

Eidesstattliche Erklärung

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt in erster Linie meinem Betreuer Univ.-Prof. Dr.-Ing Uwe Schichler, für die Ermöglichung der Verfassung dieser Arbeit am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, sowie für die Unterstützung und Begleitung bei der Entwicklung und Erstellung dieser Arbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Plesch, der immer mit einem offenen Ohr, Ratschlägen und Verbesserungsvorschlägen an der Durchführung dieses Projektes beteiligt war.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Insbesondere bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Institutswerkstatt, die jegliche Sonderwünsche sehr rasch umsetzen konnten.

An dieser Stelle möchte ich mich auch noch bei meinen Kommilitonen bedanken, mit denen ich die letzten sechs Jahre verbringen durfte und die im Laufe der Zeit zu sehr guten Freunden wurden. Euer überwiegender Optimismus und eure positive Energie hat meine Motivation zum Abschluss dieses Studiums stets gestärkt und ihr habt diese Zeit sehr besonders gemacht.

Mein außerordentlicher Dank gilt zum Abschluss meiner Familie und meinen Freunden, im Besonderen meiner Mama Birgit und meinem Freund Christian, die mir den nötigen privaten Rückhalt, Unterstützung in allen Lebenslagen und einen abwechslungsreichen Ausgleich während des Studiums sowie während der Erstellung dieser Arbeit geboten haben.

Kurzfassung

Elektrische Maschinen, im Speziellen Generatoren, sind eine der wichtigsten Komponenten des Energieversorgungsnetzes. Hohe Spannungsbeanspruchungen stellen große Herausforderungen an das Isoliersystem der Betriebsmittel und nicht selten kommt es auf Grund der starken Beanspruchung zu Teilentladungen. Teilentladungen treten entweder in festen Isolierstoffen, Flüssigkeiten oder Gasen auf. Für rotierende elektrische Maschinen stellt der Wickelkopfbereich, im Besonderen der Luftspalt zwischen den einzelnen Statorstäben, einen kritischen Bereich hinsichtlich des Teilentladungseinsatzes dar und wird daher in dieser Arbeit fokussiert. Die gesonderte Betrachtung von Teilentladungen in elektrischen Maschinen ist sehr wichtig, da die Generatorisolation vorzeitig beschädigt werden kann und damit verbundene Wartungskosten entstehen. Des Weiteren kann bei Ausfällen die Netzstabilität und Versorgungssicherheit gefährdet sein.

Im Zuge der Abnahmeprüfung der Maschine wird vom Kunden eine spezielle Teilentladungsprüfung gefordert. Nach der Norm IEEE 1799 ist die Teilentladungsfreiheit bis zur 1,2-fachen Nennspannung sicherzustellen. Die Einhaltung dieser Forderung ist oft schwierig, da die Prüfungen nicht direkt im Werk unter definierten Bedingungen stattfinden, sondern meist am Endaufstellungsort des Generators. Das bedeutet, dass unterschiedliche klimatische Bedingungen, Aufstellungshöhen und Umgebungsdrücke aufeinander treffen. Interessant festzustellen ist daher, welchen direkten Einfluss unterschiedliche Temperatur- und Feuchtebedingungen, sowie Umgebungsdrücke auf das Einsetzen der Teilentladungen haben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Messobjekte, die den Wickelkopf eines Generators nachbilden, unter verschiedenen klimatischen Bedingungen untersucht. Des Weiteren werden Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt, um kritische Stellen, an welchen es zu Feldüberhöhungen und in weiterer Folge zu Entladungen kommen kann, zu definieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit messtechnisch zu erfassen. Daraus sollen klimatische Bedingungen ermittelt werden, bei welchen Maßnahmen zu setzen sind, um einerseits Probleme bei der Abnahmeprüfung der Generatoren zu vermeiden, aber andererseits auch langfristig die Generatorisolation vor Beschädigungen zu schützen. Dies bedeutet, dass eine Senkung der Wartungskosten der Generatoren erreicht, sowie in weiterer Folge die Netzstabilität und Versorgungssicherheit in höherem Maße gewährleistet werden kann.

Schlüsselwörter:

Elektrische Maschinen

Wickelkopfbereich

Teilentladungen

Koronaeinsetzspannung

Koronaaussetzspannung

Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Abstract

Electrical machines, particularly generators are one of the most important components of the energy supply network. There is a big challenge on the insulation system of the operation equipment because of the high voltage stress. These stresses are sometimes leading to partial discharges, which occur in solid insulating materials, liquids and gases. In rotating electrical machines the end winding area, particularly the air gap between the stator bars is a very critical area where the most partial discharges occur. It is quite important to consider partial discharges in electrical machines, as the generator insulation can be damaged and this results in high maintenance costs. Also network stability and reliability of supply will be endangered.

Nowadays customers require a completely corona-free machine up to 120 % of the nominal voltage, according to IEEE 1799. As the testing of the machines often takes place at the site of installation and not directly at the factory, where constant climate conditions dominate, it is very important to investigate if different climate conditions, like temperatures, humidities and ambient pressures, influence the corona inception and extinction voltages.

For this master thesis various test objects will be investigated under different climate conditions to find out if there is a direct relation between temperature, humidity, pressure and the corona inception voltage. Also finite element analysis will be done to get to know where the critical points with the highest field strengths and therefore the discharges are.

The aim is to investigate if there is an influence of temperature and humidity on partial discharges in the end winding of an electrical machine, to consider if appropriate steps have to be taken to fulfill the requirements of the customers on one hand. But on the other hand also to protect the insulation of the machines from damage to reduce maintenance costs and to prevent blackouts.

Key words:

Electrical machines

End winding

Partial discharges

Corona inception voltage

Corona extinction voltage

Temperature and humidity

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	2
2.1	Isoliersysteme von Generatorstäben	2
2.1.1	Allgemeines	2
2.1.2	Isolierstoffe	2
2.1.3	Aufbau	2
2.2	Grundlagen zu Teilentladungen.....	5
2.2.1	Allgemeines	5
2.2.2	Elektrische Gasentladungen	5
2.2.3	Das Paschen-Gesetz und die Anwendbarkeit auf den Wickelkopfbereich elektrischer Maschinen	8
2.3	Einfluss von Druck und Aufstellungshöhe auf die Teilentladungseinsetzspannung ...	9
2.4	Einfluss von Temperatur und Feuchte auf Teilentladungen	10
2.5	Teilentladungen in rotierenden elektrischen Maschinen, Detektion und Interpretation.....	14
3	Messtechnische Untersuchungen.....	21
3.1	Allgemeines	21
3.2	Teilentladungsdetektionsverfahren	21
3.2.1	Optische Detektion	21
3.2.2	Elektrische Detektion	21
3.3	Messobjekte	22
3.3.1	Modellübersicht	22
3.3.2	Platte-Platte-Anordnungen	23
3.3.3	Stab-Stab-Anordnungen	24
3.3.4	Wickelkopfanordnung	26
3.4	Messaufbau	29
3.4.1	Messungen im Klimaschrank	29
3.4.2	Messungen im Klimaraum	30
3.4.3	Teilentladungsfreiheit der Messaufbauten.....	31
3.5	Messroutine.....	32
3.5.1	Messablauf Klimaschrank und Klimaraum	32
3.5.2	Temperatur/Feuchte-Matrix.....	33
3.6	Messergebnisse	35
3.6.1	Allgemeines	35
3.6.2	Wasseranlagerungen an der Isolierstoffoberfläche.....	35

3.6.3	Platte-Platte-Anordnung	38
3.6.4	Stab-Stab-Anordnung	39
3.6.5	Wickelkopfanordnung	41
3.6.6	Vergleich der Messergebnisse der einzelnen Anordnungen.....	44
3.6.7	Auswertung der elektrischen Teilentladungsmessung	47
3.6.8	Auswertung der optischen Teilentladungsdetektion.....	53
3.6.9	Interpretation des Temperatur- und Feuchteinflusses.....	57
3.6.10	Anwendbarkeit des Paschengesetzes.....	59
3.7	Diskussion.....	60
4	Finite-Elemente-Simulationen.....	64
4.1	Methode der Finiten Elemente.....	64
4.2	FEM-Modelle.....	65
4.2.1	Modellbildung	65
4.2.2	Modell 1.....	65
4.2.3	Modell 2 und Modell 3	66
4.2.4	Modell 4 und Modell 5	66
4.2.5	Modell 6.....	67
4.3	Auswertemethodik	68
4.4	Berechnungsergebnisse.....	70
4.5	Diskussion.....	73
5	Ausblick.....	78
6	Zusammenfassung	79
7	Literaturverzeichnis.....	81
8	Anhang	84
8.1	Anhang A: Detaillierte Auswertung der messtechnischen Untersuchungen	84
8.1.1	Auflistung der detaillierten Messwerte	84
8.1.2	Diagrammauswertung.....	101
8.1.3	Detaillierte Auswertung der elektrischen Teilentladungsmessungen.....	105
8.2	Anhang B: Detaillierte Auswertung der Finiten-Elemente-Berechnungen	113

1 Einleitung

Die Versorgung mit elektrischer Energie ist ein nicht mehr wegzudenkendes Grundbedürfnis eines jeden Menschen. Netzstabilität und Versorgungssicherheit sind unter allen Umständen zu gewährleisten, beziehungsweise Netzausfälle oder gar Blackouts müssen vermieden werden.

Elektrische Maschinen, vor allem Generatoren, stellen mit Abstand den wichtigsten Bestandteil des Energieversorgungsnetzes dar. Sie ermöglichen die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie und erzeugen den für unseren Lebensalltag essentiellen Strom. Generatoren spielen aber nicht nur für die Energieerzeugung eine wesentliche Rolle, sondern tragen auch erheblich zur Netzstabilisierung bei. Durch geeignete Regelungen kann Ausfällen vorgebeugt werden.

Kraftwerke sind weltweit nicht nur in Gebieten mit unkritischen klimatischen Bedingungen zu finden, sondern sehr oft auch in Gebieten, wo hohe Aufstellungshöhen, hohe Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeiten vorherrschen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob diese klimatischen Ausnahmebedingungen Einfluss auf die Teilentladungseinsetzspannung der Generatorisolation haben. Fokussiert wird in der Untersuchung der Wickelkopfbereich der Maschine, da es in diesem Bereich am häufigsten zu verfrühten Entladungen auf Grund der Umgebungsbedingungen kommen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zu Beginn eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Der Fokus dabei liegt auf bisherigen Untersuchungen des Temperatur- und Feuchteinflusses auf Teilentladungen. Die Kernaussagen dieser Literaturstudie sollen in weiterer Folge mit den durchgeführten messtechnischen Untersuchungen dieser Arbeit verknüpft werden. Für die Messungen kommen drei verschiedene Modelle, die den Wickelkopf in unterschiedlicher Komplexität nachbilden, zum Einsatz. Anhand einer festgelegten Temperatur/Feuchte-Matrix wird versucht, möglichst viele Klimate zu vermessen.

Des Weiteren sollen Finite-Elemente-Berechnungen einen Vergleich zwischen Messergebnissen und Berechnungsergebnissen ermöglichen. Für diese Berechnungen stehen sechs Modelle zur Verfügung, die die unterschiedlichen Verhältnisse im Wickelkopf nachbilden.

Die Auswirkungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf Teilentladungen sollen in erster Linie erfasst werden. Ausgehend davon kann die Bestimmung von kritischen Klimaten erfolgen, bei welchen geeignete Maßnahmen zu treffen sind, um die Generatorisolation vor Beschädigungen zu schützen und in weiterer Folge langfristig Wartungskosten zu senken sowie Netzausfällen vorzubeugen.

2 Stand der Technik

2.1 Isoliersysteme von Generatorstäben

2.1.1 Allgemeines

Die Isolation eines Generators soll prinzipiell die einzelnen Leiter untereinander, aber auch die Leiter gegen die Eisenbleche des Ständers isolieren. An den Stirnseiten des Blechpaketes treten diese Leiter, sogenannte Spulen oder Stabwicklungen, aus dem Blechpaket und es kommt zu einer Verschaltung der einzelnen Spulen im Wickelkopf der Maschine. Die Ausführung der Isolierung unterscheidet sich je nach Größe und Alter der Maschine [1].

Das Isoliersystem muss einerseits einige Anforderungen hinsichtlich der mechanischen und thermischen Beanspruchungen erfüllen. Andererseits müssen aber auch Teile unterschiedlichen elektrischen Potentials getrennt und die Potentiale an der Oberfläche so gesteuert werden, dass keine Durch- beziehungsweise Überschläge auftreten.

Um all diese Anforderungen erfüllen zu können, müssen die Abstände zwischen den Generatorstäben so gewählt sein, dass ein Luftspalt bleibt, der einen Teil der Isolation übernimmt und eine geeignete Wärmeabfuhr ermöglicht [2].

2.1.2 Isolierstoffe

Wie zuvor erwähnt, kann Luft bei geeigneter Wahl der Abstände einen Teil der Isolierung übernehmen. Allerdings können die Abstände nicht beliebig vergrößert werden und es müssen zusätzlich auch andere Isolationskomponenten mit geeigneten dielektrischen Kennwerten zum Einsatz kommen.

Die wichtigsten Materialien des Isoliersystems eines Generators sind:

- Glimmer
- Trägermaterial für den Glimmer
- Füllmaterial

Das Trägermaterial für den Glimmer setzt sich meist aus Polyestervliesen, Glasmatten oder Glasgewebe in Verbindung mit verschiedenen Harzen zusammen. Gießharzformstoffe, wie zum Beispiel Epoxidharz, dienen häufig als Füllmaterial des Hochspannungsisoliersystems in rotierenden elektrischen Maschinen. Diese werden flüssig verarbeitet und zur Vermeidung von Gaseinschlüssen meist unter Vakuum ausgehärtet. Die dafür heute üblichen Fertigungsverfahren sind das Vakuum-Druck-Imprägnierverfahren und das Spulenpressverfahren [2, 3].

2.1.3 Aufbau

Das Isoliersystem eines Generatorstabes besteht aus drei Komponenten:

- Hauptisolierung
- Nutenglimmschutz oder Außenglimmschutz
- Endenglimmschutz im Wickelkopfbereich

Der prinzipielle Aufbau wird in Bild 2-1 dargestellt.

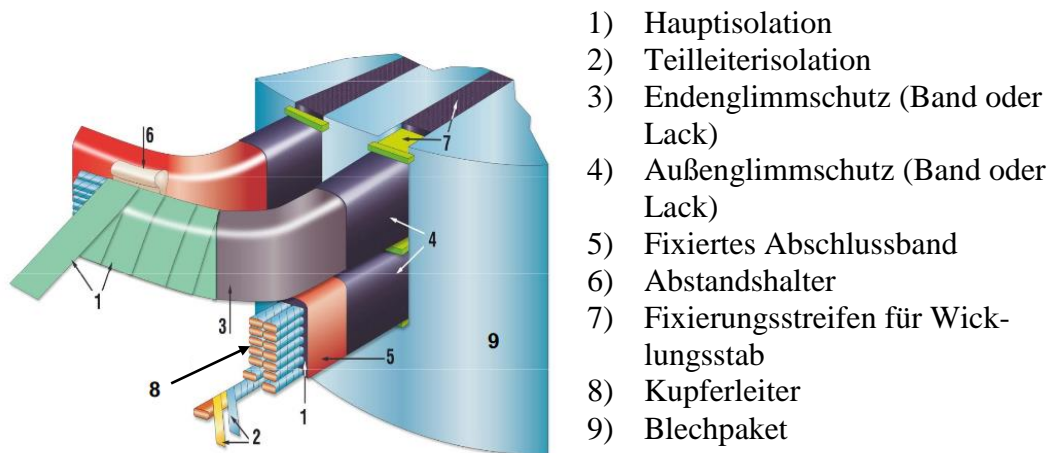


Bild 2-1: Schematischer Aufbau eines Generatorisoliersystems [4]

Die Generatorstabisolierung besteht, wie in Bild 2-1 ersichtlich, aus einer Teileleiterisolierung, welche die einzelnen Leiter eines Stabes untereinander isoliert. Die Hauptisolierung, welche die einzelnen Teileiter zu einem Stab verbindet, besteht, je nach Herstellungsverfahren, aus porösem oder harzreichem Isolationsband. Die Bestandteile der Hauptisolierung sind, wie bereits oben erwähnt, Glimmer, verschiedene Trägermaterialien und Harz zur Verbindung und Hohlraumfüllung. Je nach Betriebsfeldstärke der Maschine unterscheidet sich die Lagenzahl der Hauptisolierung, welche hauptsächlich zur Vermeidung von Kurzschlüssen zwischen Teileleitern und Blechpaket angebracht wird.

Gegen diverse Umwelteinflüsse, wie Staub, Luftfeuchte und Öl, wird im Bereich des Wickelkopfes ein fixierendes Abschlussband angebracht, welches eine versiegelte Oberfläche bildet. Zur Befestigung der Stäbe im Statorblechpaket werden verschiedene Abstandshalter verwendet, die eine fixe Positionierung der Stäbe ermöglichen [5].

Des Weiteren ist laut Bild 2-1 noch der Außen- und Endenglimmschutz am Stab aufgewickelt. Die Funktion dieser beiden Isolationsbänder wird nachfolgend noch detaillierter beschrieben.

Bild 2-2 zeigt einen einzelnen Generatorstab. Die Nutlänge ist jener Teil des Stabes, der in das Statorblechpaket eingebettet wird. Die restlichen gebogenen Abschnitte befinden sich im Wickelkopfbereich der Maschine.

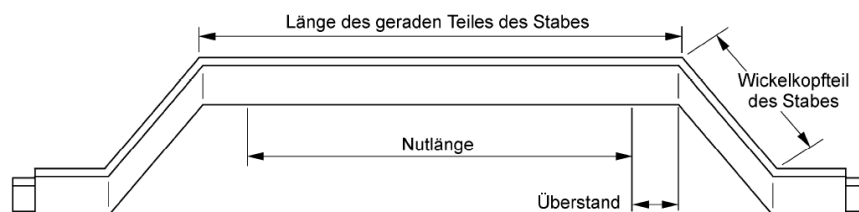


Bild 2-2: Statorstab [6]

Außenglimmschutz und Endglimmschutz

Der Außenglimmschutz stellt einen definierten Übergang zwischen der Hauptisolierung der einzelnen Kupferleiter und dem geerdeten Blechpaket her. Ziel ist es, eine geeignete Potentialsteuerung zwischen Hochspannung und Erde zu gewährleisten. Auftretende Teilentladungen in den Hohlräumen zwischen Hauptisolierung und Blechpaket können somit vermieden werden, da es auf Grund des gleichen Potentials am Außenglimmschutzband sowie Blechpaket zu einem Kurzschluss der Hohlräume kommt.

Bild 2-3 zeigt die Auswirkungen mit und ohne Außenglimmschutz. Ist kein Außenglimmschutz vorhanden, kommt es zu Entladungen im Luftspalt zwischen Generatorstab und Blechpaket. Die leitfähige Schicht, der Außenglimmschutz, ermöglicht die gewünschte Potentialsteuerung und verhindert die Bildung von Entladungen. Die Leitfähigkeit des Außenglimmschutzes darf allerdings nicht zu hoch sein, da in diesem Fall zu hohe Verluste auftreten würden. Ist die Leitfähigkeit zu tief, besteht die Gefahr der Bildung von Entladungen. Typische Werte für den AGS sind $0,2 \text{ k}\Omega$ bis $10 \text{ k}\Omega$ [4].

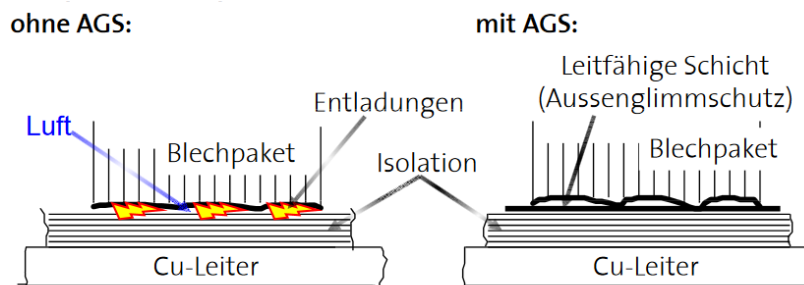


Bild 2-3: Schematische Darstellung eines Generatorstabs im Blechpaket mit und ohne AGS [4]

Ein ähnliches Prinzip verfolgt der Endglimmschutz. Für Betriebsspannungen über 6 kV wird dieser zusätzlich am Nutausgang in Richtung Wickelkopf zur geeigneten Potentialsteuerung angebracht, um Entladungen am Ende des Blechpaketes zu vermeiden. Bild 2-4 zeigt den Potentialverlauf am Ende des Blechpaketes mit und ohne EGS. Ohne Endglimmschutz kommt es zu einem Spannungssprung und in weiterer Folge zu Entladungen. Mit EGS kann ein kontinuierlicher Potentialverlauf gewährleistet werden und die Entstehung von Entladungen wird gehemmt [5].

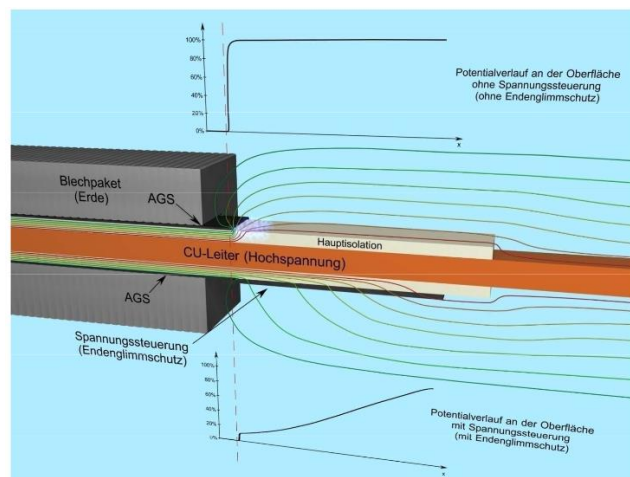


Bild 2-4: Schematische Darstellung eines Generatorstabs am Ende des Nutteils mit und ohne EGS [4]

2.2 Grundlagen zu Teilentladungen

2.2.1 Allgemeines

Teilentladungen sind Durchschlagsphänomene, die die Distanz zwischen zwei Elektroden nicht komplett überbrücken. Sie treten in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern auf, beeinträchtigen die kurzzeitige elektrische Festigkeit aber meist nicht. Allerdings führen Teilentladungen zu einer drastischen Reduktion der Lebensdauer und sind daher ein essentielles Kriterium zur Beurteilung der Isolationsqualität. Die Ursachen der Teilentladungen sind in lokalen Feldstärkeüberhöhungen beziehungsweise Minderungen der elektrischen Festigkeit begründet. Generell unterscheiden sich Teilentladungen nach dem Ort des Auftretens und nach dem Isolationsmedium, wie zum Beispiel [1, 7]:

- Innere Teilentladungen
- Oberflächenentladungen
- Entladungen in Festkörpern
- Entladungen in Flüssigkeiten
- Elektrische Gasentladungen

Innere Teilentladungen

Zu inneren Teilentladungen kommt es hauptsächlich in gasgefüllten Hohlstellen, sogenannten Fehlstellen, fester beziehungsweise flüssiger Isolierstoffe. Solche Fehlstellen können auch durch „electrical treeing“ hervorgerufen werden.

Für die Berechnung innerer Teilentladung wird auf ein vereinfachtes kapazitives Ersatzschaltbild zurückgegriffen, da in der Praxis die geometrischen Verhältnisse der zuvor erwähnten Hohlräume und Fehlstellen nicht exakt definiert werden können. Ein einzelner Teilentladungsimpuls wird dann als Entladung der definierten Hohlraumkapazität beschrieben.

Die höchste Feldstärke im Hohlraum entsteht, wenn dieser geradlinig verläuft. Die Einsatzfeldstärke errechnet sich dann mit $\epsilon_{r\text{Hohlraum}} = 1$ über:

$$E_i = \epsilon_r E_d = \epsilon_r \frac{U_d}{d} \quad (1)$$

Wobei U_d die Durchschlagsspannung für einen luftgefüllten Hohlraum beschreibt [7].

Oberflächenentladungen

Oberflächenentladungen treten an dielektrischen Grenzflächen auf, an welchen beträchtliche Feldstärken vorherrschen. Jene Grenzflächen sind dabei entweder von einem gasförmigen oder flüssigen Stoff umgeben. Oberflächenentladungen können schon bei sehr geringen Feldstärken auftreten [7].

2.2.2 Elektrische Gasentladungen

Gase sind sehr gute Isolierstoffe, die durch ihre niedrigen Leitfähigkeiten sowie eine nahezu frequenzunabhängige Dielektrizitätszahl charakterisiert sind. Allerdings weisen sie eine um einiges niedrigere elektrische Festigkeit als feste und flüssige Isolierstoffe auf. Es treten daher unter bestimmten Beanspruchungen Entladungserscheinungen auf, die einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung darstellen. Dieses Phänomen wird auch mit Hilfe der Gasentladungskennlinie beschrieben [1, 7].

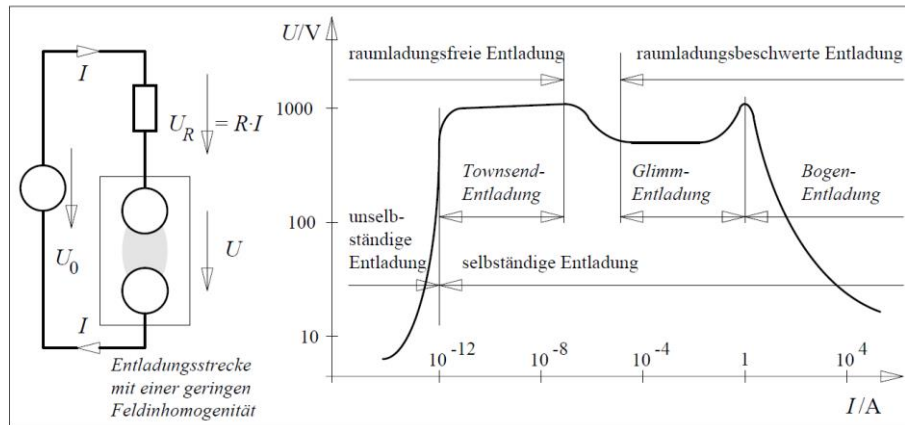


Bild 2-5: Gasentladungskennlinie in doppelt logarithmischem Maßstab [1]

Wie in der Gasentladungskennlinie aus Bild 2-5 ersichtlich, werden unselbständige und selbständige Entladungen sowie raumladungsfreie und raumladungsbeschwerte Entladungen unterschieden.

