölspaltweite von 8 mm und in Abbildung 8-10 für den Aufbau mit 20 mm dargestellt.

Feldlinienverlauf bei 8 mm Ölspaltweite

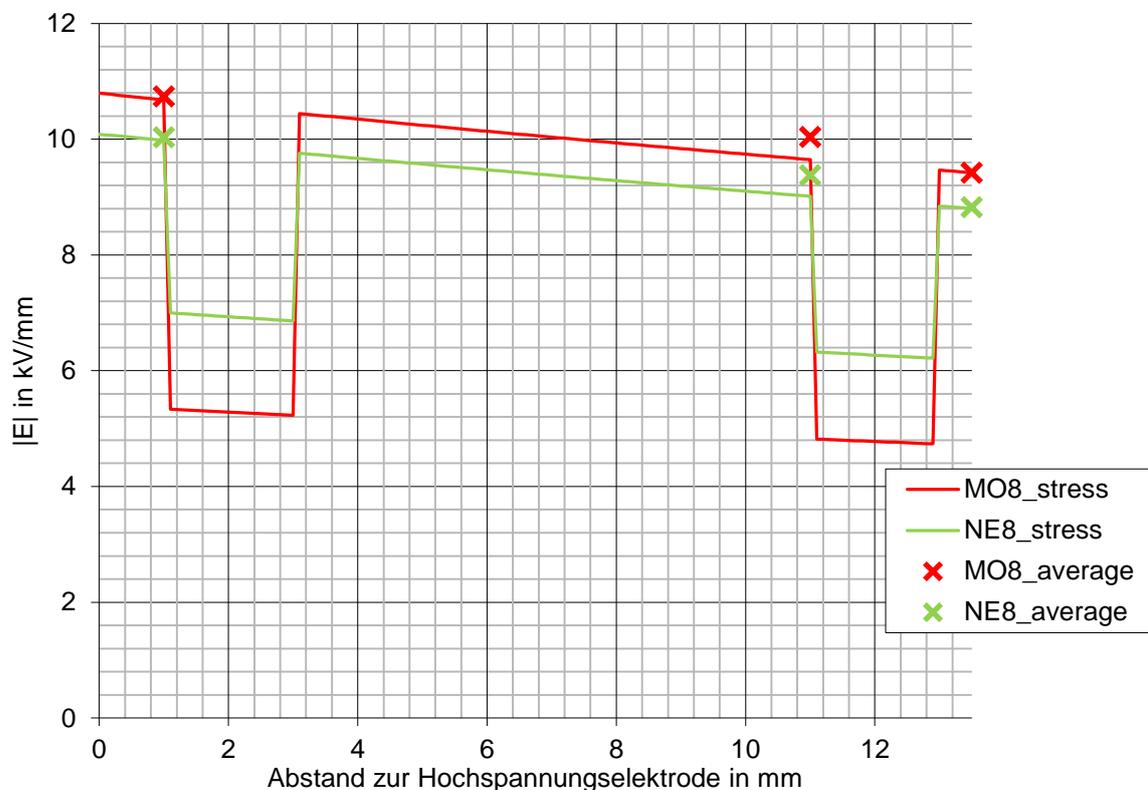


Abbildung 8-9 – Feldlinienverlauf bei 8 mm Ölspaltweite (100%)

Herangezogen für den Vergleich wurden die elektrischen Feldstärken über den Ölspalt gemittelt (vergleichbar Kapitel 5). Die gemittelten elektrischen Feldstärken über die Ölspalte sind in den Diagrammen jeweils als markiertes Kreuz zu erkennen. Dabei ist festzustellen, dass die Feldstärke für 8 mm bei den Estern NE8 mit 9.34 kV/mm geringer ausfallen als bei MO8 mit 10.0 kV/mm. Für die Variante mit 20 mm fallen die Werte aufgrund der niedriger zu erwartenden Festigkeit. Diese liegen für NE20 mit 6.87 kV/mm und MO20 7.11 kV/mm.

Feldlinienverlauf bei 20 mm Ölspaltweite

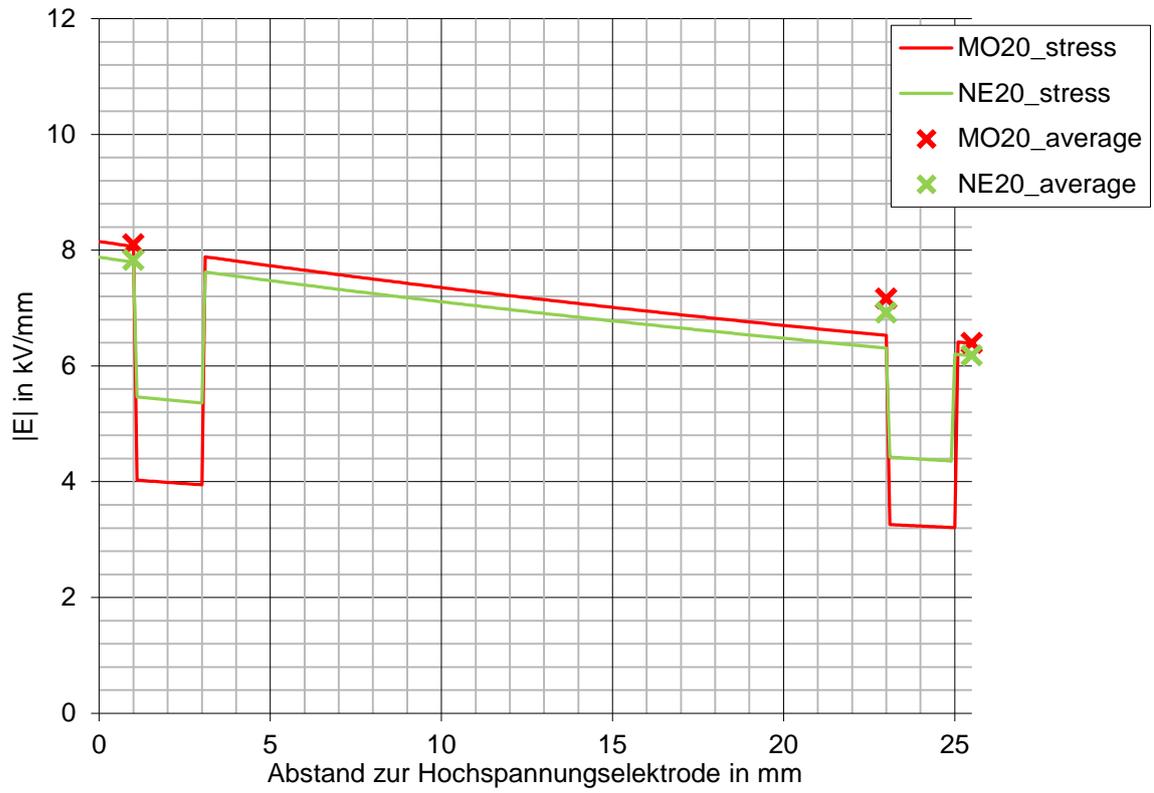


Abbildung 8-10 – Feldlinienverlauf bei 20 mm Ölspaltweite (100%)

8.6.2 Elektrische Feldstärken des einprozentigen Teilentladungseinsatzes

Durch die Ermittlung der elektrischen Feldstärken beim 100 % Prüfspannungswert und der n Abschnitt 8.4.1 bestimmten einprozentigen Teilentladungseinsatzspannung $U_{1\%PD}$ bei einer Streuung $s = 10$ war eine normierte Hochrechnung auf die tatsächlich auftretenden Werte möglich. Zur Darstellung wurden diese Werte über der gemittelten Ölspaltweiten der einzelnen Prüflinge in Abbildung 8-11 doppelt logarithmisch aufgetragen. Die rote abfallende Gerade stellt dabei die für entgastes Mineralöl geltende Öl-Designkurve zwischen Transformerboad-Barrieren dar (siehe Graph 1 Abbildung 2-1).

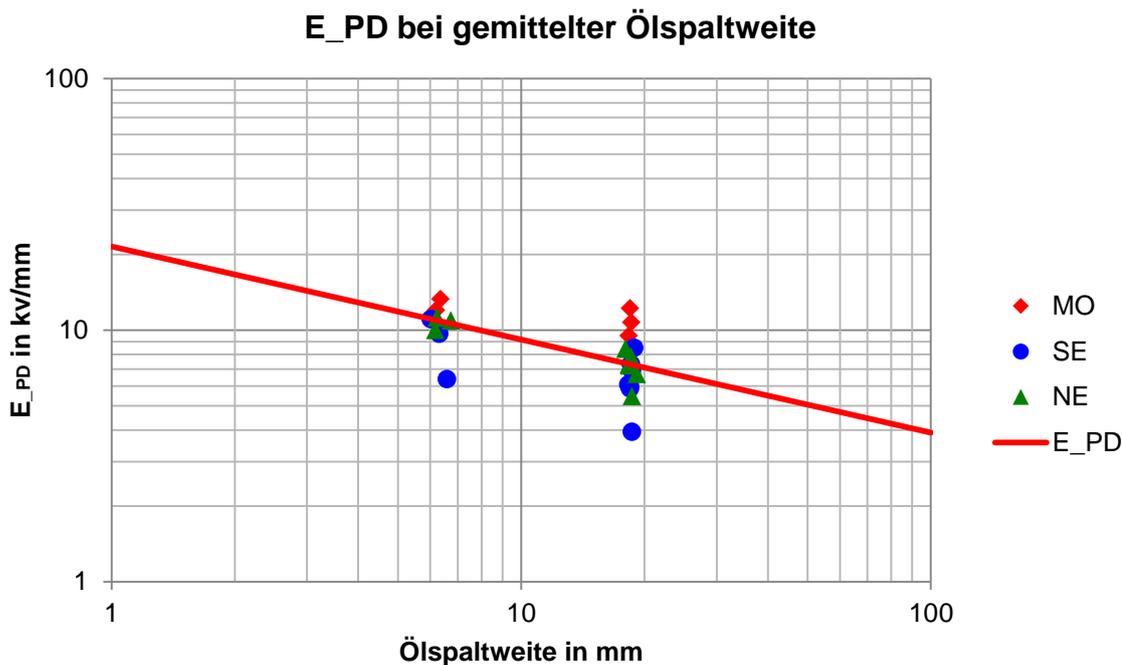


Abbildung 8-11 – E_PD bei gemittelter Ölspaltweite

Die in den Untersuchungen erzielten Mindestwerte bestätigen für Mineralöl die Öl-Design-Kurven. Insbesondere für die größere Ölspaltweiten weist die Kurve noch Reserven auf. Die Steigung der Abnahme könnte daher sogar noch etwas abgeflacht werden.

Abgesehen von Ausreißern nach oben, liegen die Messergebnisse für SE tendenziell unter dem Designwert für Mineralöl. Durch die größere Streuung der Messergebnisse wird eine größere Sicherheitsreserve erforderlich, welche insgesamt zu starken Abschlägen führt.

Für NE ließen sich recht gute Ergebnisse erzielen, auch wenn diese noch hinter der bisherigen Referenz, dem Mineralöl stehen. Die Werte treffen recht nahe die Designwerte für MO insbesondere für kleine Spaltweiten. Bei vergrößerten Abständen nimmt die Bandbreite der Werte etwas zu. Insgesamt könnte dies durch ein stärkeres Abfallen der Kurve bei vergrößerten Abständen dargestellt werden.

Besonders bei großen Ölspaltweiten sind die Ester vor allem das SE, aufgrund einer hohen Streuung weit abgeschlagen, was bei der Dimensionierung berücksichtigt werden muss.

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Der entwickelte Versuchsaufbau (siehe Abschnitt 4.5) war gut geeignet die charakteristischen Eigenschaften und die grundlegenden Unterschiede der untersuchten Isolationsflüssigkeiten vergleichend darzustellen. Die fehlende Umformung der Elektroden im Bereich der Radien wies sich im Laufe der Untersuchungen als die hauptsächliche Schwachstelle heraus, welche sich nur bedingt durch Abdeckplatten und dem Einsatz von Kreppwinkelringen entschärfen ließ. Dadurch war nur eine Aussage über die mindestens gehaltenen elektrischen Feldstärken im homogenen Bereich des jeweiligen Ölspalts möglich. Der Grenzbereich der elektrischen Feldstärke im homogenen Abschnitt konnte damit nicht ermittelt werden. Die 100% Stufe des Prüfprogramms (siehe Kapitel 5) wurde gut gewählt, da ab diesem Bereich überwiegend die Entladungseffekte gestartet sind. Durch eine statistische Auswertung mit Berücksichtigung der Vorbelastung (siehe Abschnitt 2.4), war trotz der geringen geprüften Stückzahl ein aussagekräftiges Ergebnis (siehe Kapitel 8) aus der Untersuchung möglich. Der Vergleich mit den Öl-Design Kurven bestätigte für Mineralöl deren Gültigkeit.

Durch das Schema zur Auswertung der Teilentladungen (siehe Abschnitt 8.3) war es möglich die charakteristischen Unterschiede der Isolationsflüssigkeiten darzustellen. Für Mineralöl war bereits ein früher Einsatz geringer Teilentladungen festzustellen, dieser war jedoch weitgehend stabil und führte erst viel später zu Ausfällen. Bei den Esterflüssigkeiten war dagegen der Übergangsbereich vom Einsatz der Teilentladungen bis zum Prüflingsausfall sehr gering oder teilweise gar nicht vorhanden. Durch die Auswertung mit Histogrammen (siehe Abschnitt 8.5) wurde der große Streubereich der Ausfallwahrscheinlichkeit bei den Esterflüssigkeiten veranschaulicht.

Insgesamt ist damit festzustellen, dass die elektrische Festigkeit für Mineralöl am höchsten ist. Jedoch ist unklar wie sich die geringen Teilentladungen in der Praxis über einen längeren Zeitraum auswirken würden, ob sich diese beruhigen oder mit der Zeit zu einer schleichenden Erosion führen. Für die Ester waren vor allen die frühen und teilweise unangekündigten Ausfälle vor allem bei der größeren Spaltweite auffallend. Größere Spaltweiten sind daher aufgrund der hohen Streuung und den damit verbundenen Abschlägen eher zu meiden.

Über eine lange Lebensdauer ist dagegen das hohe Wasserlösungsvermögen der Ester sehr von Vorteil, da somit die Bauteile aus Zellulose trocken gehalten werden und dies insgesamt die Alterungsprozesse und den damit verbundenen Verlust der mechanischen Festigkeit stark verlangsamt.

Im Laborbetrieb ließen sich die Abläufe durch einen zeit- und zustandsgesteuerten Pumpenbetrieb optimieren. Zusätzlich würde es sich anbieten eine Vakuumglocke aus Stahl für den Prüfkessel anzufertigen. Dies würde einen blasenfreien Prüfbetrieb und einen trockenen Einbau der Prüflinge erlauben. Zudem könnten durch die damit gewonnene Platzersparnis im Ofen, mehr Prüflinge in einem Durchgang getrocknet werden.

Mit dem bereits generierten Wissen sollten noch nähere Untersuchungen mit realitätsnäheren Anordnungen von umformten Elektroden gestartet werden. Ob sich Esterflüssigkeiten bei einem gegenwärtigen Kostenfaktor von 2,5 in der Praxis gegenüber Mineralöl breitflächig durchsetzen können, hängt mitunter von den dadurch gewonnenen Vorzügen, der Gesetzgebung und Verringerungen der Produktionskosten etc. ab.

10 Zusammenfassung

Esterflüssigkeiten weisen neben ihren elektrisch isolierenden und thermisch gut leitenden Eigenschaften eine geringe Brandgefährdung und gute Umwelteigenschaften auf, weshalb sie schon seit mehreren Jahrzehnten als Isolationsflüssigkeit in Verteiltransformatoren eingesetzt werden. Um auch in größeren Leistungstransformatoren von diesen hervorragenden Eigenschaften profitieren zu können, sind weitgehende wissenschaftliche Untersuchungen zur Sicherstellung der Betriebssicherheit erforderlich. In dieser Arbeit soll dabei auf eine wichtige Fragestellung, dem dielektrischen Verhalten von Esterflüssigkeiten im Barrierensystem von Hochspannungstransformatoren eingegangen werden. Dazu waren praktische Untersuchungen an einem Versuchsaufbau im Hochspannungslabor durchzuführen.

Durch die elektrischen Feldstudien konnte ein geeigneter Prüfaufbau zur Untersuchung verschiedener Isolationsflüssigkeiten in Barrierensystemen ausgehend von bereits vorhandener Basiskomponenten entwickelt werden. Der Versuchsaufbau umfasste die Möglichkeit Prüflinge mit verschiedenen Ölpaltweiten zu testen. Die eingebrachten Verbesserungen ermöglichten im Hochspannungslabor den Versuchsaufbau bei Prüfspannungen bis zu 340 kVAC zu erproben. Dem Umstand geschuldet, dass die Schwachstelle im Randbereich vorhanden war und nicht im homogenen Bereich, konnten nur eine Aussage über die Mindestwerte erreicht werden. Die Aussagekraft ist daher eher vergleichend zu betrachten. Es ist dennoch sehr gut möglich gewesen die verschiedenen Verhaltensmuster der Isolationsflüssigkeiten ausfindig zu machen. Mit den erreichten Werten für Mineralöl konnte die Öl-Designkurve bestätigt werden. Für die Esterflüssigkeiten sehen die Ergebnisse dabei differenzierter aus. Das synthetische Ester weist dabei die höchste Streuung auf, sowohl bei kleiner als auch bei größerer Ölpaltweite, woraus sich auf eine tendenziell geringere elektrische Festigkeit schließen lässt. Die natürliche Esterflüssigkeit weist dagegen nur bei der größeren Ölpaltweite, bedingt durch Volumeneffekte eine größere Streuung auf. Insgesamt kann daraus gefolgert werden, dass die erreichte elektrische Festigkeit für Ester geringer ist und daher für die Isolationsauslegung eigene Designkurven erforderlich sind.

