



**HOCHSCHULE OSNABRÜCK**

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Abschlussbericht HS 170131

„Untersuchung langer Isolierstrecken in geschichteten ölimprägnierten Isolierstoffen“, ein Forschungsprojekt, gefördert von der Röchling Stiftung in Mannheim

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger) .....	5
2	Stand des Wissens (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger).....	7
3	Gliederung des Forschungsvorhabens (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger) .....	8
4	Entwicklung einer geeigneten Prüfanordnung (Autor: Bittner).....	9
4.1	Voruntersuchungen .....	11
4.1.1	Prüfbehälter mit einfacher Prüfanordnung .....	12
4.1.2	Auswahl der Vorversuche .....	15
4.1.3	Feldstärkebereiche und Simulationsergebnisse .....	15
4.1.4	Untersuchung von Gleitentladungen auf der Öloberfläche .....	16
4.1.5	Untersuchung von Versuchsdurchschlägen im Prüfaufbau .....	21
4.1.6	Untersuchung des TE-Verhaltens vom HS-Schlauch und dem Anschluss.....	25
4.1.7	Ermittlung der Grenzfeldstärken in Luft und im Öl .....	29
4.1.8	Ergebnisse der Voruntersuchung .....	30
4.1.9	Abgeleitete Designregeln für den Prüfaufbau .....	31
4.2	Entwicklung und Aufbau der Prüfanordnung.....	32
4.2.1	Grundaufbau eines Prüfbehälters.....	32
4.2.2	Prüfanordnung .....	34
4.2.3	KP-Holzproben für Versuche.....	35
4.2.4	Innenleben des Prüfbehälters.....	36
4.2.5	Ablaufplan für die Entwicklung des Prüfaufbaus.....	39
4.2.6	Prüfaufbau unter Berücksichtigung der Designregeln.....	45
4.2.7	Simulationsmodell zur Ermittlung der Feldstärken.....	47
4.3	Hochspannungsuntersuchungen .....	52
4.3.1	Auswahl der Prüflinge und der Prüfelektroden .....	52
4.3.2	Teilentladungs- und Durchschlagsmeseinrichtungen.....	56
4.3.3	Ölaufbereitung und Ölqualitätsüberwachung.....	61
4.4	Vorbehandlung und Aufbereitung der Proben.....	62
4.4.1	Vorbereitung der Vorproben.....	62
4.4.2	Vorbereitung für papierisierte Prüfelektroden.....	62
4.4.3	Trocknung und Imprägnierung .....	64
4.5	Ergebnisse der Testszenarien .....	65
4.5.1	TE-Verhalten der Prüfanlage mit Prüfaufbau.....	65
4.5.2	Durchschlagsverhalten der ausgewählten Prüfkörper.....	66

---

5	Serienuntersuchungen an langen Isolierstrecken (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger)	68
5.1	Auswahl der Parameter für die Serienuntersuchungen .....	68
5.1.1	Abmessung und Isolierung der Elektroden .....	68
5.1.2	Materialsorte, Abmessungen und Anzahl der Proben.....	71
5.1.3	Versuchsprocedere .....	71
5.2	Versuchsergebnisse .....	74
6	Auswertung der Hochspannungsversuche (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger) ..	78
7	Zusammenfassung (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger) .....	81
8	Literatur .....	83

## Abschlussbericht

# „Untersuchung langer Isolierstrecken in geschichteten ölimprägnierten Isolierstoffen“, ein Forschungsprojekt, gefördert durch die Röchling Stiftung in Mannheim

### Kurzfassung

Im Bereich der Hochspannungsausleitung von ölgefüllten Leistungstransformatoren sind die geschichteten Isoliermaterialien, die für Druckringe in Transformatoren verwendet werden, auf deren Teilentladungs-, Gleitentladungs- und Durchschlagsverhalten zu erforschen. Insbesondere soll untersucht werden, ob die Materialien sich bei längeren Isolierstrecken anders verhalten, als bei kürzeren. Hierfür wird ein Versuchsaufbau entwickelt, der bis 400 kV Wechselspannung frei von Teilentladungen (TE) ist. Dies erfordert Voruntersuchungen an einem bestehenden Prüfaufbau. Anhand der Ergebnisse der Voruntersuchungen werden mit Hilfe eines 3D-Konstruktionsprogrammes, das direkt mit einem elektrischen Feldsimulator gekoppelt ist, die einzelnen Bauteile des Prüfaufbaus bezüglich der elektrischen Feldverhältnisse optimiert. Die Entwicklungsarbeiten befassen sich mit dem Prüfbehälter, dessen inneren Aufbau, der Form und den Materialien der Probekörper, mit geeigneten Prüfelektroden und dem Prüfablauf während der Versuchsdurchführung. In dem Prüfbehälter werden Versuchsproben eines speziellen Materials geprüft und die Ergebnisse ausgewertet.

### Schlüsselwörter:

Leistungstransformatoren, Anisotropes Kunstharzpressholz, Laminiertes Pressspan, Teilentladung, Oberflächenentladung, 400 kV - Prüfaufbau, Lange Isolierstrecken

## 1 Einleitung (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger)

Leistungstransformatoren werden in der elektrischen Energieversorgung eingesetzt, um eine verlustarme und wirtschaftliche Energieübertragung über weite Entfernungen zu ermöglichen. Sie werden zur Kühlung und zur Isolierung mit einem speziellen Isolieröl gefüllt. Neben dem Isolieröl kommen für verschiedene Anwendungen unterschiedliche feste Isoliermaterialien zum Einsatz. Derzeit sind bei der Planung und Fertigung von Leistungstransformatoren feste Isoliermaterialien wie z.B. Kunstharzpressholz (KP-Holz), Laminiertes Pressspan, Papier, Pressspan oder Faserstoffe aus Aramid (Nomex<sup>®</sup>) zu finden. Aus den genannten Materialien werden Winkelringe, Pressspanbarrieren, Druckringe, Stufenhölzer oder Befestigungsmaterialien hergestellt. Kunststoffe finden keine Verwendung, da sie für hohe Temperaturen, die stellenweise 90°C überschreiten können, nicht geeignet sind.

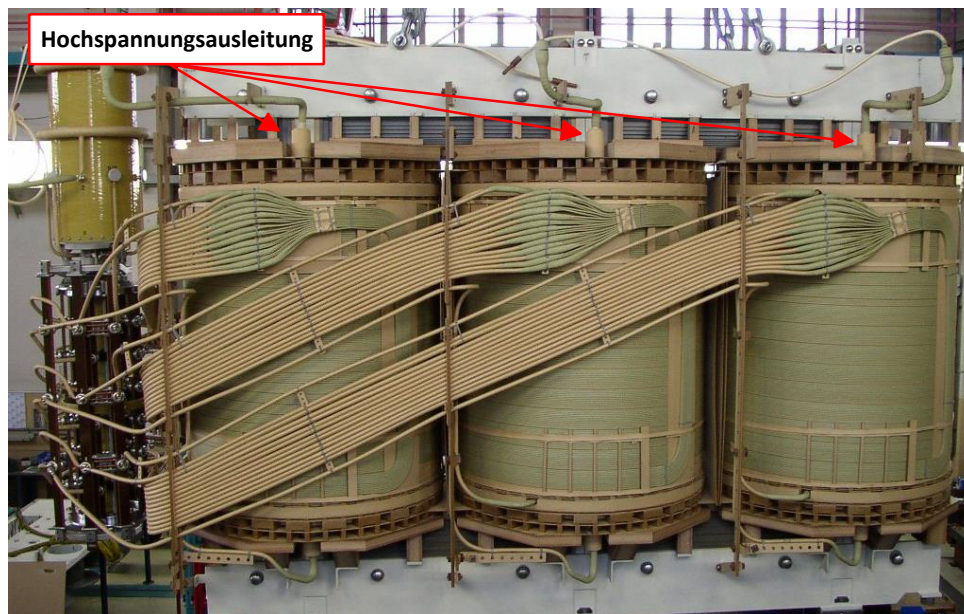
Die elektrischen, mechanischen und thermischen Anforderungen an die Isolierstoffe sind hoch und belasten sie über die gesamte Lebensdauer von 30...50 Jahren. Die Isoliermaterialien sollen eine möglichst niedrige relative Dielektrizitätszahl, hohe Durchschlagsfeldstärken und geringe Teilentladungen aufweisen.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit sind die geschichteten Isoliermaterialien KP-Holz und Laminiertes Pressspan. Diese Isoliermaterialien werden auf Basis von Zellulose hergestellt und mit Mineralöl imprägniert, um bei hohen Spannungen Teilentladungen aufgrund von Lufteinschlüssen zu vermeiden. Geschichtete Isoliermaterialien sind dadurch gekennzeichnet, dass sie gute mechanische und elektrische Eigenschaften vorweisen. Deshalb werden sie in Form von Druckringen oder als Drucksegmentketten zum Einspannen der Wicklungen in ölgefüllten Leistungstransformatoren verwendet.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Untersuchung langer Isolierstrecken in geschichteten ölprägnierten Isolierstoffen“ an der Hochschule Osnabrück, gefördert durch die Röchling Stiftung in Mannheim, sollen lange Isolierstrecken von geschichteten Isoliermaterialien auf deren Gleitentladungs- und Durchschlagsverhalten genauer untersucht werden. Lange Isolierstrecken sind in allen Leistungstransformatoren zu finden und bis zum heutigen Zeitpunkt noch unerforscht.

In dem geplanten Vorhaben wird speziell der Bereich der Hochspannungsausleitung betrachtet. An dieser Stelle verläuft der papierumwickelte Hochspannungsleiter durch eine Bohrung im Druckring hindurch. Zwischen der Bohrung und dem papierumwickelten Hochspannungsleiter befindet sich eine Ölstrecke, damit der Hochspannungsleiter nicht an den Außenrändern anliegt. Aufgrund dieser Anordnung und den unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen der festen und flüssigen Isoliermaterialien kommt es zum Effekt der Feldverdrängung. Das hohe elektrische Potenzial sorgt weiterhin für eine hohe elektrische Beanspruchung in den Isoliermaterialien und an deren Grenzschichten der Isoliermaterialien. Je nach Größe des Durchmesser des Druckrings und der Position der Bohrung für den Hochspannungsleiter ändert sich die Isolierstrecke zum geerdeten Transformatorkegel oder zum Eisenkern. Damit können sich je nach Anordnung im Bereich der Hochspannungsausleitung unterschiedliche Werte für die elektrische Feldstärke ergeben.

**Bild 1-1** zeigt den Bereich der Hochspannungsausleitung an dem Aktivteil eines Hochspannungsleistungstransformators. Da es in der Vergangenheit in diesem Bereich mehrfach zu unerklärlichen Zerstörungen des Druckrings im Bereich der Hochspannungsausleitung gekommen ist, ist das Interesse an Untersuchungen des Durchschlags- und Gleitentladungsverhaltens von geschichteten Isolierstoffen von besonderer Bedeutung. Kommt es zum Ausfall eines Leistungstransformators, ist bei einer Neuanschaffung mit erheblichen Lieferzeiten und Kosten zu rechnen.



**Bild 1-1** Aktivteil eines Leistungstransformators mit Kennzeichnung der Hochspannungsausleitung beim Druckring (Foto Siemens AG ETTR)

Entstehende Entladungskanäle sind im Material bzw. in der Nähe der Isolierstoffoberfläche zum umgebenden Mineralöl zu erwarten. Das **Bild 1-2** zeigt ein mit Mineralöl imprägniertes Drucksegment aus Blockspan, welches aus einem Leistungstransformator nach einem fehlerhaften Betrieb entnommen wurde.



**Bild 1-2** Typische Entladungsstrukturen an einem Drucksegment aus Blockspan (Foto Siemens AG ETTR)

## 2 Stand des Wissens (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger)

In den letzten 15 Jahren wurden im Labor für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik kontinuierlich Forschungsprojekte in Zusammenarbeit mit namhaften regionalen, nationalen und internationalen Herstellern von Isoliermaterialien durchgeführt. Die Arbeiten beschäftigten sich dabei überwiegend mit der Verbesserung und Neuentwicklung von Isolierstoffen. Speziell auf dem Gebiet der Isolierstoffe, die in ölgefüllten Transformatoren und Drosseln in der Hoch- und Höchstspannungsebene eingesetzt werden, hat die im Labor für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik tätige Arbeitsgruppe ein umfangreiches Wissen erworben. Zahlreiche Projekte erfolgten in Zusammenarbeit mit Herstellern von Isoliermaterialien, mit Transformatorenherstellern und im Verbund mit beiden. Weitere Forschungsprojekte wurden durch die Röchling-Stiftung GmbH gefördert und erfolgreich abgeschlossen.

Im Folgenden wird auf die bisherigen Untersuchungen eingegangen, die die Basis für weitergehende wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet des dielektrischen Verhaltens von Kunstharzpressholz bilden. Sie wurden alle im Labor für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der Hochschule Osnabrück durchgeführt. Eine ausführliche Literaturrecherche hat ergeben, dass es keine relevanten Veröffentlichungen von anderen Stellen gibt.

Das Teilentladungseinsatzverhalten von Kunstharzpressholz wurde bisher bei verschiedenen Unregelmäßigkeiten im Holz, wie z.B. Astlöcher, untersucht. Aus den Ergebnissen wurde eine Wahrscheinlichkeitsaussage für einen Teilentladungseinsatz bei einer bestimmten Feldstärkebeanspruchung senkrecht zur Schichtung abgeleitet [16]. Die Teilentladungseinsatzspannung parallel zur Schichtung wurde in [17] bestimmt.

Die Teilentladungseinsatzspannung von Kunstharzpressholz an einer typischen Gleitentladungsanordnung unter Öl bei verschiedenen Elektrodenabständen wurde in [2] untersucht. Die Spannungen für 1%- und 2%-TE-Einsatzwahrscheinlichkeiten wurden mit Hilfe der 3-parametrischen Weibull-Verteilung ermittelt. Unter Verwendung einer numerischen Berechnung des elektrostatischen Feldes erfolgte die Bestimmung der Feldstärkekomponenten an der Grenzschicht zwischen dem Kunstharzpressholz und dem umgebenden Mineralöl.

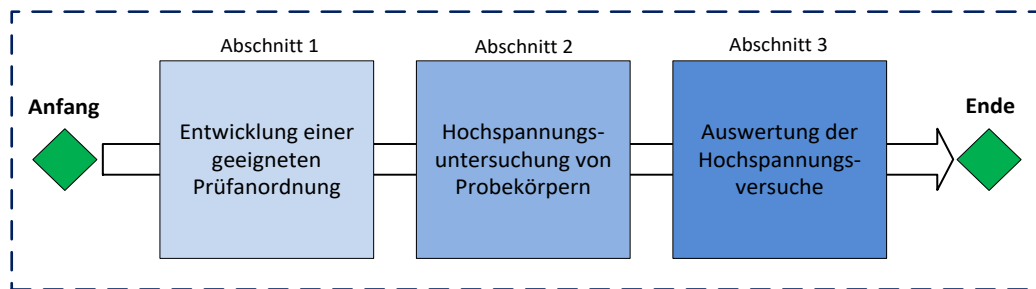
In [4] wurde erstmals der Einfluss des Materials und der Oberflächenbeschaffenheit, wie z.B. die Rauigkeit, auf den Gleitentladungseinsatz an Grenzflächen mit Mineralöl wissenschaftlich untersucht. Der Beitrag enthält erste wertvolle Hinweise auf Möglichkeiten zur Beeinflussung der dielektrischen Eigenschaften von Kunstharzpressholz. Diese ersten Erkenntnisse müssen noch statistisch weiter erhärtet werden. Auch sind zur Übertragung der Erkenntnisse auf reale Anordnungen Untersuchungen mit deutlich höheren Spannungen, als in [4] verwendet, notwendig.

Mit dem Einfluss der Normal- und Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke auf den Gleitentladungseinsatz an Grenzflächen KP-Holz/Öl und Nomex/Öl beschäftigt sich [18]. In diesem Bericht werden erstmals Daten für maximale Designfeldstärken angegeben, die allerdings noch bei realistischeren Versuchsanordnungen mit höheren Spannungen bestätigt werden müssen. Die Untersuchung zeigte weiter, dass das gesamte Entladungsverhalten stark von den Verhältnissen an der Grenzfläche zwischen dem Kunstharzpressholz und dem umgebenden Öl abhängt.

Eine weitere Veröffentlichung trägt den Titel „The Anisotropic Dielectric Constant of Oil-Impregnated, Laminated Compressed Wood and the Effect on the Electric Field Distribution“ [6] und beschäftigt sich mit der Anisotropie der Dielektrizitätszahl von Kunstharzpressholz. Sie entsteht durch unterschiedliche Dielektrizitätszahlen längs und quer zu den Holzfasern. Die Anisotropie beeinflusst die elektrische Feldstärkeverteilung im Kunstharzpressholz.

### 3 Gliederung des Forschungsvorhabens (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger)

Das gesamte Vorhaben gliedert sich in drei Abschnitte, die in **Bild 3-1** dargestellt sind.



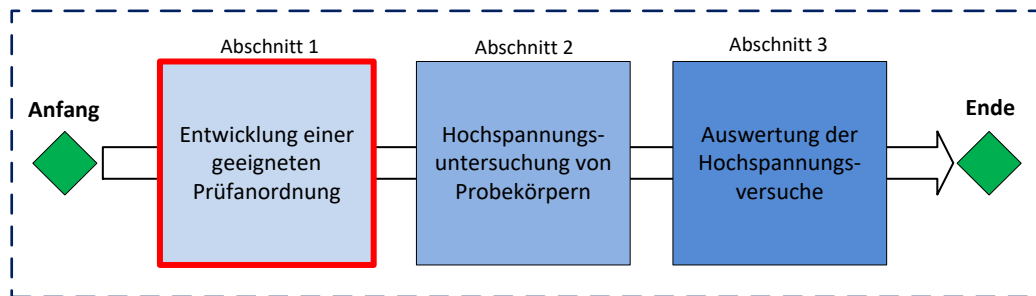
**Bild 3-1** Notwendige Arbeitsschritte zur Durchführung des Forschungsprojektes

Im ersten Abschnitt ist die Zielsetzung, eine geeignete Prüfanordnung für die Untersuchung des dielektrischen Verhaltens von langen Isolierstrecken in Kunstharzpressholz zu entwickeln und zu realisieren. In dem zweiten Abschnitt werden dann die Hochspannungsuntersuchungen an geeigneten Probekörpern mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Im dritten Abschnitt erfolgt die Auswertung der Hochspannungsuntersuchungen.



#### 4 Entwicklung einer geeigneten Prüfanordnung (Autor: Bittner)

Die Entwicklungsarbeiten und die Realisierung einer geeigneten Prüfanordnung sind Bestandteil des ersten Projektabschnitts, siehe **Bild 4-1**.



**Bild 4-1** Übersicht über die Projektabschnitte. In diesem Kapitel werden die Arbeiten im Rahmen des Abschnittes 1 „Entwicklung einer geeigneten Prüfanordnung“ beschrieben.

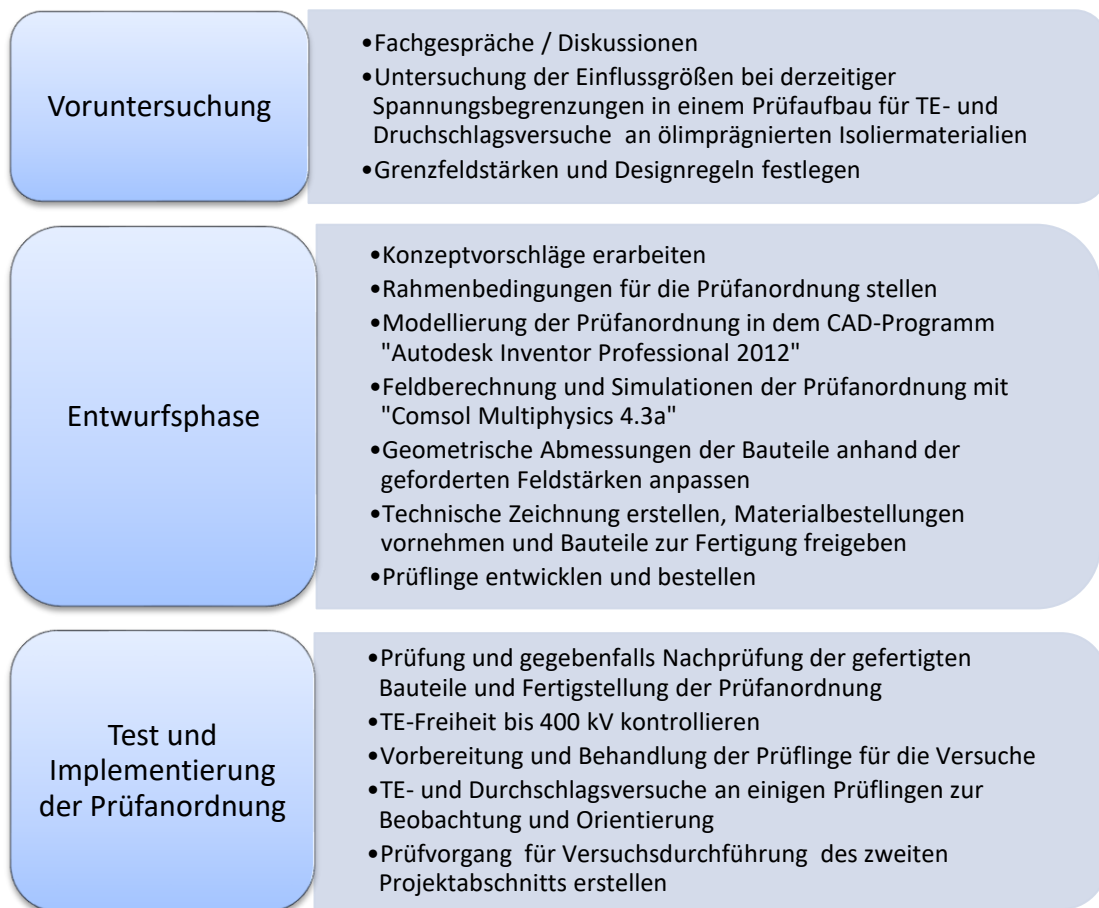
Im Labor für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik existieren teilentladungsfreie Prüfaufbauten zur kommerziellen Untersuchung von Isolierstoffen bis zu einer Wechselspannung von 250 kV. Zur Untersuchung längerer Isolierstrecken, d.h. bis zu 100 mm Länge, muss die maximale Prüfspannung auf mindestens 350 kV, besser jedoch 400 kV erhöht werden. Zur Erreichung dieses Ziels müssen umfangreiche 3D-Feldberechnungen im Bereich der Spannungseinführungen und am Innenleben des Versuchsaufbaus zur optimalen Feldsteuerung vorgenommen werden. Eine Verifizierung der berechneten Feldsteuerungen und ihrer tatsächlichen Wirkungen ist anhand von Voruntersuchungen am bestehenden Prüfbehälter durchzuführen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sind Rahmenbedingungen abzuleiten, die bei dem Entwurf des neuen Prüfaufbaus berücksichtigt werden müssen.

Gleichzeitig ist für den neuen Prüfaufbau das Design des Innenlebens für die Untersuchung von langen Isolierstrecken im Bereich der Hochspannungsausleitung zu gestalten. Parallel zu diesen Aufgaben sind durch 3D-Feldberechnungen geeignete Prüfkörper und Prüfelektroden zu verwirklichen. Unterstützt wird die Auswahl der Prüflinge mit einer parallellaufenden Arbeit [1]. Über 2D- und 3D-Simulationen wird der Ausschnitt des Prüfbereichs mit Probekörpern aus KP-Holz nachgebildet.

Nach der Entwurfsphase ist der Prüfaufbau fertigzustellen. Die einzelnen Komponenten des Prüfaufbaus werden größtenteils in der Betriebswerkstatt der Hochschule Osnabrück gefertigt.

Bei einer erfolgreichen Implementierung des Prüfaufbaus sind Durchschlagsuntersuchungen an einigen Vorproben durchzuführen. Die Ergebnisse der Durchschlagsuntersuchungen dienen nur der Orientierung für die fortlaufenden Untersuchungen. Im Wesentlichen soll die Ausführung der Prüfung beobachtet werden, um damit einen möglichen Prüfvorgang für die Serienuntersuchungen im zweiten Projektabschnitt vorzustellen. Zukünftigen Bachelor- oder Masterarbeiten soll damit ein Einstieg erleichtert werden.

Einige wichtige Aufgaben des Projektabschnitts sind der **Bild 4-2** zu entnehmen.



**Bild 4-2** Übersicht über die Teilaufgaben des Projektabschnittes 1

#### 4.1 Voruntersuchungen

In den Voruntersuchungen werden an einem realen Prüfaufbau für kommerzielle Materialprüfungen unterschiedliche Maßnahmen am Aufbau unternommen, um die Einsatzspannung der Prüfanordnung zu erhöhen. Dabei wird vor Beginn der Prüfungen die Änderung anhand der Simulationen auf mögliche Feldstärkeänderungen untersucht. Die Erkenntnisse der Vorversuche dienen der Neuentwicklung eines teilentladungsfreien Prüfbehälters für 400 kV.

Mit dem Einfachprüfbehälter können derzeit problemlos TE-Untersuchungen bis 250 kV durchgeführt werden. Bei höheren Spannungen kommt es zu Gleitentladungserscheinungen auf der Öloberfläche, welche eine freie TE-Messung der Isoliermaterialien beeinträchtigen. Schlimmstenfalls kann es zu einer vollständigen Entladung und damit zu einer Zerstörung des Prüfbehälters kommen. Versuche bei unverändertem Prüfaufbau und ausreichendem Elektrodenabstand haben gezeigt, dass unter Berücksichtigung von ausreichenden Ruhezeiten die Einsatzspannung der Gleitentladung des Öls bei ca. 320 kV liegt. Die **Bild 4-3** zeigt Gleitentladungen auf der Öloberfläche während eines Versuchs. Eine Möglichkeit, die Gleitentladung bei der Spannungseinführung zu unterbinden, wird in [15] vorgestellt. Dabei ist als Lösungsansatz vorgeschlagen worden, eine ringförmige Schutzringelektrode um den Hochspannungsrüssel zu positionieren, die zur Hälfte im Mineralöl eingetaucht ist. Bevor mit der Entwurfsphase begonnen werden kann, ist zu überprüfen, ob es praktisch umsetzbare Alternativen dazu gibt.

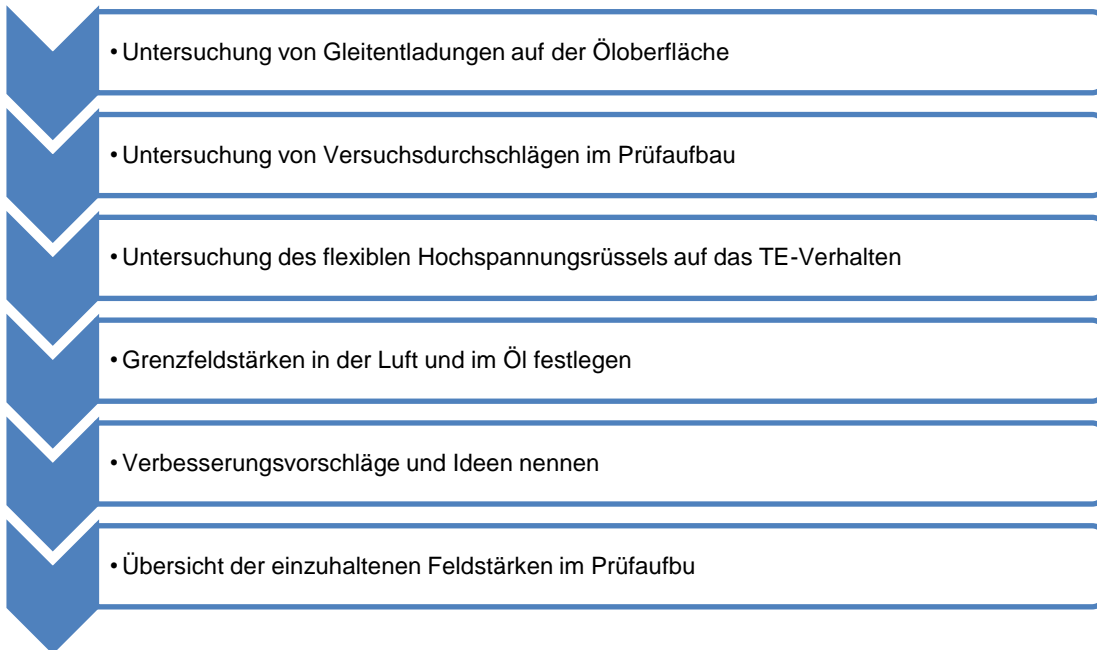


**Bild 4-3** Gleitentladungsbeobachtungen auf der Öloberfläche

Neben den Gleitentladungen sind Versuchsdurchschläge im Öl zu untersuchen, um auf kritische Feldstärkebereiche schließen zu können. Des Weiteren sollte die momentan vorhandene Hochspannungszuleitung auf das TE-Verhalten bei hohen Spannungen geprüft werden. Am Ende der Voruntersuchungen sind Grenzfeldstärken in der Luft und im Öl festzulegen. Aus den gesammelten Erkenntnissen der Vorstudie werden Designregeln abgeleitet, welche bei der Modellierung eines neuen Prüfaufbaus zu berücksichtigen sind. Am Ende des Kapitels ist

eine Übersicht der einzuhaltenden Feldstärken in verschiedenen Bereichen eines Prüfaufbaus zu finden.

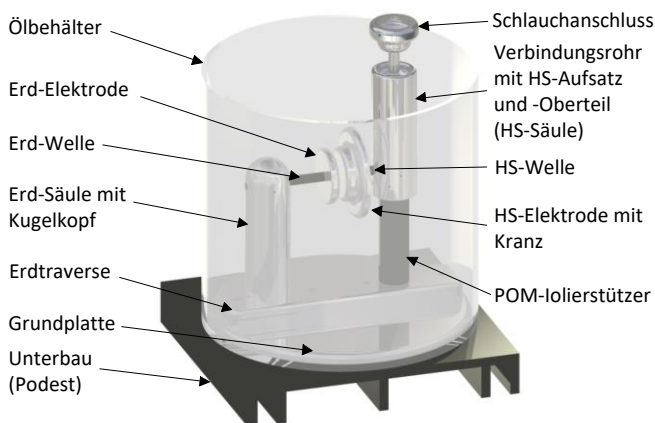
Die Untersuchungsarten und Ziele sind in der **Bild 4-4** dargestellt.



**Bild 4-4** Untersuchungsarten und Ziele der Voruntersuchung

#### 4.1.1 Prüfbehälter mit einfacher Prüfanordnung

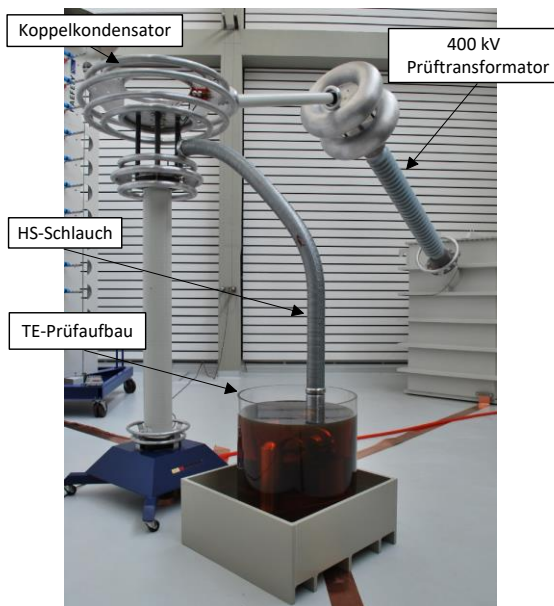
Der Prüfaufbau ist speziell für TE-Untersuchungen an quaderförmigen Probenkörper konzipiert worden. Die Isolierstoffprüfungen erfolgen nach der Norm IEC 60243-1. Das **Bild 4-5** zeigt den Prüfaufbau ohne Ölauffangwanne und Hochspannungszuleitung und deren Bezeichnungen.



**Bild 4-5** Prüfbehälter mit einfacher Prüfanordnung ohne Ölauffangwanne und Hochspannungszuleitung

Grundsätzlich besteht der Prüfaufbau mit einem runden Behälter aus PLEXI-Glas mit den darin befindlichen Elektroden. Die Hochspannungselektrode besitzt zur Feldsteuerung einen Kranz. Damit kann der Verlauf der Äquipotenziallinien gesteuert und Feldstärkeüberhöhung am Tripelpunkt der Spannungseinführung ins Öl vermieden werden. Der Prüfaufbau wird mit einem flexiblen Aluminium-Schlauch (Durchmesser ca. 116 mm) mit dem Hochspannungspotenzial verbunden. Das Erdpotenzial wird von unten in den Prüfbehälter geführt und an der Grundplatte befestigt.

Vor der Prüfung wird der Prüfbehälter mit dem aufbereiteten Mineralöl gefüllt. Der vollständige Prüfaufbau für die TE-Messung ist in der **Bild 4-6** zu sehen.



**Bild 4-6** Vollständige Prüfanordnung für TE-Messung mit den Betriebsmitteln der Hochschule Osnabrück

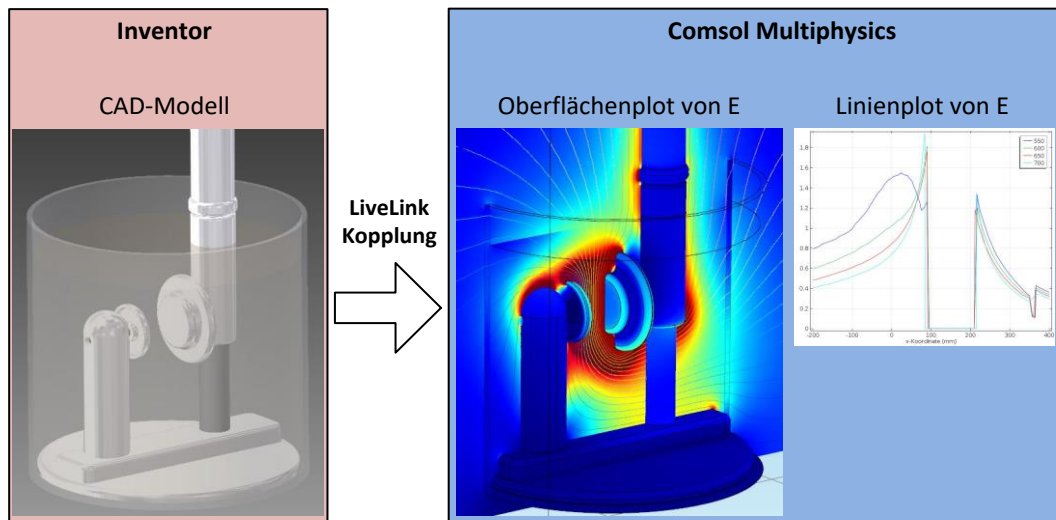
#### 4.1.1.1 Modellierung und Simulation

Der Prüfaufbau wurde vor der Fertigstellung mit einem CAD-Programm in 3D entworfen. Alle Bauteile stehen im Laborbereich als CAD-Datei zur Verfügung und können mit Autodesk Inventor Professional 2012 angezeigt und verändert werden. Über die Schnittstelle „LiveLink“ von Comsol Multiphysics kann die vollständige Baugruppe von Inventor in die Simulationssoftware Comsol überführt werden. Nach der physikalischen Beschreibung und der Vernetzung der Geometrie kann mit der Feldberechnung begonnen werden. Aufgrund der Vernetzungsschwierigkeiten in dem originalen 3D-Modell wurde zu Beginn ein vereinfachtes Modell verwendet. Dabei wurden Bohrungslöcher und Gewindgänge vernachlässigt. Ebenso wurden die Zylinderschrauben oder Gewindestifte zur Befestigung der Bauteile nicht berücksichtigt. Die benötigten relativen Dielektrizitätszahlen für die Feldberechnung sind in der **Tabelle 4-1** dargestellt.