Im vorderen Teil der Gasentladungskennlinie steigt der Strom ohne zusätzliche Spannungserhöhung an. Die Raumladungen haben also noch keinen Einfluss auf die elektrische Feldstärke im homogenen Feld. Dieser Zustand wird als raumladungsfreie Entladung bezeichnet. Erst mit steigender Stromstärke bilden sich Raumladungen, die die elektrische Feldstärke erheblich verändern. Dadurch ergibt sich ein weiterer Stromanstieg, selbst bei fallender Spannung, dies wird als raumladungsbeschwerte Entladung bezeichnet. In diesem Bereich wird die durch Stoßprozesse hervorgerufene Aussendung von Licht so intensiv, dass für das menschliche Auge sichtbare Leuchterscheinungen (Glimmentladungen) entstehen [1].

Unselbständige Entladung und der Übergang zur selbständigen Entladung

Ein Atom besteht aus positiv und negativ geladenen Teilchen, wobei die positiv geladenen Teilchen im Atomkern auftreten und die negativ geladenen Teilchen den Kern umkreisen. Ein neutrales Atom weist immer gleich viele Elektronen wie Positronen auf. Unter Energiezufuhr können allerdings einzelne Elektronen aus den Atomen losgelöst werden. Nach dieser Loslösung steht den Protonen des Kerns eine kleinere Anzahl an Elektronen der Hülle gegenüber, es bildet sich ein positives Ion. Auch die frei gewordenen Elektronen können sich wieder an neutrale Moleküle anlagern und es entstehen negative Ionen.

Infolge ihrer elektrischen Ladung ziehen die entstandenen positiven und negativen Ionen sich an, stoßen aufeinander und vereinigen sich. Ionenbildung erfolgt einerseits durch Stoßprozesse, aber auch durch elektromagnetische Wellenstrahlung. Beispiele für den Stoßprozess sind unter anderem Kathoden- und Kanalstrahlen, also im elektrischen Feld beschleunigte Elektronen und Ionen. Aber auch Ionisierung durch den Zusammenstoß der Gasmoleküle, hervorgerufen durch Erhitzung, ist möglich.

Eine weitere wichtige Ionisierungsursache ist die Wellenstrahlung. Hierbei erfolgt die Ionenbildung durch kurzwellige elektromagnetische Strahlen, wie zum Beispiel Licht- oder Röntgenstrahlen [8].

Wird nun Luft in ein elektrisches Feld gebracht, wird sie in geringem Maße leitend und es findet ein Stromdurchgang statt. Dieser Stromdurchgang ist gleichbedeutend mit dem Transport von Ionen und Elektronen. Die Elektronen weisen, auf Grund ihrer kleineren Masse, eine höhere Geschwindigkeit auf, als die positiven Ionen [8].

Die Tabelle 2-1 zeigt, dass sich die Geschwindigkeit der Ionen auch durch die Feuchte der Luft unterscheidet.

Tabelle 2-1: Beweglichkeit der Ionen bei Luft von 700 Torr und 20 °C und kleiner Feldstärke [8]

Trocken	Feucht
$k_+ = 1,36$	$1,37 \frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}}$
$k_- = 1,87$	$1,51 \frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}}$

Es wird zwischen unselbstständigen und selbstständigen Entladungen unterschieden. Treten geringe elektrische Feldstärken auf, verlaufen Strom und Spannung proportional, dies wird auch als ohmscher Bereich bezeichnet. Die Ladungsträger entstehen nur durch die zuvor beschriebenen Thermo- und Photoionisation. Das Fließen des Stromes bildet keine zusätzlichen Ladungsträger, daher wird dieser Vorgang unselbstständige Entladung genannt.

Mit zunehmender elektrischer Feldstärke steigt der Strom an. Der Abtransport der Ionen erfolgt rascher als die Erzeugung. Der Sättigungsstrom ist erreicht, da nicht mehr Ionen für den Transport zur Verfügung stehen als erzeugt werden.

Bei weiter zunehmender Feldstärke beschleunigen die Ladungsträger und besitzen daher genügend kinetische Energie, um durch einen Stoß neue Elektronen beziehungsweise positive Ionen zu schaffen. Dieser Prozess wird Stoßionisierung genannt. Unter diesen Stößen wird zwischen elastischen Stößen, wobei die Elektronen ihre Energie nicht verlieren und die Geschwindigkeit nur der Richtung nach ändern, und unelastischen Stößen unterschieden. Beide Stöße tragen allerdings zur Erhöhung der Ionisierung bei [8]. Die Gasentladungskennlinie im Übergangsbereich von der unselbstständigen zur selbstständigen Entladung wird in Bild 2-6 beschrieben.

Ist die Entladung unabhängig von der Fremdionisierung, geht sie in die selbstständige Entladung über. Die Mindestspannung, welche angelegt werden muss damit selbstständige Entladung auftritt, wird als Anfangsspannung beziehungsweise Zündspannung bezeichnet.

Das Eintreten dieser selbstständigen Entladungen hängt von der freien Weglänge ab, welche dem Druck umgekehrt proportional ist. Die Beziehung, dass die Durchschlagsspannung durch das Produkt aus Druck und Schlagweite bestimmt ist, lässt sich formulieren. Darauf wird im nächsten Kapitel näher eingegangen [8].

Meist treten selbstständige Entladungen in Form von Glimmen in der Luft, Büscheln, Funken oder Lichtbögen auf. Im stark inhomogenen Feld treten sie anfangs nur an den Orten höchster Feldstärke auf und gehen nach Steigern der Spannung in Büschelentladungen beziehungsweise Funkenentladungen und Lichtbögen über [8].

Diese Arbeit legt den Betrachtungsfokus auf Koronaentladungen im Wickelkopfbereich elektrischer Maschinen, welche zu den selbstständigen Entladungen zählen. Sie treten im stark inhomogenen Feld einer gasisolierten Elektrodenanordnung auf. Bei Wechselspannungsbeanspruchung erscheinen die Entladungen im Spannungsmaximum [1, 7].

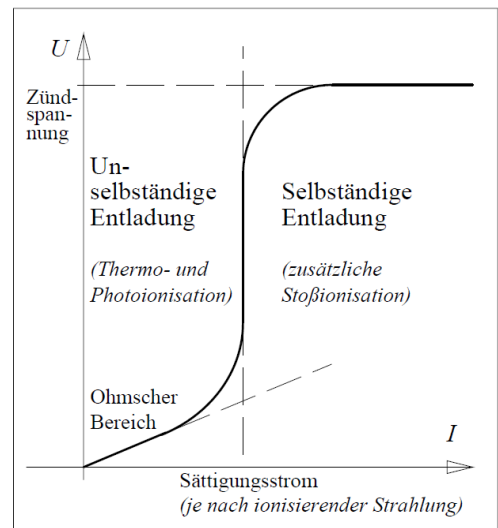


Bild 2-6: Gasentladungskennlinie im Übergangsbereich von unselbstständiger Entladung zu selbstständiger Entladung [1]

2.2.3 Das Paschen-Gesetz und die Anwendbarkeit auf den Wickelkopfbereich elektrischer Maschinen

Da Gase, im Vergleich zu festen und flüssigen Isolierstoffen, sehr gut definierbare physikalische Eigenschaften aufweisen, lässt sich im homogenen Feld unter raumladungsfreien Verhältnissen die Durchschlagsspannung mit Hilfe eines physikalischen Modells mathematisch formulieren – Das Paschen-Gesetz [1].

Das Paschen-Gesetz besagt, dass die Durchschlagsspannung einer Gasstrecke zwischen metallenen Elektroden im homogenen Feld eine Funktion des Produktes aus Gasdruck und Elektrodenabstand ist:

$$U_d = f(p \cdot d) \quad (2)$$

J. S. Townsend fasste Paschens Ergebnisse in einer mathematischen Formulierung zusammen. In Verbindung mit der Zündbedingung nach Townsend ist das Paschengesetz mit seiner charakteristischen Kurvenform als analytische Näherungsbeziehung beschrieben durch [9, 10]:

$$U_d = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln \left(\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right)} \quad (3)$$

Bild 2-7 zeigt die Paschenkurve für Luft bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C.

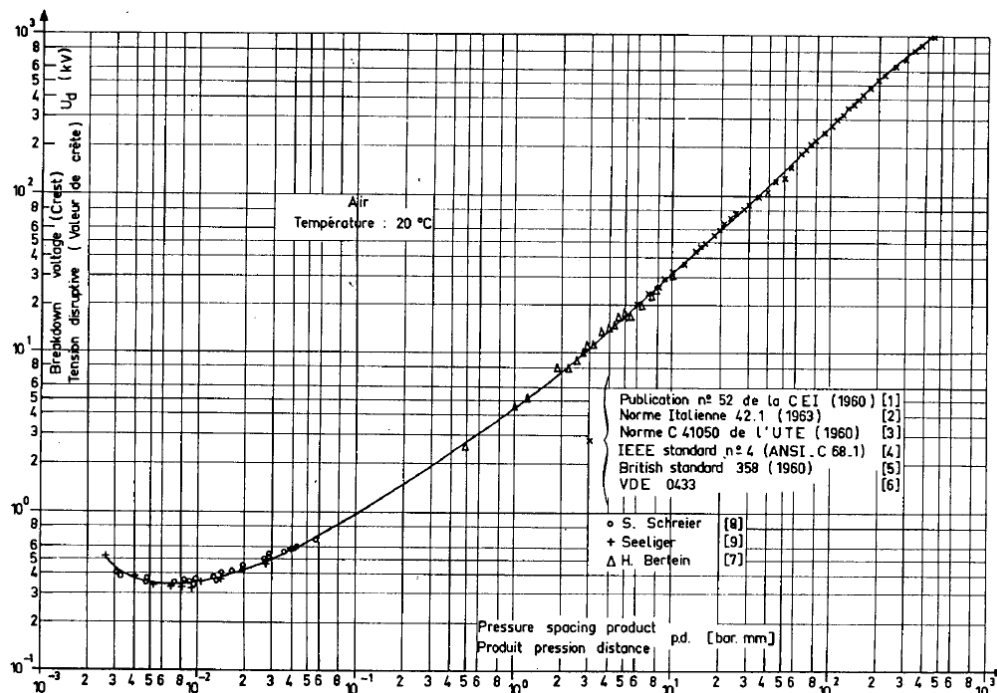


Bild 2-7: Paschenkurve für Luft bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C [9]

Anwendbarkeit auf den Wickelkopfbereich elektrischer Maschinen

Das Paschen-Gesetz gilt prinzipiell nur für Anordnungen blanker Metallelektroden. Eine Analogie zwischen dem Teilentladungsverhalten von Anordnungen isolierter Elektroden mit Luftspalt und dem klassischen Paschen-Gesetz lässt sich allerdings ableiten. Das bedeutet, dass das Paschen-Gesetz, welches die Durchschlagsspannung des Gasraumes zwischen Metallelektroden beschreibt, in erster Näherung für eine grobe Abschätzung der Koronaeinsetzspannung

im Luftspalt von Elektrodenanordnungen „isolierte Platte gegen isolierte Platte“, wie sie im weitesten Sinne im Wickelkopfbereich elektrischer Maschinen vorkommen, angewandt werden kann [10]. Dies gilt, sofern eine Umrechnung der Teilentladungseinsetzspannung auf den Luftspalt der jeweiligen Anordnung erfolgt.

Für diese Umrechnung wird die Spannungsteilerregel verwendet. Nachfolgendes Beispiel zeigt die Herleitung der Formel mit $\epsilon_{rLuft} = 1$.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (4)$$

$$\frac{U_{Luftspalt}}{U_{Gesamt}} = \frac{\frac{1}{C_{Luftspalt}}}{\frac{2}{C_{Isolierung}} + \frac{1}{C_{Luftspalt}}} \quad (5)$$

Aus den grundlegenden Formeln für die Kapazität und der Spannungsteilung ergibt sich somit die verwendete Berechnungsformel für die Spannung im Luftspalt des Messobjektes [2].

$$U_{Luftspalt} = U_{Gesamt} \cdot \frac{d_{Luft}}{\frac{2d_{Isolierung}}{\epsilon_{rIsolierung}} + d_{Luft}} \quad (6)$$

2.3 Einfluss von Druck und Aufstellungshöhe auf die Teilentladungseinsetzspannung

Wie schon in der Einleitung erwähnt, hat auch die Aufstellungshöhe einen Einfluss auf das Einsetzen von Teilentladungen. Generatoren werden häufig in sehr hoch gelegenen Gebieten eingesetzt und in Betrieb genommen, daher ist auch der Aspekt des sinkenden Luftdruckes, je höher die Aufstellungshöhe wird, nicht vernachlässigbar. Bild 2-8 geht auf Unterschiede des Luftdruckes bezogen auf die Meereshöhe ein.

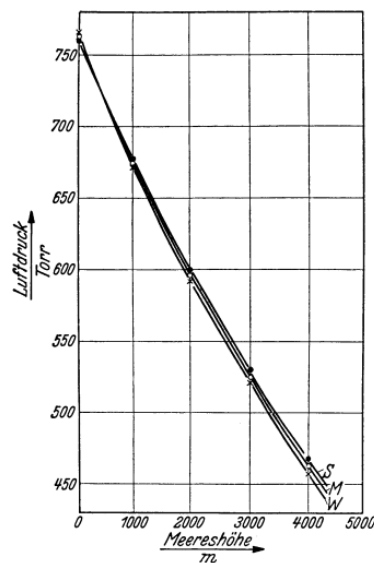


Bild 2-8: Barometerstand für Mitteleuropa verschiedener Meereshöhen [8]

Die Norm „IEEE 1799“ regelt, dass bei Abnahmeprüfungen für Aufstellungshöhen höher als 1000 Meter eine korrigierte Prüfspannung ermittelt werden muss. Die empfohlene Prüfspannung ist:

$$V_{test} = \frac{V_{nominal\ line-to-line}}{K_d} \quad (7)$$

wobei K_d der Luftdichtefaktor ist, welcher in der IEEE Std 4a-2001 durch

$$K_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \cdot \left(\frac{T_0 + 273}{T + 273}\right) \quad (8)$$

gegeben ist.

Hier gibt p den atmosphärischen Druck, p_0 den Referenzdruck, m einen Faktor gleich eins für Überschlagsdistanzen unter einem Meter, T die Temperatur im Betrieb der Maschine und T_0 die Referenztemperatur an [11, 12].

Bild 2-9 zeigt den Verlauf der Durchschlagspannung bei unterschiedlicher Aufstellungshöhe. Die Daten (Luftdruck und Temperatur) für diese Berechnung wurden aus den Online-Wetterdaten des Landes Steiermark entnommen.

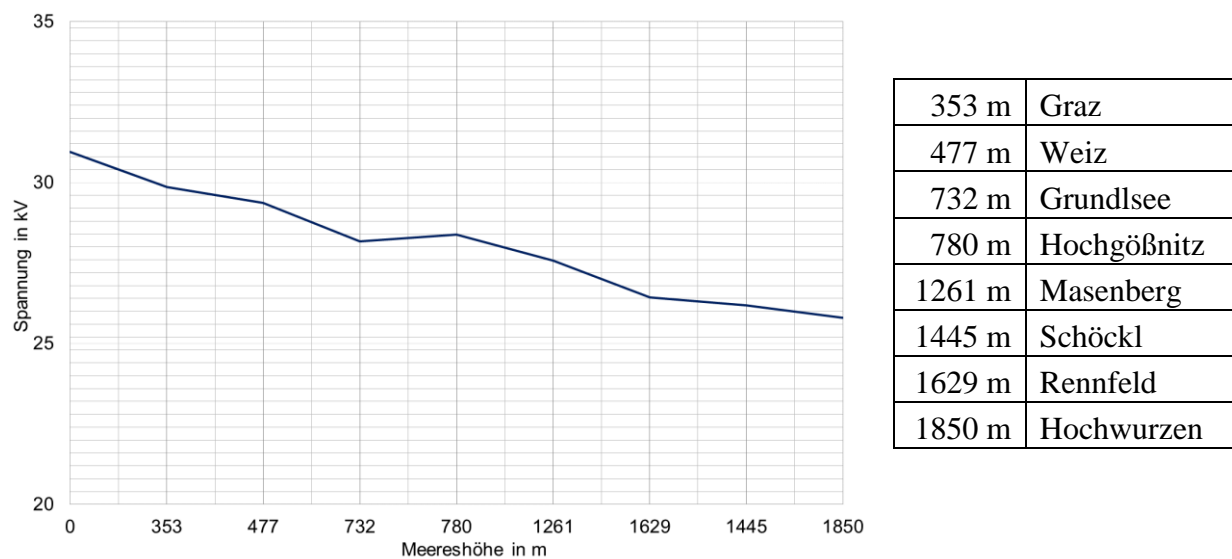


Bild 2-9: Verlauf der Durchschlagspannung bei unterschiedlichen Aufstellungshöhen [13]

2.4 Einfluss von Temperatur und Feuchte auf Teilentladungen

Prinzipiell hat die Luftfeuchtigkeit innerhalb normaler Grenzen keinen Einfluss auf die Koronaeinsatzspannung einer Elektrodenanordnung. Whitehead fand bei Versuchen an Drähten in Hohlzylindern mit relativer Feuchte von 10 % bis 90 % keinen nennenswerten Unterschied der Anfangs-Koronaspannungen. Auch Townsend und Edmunds konnten bei geringem Druck keine Änderungen zwischen Versuchen bei staubfreier Zimmerluft und gut getrockneter Luft feststellen. Allerdings ist ein signifikanter Feuchteinfluss zu beobachten, sobald die

Wandungen der Funkenstrecke aus einem Dielektrikum bestehen. Das bedeutet, es wirken sich die äußeren Einflüsse Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Druck stärker auf die Koronaeinsetzspannung aus [8, 14].

Die im nachfolgenden Bild dargestellten Versuche verwenden einerseits eine vollständig saubere Plattenanordnung mit einem zylindrischen Isolierkörper dazwischen und andererseits eine Platte-Platte-Anordnung mit Luftspalt. Die in Bild 2-10 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass bei Verwendung des Isolierkörpers ein stärkerer Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Durchbruchfeldstärke detektiert wurde [8].

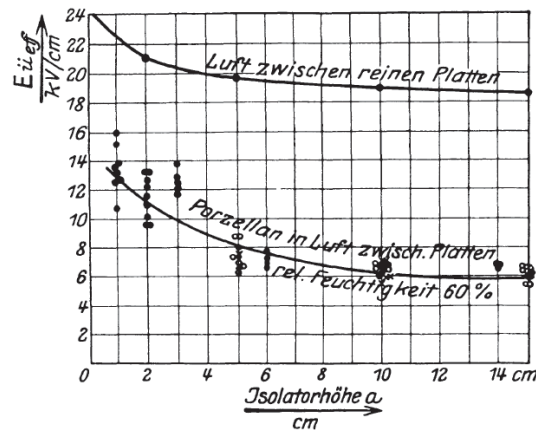


Bild 2-10: Überschlagsfestigkeit eines Porzellanzyllinders zwischen zwei Platten verglichen mit einer Platte-Platte Anordnung mit Luftspalt [8]

Zu vermuten ist, dass Erscheinungen an der Oberfläche den Spannungseinbruch mit sich bringen. Teile der Oberfläche besitzen infolge der Feuchtigkeit eine geringere Leitfähigkeit. Der Widerstand der Oberfläche ist also in Richtung der Kraftlinie des elektrischen Feldes sehr unregelmäßig verteilt. Ein höherer Prozentsatz der Gesamtspannung entfällt auf die besser isolierenden Strecken des Dielektrikums, die Überschlagsspannung wird dort früher erreicht. Bei Wechsellastbeanspruchung wird die Spannungsverteilung zusätzlich durch auftretende Teilkapazitäten an den besser leitenden Stellen beeinflusst. Zum Beispiel steigt die Überschlagsspannung von Porzellanisolatoren mit betauter Oberfläche stark an, wenn diese lackiert werden. Bei Betauung ist die Überschlagsspannung eines Porzellanstützers von 237 kV auf 120 kV gesunken, mit einer lackierten Oberfläche sank die Spannung nur auf 210 kV [8]. Darüberhinaus können laut Gänger durch die Ionisierung kleiner Luftwickel im Isolierkörper Flächenladungen auftreten, die wiederum die Spannungsverteilung an der Oberfläche stark beeinflussen [8, 15].

Treten nun neben Verschmutzungen durch den normalen Betrieb zusätzliche äußere Einflüsse durch die vorliegenden klimatischen Bedingungen auf, kommt es zu erheblichen Veränderungen der Teilentladungseinsetzspannung. Beispielsweise beeinflusst die Temperatur die Luftdichte. Steigende Temperaturen senken die Überschlagsspannung. Bei einer Schichtung des Dielektrikums quer zu den Feldlinien kann auf Grund der Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten bei steigender Temperatur eine niedrigere Einsetzspannung von Gleitbüschelentladungen auftreten. Dies ist vor allem bei der Untersuchung von Generatorstäben interessant. Einen noch stärkeren Einfluss auf das Verhalten erhält die Temperatur bei feuchter Luft. Die Feuchtigkeit setzt einerseits, bei bestehend aus Luft und festen Isolierstoffen mit inhomogenen Feldern, die Durchschlagspannung herauf, andererseits kann durch Wasseranlagerungen an der Oberfläche die Überschlagsspannung unter hoher Luftfeuchtigkeit wieder absinken.

Der Feuchteinfluss kann am besten über den Korrekturfaktor k_n berücksichtigt werden. Dieser gibt die prozentuelle Änderung der Überschlagsspannung für eine Änderung der absoluten Feuchte um 1 g/m^3 bezogen auf die Überschlagsspannung bei normaler Luftfeuchte (international 11 g/m^3) an.

$$U = \frac{U_n}{1 + \frac{k_n \cdot (11 - F)}{100 - k_n \cdot (11 - F)}} \quad (9)$$

U_n gibt die Überschlagsspannung bei normaler Luftfeuchte und einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ an, F die aktuelle absolute Feuchtigkeit und k_n den Korrekturfaktor, welcher je nach Bauart und Größe des Isolators sowie Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur stark abweichen kann [8].

Zahlreiche weitere Untersuchungen zeigen, dass Feuchtigkeit und Temperatur nicht nur die Überschlagsspannung, sondern auch die Teilentladungen beziehungsweise die Teilentladungseinsetzspannung eines Isoliersystems beeinflussen. So untersuchten Fenger und Stone den Einfluss von Temperatur und Feuchte auf Teilentladungen in Statorwicklungen. Für die Untersuchungen wurde ein Modell bestehend aus zwei Hochspannungskabeln und einem Luftspalt aufgebaut. Hier zeigt sich ein klares Absinken der Teilentladungseinsetzspannung bei steigender Luftfeuchte. Eine eindeutige Aussage über den Feuchteinfluss kann hier bei Betrachtung der absoluten Feuchte getroffen werden. Bild 2-11 zeigt die Teilentladungseinsetzspannungen als Funktion der relativen (a) sowie absoluten Feuchte (b), gemessen für unterschiedliche Schlagweiten und bei den Temperaturen $25 \text{ }^\circ\text{C}$ und $50 \text{ }^\circ\text{C}$ [16].

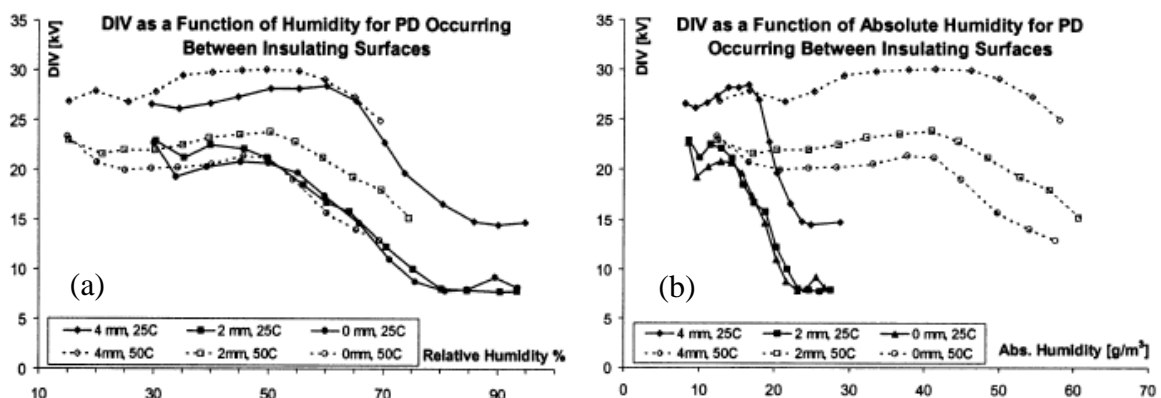


Bild 2-11: Teilentladungseinsetzspannung als Funktion der relativen Feuchte (a)
Teilentladungseinsetzspannung als Funktion der absoluten Feuchte (b) [16]

Die Ergebnisse der Messungen bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ zeigen zu Beginn ein Ansteigen der Teilentladungseinsetzspannung bis ein Maximum bei rund $10 - 15 \text{ g/m}^3$ absoluter Feuchte erreicht wird. Danach kommt es zu einem starken Abfall der Teilentladungseinsetzspannung. Die Messungen bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$ zeigen, dass die Spannung bis zum Maximum bei 40 g/m^3 absoluter Feuchte steigt, danach kommt es wieder zu einem Absinken der Teilentladungseinsetzspannung. Der erste Anstieg der Spannung kann durch den Einfluss des Feuchtegehalts der Luft auf den Gasentladungsprozess selbst erklärt werden. Der Wasserdampf reagiert demnach wie ein elektronegatives Gas, das Elektronen binden kann und somit die Verfügbarkeit freier Elektronen zur Bildung von Elektronenlawinen reduziert. Es kommt zu einem Anstieg der elektrischen Durchbruchfeldstärke.