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1 – ÖL-DESIGNKURVEN ZUR BESTIMMUNG VON ÖLSPALTWEITEN [KÜC09].....	5
ABBILDUNG 2-2 – REDUKTION DER ISOLATIONSABSTÄNDE DURCH UMFORMUNG DER ELEKTRODEN UND DEM EINSATZ VON BARRIEREN	6
ABBILDUNG 2-3 – ANPASSUNG DER ELEKTRISCHEN FESTIGKEIT UND DER SPALTWEITE AN DIE LOKALE FELDSTÄRKE IN EINEM INHOMOGENEN FELD [WEI].....	6
ABBILDUNG 2-4 – MOLEKÜLSTRUKTUREN VON MINERALÖL [BEY86]	7
ABBILDUNG 2-5 – REAKTIONSGLEICHUNG FÜR DIE ENTSTEHUNG VON RAPSÖL [HEM04].....	8
ABBILDUNG 2-6 – BIOLOGISCHE ABBAUBARKEIT VERSCHIEDENER ISOLIERFLÜSSIGKEITEN [PUK12]	11
ABBILDUNG 2-7 – HERSTELLUNGSPROZEß VON TRANSFORMERBARD [WEI09]	13
ABBILDUNG 2-8 – ANWENDUNG DER WEIBULL-VERTEILUNG (SCHEMATISCH) [KÜC].....	14
ABBILDUNG 4-1 – AUSGANGSLAGE DES VERSUCHAUFBAUS	17
ABBILDUNG 4-2 – VARIATION: LÄNGE DER GND ELEKTRODE (26,5 MM ÖLSPALT) - HOCHSPANNUNGSELEKTRODE	19
ABBILDUNG 4-3 – VARIATION: LÄNGE DER GND ELEKTRODE (26.5 MM ÖLSPALT) - ERDELEKTRODE	20
ABBILDUNG 4-4 – VARIATION: RADII DER ERDELEKTRODE (8 MM ÖLSPALT) - HOCHSPANNUNGSSEITE	21
ABBILDUNG 4-5 – VARIATION: RADII DER ERDELEKTRODE (8 MM ÖLSPALT) - ERDSEITE.....	22
ABBILDUNG 4-6 – ÜBERSICHTSDARSTELLUNG MIT MARKIERTEM HOMOGENEN PRÜFBEREICH (LINKS) – MARKIERTER OBERER RADIIENABSCHNITT (RECHTS)	23
ABBILDUNG 4-7 – DARSTELLUNG DES OBEREN RADIIENABSCHNITTS DER HOCHSPANNUNGSELEKTRODE.....	24
ABBILDUNG 4-8 – ENTWICKLUNGSGESCHICHTE DISTANZIERUNGSSTÜCKE (8 MM ÖLSPALT) - HOCHSPANNUNGSSEITE	25
ABBILDUNG 4-9 – ENTWICKLUNGSGESCHICHTE DISTANZIERUNGSSTÜCKE (8 MM ÖLSPALT) - ERDSEITE	26
ABBILDUNG 4-10 – VARIATION: LÄNGE DER DISTANZIERUNGSSTÜCKE (8 MM ÖLSPALT) - HOCHSPANNUNGSSEITE	27
ABBILDUNG 4-11 – VARIATION: LÄNGE DER DISTANZIERUNGSSTÜCKE (8 MM ÖLSPALT) - ERDSEITE	28
ABBILDUNG 4-12 – FESTGELEGTER VERSUCHAUFBAU – RESULTIERENDE VERÄNDERUNGEN.....	29
ABBILDUNG 4-13 – KONTRAST MINERALÖL VS. SYNTHETISCHES ESTER(8MM ÖLSPALT) - HOCHSPANNUNGSSEITE	30
ABBILDUNG 4-14 – KONTRAST MINERALÖL VS. SYNTHETISCHES ESTERÖL (8MM ÖLSPALT) - ERDSEITE	31
ABBILDUNG 5-1 – DARSTELLUNG DER FUNKTIONSWEISE DES PRÜFPROGRAMMS	32
ABBILDUNG 5-2 – LINKS FELDBILD DES PRÜFAUFBAUS MIT 20 MM ÖLS; RECHTS DETAILIERTE DARSTELLUNG DES FELDLINIENVERLAUFS VON PUNKT A NACH B ZUR ERMITTLUNG DER PRÜFSPANNUNG.....	33
ABBILDUNG 5-3 – VERLAUF DER BERECHNETEN FELDLINIE VON PUNKT A NACH B.....	33
ABBILDUNG 5-4 – VERGLEICH DER GEMITTELTEN FELDSTÄRKE (BLAUE GRAPHEN) MIT DEN DESIGNKURVEN (ROTE GRAPHEN) ZUR ERMITTLUNG DER ZULÄSSIGEN PRÜFSPANNUNG	34
ABBILDUNG 6-1 – VAKUUMOFEN BESTÜCKT MIT DEN PRÜFLINGEN.....	37
ABBILDUNG 6-2 – LEERES PRÜFGEFÄß (LINKS) – ERDPLATTE AM KRAN HÄNGEND (RECHTS).....	38
ABBILDUNG 6-3 – EINSETZEN DES IMPRÄGNIERGEFÄßES (LINKS) – ELEKTRODENANORDNUNG VON OBEN (RECHTS).....	38
ABBILDUNG 6-4 – EINGEBAUTER PRÜFLING MIT VERBINDUNG ZUR PRÜFKASKADE.....	39
ABBILDUNG 7-1 – ÜBERSICHT DES MESSPLATZES ZUR MESSUNG DER KAPAZITÄT UND DES VERLUSTFAKTORS	41
ABBILDUNG 7-2 – LINKS PLATTENELEKTRODE MIT SCHUTZRING; RECHTS TANDELTA MESSBRÜCKE [KÜC09]	42
ABBILDUNG 7-3 – SCHEMA DES VERSUCHSAUFBAUS IM HOCHSPANNUNGLABOR	44
ABBILDUNG 7-4 – LABORAUFBAU – WECHSELSPANNUNGSPRÜFANLAGE MIT PRÜFLING	45
ABBILDUNG 7-5 – PRÜFKESSEL MIT EINGEBAUTEM PRÜFLING WÄHREND TE-KALIBRIERUNG	46
ABBILDUNG 7-6 – PRÜFLING MIT ABDECKPLATTEN UND KUPFERTORROID	47
ABBILDUNG 7-7 – ENTLADUNGSSPUREN IM BEREICH DES RADIUS (LINKS) – EINLAGE KREPPWINKELRINGE IM DOMRADIUS (RECHTS).....	48
ABBILDUNG 8-1 – SKIZZE DER ÜBERSCHLAGSSPUREN (LINKS) – VERMESSUNG DER SPUREN AM BOARDZYLINDER (MITTIG, RECHTS)	49
ABBILDUNG 8-2 – SKIZZE MIT ANORDNUNG DES PRÜFLINGS P028 IM LABOR UND DEN GEMESSENEN ÖLSPALTWEITEN (LINKS) - ZUSAMMENFASSUNG DER PRÜFLINGSPARAMETER.....	50
ABBILDUNG 8-3 – SCHWACHSTELLENANALYSE	51

ABBILDUNG 8-4 – SCHEMA ZUR ÜBERSICHTLICHEN BEWERTUNG VON TEILENTLADUNGEN AM BEISPIEL P013MO20.....	52
ABBILDUNG 8-5 – ÜBERSICHTSDARSTELLUNG DER TEILENTLADUNGEN – SORTIERT NACH VARIANTE	53
ABBILDUNG 8-6 – CHRONOLOGISCHE ÜBERSICHT DER PRÜFLINGE MIT EINPROZENTIGER STATISTISCHER TE-EINSATZSPANNUNG.....	56
ABBILDUNG 8-7 – HISTOGRAMM DER PRÜFLUNGE MIT 20 MM ÖLSPALTWEITE	57
ABBILDUNG 8-8 – HISTOGRAMM DER PRÜFLUNGE MIT 8 MM ÖLSPALTWEITE	58
ABBILDUNG 8-9 – FELDLINIENVERLAUF BEI 8 MM ÖLSPALTWEITE (100%)	59
ABBILDUNG 8-10 – FELDLINIENVERLAUF BEI 20 MM ÖLSPALTWEITE (100%)	60
ABBILDUNG 8-11 – E_PD BEI GEMITTELTER ÖLSPALTWEITE	61

Literaturverzeichnis

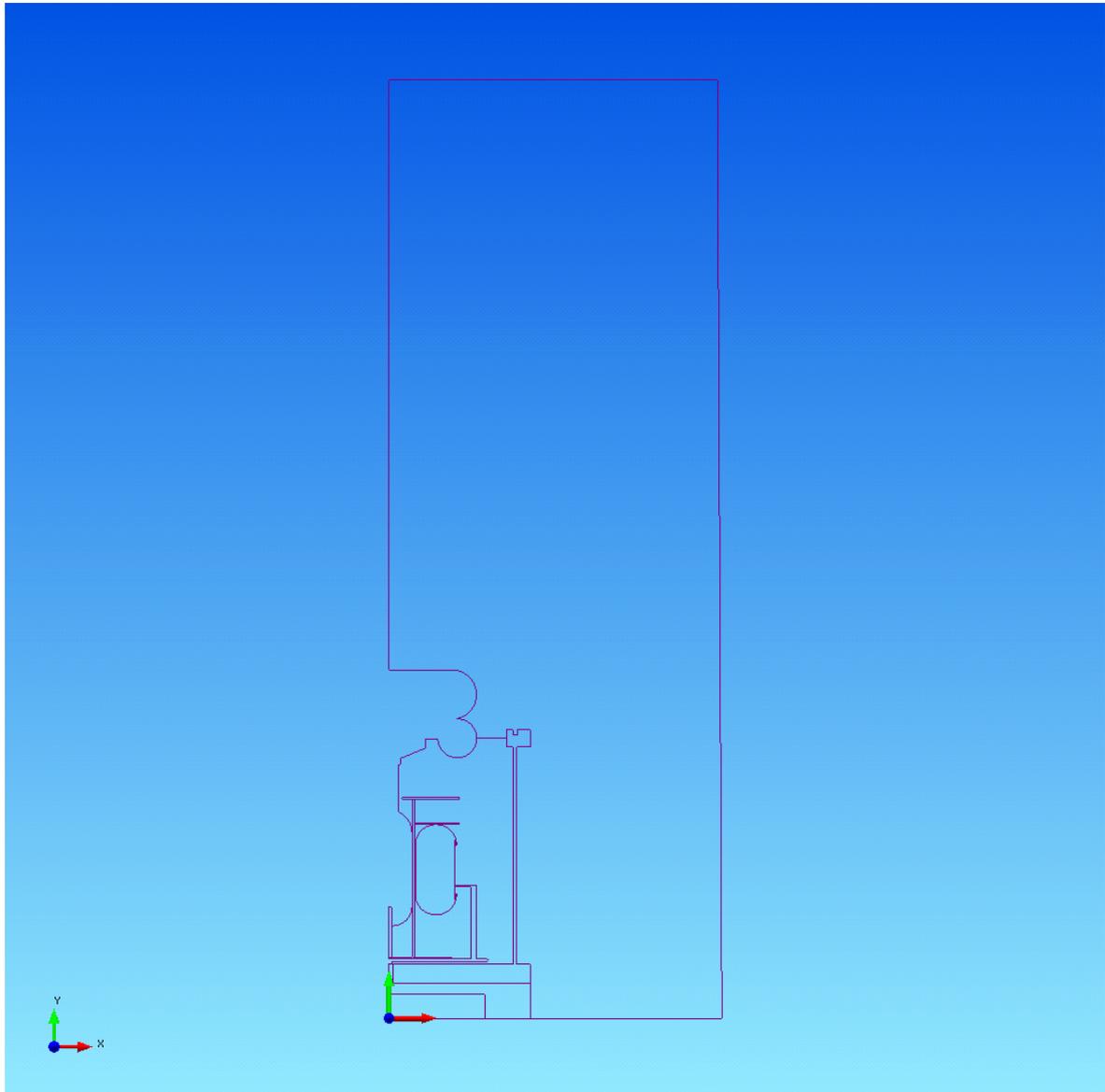
- [Bau] BAUR: *BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH: Isolierölprüfgeräte*. <http://www.baur.at/produkte/isolieroelpruefung/durchschlagerkennung/dta-100-c>, zuletzt geprüft am 3.Januar.2016.
- [Bey86] Beyer M.; Boeck W.; Möller K. et al. (1986): *Hochspannungstechnik. Theoretische und praktische Grundlagen*. Berlin, Heidelberg ;s.l: Springer Berlin Heidelberg, ISBN 9783642648939.
- [Car] Cargill: *Cargill Deutschland: Envirotemp FR3-Flüssigkeit*. <http://www.cargill.de/de/products/grain/envirotemp/fr3/index.jsp>, zuletzt geprüft am 3.Januar.2016.
- [Dum99] Dumke K. (1999): *Untersuchungen an einer Esterflüssigkeit als Isolierstoff für Transformatoren*. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., ISBN 3183273217.
- [Duy09] Duy C.T.; Lesaint O.; Denat A. et al. (2009): Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 16 (6), ISSN 1070-9878. S. 1582 - 1594.
- [Ebe11] Eberhardt R. (2011): *Elektrische Eigenschaften und Gasungsverhalten von biologischen und synthetischen Estern in Hochspannungsisolationssystemen unter Kälteeinfluss*. Dissertation Technische Universität Graz.
- [Ele] Infolytica Corporation: *ElecNet 2D/3D Electric Field Simulation Software*. <http://www.infolytica.com/en/products/electnet/>, zuletzt geprüft am 3.Januar.2016.
- [Fri14] Fritsche R. (2014): Ein Meilenstein zur grünen Uebertragungstechnologie, Natuerliche Ester ersetzen Mineralöl in Transformatoren. *ew - Magazin für die Energiewirtschaft* (06/2014).
- [Fro13] Frotscher R. (2013): *Alternative Flüssigkeiten für Stufenschalter*. Rheinhausen.
- [Hem04] Hemmer M. (2004): *Rapsöl als Isolier- und Kühlmedium in Transformatoren*. Dissertation Universität Karlsruhe.
- [Hum98] Hummel H.; Schultz K. und Wick K. (1998): *Elektrischen Prüfvorschriften für WAG Prototypen*.
- [IEC60156] (1995): *Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method*.
- [IEC60247] (2004): *Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity"*.
- [IEC60270] (2000): *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*.

- [IEC60296] (2012): *Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.*
- [IEC606412] (2004): *Pressboard and presspaper for electrical purposes - Part 2: Methods of tests.*
- [ISO12185] (1996): *Crude petroleum and petroleum products - Determination of density - Oscillating U-tube method.*
- [ISO2592] (2000): *Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method.*
- [ISO2719] (2002): *Determination of flash point - Pensky-Martens closed cup method.*
- [ISO3016] (1994): *Petroleum products -- Determination of pour point.*
- [ISO3104] (1994): *Petroleum products -- Transparent and opaque liquids - Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity.*
- [Jar11] Jarman P.; Wilson G.; Dyer P. et al. (2011): *Electrical Performance of Ester Insulating Liquids for Power Transformers..*
- [Kac77] Kachler A.J. (1977): *Technische Statistik als Hilfsmittel zur Verbesserung der Versuchs- und Prüftechnik und der Aussagesicherheit experimenteller Ergebnisse über das Isoliervermögen innerer Isolation.* Trafo-Union Werk Nürnberg.
- [Kin78] Kind D. (1978): *Einführung in die Hochspannungs-Versuchstechnik. für Elektrotechniker.* 2. Aufl. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, ISBN 352813805X.
- [Kis99] Kist K. (1999): *Streamerausbreitung im Mischdielektrikum Isolieröl, Transformerboard.* Berlin: Logos-Verl., ISBN 3897222906 (kart.).
- [Küc] Küchler A.: *Bewertung von Prüfzyklen bezüglich der „Versagenswahrscheinlichkeit“.*
- [Küc09] Küchler A. (2009): *Hochspannungstechnik. Grundlagen - Technologie - Anwendungen.* 3. Aufl. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 9783540784135.
- [Mid] M&I Materials Limited: *MIDEL.* <http://www.midel.com/de/productsmidel/midel-7131>, zuletzt geprüft am 3.Januar.2016.
- [Mos79] Moser H.P. (1979): *Transformerboard.*
- [Mos87] Moser H.P. und Dahinden V. (1987): *Transformerboard II.*
- [Nyn] Nynas AB: *Nytro 4000A - Super grade.* <http://www.nynas.com/Segment/Transformer-oils/Our-transformer-oil-products/Nytro-4000A---Super-grade/>, zuletzt geprüft am 3.Januar.2016.