**Tabelle 4-1** Relative Dielektrizitätszahlen der Materialien für die Simulation

Material	Relative Dielektrizitätszahl
Mineralöl	$\epsilon_{r \text{ Öl}} = 2,3$
Luft	$\epsilon_{r \text{ Luft}} = 1,0$
POM-C, PP	$\epsilon_{r \text{ POM}} = 3,8$

In der Simulation werden für die Spannungswerte  $U_{Sim}$  die Ereigniseinsatzspannung  $U_{Ereignis}$  eingegeben. Anhand von Oberflächen- und Liniendiagrammen des Betrags der elektrischen Feldstärke  $E$  können die Feldverhältnisse am 3D-Modell analysiert werden, siehe **Bild 4-7**.



**Bild 4-7** LiveLink-Kopplung des 3D-Modells von dem Prüfaufbau aus Inventor zur Ermittlung der Feldstärken in Comsol

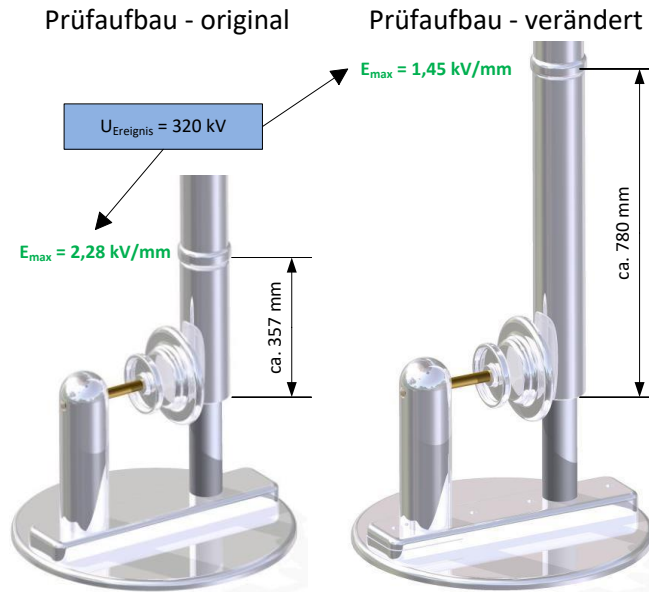
#### 4.1.1.2 Änderungen am Prüfaufbau

Vor den praktischen Untersuchungen werden anhand von Feldberechnungen verschiedene Änderungen am 3D-Modell vorgenommen. Das Hauptproblem der Gleitladung auf der Öloberfläche galt es anfangs zu lösen. Dabei sollten folgende Maßnahmen auf deren Feldstärkenwerte im Bereich des Tripelpunkts und am Schlauchanschluss betrachtet werden:

- Position der Hochspannungselektrode
- Position der Erdelektrode
- Position des kompletten Elektrodenpaars
- Ölfüllstand

Aus den Ergebnissen der Feldberechnungen wird im unveränderten Prüfaufbau die Feldstärke am Tripelpunkt durch das Erhöhen des Ölfüllstands am deutlichsten beeinflusst. Durch das Entfernen der Hochspannungselektrode von der HS-Säule können die günstigsten Feldstärken am Schlauchanschluss erzielt werden.

Da es jedoch während der Prüfungen zu neuen Erkenntnissen bezüglich der Gleitladungen auf der Öloberfläche gekommen ist, konnten die oben genannten Änderungen nicht experimentell verifiziert werden. Im Wesentlichen wurde die Höhe des Schlauchanschlusses über ein längeres Verbindungsrohr verändert, siehe **Bild 4-8**. Dadurch reduziert sich die Feldstärke von 2,28 kV/mm bei einer Spannung von 320 kV am Schlauchanschluss um etwa 36 %. Damit liegt der Wert unterhalb der Feldstärke von etwa 1,70 kV/mm am Tripelpunkt.



**Bild 4-8** Prüfaufbau-Innenleben im originalen und im veränderten Zustand mit dem Feldstärkewert am Schlauchanschlusspunkt bei  $U_{\text{Ereignis}} = 320 \text{ kV}$

#### 4.1.2 Auswahl der Vorversuche

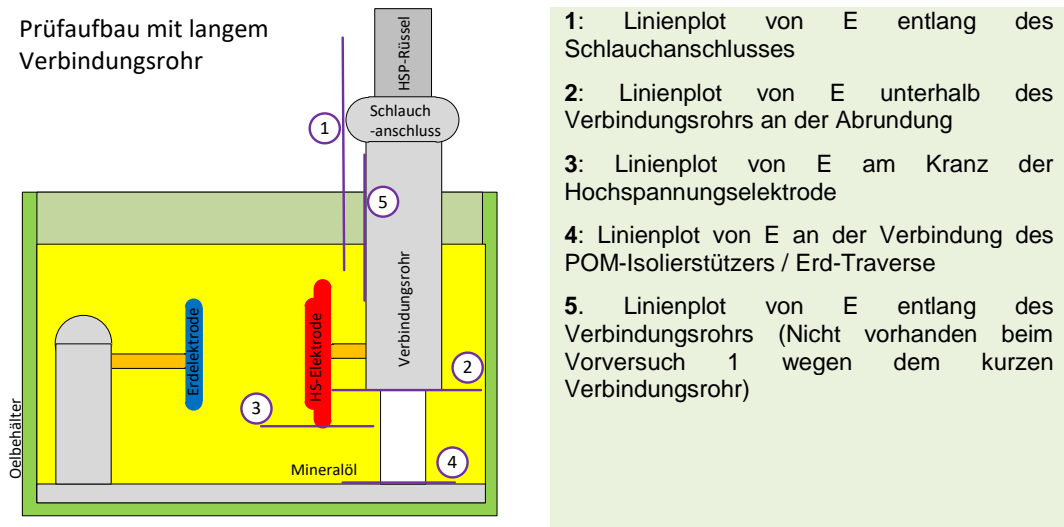
Bei der Auswertung der Versuche werden nur die Untersuchungen berücksichtigt, bei denen es zu keiner eindeutigen Überlagerung mehrerer Teilentladungsquellen gekommen ist wie z.B. mit Hohlraumentladungen. Des Weiteren muss der Entladungsvorgang in der Luft oder im Öl anhand der Videoaufnahmen erkennbar sein, damit die Feldstärkewerte in den Bereichen ermittelt werden können. Wegen des zeitlichen Aufwands der Versuchsdurchführungen stehen für die Auswertung folgende Vorversuche zur Auswahl.

**Tabelle 4-2** Auswahl der Vorversuche

Vorversuch	$U_{\text{Ereignis}}$	Beschreibung	Abk.
1	350 kV	Gleitentladung und Versuchsdurchschlag um den Ölbehälter in Luft mit kurzem Verbindungsrohr	GD-Luft
2	380 kV	Teil.- bzw. Koronaentladungen am Schlauchanschluss mit langem Verbindungsrohr	TE-Korona
3	330 kV	Versuchsdurchschlag im Öl und Überschlag am POM-Isolierstützer mit langem Verbindungsrohr	DÜ-Öl

#### 4.1.3 Feldstärkebereiche und Simulationsergebnisse

Anhand der Ereignisse sind folgende Feldstärkebereiche nach der Untersuchung ausgewertet worden.



**Bild 4-9** Feldstärkebereiche anhand der Ereignisse der Vorversuche

Einen Überblick der maximalen Feldstärken  $E_{\max}$  für die Bereiche aus den Vorversuchen liefert die folgende **Tabelle 4-3**.

**Tabelle 4-3**  $E_{\max}$  aus den Feldstärkebereichen

Maximale Feldstärken $E_{\max}$ in kV/mm aus den Vorversuchen			
	Feldstärke in Luft		
	Feldstärke im Öl		
Liniplot	1. GD-Luft	2. TE- Korona	3. DÜ-Öl
1	2,2	1,64	1,47
2	9,2	9,6	8,5
3	10,2	11,0	9,9
4	2,18	2,7	2,25
5	-	1,7	1,67

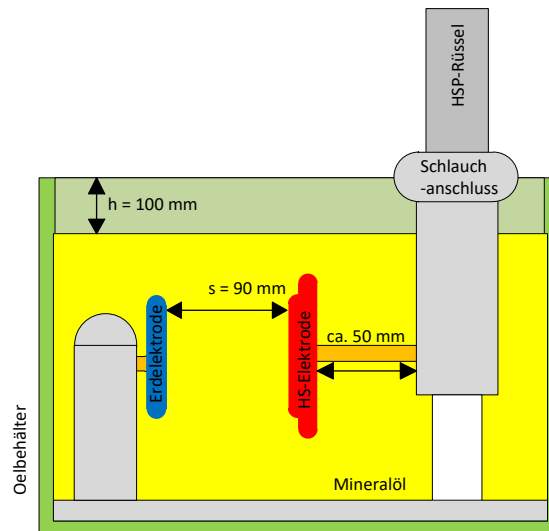
Die maximalen Feldstärken in der Luft sind im Bereich des Schlauchanschlusses und entlang des Verbindungsrohrs zu finden. Im Öl sind hohe Feldstärken an der Abrundung der HS-Säule und am Kranz der HS-Elektrode zu finden.

#### 4.1.4 Untersuchung von Gleitentladungen auf der Öloberfläche

##### 4.1.4.1 Versuchsaufbau und Prüfvorgang

Mit einem Isolierabstand von  $s = 90$  mm können Durchschläge zwischen den Elektroden vermieden werden. Die Erdelektrode ist nach Möglichkeit in der Nähe der Erd-Säule zu platzieren, um Feldüberhöhungen auf der Halbkugel der Erd-Säule zu vermeiden. Ebenso sollte sich die HS-Elektrode nicht direkt an der Hochspannungsseite befinden. Mit zunehmender Entfernung von der Hochspannungsseite nimmt die Feldstärke an der Abrundung des Schlauchanschlusses und am Tripelpunkt ab.



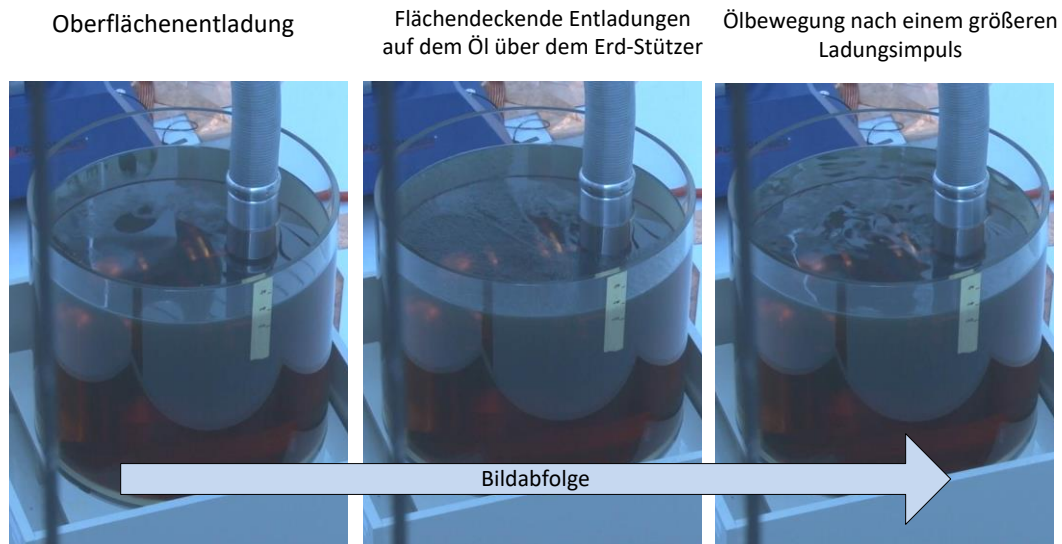


**Bild 4-10** Prüfaufbau - Vorversuch 1

Beim Prüfvorgang wird die Spannung rampenförmig auf 200 kV erhöht. Anschließend erhöht sich die Spannung bis zum Ereignis schrittweise um 10 kV im 20-Sekundentakt.

#### 4.1.4.2 Experimentelle Beobachtung

Während der Spannungserhöhung konnten folgende Beobachtungen gemacht werden: Zwischen den Spannungen 280 kV - 300 kV sind Oberflächenentladungen auf dem Öl zu sehen, welche sich bei anstehender Spannung flächendeckend ausgebreitet haben. Teilweise sind starke Vorentladungen über den kompletten Bereich der Erd-Säule zu sehen. Nach einem größeren Ladungsimpuls folgten massive Wellenbewegungen auf der Öloberfläche.



**Bild 4-11** Bildabfolge - Entladungsablauf auf der Öloberfläche

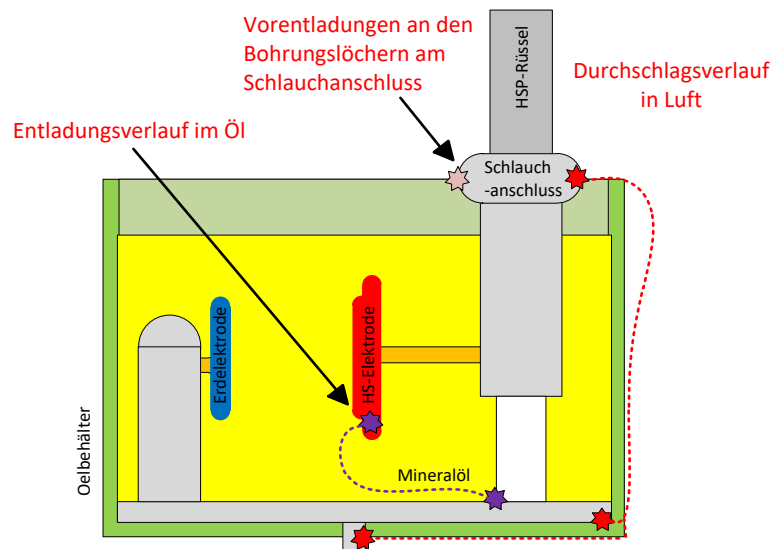
Bei Erhöhung der Spannung von 350 kV auf 360 kV ist es zu einem vollständigen Entladungsvorgang in der Luft mit einer zerstörerischen Wirkung auf den Prüfaufbau gekommen.



**Bild 4-12** Bildabfolge Entladungsvorgang in Luft vom Schlauchanschluss

Der Entladungskanal breitet sich vom Schlauchanschluss entlang der Außenseite des Prüfbehälters zum Erdpotenzial aus. Dabei ist der Lichtbogen durch die Klebeschicht am Prüfbehälterboden entlang zur Grundplatte verlaufen. Ebenso ist unter dem Prüfbehälter auf dem Podest eine Brandspur in Richtung der Erdschraube zu erkennen. Ebenfalls ist an einer Aufnahme zu sehen, dass sich ein Entladungskanal von der HS-Elektrode bogenförmig in Richtung des Isolierstützers aus POM bewegt.

Der Entladungsverlauf ist in **Bild 4-12** schematisch dargestellt.



**Bild 4-13** Nachgebildeter Entladungsverlauf des Durchschlags in Luft und im Öl

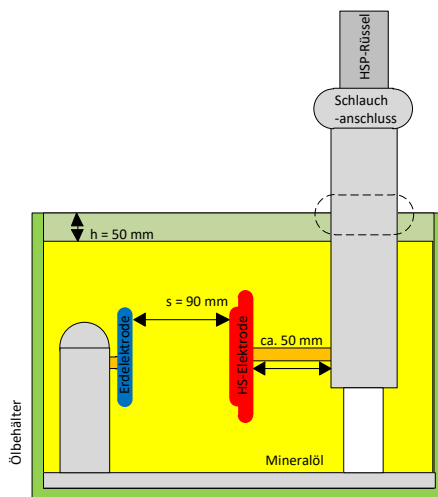
Der eindeutige Entladungsverlauf kann aufgrund mehrerer Möglichkeiten (Brandspuren am Prüfaufbau) nicht eindeutig festgestellt werden.

#### 4.1.4.3 Ursachen für Entladungsvorgänge in Luft

Nach einer genaueren Betrachtung des Schlauchanschlusses in den Videoaufnahmen ist zu erkennen, dass die Kanten der Bohrungslöcher die Ursache für die Entladungen auf der Öloberfläche sein könnten. Durch diese Vorentladungen (**Bild 4-17**) wird die Öloberfläche in Bewegung gebracht.

Um Gleitentladungen auf der Öloberfläche sowie eine vollständige Entladung in Luft zu vermeiden, können zur Feldreduzierung konstruktive Maßnahmen am Schlauchanschluss vorgenommen werden. Für die prinzipielle Untersuchung wird alternativ der Schlauchanschluss über ein längeres Verbindungsstück nach oben versetzt. Der grundsätzliche Einfluss auf die Feldverteilung im Bereich des Anschlusses ist in [19] näher untersucht. Bei Berücksichtigung der Schlauchanschlussbohrungen in der Simulation verringern sich die Feldstärken bei der Ereignisseinsatzspannung vom Vorversuch 1 um etwa 30 % auf 1,51 kV/mm.

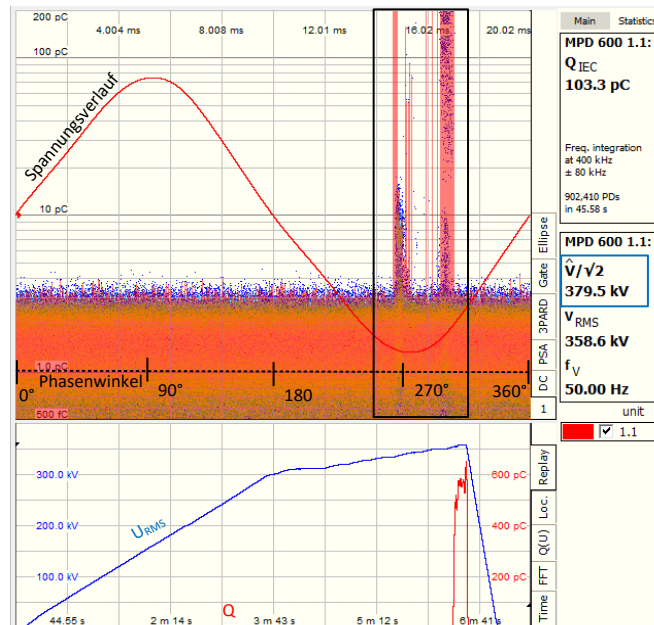
Da zum Zeitpunkt der Untersuchung die Erkenntnisse des Entladungsvorgangs in der Luft nicht vorlagen, wurde der Tripelpunkt als Ursache vermutet. Aus diesem Grund wurde der Öfüllstand um 50 mm erhöht, um dadurch die Feldstärke am Tripelpunkt zu reduzieren. Die Prüfanordnung zur Vermeidung von Gleitentladungen stellt der Vorversuch 2 „TE - Korona“ dar.



**Bild 4-14** Prüfaufbau - Vorversuch 2

Bei mehreren Prüfvorgängen wird die Spannung rampenförmig auf 200, 250 und 300 kV erhöht. Anschließend erhöht sich die Spannung schrittweise nach 20 Sekunden um 10 kV.

Mit der Änderung des Hochsetzens des Schlauchanschlusses wurde die TE-Einsatzspannung von ca. 300 kV auf 380 kV erhöht. Bei dieser Spannungshöhe kommt es sprunghaft zu Teilentladungen mit Ladungsmengen in der Größe von etwa 600 pC. Das dazugehörige TE-Verhalten ähnelt dem TE-Muster von „Korona auf Hochspannungspotenzial“ [19]. Dabei finden die Teilentladungen im Bereich des Prüfspannungswinkels von 270° statt und sind nahezu von gleicher Ladungsamplitude.



**Bild 4-15** TE-Aufnahme vom Vorversuch 2 mit ausgeprägten Hinweisen auf „Koronaentladungen auf Hochspannungspotenzial“

Gleitentladungen auf der Öloberfläche sind bei der Prüfung nicht aufgetreten. Im Prüfaufbau ist während der Versuchsdurchführung zu beobachten, dass um die Hochspannungszuleitung die Öloberfläche mit zunehmender Spannung verzerrt wird (**Bild 4-16**).

U = 200...300 kV

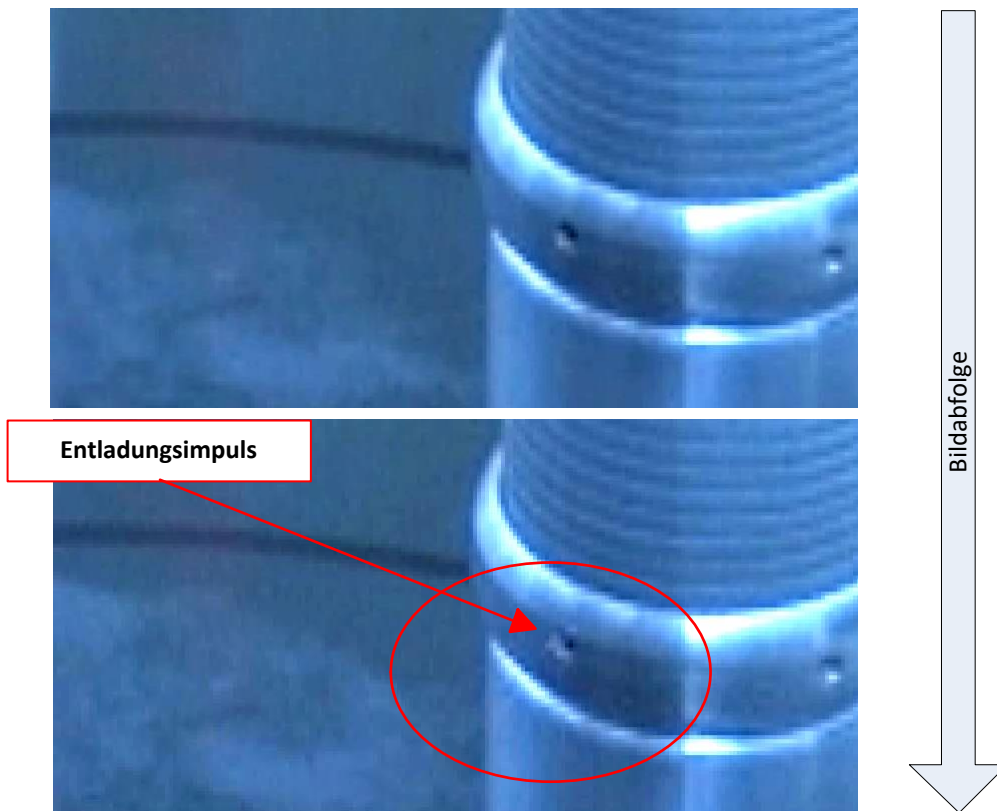
U > 300 kV

U = 0 kV



**Bild 4-16** Bildabfolge – Oberflächenspannungen auf dem Öl

Mit dieser Untersuchung konnte bestätigt werden, dass der Tripelpunkt nicht die Ursache für Gleitentladungserscheinungen auf der Öloberfläche ist. Aus den Simulationen konnte an den Bohrungen des Schlauchanschlusses eine TE-Ereigniseinsatzfeldstärke von 2,3 kV/mm bei einer Spannung von 380 kV ermittelt werden.



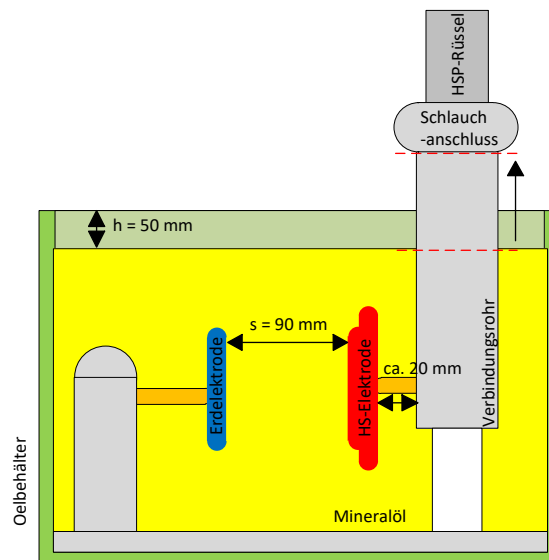
**Bild 4-17** Entladungsimpulse an den Bohrungslochern am Schlauchanschluss

Wegen dieser neuen Erkenntnisse wurden die Bohrungen am Schlauchanschluss bei der Simulation auf deren Feldstärkenwerte untersucht. Die Oberflächenabbildung sowie das Liniendiagramm aus der Simulation sind im Anhang [19] zu finden. Aus dem Liniendiagramm entlang der Anschlussbohrungen in der Luft kann eine maximale Feldstärke  $E_{\max}$  von 3 kV/mm für den Versuchsdurchschlag in der Luft ermittelt werden.

#### 4.1.5 Untersuchung von Versuchsdurchschlägen im Prüfaufbau

##### 4.1.5.1 Versuchsaufbau und Prüfvorgang

Bei der Untersuchung von Versuchsdurchschlägen wird eine Prüfanordnung gewählt, die Gleitentladungen auf der Öloberfläche vermeidet. Dazu wird der Schlauchanschluss über ein längeres Verbindungsrohr nach oben positioniert. Der Versuchsaufbau vom Vorversuch 3 ist in **Bild 4-18** zu sehen.



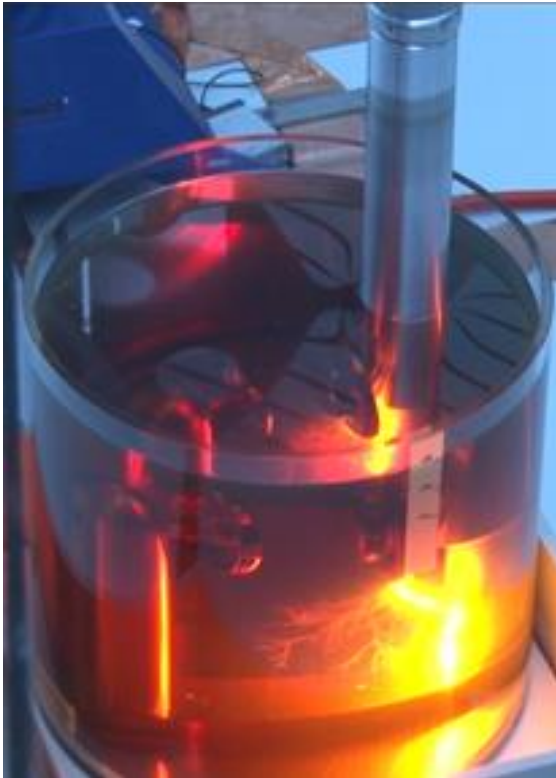
**Bild 4-18** Prüfaufbau - Vorversuch 3

Beim Prüfvorgang wird die Spannung rampenförmig auf 200 kV erhöht. Anschließend wird im 20-Sekundentakt die Spannung schrittweise um 10 kV erhöht.

#### 4.1.5.2 Experimentelle Beobachtung

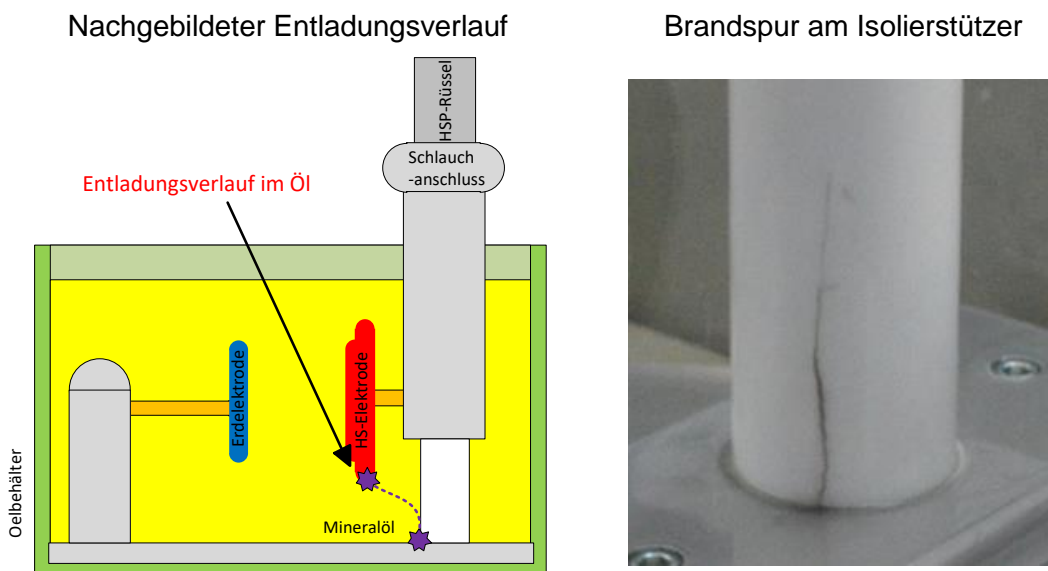
Ab einer Spannung von 330 kV kam es bei dieser Anordnung zum Versuchsdurchschlag mit Überschlag am Isolierstützer. Vor dem Ereignis sind anhand der TE-Aufnahme keine Vorentladungen wie z.B. Hohlraumentladungen festzustellen. Ebenso traten keine Gleitentladungen auf der Öloberfläche oder Koronaentladungen in der Luft auf.

Die Ereigniseinsatzfeldstärke am unteren Kranz der HS-Elektrode beträgt etwa 9,9 kV/mm. Die Feldstärke am Kranz der Hochspannungselektrode fällt um etwa 10 % geringer aus als beim Vorversuch 2 von 11,0 kV/mm.



**Bild 4-19** Versuchsdurchschlag unter Öl

In **Bild 4-19** ist zu erkennen, dass sich der Lichtbogen vom Kranz der HS-Elektrode zur Erdtraverse entlang des POM-Isolierstützers ausgebreitet hat. Der nachgebildete Verlauf der vollständigen Entladung wird durch die Schadensbegutachtung am Isolierstützer bestätigt, siehe **Bild 4-20**.



**Bild 4-20** Nachgebildeter Entladungsverlauf des Versuchsdurchschlags mit Schäden am Isolierstützer.

Die Brandspur kann mit feinem Schleifpapier entfernt werden. Eine negative Beeinträchtigung der Isolierfestigkeit hat sich bei weiteren Versuchen nicht gezeigt.

Es ist zu erwähnen, dass es bei einer Voruntersuchung dieser Prüfung ab einer Spannung von 90 kV zu Vorentladungen gekommen ist. Jedoch haben sich diese ab einer Spannung von 220 kV verflüchtigt. Der Versuch wurde bei einer Spannung von 250 kV abgebrochen. Die Vorentladungen ähneln aufgrund ihres bogenförmigen Musters in beiden Spannungshalbwellen dem TE-Bild für Hohlraumentladungen. Die Intensität der Teilentladungen lag in dem Bereich zwischen 1 - 1,6 pC, siehe **Bild 4-21**. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass die Einsatzspannung bei ähnlichen TE-Bildern nicht konstant ist, siehe Anhang [19].



**Bild 4-21** TE-Aufnahme mit charakteristischem Muster für Hohlraumentladungen

Es ist zu einer frühzeitigen Entladung gekommen, da im Vorversuch 3 eventuelle Rückstände im Öl zu einer lokalen Verringerung der Ölfestigkeit geführt haben könnten.

#### 4.1.5.3 Ursache für Versuchsdurchschläge im Öl

Unmittelbar nach den Versuchsdurchschlägen im Öl sind Gasblasen am Entstehungsort deutlich zu erkennen. Neben der Gasbildung sind im Öl schwebende Rußpartikel zu beobachten, welche sich nach einer gewissen Zeit auf dem Boden des Ölbehälters absetzen. Versuchsdurchschläge im Öl sind grundsätzlich zu vermeiden, um Schäden am Prüfaufbau vorzubeugen.

Wegen der geringen elektrischen Festigkeit sind Gase in Form von Bläschen oder haftende Gasschichten an Barrieren potenzielle TE-Quellen im Isolieröl. Aufgrund der unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen von Luft ( $\epsilon_r = 1$ ) und Mineralöl ( $\epsilon_r = 2,3$ ) kommt es zum Effekt der Feldverdrängung und demzufolge zu einer höheren elektrischen Beanspruchung in der Gasblase. Teilentladungen setzen somit bei sehr niedrigen Feldstärken bzw. Spannungen ein und können unmittelbar zum Durchschlag der Ölstrecke führen.

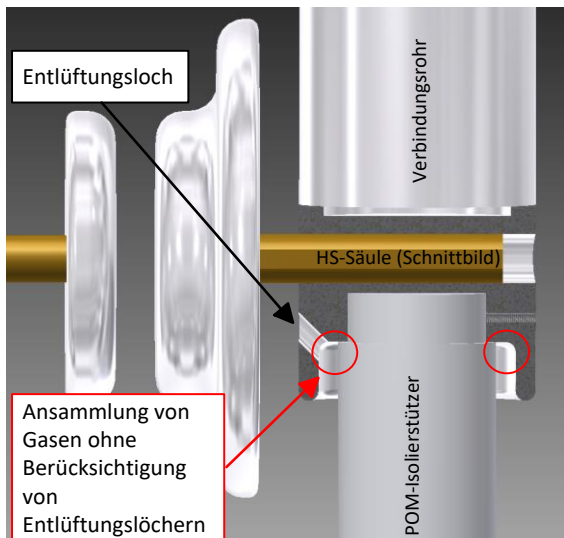
#### 4.1.5.4 Vermeidung von Durchschlägen in Öl

Um Versuchsdurchschläge durch günstigere Feldstärkenverhältnisse im Öl zu vermeiden, sind insbesondere die potenzialführenden Bauteile hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen



zu optimieren. Verbesserungsvorschläge an der HS-Elektrode und am HS-Stützer sind im Anhang von [19] zu finden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Feldstärken in den ausschlaggebenden Bereichen um mehr als 30 % verringert werden können.