Zahlreiche Prozesse können Einfluss auf die Bildung von Entladungen haben und vor allem Wassermoleküle weisen durch die Beteiligung an verschiedensten Vorgängen einen großen Einfluss auf die Entstehung von Entladungen auf. Die zwei bedeutendsten Prozesse sind:

- **Bindung von Wassermolekülen an negative Ionen**
Da Wassermoleküle Dipole sind, lagern sie sich sehr leicht an negativ geladene Sauerstoffionen an. Sie formen große, schwere Ionen, die in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt sind. Durch die Bindung freier Elektronen an Wassermoleküle beziehungsweise ganzer Moleküle an Sauerstoffionen wird die Anzahl an frei verfügbaren Elektronen zur Bildung eines Streamers erheblich limitiert.
- **Aufnahme von UV-Strahlung der Wassermoleküle**
Wasserdampf nimmt einen hohen Prozentsatz an UV-Strahlen auf. Das bedeutet, bei erhöhtem Wasserdampfgehalt in der Luft wird auch die UV-Strahlung reduziert. Diese Strahlung produziert freie Elektronen durch Photoionisation, und dies wäre wiederum sehr wichtig zur Bildung von Startelektronen für Elektronenlawinen.

Des Weiteren kommt es zu einer Veränderung der elektrischen Feldverteilung an der Oberfläche, wenn sich Wasser an der Oberfläche eines Isoliermaterials anlagert. Dies schlägt sich in einem Absinken der Einsetzspannung nieder. Das Maximum der Teilentladungseinsetzspannung tritt dort auf, wo das Absinken der Spannung, auf Grund der Wasseranlagerungen an der Oberfläche, das Ansteigen der Spannung durch den Wasserdampf in der Luft neutralisiert [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Auch Generatorstabmodelle wurden bereits unter verschiedenen klimatischen Bedingungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass ein starker Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und Teilentladungsintensität besteht. Je höher die Luftfeuchte, desto geringer die Intensität der Entladungen. Vor allem die äußeren Entladungen werden sehr stark reduziert, sobald die relative Luftfeuchte über 50 % ansteigt. Dies hängt wiederum mit der zuvor erwähnten Tatsache zusammen, dass Wasser als elektronegatives Gas reagiert. Allerdings kommt es auf Grund der erhöhten Luftfeuchte nicht zu einer verminderten Zerstörung des Isolierstoffes. Im Gegenteil, Untersuchungen zeigten, dass feuchte Luft die Degradierung des Isolierstoffes durch Teilentladungen sogar fördert [15, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27].

Da zur Diagnostik von Generatoren auch sehr oft on-line Monitoringsysteme Anwendung finden, kann ebenfalls der Unterschied der Teilentladungen zwischen Sommer und Winter analysiert werden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Teilentladungsaktivität im Winter viel höher ist, als im Sommer. Dies ist ebenfalls durch die saisonalen Schwankungen der Luftfeuchte zu begründen [15, 28].

Zusammenfassend wird die Teilentladungsintensität bei hoher Luftfeuchte auf Grund der Bindung freier Elektronen an die Wassermoleküle gesenkt. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron an der richtigen Position zur richtigen Zeit zu finden, um eine Elektronenlawine auszubilden, reduziert. Die Wassermoleküle limitieren zudem die Photoionisation durch das Absorbieren von UV-Strahlen. Das bedeutet, eine höhere Feldstärke ist notwendig, um einen Streamer ausbilden zu können. Die Durchbruchfeldstärke erhöht sich mit steigender Luftfeuchtigkeit.

Wie soeben beschrieben steigt die elektrische Durchbruchfeldstärke an, da sehr wenige freie Elektronen verfügbar sind. Jedoch kommt es auf Grund der erhöhten Luftfeuchtigkeit zu Wasseranlagerungen an der Oberfläche des Isolierstoffes. Dies hat eine Veränderung der elektrischen Feldverteilung an der Oberfläche zur Folge. Felderhöhungen an den Stellen der Wasseranlagerungen führen zu einer verringerten Teilentladungseinsetzspannung. Die Verringerung der Teilentladungseinsetzspannung lässt sich aber auch durch die Verschlechterung der Isolierstoffeigenschaften unter feuchter Luft begründen.

Des Weiteren spielt, vor allem bei Anordnungen mit einem relativ kleinen Luftspalt, die Oberflächenbeschaffenheit des Isolierstoffes bezüglich der Verbreitung der Entladungen eine große Rolle. Bei hoher Luftfeuchtigkeit steigt der Wasserdampfgehalt in der Luft. Dieser Wasserdampf lagert sich an die blanke Isolierstoffoberfläche an und reagiert mit den Oberflächenentladungen. Hat sich ein Wassermolekül an die Isolierstoffoberfläche angelagert, verbleibt es dort für eine bestimmte Zeit. Vorhandene Alterungsprodukte durch die Teilentladungsaktivität auf der Oberfläche, in Verbindung mit der erhöhten Luftfeuchtigkeit, führen zu einer erhöhten Leitfähigkeit der Isolierstoffoberfläche beziehungsweise zu einer Reduktion des Oberflächenwiderstandes. Die Beweglichkeit der Ladungen verbessert sich und die Elektronen, welche sich über eine große Fläche verteilt haben, können schneller abgebaut werden. Es kommt zu einer Vielzahl von kleinen Entladungsimpulsen. Im Gegensatz dazu dominieren unter niedriger Luftfeuchtigkeit wenige starke Entladungserscheinungen [15, 17, 19, 20, 21, 29, 30, 31].

Bild 2-12 beschreibt das Sinken der Teilentladungseinsetzspannung unter steigender relativer Luftfeuchte (a) sowie auch das Absinken der Teilentladungsintensität bei steigender Luftfeuchte in der negativen und positiven Halbwellen (b).

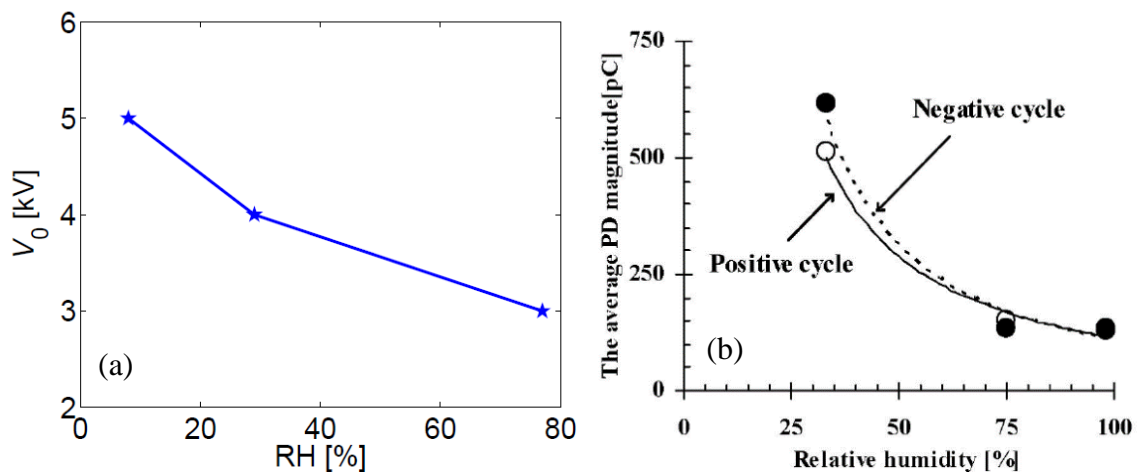


Bild 2-12: Teilentladungseinsetzspannung über der relativen Luftfeuchte (a) Teilentladungsintensität gemessen bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten (b) [15, 20]

2.5 Teilentladungen in rotierenden elektrischen Maschinen, Detektion und Interpretation

Teilentladungen zählen zu den wichtigsten Untersuchungskriterien, wenn es um die Diagnostik eines Betriebsmittels geht. Es gibt mehrere Möglichkeiten beziehungsweise Methoden Teilentladungen zu detektieren.

Methoden zur Detektion von Teilentladungen

Die Detektion von Teilentladungen kann entweder

- Elektrisch
- Akustisch oder
- Optisch

erfolgen.

Elektrische Detektion

Die elektrische Detektion ist die genaueste und aussagekräftigste Teilentladungsmessung, da die Intensität der Entladungen exakt bestimmt wird und die Interpretation des Teilentladungsmusters auch eine klare Aussage über den Erscheinungsort der Entladungen zulässt.

Die IEC 60270 definiert Teilentladungen als: „*Lokale elektrische Entladungen die eine partielle Überbrückung zwischen Isolation und leitfähigen Teilen herstellen. Teilentladungen sind im Allgemeinen die Konsequenz von lokalen Feldüberhöhungen innerhalb der Isolation oder an der Isolationsoberfläche. Generell treten solche Entladungen als Puls mit einer Zeitdauer von weniger als 1 μ s auf* [32].“

Die Teilentladungsintensität von Glimmentladungen bewegt sich in einem Bereich von wenigen Picocoulomb, Streamerentladungen können Pulse in der Höhe von 10 pC bis zu einigen 100 pC hervorrufen. Eine Umwandlung von Streamer- zu Leaderentladungen führt zu Pulsen mit einer Ladung von einigen 1000 pC [33, 34].

Zur Erfassung der Teilentladungsimpulse wird eine spezielle Messtechnik benötigt. Parallel zum Messobjekt wird ein Koppelkondensator mit der Kapazität C_k geschaltet. Ein impulsförmiger Ausgleichsstrom fließt dann im Falle einer Teilentladung im Kreis aus C_k und C_p , der Prüflingskapazität. Mit Hilfe eines Ankoppelvierpols kann schließlich der TE-Stromimpuls als Spannungsimpuls gemessen werden. Für die Sensitivität der Messung ist das Verhältnis des Koppelkondensators zur Prüflingskapazität entscheidend. Die größte Sensitivität wird erreicht, wenn $C_k \gg C_p$ ist. Dies ist allerdings oft auf Grund des Ladevermögens der Hochspannungsquelle schwierig zu erreichen. Eine akzeptable Sensitivität kann laut IEC 60270 mit einem Koppelkondensator von $C_k = 1$ nF erreicht werden.

Darüberhinaus ist zu beachten, dass der gesamte Messaufbau teilentladungsfrei ist. Das heißt, es müssen ausreichend abgerundete Zuleitungen und Armaturen zur Anwendung kommen und alle metallischen Teile müssen durch Kontaktierung auf ein definiertes Potential gelegt werden [1, 32].

Für die Teilentladungsmessung ist auch eine Kalibrierung des Teilentladungsmesskreises erforderlich. Dadurch wird der Zusammenhang von scheinbarer und messbarer Ladung ermittelt. Da eine Abhängigkeit der Messung von der Größe des Koppelkondensators ausgeschlossen werden muss, wird ein bekannter TE-Impuls parallel zum Prüfling eingespeist und der Prüfkreis kalibriert. Somit kann eine Definition des Maßstabs- beziehungsweise Kalibrierfaktors des Messkreises erfolgen [35].

Generell sind laut IEC 60270 drei verschiedene Schaltungen zur Teilentladungsmessung zulässig. Bild 2-13 bis Bild 2-15 gehen konkret auf die unterschiedlichen Konfigurationen ein.

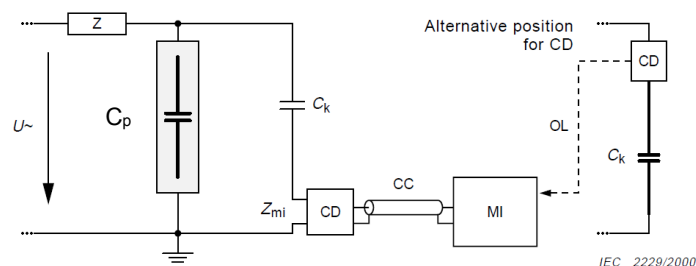


Bild 2-13: Konfiguration 1: Ankoppelvierpol CD in Serie zum Koppelkondensator [32]

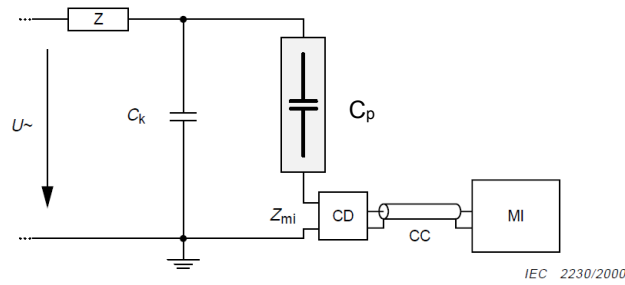


Bild 2-14: Konfiguration 2: Ankoppelvierpol CD in Serie zum Messobjekt [32]

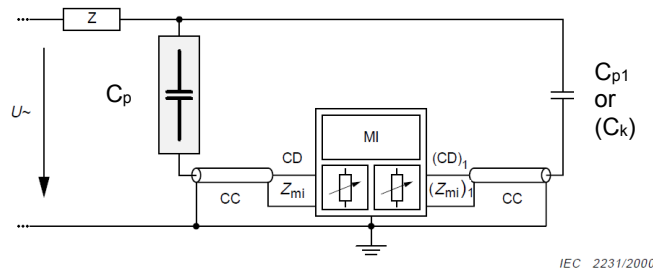


Bild 2-15: Konfiguration 3: Auskopplung über die Brückenschaltung [32]

Die am häufigsten verwendete Konfiguration ist die Konfiguration 1, in der der Ankoppelvierpol in Serie zum Koppelkondensator geschaltet wird. Die Vorteile dieser Schaltung liegen im Schutz des Messgeräts. Ein Nachteil ist darin begründet, dass die Nähe zum Prüfling nicht gegeben ist [33, 35].

Die Messparameter Mittenfrequenz und Bandbreite sind in der IEC 60270 definiert, um gewisse Einschränkungen zu treffen und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Mittenfrequenz ist definiert als:

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (10)$$

Die Bandbreite ist definiert als:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (11)$$

Von einer breitbandigen Teilentladungsmessung wird gesprochen, wenn

$$\begin{aligned} 30 \text{ kHz} &\leq f_1 \leq 100 \text{ kHz} \\ f_2 &\leq 1 \text{ MHz} \\ 100 \text{ kHz} &\leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz} \end{aligned}$$

Eine schmalbandige Messung ist gekennzeichnet durch:

$$\begin{aligned} 9 \text{ kHz} &\leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz} \\ 50 \text{ kHz} &\leq f_m \leq 1 \text{ MHz} \end{aligned}$$

Akustische Detektion

Für manche Anwendungen ist die elektrische Teilentladungsmessung nicht ideal, speziell in Fällen, wo es zu erheblichen Störsignalen kommt. Dies erschwert die Auswertung beziehungsweise macht eine eindeutige Messung erst gar nicht möglich und es muss auf ein akustisches oder auch optisches Detektionsverfahren zurückgegriffen werden [36].

Äußere Entladungen, wie zum Beispiel Oberflächenentladungen oder Koronaentladungen können mit Hilfe von Ultraschalldetektoren festgestellt werden. Diese Detektoren arbeiten gewöhnlich mit einer Frequenz von rund 30 kHz [7].

Speziell für große Testobjekte, wie Transformatoren, Generatoren oder Schaltanlagen eignet sich die akustische Detektion, da sie eine genaue Lokalisation der Entladungen ermöglicht. Des Weiteren ist kein Teilentladungsmesskreis erforderlich, welcher bei solch großen Anwendungen sehr aufwendig ist. Die Kombination beider Messmethoden ermöglicht allerdings die Vermeidung fehlerhafter Abschaltungen und bringt somit erhebliche Vorteile beim on-line Monitoring von Betriebsmitteln [36].

Zur akustischen Detektion von Teilentladungen in der Luft gibt es einige Methoden beziehungsweise Geräte:

- **Das menschliche Ohr** kann Geräusche eines Frequenzspektrums von rund 15 Hz bis 20 kHz wahrnehmen. In einer geräuschbelasteten Fabrikumgebung entspricht dies Entladungen in der Höhe von etwa 1000 pC bis 10.000 pC.
- Ein gewöhnliches medizinisches **Stethoskop in Verbindung mit einem isolierenden Rohr** mit einem Innendurchmesser von rund 0,5 cm kann ein sehr einfaches Medium zur akustischen Detektion von elektrischen Ladungen darstellen. Die Sensitivität liegt im Bereich von 10 pC.
- Das **40-kHz-Mikrofon**. Eine sehr gute Methode zur akustischen Detektion von Teilentladungen ist ein schmalbandiges Mikrofon, das in der Nähe von 40 kHz arbeitet. Damit sind Entladungen im Bereich von 5 pC detektierbar.
- Das **Parabilmikrofon** stellt eine noch sensitivere Methode als das 40-kHz-Mikrofon dar. Dabei wird ein Parabolreflektor so positioniert, dass die Schallwellen an der parabelförmigen Oberfläche auftreffen, reflektiert werden und am Mikrofon im Parabolfokus zusammenlaufen [37].

Optische Detektion

Die optische Detektion kann mit Hilfe einer Digitalkamera erfolgen. Durch Einstellung langer Belichtungszeiten können die Teilentladungen sehr gut abgeleuchtet werden. Der einzige Nachteil liegt darin, dass die Prüfumgebung komplett abgedunkelt sein muss und geringe Entladungen nicht detektierbar sind. Eine andere Variante der optischen Detektion ist ein sogenannter Coronafinder, eine spezielle UV-Kamera, die es ermöglicht, mit freiem Auge nicht sichtbare Entladungen zu detektieren [7].

Interpretation von Teilentladungsmessungen

Die elektrische Teilentladungsmessung ist eines der wichtigsten Werkzeuge zur Generator-diagnostik. Zusätzlich dazu gibt es allerdings auch noch andere Möglichkeiten den Zustand des Isoliersystems zu bestimmen, wie zum Beispiel visuelle Inspektion, Isolationswiderstandsmessungen sowie Verlustfaktormessungen. Elektrische Teilentladungsmessungen haben aber den Vorteil, dass sie on-line, also während des Betriebs der Maschine durchgeführt werden können und somit kontinuierliche Daten liefern.

Sind diese Messergebnisse erst einmal generiert, besteht der nächste wichtige Schritt darin, die erhaltenen Signale zu interpretieren, um eine kompetente Aussage über den Zustand eines Isoliersystems beziehungsweise in weiterer Folge auch des Generators treffen zu können.

Teilentladungen in rotierenden elektrischen Maschinen treten am häufigsten als

- Wickelkopfentladungen, an der Staboberfläche, zwischen den Stäben beziehungsweise Koronaentladungen in den Kreuzungsbereichen der Feldsteuerungen
- Entladungen zwischen den Stäben und dem Eisenkern
- Innere Entladungen des Isoliersystems
- Entladungen durch das Ablösen der Isolierung von der leitenden Oberfläche

auf [38].

Die nachfolgenden Bilder (Bild 2-16 bis Bild 2-23) zeigen typische Teilentladungsmuster für die einzelnen Entladungsformen.

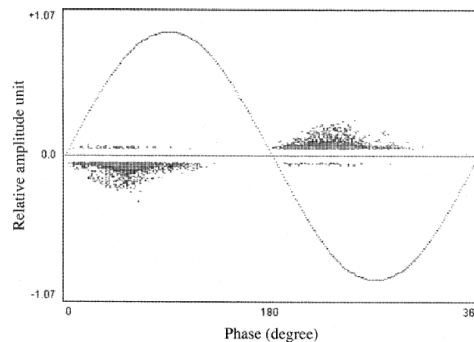


Bild 2-16: Teilentladungsmuster innerer Teilentladungen gemessen an einem Statorstab im Labor bei einer Spannung von 7 kV [38]

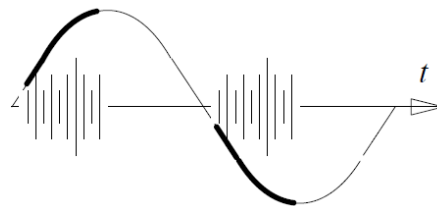


Bild 2-17: Phasenlage der Hohlraum- oder Oberflächenentladungen ohne Elektrodenkontakt beziehungsweise Entladungen zwischen isolierten Leitern [1]

Innere Entladungen beziehungsweise Hohlraumentladungen treten an kleinen Fehlstellen innerhalb des Isoliersystems auf. Das Teilentladungsmuster innerer Entladungen ist gekennzeichnet durch die Symmetrie der positiven und negativen Entladungen. Des Weiteren sind sie dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenlage zwischen Spannungsnulldurchgang und Spannungsmaximum liegt [1, 7, 38].

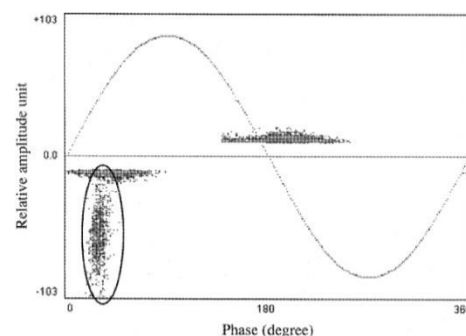


Bild 2-18: Teilentladungsmuster von Oberflächenentladungen aufgenommen bei 20 kV [38]

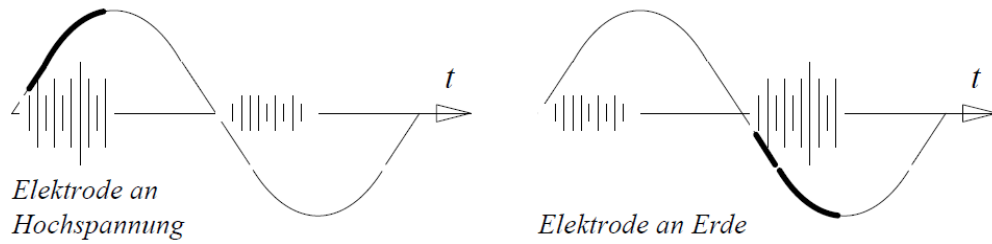


Bild 2-19: Hohlraum oder Oberflächenentladungen – einseitig begrenzt durch eine Elektrode [1]

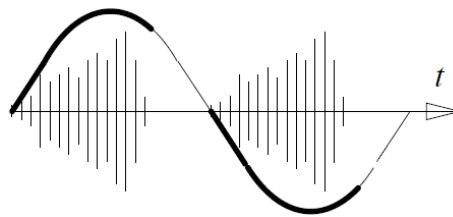


Bild 2-20: Gleitentladungen [1]

Oberflächenentladungen treten meist auf Grund von Verschmutzungen beziehungsweise Staubanlagerungen an der Oberfläche auf. Entladungen in Hohlräumen oder an Oberflächen, welche einseitig durch eine Elektrode begrenzt werden, unterscheiden sich vom klassischen Teilentladungsmuster innerer Entladungen durch die Asymmetrie in positiver und negativer Halbwelle. Beide Polaritäten unterscheiden sich mehr als um den Faktor drei. Gleitentladungen sind gekennzeichnet durch eine vom Spannungsnulldurchgang bis zum Spannungsscheitel ansteigende Intensität [1, 7, 38].

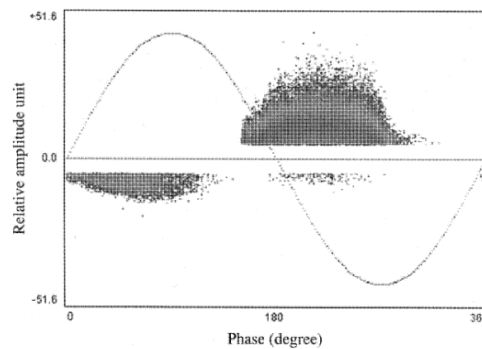


Bild 2-21: Teilentladungsmuster von Koronaentladungen im Kreuzungsbereich der Feldsteuerung [38]

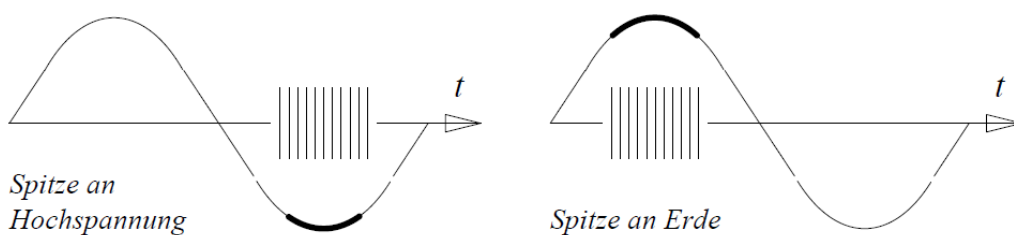


Bild 2-22: Koronaentladungen in Gasen [1]

Koronaentladungen in den Kreuzungsbereichen der Feldsteuerung sind charakterisiert durch eine größere Anzahl an positiven Entladungen als negative Entladungen. Normalerweise liegt die Phasenlage von Koronaentladungen im Spannungsmaximum, wie in Bild 2-22 dargestellt [1, 7, 38].

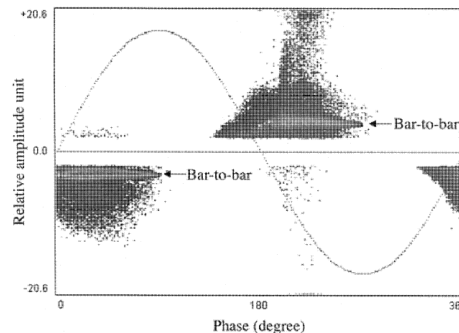


Bild 2-23: Teilentladungsmuster von Stab-Stab Entladungen bei 20 kV [38]

Entladungen zwischen einzelnen Stäben treten sehr häufig in Hochspannungsgeneratoren auf. Stab-Stab-Entladungen haben ein sehr charakteristisches Teilentladungsmuster, die Teilentladungsintensität hängt sehr stark von der Größe des Luftspaltes und dem elektrischen Feld ab.