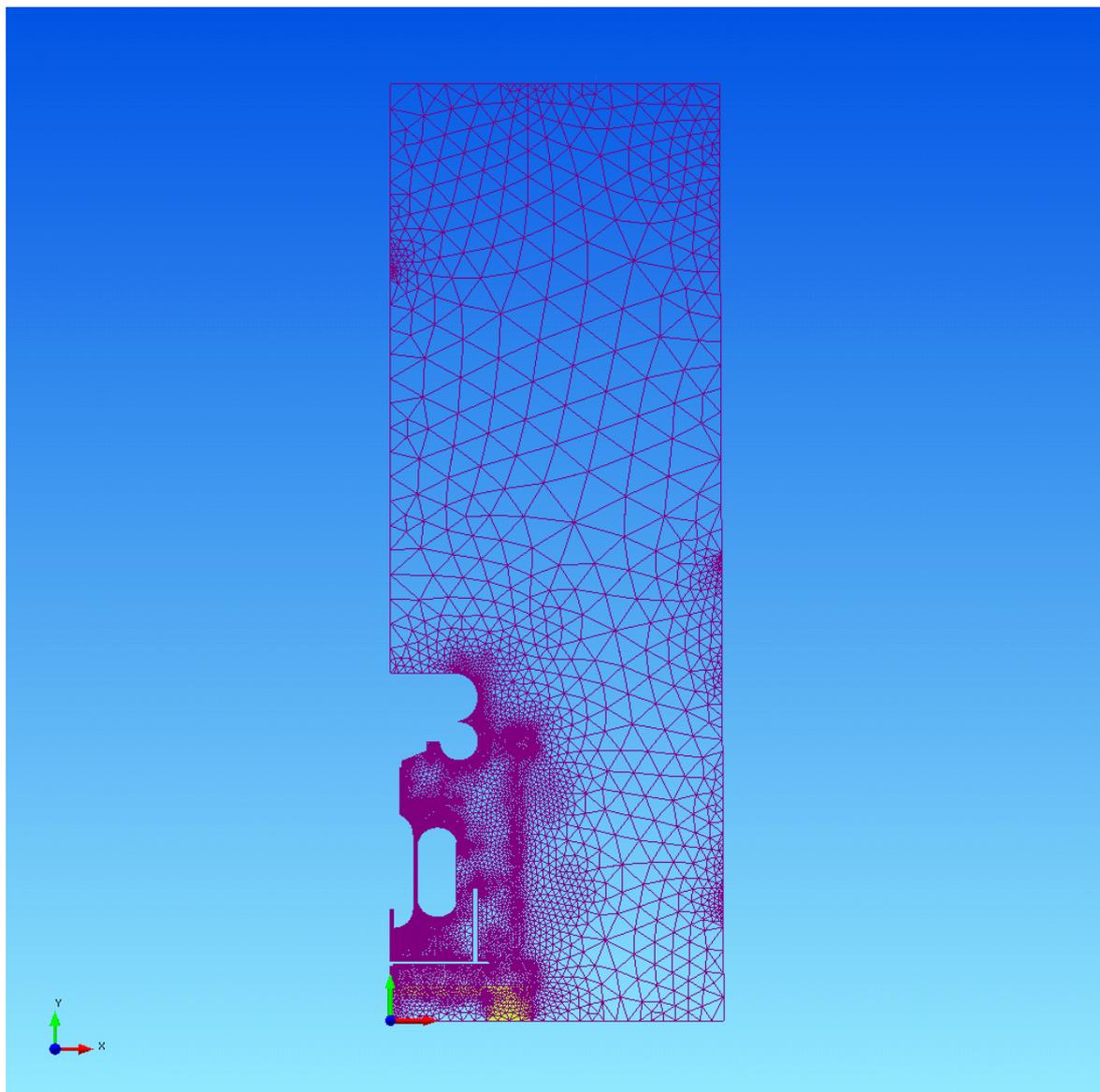
- [Pag13] Pagger P. (2013): *Alternative Isolierflüssigkeiten im Vergleich zum klassischen Mineralöl*. Dissertation TU Graz.
- [Puk10] Pukel G.J. (2010): *Elektrische Festigkeit von Isolieröl*. Wien: Österreichischer Verband für Elektrotechnik, ISBN 9783851330601 (PB.).
- [Puk12] Pukel G.J.; Schwarz R.; Baumann F. et al. (2012): Power transformers with environmentally friendly and low flammability ester liquids. *e & i; Elektrotechnik und Informationstechnik*, ISSN 0932-383X. S. 1 - 6.
- [Sin90] Sinz J.P. (1990): *Der Einfluss von Feuchte und Partikeln auf die elektrische Festigkeit von*. Dissertation TU Graz.
- [Ten08] Tenbohlen S. und Seibold R. (2008): Wasseraufnahmevermögen und Alterungsverhalten von Pflanzenölen für Leistungstransformatoren. Stuttgarter Hochspannungssymposium.
- [VwVwS1999] (1999): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen. *Bundesanzeiger*.
- [VwVwS2005] (2005): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe. *Bundesanzeiger*.
- [WEI] Küchler A.; Dahinden V. und Schultz K. (2010): *Compendium Firma Weidmann*. Rapperswil, Schweiz.
- [Wei09] Weidmann Electrical Technology AG (2009): Most Modern Transformerboard Line – the Answer to Our Customers Needs. *Weidmann Tertialkalender* (3).

Anhang

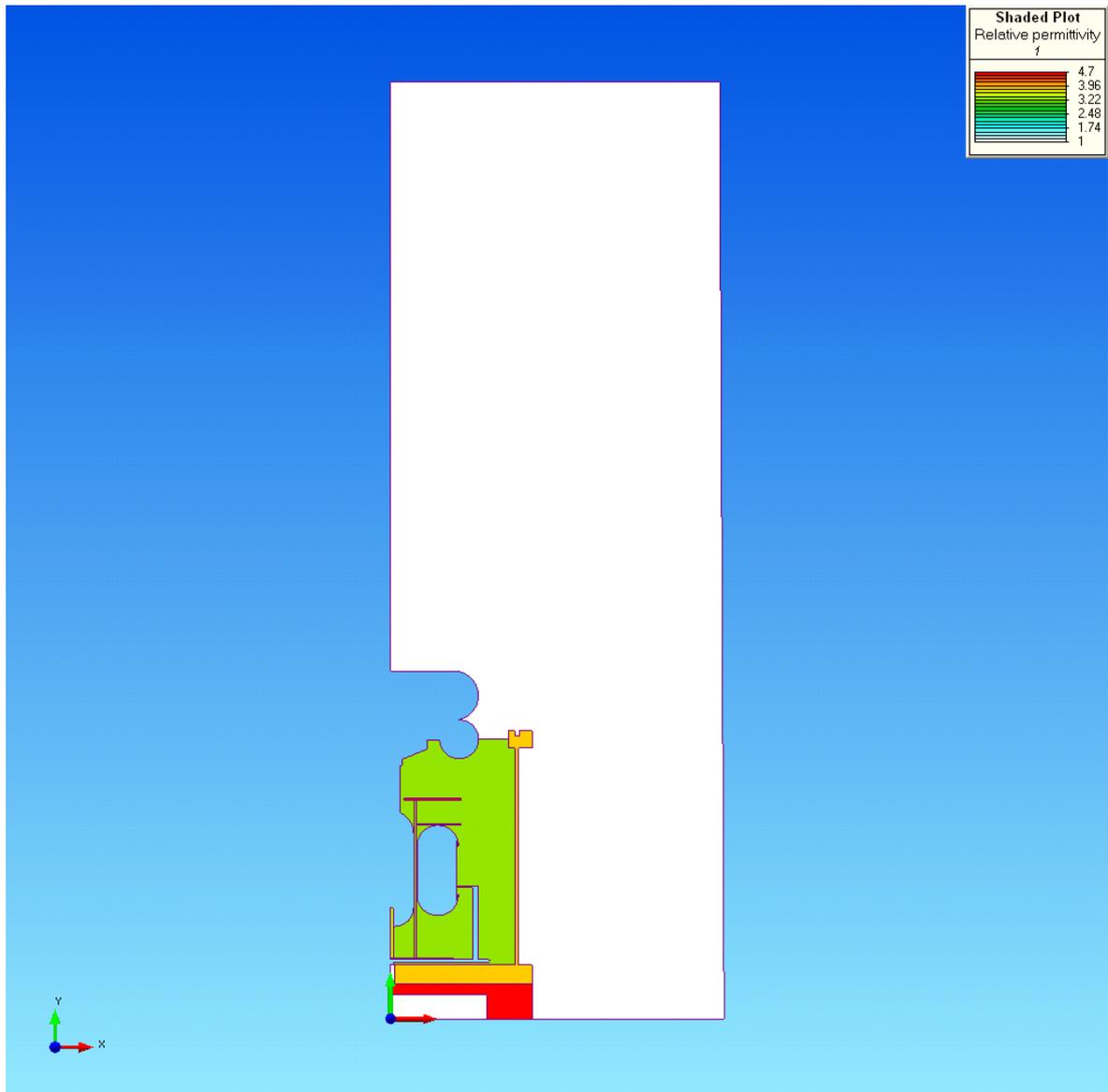
Anhang A: Report des Prüfaufbaus der 8 mm Ölspaltweite



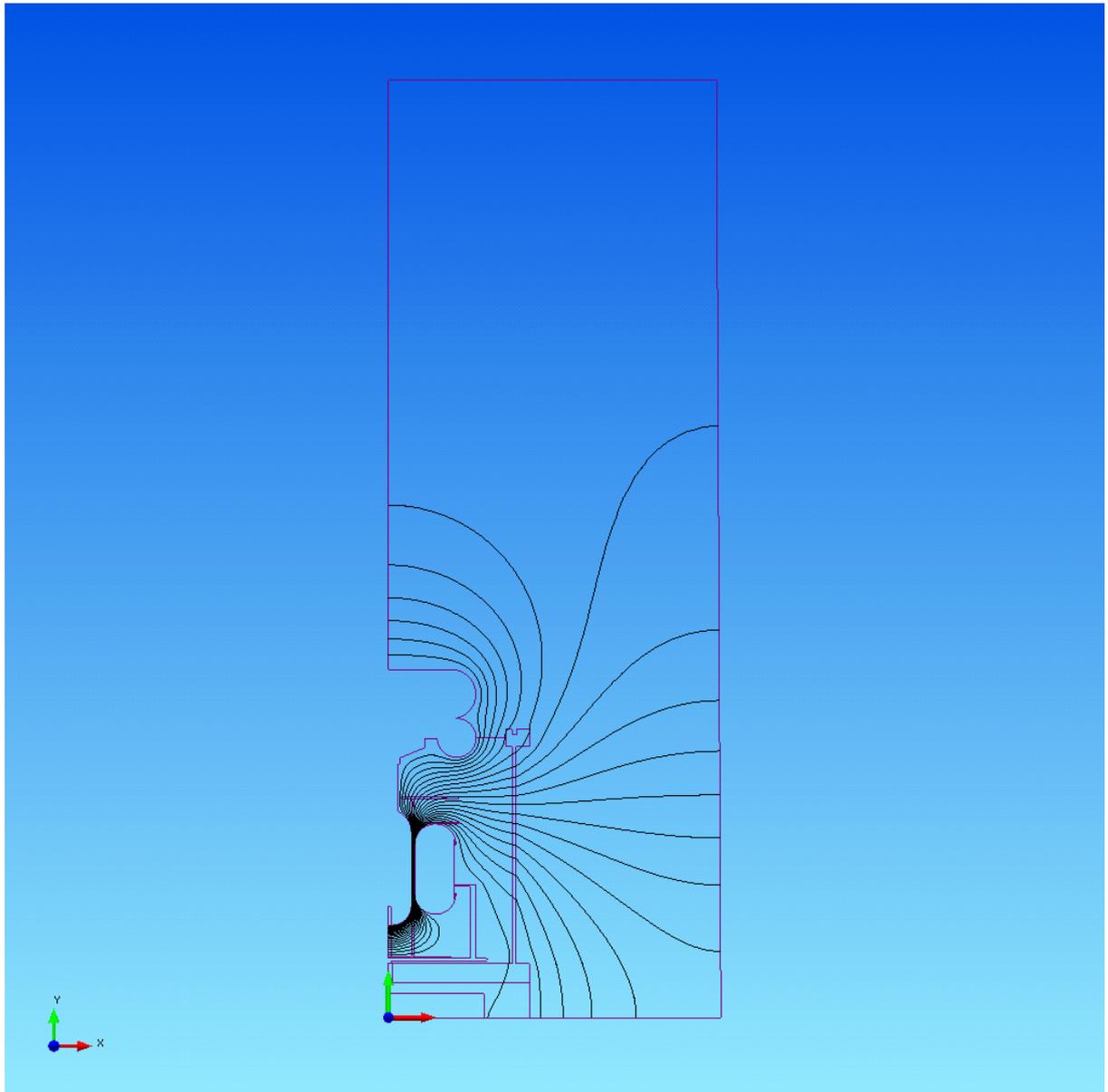
Geometrie



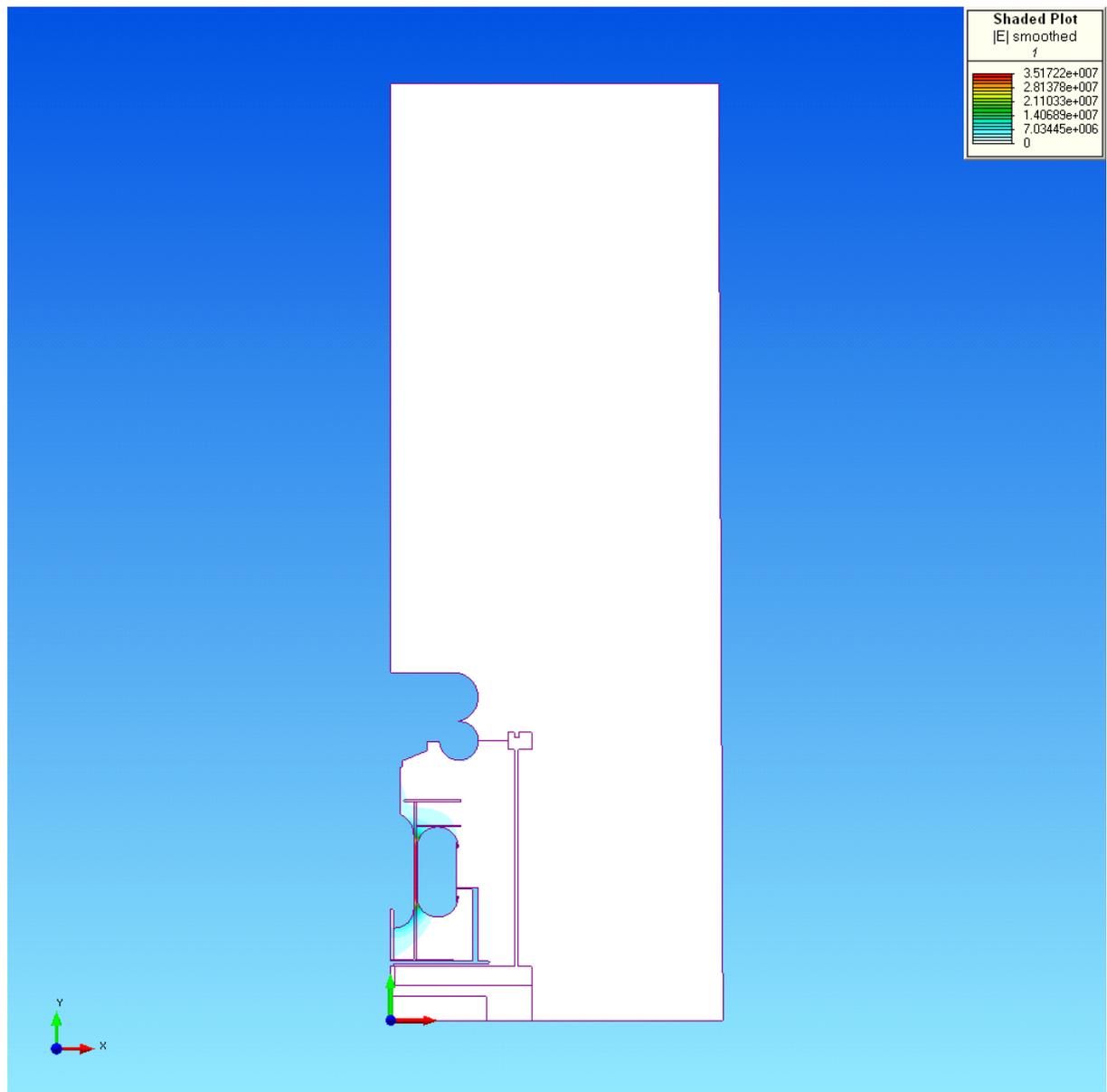
Finite Element Mesh



Materials Properties

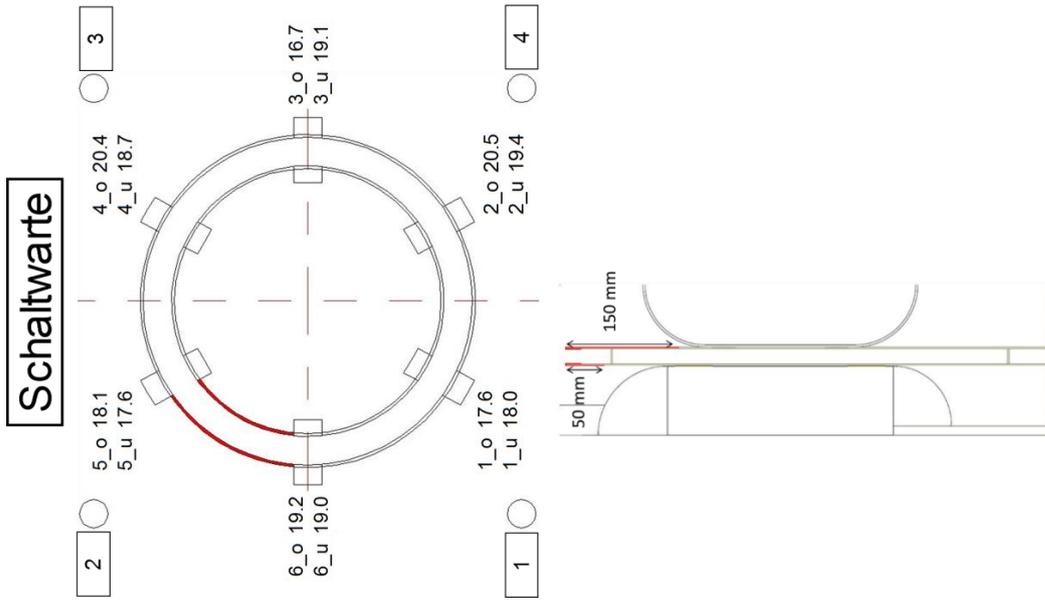


Equipotential Lines



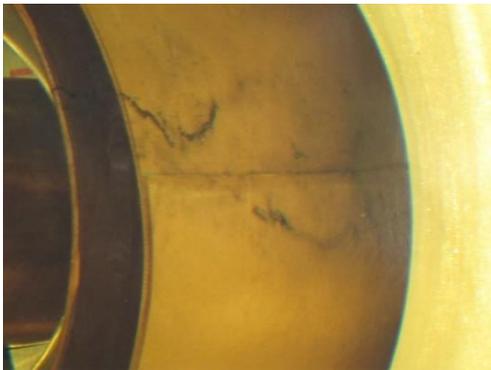
Electric Field Strength [V/m] (1kV/mm=1E6 V/m)