Neben den konstruktiven Maßnahmen ist ebenso darauf zu achten, dass bei Durchschlägen im Öl oder beim Befüllen des Ölbehälters mit Mineralöl die Gasblasen zur Öloberfläche vollständig aufsteigen können. Ein kritischer Bereich für Ansammlung von Gasschichten ist an der Verbindungsstelle der HS-Säule zum POM-Isolierstützer zu finden. Demzufolge sind ausreichende Entlüftungslöcher vorzusehen, siehe **Bild 4-22**.

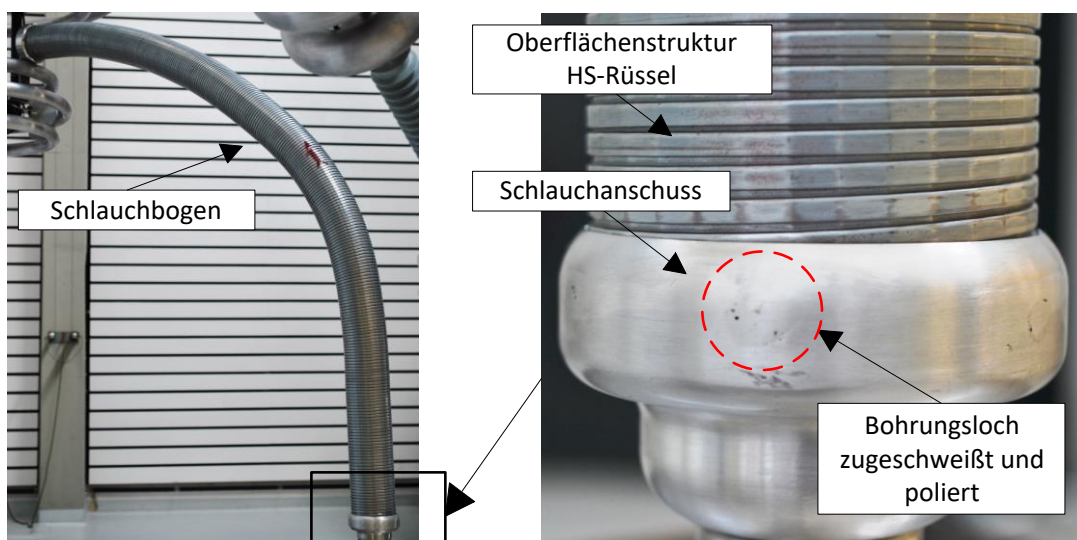


**Bild 4-22** Entlüftungslöcher zur Vermeidung von Gasschichten im Bereich der Verbindungsstelle der HS-Säule zum POM-Isolierstützer

#### 4.1.6 Untersuchung des TE-Verhaltens vom HS-Schlauch und dem Anschluss

##### 4.1.6.1 Versuchsaufbau und Prüfvorgang

Nachdem die Erfahrung gemacht worden ist, dass eine Erhöhung des Schlauchanschlusses Gleitentladungen auf der Öloberfläche unterbindet und Teilentladungen erst bei einer Spannung von 380 kV zu erwarten sind, werden die Bohrungen des Schlauchanschlusses in der Betriebswerkstatt zugeschweißt und überpoliert.

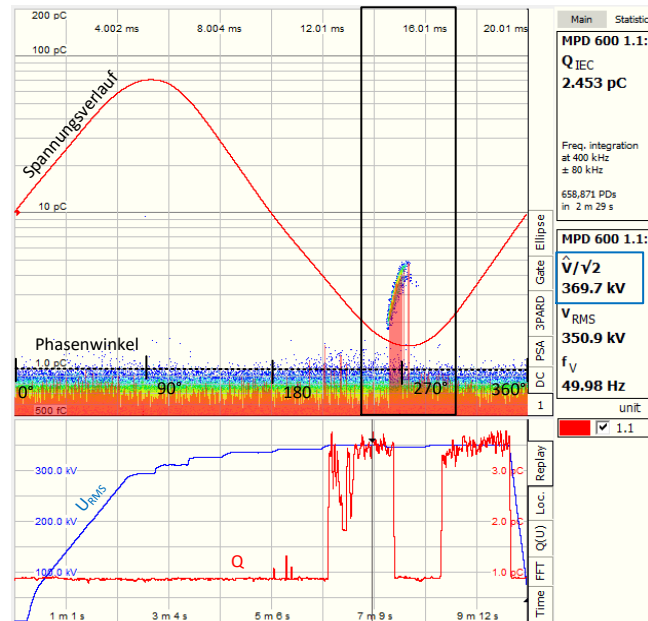


**Bild 4-23** Hochspannungsschlauch und bearbeiteter Anschluss

Beim Prüfvorgang wird die Spannung rampenförmig auf etwa 300 kV erhöht. Kommt es zu keinen Teilentladungen während der Stufenprüfung, wird nach etwa 20 – 30 Sekunden die Spannung um 10 kV erhöht.

#### 4.1.6.2 Experimentelle Beobachtungen

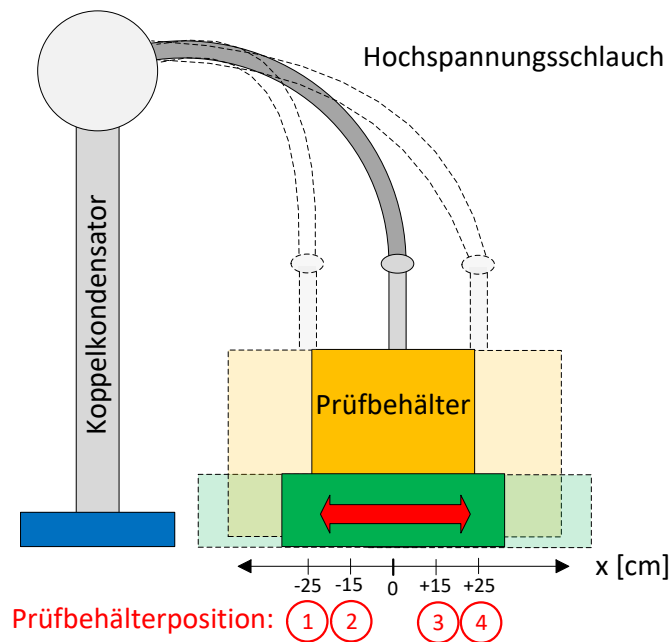
Während der Untersuchung kam es bei einer Spannung von 370 kV zu Teilentladungen, die u.a. akustisch wahrgenommen werden konnten. Das TE-Muster ähnelt dem charakteristischen TE-Bild „Koronaentladungen auf Hochspannungspotenzial“, siehe **Bild 4-24**. Der TE-Pegel liegt unterhalb von 5 pC und ist damit deutlich geringer als mit vorhandenen Schlauchanschlussbohrungen (Vorversuch 2, Anhang [19]).



**Bild 4-24** TE-Aufnahme mit zugeschweißten und nachpolierten Schlauchanschlussbohrungen mit ausgeprägten Hinweisen auf „Koronaentladungen auf Hochspannungspotenzial“

Aufgrund der Maßnahmen am Schlauchanschluss sind keine scharfen Kanten vorhanden, die zu hohen Feldstärken und Teilentladungen führen können. Anhand der in Kapitel 4.1.3 vordefinierten Feldstärkenbereichen treten für den Vorversuch 2 bei 380 kV am Schlauchanschluss und am Rand des Verbindungsrohrs Feldstärken von 1,64 kV/mm und 1,70 kV/mm auf. Da sich bei einem unveränderten Aufbau der Feldstärkewert proportional mit der Spannung verhält, können die Werte auf 370 kV bestimmt werden. Somit sind im Bereich des Schlauchanschlusses Feldstärken von 1,60 kV/mm und am Verbindungsrohr Feldstärken von 1,66 kV/mm zu finden. Die ermittelten Feldstärken liegen unterhalb der TE-Einsatzfeldstärke von Koronaentladungen in der Luft von etwa 2,3 kV/mm. Aus diesem Grund wird der Schlauchanschluss für die Koronaentladung ausgeschlossen.

Mit einem Richtmikrofon wird der Hochspannungsrüssel auf die Intensität der Geräuschentwicklung während der Stehspannungsprüfung untersucht. Ein Maximum des Knisterns stellt sich am Schlauchbogen ein. Anschließend wird die Position der kompletten Prüfanordnung vom Ursprungsort geändert, siehe **Bild 4-25**.



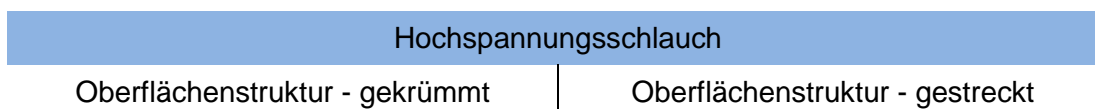
**Bild 4-25** Positionen des Prüfbehälters zur Untersuchung des TE-Verhaltens des Hochspannungsschlauchs

Es wurde festgestellt, dass die TE-Einsatzspannung von der Position des Prüfbehälters abhängig ist. Bei den Positionen 2 und 4 kommt es zu Teilentladungen bei niedrigen Spannungen. Die Werte liegen zwischen 200 kV und 240 kV. Die Ladungsimpulse liegen im Bereich um 2 pC. Bei den Positionen 1 und 3 liegt die TE-Einsatzspannung bei 365 kV und 370 kV. Die Größe der Ladungsmenge beträgt in diesen Fällen ebenfalls 2 pC. Diese sind deutlich kleiner als die Ladungsintensität bei TE-Untersuchungen mit vorhandenen Bohrungslöchern am Schlauchanschluss und gleichem Aufbau. Bei allen Positionen ist ein Knistern entlang des Hochspannungsrüssels zu hören. Die einzelnen TE-Aufnahmen sind im Anhang von [19] zu finden und ähneln dem Muster für „Korona auf Hochspannungspotenzial“.

#### 4.1.6.3 Ursachen für Teilentladungen am Hochspannungsrüssel

Die unterschiedlichen TE-Einsatzspannungen bei unterschiedlichen Positionen des Prüfaufbaus und die geringen Ladungsintensitäten geben Hinweise darauf, dass der flexible Hochspannungsschlauch aufgrund seiner geriffelten Oberflächenstruktur für hohe Spannungen ungeeignet ist. Je nach Prüfbehälterposition krümmen bzw. strecken sich diese unterschiedlich stark, siehe **Bild 4-26**. Beim Versuch eine optimale Ausrichtung des Hochspannungsrüssels vorzunehmen, konnte eine Spannung von 370 kV erreicht werden. Bei ungünstigen Positionen können Teilentladungen schon bei deutlich kleineren Spannungen entstehen.

Die maximale Spannung von 380 kV (vgl. Vorversuch 2) konnte jedoch bei der Prüfung nicht erreicht werden.





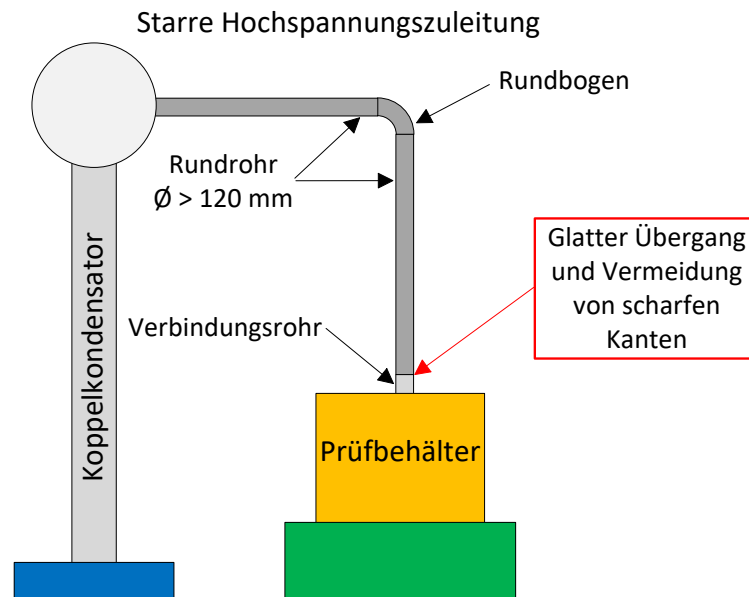
**Bild 4-26** Flexschlauch – Oberflächenstruktur bei gekrümmtem und gestrecktem Hochspannungsrüssel

#### 4.1.6.4 Vermeidung von Teilentladungen am Hochspannungsrüssel

Um Teilentladungen aufgrund der Oberflächenstruktur des Hochspannungsrüssels zu vermeiden, ist es sinnvoll, ein glattes Rundrohr zu verwenden. Dieses sollte vom Verbindungsrohr aufwärts soweit wie möglich senkrecht verlaufen. Ebenfalls sollte ein glatter Übergang vom Verbindungsrohr zur Hochspannungszuleitung geschaffen werden. Scharfe Kanten oder Bohrungslöcher sind dabei grundsätzlich zu vermeiden.

Der Durchmesser der Hochspannungszuleitung sollte ausreichend groß gewählt werden, damit die Feldstärken entlang der Hochspannungszuleitung abnehmen. Der Einfluss des Rohrdurchmessers bei einem idealen Übergang auf die Feldstärkeverteilung wurde für zwei Prüfanordnungen aus den Voruntersuchungen berechnet, siehe Anhang von [19]. Beim ursprünglichen Durchmesser des Verbindungsrohrs von 120 mm ergeben sich in dem Bereich der Öberfläche und des Prüfbehälterrands am Rohr Feldstärken zwischen 1,6... 1,7 kV/mm. Ein Minimum der Feldstärke stellt sich bei einem Rohrdurchmesser von 160 - 180 mm ein. Je nach Prüfanordnung stellt sich ein anderes Minimum der Feldstärke in diesem Bereich ein.

Eine optimale Anbindung des Prüfaufbaus an die bestehende Hochspannungsanlage ist in der **Bild 4-27** dargestellt.



**Bild 4-27** Ideale Hochspannungszuleitung zur Vermeidung von Koronaentladungen auf Hochspannungspotenzial in Luft sowie von Gleitentladungen auf der Öloberfläche

#### 4.1.7 Ermittlung der Grenzfeldstärken in Luft und im Öl

Die Grenzfeldstärken in Luft und im Öl werden aus den Ergebnissen der Untersuchungen aus den Kapiteln 4.1.4 und 4.1.5 bestimmt.

Unter Berücksichtigung der Schlauchanschlussbohrungen bei den Feldberechnungen konnte aus den Voruntersuchungen 1 und 2 folgende Ereigniseinsatzfeldstärken berechnet werden, siehe **Tabelle 4-4**.

**Tabelle 4-4** Ereigniseinsatzfeldstärken für Koronaentladungen sowie von Gleitentladungen und Durchschlag in Luft

Ereigniseinsatzfeldstärken in Luft	
$E_{\text{Koronaentladung in Luft}}$	2,3 kV/mm
$E_{\text{Gleitentladung und Durschlag in Luft}}$	3,0 kV/mm

Gleitentladungen sowie Durchschläge in der Luft entstehen bei einer Feldstärke von etwa 3 kV/mm. Koronaentladungen setzen bei einer Feldstärke von 2,3 kV/mm ein. Beim Entladungsvorgang um den Prüfbehälter mit kurzem Verbindungsrohr und tiefliegendem Schlauchanschluss (Vorversuch 1) müssten demnach Teilentladungen bei einer Spannung von etwa 270 kV erkennbar sein. In der TE-Aufnahme vom Vorversuch 1 (Anhang [19]) sind geringe Ladungsimpulse zwischen der Spannungshöhe von 270 kV - 330 kV zu entdecken. Ebenso ist anhand der Videoaufnahmen zu erkennen, dass Oberflächenentladungen auf dem Öl unter 300 kV stattfanden. Aus diesem Grund ist die zulässige Grenzfeldstärke unterhalb von 2,3 kV/mm zu wählen.

Grundsätzlich sind in diesem Prüfaufbau die maximalen Feldstärken am Kranz der Hochspannungselektrode zu finden. Aus den Voruntersuchungen 2 und 3 sind folgende Feldstärken berechnet worden, siehe **Tabelle 4-5**.

**Tabelle 4-5** Minimale und maximale Ereigniseinsatzfeldstärken im Öl

Minimale und maximale Ereigniseinsatzfeldstärken im Öl	
$E_{Max\_Öl}$	11,0 kV/mm
$E_{Min\_Öl}$	9,9 kV/mm

Da die Ölqualität von verschiedenen Faktoren abhängig ist, können sich (durchaus) unterschiedliche Durchschlagsfeldstärken ergeben. Daher wird der Mittelwert der beiden Feldstärken gebildet. Damit muss die zulässige Grenzfeldstärke unterhalb des Mittelwerts von 10,5 kV/mm betragen.

Mit einem Sicherheitsfaktor von 20 % ergeben sich folgende zulässige Grenzfeldstärken in der Luft und im Öl:

**Tabelle 4-6** Zulässige Grenzfeldstärken in der Luft und im Öl

Zulässige Grenzfeldstärken in der Luft und im Öl	
$E_{Grenz-Luft}$	1,84 kV/mm
$E_{Grenz-Öl}$	8,40 kV/mm

#### 4.1.8 Ergebnisse der Voruntersuchung

In den Voruntersuchungen wurden bestimmte Prüfungen durchgeführt, bei denen Entladungen in der Luft und im Öl beobachtet worden sind. Die Videoaufnahmen und die TE-Bilder gaben dabei wichtige Hinweise auf deren Entstehungsorte. Mithilfe der Modellierung in einem CAD-Programm und der Anbindung zum Feldberechnungsprogramm konnten die auftretenden Feldstärken berechnet werden.

Gleitentladungen auf der Öloberfläche konnten vermieden werden. Dabei hat sich gezeigt, dass der Tripelpunkt bei der Spannungseinführung nicht die Ursache für die momentane Spannungsbegrenzung war. Eine günstigere Position der HS-Elektrode sowie Änderungen am Schlauchanschluss und am Verbindungsrohr haben eine Spannungserhöhung von 320 kV bis maximal 380 kV bewirkt.

Um Versuchsdurchschläge im Öl zu vermeiden, sind möglichst lange Ruhephasen des Öls einzuhalten, damit sich u.a. alle Luftblasen auf der Öloberfläche verflüchtigen können. Nach Einhaltung der Standzeit sollten keine Luftblasen auf der Öloberfläche vorhanden sein.

Die Untersuchungen des TE-Verhaltens mit flexiblem Schlauch als Hochspannungszuleitung haben gezeigt, dass aufgrund der Oberflächenstruktur dieser für hohe Spannung ungeeignet ist. Je nach Ausrichtung des Schlauchs sind unterschiedliche TE-Einsatzspannungen zu erwarten.

Aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurden folgende Grenzfeldstärken in der Luft und im Öl festgelegt:

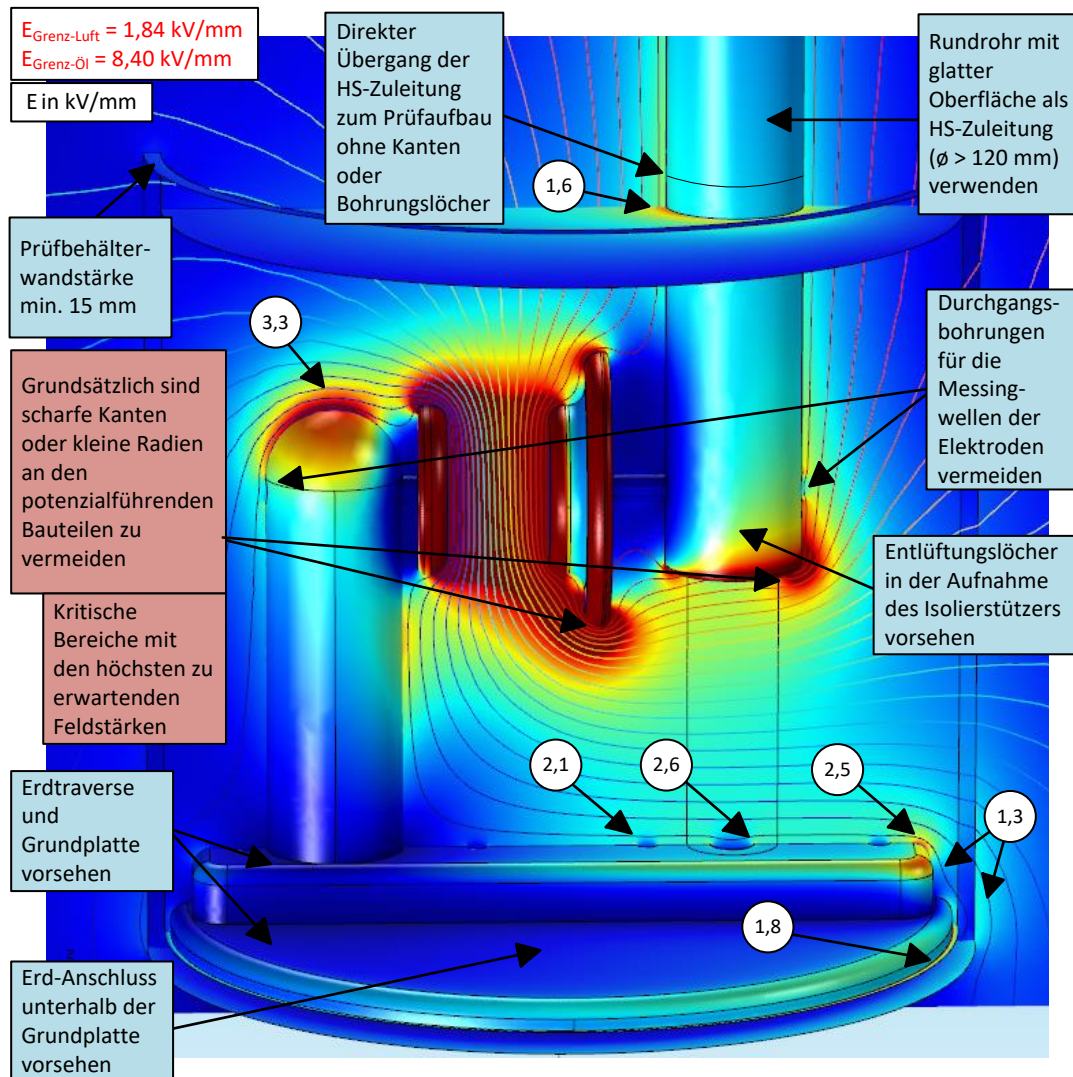
- $E_{Grenz-Luft} = 1,84 \text{ kV/mm}$
- $E_{Grenz-Öl} = 8,40 \text{ kV/mm}$

Neben diesen Grenzfeldstärken sind in der Prüfanordnung an ausgewählten Stellen bestimmte Feldstärken einzuhalten. Diese sind vor allem an den Kanten der Bohrungslöcher für Schrauben oder dem Isolierstützer zu finden. Eine Übersicht der zu berücksichtigenden Feldstärken wird im nachfolgenden Kapitel gegeben.

#### 4.1.9 Abgeleitete Designregeln für den Prüfaufbau

Aus den Ergebnissen der Vorstudie werden für die Neuentwicklung Designregeln festgelegt. Dabei sind neben den ermittelten Grenzfeldstärken ebenso Feldstärken in bestimmten Bereichen der Prüfanordnung einzuhalten. Mithilfe einer Feldberechnung werden die Feldstärken im Prüfaufbau des Vorversuchs 2 mit der entsprechenden Einsatzspannung von 380 kV.

Eine Gesamtübersicht der einzuhaltenden Feldstärken zeigt das **Bild 4-28**. Ebenso sind konstruktive Anforderungen beim Design eines Prüfaufbaus für 400 kV zu beachten.

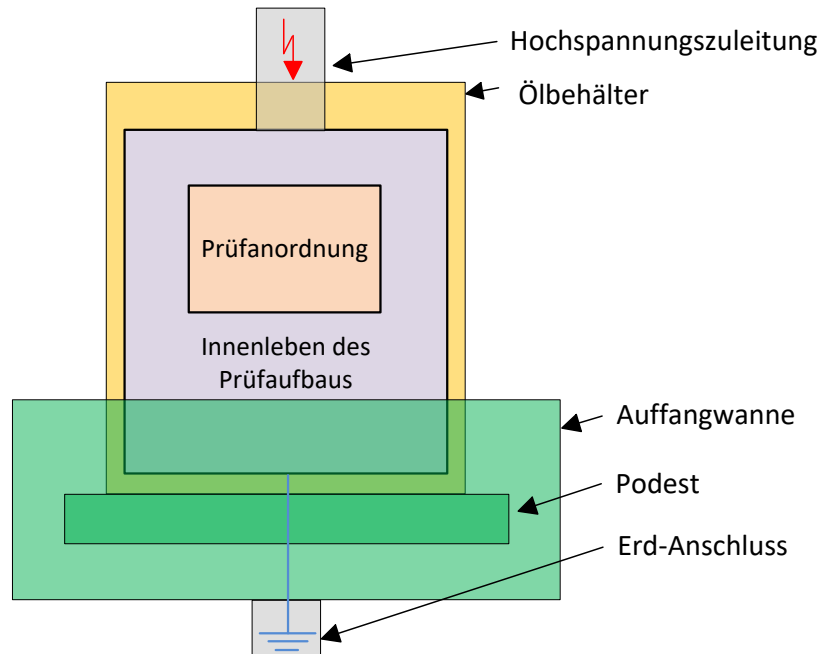


**Bild 4-28** Übersicht der einzuhaltenden Feldstärken und konstruktive Anforderungen in verschiedenen Bereichen der Prüfanordnung

## 4.2 Entwicklung und Aufbau der Prüfanordnung

### 4.2.1 Grundaufbau eines Prüfbehälters

Im Wesentlichen besteht ein Prüfaufbau für die dielektrischen Untersuchungen der Isoliermaterialien unter Öl aus den folgenden Elementen, siehe **Bild 4-29**.



**Bild 4-29** Grundaufbau eines Prüfbehälters

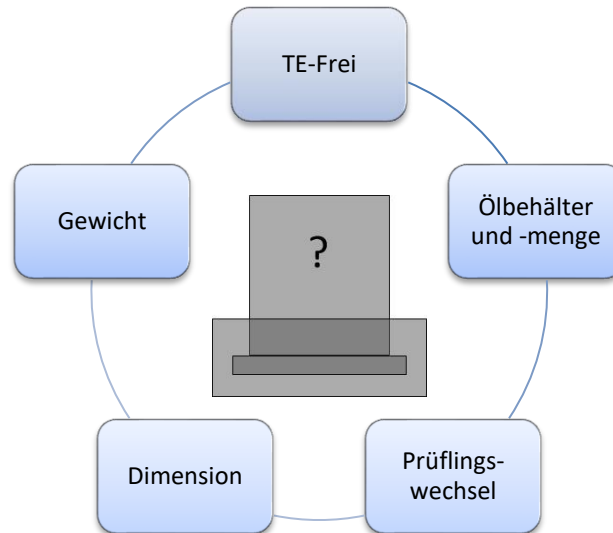
Bei der Entwicklung eines Prüfbehälters ist an erster Stelle eine geeignete Prüfanordnung zu entwerfen. Anschließend kann das Innenleben um die Prüfanordnung entworfen werden. Um das Ziel der TE-Freiheit bis 400 kV zu erreichen, werden die Erfahrungen der bisherigen TE-Prüfaufbauten, die Ergebnisse der Voruntersuchungen und der Feldberechnungen miteinbezogen. Die Größe und die Form des Ölbehälters richten sich nach der Dimension der kompletten Prüfanordnung.

Des Weiteren ist ein Unterbau für den Prüfbehälter vorzusehen. Dieser sollte aus einem Podest und einer Auffangwanne mit einer Anschlussmöglichkeit zum Erdpotenzial bestehen. Das Podest dient zur einfachen Handhabung bei der Montage des Aufbaus. Die Auffangwanne soll beim Prüflingswechsel oder bei einer unabsichtlichen Zerstörung des Prüfaufbaus das Mineralöl auffangen können. Da der Unterbau keinen nennenswerten Einfluss auf die Feldverteilung hat, bleibt die Form des Podestes und der Auffangwanne aus vorherigen TE-Aufbauten bestehen. Lediglich deren Dimensionen werden dem Ölbehälter und der benötigten Ölmenge angepasst.

#### 4.2.1.1 Rahmenbedingungen für den Prüfaufbau

Für eine erfolgreiche Umsetzung des Prüfaufbaus sind folgende Punkte beim Entwurf zu berücksichtigen, siehe **Bild 4-30**.





**Bild 4-30** Rahmenbedingungen für einen Prüfaufbau

Für einen teilentladungsfreien Prüfaufbau sind die Designregeln nach Kapitel 4.1.9 einzuhalten. Einer der wichtigsten Punkte ist es, ausreichende Entlüftungslöcher in den Bereichen möglicher Ansammlungen von Gasen zu berücksichtigen.

Die Ölaufbereitungsanlage (Kapitel 4.3.3) muss die benötigte Menge an Mineralöl für den Prüfaufbau und für die Imprägnierung der Prüflinge für eine Untersuchung fassen können. Derzeit steht ein Fassungsvermögen von 1000 Liter Mineralöl zur Verfügung. Ebenso ist zu gewährleisten, dass der Ölbehälter ölfest und dem Druck des zu fassenden Öls standhält.

Das Auswechseln der Prüflinge muss mit einfachen Mitteln unter Öl geschehen können. Dabei darf die Eintauchtiefe von der Öloberfläche zu den Prüflingen nicht größer als 400 mm sein.

Die Dimension des vollständigen Prüfaufbaus ist dem räumlichen Umfeld anzupassen.

Bei der Montage mithilfe eines Kettenzugs im Prüffeld der Hochschule Osnabrück ist darauf zu achten, dass die zulässige Last eingehalten wird. Momentan kann ein Kettenanzug mit einem maximalen Gewicht von 500 kg belastet werden. Deshalb sollte bei der Konstruktion der Bauteile und während der Montage auf das Gewicht geachtet werden.

#### 4.2.1.2 Auswahl der Materialien

Für einen Prüfaufbau und deren Komponenten kommen folgende Materialien zum Einsatz, siehe **Tabelle 4-7**.

**Tabelle 4-7** Auswahl der Materialien

Komponenten	Materialart
Ölbehälter	PMMA: Polymethylmethacrylat „PLEXIGLAS“
Potenzialführende Komponenten:	Aluminium
- Hochspannungszuleitung - Innenleben des Prüfaufbaus - Elektroden, Wellen usw.	Messing

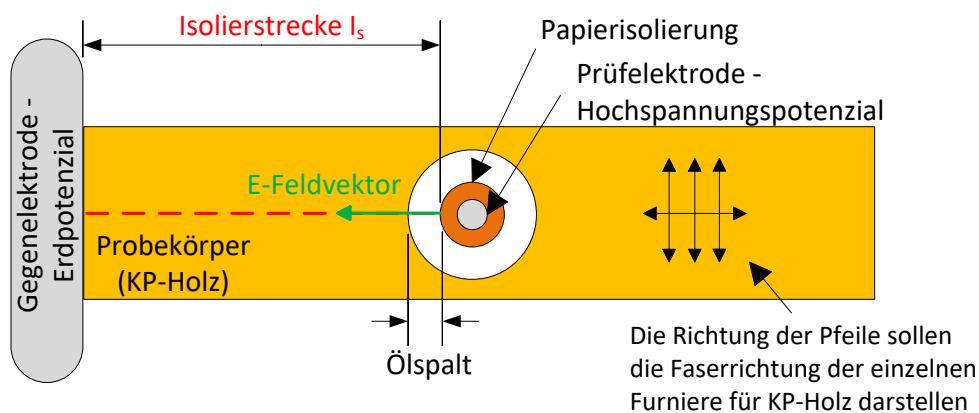
Nichtleitende Komponenten im Prüfaufbau: - Isolierstützer - Befestigungsgegenstände usw.	POM-C „weiß“: Polyoxymethylen
Podest Auffangwanne	PP: Polypropylen

Damit bei der Fertigung der potenzialführenden Komponenten keine Schwierigkeiten beim Bearbeiten der Rohmaterialien aus Aluminium oder Messing auftreten, ist darauf zu achten, dass diese gute Bohr- und Drehqualitäten aufweisen. Nichtleitende Komponenten oder Befestigungsvorrichtungen im Aufbau sollten aus dem technischen Kunststoff „POM – C“ ohne Zusatzstoffe wie z.B. Graphit oder Ruß hergestellt werden.

## 4.2.2 Prüfanordnung

### 4.2.2.1 Prüfstrecke- und Anordnung

Um einen ähnlichen Verlauf der Feldstärke zu erhalten, muss für den Versuchsaufbau als Hochspannungselektrode ein Rundleiter mit einer Papierisolierung eingesetzt werden. Prüfelektrode und Probekörper müssen durch einen Ölspalt voneinander getrennt sein. Die Gegenelektrode mit Erdpotenzial kann direkt am Prüfling anliegen. Die Form der Gegenelektrode kann denen der Teller Elektroden ähneln. Die Isolierstrecke breitet sich von der maximalen Feldstärke an der Grenzfläche der papierbewickelten Prüfelektrode bis hin zur Gegenelektrode aus. Die Länge der Isolierstrecke  $I_s$  soll für die Untersuchungen variabel einzustellen sein. Der Aufbau der Prüfstrecke ist in der **Bild 4-31** zu sehen.



**Bild 4-31** Aufbau der Prüfstrecke

### 4.2.2.2 Anforderungen an Prüfelektroden und Prüfkörper

Die Betrachtungen der vorherigen Kapitel und interne Fachgespräche führten zu folgenden Grundanforderungen, die bei der Konstruktion der Prüfanordnung zu berücksichtigen sind:

- Isolierstrecke variabel zwischen 100 mm und 300 mm  
(Grundsätzlich sollen kleinere Isolierstrecken möglich sein)
- Durchmesser der Prüfelektroden ohne Papierisolierung 16 ... 30 mm
- Papierdicke um die Prüfelektrode mindestens 2 mm

- Quaderförmige Prüflinge mit einer Durchgangsbohrung
- Ölabbstand mindestens 10 mm

Die Länge der Prüfelektroden darf nicht größer als 450 mm betragen, da die Imprägnieranlage der Hochschule Osnabrück für längere Prüfelektroden ungeeignet ist.

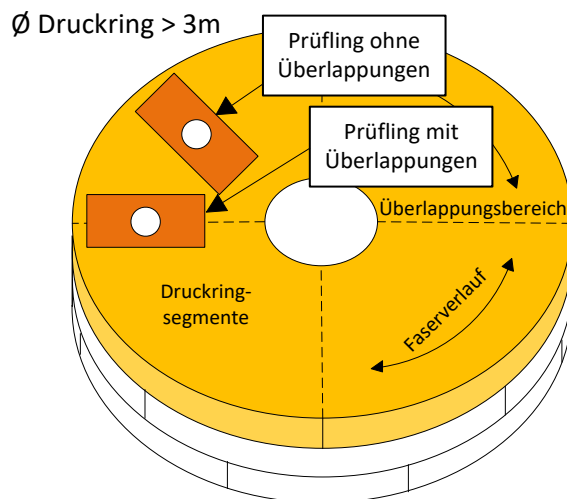
### 4.2.3 KP-Holzproben für Versuche

Die geometrischen Eigenschaften der Prüfkörper aus KP-Holz wurden bei Fachgesprächen mit einem Transformatorenhersteller festgelegt. Beide Druckringvarianten und deren Eigenschaften sind in der **Tabelle 4-8** aufgeführt.