3 Messtechnische Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Die messtechnischen Untersuchungen dieser Arbeit umfassen drei Messobjekte, die sich am realen Wickelkopfbereich einer Maschine orientieren. Begonnen wird mit einer Platte-Platte-Anordnung, die ein Orientierungsmodell darstellt und in sehr einfacher Form die Verhältnisse im Wickelkopf einer rotierenden elektrischen Maschine nachbildet. Das zweite Modell ist eine Stab-Stab-Anordnung, die dem tatsächlichen Wickelkopf durch den Aufbau aus Stabstücken schon etwas näher kommt. Das dritte Modell stellt eine Wickelkopf-Anordnung dar, welche aus realen Generatorstäben besteht und somit eine komplexe aber auch sehr realitätsnahe Anordnung ist. Alle Modelle, bis auf das Wickelkopfmodell, sind im Lufspaltabstand variabel einstellbar, so dass unterschiedliche Abstandsvariationen geprüft und in weiterer Folge verglichen werden können.

Alle Spannungs- und Feldstärkewerte dieses Kapitels verstehen sich als Scheitelwerte.

3.2 Teilentladungsdetektionsverfahren

3.2.1 Optische Detektion

Für die Koronadetektion einer rotierenden elektrischen Maschine bieten sich optische Detektionsverfahren an. Somit wurden auch alle Messungen im Zuge dieser Arbeit durch eine optische Teilentladungsdetektion ergänzt. Hierzu wurde ein Coronafinder der Marke Syntronics verwendet, eine spezielle UV-Kamera, die mit dem freien Auge nicht sichtbare Entladungen detektieren lässt. Bild 3-1 zeigt die verwendete Koronakamera.



Bild 3-1: Coronafinder der Firma Syntronix [39]

Mit diesem Coronafinder können Teilentladungen ab 10 pC detektiert werden. Das Verfahren eignet sich besonders gut zur Detektion der Teilentladungen in rotierenden elektrischen Maschinen, da auch die Lokalisation des Erscheinungsortes der Entladungen möglich wird [39]. Das beste Ergebnis wird erzielt, wenn die Messumgebung komplett abgedunkelt ist. Der zusätzlich oft durchgeführte, sogenannte Korona-Darkness-Test ermöglicht es schon kleinste Entladungen, teilweise sogar mit freiem Auge, zu sehen. Jedoch ist eine völlige Abdunkelung der Messumgebung schwierig zu realisieren und nicht immer möglich.

3.2.2 Elektrische Detektion

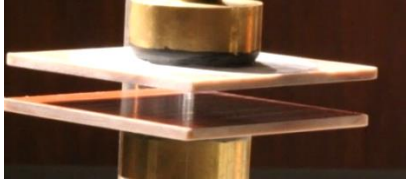
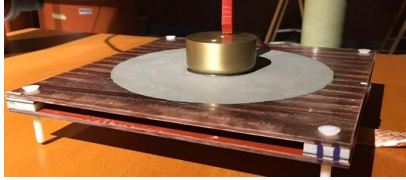



Die elektrische Teilentladungsmessung wurde laut Norm IEC 60270 durchgeführt. Das verwendete Messsystem, Omicron MPD600, kann sehr einfach an beliebigen Messumgebungen installiert werden und wird daher auch in der Praxis häufig verwendet. Die Mittenfrequenz wurde für die Messungen in dieser Arbeit mit 90 kHz und die Bandbreite mit 100 kHz gewählt.

3.3 Messobjekte

3.3.1 Modellübersicht

Für die Messreihe wurden drei verschiedene Modelle entwickelt, die dem Wickelkopfbereich einer Maschine ähnlich sind. Nachfolgend wird jedes dieser Modelle mit seinen Abstandsverhältnissen genau beschrieben. Tabelle 3-1 zeigt eine erste Übersicht der zu vermessenden Modelle.

Tabelle 3-1: Modellübersicht

Modell	Abstandsvariationen Luftspalt	Abstandshalter	Beschreibung und Verwendung
 <p>Modell A1 – Platte-Platte-Modell</p>	d = 1 mm bis d = 10 mm in 1-mm-Schritten	d = 6 mm	Orientierungsmodell, hauptsächlich zur Prüfung der Anwendbarkeit des Paschengesetzes auf nachfolgende Anordnungen
 <p>Modell A2 – Platte-Platte-Modell</p>	d = 5 mm d = 7,5 mm d = 10 mm	d = 5 mm d = 7,3 mm d = 10 mm	Erstes Modell zur Abschätzung des Temperatur/Feuchte-Einflusses
 <p>Modell B1 – Stab-Stab-Modell</p>	d = 5 mm d = 7,5 mm d = 15,6 mm	d = 7,5 mm d = 15,6 mm	Modell bestehend aus realen Stabteilen – Abschätzung des Temperatur/Feuchte-Einflusses auf Entladungen im Wickelkopfbereich kann konkreter erfolgen
 <p>Modell B1 – Modifikationen des Stab-Stab-Modells</p>	d = 7,5 mm d = 15,6 mm	-	Messung mit: <ul style="list-style-type: none"> • Unvoreilhafter Bandage • Geschmirelter Bandage • Unvoreilhaftem Spacer • Definiertes Inhomogenität
 <p>Modell B2 - Wickelkopfmodell</p>	-	d = 15,6mm	Anordnung bestehend aus Generatorstäben - Abschätzung des Temperatur/Feuchte-Einflusses auf Entladungen im realen Wickelkopf

3.3.2 Platte-Platte-Anordnungen

Das erste Messobjekt, der Prüfling A1, wurde für erste Orientierungsmessungen verwendet. Der Prüfling besteht aus einem Testelektrodenpaar mit Messingzylindern (Durchmesser 50 mm, Dicke 25 mm) auf welche Isolationsplatten (bestehend aus Feinglimmer-Epoxidharzisolierung aus VPI-Technologie) aufgeklebt wurden. Die Isolationsplatten haben eine Seitenlänge von 100 mm und eine Dicke von 5 mm. Die Messingelektrode wurde mit einem leitfähigen Kleber an der Isolierplatte befestigt, um Hohlräume zwischen den Komponenten zu vermeiden. Des Weiteren wurde zur Potentialsteuerung um die Messingelektrode eine Schicht EGS-Lack aufgetragen. Bild 3-2 zeigt den Prüfling A1.

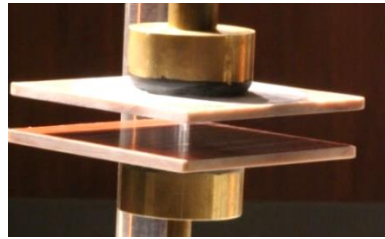


Bild 3-2: Prüfling A1 – Platte-Platte-Anordnung mit einer Seitenlänge von 100 mm

Für die weiteren Untersuchungen steht ein zweites Platte-Platte-Modell, der Prüfling A2, zur Verfügung. Diese Anordnung besteht aus zwei Isolierplatten mit einer Seitenlänge von 200 mm und einer Dicke von 2,8 mm. Die angebrachten Messingelektroden sowie der EGS-Lack entsprechen dem Modell A1. Bild 3-3 stellt den Prüfling A2 dar.

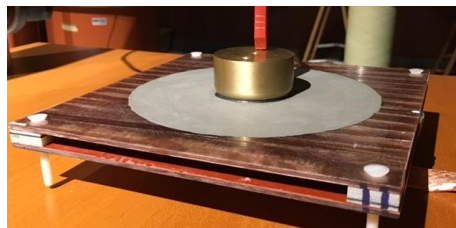


Bild 3-3: Prüfling A2 – Platte-Platte-Anordnung mit einer Seitenlänge von 200 mm

Der reale Wickelkopf weist Abstandshalterpakete zwischen den einzelnen Stäben auf, so dass ein konstanter Abstand gewährleistet werden kann. Daher wurden alle Modelle auch zusätzlich mit einem sogenannten Spacer ausgestattet, um Unterschiede zwischen der Luftspaltanordnung und der realitätsnahen Spaceranordnung ermitteln zu können. Zur Realisierung wurde ein zweites Modell des Prüflings A2 angefertigt und ein Abstandshalter eingebaut. Bild 3-4 stellt den Prüfling A2 mit Spacer dar.

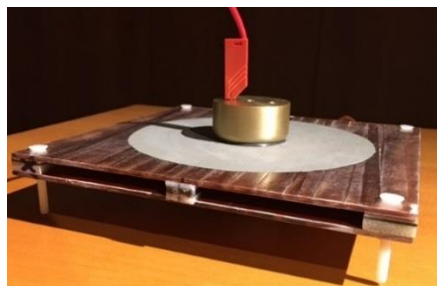


Bild 3-4: Prüfling A2 mit Spacer – Platte-Platte-Anordnung mit Spacer mit einer Seitenlänge von 200 mm

3.3.3 Stab-Stab-Anordnungen

Das zweite Messobjekt, der Prüfling B1, ist das erste Modell, das sich an realen Stäben orientiert. Es handelt sich um ein speziell für diese Arbeit gefertigtes Modell, bestehend aus Stabstücken in ähnlicher Formgebung wie im realen Wickelkopf. Das Modell weist eine Länge von 536 mm, eine Breite von 327 mm und eine Höhe von 395 mm auf. Die Stabisolierung hat eine Dicke von 3,41 mm. Die kompakte Größe ermöglicht es, die Untersuchungen an diesem Modell in einem Klimaschrank durchzuführen. Dies bringt hinsichtlich der Aufheizdauer einen großen Vorteil, da ein kleineres Modell in einem kleineren Volumen schneller den gewünschten Temperatur- und Feuchtwert annehmen kann. Bild 3-5 veranschaulicht den Prüfling B1.



Bild 3-5: Prüfling B1 – Stab-Stab-Anordnung

Auch dieses Modell wurde zusätzlich mit einem Spacer ausgestattet, um die Ergebnisse mit jenen der Platte-Platte-Anordnung inklusive Spacer zu vergleichen und gegebenenfalls auf Abweichungen beziehungsweise Unterschiede zwischen den Modellen aufmerksam zu werden. Bild 3-6 veranschaulicht den Prüfling B1 mit Spacer.

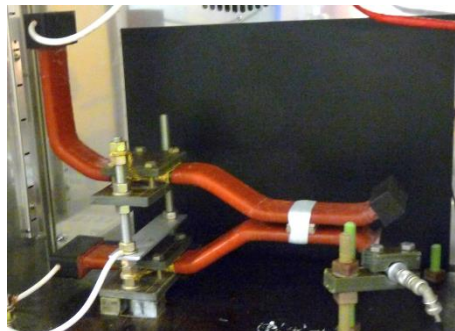


Bild 3-6: Prüfling B1 – Stab-Stab-Anordnung mit Spacer

Weitere Modifikationen an der Stab-Stab-Anordnung

Des Weiteren wurden Modifikationen an der Stab-Stab-Anordnung durchgeführt. Im ersten Schritt wurde dafür eine unvorteilhafte Bandage am oberen Stab angebracht. Dies sollte die Auswirkungen durch schlechte Wickeltechniken beziehungsweise unsauberes Arbeiten auf die Teilentladungseinsetzspannung verdeutlichen. Bild 3-7 und Bild 3-8 stellen den Prüfling B1 mit unvorteilhafter Bandage dar.

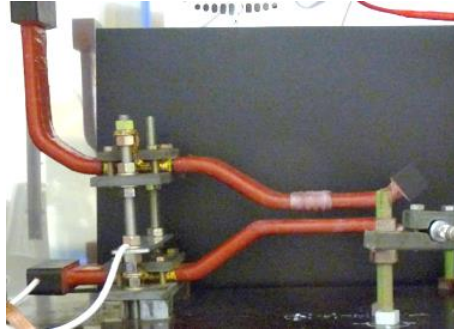


Bild 3-7: Prüfling B1 – Stab-Stab-Anordnung mit unvorteilhafter Bandage



Bild 3-8: Unvorteilhafte Bandage

Die verwendete Bandage weist, wie Bild 3-8 ersichtlich, fünf signifikante Unebenheiten auf. Diese ragen in den Abmessungen zwischen 0,5 mm und 1 mm in den Luftspalt hinein. In der Praxis wird eine solche unvorteilhafte Bandage abgeschliffen, um wieder die gewünschte ebene Staboberfläche zu erhalten. Durch das Abschleifen können allerdings zusätzliche Inhomogenitäten entstehen. Es wurde untersucht, welche Auswirkungen diese geschmirgelte Bandage bei hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit zeigt. Bild 3-9 stellt den Prüfling B1 mit geschmirgelter Bandage dar.

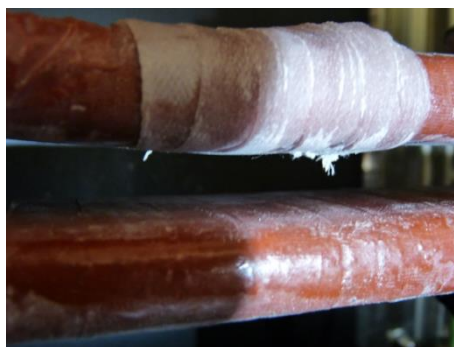


Bild 3-9: Prüfling B1 – Stab-Stab-Anordnung mit geschmirgelter Bandage

Um den Einfluss verschiedenster Inhomogenitäten noch genauer betrachten zu können, wurde eine definierte Inhomogenität, bestehend aus einem 10 mm x 10 mm großen Gewebeplättchen welches 3 mm in den Luftspalt hineinragt, am oberen Stab des Prüflings B1 mit handelsüblichem Sekundenkleber angebracht. Bild 3-10 veranschaulicht die zusätzlich angebrachte definierte Inhomogenität am Oberstab des Prüflings B1.



Bild 3-10: Prüfling B1 – Stab-Stab-Anordnung mit definierter Inhomogenität

Die letzte Modifikation des Stab-Stab-Modells behandelt Produktionsfehler in der Spacerherstellung. Dabei kann es vorkommen, dass das Vlies, welches den Hartgewebespuacer umschließt, nicht bündig mit diesem abschließt. Das heißt, es kommt zu einem Luftraum zwischen Staboberfläche und Hartgewebe. Dieses Phänomen wurde zusätzlich auch in den Finite-Elemente-Berechnungen betrachtet. Es kann daher ein sehr guter Vergleich zwischen Messergebnissen und Berechnungsergebnissen erstellt werden. Bild 3-11 zeigt die verwendete Anordnung zur Messung des Prüflings B1 mit unvorteilhaftem Spacer.

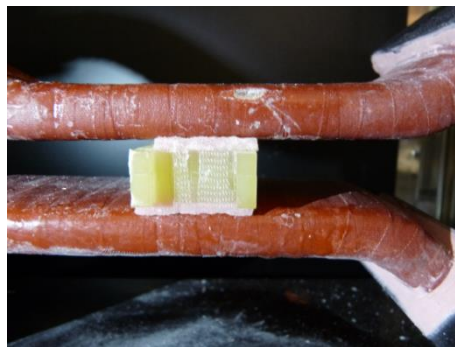


Bild 3-11: Prüfling B1 – Stab-Stab-Anordnung mit unvorteilhaftem Spacer

An dem für diese Untersuchung präparierten Spacer wurde das Vlies auf der linken Seite um 5 mm gekürzt.

3.3.4 Wickelkopfanordnung

Das dritte Modell, das Modell B2, ist eine Wickelkopfanordnung und besteht aus realen Generatorstäben. Das Modell wurde aus vier Unterstäben und zwei Oberstäben zusammengesetzt, so dass auch der Kreuzungsbereich zwischen der Oberlage und der Unterlage mit dem abstandshaltenden Stützschlauch vermessen werden kann. Das Modell ist 1625 mm lang, 540 mm breit und 125 mm hoch. Die Dicke der Isolierschicht beläuft sich auf 3,41 mm und der Abstand zwischen den einzelnen Stäben $d = 15,6$ mm. Der Nachteil dieser Anordnung liegt in der Größe des Modells, da die Betrachtung in einem Klimaraum erfolgen muss und somit die Aufheizdauer erheblich verlängert wird. Auf Grund dieser hohen Zeitkonstanten wurde eine reduzierte Temperatur/Feuchte-Matrix für dieses Modell verwendet.

Der Vorteil dieses Modells liegt allerdings darin, dass alle kritischen Stellen des Wickelkopfbereichs in einem einzigen Modell zusammengefasst wurden. Dies sind einerseits Phasentrennstellen mit Spacer an den Unterstäben sowie Oberstäben und der Kreuzungsbereich zwischen Oberlage und Unterlage. Des Weiteren muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass in den jeweiligen Phasentrennstellen unterschiedliche Spacer eingebaut wurden. Die Spacer der

Oberlage links sind mit einer Kreuzbandage versehen und auf der rechten Seite der Oberstäbe wurden zwei Nasenspacer, welche schon in der Anordnung des Prüflings B1 mit unvorteilhaftem Spacer verwendet wurden, platziert. In der Unterlage befinden sich Nasenspacer sowie Abstandshalterpakete die komplett mit Vlies ummantelt wurden. Bild 3-12 zeigt den Prüfling B2.

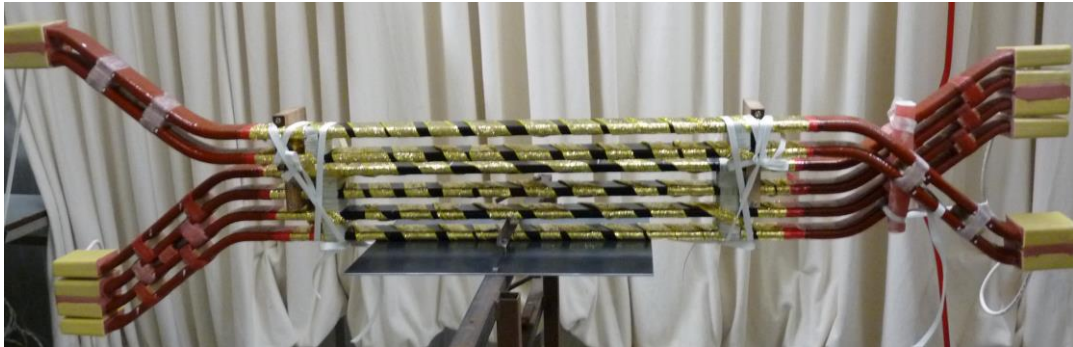


Bild 3-12: Prüfling B2 - Wickelkopfanzordnung

Für die Messung dieses Modells wurden schließlich vier Konfigurationen festgelegt. Die erste Konfiguration betrachtet nur eine Phasentrennstelle der Unterlage. Die Stäbe sind so verschaltet, dass die Trennstelle zwischen dem zweiten und dritten Stab betrachtet wird. Zur Messung dieser ersten Konfiguration müssen, wie nachfolgendes Bild zeigt, die Oberstäbe geerdet und zwei Stäbe der Unterlage mit Hochspannung versorgt, sowie die anderen zwei Stäbe geerdet werden. Bild 3-13 veranschaulicht die Verschaltung der Stäbe für die Konfiguration 1.



Bild 3-13: Konfiguration 1 – Phasentrennstelle Unterlage

Bei der zweiten Konfiguration wird nun eine Phasentrennstelle der Oberlage betrachtet. Da es nur zwei Oberstäbe gibt, wird ein Stab mit Hochspannung versorgt und der andere Stab geerdet. Die gesamten Unterstäbe weisen eine Erdungsverbindung auf. Bild 3-14 veranschaulicht die Verschaltung der Stäbe für die Konfiguration 2.



Bild 3-14: Konfiguration 2 – Phasentrennstelle Oberlage

Die dritte Konfiguration betrachtet den Kreuzungsbereich zwischen den Stäben der Oberlage und jenen der Unterlage. Bei dieser Messung müssen die Stäbe der Oberlage geerdet und die Stäbe der Unterlage mit Hochspannung versorgt werden. Im Kreuzungsbereich wird ein Stützschlauch angebracht, wie er auch im realen Generatorstator vorhanden ist. Die Messung soll besonderes Augenmerk auf diese zusätzliche Inhomogenität legen. Bild 3-15 zeigt die Verschaltung der Stäbe für die Konfiguration 3.

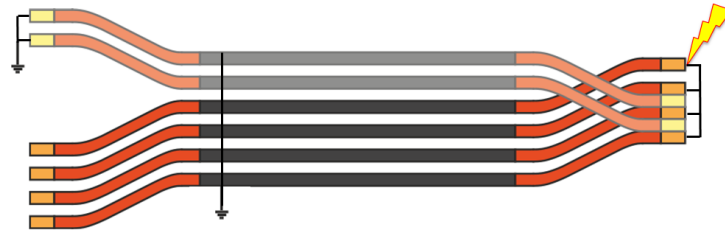


Bild 3-15: Konfiguration 3 – Oberlage gegen Unterlage

Die vierte Messung soll schließlich die realen Wickelkopfverhältnisse nachbilden und alle zuvor beschriebenen kritischen Bereiche beinhalten, das heißt Phasentrennstellen der Unterlage sowie Oberlage und Unterlage gegen Oberlage. Für diese Messung wird ein Oberstab auf Hochspannung gelegt und der andere Oberstab geerdet. Ähnlich werden bei der Unterlage zwei Unterstäbe mit Hochspannung versorgt und die übrigen zwei geerdet. Ziel dieser Messung ist es, die Veränderungen zu den vorangegangenen Messungen zu dokumentieren beziehungsweise die Ergebnisse zu vergleichen. Bild 3-16 zeigt die Verschaltung der Stäbe für die Konfiguration 4.

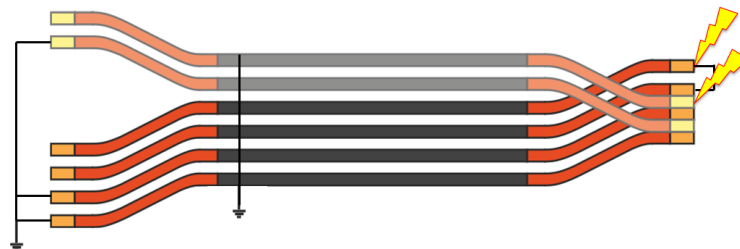


Bild 3-16: Konfiguration 4 – Phasentrennstellen der Oberlage und Unterlage sowie Oberlage gegen Unterlage

3.4 Messaufbau

3.4.1 Messungen im Klimaschrank

Für die Messungen wurde ein Klimaschrank der Firma CTS-Umweltsimulationen verwendet. Bild 3-17 zeigt den bei den Messungen verwendeten Klimaschrank der Firma CTS Umweltsimulationen.



Bild 3-17: Klimaschrank mit Sichtfenster [40]

Der Schrank CTS 70/200 arbeitet in einem Temperaturbereich von -70 °C bis $+180\text{ °C}$ und einem Feuchtebereich von 10% r.F. bis 98% r.F. Der Klimaschrank weist auch ein Sichtfenster in der Größe von $570\text{ mm} \times 710\text{ mm}$ auf, welches essentiell für die durchzuführenden Messungen, beziehungsweise im Besonderen für die optische Detektion der Entladungen, ist [40].

Der Messaufbau orientiert sich an der Norm IEC 60270, um eine normgerechte elektrische Teilentladungsmessung zu gewährleisten. Es wurde ein Koppelkondensator mit $C_k = 1\text{ nF}$ parallel zum Prüfling im Klimaschrank installiert. Der Ankoppelvierpol befindet sich in Serie des Koppelkondensators. Zusätzlich wurde ein Begrenzungswiderstand mit $R = 43\text{ k}\Omega$ verwendet. Die Nenndaten des verwendeten Hochspannungstransformators sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Nenndaten des für die Messungen verwendeten Prüftransformators
Baur PGK 150/5

Daten Prüftransformator Baur PGK 150/5	
Nennspannung	0,23 / 106 kV AC 0,23 / 150 kV DC

Bild 3-18 zeigt den Messaufbau der Messungen im Klimaschrank.



Bild 3-18: Messaufbau der Messungen im Klimaschrank

3.4.2 Messungen im Klimaraum

Das Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz verfügt über einen Extremklimaraum, in welchem Temperaturen von -40 °C bis $+80\text{ °C}$ und relative Feuchten von 20 % bis 95 % einstellbar sind. Der Raum weist eine Grundfläche von 5 m x 5 m auf und hat eine Höhe von 4 m. Daher stellte dieser Klimaraum den idealen Bereich zur Untersuchung des Wickelkopfmodells dar.

Der Aufbau für die Messungen im Extremklimaraum unterscheidet sich, zum Messaufbau bei Verwendung des Klimaschranks, nur in der Hochspannungsdurchführung und im Hochspannungstransformator. Für die Messungen im Klimaraum wurde die vorhandene direkt verbaute Hochspannungsdurchführung verwendet. Tabelle 3-3 fasst die Nenndaten des verwendeten Hochspannungstransformators zusammen. Die restlichen Komponenten wurden in gleicher Form beibehalten.

Tabelle 3-3: Nenndaten des für die Messungen verwendeten Prüftransformators TEO 100/10

Daten Prüftransformator TEO 100/10	
Nennspannung	2·0,22 / 100 / 0,22 kV
Nennstrom	2·11,4 / 0,05 / 22,7 A
Nennleistung	5 kVA
Kurzschlussspannung	40 %

Bild 3-19 zeigt den Messaufbau der Messungen im Klimaraum.