Anhang B: Prüflingskennblätter



Stufen	Sequenz									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr.	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
20 mm KV-Wert	340	320	305	285	270	255	240	220	205	185
%Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%
1	9.9	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5
2	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.5	0.5
3	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
4	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	3.0	2.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	2.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC



P001MO20	
Zeitraum	06. - 08.07.2015
rel. Luftfeuchte	32 %
T _{Luft}	33 °C
a _w	0,062
T _{öl}	32 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	4
Durch- / Überschlag	255 kV
Stufe	6
Sequenz	1
Spannung	150 %
U _{1%PD}	s = 10 s = 15
Mittelwert	207 kV
Stand. abw.	193 kV
BAUR	kV
Öqualität	MW. Stand. abw. %
min.	16,7
max	20,5 mm
mittel.	18,7

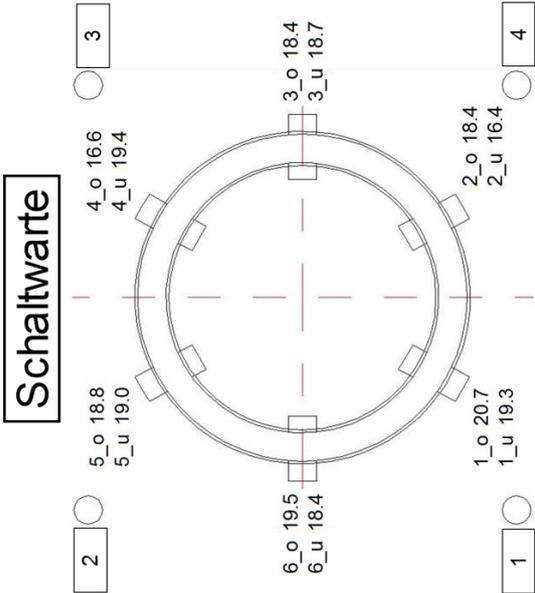
Bemerkungen

Wurde verkehrt eingebaut, daher waren die Streifen nicht richtig positioniert.

P002MO20	
Zeitraum	09. - 10.07.2015
rel. Luftfeuchte	29 %
T _{Luft}	31 °C
a _w	0,061
T _{öl}	31 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	3
	Stufe 3
	Sequenz 8
Durch- / Überschlag	205 kV
	120 %
U _{1%PD}	s = 10 193 kV
	s = 15 160 kV
	Mittelwert
BAUR	Stand. abw.
Ölqualität	MW. Stand. abw.
	%
Ölspaltweite	min. 16,4
	max 20,7
	mittel. 18,6

Nr.	Stufen		Sequenz										
	20 mm kV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
11	340	200%											
10	320	190%											
9	305	180%											
8	285	170%											
7	270	160%											
6	255	150%											
5	240	140%											
4	220	130%											
3	205	120%	13,0	9,0	13,0	6,0	3,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
2	185	110%	7,0	7,0	9,5	3,0	6,0	3,0	3,0	4,0	7,0	3,0	3,0
1	170	100%	4,0	6,0	3,0	1,0	11,0	14,0	9,0	8,0	8,0	8,0	5,0
0	150	90%	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
0	135	80%	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
0	125	73%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0	105	62%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0	95	55%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0	60	35%	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC



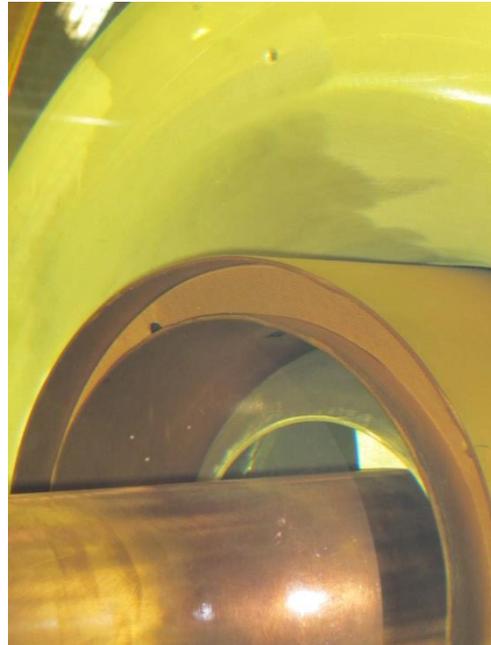
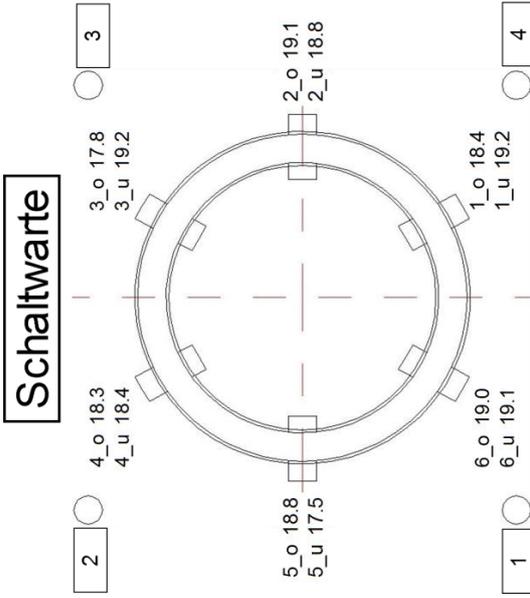
Bemerkungen

Frühzeitige Abschaltung der Anlage durch Strombegrenzung ist nicht auszuschließen. Wurde verkehrt eingebaut, daher waren die Streifen nicht richtig positioniert.

P003MO20	
Zeitraum	13. - 17.07.2015
rel. Luftfeuchte	29 %
T _{Luft}	30 °C
a _w	0,068
T _{öl}	31 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	2
Durch- / Überschlag	Stufe 2
	Sequenz 7
	Spannung 185 kV
	110 %
U _{-%PD}	s =10 145 kV
	s =15 131 kV
	Mittelwert 77,3 kV
BAUR	Stand. abw. 7,4 kV
Ölqualität	MW. Stand. 10 %
	abw.
Ölspaltweite	min. 17,5 mm
	max 19,2 mm
	mittel. 18,6 mm

Nr.	Stufen		Sequenz									
	20 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%										
10	320	190%										
9	305	180%										
8	285	170%										
7	270	160%										
6	255	150%										
5	240	140%										
4	220	130%										
3	205	120%										
2	185	110%										
1	170	100%	13,0	8,0	4,0	4,0	4,0	4,0	5,0	3,0	2,0	1,0
0	150	90%	7,0									
0	135	80%	5,0									
0	125	73%	3,0									
0	105	62%	3,0									
0	95	55%	3,0									
0	60	35%	4,0									

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC

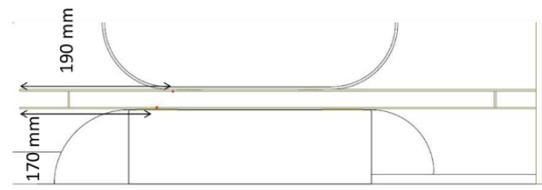
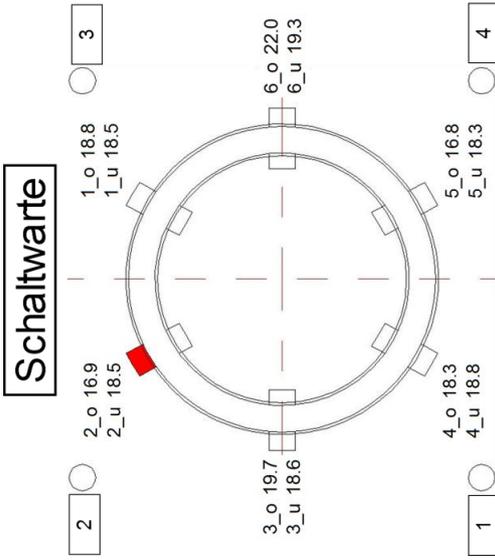


Bemerkungen	Frühzeitige Abschaltung der Anlage durch Strombegrenzung ist nicht auszuschließen. Wurde verkehrt eingebaut, daher waren die Streifen nicht richtig positioniert.
--------------------	---

P004SE20	
Zeitraum	20. - 21.07.2015
rel. Luftfeuchte	30 %
T _{Luft}	31 °C
a _w	0,056
T _{öl}	31 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	1
Stufe	2
Sequenz	2
Durch- / Überschlag Spannung	185 kV
	110 %
U _{1%PD}	65 kV
	s = 10
	s = 15
Mittelwert	78,1 kV
Stand. abw.	6,1 kV
Öqualität	MW. Stand. abw. 8 %
Öspaltweite	min. 16,8 mm
	max 22,0 mm
	mittel. 18,7 mm

Stufen	Sequenz																	
	20 mm Nr.	340	320	305	285	270	255	240	220	205	185	170	150	135	125	105	95	60
%-Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%	100%	90%	80%	73%	62%	55%	35%	
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

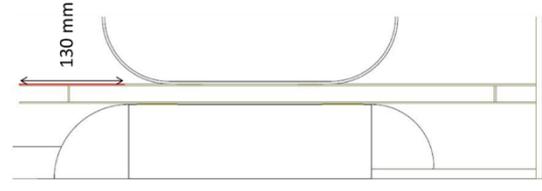
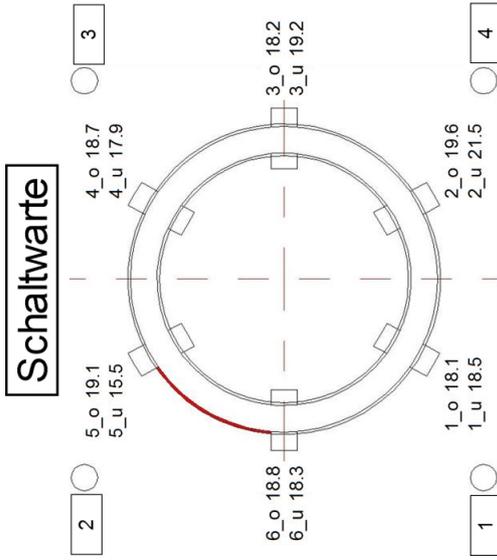


Bemerkungen
Blasen vorhanden.

P005SE20	
Zeitraum	22. - 24.07.2015
rel. Luftfeuchte	30 %
T _{Luft}	31 °C
a _w	0,075
T _{öl}	33 °C
H ₂ O	7 ppm
Elektrode	4
Stufe	3
Sequenz	6
Spannung	205 kV
Durch- / Überschlag	120 %
U _{1%} PD	s =10 170 kV
	s =15 157 kV
Mittelwert	78,5 kV
Stand. abw.	6,1 kV
BAUR	
Ölqualität	MW. Stand. 8 % abw.
Ölspaltweite	min. 15,5 mm max 21,5 mm mittel. 18,6 mm

Stufen	Sequenz												
	20 mm Nr.	340 kv-Wert	%Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%											
10	320	190%											
9	305	180%											
8	285	170%											
7	270	160%											
6	255	150%											
5	240	140%											
4	220	130%											
3	205	120%	6.0	0.1	0.1	1.0	3.0						
2	185	110%	3.0	5.0	0.1	0.1	2.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1	170	100%	8.0	1.0	0.1	3.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0	150	90%											
0	135	80%											
0	125	73%											
0	105	62%											
0	95	55%											
0	60	35%											

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC

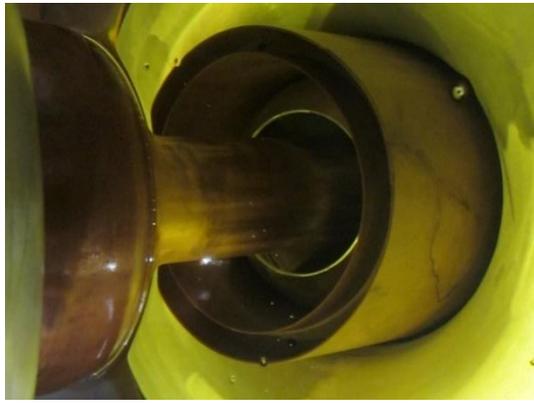
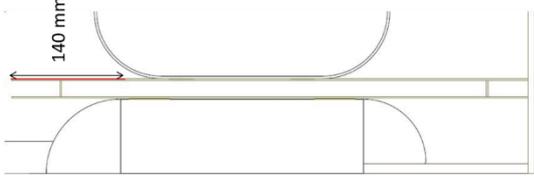
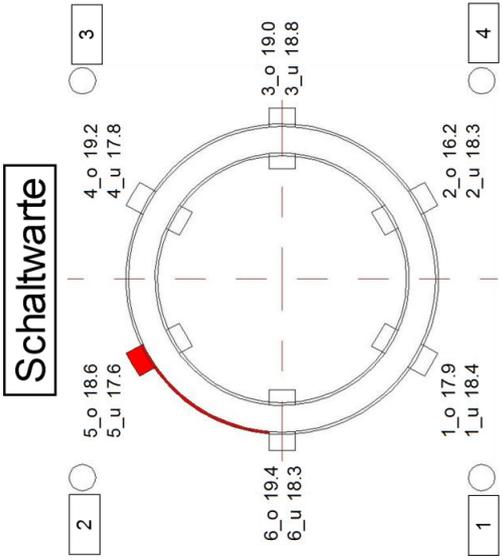


Bemerkungen	
--------------------	--

P006SE20	
Zeitraum	27. - 28.07.2015
rel. Luftfeuchte	29 %
T _{Luft}	29 °C
a _w	0,101
T _{öl}	31 °C
H ₂ O	8 ppm
Elektrode	3
Durch- / Überschlagnung	Stufe 2 Sequenz 3 Spannung 185 kV
U ₁ %PD	110 %
	s = 10 150 kV
	s = 15 135 kV
Mittelwert	85,4 kV
Stand. abw.	10,3 kV
Ölqualität	MW. Stand. 12 % abw.
Ölspaltweite	min. 16,2 mm max 19,4 mm mittel. 18,3 mm

Stufen	Sequenz												
	20 mm Nr.	340 kv-Wert	%Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%											
10	320	190%											
9	305	180%											
8	285	170%											
7	270	160%											
6	255	150%											
5	240	140%											
4	220	130%											
3	205	120%											
2	185	110%		9,5	9,5								
1	170	100%		12,0	8,0	8,0	6,0	8,0	8,0	6,0	6,0	0,1	0,1
0	150	90%		8,0									
0	135	80%		2,0									
0	125	73%		2,0									
0	105	62%		2,0									
0	95	55%		2,0									
0	60	35%		2,0									