**Tabelle 4-8** Übersicht der Druckringvarianten und derer Eigenschaften

Druckringvarianten	Schichtaufbau	Faserverlauf zum E-Feldvektor	Verdichtungsstufe
Druckring	Tangential	Senkrecht stehende Fasern (Jede 4-Lage, 1-Querlage vorhanden - Querfestigkeit)	Mittel - 1,25 g/cm <sup>3</sup> (ca. 22 % mehr Furniere) Leicht - 0,95 g/cm <sup>3</sup>
Drucksegmente (KP-Holzplatten)	Parallel Kreuz	Parallel und senkrecht stehende Fasern	Mittel - 1,25 g/cm <sup>3</sup> Leicht - 0,85 g/cm <sup>3</sup>
			Mittel - 1,25 g/cm <sup>3</sup> Leicht - 0,95 g/cm <sup>3</sup>

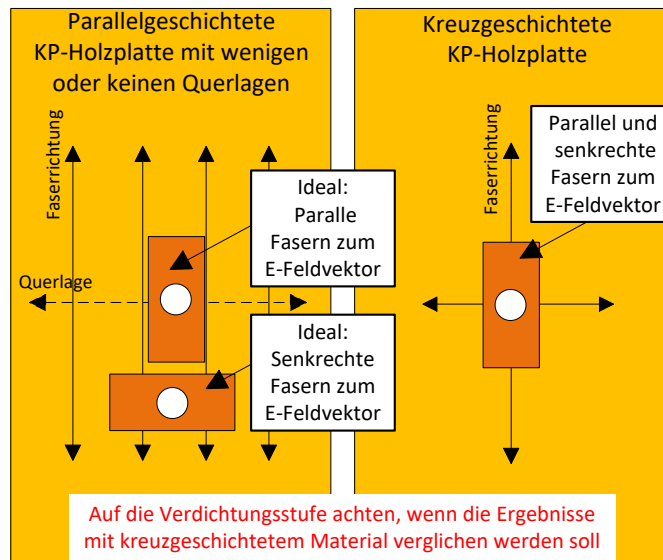
Für die Untersuchung können die Proben aus einem Druckring oder aus einer KP-Holzplatte entnommen werden. Bei der Auswahl der Prüflinge aus einem Druckring stehen zwei Varianten zur Verfügung, mit oder ohne Überlappungen, siehe **Bild 4-32**. Der segmentierte Schichtaufbau des Druckrings erlaubt es, den Überlappungsbereich auszunutzen. Bei beiden Varianten werden die Fasern größtenteils von dem dazu senkrecht verlaufenden E-Feldvektor beansprucht.



**Bild 4-32** Herstellung der Proben aus einem tangentialgeschichteten Druckring

Um den Aufwand bei der Probenbeschaffung zu verringern, können die Prüfkörper aus einer KP-Holzplatte gefertigt werden, siehe **Bild 4-33** links. Um der Faserbeanspruchung der des Druckrings nahe zu kommen, können die Proben aus einer parallelgeschichteten Platte mit keiner oder nur einer geringen Anzahl von Querlagen entnommen werden. Sollte der Einfluss der Faserrichtung auf die Durchschlagsspannung untersucht werden, kann der Ausschnitt der Probe bei der parallelgeschichteten KP-Holzplatte um 90° gedreht werden. Das Verhältnis der senkrecht- und parallellaufenden Fasern ändert sich.

Zur Untersuchung der Durchschlagfestigkeit von kreuzgeschichtetem Material sind die Proben ebenfalls aus einer KP-Holzplatte zu fertigen, siehe **Bild 4-33** rechts.



**Bild 4-33** Herstellung der Proben aus einer KP-Holzplatte aus parallel- oder kreuzgeschichtetem Material

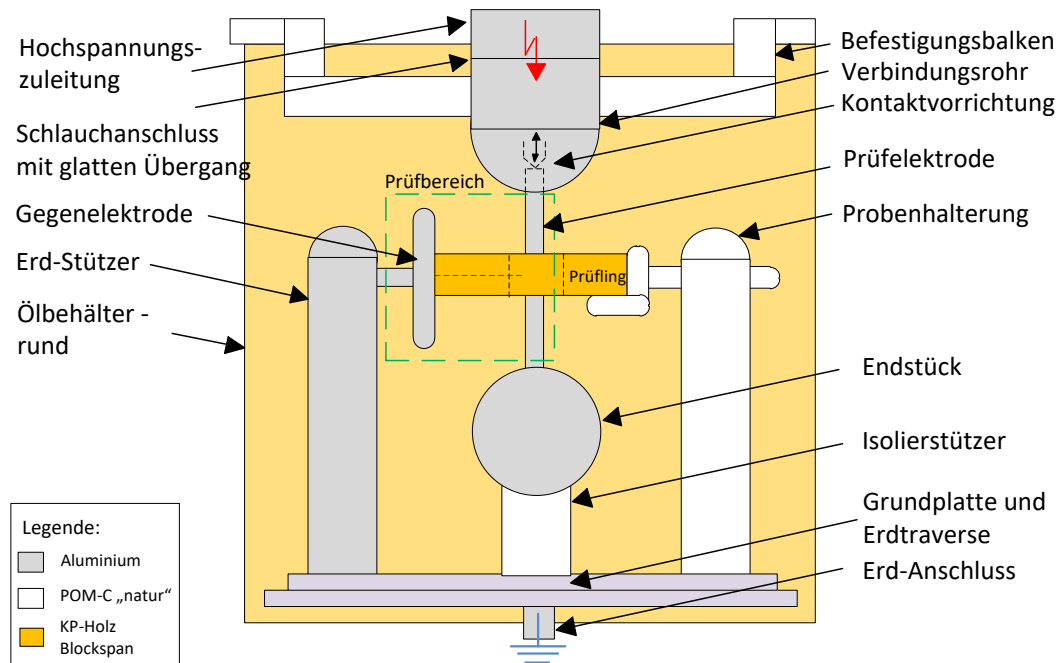
## 4.2.4 Innenleben des Prüfbehälters

### 4.2.4.1 Konzept A

Bei der Realisierung des Innenlebens für die Prüfanordnung stehen zwei Konzepte zur Verfügung.

Bei dem ersten Konzept handelt es sich, wie in **Bild 4-34** dargestellt, um einen runden Ölbehälter. Die Hochspannungszuleitung wird mittig in den Prüfbehälter eingeführt und setzt direkt am Verbindungsrohr an. Das Verbindungsrohr wird mit einem POM-Balken an dem Ölbehälter fixiert und schwebt somit im Öl, damit beim Auswechseln der Prüfelektroden und des Prüflings die Hochspannungszuleitung nicht entfernt werden muss. Im Verbindungsrohr befindet sich eine Durchführung, in der die Prüfelektrode von außen eingeführt werden kann. Mithilfe einer Kontaktvorrichtung liegen die Prüfelektrode und das Endstück fest am Hochspannungspotenzial an.

Die Prüflinge werden anhand ihres Bohrungslochs an der Prüfelektrode zentriert. Die nicht zu prüfende Seite liegt auf eine dafür vorgesehene Halterung aus POM auf. Die Prüfseite der Probe steht in direktem Kontakt mit der Gegenelektrode, welche an Erdpotenzial liegt. Die Position der Gegenelektrode und der Probenhalterung sind dem Prüfling entsprechend anzupassen. Die Prüfstrecke ist komplett.



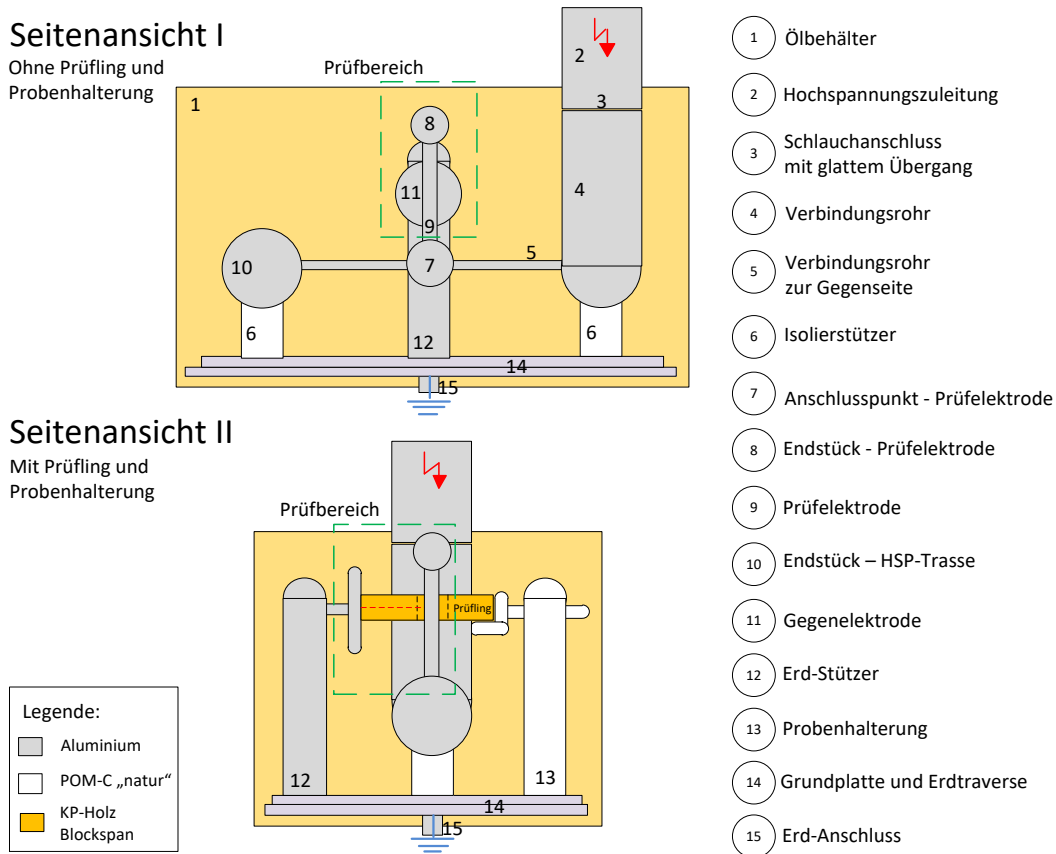
**Bild 4-34** Innenleben der Prüfanordnung - Konzept A

#### 4.2.4.2 Konzept B

Im zweiten Konzept handelt es sich um einen länglichen Prüfaufbau, siehe **Bild 4-35**. Die Prüfanordnung wird zentriert in der Mitte des Ölbehälters vorgesehen. Die Hochspannungszuleitung mit dem Verbindungsrohr ④ im Öl steht separat auf einen eigenen Isolierstützer ⑥. Über eine starre Verbindung ⑤ (Hochspannungstrasse) gelangt das Hochspannungspotenzial zur Gegenseite des Prüfbehälters zu einem geeigneten Endstück ⑩, welches ebenfalls auf einen Isolierstützer ⑥ steht.

Die Prüfelektrode ⑨ wird über eine Anschlussmöglichkeit ⑦ mittig auf die Hochspannungstrasse befestigt. Um hohe Feldstärken auf der entgegengesetzten Seite der Prüfelektrode zu vermeiden, ist ein kugelförmiges Endstück ⑧ vorzusehen. Die Gegenelektrode ⑪ und die Probenhalterung ⑬ werden versetzt zur Hochspannungstrasse positioniert und stehen in einer Flucht mit der Prüfelektrode.

Das Ausrichten der Prüflinge für die Untersuchung erfolgt wie im ersten Konzept beschrieben.



**Bild 4-35** Innenleben der Prüfanordnung – Konzept B

#### 4.2.4.3 Gegenüberstellung und Probleme der Konzepte

Grundsätzlich können die Feldstärken bei beiden Varianten über die Geometrie der potenzialführenden Teile nach den Designregeln beeinflusst werden. Deshalb werden die Konzepte auf folgende Kriterien hin begutachtet:

- Dimension des Prüfbehälters
- Montage der Prüfanordnung
- Prüflingswechsel

#### Konzept A:

Aufgrund der maximalen Prüfstrecke von 300 mm wird der Prüfbehälterdurchmesser über 600 mm betragen. Damit entsprechende Isolierabstände zur Erdtraverse oder von der Gegenelektrode zu den potenzialführenden Teilen eingehalten werden können, ist mit einem hohen Prüfaufbau zu rechnen. Außerdem sind hohe Ansprüche an den in Öl befindlichen Befestigungsbalken gestellt. Da keine Bohrungslöcher an dem Verbindungsrohr vorgesehen werden dürfen, kommt nur ein Klemmsystem in Frage. Dieses muss direkt an dem Verbindungsrohr anliegen, damit der Zwickel-effekt vermieden wird. Zur mechanischen Stabilisierung ist ein breiter Balken vorzusehen, damit bei der Montage die Klemmvorrichtung das Gewicht des Verbindungsrohrs und der HS-Zuleitung gehalten werden kann. Dadurch wird das Auswechseln der Prüfelektrode und des Prüflings erschwert. Ebenso ist eine spezielle Kontaktvorrichtung in dem Verbindungsrohr anzubringen, damit ein Probenwechsel schnell und effizient durchgeführt werden kann.

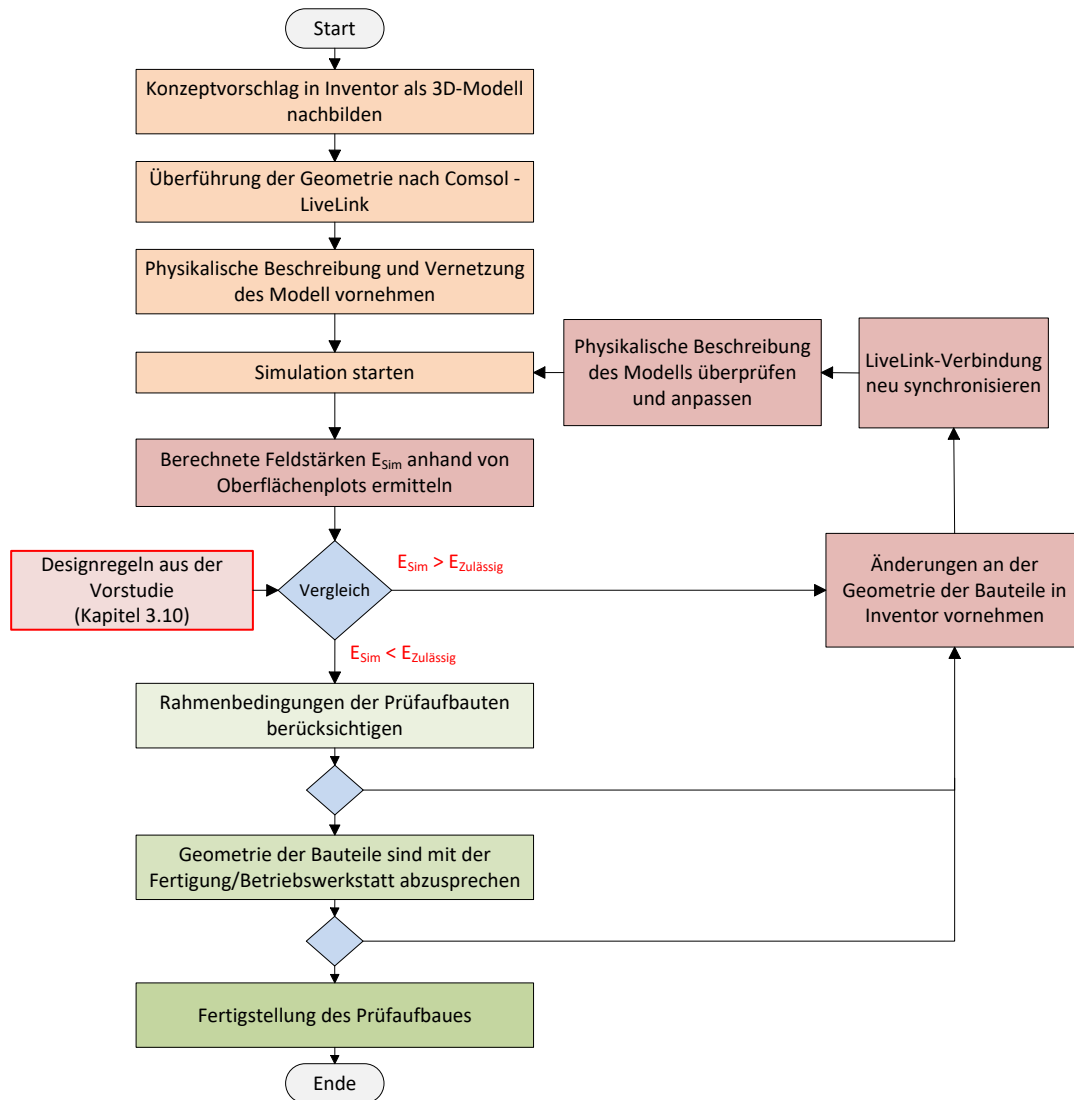
**Konzept B:**

Aufgrund der Hochspannungstrasse im Öl wird der Aufbau in seiner Länge gestreckt. Die Höhe des Prüfbehälters richtet sich zum einen an die Isolierabstände der beiden kugelförmigen Endstücke der Hochspannungstrasse zur Erdtraverse. Zum anderen sollten ausreichende Abstände von der Gegenelektrode zu den hochspannungsführenden Teilen oder zur Öloberfläche von dem Endstück der Prüfelektrode eingehalten werden. Durch die Hochspannungstrasse wird das Problem mit dem Befestigungsbalken und dem Klemmsystem sowie mit der speziellen Kontaktvorrichtung für die Prüfelektroden umgangen. Außerdem steht dem Auswechseln der Prüflinge kein Hindernis im Weg.

Aufgrund dieser Vorteile werden Weiterarbeiten am Konzept B unternommen. Im weiteren Vorhaben sind die Dimensionen des Ölbehälters und der Bauteile zu bestimmen.

**4.2.5 Ablaufplan für die Entwicklung des Prüfaufbaus**

Für die Entwicklung des Prüfbehälters ist zu Beginn ein Grundmodell des Konzeptvorschlags in Inventor zu erstellen. Mithilfe der Kopplungsmöglichkeiten zum Feldberechnungsprogramm kann die vollständige Geometrie überführt werden. Nach der physikalischen Beschreibung und der Vernetzung des Modells sind die berechneten Feldstärken mit den zulässigen Feldstärken aus den abgeleiteten Designregeln zu vergleichen. Kommt es zu keiner Überschneidung der Feldstärken, ist die Geometrie des Prüfaufbaus zu ändern. Dieses Vorhaben ist so lange durchzuführen, bis es zur Überschneidung der Ergebnisse kommt. Eine Übersicht der einzelnen Arbeitsschritte zeigt **Bild 4-36**.



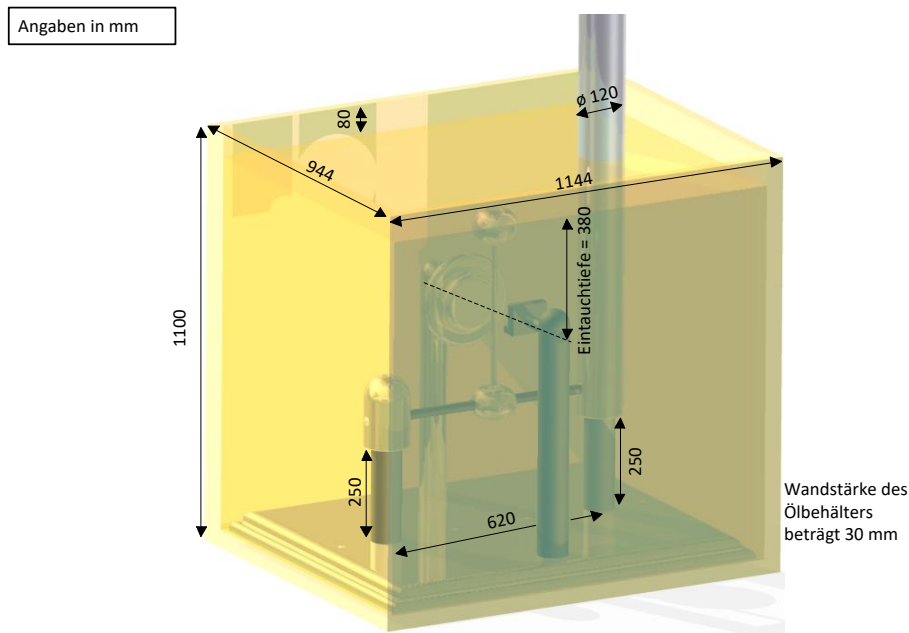
**Bild 4-36** Ablaufplan für die Entwicklung des Prüfaufbaus

#### 4.2.5.1 Modellierung des Konzepts in 3D

Im ersten Schritt wird das Konzept als 3D-Modell in Inventor nachgebildet. Um zu Beginn den Aufwand beim Modellieren gering zu halten, werden beim Erstentwurf noch einige Details, wie z.B. Verschraubungsmöglichkeiten, vernachlässigt. Die Bauteile können anfangs vom Einfachprüfbehälter entnommen und dem Konzept angepasst werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, neue Komponenten zu modellieren. Die Abstände der einzelnen Komponenten zueinander können im Grunde nur erahnt werden, da u.a. die Form der leitfähigen Bauteile die Feldstärkenverhältnisse bestimmen. Grundsätzlich ist die Höchstfeldstärke bei einer Prüfstrecke von 100 mm an der Prüfelektrode zu erwarten. Deshalb sind die Isolierabstände der hochspannungsführenden Komponenten der Prüfanordnung zur Gegenelektrode oder zur Erdtraverse größer als die minimale Prüfstrecke zu wählen. Als Hochspannungszuleitung wird ein glattes Rundrohr ( $\varnothing$  120 mm) mit einem direkten Übergang zum Prüfaufbau verwendet. Die Anordnung wird zu Anfang in einem rechteckigen Ölbehälter, ähnlich dem Doppelprüfbehälter untergebracht. Die Füllstandshöhe des Öls beträgt 990 mm und ist damit 80 mm unter dem Prüfbehälterrand.



Die Isolierabstände sowie die Geometrie der potenzialführenden Komponenten und des Ölbehälters werden im Laufe der Entwicklung mit den Ergebnissen der Feldberechnung iterativ angepasst. Das Basismodell für die Weiterentwicklung ist in dem **Bild 4-37** dargestellt.



**Bild 4-37** Erstentwurf des Konzepts in Inventor

#### 4.2.5.2 Physikalische Beschreibung und Vernetzung des Modells

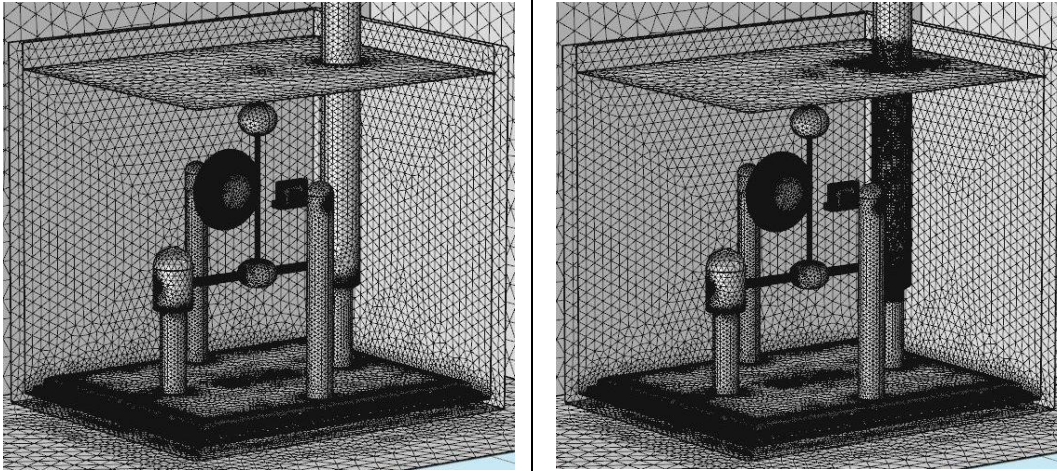
Nach der Modellierung ist das 3D-Modell im Feldberechnungsprogramm über die Schnittstelle „LiveLink“ zu importieren. Als Eingangsspannung für die Simulation wird die maximale Prüfspannung von 400 kV vorgegeben. Der Raum um die Prüfanordnung hat eine Größe von 2 m x 2 m x 1,5 m (B x H x T). Die physikalische Beschreibung der Bauteile erfolgt über die relativen Dielektrizitätszahlen. Anschließend ist den Flächen bzw. Rändern der leitfähigen Komponenten ein Potenzial zuzuweisen. Bei der Vernetzung des Modells sollte ein freies Tetraedernetz verwendet und die Elementgröße auf den vordefinierten Parameter „extra fein“ eingestellt werden. Dadurch können im Voraus aus den Simulationsergebnissen kritische Bereiche in der Prüfanordnung erkannt werden. Dann ist eine feinere Diskretisierung der einzelnen Bereiche vorzunehmen. Dabei sollte immer nur ein Bereich genauer betrachtet werden, um die Rechenzeit gering zu halten. Des Weiteren ist bei der Diskretisierung zu achten, dass eine Überschneidung der Geometrien aufgrund von Abhängigkeiten bei der Baugruppenerstellung in dem CAD-Programm vermieden wird. Eine Beschreibung zum Thema „Vernetzung von 3D-Modellen“ steht als Lernvideo im Hochspannungslabor zur Verfügung stehen. Das **Bild 4-38** zeigt das 3D-Modell und die Anzahl der Elemente nach der Vernetzung mit und ohne Verfeinerung des Bereichs der HS-Zuleitung.

Art der Vernetzung um kritische Feldstärkebereiche zu erkennen

Anzahl der Elemente: 2.453.346

Genauere Betrachtung der kritischen Bereiche durch eine feinere Diskretisierung

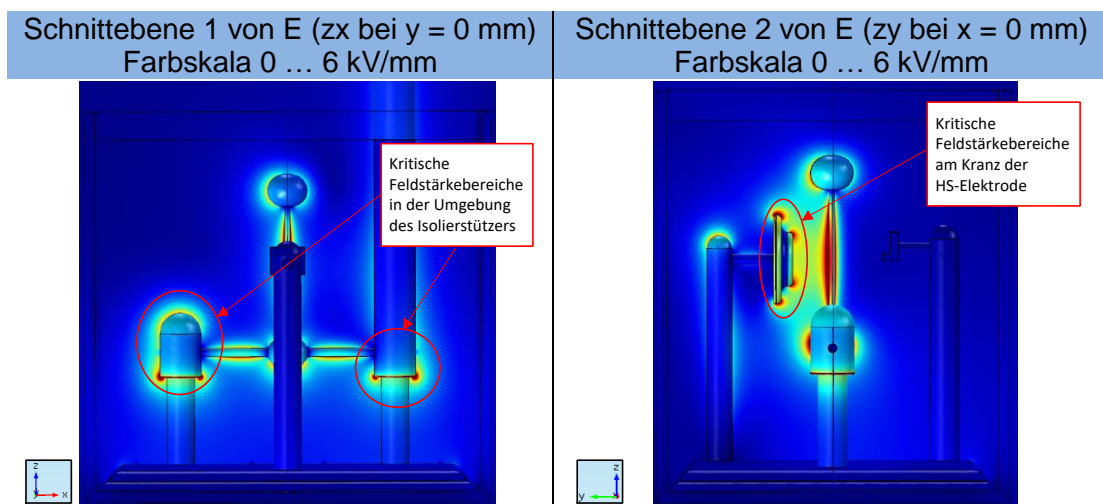
Anzahl der Elemente: 9.396.009



**Bild 4-38** Vernetzung des 3D-Modells und Anzahl der Elemente

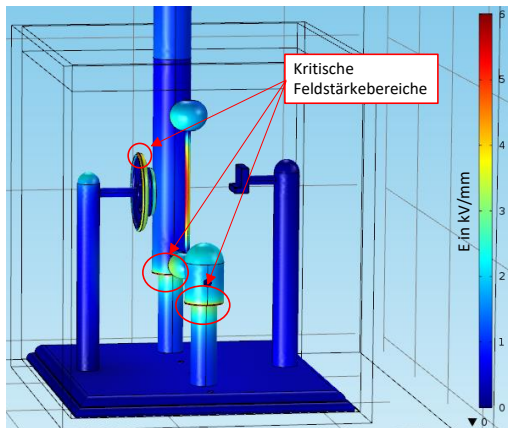
#### 4.2.5.3 Kritische Feldstärkebereiche am Grundmodell

Zur Ermittlung der kritischen Feldstärkebereiche werden Schnittebenen in den Raum gelegt. Um auf die Höchstfeldstärken in der Prüfanordnung zu schließen, sollte der Farbbereich entsprechend den einzuhaltenden Feldstärken angepasst werden. Die Feldstärkebeträge können direkt aus den Schnittebenen entnommen werden. Für den Entwicklungsprozess ist die Ermittlung der Feldstärken in der Prüfanordnung mithilfe der Liniendiagramme nicht angebracht, da durch die geometrische Veränderung der Bauteile die Koordinaten erneut anzupassen wären. Das **Bild 4-39** zeigt anhand der Schnittebenen die Bereiche mit den höchsten Feldstärken im Prüfaufbau.



**Bild 4-39** Kritische Feldstärkebereiche anhand der Schnittebenen erkennen

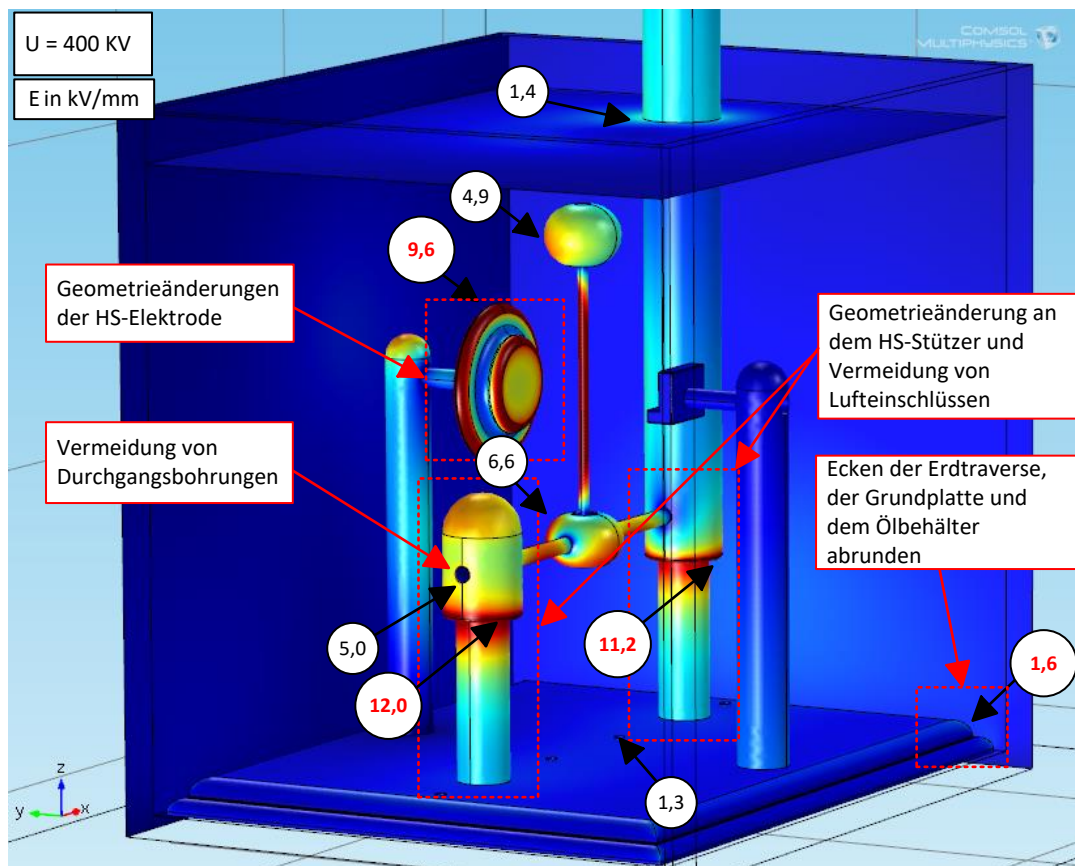
Eine weitere Möglichkeit ist es, anhand der Oberflächenabbildung des Feldstärkebetrags auf den Rändern der Prüfanordnung kritische Feldstärkebereiche zu erkennen, siehe **Bild 4-40**. Es ist zu erwähnen, dass es sich hierbei nur um das Erkennen der kritischen Bereiche handelt. Die Feldstärkebeträge repräsentieren aufgrund des Randproblems nicht den exakten Feldstärkewert.



**Bild 4-40** Kritische Feldstärke-bereiche anhand der Oberflächenabbildung der Prüfanordnung von E

#### 4.2.5.4 Optimierende Bereiche des Grundmodells

Anhand der Feldberechnungen können in den weiteren Schritten Optimierung am Grundmodell unternommen werden. Dieser iterative Prozess ist sehr aufwendig, da u.U. gleichzeitig mehrere Bauteile in dem CAD-Programm anzupassen sind. Gegebenenfalls ist der Einfluss auf die Feldverteilung zu überprüfen. Die notwendigen Änderungen am Aufbau werden zusammenfassend in dem **Bild 4-41** dargestellt.