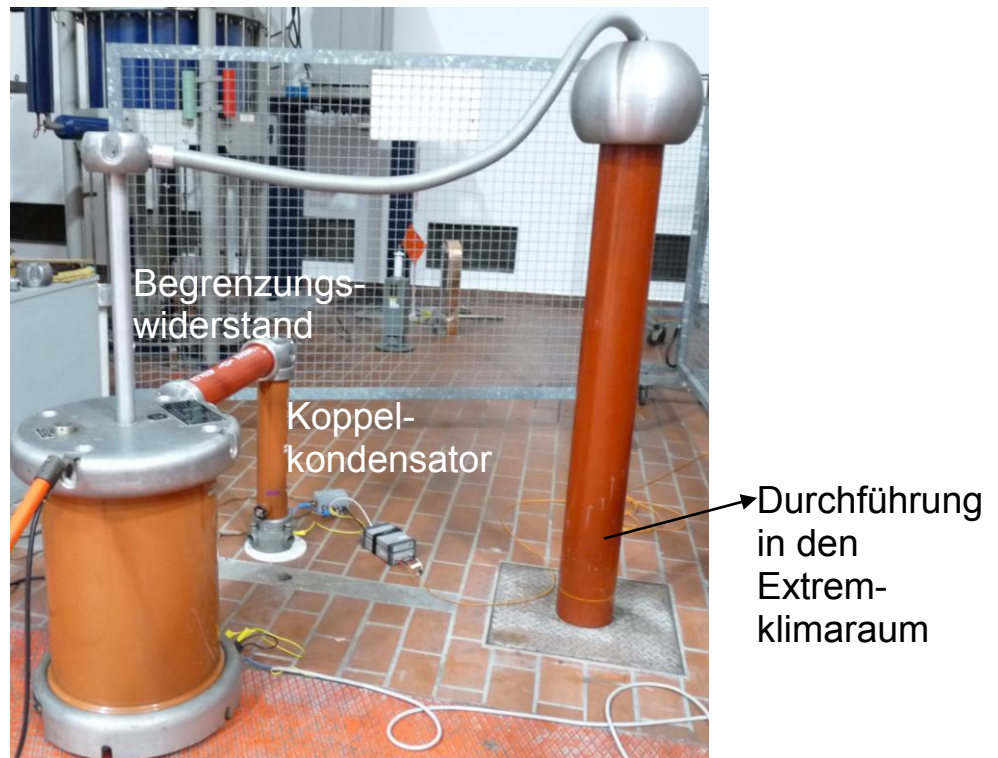


Bild 3-19: Messaufbau der Messungen im Klimaraum

3.4.3 Teilentladungsfreiheit der Messaufbauten

Beim Einbringen der Hochspannung in den Klimaschrank beziehungsweise Klimaraum müssen einige Dinge beachtet werden. Besonders wichtig für die Teilentladungsmessung ist die Teilentladungsfreiheit des Messaufbaus, da ansonsten Entladungen des Messaufbaus und nicht nur des Prüflings vermessen werden. Das bedeutet, auch die Hochspannungsdurchführung muss entladungsfrei sein.

Der Klimaschrank weist eine Durchführung mit einem Durchmesser von 50 mm auf. Über diese Durchführung wird die Hochspannungsversorgung des Prüflings eingeführt. Hierfür wurde eine Durchführung aus Teflon gefertigt. Zur Vermeidung der Entladungen auf Grund der Grenzflächen am Ende der Durchführung wurde eine Feldsteuerung mit handelsüblicher Knetmasse vorgenommen. Bild 3-20 zeigt die gefertigte Hochspannungsdurchführung für die Messungen im Klimaschrank.



Bild 3-20: Gefertigte Hochspannungsdurchführung für den Klimaschrank

Der gesamte Messaufbau im Klimaschrank ist bis zu einer Spannung von $U_{\text{eff}} = 25 \text{ kV}$ teilentladungsfrei. Zwischen $U_{\text{eff}} = 25 \text{ kV}$ und $U_{\text{eff}} = 30 \text{ kV}$ kommt es zu Entladungen von rund 600 pC . Diese Entladungen sind vertretbar, da die gemessenen Entladungen der Prüfobjekte im Bereich von einigen Nanocoulomb liegen.

Für den Messaufbau im Klimaraum wurde die vorhandene fest verbaute Durchführung verwendet. Der Aufbau weist bis zu einer Spannung von $U_{\text{eff}} = 27 \text{ kV}$ Entladungen unter 2 pC auf. Erst ab einer Spannung von $U_{\text{eff}} = 31 \text{ kV}$ treten Entladungen im Bereich von 1 nC bis 2 nC auf. Der Aufbau ist aber dennoch für die durchzuführenden Messungen als hinreichend teilentladungsfrei einzustufen, da die Spannung maximal bis $U_{\text{eff}} = 30 \text{ kV}$ erhöht wird und die auftretenden Entladungen des Modells B2 in diesem Bereich sehr viel höher sind.

3.5 Messroutine

3.5.1 Messablauf Klimaschrank und Klimaraum

Die Messungen im Klimaschrank laufen wie folgt ab: Als Erstes werden die Messobjekte im Schrank platziert. Es folgt die Kalibrierung der Spannung sowie des TE-Pegels für die elektrische Teilentladungsmessung. Danach kann die Einstellung der Temperatur sowie der relativen Feuchte am Klimaschrank erfolgen. Es dauert ca. eine Stunde bis ein stationärer Punkt erreicht wird und der Start der Messungen erfolgen kann. Die Messungen laufen nach einer definierten Messroutine ab, bei der pro Temperatur/Feuchte-Punkt zehn Messungen durchgeführt werden, um eine statistische Auswertung der Ergebnisse gewährleisten zu können.

Der Messablauf im Klimaraum unterscheidet sich wie folgt: Nach Installation der Wickelkopf-Anordnung im Klimaraum wird der gewünschten Temperatur/Feuchte-Punkt eingestellt. Danach dauert es ca. 12 Stunden, bis ein stationärer Punkt erreicht werden kann. Jeweils vor Beginn der Messung wird die Spannung und der TE-Pegel kalibriert. Nach Abschluss der Messung für eine Konfiguration erfolgt der Umbau und eine erneute Kalibration, da sich die Kapazitätsverhältnisse verändern. Soll die Temperatur und Feuchte beibehalten werden, kann der Start eines neuen Messzyklus erfolgen, ansonsten muss zuvor auf ein anderes Klima geregelt werden. Pro Tag kann auf Grund der langen Zeitkonstanten nur die Messung eines Temperatur/Feuchte-Punktes für alle vier Konfigurationen erfolgen. Bild 3-21 veranschaulicht mit Hilfe eines Flussdiagramms den Messablauf im Klimaschrank sowie Klimaraum.

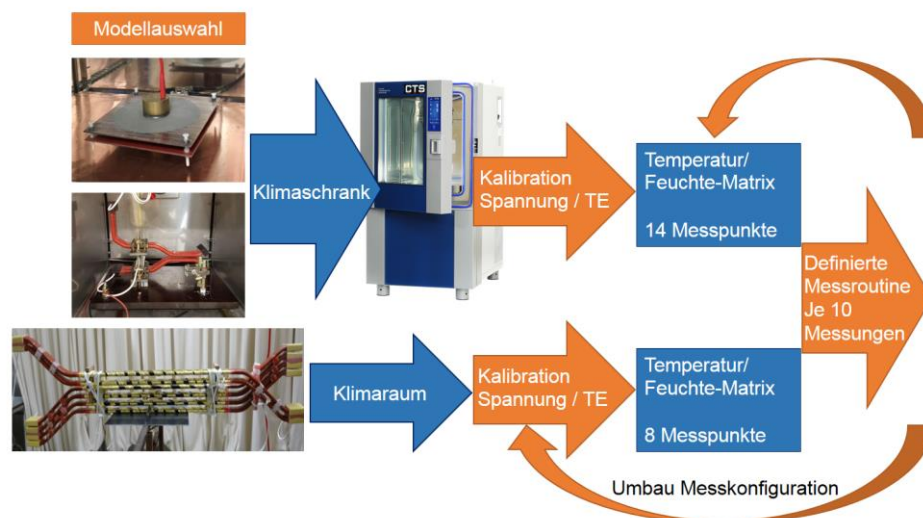


Bild 3-21: Messablauf der Messungen im Klimaschrank und Klimaraum

Jede einzelne Messung läuft nach einer bestimmten Messroutine ab, um alle Messungen reproduzierbar zu gestalten.

Wie in Bild 3-22 ersichtlich, wird die Spannung bis zu einem definierten Wert, der mindestens 5 kV unter der Koronaeinsatzspannung liegt, erhöht. Die Erhöhung der Spannung bis zur Koronaeinsatzspannung erfolgt in 0,5 kV-Schritten.

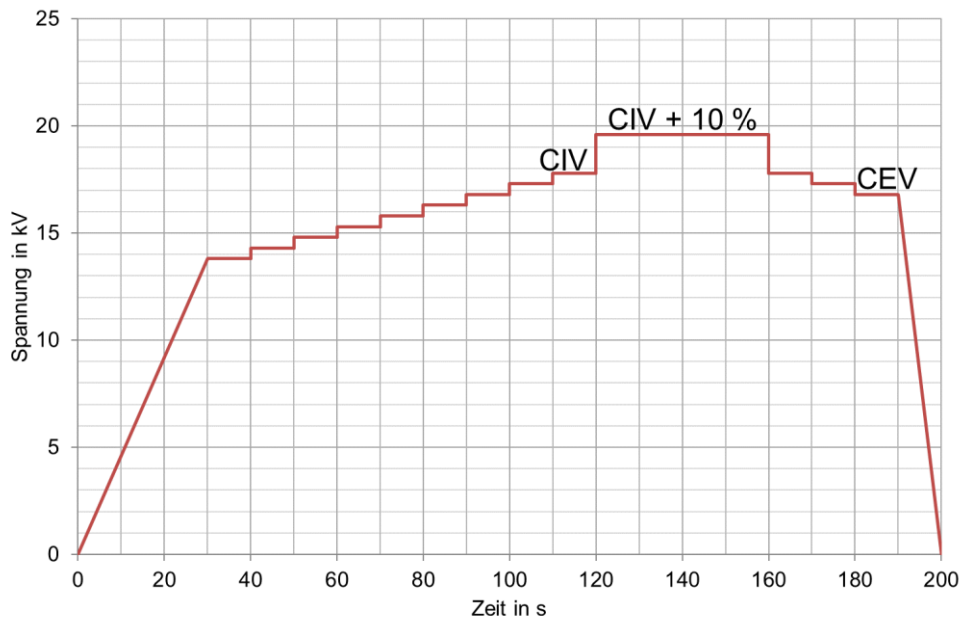


Bild 3-22: Festgelegte Messroutine zur Bestimmung der Koronaeinsatzspannung und Korona-aussetzspannung

3.5.2 Temperatur/Feuchte-Matrix

Die festgelegte Temperatur/Feuchte-Matrix orientiert sich an realen Umgebungsbedingungen an den Endaufstellungsorten von Generatoren.

Das Mollier-Diagramm in Bild 3-23 zeigt, welche Punkte einstellbar sind und welche physikalisch, auf Grund der Eisbildung im Klimaschrank beziehungsweise Klimaraum, nicht regelbar sind. Bei einer Taupunkttemperatur von unter 5 °C kann es zur Eisbildung kommen und diese Temperatur/Feuchte-Punkte können nur kurze Zeit gehalten beziehungsweise nicht realisiert werden.

Das in Bild 3-23 dargestellte Beispiel zeigt den Punkt 10 °C und 20 % relative Feuchte. Dieses Klimat ergibt eine Taupunkttemperatur von – 11 °C und kann somit nicht eingestellt werden. Auf Grund dieser Tatsache musste eine Einschränkung der Temperatur/Feuchte-Matrix vorgenommen werden.

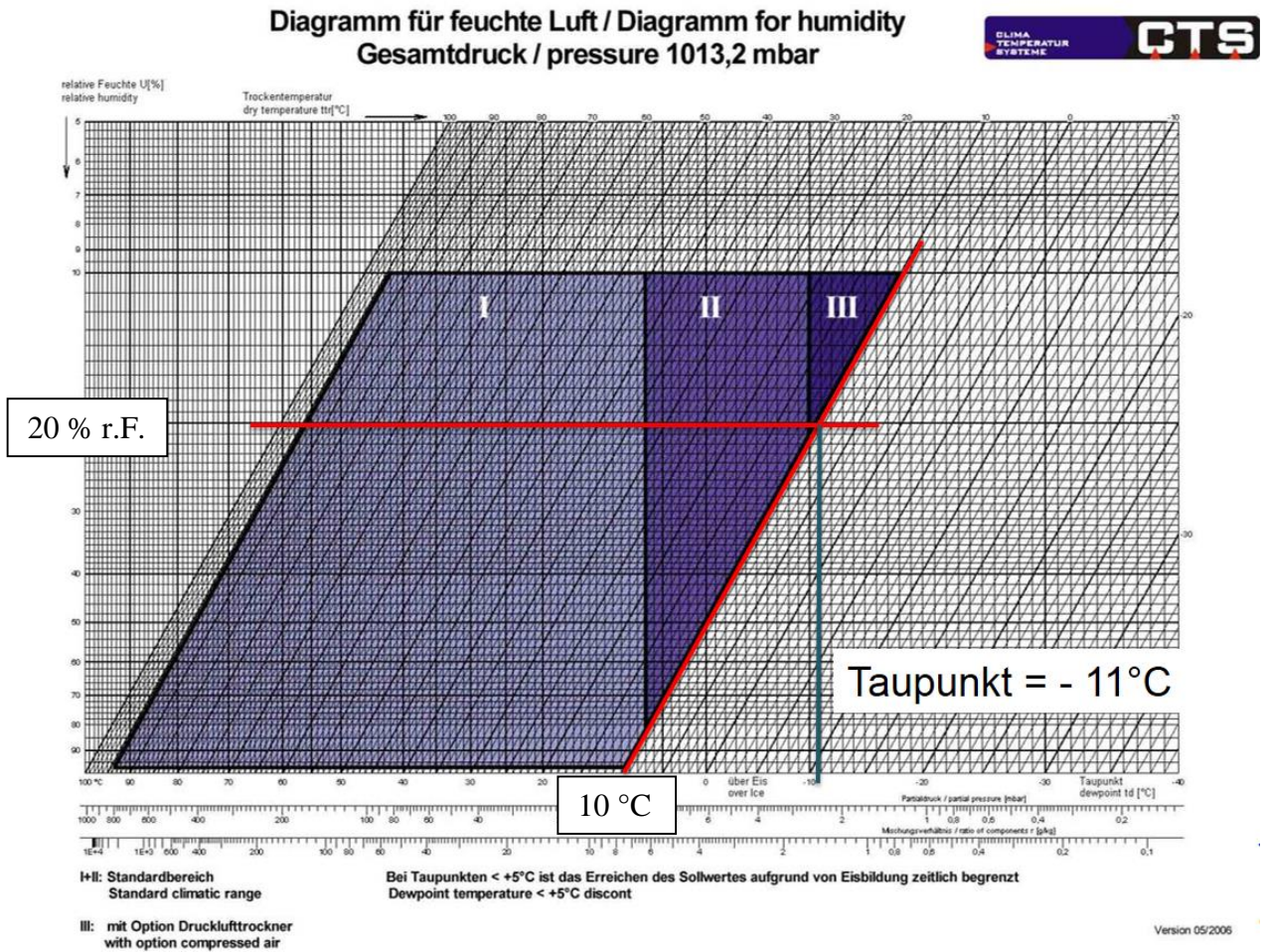


Bild 3-23: Mollier-Diagramm zur Abschätzung der möglichen Temperatur/Feuchte-Punkte [40]

Bild 3-24 zeigt die festgelegte Temperatur/Feuchte-Matrix für die messtechnischen Untersuchungen.

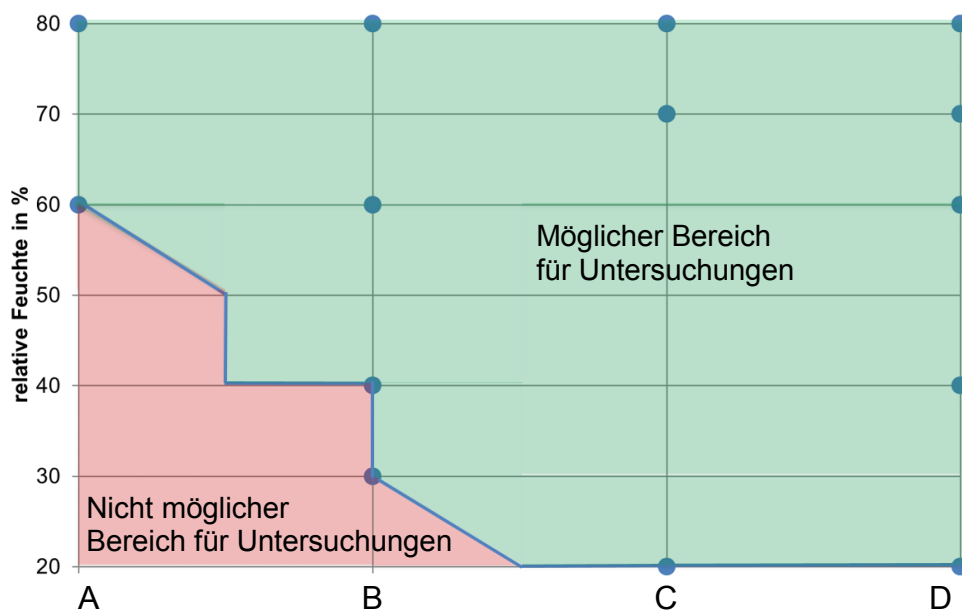


Bild 3-24: Festgelegte Temperatur/Feuchte-Punkte

3.6 Messergebnisse

3.6.1 Allgemeines

Die erhaltenen Messergebnisse bestehen aus der elektrischen Teilentladungsmessung und den Fotos des Coronafinders bei Einsetzen der Entladungen. Die beiden Detektionsergebnisse lassen sich sehr gut korrelieren. Im Zuge der Messungen wurde jeweils ein Messfile der elektrischen Messung gespeichert. Zusätzlich dazu wurden Bilder der Entladungen mit Hilfe des Coronafinders aufgenommen. Die Auswertung der Messergebnisse enthält die Teilentladungsmuster der elektrischen Messung, die Fotos des Coronafinders sowie die in entsprechenden Diagrammen zusammengefasste Auswertung der Teilentladungseinsatzfeldstärke.

Die detaillierten Ergebnisse aller durchgeführten Messungen dieser Arbeit befinden sich im Anhang.

3.6.2 Wasseranlagerungen an der Isolierstoffoberfläche

Die Benetzung beschreibt das Verhalten von Flüssigkeiten bei Kontakt mit einer Festkörpergrenzfläche. Dabei muss zwischen der Benetzung einer glatten Oberfläche, wie sie annähernd beim Platte-Platte-Modell vorhanden ist, und der Benetzung einer strukturierten Oberfläche unterschieden werden.

Bei einer glatten Oberfläche wird zwischen der vollständigen und der partiellen Benetzung differenziert. Bei der vollständigen Benetzung wird die Oberfläche zur Gänze mit einem Wasserfilm überzogen. Bei der partiellen Benetzung bildet die Flüssigkeit einen Tropfen mit einem charakteristischen Winkel zwischen Flüssigkeit und Festkörper, dem Kontaktwinkel [41].



Bild 3-25: Benetzungszustände auf einer glatten Oberfläche
A: Vollständige Benetzung, B: Partielle Benetzung [41]

Die Messung des Kontaktwinkels gibt Aufschluss über die Benetzbarkeit einer Festkörperoberfläche. Ist der Kontaktwinkel auf einer Oberfläche kleiner als 90° , so wird die Oberfläche als hydrophil bezeichnet. Eine hydrophobe Oberfläche liegt vor, sobald der Kontaktwinkel größer als 90° ist.

Bei der Benetzung von strukturierten Oberflächen wird zwischen der homogenen und der heterogenen Benetzung unterschieden. Bei der homogenen Benetzung dringt die Flüssigkeit zwischen die Oberflächenstruktur ein und es kommt zur Benetzung der kompletten Festkörperoberfläche. Bei der heterogenen Benetzung werden vor allem bei hydrophoben Oberflächen Luftpinschlüsse in den Vertiefungen der Oberflächenstruktur gebildet [41].

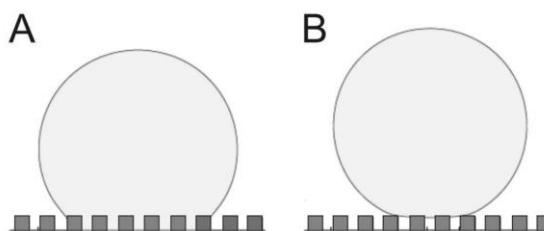


Bild 3-26: Benetzungszustände auf einer strukturierten Oberfläche
A: Homogene Benetzung, B: Heterogene Benetzung [41]

Die in dieser Arbeit verwendeten Modelle unterscheiden sich in ihrer Oberflächenbeschaffenheit. Das Platte-Platte-Modell weist eine glatte Oberflächenstruktur auf. Bild 3-27 zeigt einen 20- μl -Tropfen an der Isolierstoffoberfläche der Platte-Platte-Anordnung. Der Kontaktwinkel wurde mit $\Theta = 35,45^\circ$ bestimmt, somit wird die vorliegende Oberfläche als hydrophil bezeichnet.

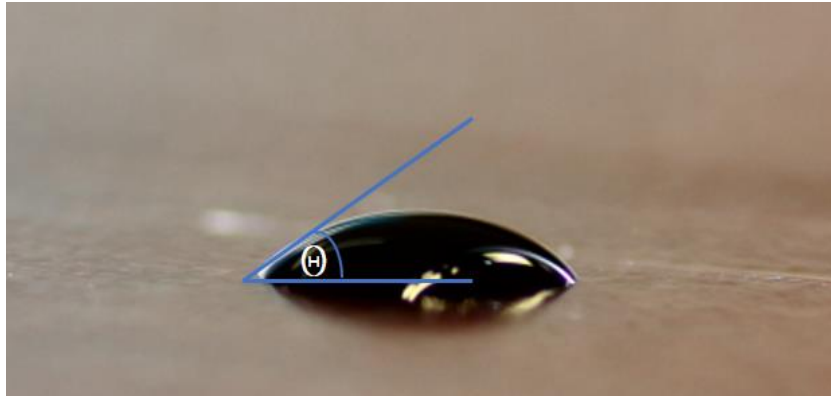


Bild 3-27: 20- μl -Tropfen angebracht an der Isolierplatte der Platte-Platte-Anordnung zur Bestimmung des Kontaktwinkels

Das Stab-Stab-Modell weist eine strukturierte Oberfläche auf und es muss zwischen einer homogenen und einer heterogenen Benetzung unterschieden werden. Bild 3-28 zeigt einen 20- μl -Tropfen an der Isolierstoffoberfläche der Stab-Stab-Anordnung. Der Kontaktwinkel wurde mit $\Theta = 26,57^\circ$ bestimmt. Somit ist bewiesen, dass die Staboberfläche hydrophiler ist als die Isolierstoffoberfläche der Platte-Platte-Anordnung.



Bild 3-28: 20- μl -Tropfen angebracht an der Isolierstoffoberfläche der Stab-Stab-Anordnung zur Bestimmung des Kontaktwinkels

Durch die Strukturierung beziehungsweise Zunahme der Rauheit eines hydrophilen Materials wird die Oberfläche noch hydrophiler. Je hydrophiler eine Oberfläche ist, desto leichter kann eine vollständige Benetzung der Oberfläche erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines Wasserfilms an der Isolierstoffoberfläche steigt [41].

Bei hoher Luftfeuchtigkeit kommt es zu einer vermehrten Anzahl von Wassermolekülen, welche sich an der Isolierstoffoberfläche anlagern können. Diese Anlagerung verändert den Oberflächenwiderstand, die Leitfähigkeit der Oberfläche sowie die elektrische Feldverteilung an der Isolierstoffoberfläche [30]. Bild 3-29 zeigt die Veränderung des Oberflächenwiderstandes über der relativen Feuchte.

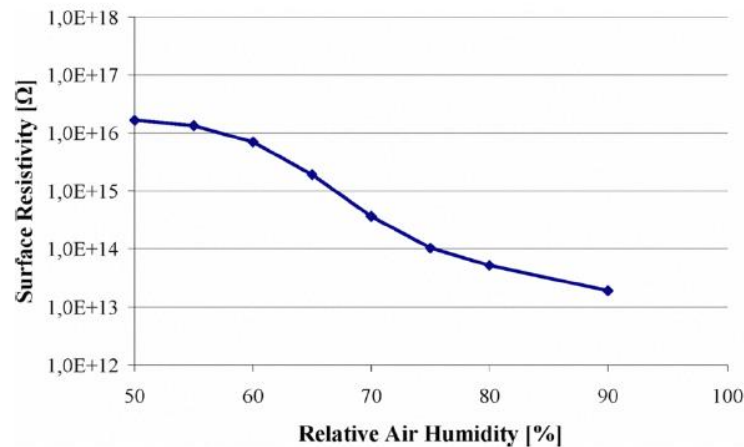


Bild 3-29: Veränderung des Oberflächenwiderstandes der Isolierstoffoberfläche mit steigender relativer Luftfeuchte begründet durch die Anlagerung von Wassermolekülen [30]

Je nach Oberflächenbeschaffenheit beziehungsweise Molekülstruktur an der Oberfläche kann die Anlagerung von Wassermolekülen beeinflusst und gefördert werden [42].

Bild 3-30 (a) zeigt die Adsorptionsisotherme bei 23 °C für Wasserdampf auf Teflon und Quartz. Unter Sorption wird ein Vorgang verstanden, bei dem ein flüssiger oder gasförmiger Bestandteil (Sorptiv) an einen Festkörper angelagert wird (Adsorption). Der Zusammenhang zwischen der Menge an sorbierten Stoffen und der Konzentration des Sorptivs wird bei konstanter Temperatur mit Hilfe von Sorptionsisothermen dargestellt [43]. In Bild 3-30 (a) ist der Prozentsatz errechnet aus dem Gewicht des sorbierten Stoffes bezogen auf die Probe ohne Adsorption über der relativen Luftfeuchtigkeit aufgetragen. Im Vergleich dazu wurde für die gleichen Proben die Oberflächenleitfähigkeit über der relativen Luftfeuchte gemessen [44]. Bild 3-30 (b) zeigt die Veränderung der Oberflächenleitfähigkeit über der relativen Feuchte für Teflon und Quartz.