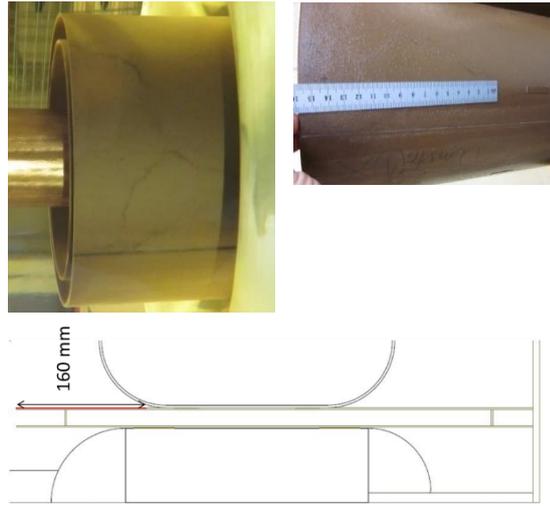
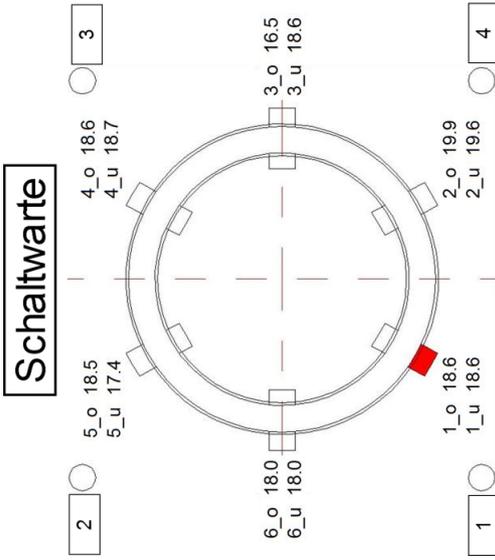
Durch- / Überschlagnung
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC



Bemerkungen	
--------------------	--

P007SE20	
Zeitraum	29. - 30.07.2015
rel. Luftfeuchte	33 %
T _{Luft}	27 °C
a _w	0,070
T _{öi}	34 °C
H ₂ O	6 ppm
Elektrode	2
Durch- / Überschlag	Stufe 2
Spannung	185 kV
U _{1%PD}	110 %
s = 10	145 kV
s = 15	131 kV
Mittelwert	74,6 kV
Stand. abw.	12,5 kV
Ölqualität	MW. Stand. 17 % abw.
Ölspaltweite	min. 16,5 mm max 19,9 mm mittel. 18,4 mm

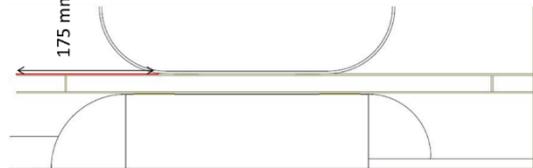
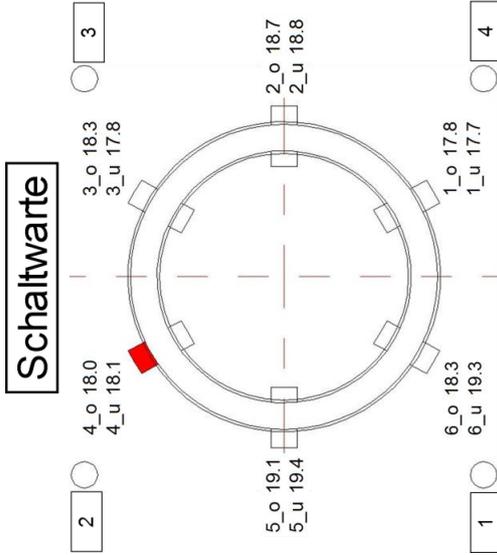
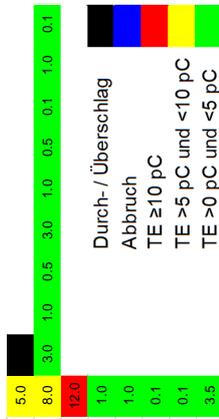
Stufen	Sequenz									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr.	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
20 mm kv-Wert	340	320	305	285	270	255	240	220	205	185
%Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%
Durch- / Überschlag	1.0	3.5	7.0	0.1	0.1	1.0	2.0	0.1	0.1	0.1
Abbruch	2.5	3.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
TE ≥ 10 pC	3.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
TE > 5 pC und < 10 pC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TE > 0 pC und < 5 pC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Bemerkungen

P008SE20	
Zeitraum	30. - 31.07.2015
rel. Luftfeuchte	30 %
T _{Luft}	27 °C
a _w	0,071
T _{öl}	30 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	4
Durch- / Überschlag	Stufe 2 Sequenz 2 Spannung 185 kV
U _{1%PD}	110 %
	s = 10 147 kV
	s = 15 133 kV
Mittelwert	86,3 kV
Stand. abw.	5,4 kV
BAUR Ölqualität	MW. Stand. abw. 6 %
Ölspaltweite	min. 17,7 mm
	max 19,4 mm
	mittel. 18,4 mm

Nr.	Stufen		Sequenz										
	20 mm kV-Wert	%Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
11	340	200%											
10	320	190%											
9	305	180%											
8	285	170%											
7	270	160%											
6	255	150%											
5	240	140%											
4	220	130%											
3	205	120%											
2	185	110%											
1	170	100%											
0	150	90%											
0	135	80%											
0	125	73%											
0	105	62%											
0	95	55%											
0	60	35%											

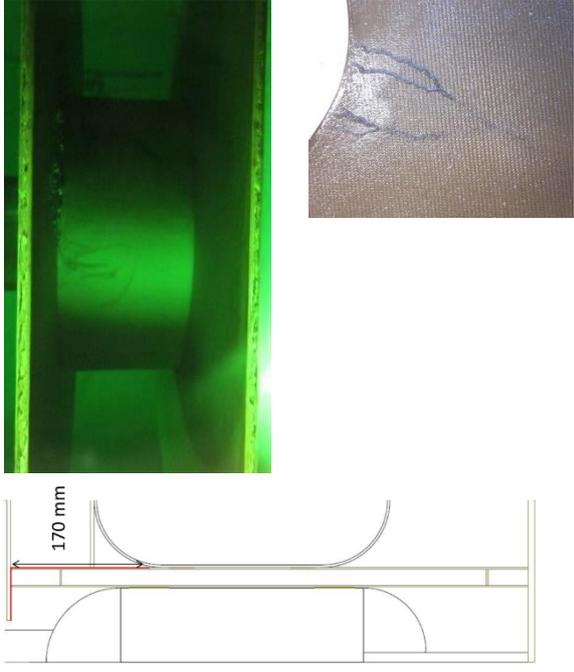
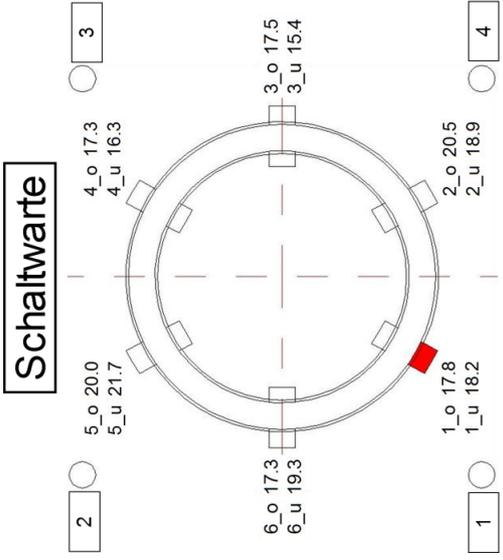


Bemerkungen	
-------------	--

P009NE20	
Zeitraum	03. - 05.08.2015
rel. Luftfeuchte	33 %
T _{Luft}	28 °C
a _w	0,092
T _{öl}	29 °C
H ₂ O	7 ppm
Elektrode	1
Durch- / Überschlag	Stufe 4
Spannung	Seqenz 1
	220 kV
U _{1%PD}	130 %
	s = 10 179 kV
	s = 15 165 kV
BAUR	Mittelwert 60,8 kV
Öqualität	Stand. abw. 8,5
	MW. Stand. abw. 14 %
Ölspaltweite	min. 15,4
	max 21,7 mm
	mittel. 18,4

Stufen	Sequenz											
	20 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%										
10	320	190%										
9	305	180%										
8	285	170%										
7	270	160%										
6	255	150%										
5	240	140%										
4	220	130%	1.0									
3	205	120%	0.1	1.0	1.0	0.1	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0
2	185	110%	0.1	1.0	1.0	0.1	0.1	0.1	1.0	0.1	2.0	2.0
1	170	100%	1.0	8.0	1.0	0.1	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5
0	150	90%	1.0									
0	135	80%	1.0									
0	125	73%	3.0									
0	105	62%	0.5									
0	95	55%	0.5									
0	60	35%	4.0									

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

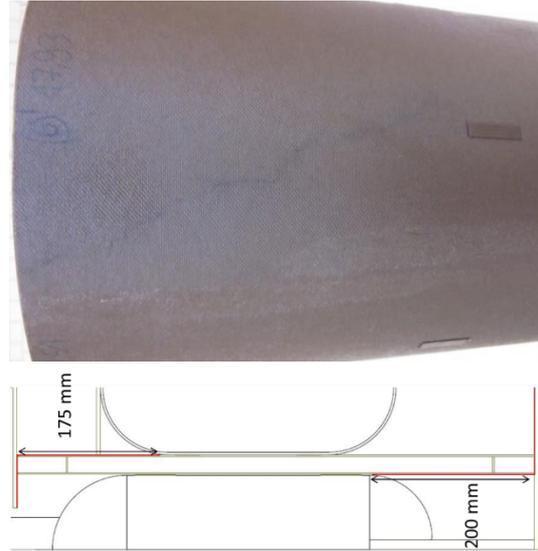
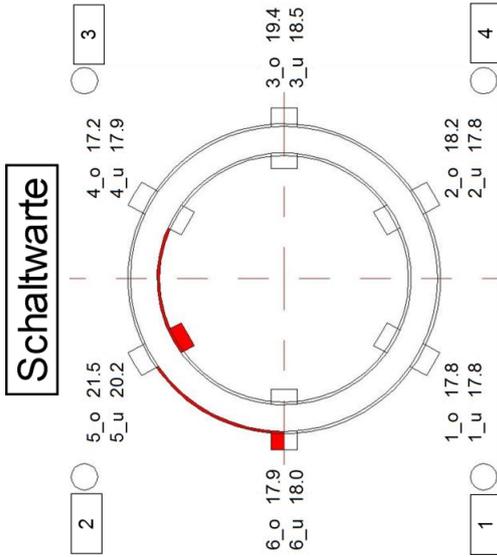


Bemerkungen	
-------------	--

P010NE20	
Zeitraum	06. - 07.08.2015
rel. Luftfeuchte	32 %
T _{Luft}	30 °C
a _w	0,100
T _{öl}	30 °C
H ₂ O	8 ppm
Elektrode	4
Durch- / Überschlag	Stufe 5
U _{1%PD}	Sequenz 2
	Spannung 240 kV
	140 %
	s =10 193 kV
	s =15 180 kV
	Mittelwert 77,7 kV
	Stand. abw. 12,9 kV
	MW. Stand. abw. 17 %
Ölspaltweite	min. 17,2 mm
	max 21,5 mm
	mittel. 18,5 mm

Stufen	Sequenz												
	20 mm Nr.	3-40	100%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	3-40	200%											
10	320	190%											
9	305	180%											
8	285	170%											
7	270	160%											
6	255	150%											
5	240	140%	6,0	6,0	0,1	0,1	0,1	0,1	6,0	6,0	0,1	8,0	0,1
4	220	130%	6,0	0,1	3,0	0,1	3,0	0,1	0,1	0,1	3,0	3,0	0,1
3	205	120%	0,1	3,0	0,1	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	185	110%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1	170	100%	9,9	6,0	6,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0
0	150	90%	13,0										
0	135	80%	12,0										
0	125	73%	12,0										
0	105	62%	12,0										
0	95	55%	1,0										
0	60	35%	1,0										

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

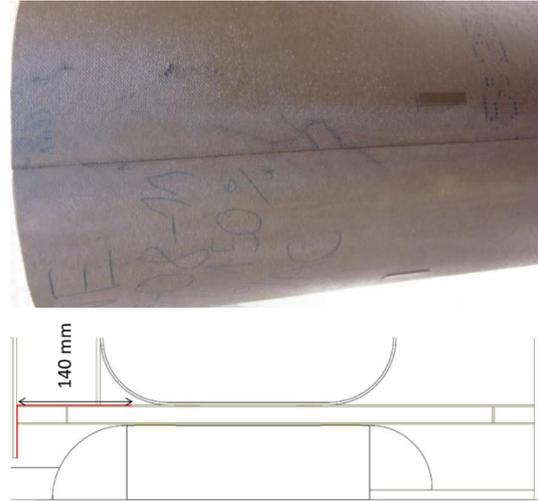
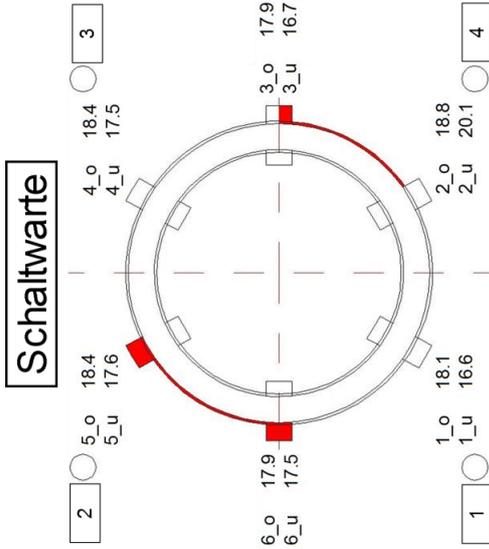


Bemerkungen	
-------------	--

P011NE20	
Zeitraum	10. - 12.08.2015
rel. Luftfeuchte	30 %
T _{Luft}	31 °C
a _w	0,112
T _{öl}	37 °C
H ₂ O	11 ppm
Elektrode	1
Durch- / Überschlag	Stufe 6
	Sequenz 1
	Spannung 255 kV
	150 %
U _{1%PD}	s = 10 207 kV
	s = 15 193 kV
Mittelwert	75,9 kV
Stand. abw.	13,4 kV
BAUR	
Öqualität	MW. Stand. 18 %
	abw.
Ölspaltweite	min. 16,6 mm
	max 20,1 mm
	mittel. 18,0 mm

Stufen	Sequenz										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Nr.	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
20 mm KV-Wert	340	320	305	285	270	255	240	220	205	185	170
%-Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%	100%
	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	11,0	2,5	3,0	0,1	3,0	13,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	9,0	5,0	10,0	2,0	0,5	2,5	0,1	0,1	0,1	0,5	1,0
	0,5										
	0,5										
	0,5										
	1,0										
	6,0										
	0,1										
	2,5										

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

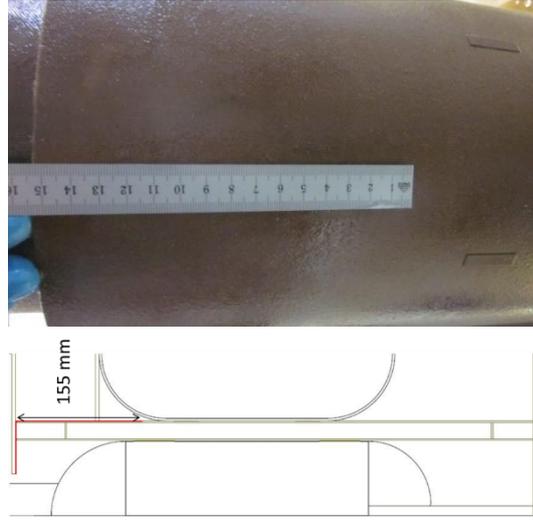
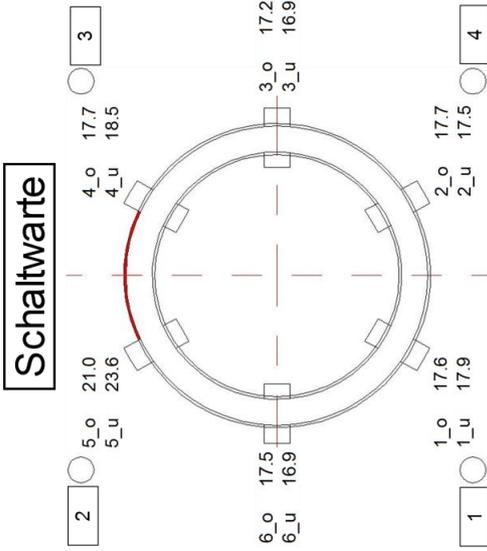


Bemerkungen	

P012NE20	
Zeitraum	12. - 13.08.2015
rel. Luftfeuchte	31 %
T _{Luft}	31 °C
a _w	0,106
T _{öl}	45 °C
H ₂ O	15 ppm
Elektrode	4
Durch- / Überschlag	Stufe 4 Sequenz 3 Spannung 220 kV
U _{1%PD}	130 % s = 10 181 kV s = 15 167 kV
BAUR	Mittelwert 75,8 kV Stand. abw. 10,9 kV
Öqualität	MW. Stand. abw. 14 %
Öspaltweite	min. 16,9 mm max 23,6 mm mittel. 18,3 mm

Stufen	Sequenz												
	Nr.	20 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%											
10	320	190%											
9	305	180%											
8	285	170%											
7	270	160%											
6	255	150%											
5	240	140%											
4	220	130%	3,0	3,0									
3	205	120%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	185	110%	1,0	3,5	3,5	0,5	0,5	3,0	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1
1	170	100%	1,0	1,0	3,5	1,0	1,0	3,5	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0
0	150	90%						0,5					
0	135	80%						0,5					
0	125	73%						0,5					
0	105	62%						0,5					
0	95	55%						1,5					
0	60	35%						1,0					