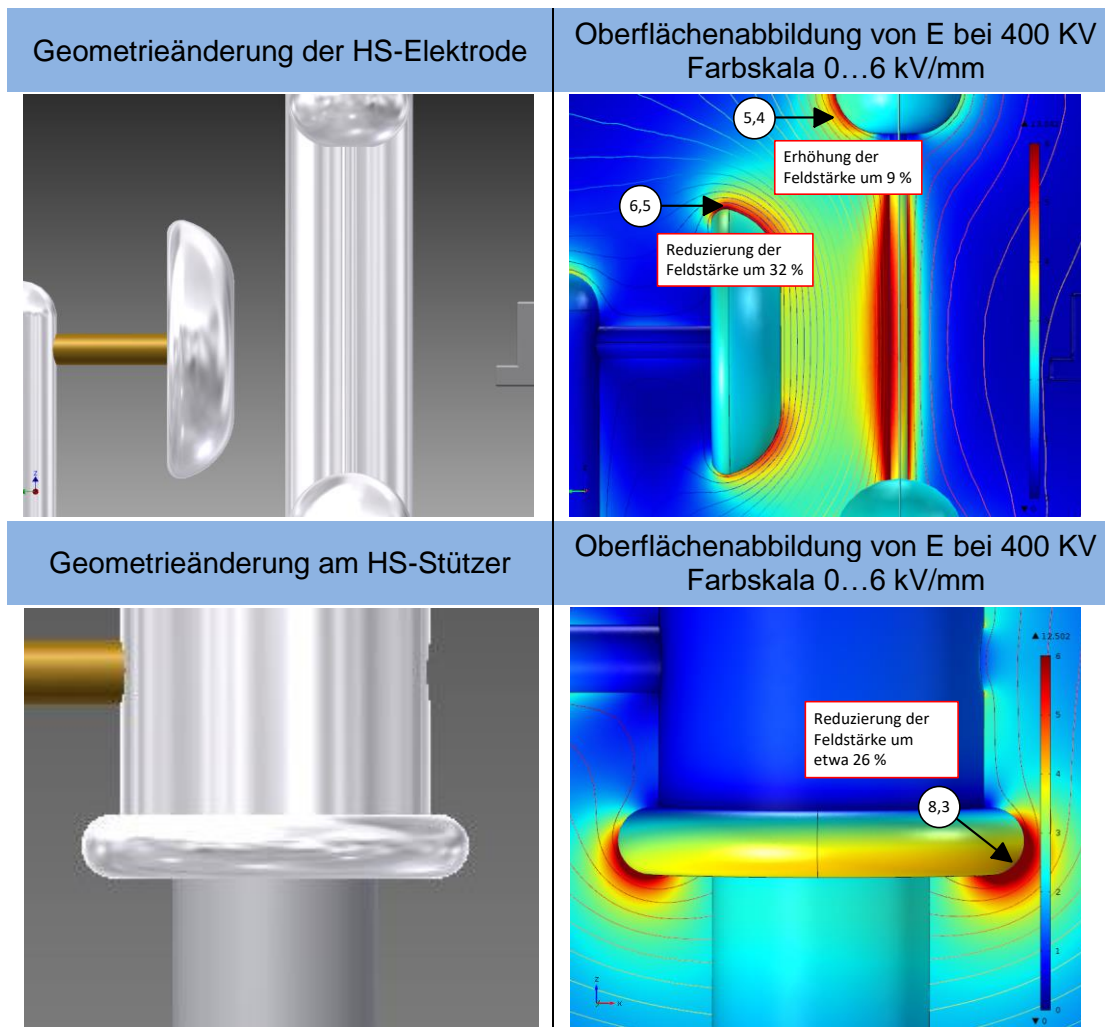


**Bild 4-41** Notwendige Änderungen am Grundmodell unter Berücksichtigung der Designregeln, Elektrodenabstand 100 mm

Die wichtigsten Änderungen betreffen die Form der HS-Elektrode, des HS-Stützers und die Geometrie des Ölbehälters. Unbedingt zu vermeiden sind Lufteinschlüsse an den Befestigungspunkten des Isolierstützers an der Erdtraverse bzw. an der HS-Säule.

#### 4.2.5.5 Feldwirkung bei veränderter Geometrie

Durch konstruktive Eingriffe an den potenzialführenden Bauteilen können die Randfeldstärken reduziert werden. Grundsätzlich ist dabei die Geometrie an dem Verlauf der Äquipotentiallinien anzupassen. Das **Bild 4-42** zeigt eine Version der HS-Elektrode ohne veränderten Elektrodenabstand sowie eine Möglichkeit, die Feldstärke an der Abrundung des HS-Stützers ohne Vergrößerung der Isolierstützerhöhe zu reduzieren. Dazu wird der Kranz der HS-Elektrode entfernt und ein größerer Ring am HS-Stützer vorgesehen.



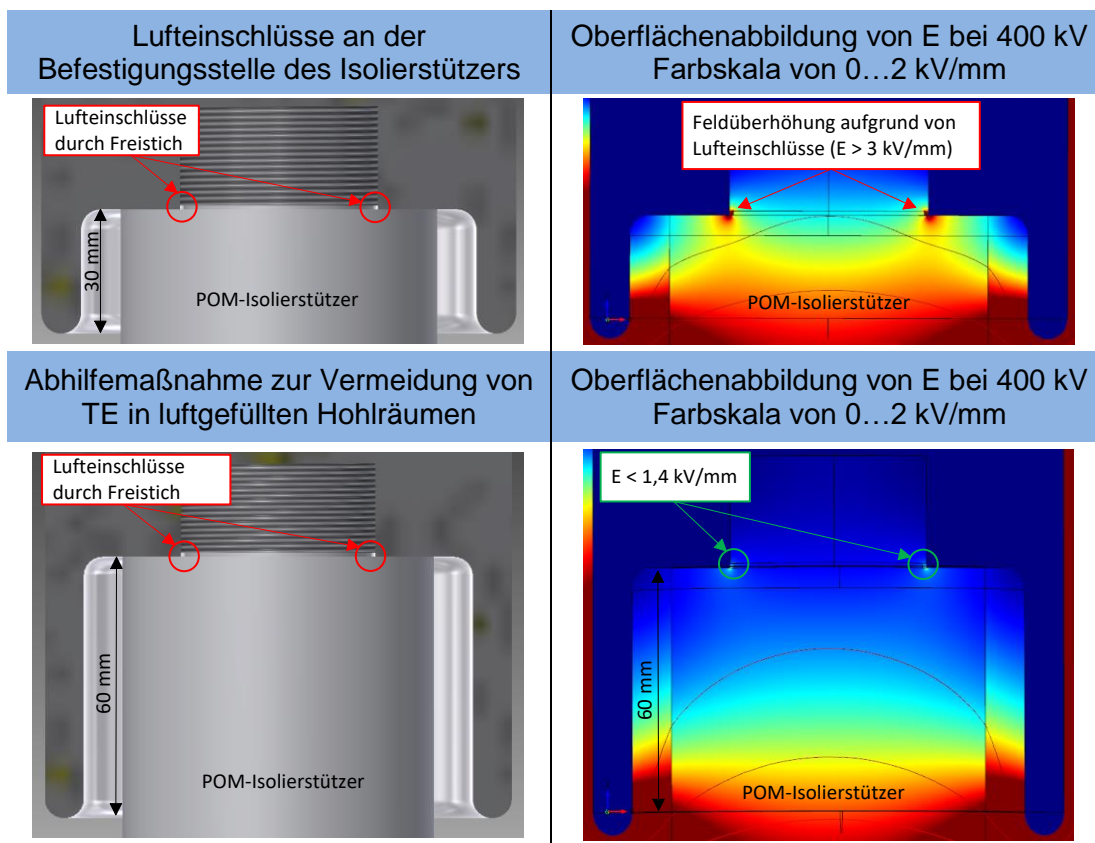
**Bild 4-42** Feldverteilung im Öl durch Geometrieänderungen der HS-Elektrode und des HS-Stützers

Durch geschickte Formänderungen kann die Randfeldstärke im Öl gegenüber dem Erstentwurf um mehr als 30 % vermindert werden. Gleichzeitig sollte darauf geachtet werden, dass es an den gegenüberliegenden Bauteilen zu keiner massiven Feldüberhöhung kommt.

#### 4.2.5.6 Vermeidung von Lufteinschlüssen am Isolierstützer

Da an Vorversuchen festgestellt worden ist, dass an den Befestigungspunkten des Isolierstützers unterhalb von 400 kV zu Teilentladungen gekommen ist, wird auf die Problemstelle näher eingegangen.

Prinzipiell kann die HS-Säule direkt auf den Isolierstützer gesteckt und von außen mit Schrauben fixiert werden. Bei direktem Anliegen des Isolierstützers in der Bohrung sind keine Lufteinschlüsse vorhanden. In diesem Aufbau sollten, wenn möglich, keine Bohrungen an den hochspannungsführenden Teilen für die Befestigung verwendet werden. Daher werden die Isolierstützer in die HS-Säule verschraubt. Ein Freistich am Gewinde des Isolierstützers ist aus fertigungstechnischen Gründen unvermeidlich. Beim Verschrauben wird Luft in diesem Einstich eingeschlossen und kann beim Anliegen der HS-Säule nicht entweichen. Feldberechnungen zeigen, dass es an dieser Stelle zu erhöhten Feldstärken kommen kann, wenn nicht entsprechende Maßnahmen getroffen werden. Folgendes **Bild 4-43** dient der Erläuterung des Problems und zeigt Abhilfemaßnahmen zur Vermeidung von Teilentladungen aufgrund von Lufteinschlüssen im Freistich.



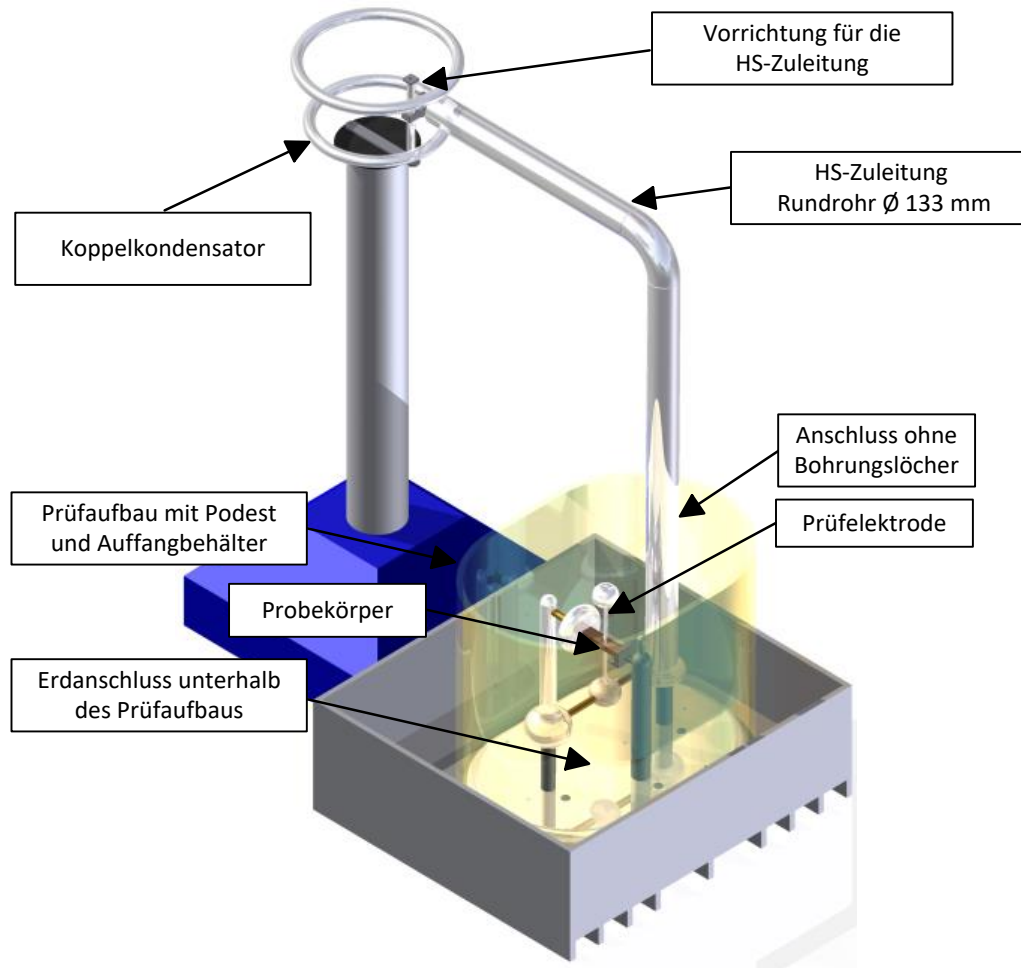
**Bild 4-43** Feldüberhöhung durch Lufteinschlüsse unterhalb der HS-Säule am Isolierstützer und Maßnahme zur Abhilfe

#### 4.2.6 Prüfaufbau unter Berücksichtigung der Designregeln

Nach zahlreichen Simulationen und unter Berücksichtigung der einzelnen Entwicklungsschritte ergibt sich folgender Prüfaufbau, siehe **Bild 4-44**.

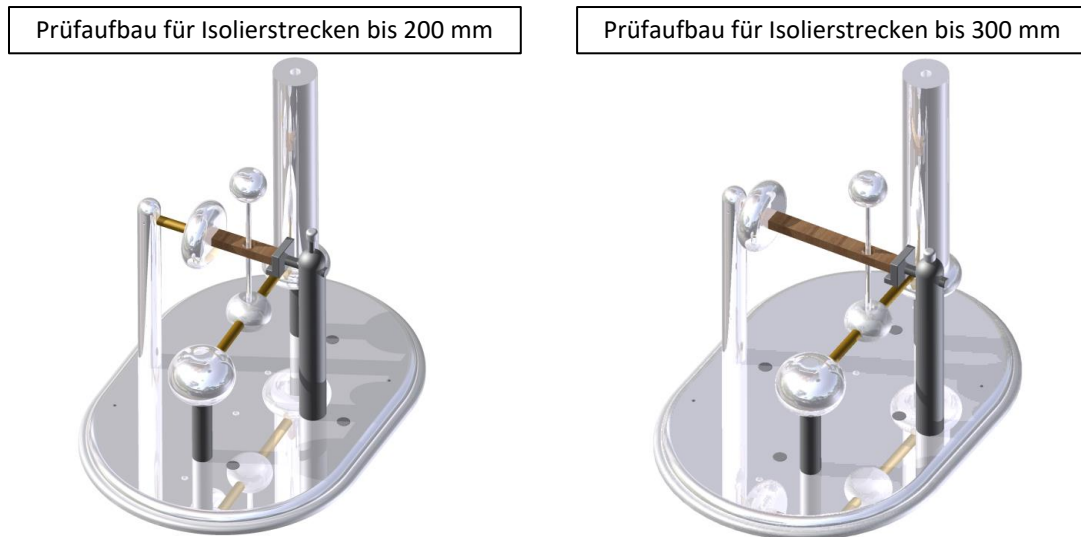
Die geometrischen Abmessungen und die Isolierabstände können aus dem CAD-Programm entnommen werden. Der Durchmesser der HS-Zuleitung wurde aufgrund von Lieferschwierigkeiten auf 133 mm erhöht. Der Erdanschluss des Prüfaufbaus befindet sich unterhalb der

Grundplatte im feldfreien Raum und ist von außen erreichbar. Um die Beweglichkeit der HS-Zuleitung, die ein flexibler Schlauch bietet, möglichst beizubehalten, wurde eine spezielle Vorrichtung entwickelt. Für die Form des Ölbehälters wurde eine ovale Geometrie gewählt, um zum einen das Ölvolumen gering zu halten und zum anderen die Randfeldstärken an den Ecken der Erdtraverse und der Grundplatte sowie zum Prüfbehälterrand zu reduzieren.



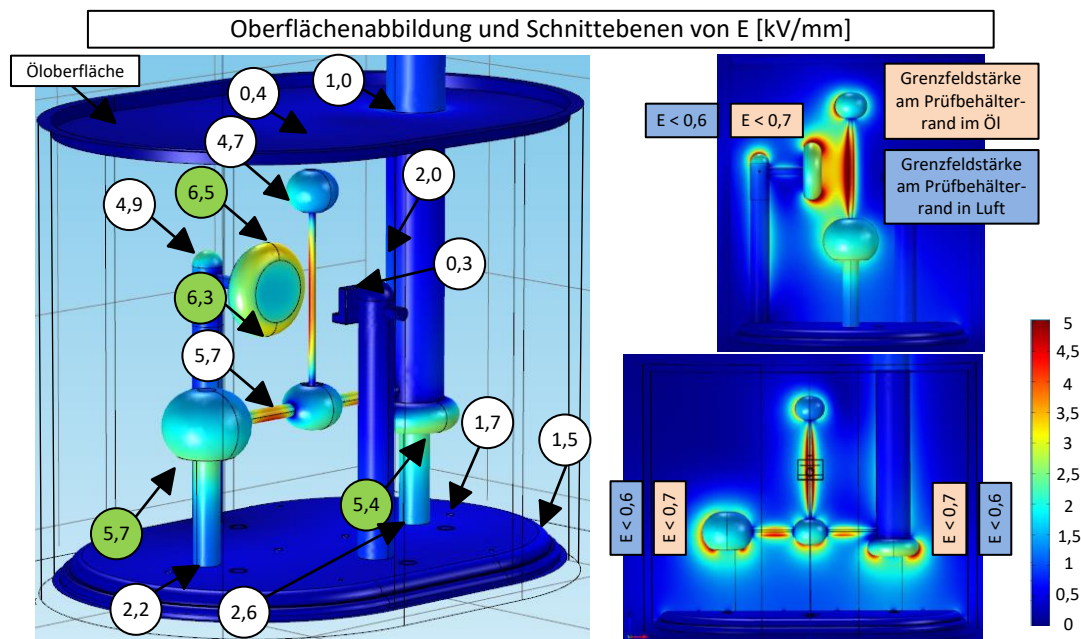
**Bild 4-44** Modell des vollständigen Prüfaufbaus für Isolerstrecken bis 200 mm mit Anbindung zum Koppelkondensator

Um in Zukunft Isolerstrecken größer als 200 mm prüfen zu können, kann das Innenleben des Prüfaufbaus von der Mitte um 100 mm versetzt werden. Dazu sind in der Erdtraverse Befestigungsmöglichkeiten vorhanden. Das **Bild 4-45** zeigt den Prüfbehälter ohne Ölbehälter für unterschiedliche Isolerstrecken.



**Bild 4-45** Prüfanordnung ohne Ölbehälter für unterschiedliche Isolierstrecken

Eine Übersicht der Feldstärken innerhalb des Prüfaufbaus ohne Prüfkörper für Isolierstrecken bis 200 mm ist in dem **Bild 4-46** dargestellt.



**Bild 4-46** Übersicht der Feldstärken des Prüfaufbaus für Isolierstrecken bis 200 mm bei  $U = 400$  kV und einem Elektrodenabstand von 100 mm

## 4.2.7 Simulationsmodell zur Ermittlung der Feldstärken

### 4.2.7.1 Prüfkörpermodell für die Simulation

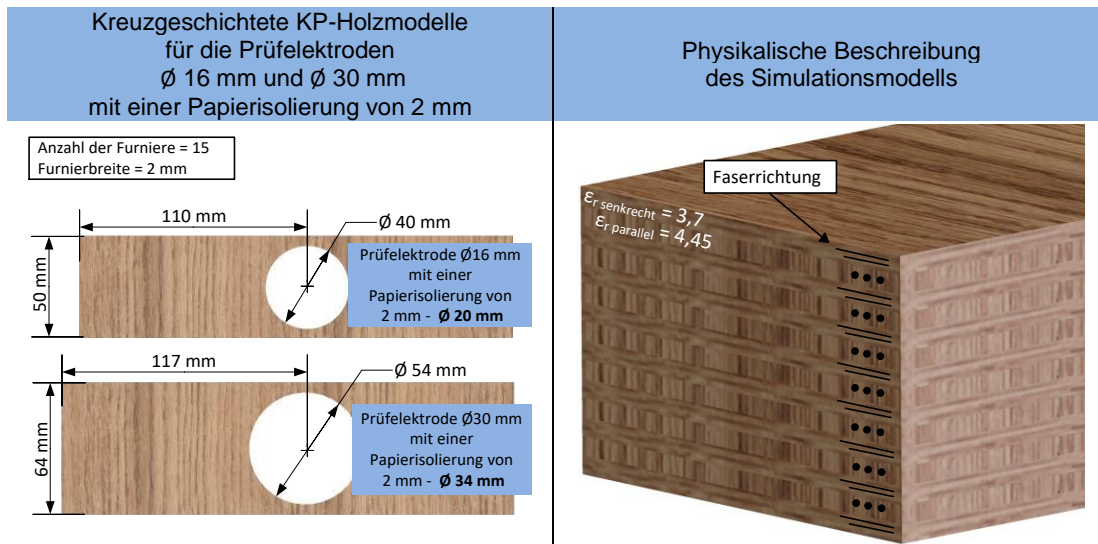
Zu Beginn sollte mit einem leichtverdichteten und kreuzgeschichteten Material und mit einer Dichte von  $0,95 \text{ g/cm}^3$  gerechnet werden. Abzüglich der 5 % Feuchtigkeit von der Ausgangsdichte nach dem Trocknungsverfahren kann die Materialdichte von getrocknetem Material bestimmt werden. Anhand dieses Werts kann die relative Dielektrizitätszahl für parallel und

senkrecht verlaufende Fasern aus der **Tabelle 4-9** bestimmt werden. Folgende Werte wurden für die Simulation entnommen:

**Tabelle 4-9** Relative Dielektrizitätszahlen für parallel und senkrecht laufende Fasern von leichtverdichteten kreuzgeschichteten KP-Holz

Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte nach Trocknung $\rho_{(\text{Trocken})}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\epsilon_r$ parallel	$\epsilon_r$ senkrecht
0,95	0,90	3,7	4,45

Das Modell wird aus 15 einzelnen Furnieren mit einer Breite von 2 mm erzeugt. Der Lochdurchmesser des Modells wird so gewählt, dass eine Prüfelektrode mit einer Papierschichtdicke von 2 mm und eine Ölstrecke von 10 mm gegeben ist. Im Grunde können unterschiedliche Parameter an dem Modell geändert werden, wie z.B. die Materialdicke oder der Lochdurchmesser. Zu Anfang galt es, die Isolierstrecke bei fester Ölspaltweite von 10 mm und unterschiedlichen Prüfelektroden mit einer Papierisolierung von 2 mm zu verändern und die resultierende Feldverteilung zu beobachten. Für das verwendete Isolierpapier der Firma „Bayka Bayerische Kabelwerk“ wurde eine relative Dielektrizitätszahl von  $\epsilon_r = 3,4$  ermittelt.

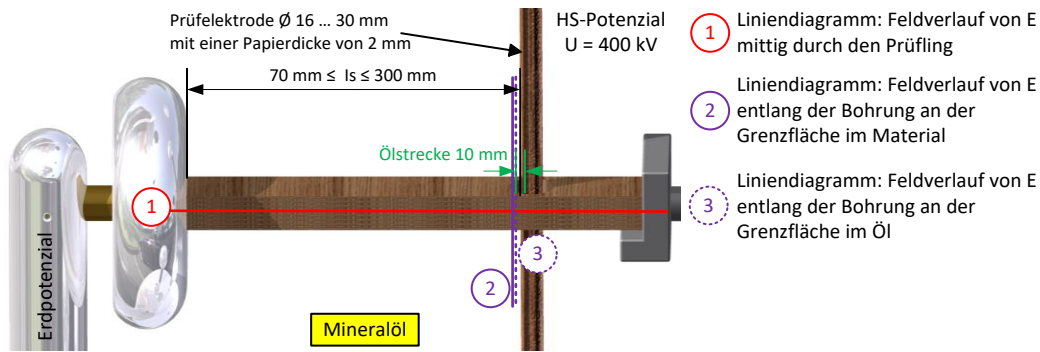


**Bild 4-47** Simulationsmodell einer kreuzgeschichteten KP-Holzprobe

#### 4.2.7.2 Grundsätzlicher Feldverlauf im Öl und im Material

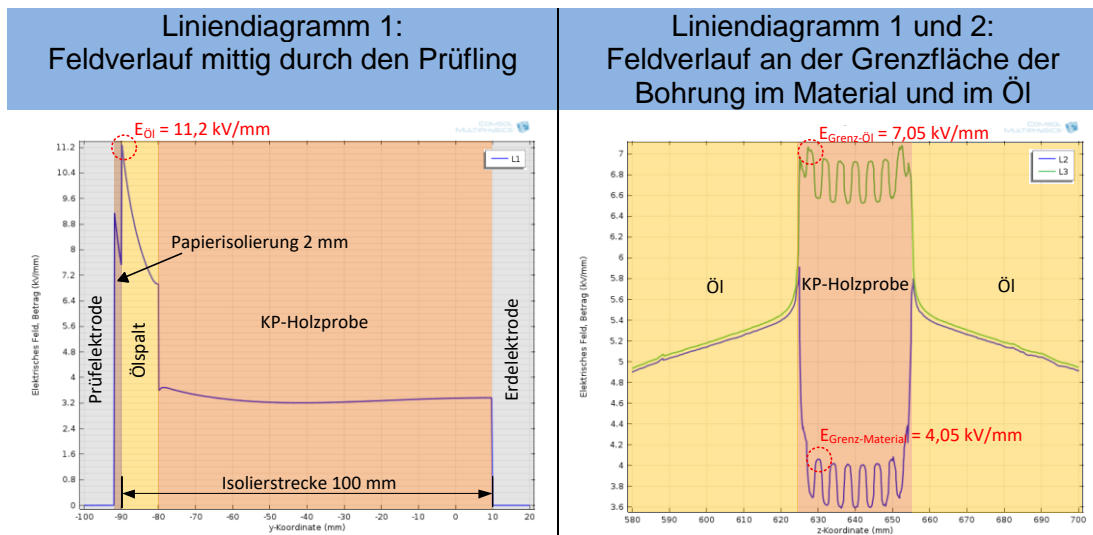
In der näheren Betrachtung soll der Feldverlauf bei unterschiedlichen Isolierstrecken untersucht werden. Um die Feldbeanspruchung des Materials zu erhöhen, werden ebenso Isolierstrecken von 70 mm untersucht. Untersuchungen von kleineren Isolierstrecken sind grundsätzlich möglich. Die Modellanordnung und die gewählten Liniendiagramme sind in dem **Bild 4-48** dargestellt. In der DVD sind die einzelnen Liniendiagramme, das Comsol- und das CAD-Modell zu finden. Ebenso wurden Feldberechnungen bei gleicher Anordnung ohne Papierisolierung unternommen.





**Bild 4-48** Simulationsmodell und gewählte Liniendiagramme zur Ermittlung der Feldstärken im Öl und im Material bei unterschiedlichen Isolierstrecken

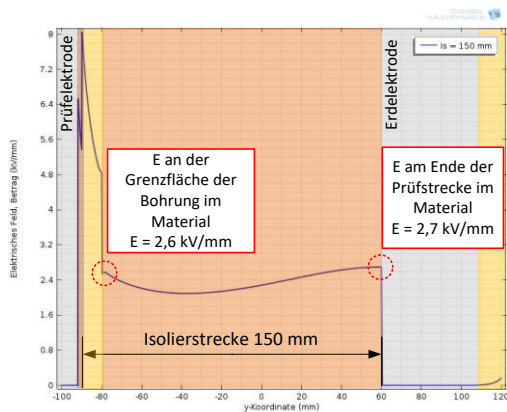
Der Feldverlauf für eine Isolierstrecke von 100 mm im Öl sowie an der Grenzfläche der Bohrung im Öl und im Material ist in dem **Bild 4-49** dargestellt.



**Bild 4-49** Feldverlauf bei einer Isolierstrecke von 100 mm, einer Prüfelektrode  $\varnothing$  16 mm und einer Papierschichtdicke von 2 mm bei  $U = 400$  kV

Die Maximalfeldstärke im Ölkanal ist an der Grenzfläche der papierisolierten Prüfelektrode im Öl zu finden. Bei dem Liniendiagramm entlang der Bohrung im Material und im Öl ist der Einfluss der Anisotropie des Materials deutlich zu erkennen. Die hohen Feldstärkenspitzen erklären sich durch die scharfen Kanten an der Bohrung der Probe. In der Realität ist eine ideale scharfe Kante an den Prüflingen nicht gegeben, sodass die Feldstärkenspitzen bei der Beurteilung der Feldbeanspruchung des Materials vernachlässigt werden können. Des Weiteren wurde bei bisherigen Durchschlagsuntersuchungen mit ölprägniertem KP-Holz und nicht anliegenden Elektroden beobachtet, dass ein Entladungskanal nicht immer am Rand der Prüflinge zu sehen war. Aus dem **Bild 4-49** ist im Öl eine maximale Feldstärke  $E_{\text{Öl}}$  von 11,2 kV/mm zu entnehmen. Im Material und an der Grenzfläche der Probe im Öl ist eine Feldstärke von  $E_{\text{Grenz-Material}} = 4,05$  kV/mm und  $E_{\text{Grenz-Öl}} = 7,05$  kV/mm zu finden.

Ab einer Isolierstrecke von 150 mm sollte der Durchmesser der Erdelektrode vergrößert werden, weil es zu einer Feldüberhöhung im Material am Ende der Prüfstrecke von etwa 4 % gegenüber der Grenzfeldstärke an der Bohrung im Material kommt, siehe **Bild 4-50**.

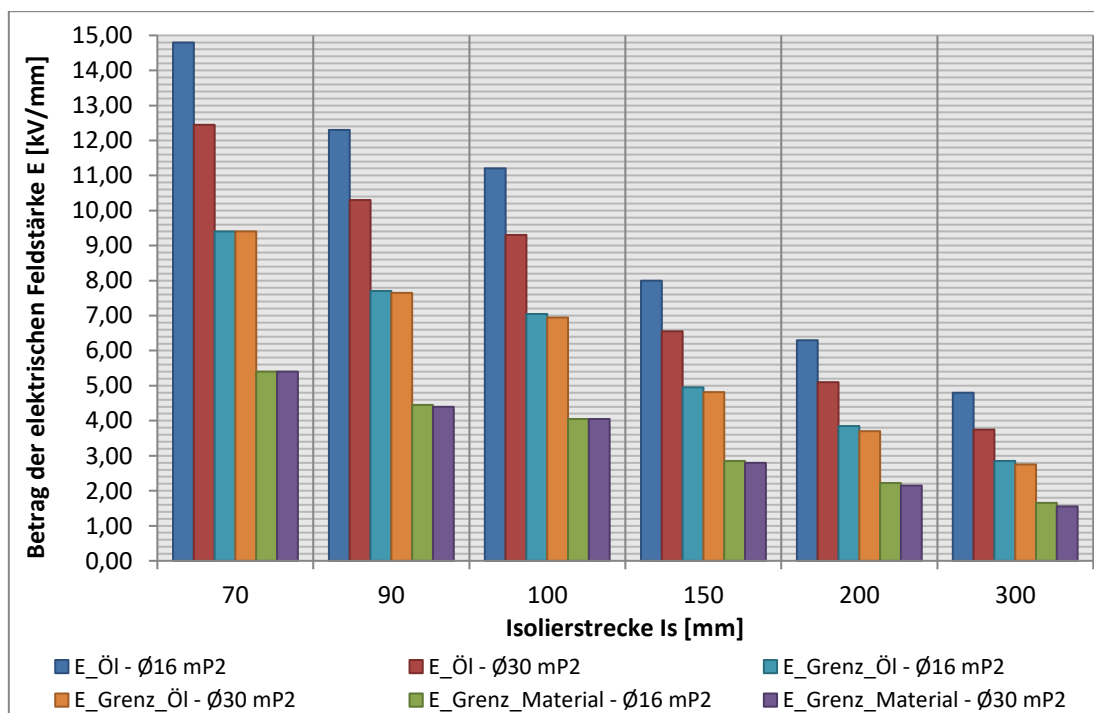


**Bild 4-50** Feldüberhöhung im Material ab Isolierstrecken von 150 mm bei einem Durchmesser der Prüffläche der Erdelektrode von 140 mm

Bei größeren Isolierstrecken können sich die Feldstärken bis zu 24 % unterscheiden.

#### 4.2.7.3 Feldstärken im Öl und Material bei unterschiedlichen Isolierstrecken

Die zu erwartenden Feldstärken im Ölspalt  $E_{\text{Öl}}$ , an der Grenzfläche der Bohrung im Material  $E_{\text{Grenz-Material}}$  und im Öl  $E_{\text{Grenz-Öl}}$  werden in Bezug auf das vorangehende Unterkapitel für unterschiedliche Isolierstrecken mit beiden papierisolierten Prüfelektroden ( $\varnothing 16$  mm und 30 mm) in dem **Bild 4-51** dargestellt.



**Bild 4-51** Erwartende Feldstärken im Ölspalt  $E_{\text{Öl}}$ , an der Grenzfläche der Bohrung im Öl  $E_{\text{Grenz-Öl}}$  und im Material  $E_{\text{Grenz-Material}}$  für die Prüfelektroden  $\varnothing 16$  mm und  $\varnothing 30$  mm mit einer Papierschichtdicke von 2 mm (mP2) und einem Ölspalt von 10 mm bei einer Spannung von 400 kV in Abhängigkeit von der Isolierstrecke  $I_s$

Anhand von **Bild 4-51** ist zu erkennen, dass die Maximalfeldstärken im Öl an der Grenzfläche der Papierisolierung auftreten. Durch Vergrößerung des Durchmessers der Prüfelektrode bei gleicher Papierschichtdicke kann die Feldbeanspruchung im Ölspalt reduziert werden, ohne dabei die elektrische Belastung des Materials zu verändern. Dadurch kann ein frühzeitiger

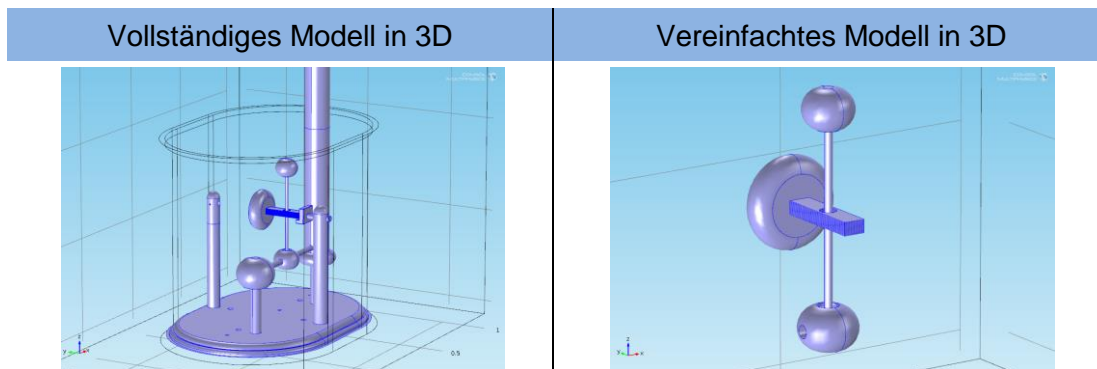
Zusammenbruch des Ölkanals bei der Materialprüfung vermieden werden. Eine weitere Möglichkeit zur Entlastung des Ölspalts kann mithilfe größerer Papierschichtdicken erreicht werden [1]. Ohne eine Papierisolierung erhöhen sich die Feldstärken im Ölspalt für die Prüfelektroden des Durchmessers 16 mm um etwa 16 bis 18 %. Bei den Prüfelektroden mit einem Durchmesser von 30 mm treten im Ölspalt etwa 8 – 9 % höhere Feldstärken auf. Bei einer Isolierstrecke von 70 mm wird das Material mit einer Feldstärke von 5,4 kV/mm elektrisch beansprucht. Mit zunehmendem Abstand sinkt die Feldstärke im Material bei einer Isolierstrecke von 300 mm auf etwa 1,6 kV/mm ab.

Für die Voruntersuchungen des Durchschlagverhaltens wird ein leichtverdichtetes Material gewählt, um ähnliche Feldverhältnisse erreichen zu können. Als Isolierstrecken kommen die Längen 70 mm und 100 mm vor.