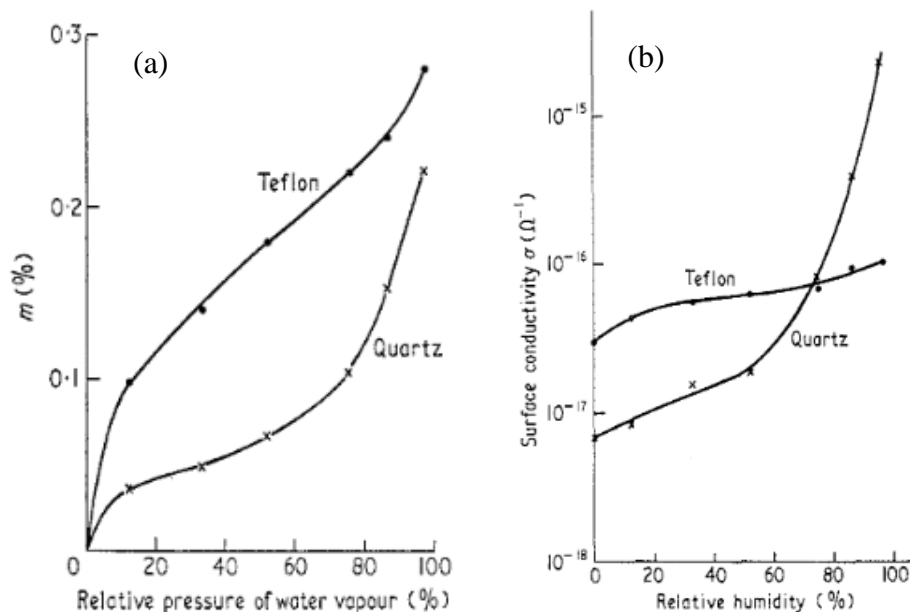


Bild 3-30: Adsorptionsisotherme für Teflon und Quartz (a)
Oberflächenleitfähigkeit von Teflon und Quartz als Funktion der relativen Luftfeuchte bei 23 °C (b) [44]

Je nach Material kommt es natürlich zu leichten Veränderungen der Adsorptionsisotherme sowie der Oberflächenleitfähigkeit. Belegt ist allerdings eindeutig, dass es unter hoher Feuchte zu einer Adsorption von Wassermolekülen an Isolierstoffoberflächen kommt. Dies führt in weiterer Folge zu einer Veränderung der Leitfähigkeit, des Oberflächenwiderstandes und zu einer Reduktion der Teilentladungseinsetzspannung [44].

Während der durchgeführten Untersuchungen kommt es auf Grund des erhöhten Wasserdampfgehaltes in der Luft zur Anlagerung von Wassermolekülen an der Isolierstoffoberfläche, die wie zuvor beschrieben auch die Feldverteilung auf der Oberfläche sowie die Oberflächenleitfähigkeit verändern. Die Wassermoleküle bilden bei sehr hoher Feuchte einen feinen Wasserfilm, der im Zuge der Untersuchungen detektiert werden konnte. Eine eindeutige Detektion der Molekülanlagerungen könnte mit Hilfe von Adsorptionsisothermen für das verwendete Material erfolgen.

3.6.3 Platte-Platte-Anordnung

Die Platte-Platte-Anordnung stellt ein einfaches Modell mit einem sehr homogenen Aufbau dar. Die Oberflächen der Isolierplatten sind glatt und es zeigen sich daher sehr geringe Auswirkungen auf die Koronaeinsatzspannung und Koronaaussetzspannung bei hoher Luftfeuchte. Es kommt zu einem Absinken der Koronaeinsatzfeldstärke von maximal 13 %. Wird in diese Anordnung allerdings ein Spacer eingebaut, kann festgestellt werden, dass diese Inhomogenität die Koronaein- und -aussetzspannung in Bereichen höherer Luftfeuchtigkeit, teilweise schon ab ca. 40 % r.F., stark absinken lässt. Es kommt zu einem Absinken der Teilentladungseinsatzfeldstärke von maximal 40 %.

Bild 3-31 zeigt den gemessenen Feldstärkeverlauf E_{CIV} über der relativen Feuchte für die Platte-Platte-Anordnung ohne Spacer und einem Abstand von 10 mm im Vergleich mit der Anordnung inklusive Abstandshalterpaket.

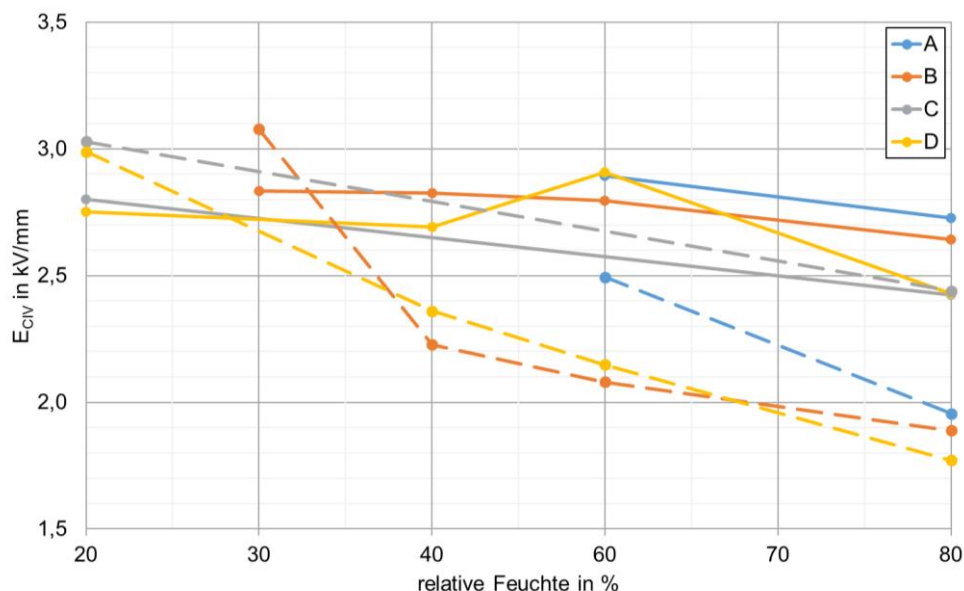


Bild 3-31: Verlauf der Koronaeinsatzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Platte-Platte-Modell ohne Spacer (durchgezogen) / mit Spacer (strichliert) für $d = 10$ mm) für verschiedene Temperaturen A - D

Der Vergleich der beiden Modelle gleichen Abstands lässt den Effekt erkennen, dass die zusätzliche Inhomogenität des Spacers ein drastischeres Absinken der Teilentladungseinsatzfeldstärke zur Folge hat. Insbesondere bei Temperatur B sinkt die Feldstärke E_{CIV} beim Spacermodell von 30 % r.F. auf 40 % r.F. um 0,9 kV/mm, wobei für das Modell ohne Spacer ein nahezu konstanter Verlauf ausgewertet wurde. Die Verläufe der Feldstärke E_{CIV} für die Temperaturen A und C sind sehr ähnlich, lediglich für Temperatur A und eine relative Feuchte von 80 % zeigt sich ein starkes Absinken der Einsatzfeldstärke für das Spacermodell. Die Kurve bei Temperatur D lässt beim Modell mit Abstandshalter ein nahezu lineares Absinken der Feldstärke feststellen.

Das Platte-Platte-Modell ohne Spacer weist im Allgemeinen einen deutlich niedrigeren Feuchteinfluss auf, als jenes Modell mit Spacer. Bild 3-32 zeigt die Aufnahme der Teilentladungen mit Hilfe des verwendeten Coronafinders bei Messung des Modells ohne Spacer unter Temperatur B und 80 % relativer Feuchte.



Bild 3-32: Aufnahme des Coronafinders der Entladungen am Platte-Platte-Modell ohne Spacer mit $d = 10$ mm und einer relativen Luftfeuchte von 80 % sowie Temperatur B

3.6.4 Stab-Stab-Anordnung

Das Stab-Stab-Modell weist auf Grund der gewickelten Isolierung eine inhomogenere Oberfläche auf als das Platte-Platte-Modell. Es wurde für dieses Modell ein stärkerer Feuchteinfluss detektiert. Auch hier ist ein Absinken der Koronaeinsatzfeldstärke um bis zu rund 40 % zu beobachten. Unterschiede ergeben sich ebenso für das Modell mit und ohne eingebautem Spacer, sowie auch die verschiedenen Abstände zeigen abweichendes Verhalten. Insbesondere für das Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 5$ mm kann ein ausgeprägter Feuchteinfluss abgeleitet werden. Bild 3-33 zeigt die Auswertung der Messergebnisse des Stab-Stab-Modells mit und ohne Spacer bei einem Luftspaltabstand von $d = 15,6$ mm.

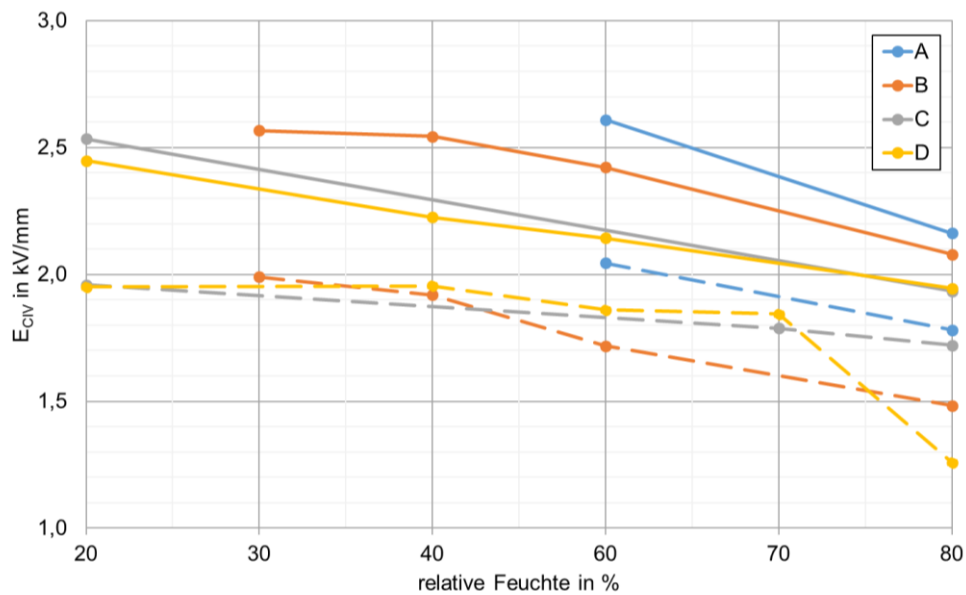


Bild 3-33: Verlauf der Koronaeinsatzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Stab-Stab-Modell mit Spacer (durchgezogen) / ohne Spacer (strichliert) für $d = 15,6$ mm) für verschiedene Temperaturen A - D

Der Vergleich der beiden Modelle zeigt, dass das Stab-Stab-Modell ohne Spacer eine starke Feuchteabhängigkeit mit sich bringt. Dennoch ist das Absinken der Koronaeinsatzfeldstärke bei Temperatur D und 80 % r.F. für das Spacermodell noch stärker ausgeprägt. Das Bild 3-33 weist auch daraufhin, wie schon beim Platte-Platte-Modell, dass die Kurven des Spacermodells deutlich unter jenen des Stabmodells ohne Spacer liegen, obwohl die Einsatzspannungen auf den gleichen Luftspaltabstand bezogen wurden. Auf Grund des verbauten Spacers kommt es, begründet durch die relativen Permittivitäten der Isolierstoffe, zu einer Veränderung der Feldstärkeverteilung und in weiterer Folge zu Feldstärkeüberhöhungen an den Kanten des Abstandshalterpaketes. Vor allem unter hoher Luftfeuchte wirken sich diese Unterschiede noch stärker aus, da es am eingebauten Spacer zu zusätzlichen Wasseranlagerungen kommen kann, die in weiterer Folge zu einem Absinken der Teilentladungseinsetzspannung führen.

Bild 3-34 und Bild 3-35 zeigen Coronafinderaufnahmen der Entladungen am Prüfling B1 mit und ohne Spacer, unter Temperatur B und 60 % relativer Feuchte.

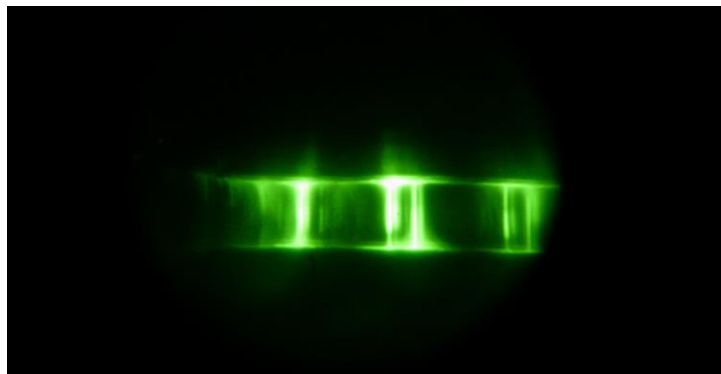


Bild 3-34: Aufnahme des Coronafinders bei Messung des Stab-Stab-Modells ohne Spacer mit $d = 15,6$ mm und einer relativen Feuchte von 60 % sowie Temperatur B

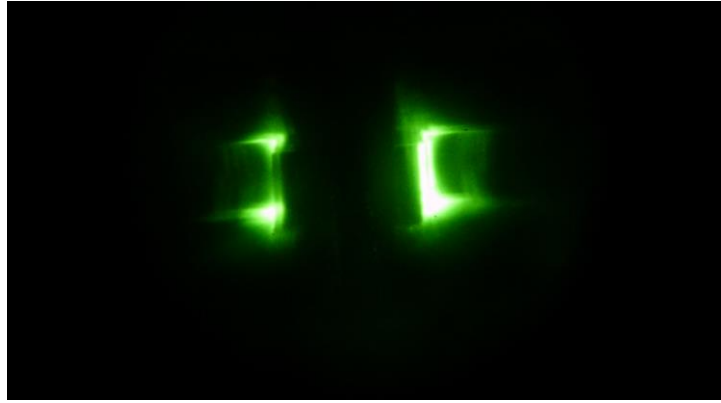


Bild 3-35: Aufnahme des Coronafinders bei Messung des Stab-Stab-Modells mit Spacer mit $d = 15,6 \text{ mm}$ und einer relativen Feuchte von 60 % sowie Temperatur B

3.6.5 Wickelkopfanordnung

Die Messungen am Modell B2, dem Wickelkopfmodell bestehend aus realen Statorstäben, zeigen, dass der Feuchteeinfluss an diesem Modell noch stärker ausgeprägt ist als zuvor beim Stab-Stab-Modell. Es kommt zu einer Halbierung der Koronaeinsatzfeldstärke bei 80 % relativer Feuchte.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Konfiguration 2 und Konfiguration 3 näher beschrieben. Konfiguration 1 wird im nächsten Kapitel im Vergleich mit dem Stab-Stab-Modell näher diskutiert.

Bild 3-36 zeigt die Auswertung der Messergebnisse der Konfiguration 2 des Wickelkopfmodells.

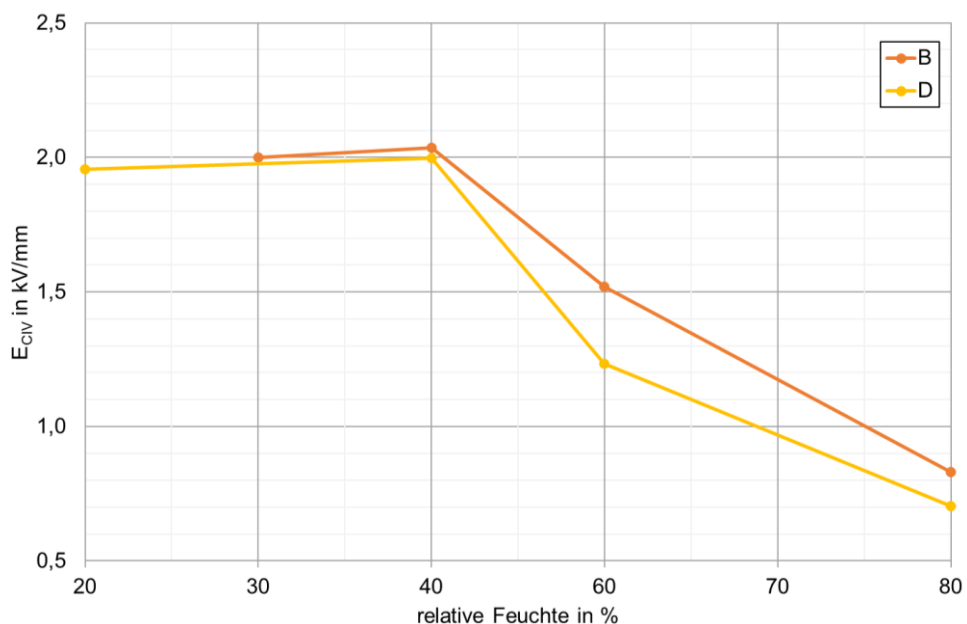


Bild 3-36: Verlauf der Koronaeinsatzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Wickelkopfmodell Konfiguration 2) für die Temperaturen B und D

Die Ergebnisse der Konfiguration 2 des Wickelkopfmodells sind unter trockenen Klimaten gut mit dem Stab-Stab-Modell vergleichbar. Ab 40 % r.F. kommt es zu einem drastischen

Absinken der Koronaeinsatzfeldstärke. Diese liegt für Temperatur D nur mehr bei 0,7 kV/mm. Auf Grund der zusätzlichen Spacer (drei Abstandshalter) ergeben sich weitere Inhomogenitäten, an welchen Wasseranlagerungen zum Absinken der Koronaeinsatzfeldstärke führen. Der Einbau von weiteren Abstandshalterpaketen in das Stab-Stab-Modell könnte Aussage darüber geben, ob nur die zusätzlichen Inhomogenitäten oder auch die Bauform des Modells zu diesem ausgeprägten Feuchteinfluss führen.

Im Kreuzungsbereich zwischen Oberlage und Unterlage, wo ein spezieller Stützschauch als Abstandshalter montiert wird, treten als erstes Entladungen auf. Der Stützschauch stellt eine große Inhomogenität durch seine Form und Platzierung dar. Nachfolgendes Diagramm beschreibt die Ergebnisse der Konfiguration 3 detailliert. Ein Vergleich der Konfiguration 3 mit anderen Modellen ist nicht möglich, da zuvor die Problematik „Stützschauch als Abstandshalter“ nicht behandelt wurde.

Bild 3-37 zeigt die Auswertung der Messergebnisse der dritten Messkonfiguration des Wickelkopfmodells.

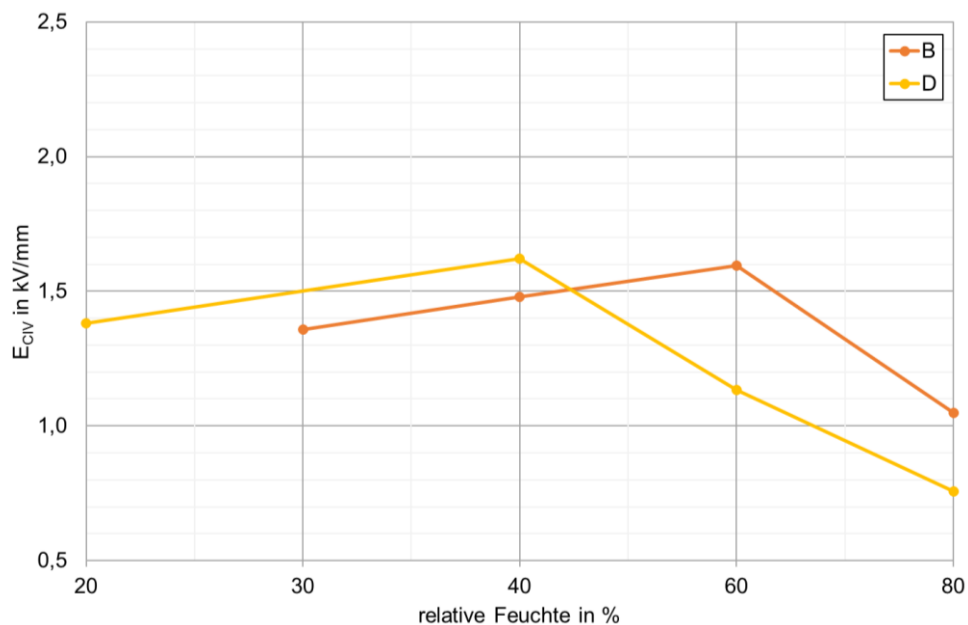


Bild 3-37: Verlauf der Koronaeinsatzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Wickelkopfmodell Konfiguration 3) für die Temperaturen B und D

Die Kurvenverläufe zeigen, dass für Temperatur D ein früheres Absinken der Koronaeinsatzfeldstärke zu erwarten ist (schon ab 40 % relativer Feuchte). Generell kann die Aussage formuliert werden, dass schon unter trockenen Klimaten eine niedrigere Koronaeinsatzspannung und Koronaaussetzspannung, als bei den anderen Modellen gemessen wurde. Materialveränderungen am Stützschauch beziehungsweise die Behandlung mit leitfähigem Lack oder die Veränderung der relativen Permittivität der Materialien könnte die Teilentladungseinsetzspannung an diesem kritischen Bereich erhöhen.

Die Darstellung der Ergebnisse der Konfiguration vier befindet sich im Anhang und wird hier nicht weiter diskutiert, da die einzelnen Koronaeinsatzfeldstärken sehr gut mit den Konfigurationen 1 bis 3 übereinstimmen.

Bild 3-38 bis Bild 3-40 zeigen die Entladungen in der Unterlage des Wickelkopfmodells, einmal aufgenommen mit dem Coronafinder bei niedriger Luftfeuchtigkeit sowie unter hoher Luftfeuchte, und einmal mit einer Digitalkamera aufgenommen.

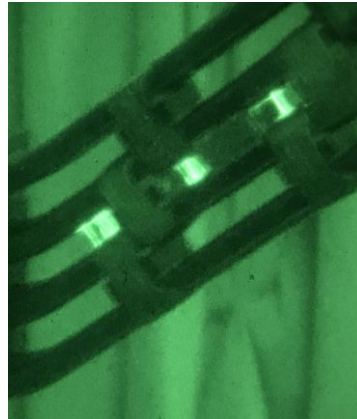


Bild 3-38: Aufnahme des Coronafinders der Entladungen in der Unterlage des Wickelkopfmodells bei 30 % r.F. und Temperatur B



Bild 3-39: Aufnahme des Coronafinders der Entladungen in der Unterlage des Wickelkopfmodells bei 80 % r.F. und Temperatur B

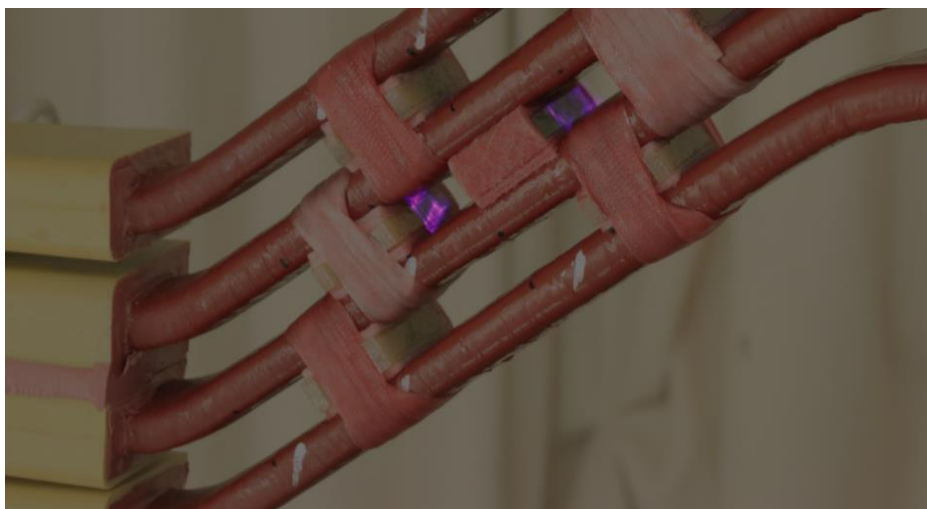


Bild 3-40: Digitalkameraaufnahme der Entladungen in der Unterlage des Wickelkopfmodells bei 30 % r.F. und Temperatur B

3.6.6 Vergleich der Messergebnisse der einzelnen Anordnungen

Die erste Kernaussage der Literaturrecherche, dass die Teilentladungseinsetzspannung mit zunehmender Feuchte sinkt, wurde durch die Messungen an allen Modellen bestätigt.

Die Ergebnisse zeigen allerdings, dass die Homogenität der Anordnung eine sehr große Rolle bei Untersuchungen mit hoher Luftfeuchtigkeit spielt. Ein Vergleich des Modells A mit dem Modell B1, also die Platte-Platte-Anordnung verglichen mit dem Stab-Stab-Modell, zeigt, dass die Isolierung der Stäbe auf Grund der gewickelten Oberfläche sowie der Stabform eine inhomogenere Anordnung darstellt. Auch in den Messergebnissen wurde deutlich, dass Modell B1 eine stärkere Feuchteabhängigkeit aufweist. Jedoch lassen sich die Ergebnisse des Stabmodells ohne Spacer sehr gut mit jenen der Platte-Platte-Anordnung mit Spacer vergleichen. Auffallend dabei ist auch, dass die Temperatur in diesen Untersuchungen nachrangig einzustufen ist, da es bei allen gemessenen Temperaturpunkten zum Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung bei hoher Luftfeuchte kommt. Erkennbar ist lediglich, dass das Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung ab Temperatur C stärker ausgeprägt ist. Als kritischster Punkt ist jener bei Temperatur D und einer relativen Feuchte von 80 % einzustufen. Bild 3-41 zeigt einen Vergleich der Messergebnisse des Platte-Platte-Modells mit dem Stab-Stab-Modell ohne Spacer.