Durch- / Überschlag
Abbruch
TE ≥ 10 pC
TE > 5 pC und < 10 pC
TE > 0 pC und < 5 pC

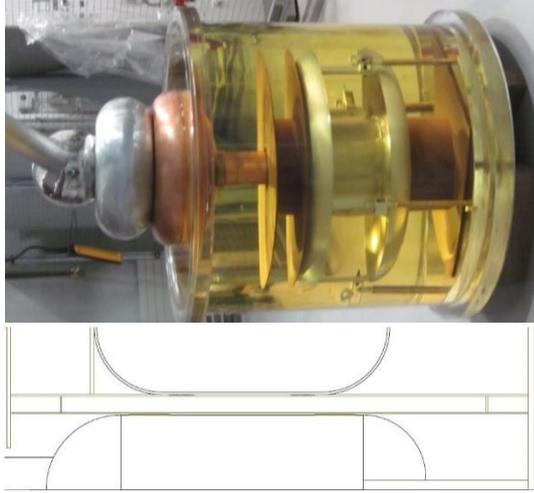
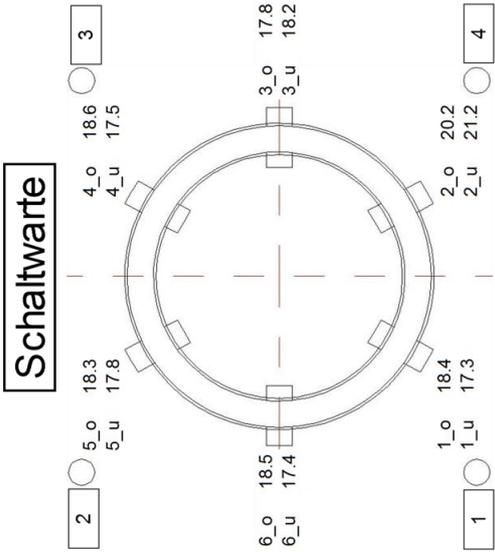


Bemerkungen	
-------------	--

P013 MO20	
Zeitraum	14. - 20.08.2015
rel. Luftfeuchte	29 %
T _{Luft}	28 °C
a _w	0,095
T _{öl}	28 °C
H ₂ O	7 ppm
Elektrode	1
Durch- / Überschlag	Stufe 11 Sequenz 6 Spannung 340 kV
U _{1%PD}	s = 10 291 kV s = 15 273 kV
BAUR Ölqualität	Mittelwert 92,1 kV Stand. abw. 4,7 MW. Stand. abw. 5 %
Ölspaltweite	min. 17,3 max 21,2 mm mittel. 18,4

Nr.	Stufen		Sequenz									
	20 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	320	190%	5,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	3,5	0,5	0,5	0,5
9	305	180%	10,0	15,0	11,0	3,0	0,1	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1
8	285	170%	9,5	4,0	4,0	1,5	1,5	6,5	4,0	3,0	2,5	3,0
7	270	160%	6,0	7,0	4,5	7,5	6,5	5,5	6,0	6,5	4,5	5,0
6	255	150%	4,0	5,0	7,0	7,0	8,0	7,0	7,5	4,5	4,5	4,5
5	240	140%	3,0	1,0	1,0	2,5	3,0	2,0	2,0	2,5	6,0	7,0
4	220	130%	4,5	4,0	14,0	11,0	7,5	7,0	7,0	4,0	5,0	5,0
3	205	120%	4,9	5,5	5,5	5,0	1,5	2,0	5,0	6,0	4,0	4,9
2	185	110%	6,5	6,0	5,0	4,5	5,0	20,5	8,5	6,0	0,1	0,1
1	170	100%	5,0	5,0	4,0	4,0	4,5	5,0	5,0	5,0	4,9	5,0
0	150	90%	3,0									
0	135	80%	2,0									
0	125	73%	2,0									
0	105	62%	0,1									
0	95	55%	0,1									
0	60	35%	1,5									

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

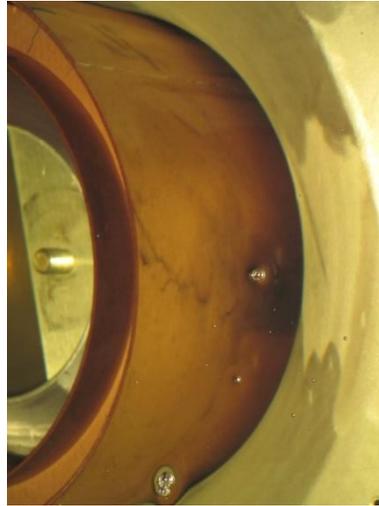
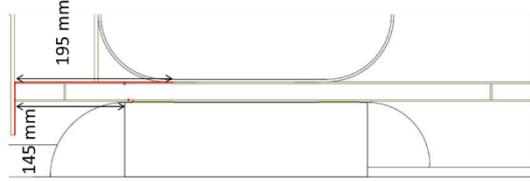
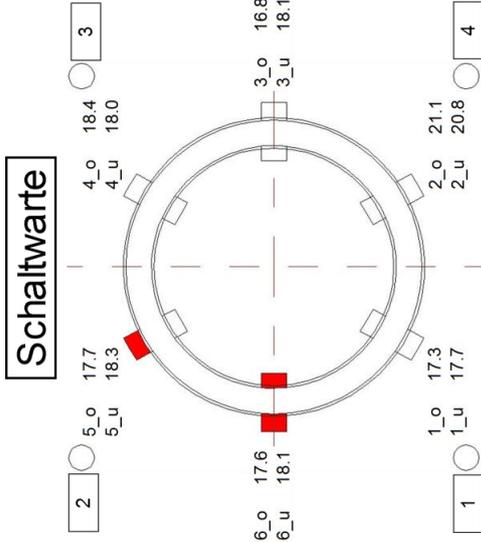


Bemerkungen	
Umbau der Spannungszuführung aufgrund starker Entladungen am Ölspiegel.	

P014MO20	
Zeitraum	21. - 24.08.2015
rel. Luftfeuchte	31 %
T _{Luft}	27 °C
a _w	0,093
T _{öl}	27 °C
H ₂ O	7 ppm
Elektrode	3
Durch- / Überschlag	Stufe 8
Spannung	Sequenz 3
	285 kV
U _{1%PD}	170 %
	s = 10 226 kV
	s = 15 211 kV
BAUR	Mittelwert 86,9 kV
Ölqualität	Stand. abw. 6,6 kV
	MW. Stand. abw. 8 %
Ölspaltweite	min. 16,8 mm
	max 21,1 mm
	mittel. 18,3 mm

Stufen	Sequenz																	
	20 mm Nr.	340	320	305	285	270	255	240	220	205	185	170	150	135	125	105	95	60
%-Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%	100%	90%	80%	73%	62%	55%	35%	
	4,50	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	4,90	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	5,00	6,50	11,50	6,50	3,00	0,10	5,00	0,10	4,50	0,10	1,00	0,10	3,50	0,10	6,50	0,10	9,00	0,10
	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	11,50	3,00	4,00	3,00	3,50	1,00	2,00	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00
	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

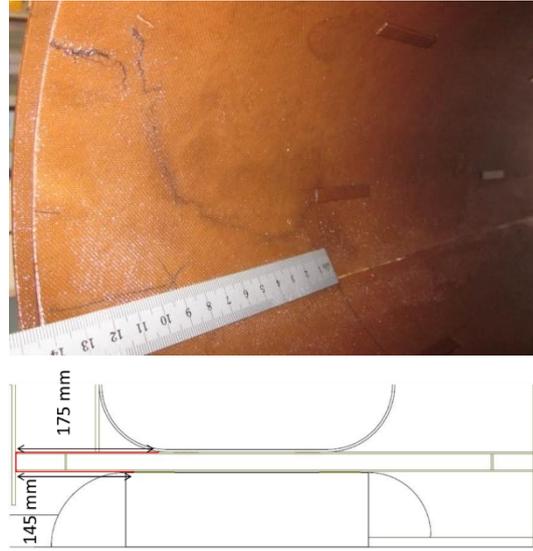
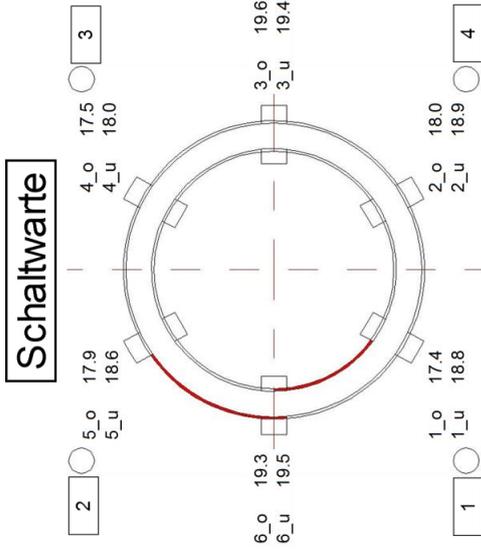


Bemerkungen	

P015MO20	
Zeitraum	25. - 27.08.2015
rel. Luftfeuchte	29 %
T _{Luft}	28 °C
a _w	0,094
T _{öl}	27 °C
H ₂ O	6 ppm
Elektrode	2
Durch- / Überschlag Spannung	305 kV
Stufe	9
Sequenz	4
U _{1%PD}	180 %
s = 10	256 kV
s = 15	240 kV
Mittelwert	90,4 kV
Stand. abw.	5,6 kV
Ölqualität	MW. Stand. abw. 6 %
Ölspaltweite	min. 17,4 mm
	max. 19,6 mm
	mittel. 18,6 mm

Stufen	Sequenz												
	Nr.	20 mm kV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%											
10	320	190%											
9	305	180%	11,0	3,5	0,5								
8	285	170%	6,5	0,1	0,1	3,0	0,1	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
7	270	160%	0,1	0,1	3,0	0,1	5,5	0,1	3,0	0,1	3,0	0,1	0,1
6	255	150%	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	6,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5	240	140%	3,5	0,1	0,1	3,5	0,1	0,1	2,0	0,1	1,0	0,1	0,1
4	220	130%	4,0	7,5	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3	205	120%	8,5	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	5,5	0,1	0,1
2	185	110%	4,5	0,1	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1	170	100%	5,0	3,5	4,0	0,1	0,1	2,5	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1
0	150	90%	3,0										
0	135	80%	0,5										
0	125	73%	0,1										
0	105	62%	0,1										
0	85	55%	0,5										
0	60	35%	1,0										

Durch- / Überschlag
Abbruch
TE ≥ 10 pC
TE > 5 pC und < 10 pC
TE > 0 pC und < 5 pC

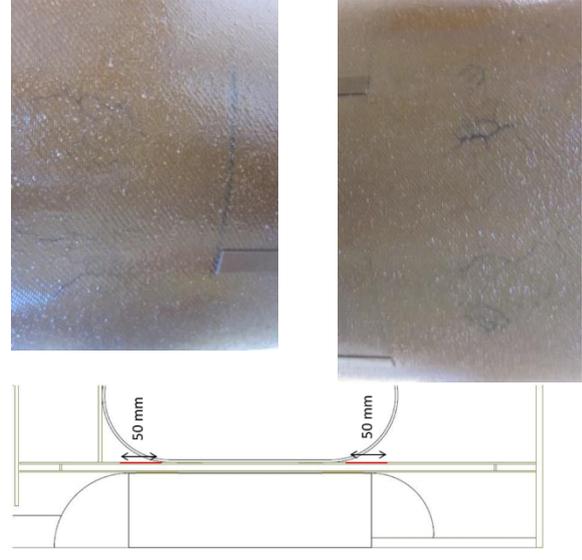
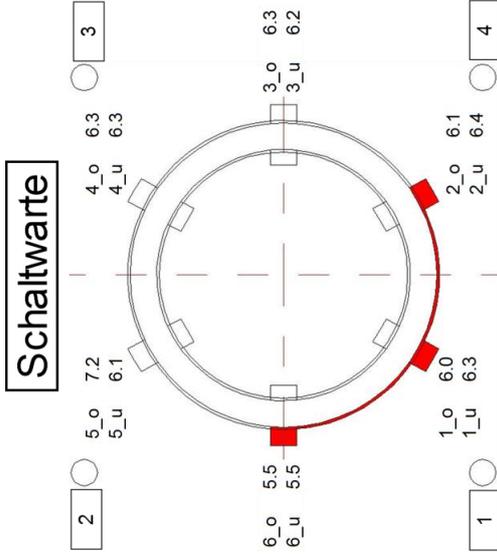


Bemerkungen

P016MO8	
Zeitraum	28.08.2015
rel. Luftfeuchte	30 %
T _{Luft}	29 °C
a _w	0,097
T _{öl}	27 °C
H ₂ O	7 ppm
Elektrode	4
	Stufe 4
	Sequenz 6
Durch- / Überschlag	150 kV
	130 %
U _{1%PD}	s = 10 33 kV
	s = 15 30 kV
Mittelwert	89,8 kV
BAUR	Stand. abw. 6,6
Öqualität	MW. Stand. 7 %
	abw.
Ölspalte	min. 5,5 mm
	max 7,2 mm
	mittel. 6,2 mm

Stufen	Sequenz												
	Nr.	8 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	230	200%											
10	220	190%											
9	210	180%											
8	195	170%											
7	185	160%											
6	175	150%											
5	160	140%											
4	150	130%	7.0	7.0	17.0	16.0	18.0	5.0					
3	140	120%	13.0	13.0	12.0	12.0	13.0	14.0	14.0	13.0	10.0	12.0	
2	125	110%	15.0	16.0	18.0	18.0	18.0	15.0	15.0	15.0	15.0	10.0	
1	115	100%	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	15.0
0	105	90%	18.0										
0	90	80%	18.0										
0	85	73%	18.0										
0	70	62%	13.0										
0	65	55%	11.0										
0	40	35%	0.1										

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC



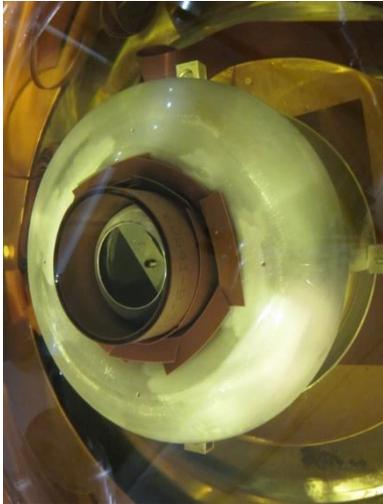
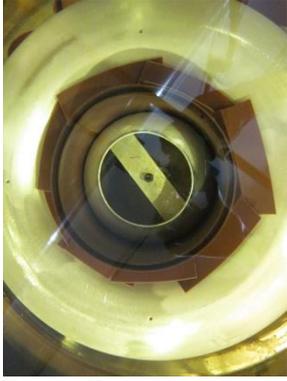
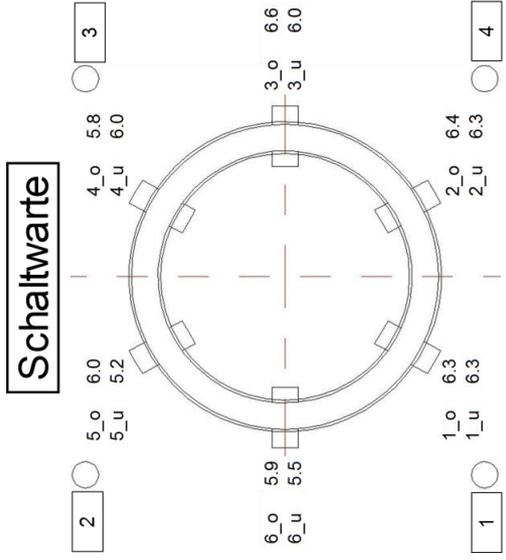
Bemerkungen

Testprüfling für 8 mm Variante noch ohne Kreppeinlage.