#### 4.2.7.4 Vergleich von Simulationsmodellen bei der Feldberechnung

Für das Design des Prüfbehälters war eine vollständige Simulation der Anordnung unvermeidlich, da nur durch die Zusammenwirkung aller Komponenten eine optimale Auslegung erstellt werden konnte. Für die Feldberechnung in den vorherigen Kapiteln wurde mit einem vollständigen Simulationsmodell des Prüfaufbaus für Isolierstrecken bis 300 mm gerechnet. Dabei wurde jedoch die Welle von der Erdelektrode entfernt, um keine manuelle Anpassung der Länge im CAD-Programm vornehmen zu müssen. Eine globale Variable wurde zur Längenänderungen der Isolierstrecke eingeführt. Um die Rechenzeit zu verringern und ein besseres Ergebnis durch eine feinere Vernetzung erreichen zu können, wurde das vollständige Simulationsmodell auf den unmittelbaren Prüfbereich beschränkt. Für Isolierstrecken kleiner als 100 mm ist die Änderung der Feldverteilung im Vergleich zu der vereinfachten Modellierung zum vollständigen Simulationsmodell vernachlässigbar klein. Bei größeren Isolierstrecken zwischen 200 mm – 300 mm kann ein Unterschied der Feldstärken von 7 - 10 % festgestellt werden. Nach dem Import der vollständigen Geometrie kann das vereinfachte Modell in Comsol erstellt werden. Dazu sind alle Bauteile, die nicht im direkten Kontakt zum Prüfling stehen, in Comsol zu entfernen. Anschließend ist der Umgebung die Eigenschaft des Mineralöls zuzuweisen.

Das vereinfachte Modell der Prüfanordnung entspricht dem Simulationsmodell der Bachelorarbeit [1]. Das vollständige und vereinfachte Simulationsmodell zur Feldberechnung ist in dem **Bild 4-52** zu sehen.



**Bild 4-52** Vergleich von Simulationsmodellen bei der Feldberechnung

Zur Auswertung zukünftiger Messergebnisse kann bei kurzen Isolierstrecken ( $l_s \leq 70$  mm) das vereinfachte Simulationsmodell verwendet werden.

### 4.3 Hochspannungsuntersuchungen

Zunächst werden einige TE- und Durchschlagsversuche mit ausgewählten Prüfkörpern und Prüfelektroden unternommen. Die Versuche dienen aufgrund der geringen Anzahl der Proben zur Orientierung des Durchschlagsverhaltens. Die allgemeine Beschreibung der Betriebsmittel und Messeinrichtungen richtet sich nach den Kapiteln „Versuchsaufbau“ der bisherigen Diplom- und Bachelorarbeiten [6], [10], [11].

#### 4.3.1 Auswahl der Prüflinge und der Prüfelektroden

##### 4.3.1.1 Prüflinge für Voruntersuchungen

Die Prüflinge aus KP-Holz werden von dem Unternehmen Röchling Engineering Plastics KG bereitgestellt.

Für die Durchschlagsuntersuchungen sowie für die dielektrische Untersuchung werden die KP-Holzproben aus einer längsgeschichteten und leichtverdichteten KP-Holzplatte (LI /2 E3 – DIN 7707) entnommen. Der Bohrungsdurchmesser der Proben wurde so gewählt, dass ein 10 mm großer Ölbestand zwischen den Prüfelektroden ( $\varnothing$  16mm und  $\varnothing$  30 mm) unter Berücksichtigung einer 2 mm dicken Papierschicht vorhanden ist. Für beide Prüfelektroden kommen als Isolierstrecken die Längen 70 mm und 100 mm vor. Somit stehen für Vorversuche vier Prüflinge zur Auswahl, siehe **Bild 4-53**.

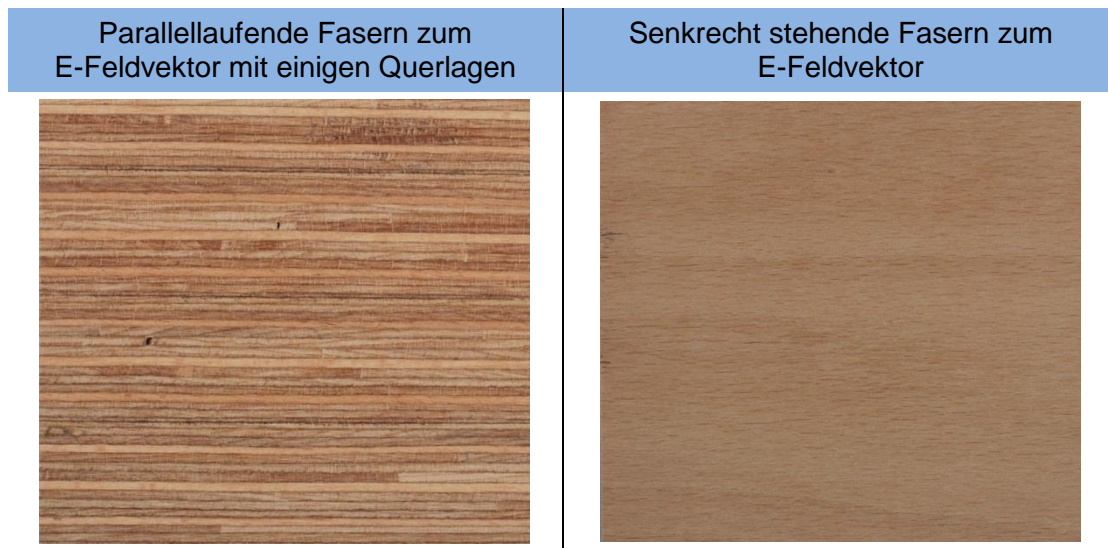


**Bild 4-53** Auswahl der KP-Holzproben für Vorversuche für die Isolierstrecken 70 mm, 90 mm und 100 mm

Sollte es bei einer Isolierstrecke von 100 mm nicht zum Durchschlag kommen, besteht die Möglichkeit, die Probe in der Prüfanordnung zu wenden. Dadurch verkürzt sich die Isolierstrecke auf 90 mm.

Um bei der Serienprüfung im zweiten Projektabschnitt aussagekräftige Ergebnisse über die Beeinflussungsgrößen des Durchschlagverhaltens nennen zu können, ist es besonders wichtig, dass nur ein Parameter bei der Prüfung verändert wird. Alle Versuchsproben sind nach Möglichkeit aus der gleichen Materialcharge zu fertigen. Dadurch können produktionsbedingte Materialänderungen, natürlich bedingte Dichteänderungen der Holzfurniere, unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit sowie eine unterschiedliche Anzahl von längs- oder querliegenden Furnieren vermieden werden. Des Weiteren sind für die Versuchsdurchführung nur die Prüflinge auszuwählen, welche keine sichtbaren Schäden bei der Anlieferung oder Fehlstellen aufweisen wie z.B. Riss- bzw. Astlöcher oder Überlappungen einzelner Furniere.

Zur Berechnung der Einsatzfeldstärken in den weiteren Arbeiten sind die faserrichtungsabhängigen Dielektrizitätszahlen aus der Materialcharge zu bestimmen. Für die dielektrischen Untersuchungen können dazu Proben mit einer Größe von 120 x 120 x 5 mm aus der KP-Holzplatte gefertigt werden, siehe **Bild 4-54**.

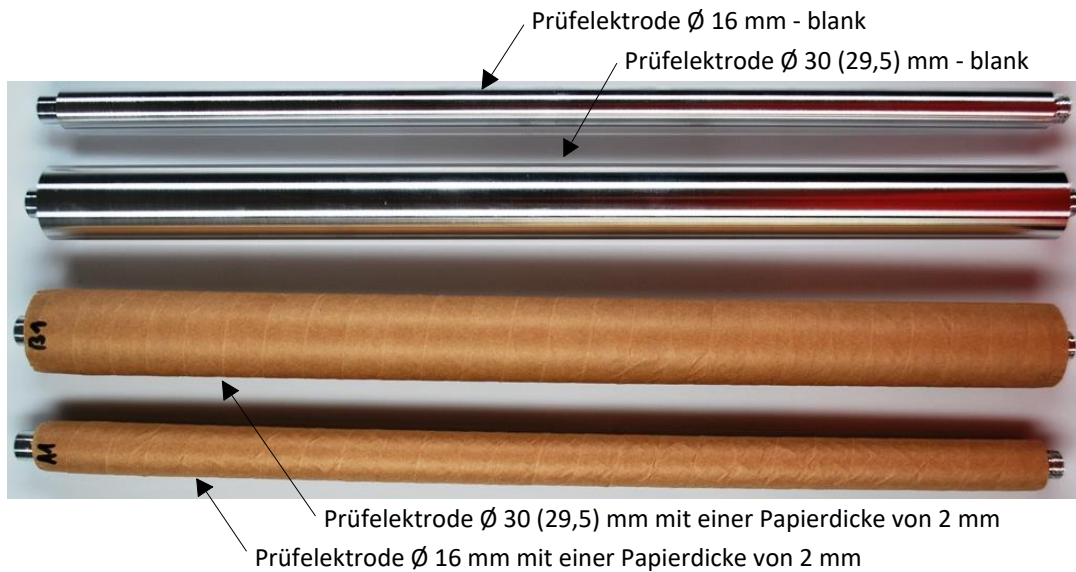


**Bild 4-54** Holzplatten aus der Materialcharge der Vorproben zur Messung der faserrichtungsabhängigen relativen Dielektrizitätszahl

Da zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätszahl von parallellaufenden Fasern in der KP-Holzplatte einige Querlagen vorhanden sind, dienen diese Ergebnisse nur als Vergleichswerte. Mithilfe von [9] kann mit der relativen Dielektrizitätszahl der senkrechten Fasern auf die parallellaufenden Fasern geschlossen werden.

#### 4.3.1.2 Prüfelektroden für Voruntersuchungen

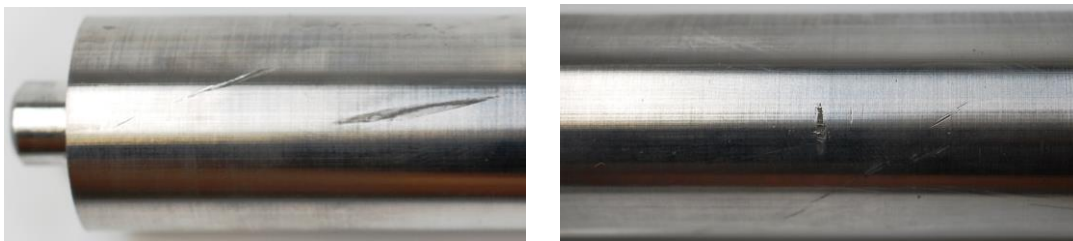
Zur Prüfung des TE-Verhaltens der Prüfanordnung und für die Vorversuche mit realen Prüfkörpern stehen folgende Prüfelektroden zur Verfügung (**Bild 4-55**).



**Bild 4-55** Ausgewählte Prüfelektroden für die Vorversuche

Bei dem papierumwickelten Leiter beträgt die Papierschichtdicke 2 mm. Auf die Vorbereitung der papierisolierten Prüfelektroden mit den technischen Möglichkeiten an der Hochschule Osnabrück wird weiter unten näher eingegangen.

Bei der Fertigung der Prüfelektroden mit einem Durchmesser von 30 mm wurden auf der Oberfläche markante Unebenheiten festgestellt (**Bild 4-56**). Solche Schäden auf der Elektrodenoberfläche sind generell zu vermeiden, da es an den Kanten zu einer hohen elektrischen Feldstärke und damit zu einer frühzeitigen Vorentladung kommen kann.



**Bild 4-56** Unebenheiten auf der Oberfläche der  $\varnothing$  30 mm – Prüfelektroden

#### 4.3.1.3 Testsznarien des Versuchsaufbaus

Bevor mit den Durchschlagsuntersuchungen an realen Prüflingskörpern begonnen werden kann, ist der Prüfaufbau auf das TE-Verhalten bis zu einer Spannung von 400 kV zu untersuchen. Dazu wird der Versuchsaufbau bis zur maximalen Prüfspannung bei einem festen Elektrodenabstand geprüft. Bei dem Testlauf mit papierisolierten Prüfelektroden sollte im Wesentlichen festgestellt werden, ob es aufgrund der Klebepunkte zum Fixieren der Papierlagen zu Teilentladungen kommt. Nach erfolgreichem Bestehen der Teilentladungsprüfung werden einige Vorversuche mit und ohne papierisolierten Prüfelektroden bei unterschiedlichen Isolierstrecken durchgeführt.

Eine Übersicht der Testsznarien ist in der **Tabelle 4-10** dargestellt:

**Tabelle 4-10** Übersicht der durchgeführten Tests

Nr.	Is [mm]	Prüfelektroden		Papierisolierte Prüfelektroden (Papierdicke = 2 mm)		Prüfkörper nach Kapitel 4.3.1.1
		∅ 16 mm	∅ 30 mm	∅ 16 mm	∅ 30 mm	
TE-Verhalten des Prüfaufbaus mit Prüfanlage						
Prüfelektroden ohne Papierisolierung bei unterschiedlichen Elektrodenabstände						
Prüfelektroden mit Papierisolierung bei unterschiedlichen Isolierstrecken						
1	80			X		
2	70				X	
Durchschlagsversuche bei unterschiedlichen Isolierstrecken						
Is = 100 mm						
3	100	X	X	X	X	X
Is = 90 mm						
4	90	X			X	X
Is = 70 mm						
5	70			X	X	X

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen dienen nur als Orientierungswerte für das Durchschlagsverhalten bei der Weiterführung des Projekts. Aufgrund des Aufwands bei der Vorbereitung (Bewickeln der Stäbe) kann nur eine geringe Anzahl von Versuchen durchgeführt werden. Die Hauptaufgabe dieser Arbeit ist es, einen teilentladungsfreien Prüfaufbau in das bestehende Prüffeld zu implementieren.

## 4.3.2 Teilentladungs- und Durchschlagsmesseinrichtungen

### 4.3.2.1 Teilentladungsmesseinrichtung

In der Regel werden Teilentladungen eines Geräts während der Stehspannungsprüfung gemessen. Für das Bestehen einer Prüfung ist somit nicht die kurzzeitige Festigkeit von Bedeutung, sondern auch die Intensität der TE-Impulse, die für bestimmte Geräteklassen in Normen empfohlen werden oder zwischen Hersteller und Kunde je nach Anwendung vereinbart wird [2].

Während einer TE-Messung werden Signale erfasst, die zum Grundstörpegel gehören und in keinem Zusammenhang mit dem Prüfbehälter oder dem Prüfling stehen. Diese Signale ähneln einem Rauschen und sind über den kompletten Frequenzbereich zu finden. Damit der Grundstörpegel auf einem verträglichen Niveau gehalten werden kann, wird ein hoher technischer Aufwand mit Filtern und Abschirmungen betrieben [4]. Grundlagen zum Teilentladungsmesskreis, scheinbare Ladung und Kalibrierung kann in der Literatur [2] und [4] herangezogen werden.

Im Labor der Hochspannungstechnik kann die Intensität des Grundstörpegels zwischen 600 nC - 800 nC liegen.

### 4.3.2.2 Durchschlagsmesseinrichtung

Kommt es während einer Prüfung zu einem Über- oder Durchschlag an dem Prüfaufbau, muss unmittelbar die Hochspannung abgeschaltet werden, da sonst der Lichtbogen im Öl erhöhte Verunreinigungen hervorruft oder die Oberfläche der Bauteile und der Elektroden zu stark beschädigt wird.

Zur Registrierung von Durchschlägen werden zwei verschiedene Messmethoden verwendet. Zum einen wird der kapazitive Strom während einer Prüfung gemessen. Überschreitet der Strom bei einem Durchschlag eine vorher eingestellte maximale Amplitude und / oder steigt die Stromsteilheit  $di/dt$  stark an, wird die Anlage vom Netz genommen.

Zum anderen gibt es die Möglichkeit, den Lichtbogen über die Messung der hochfrequenten elektromagnetischen Impulse (EMP) zu erfassen. Dazu ist eine regelbare Überwachungsvorrichtung mit der Hochspannungseinrichtung gekoppelt, welche die Signale über eine Antenne empfängt. Es ist darauf zu achten, dass eine zu feine Einstellung hochfrequente Signale von außen empfangen kann und dadurch eine Schnellabschaltung verursacht wird.

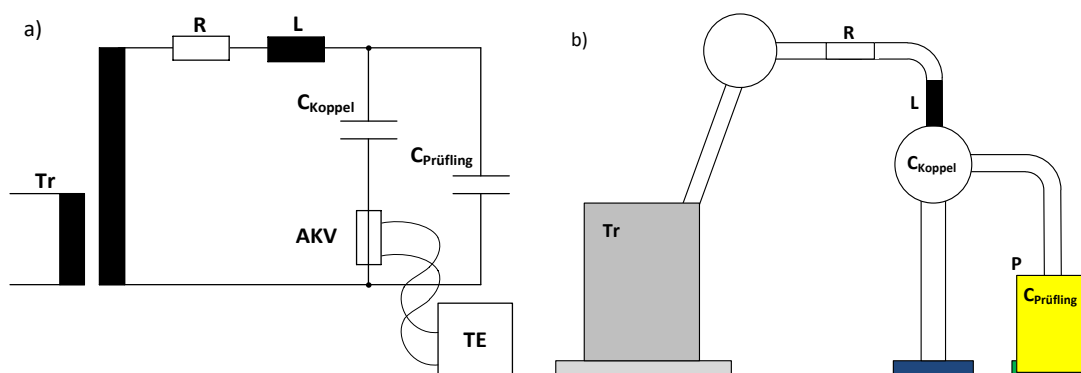


### 4.3.2.3 Prüfaufbau für TE- und Durchschlagsversuche

In dem **Bild 4-57** ist der fertiggestellte Prüfaufbau nach im Labor für Hochspannungstechnik zu sehen. Der schematische Aufbau und den dazugehörigen Schaltplan zeigt das **Bild 4-58**.



**Bild 4-57** Gesamtübersicht des vollständigen Prüfaufbaus und Kennzeichnung der Betriebsmittel im Labor für Hochspannungstechnik der Hochschule Osnabrück



**Bild 4-58** Aufbau der Prüfanlage, a) Schaltplan, b) Schematischer Aufbau; Tr = Transformator, R= Dämpfungswiderstand, L = Filterspule,  $C_{\text{Koppel}}$  = Koppelkondensator, AKV = Ankopplungsvierpol, P = Prüfbehälter,  $C_{\text{Prüfling}}$  = Prüflingskapazität, TE = Teilentladungsmessgerät über LWL angeschlossen

Die Hochspannung für den Prüfaufbau wird von dem einphasigen Hochspannungstransformator bereitgestellt. Anschließend folgt ein Tiefpassfilter 2. Ordnung bestehend aus einem Dämpfungswiderstand von 1 k $\Omega$ , einer Filterinduktivität von 600 mH und einem Koppelkondensator mit 1 nF, um den Einfluss hochfrequenter Netzstörungen aus dem Versorgungsnetz zu vermeiden.

Der Ankopplungsvierpol (AKV) ist in Reihe zum Koppelkondensator geschaltet. Den nachgeschobenen Ladungsimpuls  $Q_S$  stellt der Koppelkondensator bereit. Der AKV erfasst den TE-Strom bzw. den Ladungsimpuls als Spannungsimpuls und überträgt das Signal über eine Lichtwellenleitung (LWL) an den PC im Hochspannungslabor. Eine galvanische Trennung mit dem Lichtwellenleiter ist erforderlich, damit keine elektromagnetischen hochfrequenten Störungen von außerhalb in das Messsystem eingekoppelt werden.

Um verlässliche Messergebnisse während einer Teilentladungsuntersuchung zu erhalten, muss die gesamte Prüfanlage für die maximale Prüfspannung teilentladungsfrei sein. Dazu sind mehrere Maßnahmen im Prüffeld vorzunehmen. Alle metallischen Teile müssen auf ein definiertes Potenzial gehalten werden. Des Weiteren sind ausreichende Abstände zu den umgebenden Prüffeldgegenständen einzuhalten, damit u.a. keine Koronaentladungen an Ecken oder Kanten entstehen können. Neben diesen Vorkehrungen sind ausreichend große Radien der Verbindungsleitungen und der Einsatz von Toroiden an scharfen Kanten vorzunehmen.

#### 4.3.2.4 Hochspannungserzeuger

Die hohe Wechselspannung wird mithilfe einer Kaskade aus einem Stelltransformator und einem Prüftransformator der Firma Hipotronics erzeugt. Der Stelltransformator liefert die variable Ausgangswechselspannung von 0 – 400 V. Am Ausgang des Prüftransformators kann eine maximale Hochspannung von 400 kV erreicht werden. Bei einem Strom von 625 mA auf der Sekundärseite beträgt die Nennleistung 250 kVA.

#### 4.3.2.5 Prüfbehälter und Elektrodenanordnung

Das Innenleben des Prüfbehälters ist in dem **Bild 4-59** zu sehen. Die Hochspannungselektrode ist in Form eines Rundleiters gefertigt. Die Enden des Rundleiters sind zur Feldsteuerung mit Kugeln abgeschlossen. Die Prüflinge liegen auf der Probenhalterung aus POM auf und werden mit der Gegenelektrode auf der gegenüberliegenden Seite eingeklemmt gehalten. Bei einem Probenwechsel ist zuerst die obere Kugel am Ende des Rundleiters zu entnehmen. Anschließend kann die Prüfelektrode herausgeschraubt werden. Bevor der Prüfling eingesetzt wird, sollte vorerst die Prüfelektrode eingebaut sein.



**Bild 4-59** Elektrodenanordnung im Prüfbehälter im ursprünglichen Zustand ( $\varnothing$  Prüfelektrode = 16 mm, Isolierstrecke 80 mm)

Für die Untersuchung wird der Prüfbehälter mit dem aufbereiteten Mineralöl gefüllt. Dabei sollte der Abstand zwischen Öberfläche und Prüfbehälterrand nicht 30 mm unterschreiten oder 50 mm überschreiten.

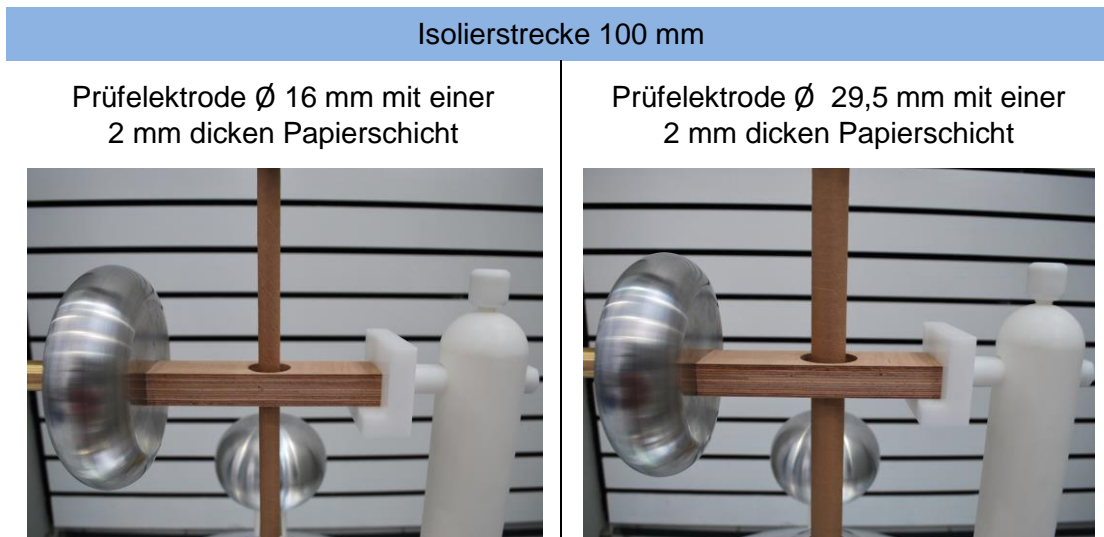
Für die Durchschlagsuntersuchungen an Probekörpern muss vor dem Befüllen die Position der Probenhalterung und der Erdelektrode für die jeweilige Isolierstrecke eingestellt werden. Für den Einstellvorgang können die nicht-imprägnierten Prüflinge und papierbewickelten Prüfelektroden verwendet werden.

Um einen zentrierten Aufbau zu garantieren, wurden spezielle Abstandshalter entwickelt, die in der Bohrung der Prüflinge eingesetzt werden und an den papierbewickelten Prüfelektroden anliegen. Diese können während eines Probenwechsels im Öl zur Nachjustierung oder bei der Voreinstellung verwendet werden. Das **Bild 4-60** zeigt einen Abstandshalter für eine Prüfelektrode mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Papierschichtdicke von 2 mm. Bei anderen Durchmessern der Prüfelektroden sind neue Abstandshalter zu fertigen.



**Bild 4-60** Voreinstellung der Prüfanordnung mithilfe eines kegelförmigen Abstandshalters

Die genaue Elektroden- und Prüflingsanordnung bei einer Isolierstrecke von 100 mm und verschiedenen Prüfelektroden ist in dem **Bild 4-61** dargestellt.



**Bild 4-61** Elektroden- und Prüflingsanordnung für TE- und Durchschlagsuntersuchungen bei einer Isolierstrecke von 100 mm

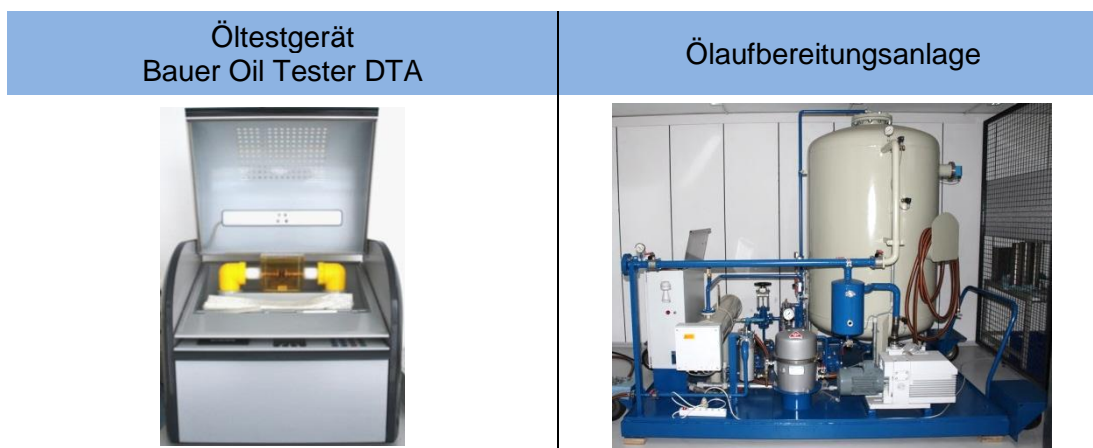
Bei den Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass ein Nachjustieren im Öl größtenteils nichts notwendig war. Sobald ein Prüflingswechsel stattgefunden hat, müssen Standzeiten bzw. Ruhephasen des Öls eingehalten werden. Die Wartezeit ist groß genug zu wählen, damit Durchschläge im Prüfaufbau vermieden werden. Des Weiteren sind Luftblasen auf der Öloberfläche zu entfernen.

### 4.3.3 Ölaufbereitung und Ölqualitätsüberwachung

Für die TE- und Durchschlagsuntersuchungen sowie die Imprägnierung der Prüflinge wird das Transformatoren-Öl „Shell Diala D Dried“ in der eigenen Ölaufbereitungsanlage gefiltert und auf 1 ppm getrocknet. In der hauseigenen Aufbereitungsanlage (**Bild 4-62 rechts**) kann eine maximale Ölmenge von 1000 Liter aufbereitet werden. Die Ölqualität erfüllt die Anforderungen der Norm IEC 60296.

Die Aufbereitung des Transformatoren-Öls ist mit großer Sorgfalt durchzuführen, da es bei unterschiedlichen Ölqualitäten zu Schwierigkeiten bei der Auswertung der Versuchsergebnisse kommt. Vor allem bei Untersuchungen mit einem Ölspalt wird das Transformatoren-Öl deutlich höher elektrisch beansprucht. Versuchsdurchschläge im Prüfaufbau oder der Zusammenbruch des Ölspalts liefern keine aussagekräftigen Ergebnisse bei den Einflussparametern des Isoliermaterials.

Für die Überwachung der Ölqualität wird an jedem Prüftag eine Ölprobe aus dem Prüfbehälter entnommen. Mithilfe des Öltestgeräts „Bauer Oil Tester DTA“ (**Bild 4-62 links**) wird die Probe nach VDE 0370 Teil 5: 1995 mit einem Elektrodenabstand von 2,5 mm auf die Durchschlagsfestigkeit überprüft. Bei der Prüfung werden zeitnah mehrere Durchschlagsspannungen aufgenommen. Der Mittelwert der Durchschlagsspannung bei 2,5 mm sollte nicht kleiner als 60 kV/mm sein.



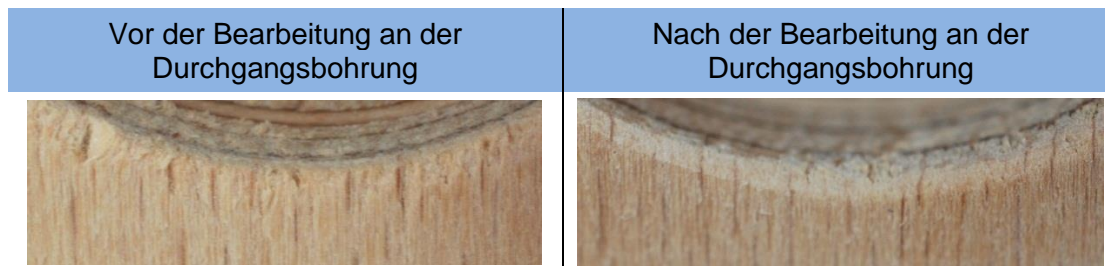
**Bild 4-62** Ölqualitätsüberwachung und Ölaufbereitungsanlage im Hochspannungslabor der Hochschule Osnabrück

## 4.4 Vorbehandlung und Aufbereitung der Proben

### 4.4.1 Vorbereitung der Vorproben

Aus fertigungstechnischen Gründen bei der Produktion der Vorproben sind die Durchgangsbohrungen der Prüflinge nicht nachbearbeitet worden. Die Oberfläche fühlt sich rau an und es sind abstehende Fasern zu erkennen. Für wissenschaftliche Untersuchungen an dem Material stellen solche Zustände unbefriedigende Ausgangspositionen dar.

Nach [1] sind höhere Feldstärken an scharfen Ecken und spitzen Überständen im Material wie auch im umgebenden Öl zu erwarten. Aus diesem Grund werden die Durchgangsbohrungen mit einem Schleifpapier der Körnung „P 320“ nachbearbeitet. Das **Bild 4-63** zeigt einen Ausschnitt der Durchgangsbohrungen vor und nach der Behandlung.



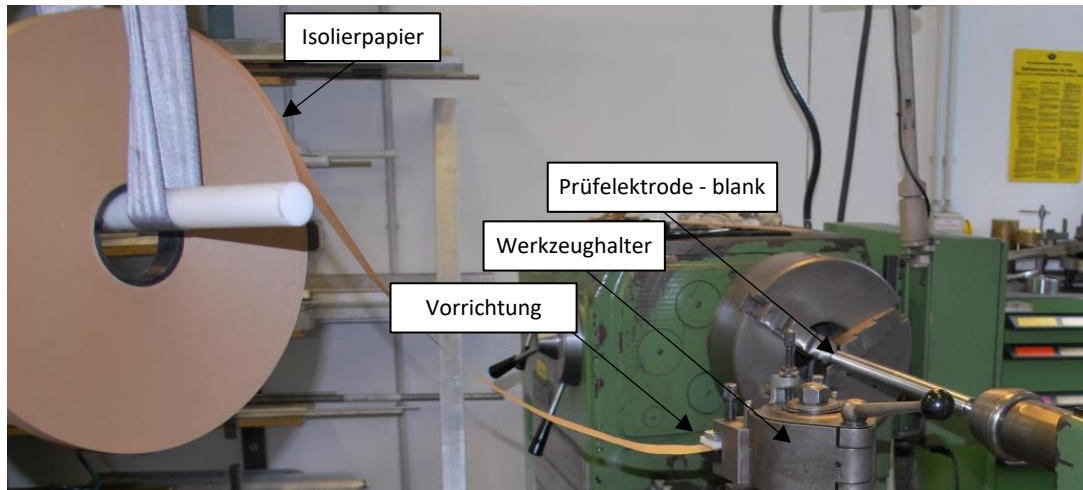
**Bild 4-63** Vorbehandlung der Durchgangsbohrungen bei den Vorproben mit einem Schleifpapier der Körnung „P 320“

### 4.4.2 Vorbereitung für papierisolierte Prüfelektroden

Als Isolierpapier wird das Material „M'glatt Starkstrompapier 5A2-1M3“ der Firma „Bayka Bayerische Kabelwerk AG“ verwendet. Dieses Isolierpapier kommt bei der Bewicklung der Hochspannungsleiterseile in einem ölgefüllten Leistungstransformator im Bereich der Ausleitung vor.

Um vergleichbare Ergebnisse bei den Untersuchungen mit realen Prüfkörpern und papierisolierten Prüfelektroden zu erhalten, muss die Bewicklung der Stäbe immer unter gleichen Bedingungen und Anforderungen durchgeführt werden. Laut Aussagen des Transformatorenherstellers hat das Bewickeln der Stäbe mit Hand gegenüber dem Maschinenbewickeln keinen nennenswerten Einfluss auf die Durchschlagsfestigkeit.

Das Auftragen der Papierisolierung erfolgt wie vorher beschreiben. Erste praktische Versuche mit Handbewicklung ergaben, dass diese sehr zeitaufwendig sind. Des Weiteren kann keine Gleichmäßigkeit bei den Überlappungen der einzelnen Papierlagen erreicht werden. Aus diesen Gründen kann für die benötigte Anzahl von Prüfelektroden für die Untersuchung keine Bewicklung von Hand geschehen. Erste Erfolge wurden beim teilweise automatisierten Verfahren an einer Drehbank erzielt. Dabei werden die blanken Prüfelektroden als Werkstück in der Drehbank eingespannt, siehe **Bild 4-64**.



**Bild 4-64** Vorbereitung der Prüfelektroden für das Bewickeln der Prüfelektroden an einer Drehbank der Hochschule Osnabrück

Mithilfe einer Vorrichtung am Werkzeughalter liegt das Papier mit einem festen Winkel zur Prüfelektrode an. Sobald die Prüfelektrode zu rotieren beginnt, kann mit voreingestelltem Vorschub die Papierlage aufgetragen werden. Bei diesem Vorgang muss der Bediener das Papier möglichst stramm im gleichen Winkel zur Vorrichtung halten. Das **Bild 4-65** zeigt eine Prüfelektrode ( $\varnothing 30 \text{ mm}$ ) mit einer Papierschichtdicke von 2 mm nach dem Bandagieren an der Drehbank.



**Bild 4-65** Prüfelektrode  $\varnothing 30 \text{ mm}$  mit einer Papierschichtdicke von 2 mm nach dem Bandagieren an der Drehbank der Betriebswerkstatt der Hochschule Osnabrück

An den Enden der Prüfelektroden sind die überstehenden Papierlagen zu entfernen. Die Kontaktstelle sollte dabei frei von allen Rückständen sein, siehe **Bild 4-66**.