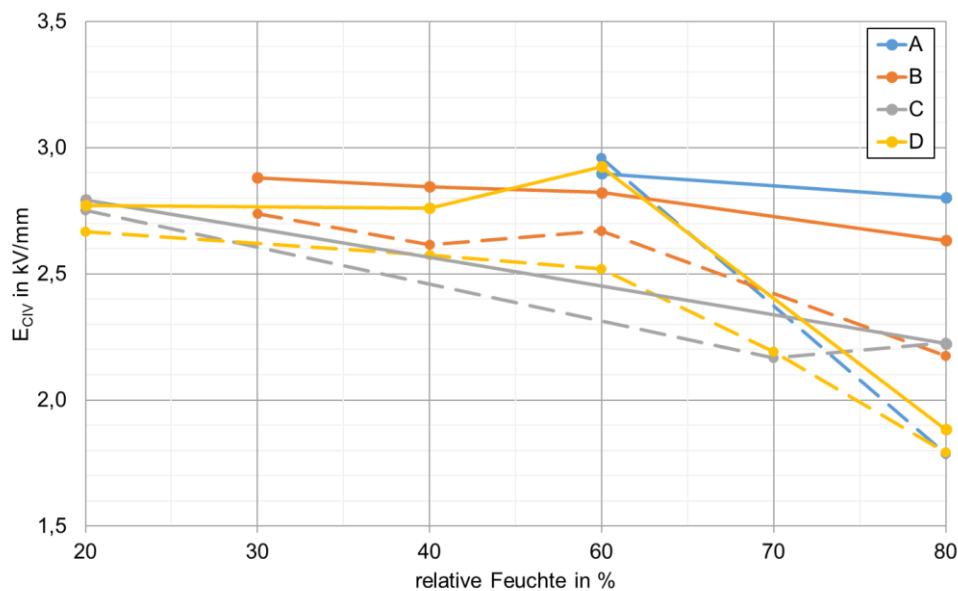


Bild 3-41: Vergleich der Koronaeinsetzfeldstärke E_{CIV} des Platte-Platte-Modell mit dem Stab-Stab-Modell Luftspaltabstand $d = 7,5$ mm über der relativen Feuchte (Platte-Platte-Modell durchgezogen / Stab-Stab-Modell strichliert) für verschiedene Temperaturen A - D

Wie in Bild 3-41 gut ersichtlich, weist das Stab-Stab-Modell einen ausgeprägteren Feuchteinfluss auf. Dies ist, wie schon zuvor erwähnt, auf die inhomogenere Staboberfläche zurückzuführen, an welcher Wasseranlagerungen auftreten. Eine Verminderung des Feuchteinflusses könnte möglicherweise durch die Behandlung der Oberfläche mit diversen Lacken erzielt werden.

Die Problematik der Inhomogenität spiegelt sich auch in den durchgeführten Messungen mit unvorteilhafter Bandage, geschmirgelter Bandage, unvorteilhaftem Spacer sowie definierter Inhomogenität wieder. Hierbei ist deutlich erkennbar, dass eine unvorteilhafte Bandage in nahezu allen gemessenen Feuchtepunkten signifikante Auswirkungen auf die Koronaeinsetzspannung und Koronaaussetzspannung hat. Nach schmirgeln der Bandage kommt es zu einer Erhöhung der Koronaein- und -aussetzspannung, da die Unebenheiten der unvorteilhaften

Bandage beseitigt und wieder eine glatte Oberfläche geschaffen wurde. Durch ungenaues Abschleifen können erneut kleine Inhomogenitäten entstehen, die ein Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung zur Folge haben. Dies konnte allerdings bei den durchgeführten Untersuchungen nicht beobachtet werden.

Bei dem Prüfling mit definierter Inhomogenität wurde ein erhöhter Feuchteinfluss detektiert. Das bedeutet, dass Inhomogenitäten, hervorgerufen durch eine nicht ideale Produktion, unbedingt vermieden werden müssen und für Aufstellungsorte mit kritischen klimatischen Bedingungen auf keinen Fall außer Acht gelassen werden können. Bild 3-42 zeigt die ausgewertete Koronaein- sowie -aussetzspannung am Modell mit definierter Inhomogenität. Im Vergleich zur Messung ohne angebrachte Inhomogenität lässt sich deutlich feststellen, dass es bei erhöhter Luftfeuchtigkeit zu einem drastischen Absinken der Koronaein- und aussetzspannung kommt. Die Aussage, dass sich Inhomogenitäten unter hoher Luftfeuchtigkeit stärker auswirken, lässt sich formulieren.

In Bild 3-42 zeigt jeweils der Balken „vorher“ jene Messwerte an, die am Stab-Stab-Modell mit Luftspalt $d = 7,5$ mm gemessen wurden. Der Balken „nachher“ stellt die Messwerte des Stab-Stab-Modells mit eingebauter definierter Inhomogenität dar.

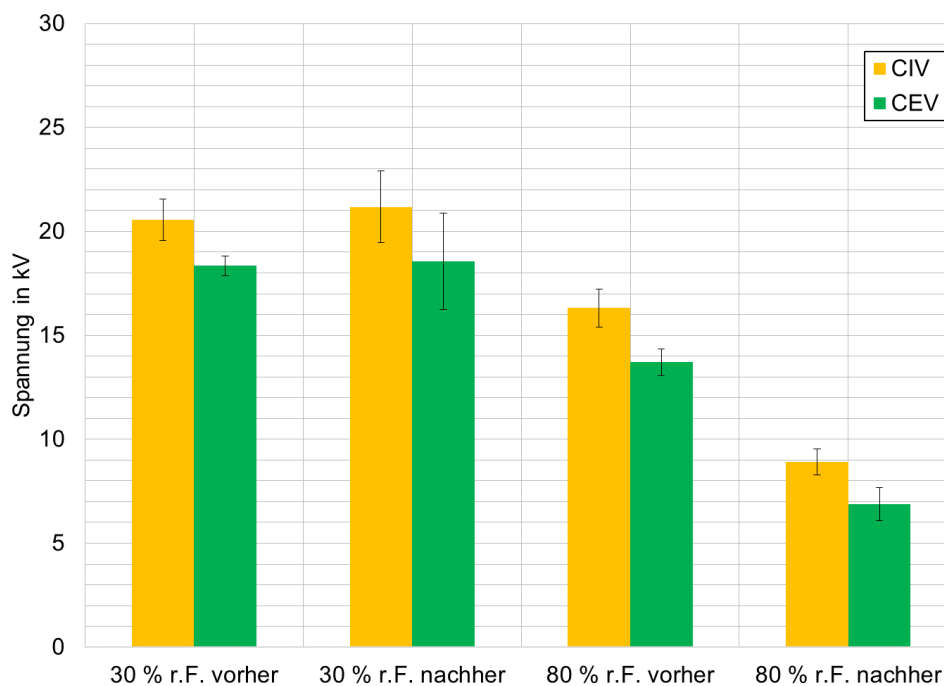


Bild 3-42: Koronaein- und -aussetzspannung gemessen am Modell B1 mit definierter Inhomogenität im Vergleich zur Messung mit Luftspalt ohne Inhomogenitäten

Die Ergebnisse des Wickelkopfmodells, unter unbedenklichen klimatischen Bedingungen, sind für die betrachteten Oberstäbe sehr ähnlich zu jenen des Modells B1. Die Unterstäbe weisen eine etwas niedrigere Ein- sowie Aussetzspannung auf, dies ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Einerseits weist die Phasentrennstelle der Unterlage unterschiedliche Spacer auf, andererseits hat der Luftspalt der Phasentrennstelle der Unterstäbe an manchen Stellen einen etwas geringeren Abstand, als die Oberstäbe. Des Weiteren sind in der Unterlage vier Generatorstäbe verbaut, wobei zwei davon parallel geschaltet wurden. Es erhöht sich somit die Kapazität, und dies führt wiederum bei konstanter Spannung zu einer Erhöhung der Ladungsmenge.

Die stärkere Feuchteabhängigkeit dieses Modells ergibt sich aus der stärker ausgeprägten Inhomogenität beziehungsweise Komplexität des Modells, da deutlich mehr Abstandshalter-

pakete eingebaut wurden. Auch die Bauform der Stäbe sowie die Unterschiede der einzelnen Spacer können Einfluss auf die festgestellte, ausgeprägte Feuchteabhängigkeit haben. Bild 3-43 und Bild 3-44 zeigen einen Vergleich der Konfiguration 1 und Konfiguration 2 mit dem Stab-Stab-Modell.

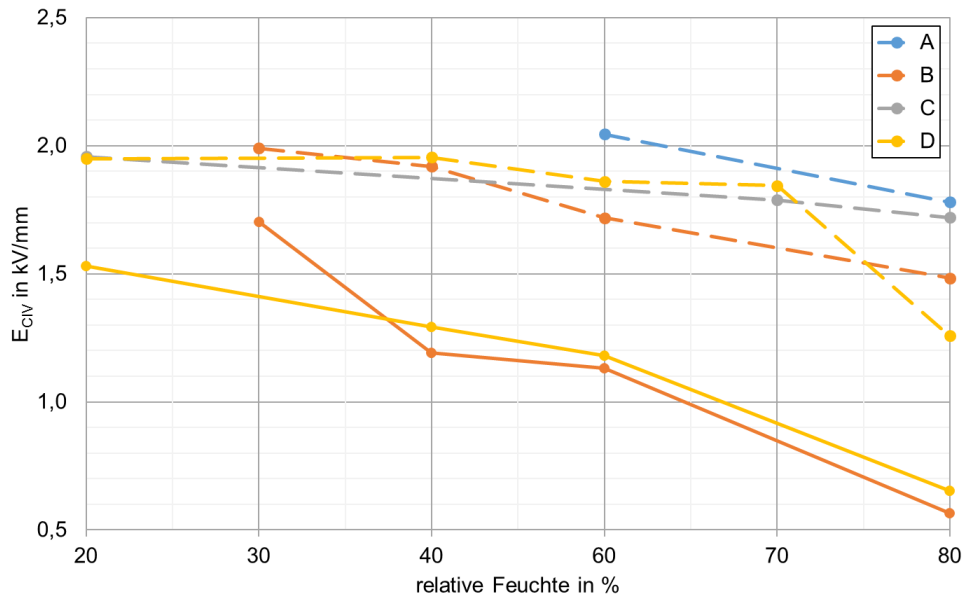


Bild 3-43: Vergleich der Koronaesatzfeldstärke E_{CIV} des Stab-Stab-Modells mit Spacer mit der Konfiguration 1 der Wickelkopfanordnung über der relativen Feuchte (Stab-Stab-Modell strichliert / Wickelkopfmodell durchgezogen) für verschiedene Temperaturen A - D

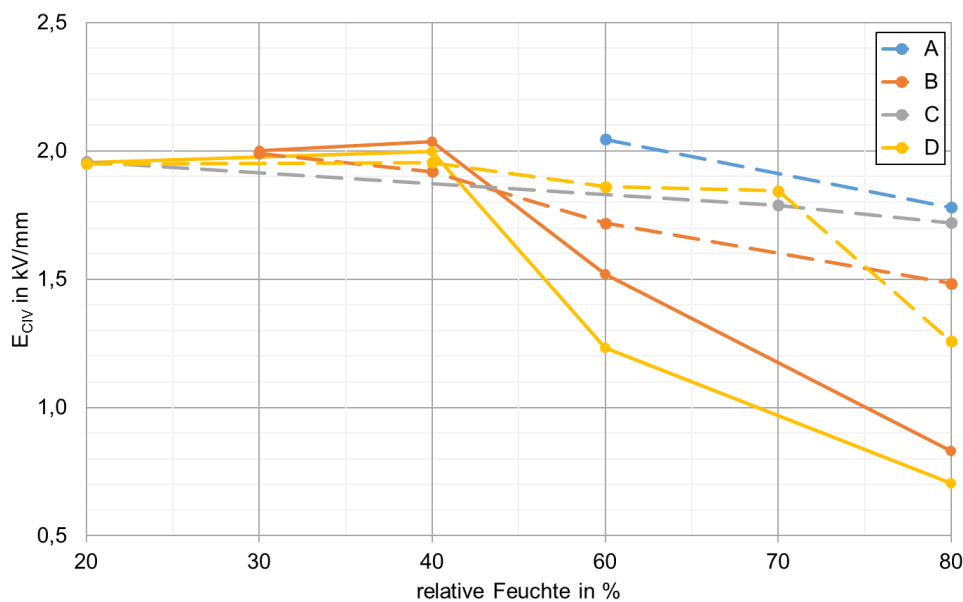


Bild 3-44: Vergleich der Koronaesatzfeldstärke E_{CIV} des Stab-Stab-Modells mit Spacer mit der Konfiguration 2 der Wickelkopfanordnung über der relativen Feuchte (Stab-Stab-Modell strichliert / Wickelkopfmodell durchgezogen) für verschiedene Temperaturen A - D

Die beiden Bilder (Bild 3-43 und Bild 3-44) verdeutlichen die zuvor beschriebenen Effekte. Die Konfiguration 2 des Wickelkopfmodells lässt sich sehr gut mit dem Stab-Stab-Modell vergleichen. Die Konfiguration 1 weicht auch schon in den Punkten niedriger Feuchte stark

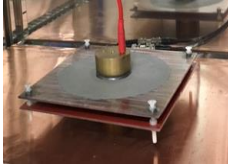
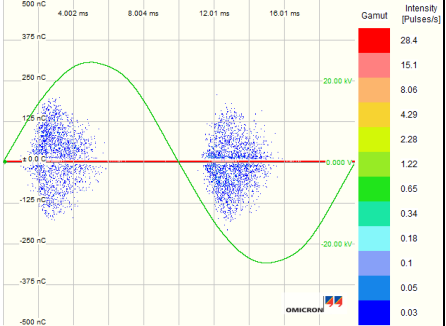
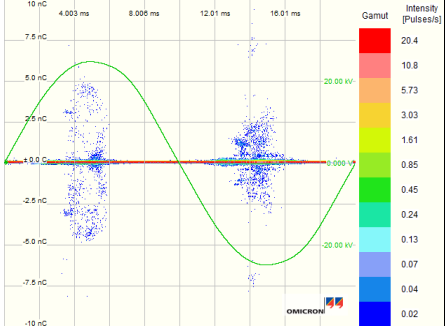
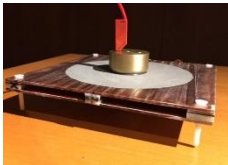
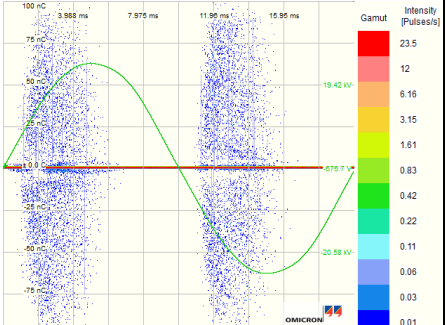
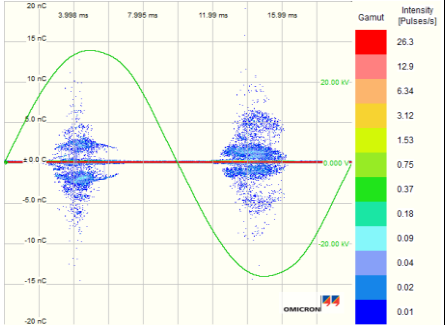

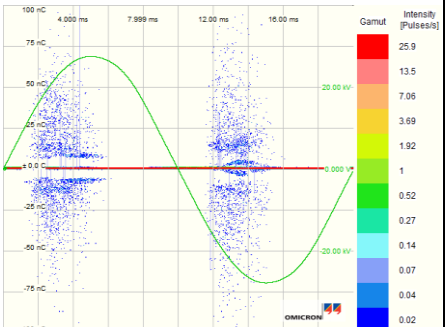
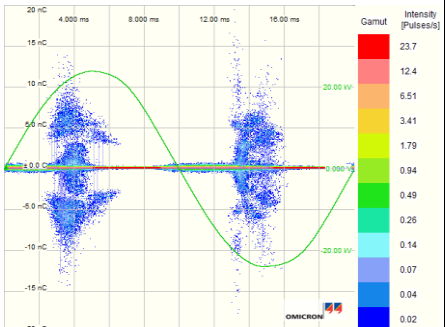
ab. Dies ist auf die oben erwähnten Gegebenheiten zurückzuführen. Um allerdings eine eindeutige Aussage über die gemessene Abweichung treffen zu können, müssen weitere Untersuchungen an diesem Modell beziehungsweise auch am Stab-Stab-Modell durchgeführt werden.


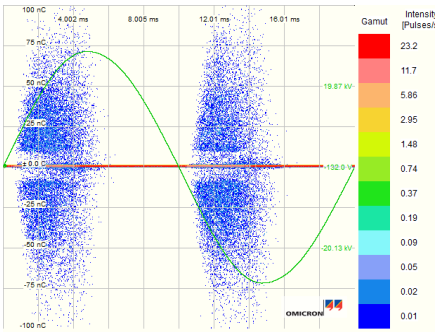
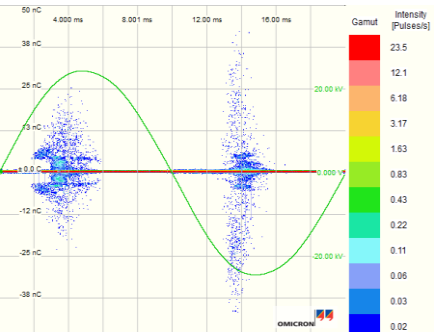
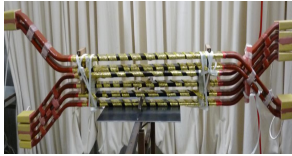
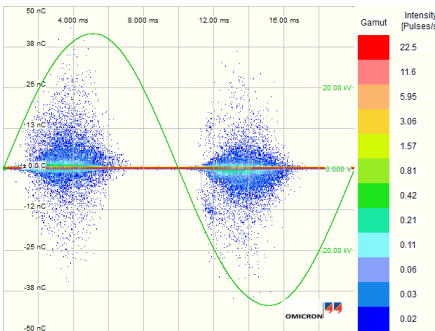
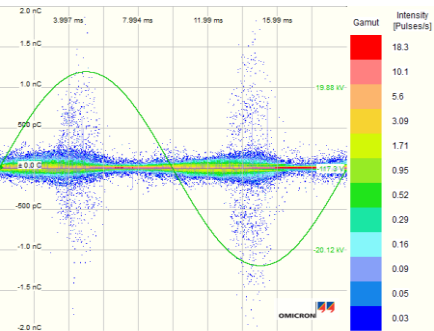
3.6.7 Auswertung der elektrischen Teilentladungsmessung

Die zweite und dritte Kernaussage der Literatur, dass die Teilentladungsintensität mit steigender Feuchte abnimmt und die Anzahl der Entladungsimpulse zunehmen, können mit folgender Auswertung der elektrischen Teilentladungsmessung nachgewiesen werden.

Tabelle 3-4 zeigt die Messergebnisse der elektrischen Teilentladungsmessung der einzelnen Modelle, jeweils gemessen bei 20 % relativer Luftfeuchte sowie 80 % relativer Luftfeuchte und Temperatur D.

Tabelle 3-4: Übersicht der PRPD-Pattern der einzelnen Modelle ausgewertet unter 20 % r.F. sowie 80 % r.F. für Temperatur D

Modell	Messergebnis bei 20 % r.F.	Messergebnis bei 80 % r.F.
 <p>d = 7,5 mm</p>	 <p>$Q_{IEC} = 143,3 \text{ nC} / U_{eff} = 17,4 \text{ kV}$</p>	 <p>$Q_{IEC} = 4,5 \text{ nC} / U_{eff} = 17,5 \text{ kV}$</p>
 <p>d = 7,3 mm</p>	 <p>$Q_{IEC} = 82,1 \text{ nC} / U_{eff} = 17,8 \text{ kV}$</p>	 <p>$Q_{IEC} = 7,4 \text{ nC} / U_{eff} = 19,8 \text{ kV}$</p>
 <p>d = 7,5 mm</p>	 <p>$Q_{IEC} = 75,6 \text{ nC} / U_{eff} = 19,6 \text{ kV}$</p>	 <p>$Q_{IEC} = 10,9 \text{ nC} / U_{eff} = 16,9 \text{ kV}$</p>

Modell	Messergebnis bei 20 % r.F.	Messergebnis bei 80 % r.F.
 <p data-bbox="300 542 454 577">$d = 7,5 \text{ mm}$</p>	 <p data-bbox="550 622 954 658">$Q_{IEC} = 73,9 \text{ nC} / U_{eff} = 20,2 \text{ kV}$</p>	 <p data-bbox="1010 622 1414 658">$Q_{IEC} = 25,3 \text{ nC} / U_{eff} = 17,3 \text{ kV}$</p>
 <p data-bbox="274 922 480 992">$d = 15,6 \text{ mm} /$ Konfiguration 4</p>	 <p data-bbox="550 1028 954 1064">$Q_{IEC} = 24,4 \text{ nC} / U_{eff} = 23,6 \text{ kV}$</p>	 <p data-bbox="1010 1028 1414 1064">$Q_{IEC} = 1,3 \text{ nC} / U_{eff} = 16,9 \text{ kV}$</p>

Anhand der Tabelle 3-4 wird deutlich, dass die Intensität der Entladungen bei hoher Feuchte erheblich abnimmt. Dies ist einerseits auf die Bindung freier Elektronen an die Wassermoleküle zurückzuführen und andererseits darauf, dass die Wassermoleküle die Photoionisation durch das Absorbieren bestrahlter Photonen limitieren. Die Tatsache, dass wenige freie Elektronen verfügbar sind, erhöht die elektrische Durchbruchfeldstärke. Dennoch sinkt die Teilentladungseinsetzspannung unter feuchter Luft, da sich die Isolierstoffeigenschaften verändern, beziehungsweise kommt es vor allem zu einer Veränderung der Feldverteilung. An Stellen wo sich Wassermoleküle anlagern, kommt es zu Feldverdrängungen. Es entstehen Feldüberhöhungen und in Folge dessen verfrühte Entladungen.

Die Tabelle 3-4 zeigt ebenfalls, dass ein weiterer Einfluss auf das Teilentladungsmuster durch den Einbau eines Abstandshalterpaketes abzuleiten ist.

Je nach Abstand der Isolierplatten beziehungsweise Stäbe sowie je nach Modell ist die Abhängigkeit der Feuchte auf die Teilentladungsintensität unterschiedlich stark ausgeprägt. Es kann jedoch festgestellt werden, dass mit Ausnahme der Entladungen des Wickelkopfmodells zwischen Oberlage und Unterlage ein Absinken der Entladungsamplitude um zumindest 65 % zu erwarten ist.

Wird nur die Temperatur ohne die relative Luftfeuchte betrachtet, ist beachtlich, dass ein Anstieg der Temperatur einen Anstieg der Teilentladungen zur Folge hat. Dies wird dadurch erklärt, dass die Elektronen bei höherer Temperatur eine höhere thermische Energie aufweisen und es somit zu einer effizienteren Ionisation und der Bildung einer größeren Anzahl an Startelektronen kommt [45].

Außerdem ist zu erkennen, dass sich bei erhöhter relativer Luftfeuchte eine leichte Verschiebung der Phasenlage der Entladungen ergibt. Diese Verschiebung ist deutlicher ausgeprägt, sobald sich eine Tropfenschicht ausbildet [46].

Die dritte Kernaussage der Literatur beschäftigt sich mit der Anzahl der Entladungsimpulse. Werden die einzelnen Teilentladungsmuster näher betrachtet, kann festgestellt werden, dass die Anzahl der Entladungsimpulse mit steigender Feuchte zunimmt.

Nachfolgende Tabelle 3-5 zeigt die Auswertung der Entladungsimpulse anhand des Stab-Stab-Modells mit einem Luftspaltabstand von $d = 15,6$ mm. Für die Auswertung der Entladungsimpulshäufigkeit wurde die Detektionsempfindlichkeit der Entladungen $\geq 0,1$ pC gewählt. Das bedeutet es kommt zu einer zusätzlichen Erfassung von Störimpulsen, wodurch eine verhältnismäßig hohe Anzahl an Entladungen pro Periode detektiert wird.

Tabelle 3-5: Amplitude der Entladungen (Q_{IEC}) sowie Anzahl der Entladungsimpulse anhand des Stab-Stab-Modells mit einem Luftspaltabstand von $d = 15,6$ mm

Temperatur/Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	45,5	466,1	466,1	297,0	297,0
A/80	37,7	1,2	21,2	328,2	302,6
B/30	44,7	282,4	282,4	295,4	295,4
B/40	44,3	320,7	320,7	296,2	296,2
B/60	42,2	0,9	334,2	326,0	297,0
B/80	36,2	0,8	99,8	327,6	296,4
C/20	44,1	261,1	261,1	294,6	294,6
C/80	33,7	0,6	45,6	310,2	300,2
D/20	42,7	242,1	242,1	293,6	333,6
D/40	38,8	67,8	67,8	297,4	297,4
D/60	37,3	0,5	155,4	295,8	313,0
D/80	33,9	0,5	24,5	330,2	298,4

Tabelle 3-5 zeigt sehr gut, dass die Anzahl der Entladungsimpulse bei hoher Luftfeuchte ansteigt, obwohl die Entladungsamplitude sinkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Oberflächenleitfähigkeit steigt und eine Vielzahl von kleinen Punktentladungen an der Oberfläche vorhanden sind. Es sinkt somit die Entladungsintensität und die Entladungsimpulshäufigkeit steigt an. Nach Steigern der Spannung bilden sich vereinzelt Entladungen höherer Intensität und die Impulshäufigkeit sinkt wieder ab.