P017SE8	
Zeitraum	01. - 02.09.2015
rel. Luftfeuchte	30 %
T _{Luft}	30 °C
a _w	0,068
T _{öl}	29 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	1
Durch- / Überschlag	Stufe 5
	Sequenz 8
	Spannung 160 kV
	140 %
U _{1%} PD	s = 10 137 kV
	s = 15 128 kV
BAUR	Mittelwert 80,9 kV
Ölqualität	Stand. abw. 18,2 kV
	MW. Stand. abw. 23 %
Ölspaltweite	min. 5,2 mm
	max 6,6 mm
	mittel. 6,0 mm

Stufen	Sequenz												
	Nr.	8 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	230	200%											
10	220	190%											
9	210	180%											
8	195	170%											
7	185	160%											
6	175	150%											
5	160	140%	7.0	0.1	4.0	6.0	0.1	4.5	4.5				
4	150	130%	5.0	6.0	5.0	0.1	3.5	8.0	0.1	1.0	0.1	3.5	
3	140	120%	5.0	4.0	4.0	12.0	11.5	10.3	9.0	4.5	0.1	0.1	
2	125	110%	2.5	0.5	2.5	1.0	0.1	0.1	0.1	1.0	0.5	0.1	
1	115	100%	5.5	6.5	3.5	0.5	2.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	
0	105	90%	3.5										
0	90	80%	0.1										
0	85	73%	0.1										
0	70	62%	0.1										
0	65	55%	0.5										
0	40	35%	3.0										

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC

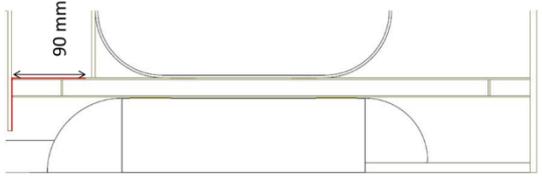
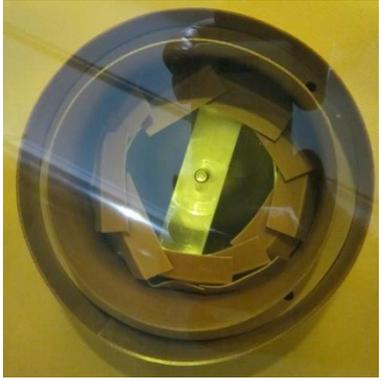
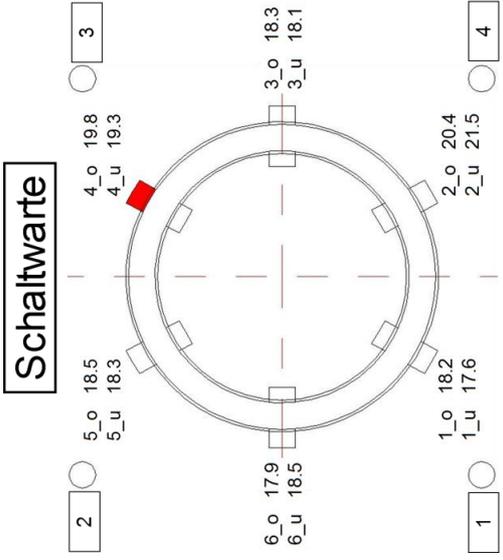


Bemerkungen	Mit Kreppereinlage.
-------------	---------------------

P018SE20	
Zeitraum	03. - 04.09.2015
rel. Luftfeuchte	29 %
T _{Luft}	28 °C
a _w	0,073
T _{öl}	28 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	3
Durch- / Überschlag	Stufe 7
Spannung	Sequenz 1
	270 kV
	160 %
U _{1%} PD	s = 10
	210 kV
	s = 15
	195 kV
Mittelwert	66,3 kV
Stand. abw.	13,4 kV
Öqualität	MW. Stand. abw. 20 %
Ölspaltweite	min. 17,6 mm
	max 21,5 mm
	mittel. 18,9 mm

Nr.	Stufen		Sequenz											
	20 mm KV-Wert	%Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
11	340	200%												
10	320	190%												
9	305	180%												
8	285	170%												
7	270	160%												
6	255	150%	4,90	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
5	240	140%	4,0	4,0	12,5	0,1	10,0	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1
4	220	130%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3	205	120%	0,1	0,1	0,1	4,5	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	0,1
2	185	110%	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1	170	100%	0,5	0,5	0,5	0,1	2,0	0,1	0,1	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1
0	150	90%	1,0											
0	135	80%	3,0											
0	125	73%	3,0											
0	105	62%	2,5											
0	95	55%	1,5											
0	60	35%	1,5											

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

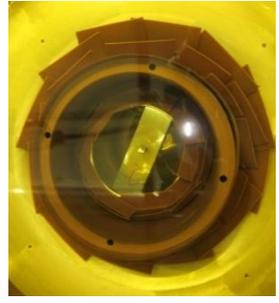
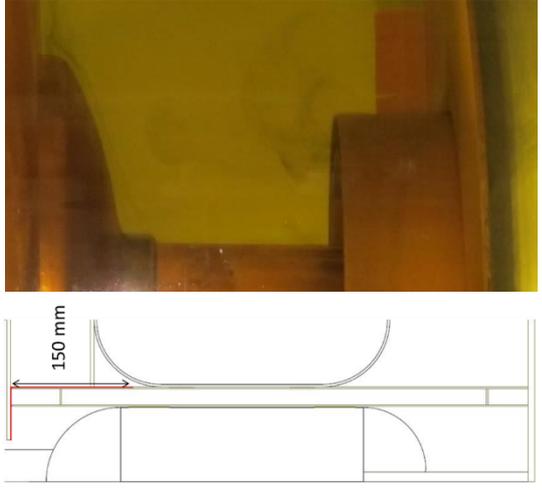
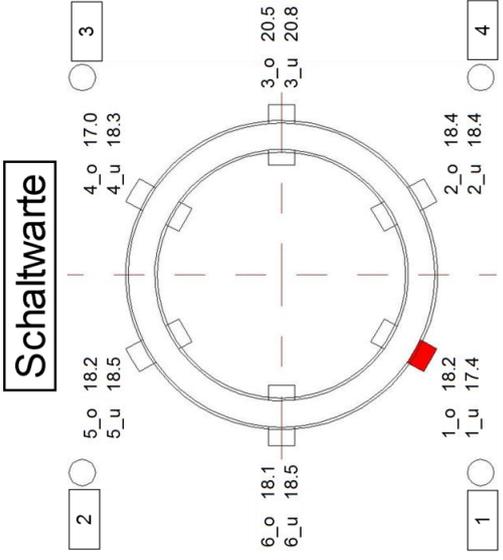


Bemerkungen	Mit Kreppereinlage.
-------------	---------------------

P019SE20	
Zeitraum	07.09.2015
rel. Luftfeuchte	28 %
T _{Luft}	25 °C
a _w	0,090
T _{öl}	24 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	2
	Stufe 4
	Sequenz 3
Durch- / Überschlag	220 kV
	130 %
U _{1%PD}	s = 10 181 kV
	s = 15 167 kV
BAUR	Mittelwert 64,1 kV
Öqualität	Stand. abw. 9,9
	MW. Stand. abw. 16 %
Ölspalte	min. 17,0 mm
	max. 20,8 mm
	mittel. 18,5 mm

Stufen	Sequenz									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr.	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
20 mm KV-Wert	340	320	305	285	270	255	240	220	205	185
%-Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%
	2,0	3,0	3,5	2,5	2,0	2,5	2,0	2,5	2,0	2,0
	3,5	2,5	2,0	1,0	3,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0
	4,5	2,5	1,0	1,0	3,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0
	3,5	4,5	3,0	3,5	3,5	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5
	0	150	90%	3,5						
	0	135	80%	2,0						
	0	125	73%	0,1						
	0	105	62%	0,1						
	0	85	55%	0,1						
	0	60	35%	0,5						

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC

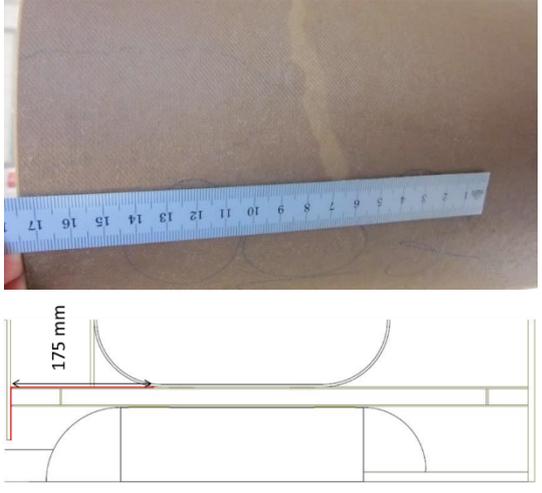
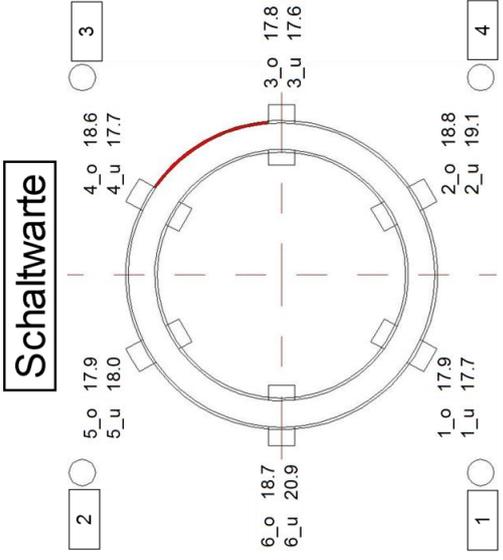


Bemerkungen
Abdeckplatten im Laufe des Tests abgenommen, da diese wiederholt im Einsatz waren.
Mit Kreppleinlage.

P020SE20	
Zeitraum	08. - 09.09.2015
rel. Luftfeuchte	32 %
T _{Luft}	24 °C
a _w	0,062
T _{öl}	23 °C
H ₂ O	4 ppm
Elektrode	1
Durch- / Überschlag	Stufe 1
Spannung	170 kV
	100 %
U _{1%PD}	s = 10 108 kV
	s = 15 92 kV
Mittelwert	70,9 kV
Stand. abw.	8,5 kV
Ölqualität	MW. Stand. 12 %
abw.	
min.	17,6
max	20,9
mittel.	18,4

Nr.	Stufen		Sequenz											
	20 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
11	340	200%												
10	320	190%												
9	305	180%												
8	285	170%												
7	270	160%												
6	255	150%												
5	240	140%												
4	220	130%												
3	205	120%												
2	185	110%												
1	170	100%	14,5											
0	150	90%	6,0											
0	135	80%	6,0											
0	125	73%	10,0											
0	105	62%	1,0											
0	95	55%	0,1											
0	60	35%	0,1											

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC



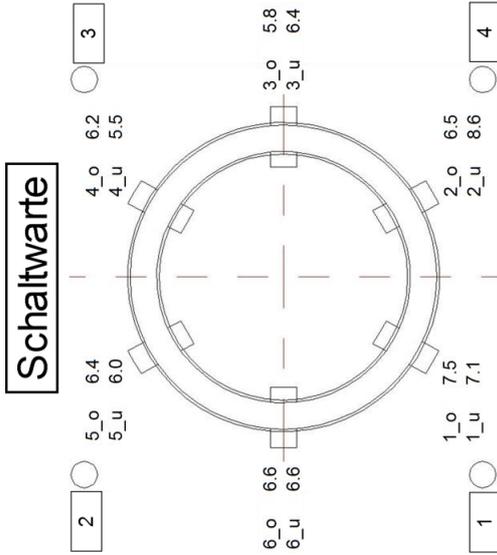
Bemerkungen

Wurde verkehrt eingebaut, daher waren die Streifen nicht richtig positioniert. Mit Kreppeinlage.

P021SE8	
Zeitraum	10. - 11.09.2015
rel. Luftfeuchte	31 %
T _{Luft}	24 °C
a _w	0,061
T _{öl}	24 °C
H ₂ O	4 ppm
Elektrode	4
Durch- / Überschlag	Stufe 3 Sequenz 3 Spannung 140 kV
U _{1%PD}	s = 10 108 kV s = 15 100 kV
BAUR	Mittelwert 62,7 kV Stand. abw. 13,1 kV
Öqualität	MW. Stand. 21 % abw.
Ölspalte	min. 5,5 mm max 8,6 mm mittel. 6,6 mm
Bemerkungen	Mit Kreppeneinlage.

Stufen	Sequenz												
	Nr.	8 mm kV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	230	200%											
10	220	190%											
9	210	180%											
8	195	170%											
7	185	160%											
6	175	150%											
5	160	140%											
4	150	130%											
3	140	120%	11,0	12,0									
2	125	110%	11,0	4,0	15,0	13,0	2,0	4,5	3,0	4,0	6,0	7,0	
1	115	100%	12,5	6,5	11,5	12,5	7,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0	105	90%			9,5								
0	90	80%			7,0								
0	85	73%			0,5								
0	70	62%			0,5								
0	65	55%			1,0								
0	40	35%			1,0								

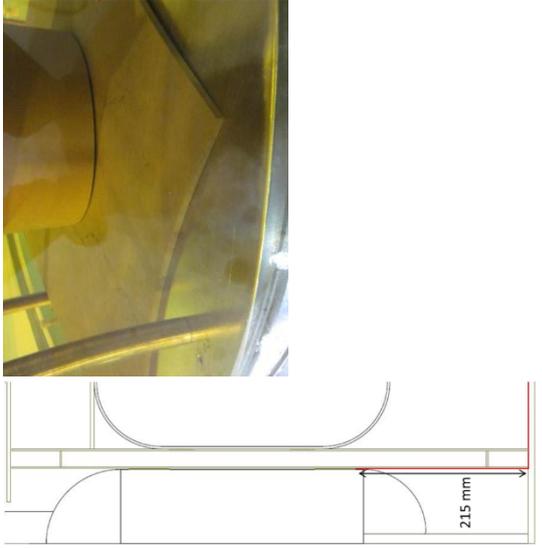
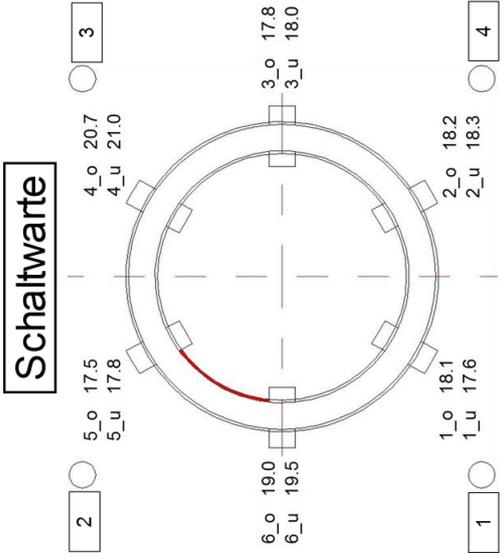
Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC



P022SE20	
Zeitraum	14. - 15.09.2015
rel. Luftfeuchte	33 %
T _{Luft}	24 °C
a _w	0,067
T _{öl}	25 °C
H ₂ O	4 ppm
Elektrode	3
Stufe	1
Durch- / Sequenz	150 kV
Überschlag Spannung	90 %
U _{1%PD}	s =10 97 kV
	s =15 82 kV
Mittelwert	70,3 kV
Stand. abw.	9,9 kV
Öqualität	MW. Stand. 14 %
	abw.
min.	17,5
Öspaltweite max	21,0 mm
mittel.	18,6

Nr.	Stufen		Sequenz											
	20 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
11	340	200%												
10	320	190%												
9	305	180%												
8	285	170%												
7	270	160%												
6	255	150%												
5	240	140%												
4	220	130%												
3	205	120%												
2	185	110%												
1	170	100%												
0	150	90%												
0	135	80%	0.5											
0	125	73%	0.5											
0	105	62%	0.5											
0	95	55%	0.5											
0	60	35%	0.5											

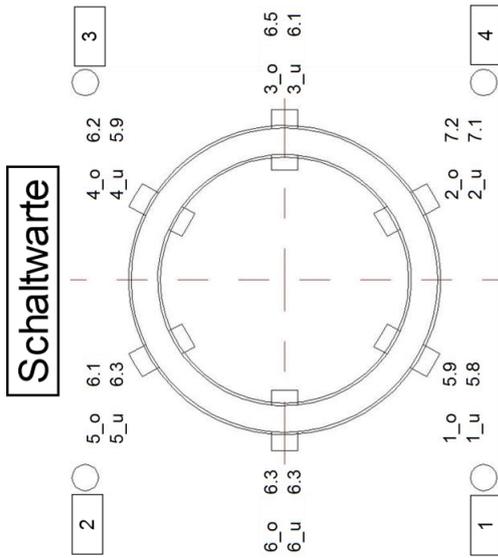
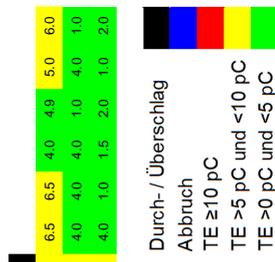
 Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC



Bemerkungen
Mit Kreppeinlage.

P023SE8	
Zeitraum	16. - 21.09.2015
rel. Luftfeuchte	32 %
T _{Luft}	23 °C
a _w	0,080
T _{öl}	23 °C
H ₂ O	4 ppm
Elektrode	1
	Stufe 4
	Sequenz 4
Durch- / Überschlag Spannung	150 kV
	130 %
U _{1%PD}	s =10 120 kV
	s =15 111 kV
Mittelwert	66,1 kV
BAUR Stand. abw.	7,9 kV
Öqualität MW. Stand. abw.	12 %
Ölspaltweite min.	5,8 mm
	max 7,2 mm
	mittel. 6,3 mm

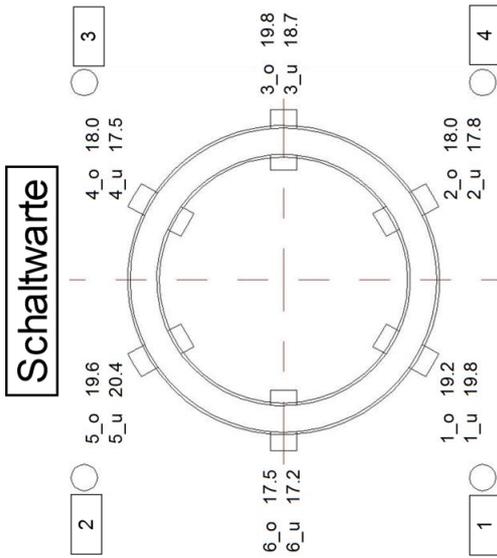
Stufen	Sequenz												
	Nr.	8 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	230	200%											
10	220	190%											
9	210	180%											
8	195	170%											
7	185	160%											
6	175	150%											
5	160	140%											
4	150	130%											
3	140	120%											
2	125	110%											
1	115	100%											
0	105	90%											
0	90	80%											
0	85	73%											
0	70	62%											
0	65	55%											
0	40	35%											



Bemerkungen
Mit Kreppeinlage.