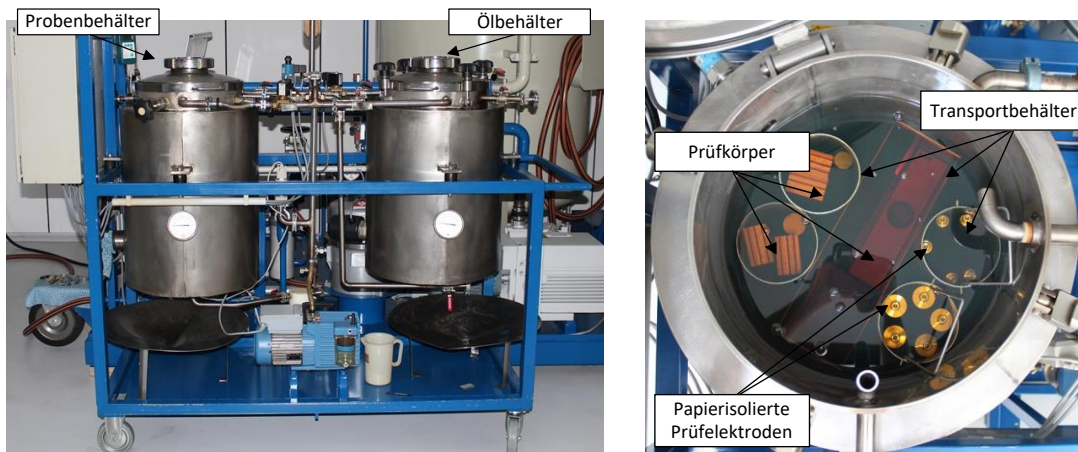
**Bild 4-66** Bearbeitete Enden einer Prüfelektrode nach der Bewicklung an der Drehbank

Abstehende Fasern an den Enden der Prüfelektrode sollten keinen Einfluss auf das TE-Verhalten haben, zumal diese Fasern getrocknet und mit Mineralöl gefüllt sind. Des Weiteren befinden sich die Enden der Prüfelektroden aufgrund der Prüfanordnung in einen nahezu feldfreien Raum. Für das Bandagieren einer Prüfelektrode mit einer 2 mm dicken Papierschicht ist eine Zeit von etwa 30 - 45 Minuten vorzusehen.

Es ist darauf zu achten, dass die Vorbereitung der Prüfelektroden sehr sorgfältig durchgeführt wird. Staub oder andere Fremdpartikel auf der Papieroberfläche dürfen unter keinen Umständen die Isolierung verunreinigen. Deshalb sollte vor Beginn die Drehbank auf diese Anforderungen hin überprüft werden. Die Drehbank kann beispielsweise mit Isopropanol, einem farblosen und chlorfreien Reinigungsmittel, gesäubert werden.

#### 4.4.3 Trocknung und Imprägnierung

Die Prüflinge für die TE- und Durchschlagsversuche und für die dielektrischen Untersuchungen dürfen keine Feuchtigkeit und keine luftgefüllten Hohlräume enthalten, da diese die dielektrischen Eigenschaften sowie die elektrische Festigkeit stark beeinflussen. Aus diesem Grund müssen die zellulosehaltigen Isolierstoffe unbedingt vor der Prüfung getrocknet und unter Vakuum imprägniert werden. Beim Transport der Prüflinge nach der Imprägnierung ist darauf zu achten, dass diese nicht an Luft gelangen. Deshalb sind die Prüflinge in entsprechenden Transportbehältern im Probenbehälter der Imprägnieranlage zu lagern, siehe **Bild 4-67**.



**Bild 4-67** Imprägnierungsanlage und Einblick in den Probenbehälter zur Anordnung der Prüflinge in entsprechenden Transportbehältern

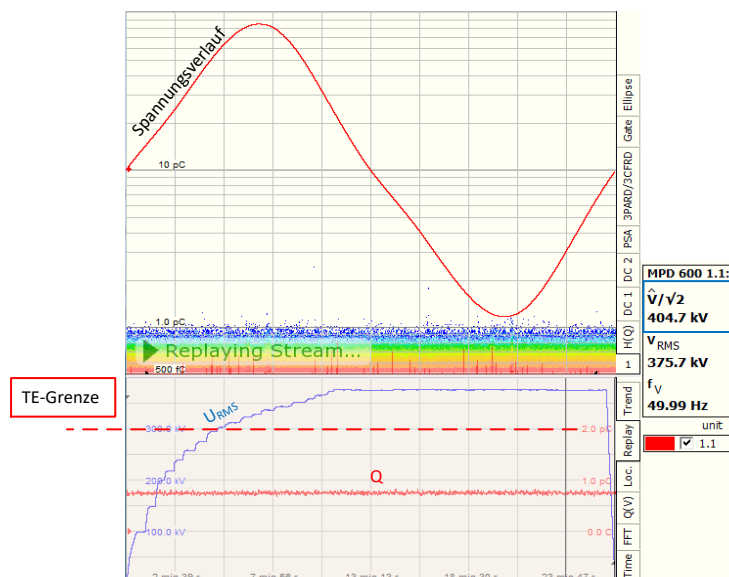


## 4.5 Ergebnisse der Testszenarien

### 4.5.1 TE-Verhalten der Prüfanlage mit Prüfaufbau

Nach einigen Anlaufschwierigkeiten aufgrund der luftgefüllten Hohlräume im Freistich am POM-Isolierstützer und diversen TE-Aufnahmen konnte der Prüfaufbau auf das TE-Verhalten geprüft werden.

Vor der Prüfung ist sicherzustellen, dass die Prüfanlage ohne Prüfaufbau teilentladungsfrei bis zu einer Spannung von 400 kV ist. Dazu sind möglichst alle Betriebsmittel, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem Prüfaufbau stehen, aus dem Prüffeld zu entfernen. Bei der Prüfung darf der TE-Pegel den Wert 2 pC nicht überschreiten. Dieser Wert gilt bei der TE-Prüfung von ölprägnierten Isoliermaterialien als untere Grenze und wurde in Absprache mit den Isolierstoff- sowie den Transformatorenherstellern festgehalten. Bei der Untersuchung des TE-Verhaltens der Prüfanordnung wurde die Spannung stufenförmig aus einer beliebigen Ausgangsspannung nach etwa 20 Sekunden bis 300 kV um 20 kV und danach bis 400 kV um 10 kV erhöht. Anschließend wurde die maximale Ausgangsspannung mehrere Minuten (maximal 15 Minuten) gehalten. Bei keiner Prüfung kam es zu Oberflächenentladungen auf dem Öl. Zu Beginn wurde ein Elektrodenabstand von etwa 80 mm getestet. Da es zu einigen Durchschlägen im Prüfbereich gekommen ist, wurde der Elektrodenabstand auf etwa 200 mm erhöht. Das **Bild 4-68** zeigt eine TE-Aufnahme bei vollständigem Prüfaufbau bis zur maximalen Prüfwechselfspannung von 400 kV.

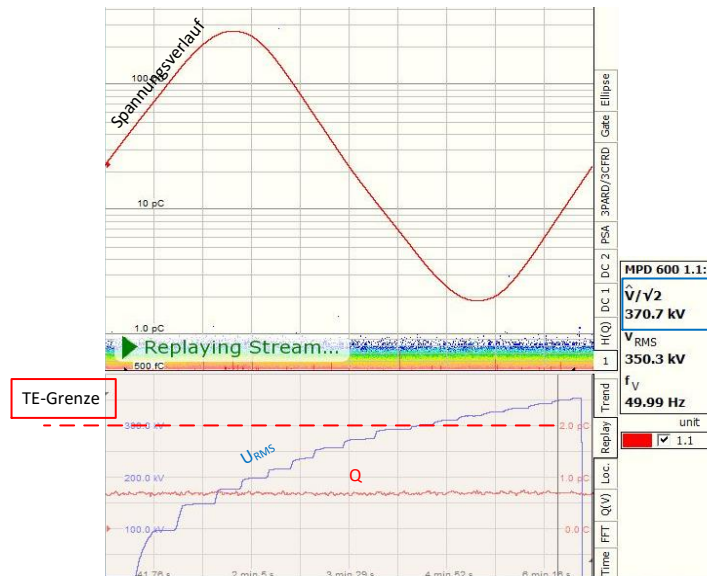


**Bild 4-68** TE-Verhalten der Hochspannungsanlage mit Prüfaufbau ohne Prüfling

Eine TE-Freiheit bis 400 kV kann nur erzielt werden, wenn lange Ruhephasen nach dem Befüllen (mindestens 3 Tage) eingehalten werden. Außerdem sind alle Luftblasen auf der Öloberfläche vor der Untersuchung zu entfernen. Sollte es bei niedrigen Spannungen zu Teilentladungen (z.B. Hohlrumentladungen) kommen, ist sofort abzuschalten, da es zu Versuchsdurchschlägen im Prüfaufbau gekommen ist. Kommt es zu Überschlägen an dem POM-Stützer, muss nicht zwangsläufig die Prüfung beendet werden. Durch Verwirbelung der Rückstände im Öl und durch Einhaltung längerer Standzeiten (mindestens 2 Stunden) kann die Prüfung weitergeführt werden.

Bei der Versuchsdurchführung mit papierisolierten Prüfelektroden ohne Prüflinge lagen jeweils zwei Prüfelektroden mit einem Durchmesser von 16 mm und 30 mm und einer Papierschichtdicke von 2 mm vor. Bei der Prüfelektrode mit einem Durchmesser von 30 mm kam es bei

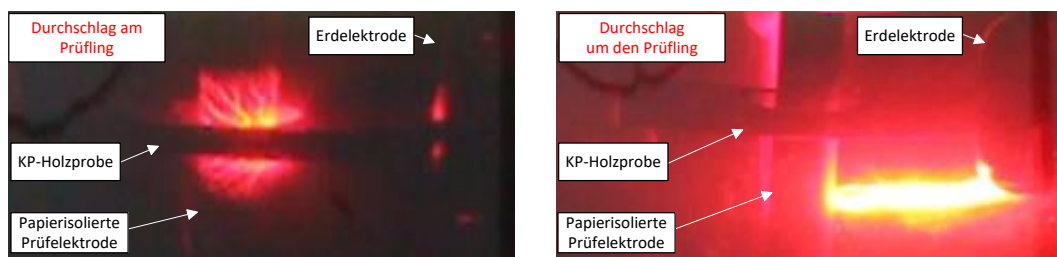
einer Isolierstrecke von 70 mm bis zu einer Spannung von 400 kV zu keinem Durchschlag. Der TE-Pegel lag bis 400 kV unter 2 pC. Bei den Prüfelektroden mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Isolierstrecke von 80 mm überstieg der TE-Pegel nicht den Wert von 2 pC. Das **Bild 4-69** zeigt eine TE-Aufnahme einer papierisolierten Prüfelektrode  $\varnothing$  16 mm und einer Isolierstrecke von 80 mm, bei dem der TE-Pegel bis zum Durchschlag zur Erdelektrode auf Grundstörniveau lag.



**Bild 4-69** TE-Verhalten bei einer papierisolierten Prüfelektrode ( $\varnothing$  16 mm mit einer Papierschichtdicke von 2 mm) bis zum Durchschlagsereignis  $U_{\text{Ereignis}} = 375$  kV

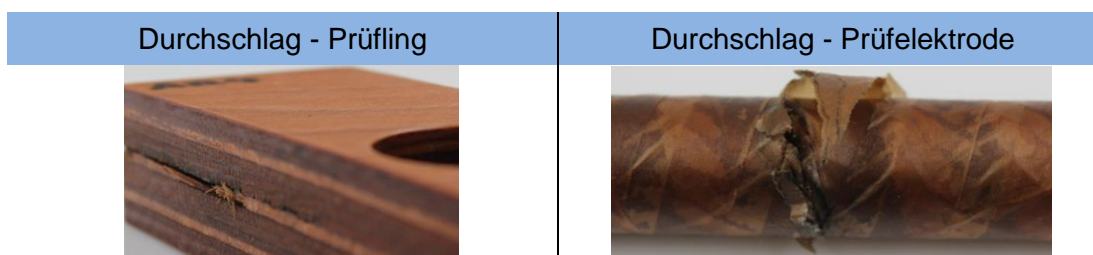
#### 4.5.2 Durchschlagsverhalten der ausgewählten Prüfkörper

Zu Beginn wurden Durchschlagsversuche mit allen ausgewählten Prüfelektroden bei einer Isolierstrecke von 100 mm vorgenommen. Bei diesem Versuch kam es bei Stufenprüfung bis 400 kV zu keinem Durchschlag. Erst bei Versuchen mit Isolierstrecken von 90 mm wurden Durchschläge an den Prüflingen festgestellt. Dabei wurde zu Anfang die Ölspaltstrecke verringert, indem papierisolierte Prüfelektroden mit einem Durchmesser von 30 mm anstelle der  $\varnothing$  16 mm – Prüfelektroden bei nicht verändertem Bohrungsradius eingesetzt worden sind. Es fanden einige Durchschläge bei 400 kV statt. Im Anschluss daran wurden blanke Prüfelektroden mit einem Durchmesser von 16 mm eingesetzt. Diese Maßnahme wurde ergriffen, um Durchschläge gezielt zu provozieren, damit Aussagen über die Festigkeit des Materials gemacht werden können. Bei allen Prüflingen kam es zum Durchschlag im Bereich zwischen 250 kV – 320 kV. Bei Durchschlagsversuchen mit einer Isolierstrecke von 70 mm und fester Ölspaltweite von 10 mm kam es bei Spannungen zwischen 250 kV – 330 kV zu Durchschlägen an den Prüflingen. Während des Versuchs fanden Versuchsdurchschläge bei Spannungen größer als 330 kV im Prüfaufbau und im Prüfbereich statt. In einigen Aufnahmen ist zu erkennen, dass sich der Entladungskanal berührungslos von außen um den Prüfling von der papierisolierten Prüfelektrode zur Erdelektrode ausgebildet hat, siehe **Bild 4-70**.



**Bild 4-70** Durchschlag unter Öl an der und um die Probe

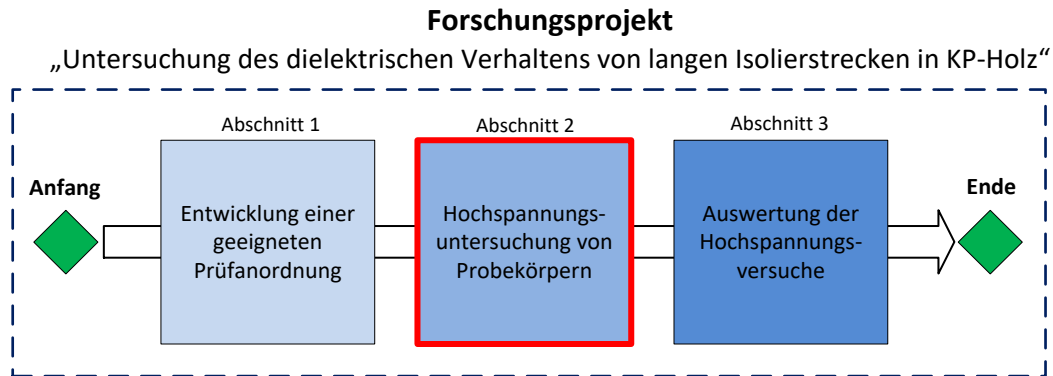
Typische Brandspuren an den Prüflingen oder an papierisierten Prüfelektroden zeigt das **Bild 4-71**.



**Bild 4-71** Typische Entladungsmuster nach einem Durchschlag an einer KP-Holzprobe mit einer papierisierten Prüfelektrode

## 5 Serienuntersuchungen an langen Isolierstrecken (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger)

Mit der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen neu entwickelten Prüfanordnung sollen Gleitstrecken an Kunstharzpressholzproben im Bereich bis 100 mm unter Ausnutzung der möglichen Prüfspannung bis 400 kV untersucht werden. Im Gesamtforschungsprojekt, **Bild 5-1**, sind dieses die Arbeiten des Abschnittes 2.



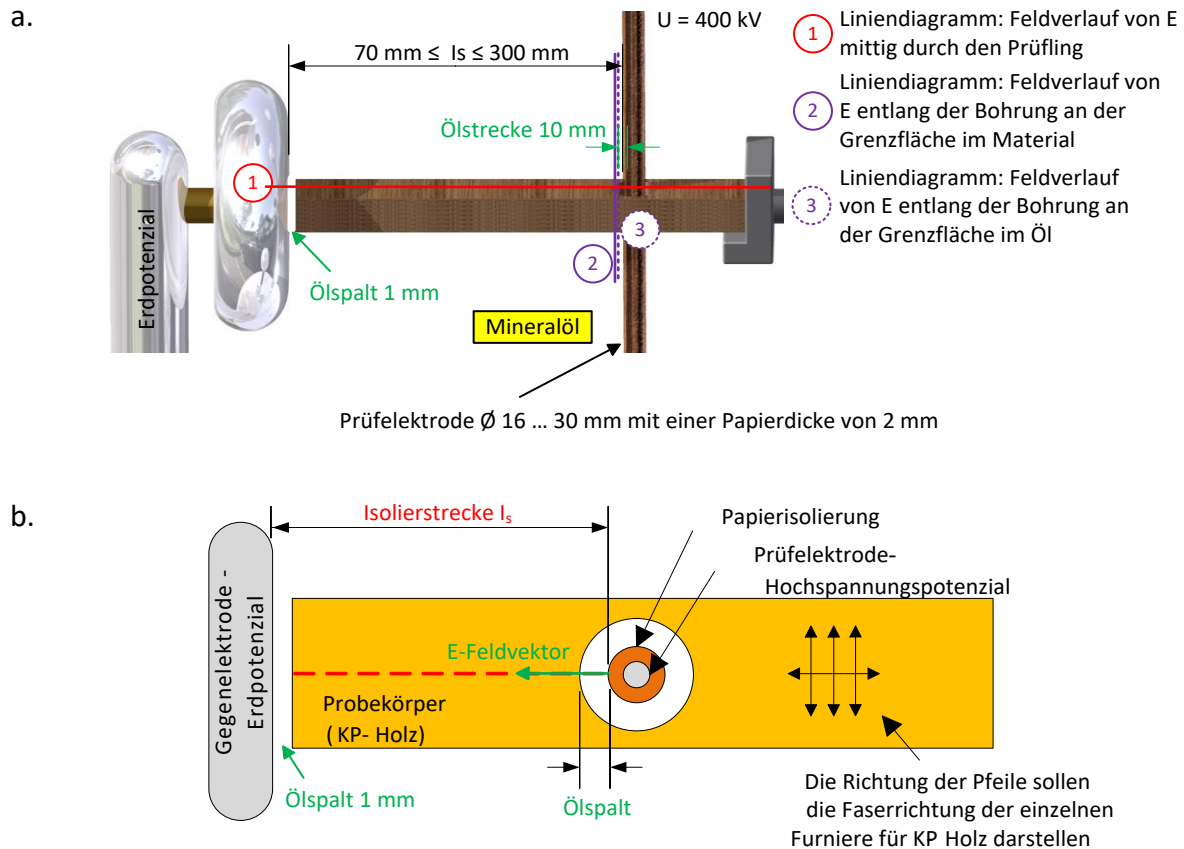
**Bild 5-1** Arbeitsabschnitte des Forschungsprojektes. In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung der Hochspannungsuntersuchung von Probekörpern.

Zunächst erfolgt die Festlegung der Versuchsparameter und die Durchführung der Versuche.

### 5.1 Auswahl der Parameter für die Serienuntersuchungen

#### 5.1.1 Abmessung und Isolierung der Elektroden

Das Ziel der Untersuchungen ist, die kritischen Feldstärken für Kunstharzpressholz zu ermitteln. Das **Bild 5-2 a, b** zeigt den entscheidenden Ausschnitt aus der in den vorhergehenden Kapiteln entwickelten Prüfanordnung. Abweichend von dieser Prüfanordnung wurde zwischen der Erdelektrode und dem Probekörper zusätzlich ein 1 mm Ölspalt eingefügt, um eventuellen Zwickelentladungen im Bereich der Erdelektrode vorzubeugen.

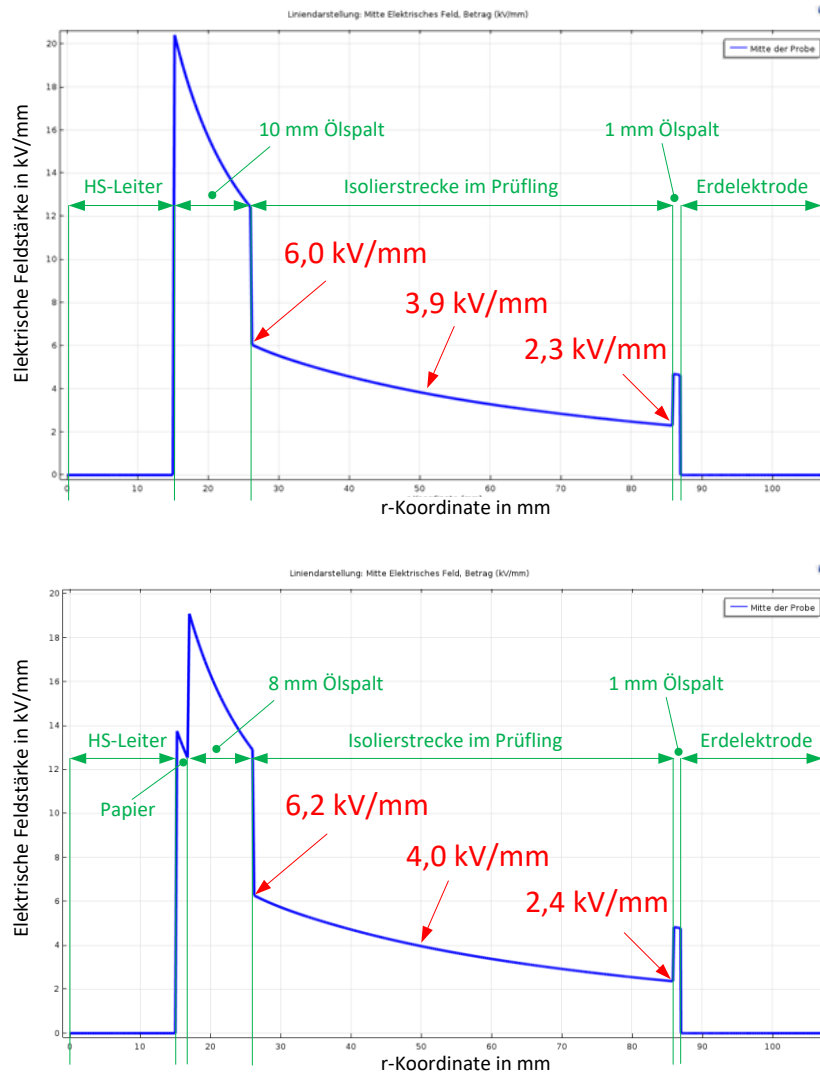


**Bild 5-2** Simulationsmodell und gewählte Liniendiagramme zur Ermittlung des Einflusses der Papierisolierung

Die elektrische Feldstärke an der Hochspannungselektrode bzw. auf der Papieroberfläche darf nicht so hoch werden, dass eine Zündung im Ölkanal provoziert wird. Aus diesem Grunde wurde der größere Elektrodendurchmesser von 30 mm gewählt, der eine kleinere Feldstärke im Ölkanal zur Folge hat.

Die Herstellung der Isolierung auf der Hochspannungselektrode ist sehr aufwändig und wird bei jedem Durchschlag zerstört. Aus diesem Grunde wurden Untersuchungen durchgeführt, um festzustellen, ob die Papierisolierung der Elektroden einen wichtigen Einfluss auf die Ergebnisse hat, oder, ob zur Verringerung des Versuchsaufwandes die Papierisolierung weggelassen werden kann. Wichtig ist, dass der Feldstärkeverlauf im Prüfling möglichst realitätsnah nachgebildet wird. Die Referenz für die Realität ist die papierisolierte Elektrode.

Ein ähnlicher Feldverlauf für die Anordnung mit papierbewickelter Elektrode und blanker Elektrode wird durch die Feldberechnung **Bild 5-3** nachgewiesen.



**Bild 5-3** Verlauf des elektrischen Feldes entlang der Isolierstrecke in der Mitte des Prüflings bei einer angelegten Spannung von 400 kV. **Oben:** Hochspannungselektrode ohne Papierbewicklung **Unten:** Hochspannungselektrode mit Papierbewicklung

Die in **Bild 5-3** in Rot eingetragenen Feldstärken weichen nur wenig voneinander ab, d.h. der Feldstärkeverlauf in dem Prüfling ist nur unwesentlich unterschiedlich.

Zusätzlich zu diesem Nachweis aus einer numerischen Feldberechnung wurden reale Versuche mit dem direkten Vergleich zwischen den Varianten „HS-Elektrode bewickelt“ und „HS-Elektrode blank“ durchgeführt. Es konnten unter Berücksichtigung der Streuung der Messergebnisse keine Unterschiede festgestellt werden.

Damit kann die gesamte weitere Untersuchung mit blanker Hochspannungselektrode durchgeführt werden, ohne die Ergebnisse unzulässig zu beeinflussen.

### 5.1.2 Materialsorte, Abmessungen und Anzahl der Proben

Als Material wird LI/2-E3-TQ ohne Querlagen des Herstellers Röchling Engineering Plastics gewählt. Auf die im realen Einsatz vorhandenen Querlagen wurde verzichtet, um das reine Materialverhalten bei einer elektrischen Beanspruchung des Materials parallel zu den Fasern zu ermitteln. Die Versuchsproben wurden jeweils mit einer Bohrung mit einem Durchmesser von 54 mm versehen. Als Elektrodenabstände  $l_s$  werden 50, 60, 70, 80, 90 und 100 mm gewählt. Noch größere Abstände können wegen der auf 400 kV begrenzten Prüfspannung nicht realisiert werden.

Je Prüflingssorte werden 6 Prüflinge untersucht.

### 5.1.3 Versuchsprocedere

#### 5.1.3.1 Standardversuchsprocedere

Grundlage für die Untersuchungen sind die im Labor für Hochspannungstechnik standardmäßig verwendeten Prüfabläufe angewendet. Sie sind in englischer Sprache verfasst und nachfolgend aufgelistet:

#### 1. Preparation of Samples

The test samples are predried for 24 hours in a drying oven at a temperature of 105°C. After that they are dried in a vacuum chamber at 105°C under a pressure lower than 100 Pa. Afterwards insulating oil according to IEC 296, class II, with a temperature of 90°C is filled into the evacuated container so slowly, that the interior pressure does not rise above 250 Pa. When the samples are completely submerged the under pressure is reduced slowly, until ambient pressure is reached. Then the heating is turned off. From this moment onwards the samples are left submerged in oil for at least 24 hours.

After cooling the samples are placed one after another between the electrodes without any contact to the atmosphere. 30 minutes later the assembled sample can be tested.

#### 2. General Test Conditions

The tests for the partial discharge inception voltage are carried out with a 50 Hz AC voltage that is increased step by step until PD or a breakdown occurs. The temperature of the oil amounts to 20°C ± 2°C.

#### 3. Voltage Rise

The tests start at 60% of the expected partial discharge inception voltage. This voltage is raised in 5%-steps of the initial value until continuous partial discharges or a breakdown occurs. Each voltage step is applied for a period of 1 min. The voltage is raised with 100 kV/min.

#### 4. PD Inception Voltage

The first appearance of partial discharges that occur at a level greater than 2 pC for at least one minute is noted as the partial discharge inception voltage.

## 5. Determination of the Expected PD Inception Voltage

As the partial discharge behaviour of the examined materials is unknown, pre-tests must be carried out to find the expected partial discharge inception voltage. The following method using 5 pilot samples is applied:

### 1<sup>st</sup> pilot sample

The 1<sup>st</sup> pilot sample is tested with a voltage ramp with a slope of 30 kV/min until PD inception or a breakdown occurs.

### 2<sup>nd</sup> pilot sample

The test starts with 60% of the measured PD inception voltage of the first pilot sample. This voltage is raised in 5%-steps of the initial value until continuous partial discharges or a breakdown occurs. Each voltage step is applied for a period of 1 min. The voltage is raised with 100 kV/min.

### 3<sup>rd</sup> pilot sample

The test starts with 60% of the averaged results of the previous two tests. This voltage is raised in 5%-steps of the initial value until continuous partial discharges or a breakdown occurs. Each voltage step is applied for a period of 1 min. The voltage is raised with 100 kV/min.

### 4<sup>th</sup> pilot sample

The test starts with 60% of the averaged results of the previous three tests. This voltage is raised in 5%-steps of the initial value until continuous partial discharges or a breakdown occurs. Each voltage step is applied for a period of 1 min. The voltage is raised with 100 kV/min.

### 5<sup>th</sup> pilot sample

The test starts with 60% of the averaged results of the previous four tests. This voltage is raised in 5%-steps of the initial value until continuous partial discharges or a breakdown occurs. Each voltage step is applied for a period of 1 min. The voltage is raised with 100 kV/min.

## 6. Expected PD Inception Voltage

The expected PD inception voltage is the calculated mean value of the tests of the 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> pilot samples.

## 7. Monitoring the Oil Quality and the Test Setup

During the testing the oil quality is checked regularly. If the breakdown voltage according to IEC 156 (EN 60156) falls below  $\geq 60\text{kV} / 2,5\text{ mm}$  the oil will be filtered and dried.

In addition to the standard tests, the PD behavior and the breakdown voltage of the test setup is checked daily. The tests start with 50 kV for the electrodes with a 10 mm distance. This voltage is raised in 5%-steps of the initial value until continuous partial discharges or a breakdown occurs. Each voltage step is applied for a period of 1 min. The voltage is raised with 100 kV/min.

The average value of these tests amounts to  $U_D(10\text{ mm}) > 120,0\text{ kV}$ .

### 5.1.3.2 Abweichungen vom Standardversuchsprocedere

Abweichend von dem beschriebenen Standardprocedere wird vor Beginn der Prüfung der Versuchsaufbau bei ausreichendem Elektrodenabstand von etwa 200 mm auf dessen TE-Verhalten überprüft.



Nach einem Prüflingswechsel unter Öl wird abhängig von der Länge der zu untersuchenden Prüfstrecke mindestens eine Standzeit von 1,5 Stunde bis zu 4 Stunden eingehalten, sodass Versuchsdurchschläge im Prüfaufbau nicht eintreten können. Kommt es zu Durchschlägen im Prüflingsbereich oder zu Überschlägen am Isolierstützer, wird in dem Ölbehälter an der Durchschlagsstelle das Mineralöl verwirbelt, damit sich die Rückstände verflüchtigen können. Parallel zum Messverfahren wird eine Videoaufnahme gestartet, um das Ereignis festzuhalten und die Auswertung zu stützen.

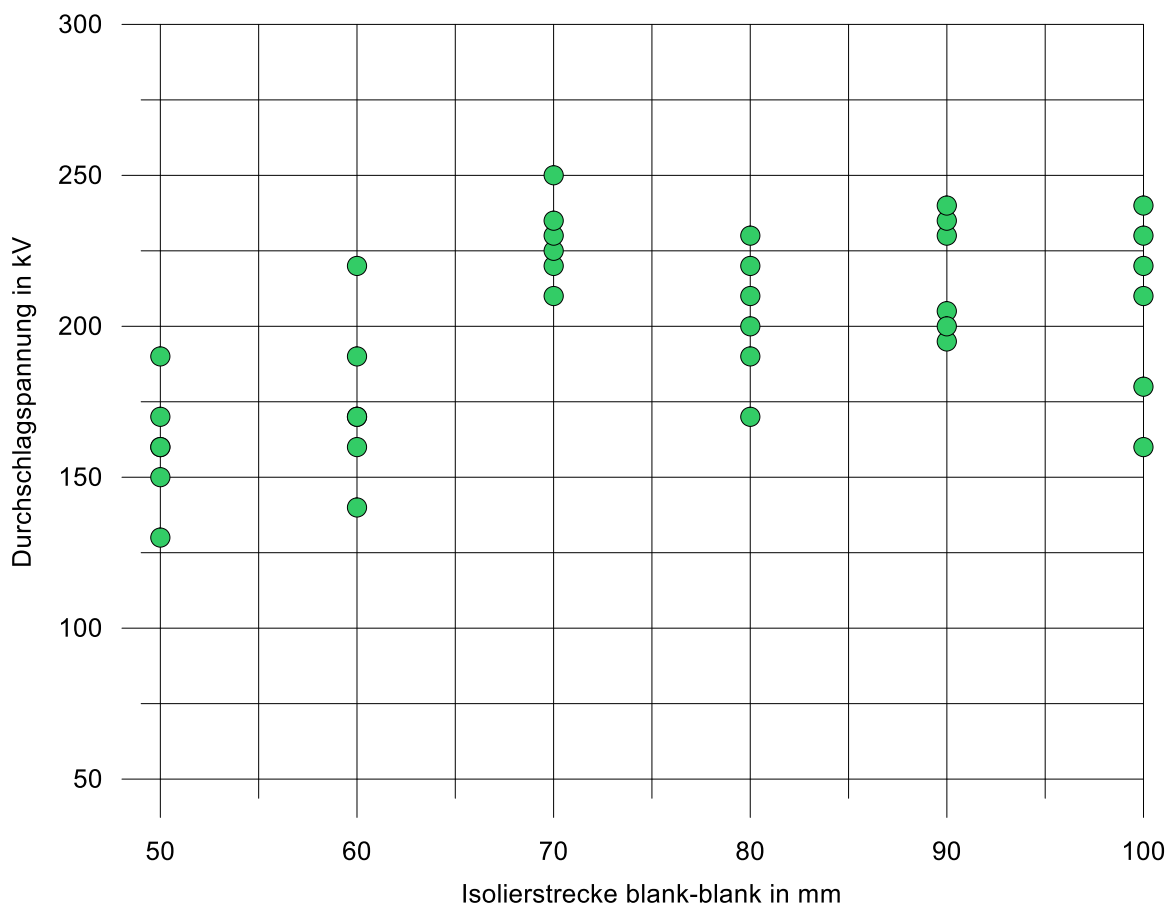
## 5.2 Versuchsergebnisse

Die Messergebnisse für die jeweils 6 Proben bei 6 verschiedenen Abständen sind in der **Tabelle 5-1** aufgelistet.

**Tabelle 5-1** Durchschlagspannung für jeweils 6 Proben bei 6 verschiedenen blanken Elektrodenabständen. Prüflingsmaterial LI/2-E3-TQ ohne Querlagen des Herstellers Röchling Engineering Plastics.

$l_s$ [mm]	Messwert 1	Messwert 2	Messwert 3	Messwert 4	Messwert 5	Messwert 6
50	130	150	160	160	170	190
60	140	160	170	170	190	220
70	210	220	220	230	230	250
80	170	190	210	220	230	200
90	200	200	200	230	230	240
100	160	180	210	220	230	240

Das **Bild 5-4** stellt die bei jedem Abstand an 6 Proben gefundenen Messwerte grafisch dar.