P024NE20	
Zeitraum	22. - 23.09.2015
rel. Luftfeuchte	33 %
T _{Luft}	22 °C
a _w	0,094
T _{öl}	23 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	4
Durch- / Überschlag	Stufe 1
Spannung	Seqenz 5
U _{1%PD}	170 kV
U _{1%PD}	100 %
	s = 10 135 kV
	s = 15 118 kV
Mittelwert	63,2 kV
Stand. abw.	9,3 kV
Ölqualität	MW. Stand. 15 %
	abw.
Ölspaltweite	min. 17,2 mm
	max 20,4 mm
	mittel. 18,6 mm

Stufen	Sequenz												
	Nr.	20 mm KV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	340	200%											
10	320	190%											
9	305	180%											
8	285	170%											
7	270	160%											
6	255	150%											
5	240	140%											
4	220	130%											
3	205	120%											
2	185	110%											
1	170	100%											
0	150	90%											
0	135	80%											
0	125	73%											
0	105	62%											
0	95	55%											
0	60	35%											

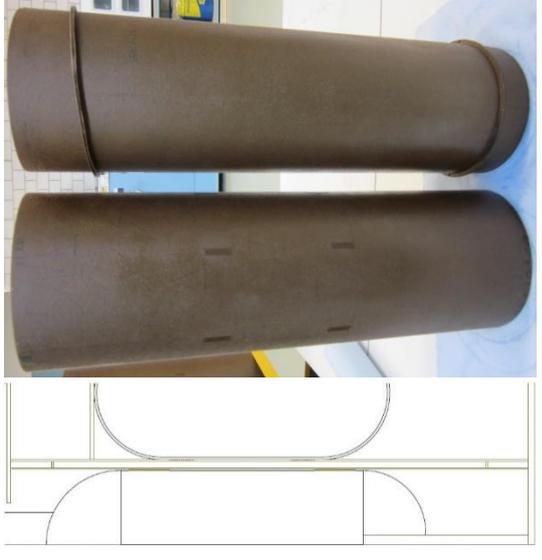
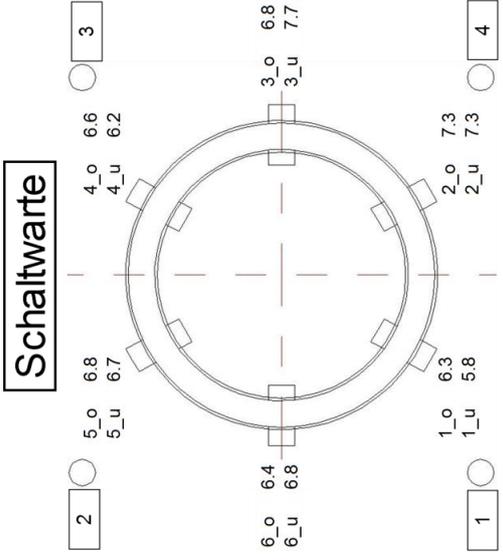


Bemerkungen	
Mit Krepppeinlage.	

P025NE8	
Zeitraum	24. - 29.09.2015
rel. Luftfeuchte	32 %
T _{Luft}	22 °C
a _w	0,086
T _{öl}	26 °C
H ₂ O	6 ppm
Elektrode	1
Durch- / Überschlag	Stufe 5
Spannung	160 kV
U _{1%PD}	s = 10 136 kV
	s = 15 126 kV
Mittelwert	80,0 kV
Stand. abw.	10,7 kV
Ölqualität	MW. Stand. 13 %
	abw.
Ölspaltweite	min. 5,8 mm
	max 7,7 mm
	mittel. 6,7 mm

Stufen	Sequenz												
	Nr.	8 mm kV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	230	200%											
10	220	190%											
9	210	180%											
8	195	170%											
7	185	160%											
6	175	150%											
5	160	140%	0,5	0,5	0,5	4,0	4,0	4,0					
4	150	130%	18,0	2,0	7,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0
3	140	120%	4,5	1,0	1,0	18,5	4,5	4,0	5,5	1,0	1,0	5,0	
2	125	110%	4,0	2,0	2,0	2,0	9,9	2,0	2,0	8,5	2,0	2,0	2,0
1	115	100%	11,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
0	105	90%	12,0										
0	90	80%	4,0										
0	85	73%	10,5										
0	70	62%	0,5										
0	65	55%	1,0										
0	40	35%	2,0										

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC

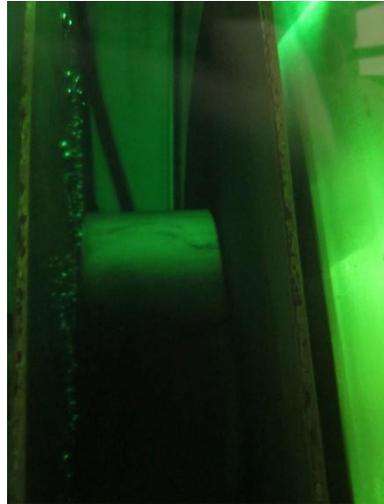
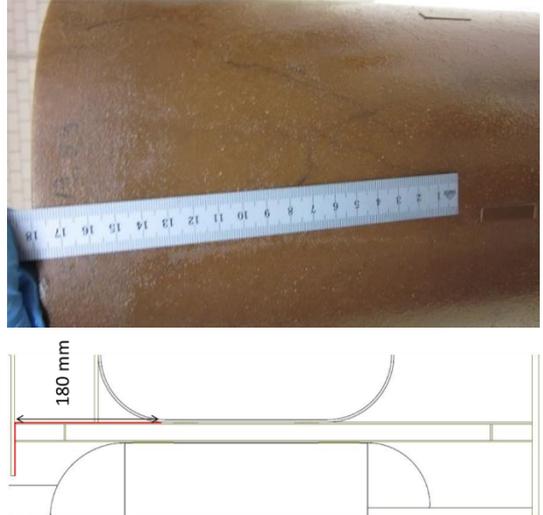
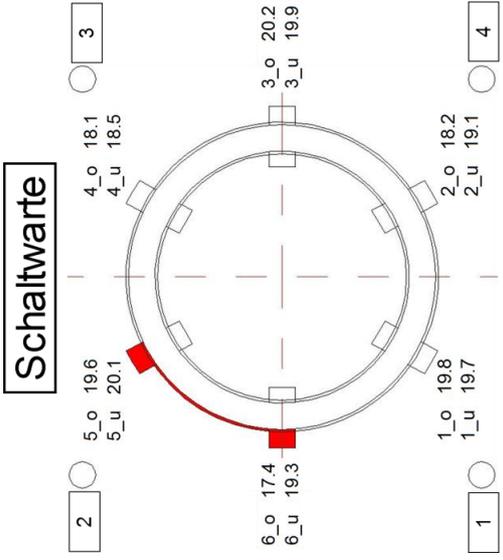


Bemerkungen
Mit Kreppeinlage.

P026NE20	
Zeitraum	29.09. - 01.10.2015
rel. Luftfeuchte	32 %
T _{Luft}	21 °C
a _w	0,093
T _{öl}	21 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	3
Durch- / Überschlag	Stufe 3
	Sequenz 3
	Spannung 205 kV
	120 %
U _{1%PD}	s = 10 165 kV
	s = 15 152 kV
Mittelwert	69,3 kV
Stand. abw.	14,6 kV
BAUR	
Öqualität	MW. Stand. 21 %
	abw.
Ölspaltweite	min. 17,4 mm
	max 20,2 mm
	mittel. 19,2 mm

Stufen	Sequenz										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Nr.	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
20 mm KV-Wert	340	320	305	285	270	255	240	220	205	185	170
%-Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%	100%
	1,5	3,5	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1
	9,0	5,0	1,5	0,5	0,1	0,5	3,5	0,1	0,1	0,1	0,1
	3,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	80%	73%	62%	55%	35%	1,0					
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	135	125	105	95	60						
	80%	73%	62%	55%	35%						

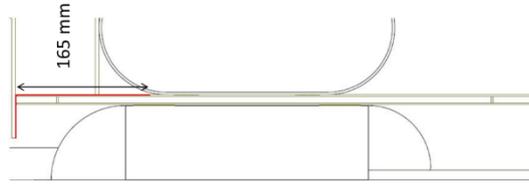
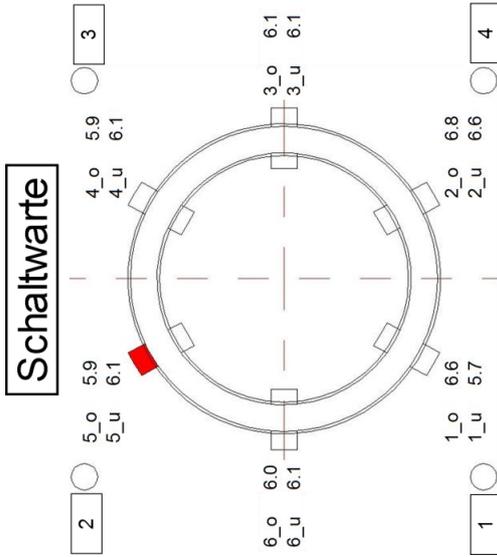
Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC



Bemerkungen	Mit Kreppeinlage.
-------------	-------------------

P027NE8	
Zeitraum	01. - 05.10.2015
rel. Luftfeuchte	33 %
T _{Luft}	21 °C
a _w	0,075
T _{Öl}	21 °C
H ₂ O	5 ppm
Elektrode	2
Durch- / Überschlag	Stufe 4
	Sequenz 4
	Spannung 150 kV
U _{1%} PD	130 %
	s = 10 124 kV
	s = 15 115 kV
Mittelwert	83,2 kV
Stand. abw.	12,7 kV
BAUR	
Öqualität	MW. Stand. 15 %
	abw.
Ölspaltweite	min. 5,7 mm
	max 6,8 mm
	mittel. 6,2 mm

Stufen	Sequenz												
	Nr.	8 mm kV-Wert	%-Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	230	200%											
10	220	190%											
9	210	180%											
8	195	170%											
7	185	160%											
6	175	150%											
5	160	140%											
4	150	130%	0,1	4,5	3,0								
3	140	120%	3,0	2,5	7,0	3,5	0,1	5,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	125	110%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	11,0	10,5	10,0	0,1	0,1	0,1
1	115	100%	3,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0	105	90%	3,5										
Durch- / Überschlag	0	90%	80%	4,5									
Abbruch	0	85%	73%	9,9									
TE ≥ 10 pC	0	70%	62%	1,0									
TE > 5 pC und < 10 pC	0	65%	55%	2,0									
TE > 0 pC und < 5 pC	0	40%	35%	3,5									

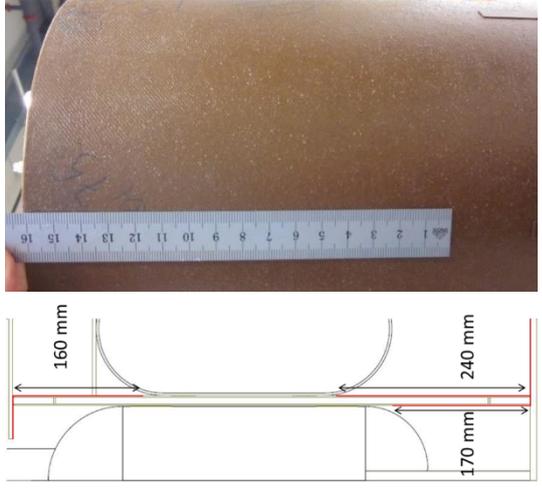
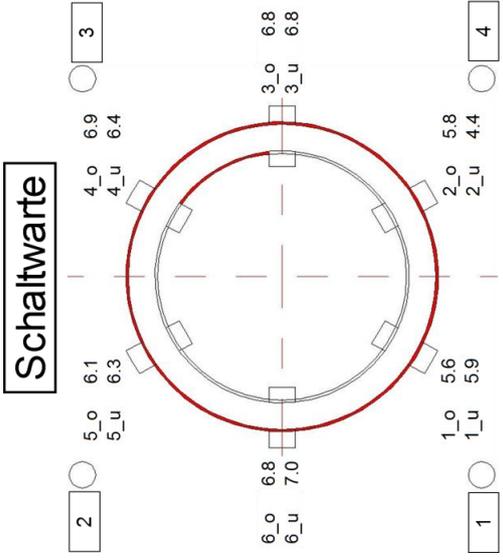


Bemerkungen	
Mit Kreppeinlage.	

P028NE8	
Zeitraum	05. - 07. 10. 2015
rel. Luftfeuchte	33 %
T _{Luft}	22 °C
a _w	0,084
T _{öl}	20 °C
H ₂ O	4 ppm
Elektrode	1
Durch- / Überschlag	Stufe 6
Spannung	175 kV
U _{1%PD}	150 %
	s = 10
	139 kV
	s = 15
	130 kV
Mittelwert	76,0 kV
Stand. abw.	9,3 kV
Ölqualität	MW. Stand. abw. 12 %
Ölspaltweite	min. 4,4 mm
	max. 7,0 mm
	mittel. 6,2 mm

Stufen	Sequenz									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr.	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
8 mm kV-Wert	230	220	210	195	185	175	160	150	140	130
%-Wert	200%	190%	180%	170%	160%	150%	140%	130%	120%	110%
	3,0	0,1	3,5	4,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	0,1	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	2,0	0,1
	9,0	4,0	6,0	6,0	0,1	0,1	4,5	0,1	0,1	0,1
	18,0	9,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	13,0	16,0	16,0	16,0	17,0	16,0	18,0	11,0	16,0	16,0
	0	105	90%	1,0						
	0	90	80%	0,1						
	0	85	73%	0,1						
	0	70	62%	0,1						
	0	65	55%	14,0						
	0	40	35%	0,1						

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥ 10 pC
 TE > 5 pC und < 10 pC
 TE > 0 pC und < 5 pC

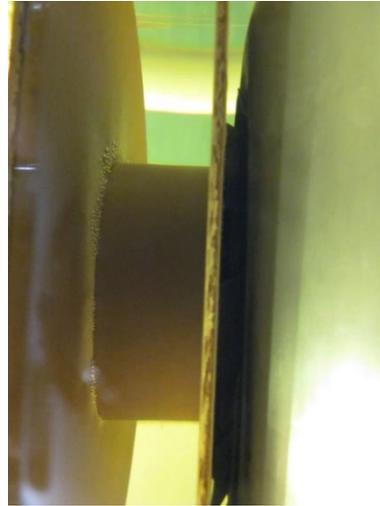
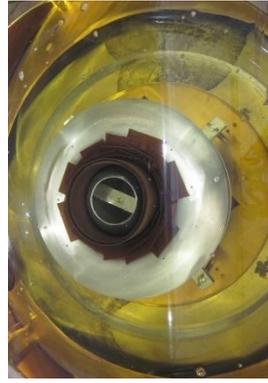
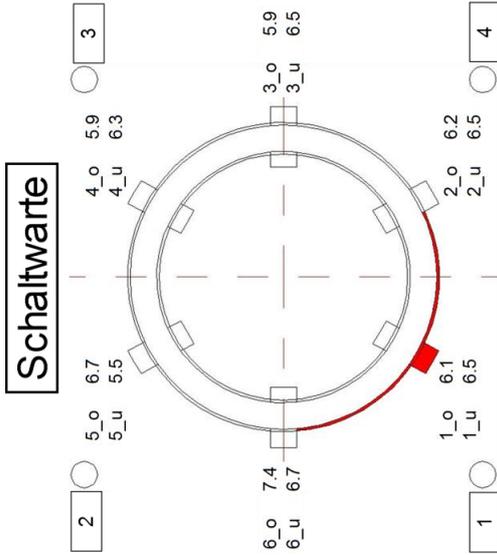


Bemerkungen	Mit Kreppleinlage.
-------------	--------------------

P029MO8	
Zeitraum	08. - 12.10.2015
rel. Luftfeuchte	32 %
T _{Luft}	23 °C
a _w	0,102
T _{öl}	25 °C
H ₂ O	7 ppm
Elektrode	2
Durch- / Überschlag	Stufe 7
U _{1%PD}	Sequenz 3
BAUR	Spannung 185 kV
Ölqualität	MW. Stand. abw. 15 %
Ölspaltweite	min. 5,5
	max 7,4
	mittel. 6,4

Stufen	Sequenz												
	Nr.	8 mm KV-Wert	%Wert	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	230	200%											
10	220	190%											
9	210	180%											
8	195	170%											
7	185	160%	0,10	6,00									
6	175	150%	0,10	0,10	4,00	0,10	7,00	1,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
5	160	140%	0,1	6,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	3,0	0,1
4	150	130%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	7,0	4,0	5,5	5,5	0,1	
3	140	120%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	125	110%	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1	115	100%	5,5	3,5	3,0	0,5	0,1	3,0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1
0	105	90%	3,5										
0	90	80%	3,5										
0	85	73%	0,1										
0	70	62%	1,0										
0	65	55%	3,5										
0	40	35%	0,5										

Durch- / Überschlag
 Abbruch
 TE ≥10 pC
 TE >5 pC und <10 pC
 TE >0 pC und <5 pC



Bemerkungen	Mit Kreppeinlage.
-------------	-------------------

Anhang C: Übersichtsdarstellung der Teilentladungen - chronologisch