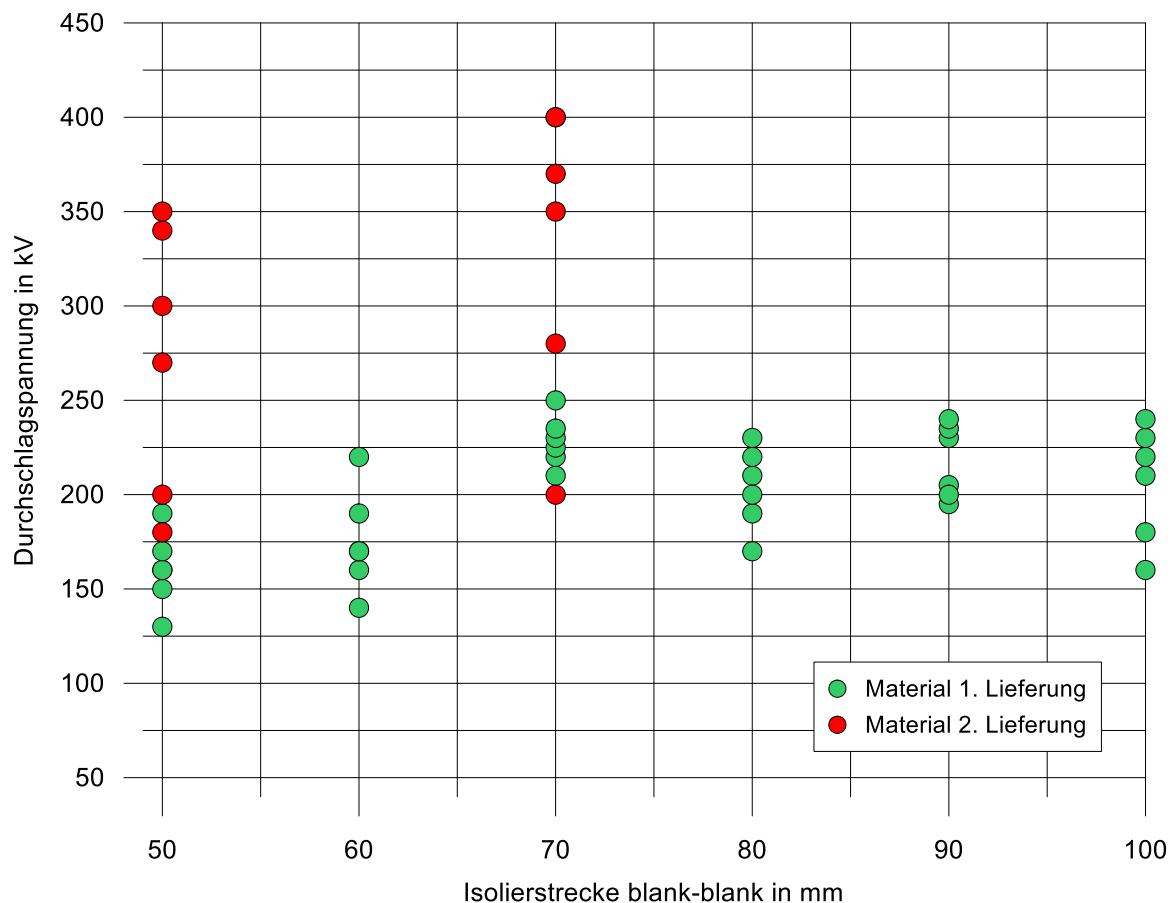
**Bild 5-4** Durchschlagspannung bei 6 verschiedenen Abständen  $l_s = 50, 60, 70, 80, 90$  und  $100$  mm blank-blank. Bei jedem Abstand sind die Ergebnisse für 6 untersuchte Proben jeweils als grüner Punkt dargestellt.

Da die Messwerte bei dem Abstand  $l_s = 70$  mm etwas aus dem Rahmen fallen, wurde das gleiche Material nachbestellt und mit den gleichen anderen Versuchsparametern getestet. Das Ergebnis ist der **Tabelle 5-2** zu entnehmen.

**Tabelle 5-2** Durchschlagspannung für jeweils 6 Proben bei 2 verschiedenen blanken Elektrodenabständen. Prüflingsmaterial Nachbestellung LI/2-E3-TQ ohne Querlagen des Herstellers Röchling Engineering Plastics.

s [mm]	Messwert 1	Messwert 2	Messwert 3	Messwert 4	Messwert 5	Messwert 6
50	180	200	270	300	340	350
70	200	280	350	370	400	400

Das **Bild 5-5** stellt die bei jedem Abstand an 6 Proben gefundenen Messwerte grafisch dar. Die grünen Punkte sind die Ergebnisse der 1. Materiallieferung, die roten Punkte sind die Ergebnisse der 2. Materiallieferung.



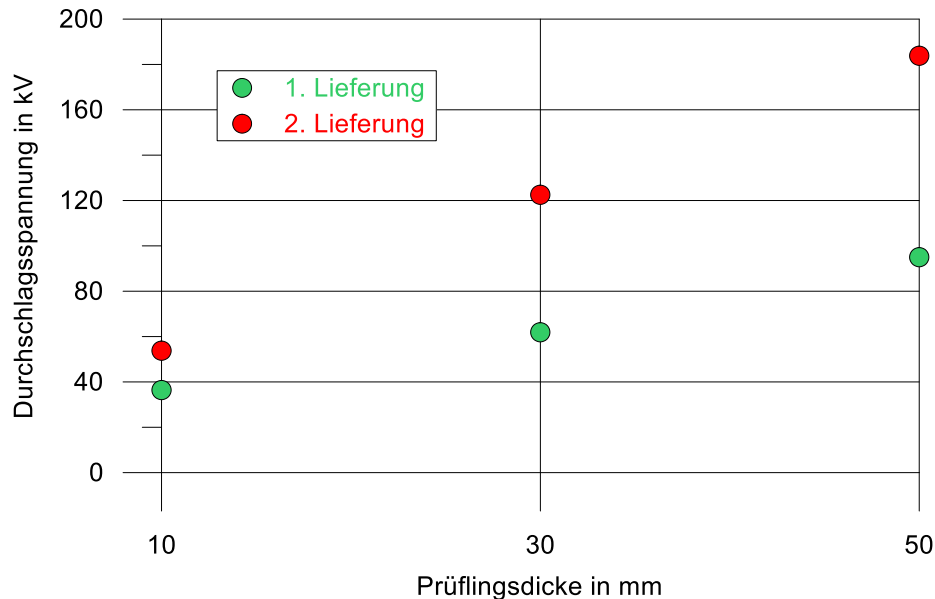
**Bild 5-5** Durchschlagspannung bei verschiedenen Abständen blank-blank.

**Grüne Punkte:** Ergebnisse der 1. Materiallieferung, jeweils 6 Proben bei den Abständen  $l_s = 50, 60, 70, 80, 90$  und  $100$  mm.

**Rote Punkte:** Ergebnisse der 2. Materiallieferung, jeweils 6 Proben bei den Abständen  $l_s = 50$  und  $70$  mm.

Zur Klärung der großen Unterschiede zwischen den beiden Materiallieferungen werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

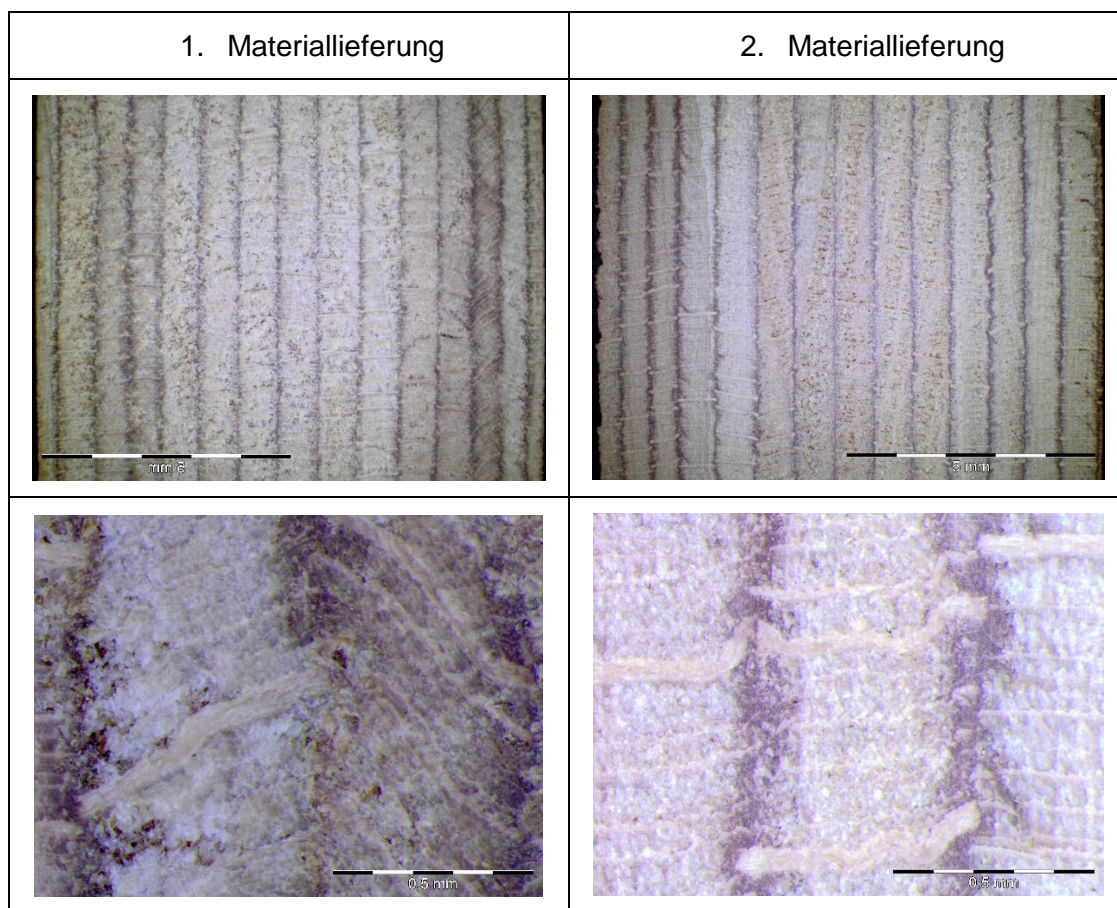
1. Überprüfung der eigenen Messtechnik, der Aufbereitungsverfahren und des Prüfprocedures. Hierbei konnte auch nach sehr sorgfältiger Prüfung kein Unterschied in der Behandlung der Proben der 1. und 2. Lieferung rekonstruiert werden.
2. Zur Absicherung der Ergebnisse werden Proben beider Materialien bei unterschiedlichen Dicken in einem Standardverfahren [20] untersucht. Dabei werden die Proben aus dem Material der 1. und 2. Lieferung gleichzeitig aufbereitet und geprüft, d.h. die absolute Gleichbehandlung ist gewährleistet. Das Ergebnis zeigt das **Bild 5-6**.



**Bild 5-6** Durchschlagsspannung bei 3 verschiedenen Abständen blank-blank. Bei jedem Abstand sind die Mittelwerte von jeweils 15 untersuchten Proben der 1. Lieferung als grüne Punkte und der 2. Lieferung als rote Punkte dargestellt.

Die Materialien der beiden Lieferungen zeigen ein sehr unterschiedliches Verhalten. Dies bedeutet, dass die beiden Materialien tatsächlich unterschiedlich sein müssen und der Grund nicht beim Prüfverfahren oder der Messtechnik zu suchen ist.

3. Es wurde beim Materialhersteller eine Anfrage gestellt und daraufhin wurden herstellerseitig alle protokollierten Parameter bei der Herstellung überprüft. Laut Hersteller sind die Materialien der beiden Lieferungen genau gleich hergestellt worden.
4. Um mögliche Unterschiede der Materialien zu erkennen, wurden Mikroskopaufnahmen gemacht.



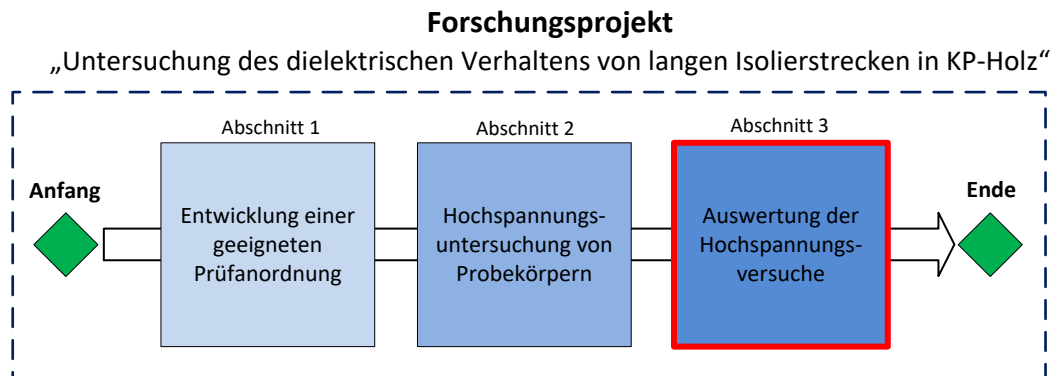
**Bild 5-7** Mikroskopaufnahmen von jeweils einer Probe der ersten und der zweiten Lieferung

Leichte Unterschiede zwischen der 1. und 2. Materiallieferung sind sichtbar. Zur Interpretation der Bilder fehlt die Erfahrung.

Der große Unterschied im Verhalten des Materials der 1. und 2. Lieferung bleibt damit unerklärlich.

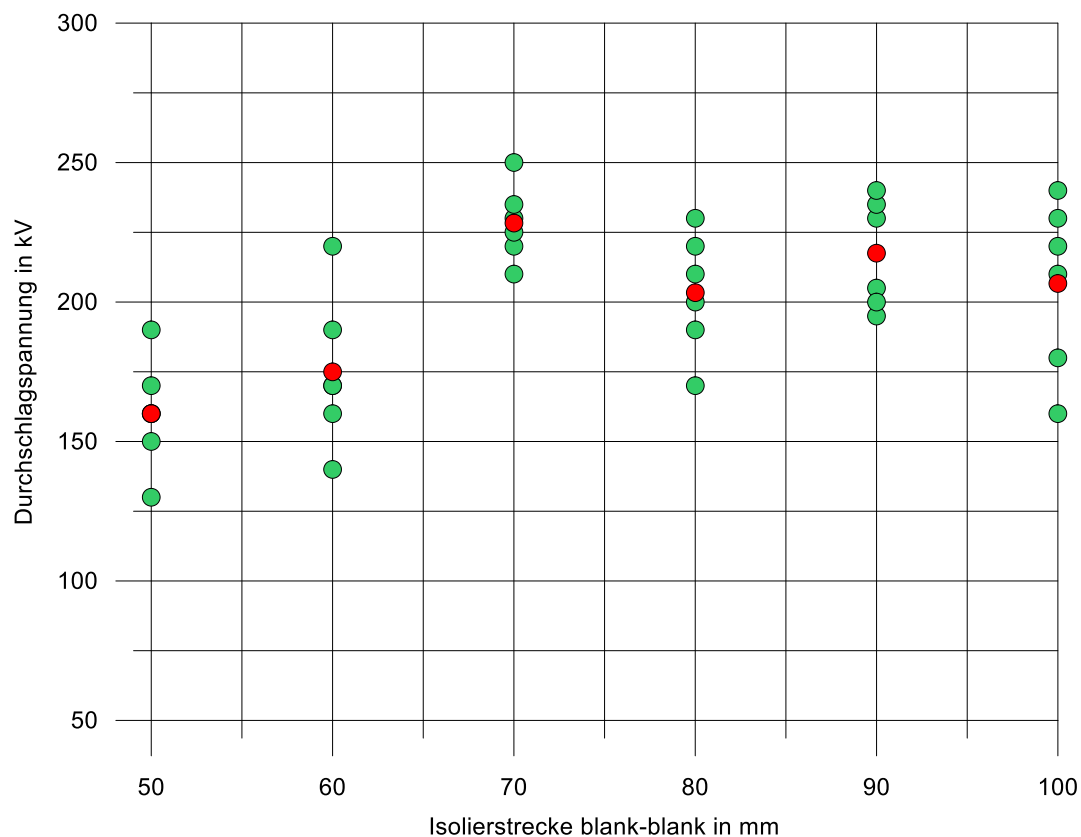
## 6 Auswertung der Hochspannungsversuche (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger)

In diesem Kapitel wird der 3. Abschnitt des Forschungsprojektes, gemäß **Bild 6-1**, behandelt.



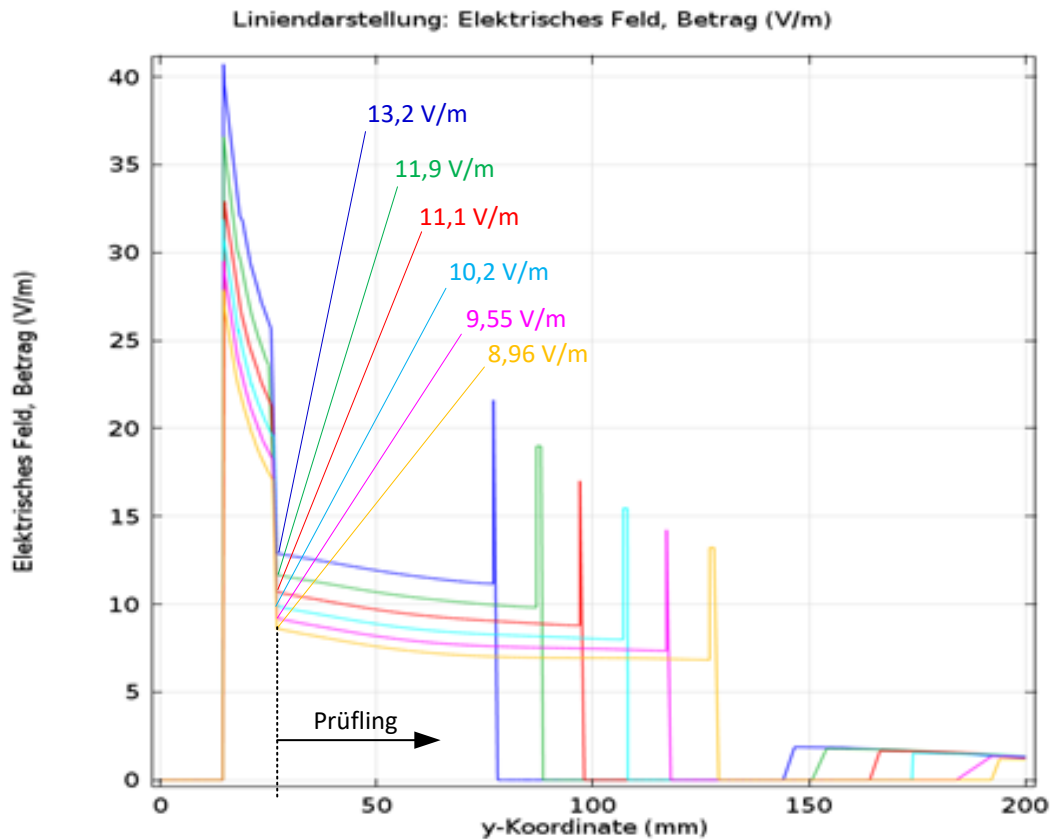
**Bild 6-1** Arbeitsabschnitte des Forschungsprojektes. In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung der Auswertung der Hochspannungsversuche.

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse werden aufgrund der Erkenntnisse aus **Kapitel 5.2** ausschließlich die Daten der 1. Materiallieferung herangezogen (**Tabelle 5-1** und **Bild 5-4**). Zunächst werden die Mittelwerte der Ergebnisse aus **Bild 5-4** berechnet und in dasselbe Diagramm mit Hilfe von roten Punkten eingetragen (**Bild 6-2**).



**Bild 6-2** Durchschlagspannung bei 6 verschiedenen Abständen blank-blank. Bei jedem Abstand sind die Ergebnisse für 6 untersuchte Proben jeweils als grüner Punkt, die Mittelwerte als roter Punkt dargestellt.

Anschließend werden die elektrischen Feldstärken für die einzelnen Abstände normiert auf eine angelegte Spannung von 1 V berechnet.



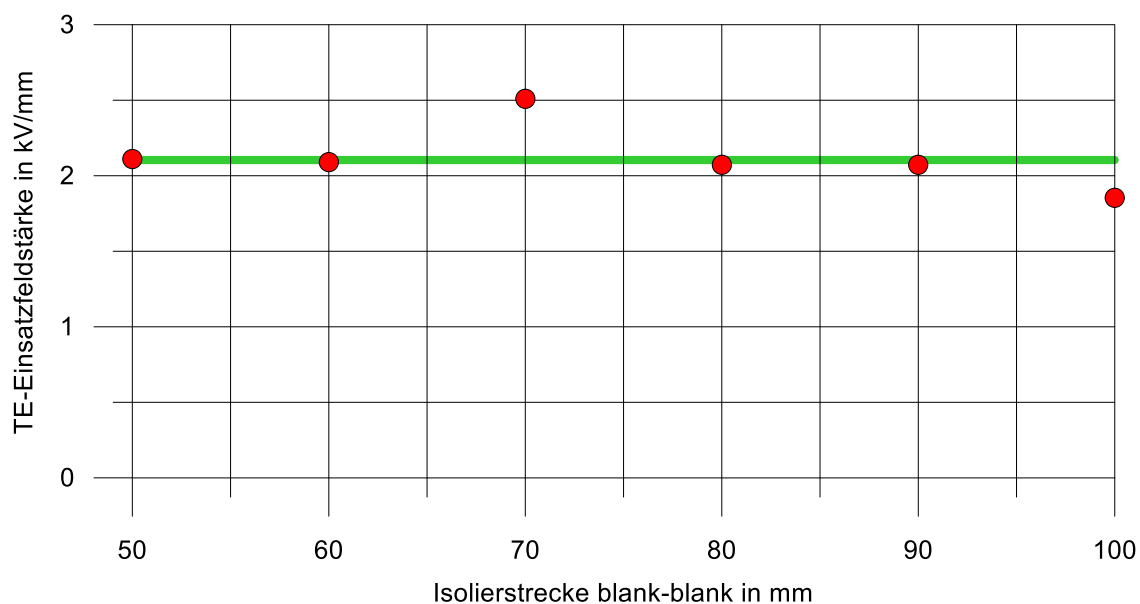
**Bild 6-3** Berechnete normierte Feldstärke entlang der geprüften Isolierstrecke bei angelegten 1 V.

Die normierten Höchstfeldstärken aus **Bild 6-3**, die gemessenen Mittelwerte der TE-Einsatzspannungen  $U_{TE}$  aus **Bild 6-2** und die aus diesen beiden Angaben berechnete elektrische Feldstärke sind in der **Tabelle 6-1** dargestellt.

**Tabelle 6-1** Normierte Höchstfeldstärken aus **Bild 6-3**, gemessene Mittelwerte der TE-Einsatzspannungen  $U_{TE}$  aus **Bild 6-2** und die aus diesen beiden Angaben berechnete elektrische Feldstärke

Elektrodenabstände mm	Normierte Feldstärke V/m	Mittelwerte der TE- Einsatzspannung $U_{TE}$ kV	Aus den Spalten 2 und 3 berechnete Feldstärke kV/mm
50	13,2	160,0	2,11
60	11,9	175,0	2,09
70	11,1	228,3	2,53
80	10,2	203,3	2,08
90	9,55	217,5	2,08
100	8,96	206,7	1,85

**Bild 6-4** zeigt die grafische Darstellung der berechneten Maximalfeldstärken in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes  $l_S$ .



**Bild 6-4** Berechnete TE-Einsatzfeldstärke bei den untersuchten Elektrodenabständen  $l_s = 50, 60, 70, 80, 90$  und  $100$  mm.

Unter Berücksichtigung der starken Streuung der Einzelmesswerte kann die TE-Einsatzfeldstärke, unabhängig vom Elektrodenabstand, als konstant angesehen werden. Erfolgt der TE-Einsatz immer bei der gleichen Feldstärke, so bedeutet dies ein ausschließlich geometrieabhängiges Verhalten. Das Isoliermaterial hat dann, unabhängig von der Isolierstrecke in dem Bereich  $l_s = 50 \dots 100$  mm, ein konstantes Verhalten.



## 7 Zusammenfassung (Autoren: Buckow, Havekost, Kröger)

Im Rahmen des Forschungsprojekts der Röchling Stiftung in Kooperation mit der Hochschule Osnabrück sollen lange Isolierstrecken von geschichteten Isoliermaterialien auf deren Gleit- und Durchschlagsverhalten erforscht werden. Zur Untersuchung einer möglichen elektrischen Festigkeitsminderung bei längeren Isolierstrecken sollte im ersten Projektabschnitt eine möglichst praxisnahe Prüfanordnung der Hochspannungsausleitung konzipiert und in die bestehende Hochspannungsanlage der Hochschule Osnabrück implementiert werden.

Um bei der Versuchsdurchführung Vorentladungen im Material zu erkennen, war der Prüfaufbau bis zu einer Spannung von 400 kV teilentladungsfrei zu entwickeln. Die hohe Spannung ist nötig, um eine maximale Feldbeanspruchungen im Material bei den untersuchten Isolierstrecken bis 100 mm zu garantieren. Anhand der Voruntersuchungen an einem bestehenden Prüfbehälter konnten TE-Quellen, Gleitentladungen auf der Öloberfläche sowie Durchschläge im Öl bei hohen Spannungen identifiziert werden. Die Entstehungsorte konnten mithilfe von Videoaufzeichnungen, TE-Aufnahmen und 3D-Feldberechnungen nachvollzogen werden. Durch konstruktive Änderungen am Prüfaufbau konnte die TE-Einsatzspannung um 38 % auf etwa 380 kV erhöht werden. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen werden als allgemeingültige Designregeln für Prüfaufbauten angegeben.

Durch Fachgespräche mit Experten aus der Transformatorenindustrie konnten Merkmale und Anforderungen für die Prüfanordnung zur möglichst realistischen Nachbildung einer Hochspannungsausleitung in einem ölgefüllten Leistungstransformator festgelegt werden.

Als Prüfstrecken sind Längen bis 300 mm vorzusehen. In der Prüfanordnung werden Runden mit einem Durchmesser von 16 mm bis 30 mm als Hochspannungselektroden eingesetzt. Die Prüfkörper für die Versuche können aus einem Druckring oder aus KP-Holzplatten gefertigt werden. Um einen ähnlichen Schichtaufbau bei der Entnahme der Prüflinge aus einer parallelgeschichteten KP-Holzplatte gegenüber den Proben aus einem Druckring zu erhalten, sollten wenige bzw. nach Möglichkeit keine Querlagen vorhanden sein. Aus den gewonnenen Kenntnissen der Vorstudie und dem Entwurf der Prüfanordnung konnte das Konzept für den abschließenden Versuchsaufbau anhand eines Ablaufplans zu dessen Entwicklung umgesetzt werden.

Für die Berechnung der Feldstärken in Prüflingsnähe kann eine Vereinfachung des vollständigen Modells genutzt werden, jedoch ist mit geringen Abweichungen der Berechnungsergebnisse bei langen Isolierstrecken ab 100 mm zu rechnen. Zusätzliche Feldberechnungen dienen der Einschätzung des Feldverlaufs im Material und im Ölspalt zur Hochspannungselektrode bei vorgegebenen Isolierstrecken. Die Ergebnisse der Simulationen haben gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit eines elektrischen Durchschlags im Ölspalt durch die Größe des Leiterdurchmessers und die Dicke der Papierisolierung beeinflusst werden kann.

Nach der praktischen Umsetzung und einer erfolgreichen TE-Prüfung des Versuchsaufbaus bis 400 kV wurden verschiedene Isolierstrecken und Leitergrößen getestet. Es stellte sich heraus, dass die Hochspannungselektrode mit 30 mm Durchmesser ohne Papierisolierung verwendet werden kann, ohne das elektrische Feld im Prüfling zu sehr zu beeinflussen. Die maximale Prüfstrecke wurde auf 100 mm festgelegt, um bei den Tests nicht das Hochspannungsanlagenlimit von 400 kV zu erreichen.

Als Material wird LI/2-E3-TQ ohne Querlagen des Herstellers Röchling Engineering Plastics gewählt. Auf die im realen Einsatz vorhandenen Querlagen wurde verzichtet, um das reine Materialverhalten bei einer elektrischen Beanspruchung des Materials parallel zu den Fasern zu ermitteln. Die Versuchsproben wurden jeweils mit einer Bohrung mit einem Durchmesser von 54mm versehen. Als Elektrodenabstände  $l_s$  wurden 50, 60, 70, 80, 90 und 100 mm gewählt. Die Versuchsproben wurden wie in der Transformatorenpraxis üblich getrocknet und imprägniert und anschließend im Spannungssteigerungsversuch geprüft. Die Spannung wurde stufenförmig bis zum Durchschlag gesteigert. Jede Spannungsstufe stand 1 Minute an.

Es erfolgte eine kontinuierliche TE-Erfassung. Die Auswertung der Hochspannungsversuche erforderte, dass zu jedem gemessenen Wert eine numerische Feldberechnung erfolgt. Aus dieser war dann der Ort und der Wert der höchsten aufgetretenen Feldstärke bekannt. Es zeigte sich, dass alle Versuchsproben im Mittelwert unabhängig von der Isolierstrecke bei 2,1 kV/mm versagten. Hieraus kann abgeleitet werden, dass das untersuchte Material seine Eigenschaften bei langen Isolierstrecken bis 100 mm nicht verändert.

## 8 Literatur

- [1] Steinkühler, T. Simulation elektrischer Felder zur Optimierung eines Prüfaufbaues für anisotrope Isoliermaterialien im Hochspannungslabor der Hochschule Osnabrück  
HS Osnabrück, 2013
- [2] Kuchler, A. Hochspannungstechnik  
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009
- [3] F. S. AG Prospekt: Power Transformers 10 to 100 MVA
- [4] Buckow, E. Hochspannungstechnik – Vorlesungsskriptum  
HS Osnabrück, 2011
- [5] Buckow, E. Partial discharge performance of solid insulation in liquid-immersed  
Bittner, M. insulation systems  
Havekost, M. Cigré, Dubrovnik, Kroatien, 2012  
Kroeger, M.  
Szwecyk, R.
- [6] Bittner, M. Untersuchung des Grenzschichtverhaltens von elektrisch hoch belastetem ölimprägniertem Kunstharzpressholz unter Berücksichtigung einer Anisotropie, HS Osnabrück, 2011
- [7] Glinski, W. Grundstufe Holztechnik - Technologie, Hamburg: Handwerk und  
Hansen, P. Technik, 1993  
Heidsieck, E.  
Koblitz, G.  
Ludolph, M.  
Parey, G.  
Rolfes, K.
- [8] Brinkmann, C. Die Isolierstoffe der Elektrotechnik  
Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1975
- [9] Bittner, M. The anisotropic dielectric constant of oil-impregnated, laminated  
Buckow, E. compressed wood and the effect on the electric field distribution  
Havekost, M. IEEE Electrical Insulation Magazine Volume 28 Number 6, Nov./Dec,  
Kröger, M. 2012  
Geers, H.-J.
- [10] Klötter, D. Einfluss der geometrischen Form und Abmessung auf das Teilentladungs- und Durchschlagsverhalten ölimprägnierter Isolierstoffe  
HS Osnabrück, 2009
- [11] Kleine-König, M. Teilentladungs- und Durchschlagsverhalten von ölimprägniertem Kunstharzpressholz  
HS Osnabrück, 2010
- [12] DIN EN 61061-1 Nicht-imprägniertes Kunstharzpressholz für elektrotechnische Zwecke  
April 2002

- [13] Buckow, E.  
Havekost, M.  
Kröger, M. Einfluss des Materials und der Oberflächenbeschaffenheit auf den Gleitentladungseinsatz an Grenzflächen mit Transformatorenöl  
Technical Report, Laboratory for High Voltage Technologie, University of Applied Sciences Osnabrück, 2004.  
<http://www.ecs.fh-osnabrueck.de/10252.html>
- [14] Buckow, E.  
Havekost, M. Investigation of Creeping Discharge on the Surface of Laminated Compressed Wood Used in Power Transformers  
Technical Report, Laboratory for High Voltage Technologie, University of Applied Sciences Osnabrück, 1999  
<http://www.ecs.fh-osnabrueck.de/10252.html>
- [15] Stocker, K. Konzeptionierung eines Hochspannungsmaterialprüffeldes  
Diplomarbeit, Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg, 2009
- [16] Buckow, E.  
Havekost, M. Teilentladungseinsatz von Kunstharzpressholz bei einer Beanspruchung senkrecht zur Schichtung  
Technical Report, Laboratory for High Voltage Technologie, University of Applied Sciences Osnabrück.  
<http://www.ecs.fh-osnabrueck.de/10252.html>
- [17] Buckow, E.  
Havekost, M.  
Kröger, M. Teilentladungseinsatz von Kunstharzpressholz bei einer Beanspruchung parallel zur Schichtung  
Technical Report, Laboratory for High Voltage Technologie, University of Applied Sciences Osnabrück 2002  
<http://www.ecs.fh-osnabrueck.de/10252.html>
- [18] Buckow, E.  
Havekost, M.  
Kröger, M. Einfluss der Normal- und Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke auf den Gleitentladungseinsatz an Grenzflächen KP-Holz/Öl und Nomex/Öl  
Technical Report, Laboratory for High Voltage Technologie, University of Applied Sciences Osnabrück 2005.  
<http://www.ecs.fh-osnabrueck.de/10252.html>
- [19] Bittner, M. Konzeptionierung und Implementierung einer geeigneten Prüfanordnung zur Untersuchung des Teilentladungs- und Durchschlagsverhalten von langen Isolierstrecken in ölimprägniertem Kunstharzpressholz und Blockspan, Masterarbeit HS Osnabrück, 2013
- [20] Buckow, E.  
Havekost, M.  
Kröger, M. PDIV of LI/2-E3-HQ from Different Productions, Technical Report HS 160912, University of Applied Sciences Osnabrueck, 2016



# HOCHSCHULE OSNABRÜCK

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Februar 2017

Prof. Dr.-Ing. E. Buckow (Hochschule Osnabrück)  
Bittner, M., M.sc. (ehem. Hochschule Osnabrück, heute TenneT)  
Dipl.-Ing. M. Havekost (Hochschule Osnabrück)  
Dipl.-Ing. M. Kröger (Hochschule Osnabrück)

Albrechtstraße 30  
D-49076 Osnabrück/Germany

Phone 0541-969-3066  
Fax 0541-969-3070  
E-mail [e.buckow@hs-osnabrueck.de](mailto:e.buckow@hs-osnabrueck.de)  
www <http://www.ecs.hs-osnabrueck.de/elektrische-energieversorgung.html>