Unter den gewählten Einstellungen ist dieses Phänomen für das Stab-Stab-Modell in allen Konfigurationen zu beobachten. Es konnte allerdings eine leichte Abweichung beim Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 5$ mm detektiert werden. Beim Platte-Platte-Modell kann der Effekt bei einem Abstand von $d = 10$ mm nachgewiesen werden. Für die anderen Abstände kommt es nicht bei allen gemessenen Temperaturen unter hoher Feuchte zu einem Ansteigen der Anzahl der Entladungsimpulse. Diese Abweichung zwischen dem Platte-Platte-Modell und dem Stab-Stab-Modell könnte auf die Oberflächenbeschaffenheit der beiden Anordnungen zurückgeführt werden. Die hydrophilere Staboberfläche fördert die Ausbildung eines Wasserfilms an der Isolierstoffoberfläche. Dies führt zu einer ausgeprägteren Reduktion der Teilentladungseinsetzspannung sowie zu einer drastischen Veränderung der Oberflächenleitfähigkeit. In weiterer Folge steigt somit auch die Anzahl der Entladungsimpulse stärker an, als beim Platte-Platte-Modell.

Beim Wickelkopfmodell kann der Effekt für Konfiguration 1 und Konfiguration 2 beobachtet werden. Leichte Abweichungen ergeben sich für die Konfiguration 3 dieses Modells.

Eine detaillierte Aufstellung aller Entladungsintensitäten sowie der Anzahl aller Entladungen anhand der gemessenen Modelle befindet sich im Anhang.

Aus den in obiger Tabelle 3-4 enthaltenen PRPD-Pattern kann auf die Art der Teilentladungen sowie deren Quellen geschlossen werden. Allerdings nimmt die Komplexität dieser Muster mit erhöhter Komplexität der Isolierstoffe zu und es kommt oft zu Überlagerungen verschiedener TE-Quellen, wodurch eine eindeutige Interpretation schwierig wird.

Die grundlegenden Kenngrößen eines solchen Entladungsmusters sind [2]:

- Phasenlage
- Polaritätseffekt
- Impuls-Häufigkeit und -Regelmäßigkeit
- Veränderung der Intensität mit zunehmender Spannung
- Verhältnis von Einsetz- zu Aussetzspannung

Generell kann festgehalten werden, dass es sich um innere Teilentladungen handelt, sofern die höchste Teilentladungsintensität im Spannungsnulldurchgang auftritt. Handelt es sich um äußere Teilentladungen, tritt die höchste Teilentladungsintensität im Spannungsmaximum auf [36].

Das Bild 2-17 aus Kapitel 2 zeigt ein typisches Teilentladungsmuster für Hohlraum- und Oberflächenentladungen ohne Elektrodenkontakt sowie Entladungen zwischen isolierten Leitern. Die Messanordnungen dieser Arbeit können sehr gut mit Entladungen zwischen isolierten Leitern verglichen werden.

Bild 3-45 stellt ein Teilentladungsmuster, aufgenommen bei der Messung der Platte-Platte-Anordnung mit einem Luftspalt von $d = 7,5$ mm, dar. Das PRPD-Pattern zeigt, dass es sich hierbei um die zuvor beschriebenen Entladungen zwischen isolierten Leitern handelt. Die Entladungen treten im Spannungsanstieg bis zum Spannungsmaximum auf. Bei dieser Anordnung sind keine Störeinflüsse beziehungsweise andere Teilentladungsquellen vorhanden.

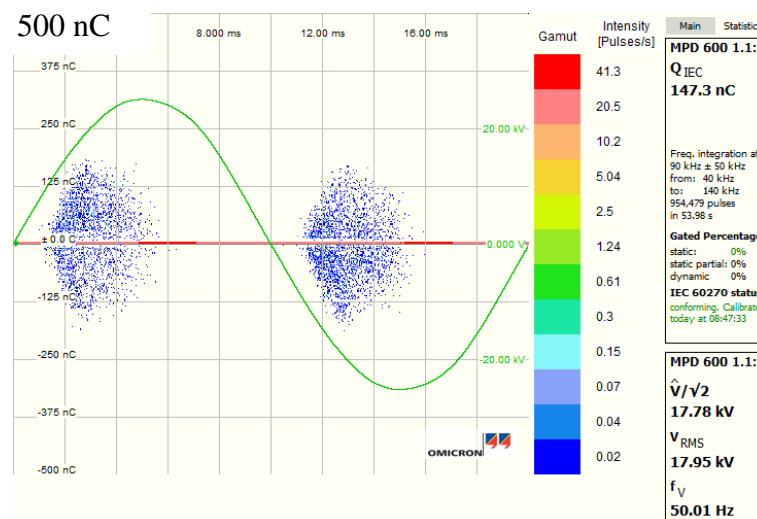


Bild 3-45: Teilentladungsmuster der Platte-Platte-Anordnung $d = 7,5$ mm aufgenommen bei 20 % r.F. und Temperatur C

Wird das Stab-Stab-Modell betrachtet, ist die Aussage über die vorliegenden TE-Quellen nicht mehr eindeutig zu treffen. Bild 3-46 zeigt das Teilentladungsmuster des Modells B1 mit einem Luftspalt von $d = 7,5$ mm aufgenommen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 20 %.

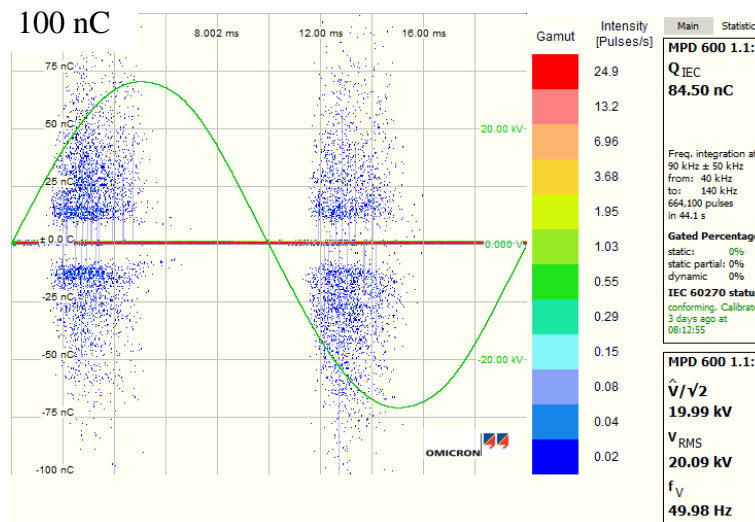


Bild 3-46: Teilentladungsmuster der Stab-Stab-Anordnung aufgenommen bei 20 % r.F. und Temperatur C

Nach wie vor ist die Phasenlage der Entladungen im Spannungsanstieg. Das bedeutet, auch hier kann wieder auf die TE-Quelle Entladungen zwischen isolierten Leitern geschlossen werden. Da es auch im Spannungsnulldurchgang zu keiner erhöhten TE-Intensität kommt, können innere Teilentladungen ausgeschlossen werden. Auch die bereits in Kapitel 2 beschriebenen TE-Muster gemäß [1, 7, 38] lassen auf die gleichen Aussagen über die erhaltenen Muster schließen.

Das Wickelkopfmodell stellt das komplexeste, vermessene Modell dar und birgt auch hinsichtlich der TE-Quellen eine Vielzahl von Möglichkeiten, die sich in den Mustern überlagern können. Es folgt eine Diskussion der einzelnen TE-Muster der Konfiguration 1-3, da in diesem Fall zumindest eine Einschränkung auf den betrachteten Bereich getroffen werden kann. Das PRPD-Pattern der Konfiguration 4 besteht aus der Überlagerung der Entladungen in der Unterlage, in der Oberlage sowie zwischen Oberlage und Unterlage.

Bild 3-47 beschreibt das Teilentladungsmuster der Konfiguration 1 des Wickelkopfmodells bei einer relativen Feuchte von 30 % und der Temperatur B.

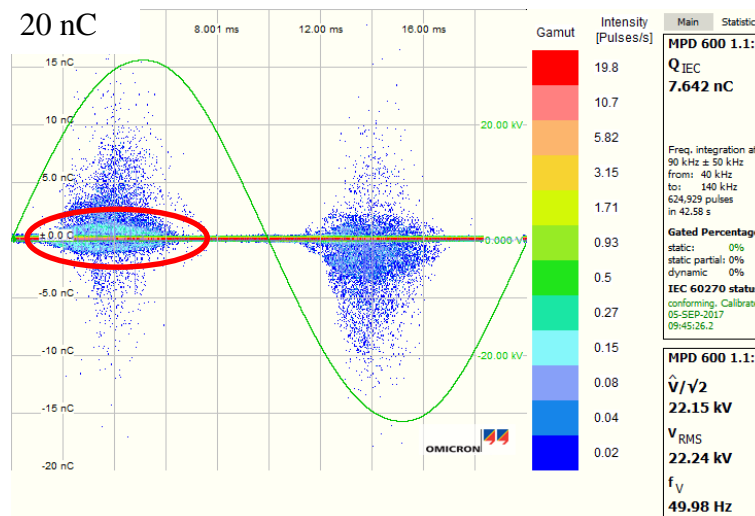


Bild 3-47: Teilentladungsmuster des Wickelkopfmodells Konfiguration 1 aufgenommen bei 30 % r.F. und Temperatur B

Bild 3-48 zeigt das Teilentladungsmuster der Konfiguration 2 des Wickelkopfmodells bei 30 % relativer Feuchte.

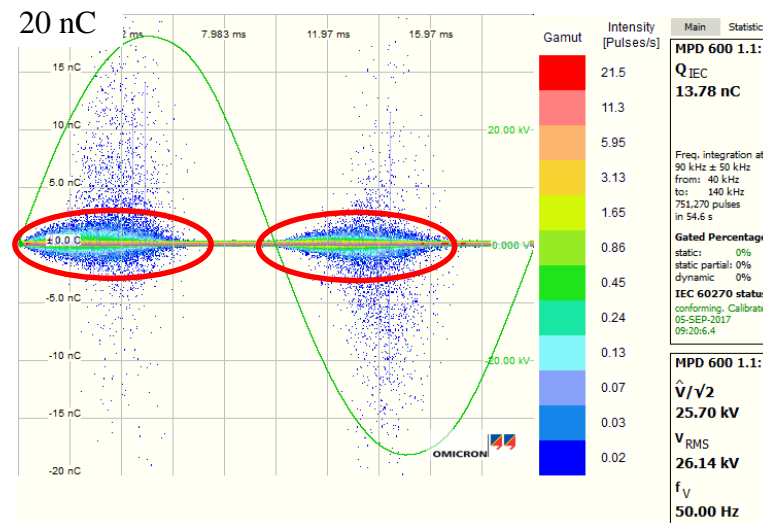


Bild 3-48: Teilentladungsmuster des Wickelkopfmodells Konfiguration 2 aufgenommen bei 30 % r.F. und Temperatur B

Konfiguration 1 und 2 zeigen ähnlich wie die beiden vorigen Modelle, dass die Entladungen zwischen Spannungsanstieg und Spannungsmaximum auftreten. Markant sind jeweils die rot eingekreisten Bereiche, die auf Stab-Stab-Entladungen zurückzuführen sind, wie schon in Bild 2-23 ersichtlich.

Das Entladungsmuster für die Konfiguration 3 (Bild 3-49) weicht deutlich von den bisher beschriebenen Mustern ab, da die Entladungen in den Spannungsnulldurchgang verschoben sind. Dies ist möglicherweise auf innere Entladungen oder ein Rauschen zurückzuführen. Einige Entladungen treten allerdings wieder zwischen Spannungsanstieg und Spannungsmaximum auf, wodurch eine Korrelation zu vorigen Modellen herstellbar ist.

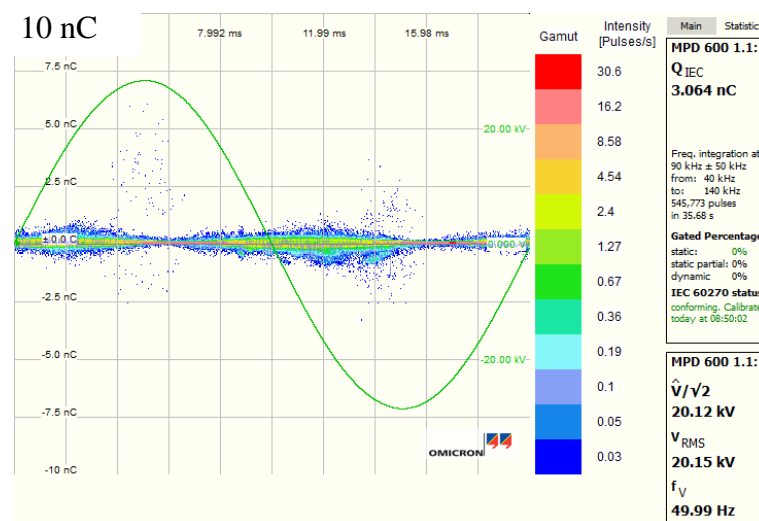


Bild 3-49: Teilentladungsmuster des Wickelkopfmodells Konfiguration 3 aufgenommen bei 30 % r.F. und Temperatur B

Schon in Tabelle 3-4 ist ersichtlich, dass sich das Teilentladungsmuster unter zunehmender Feuchte verändert. Die Teilentladungsintensität sinkt und es kommt zu vielen kleinen Teilentladungsimpulsen. Nachfolgende Phasenwinkelhistogramme (Bild 3-50) zeigen die Entladungsmuster für eine Platte-Platte-Anordnung mit einer dazwischenliegenden Isolierstoffbrücke, einmal mit einem einzelnen Tropfen an der Isolierstoffoberfläche und einmal mit einer kompletten Tropfenschicht befeuchtet.

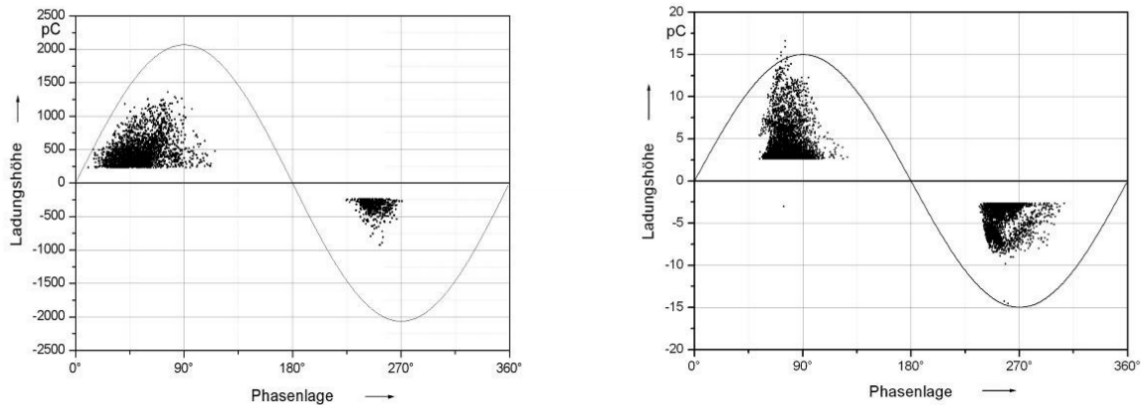


Bild 3-50: Phasenwinkelhistogramm für die Platte-Platte-Anordnung mit befeuchteter Isolierstoffbrücke bei Einsetzspannung. Links: Einzelner 30 µl-Tropfen (26,5 kV), Rechts: Tropfenschicht (13 kV) [46]

Es zeigt sich deutlich, dass sich die scheinbare Ladung sowie die Einsetzspannung in den beiden Fällen erheblich unterscheiden. Am Einzeltropfen entstehen die Teilentladungen erst bei einer Spannung von ca. 26,5 kV mit hohen scheinbaren Ladungen. Der feine Tropfenbelag führt hingegen zu einer Reduktion der Einsetzspannung und durch die „kleineren“ Entladungsgebiete zu niedrigen scheinbaren Ladungen. Die Phasenlage zeigt auch leichte Abweichungen zwischen der Anordnung mit Einzeltropfen und jener mit einer vollständigen Tropfenschicht und erinnert an Teilentladungen einer Spitze-Platte-Anordnung aber auch an Oberflächenentladungen [46].

Die Ergebnisse der Messungen dieser Arbeit sind mit jenen des feinen Tropfenbelags zu vergleichen. Durch die hohe Feuchtigkeit in der Luft bildet sich ein leitfähiger Wasserfilm an der Oberfläche aus, der in weiterer Folge auch zu einer Veränderung der Entladungserscheinungen führt, da sich auch die zur Verfügung stehenden Entladungsgebiete verkleinern.

3.6.8 Auswertung der optischen Teilentladungsdetektion

Die optische Teilentladungsdetektion wurde zur Ermittlung der Koronaeinsetzspannung und Koronaaussetzspannung herangezogen. Bei der elektrischen Teilentladungsmessung ist es nicht möglich eindeutig festzustellen, ab wann Entladungen im Luftspalt zwischen den Stäben auftreten. Es kommt schon vor der optischen Detektion zu Entladungen, die auf innere Teilentladungen zurückzuführen sind. Mit dem optischen Detektionsverfahren kann eindeutig bestimmt werden, wo die Entladungen auftreten und es kann somit sichergestellt werden, dass die Koronaein- und -aussetzspannungen exakt gemessen wurden. Auch in der Praxis wird dieses Verfahren sehr oft herangezogen, da kein aufwendiger Teilentladungsmessaufbau erfolgen muss.

Die Messreihe dieser Arbeit hat gezeigt, dass unter niedriger Luftfeuchtigkeit (20 % r.F. bis 40 % r.F.) ein sofortiges Einsetzen von stationären Entladungen, ab einem gewissen Spannungswert, zu erwarten ist. Unter hoher Luftfeuchtigkeit (60 % r.F. bis 80 % r.F.) treten verfrüht Punktentladungen an der Oberfläche des Isolierstoffes auf. Diese Punktentladungen entstehen durch die Wasseranlagerungen an der Oberfläche und der damit verbundenen Feldver-

drängung. Erst nach Steigern der Spannung können vereinzelt größere Entladungsimpulse detektiert werden.

Nachfolgende Bilder (Bild 3-51 bis Bild 3-59) zeigen die aufgenommenen Coronafinder-Bilder unter verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten am Beispiel des Stab-Stab-Modells mit und ohne Spacer mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm.

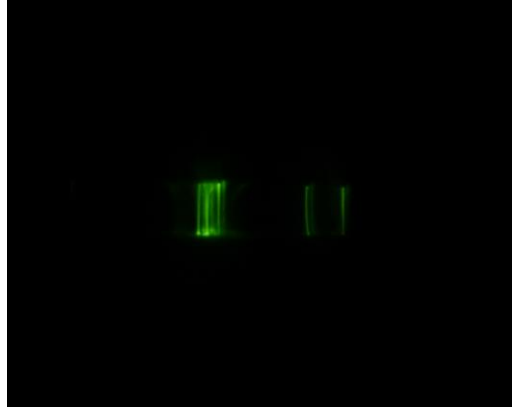


Bild 3-51: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 37,7$ kV) am Stab-Stab-Modell ohne Spacer für $d = 15,6$ mm bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % und Temperatur A

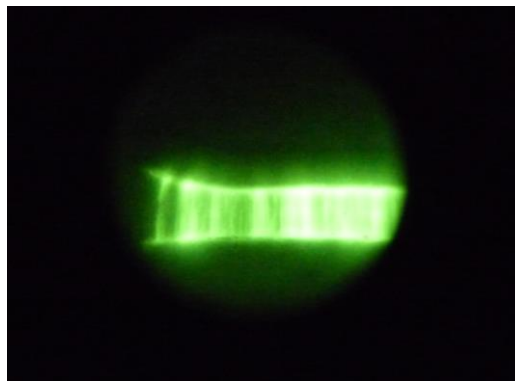


Bild 3-52: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 44,7$ kV) am Stab-Stab-Modell ohne Spacer für $d = 15,6$ mm bei einer relativen Luftfeuchte von 30 % und Temperatur B

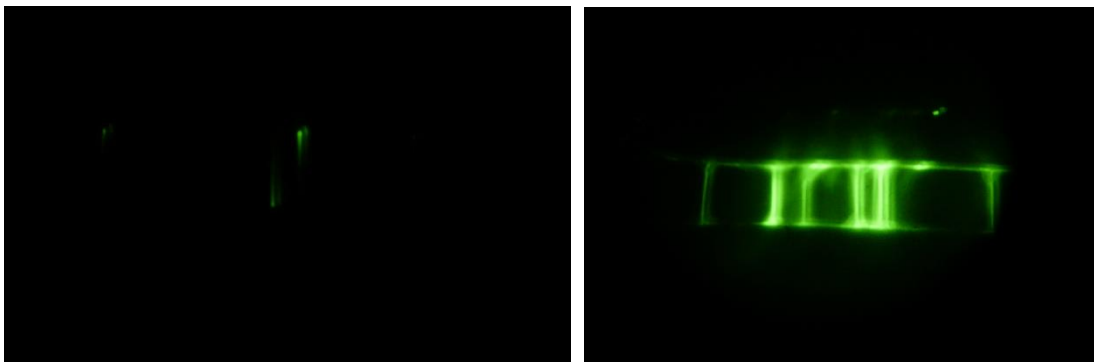


Bild 3-53: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 36,2$ kV links) sowie nach Erhöhung der Spannung ($\hat{U} = 39,8$ kV rechts) am Stab-Stab-Modell ohne Spacer für $d = 15,6$ mm bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % und Temperatur B

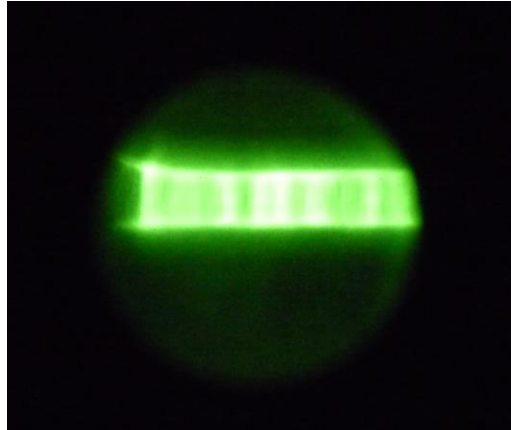


Bild 3-54: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 44,1 \text{ kV}$) am Stab-Stab-Modell ohne Spacer für $d = 15,6 \text{ mm}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % und Temperatur C

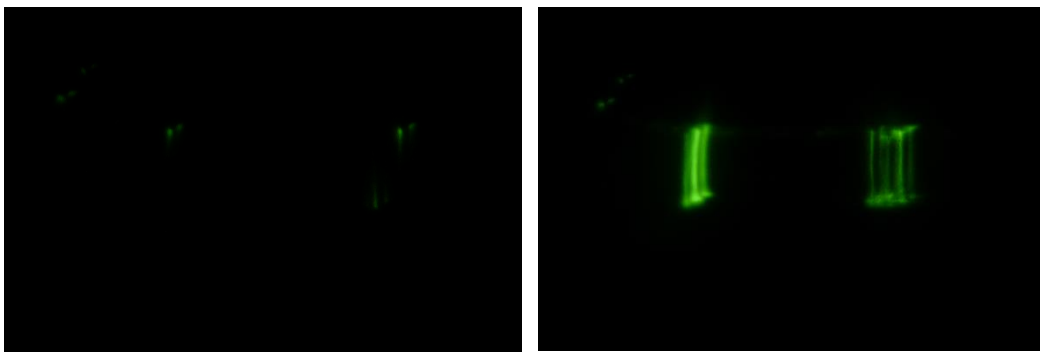


Bild 3-55: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 33,7 \text{ kV}$ links) sowie nach Erhöhung der Spannung ($\hat{U} = 37,1 \text{ kV}$ rechts) am Stab-Stab-Modell ohne Spacer für $d = 15,6 \text{ mm}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % und Temperatur C



Bild 3-56: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 42,7 \text{ kV}$) am Stab-Stab-Modell ohne Spacer für $d = 15,6 \text{ mm}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % und Temperatur D

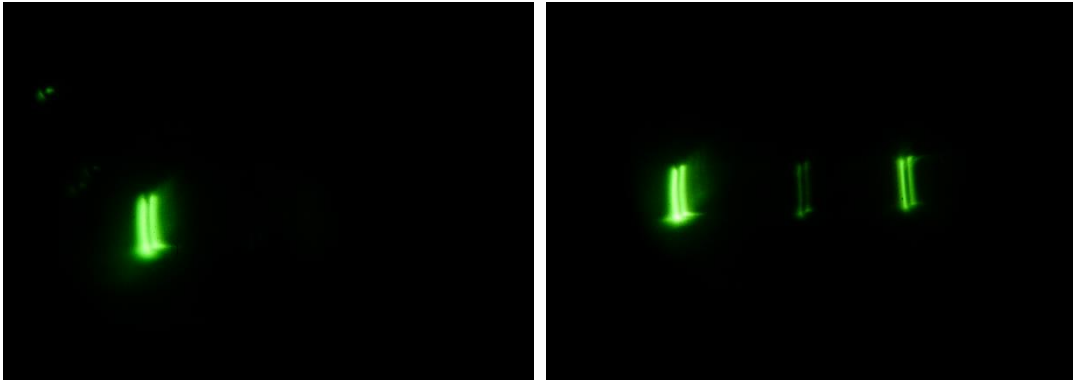


Bild 3-57: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 33,9 \text{ kV}$ links) sowie nach Erhöhung der Spannung ($\hat{U} = 37,3 \text{ kV}$ rechts) am Stab-Stab-Modell ohne Spacer für $d = 15,6 \text{ mm}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % und Temperatur D

Die Auswertung der Coronafinderaufnahmen am Stab-Stab-Modell ohne Spacer zeigt unter niedriger Luftfeuchte starke Entladungen. Der gesamte Luftspalt ist mit dichten Entladungsimpulsen ausgefüllt. Wie schon die Auswertung der elektrischen Teilentladungsmessung zeigte, kommt es bei Erreichen der Koronaeinsatzspannung zum Einsetzen dieser Entladungen mit hoher Intensität. Unter hoher Luftfeuchte treten anfangs vereinzelt Punktentladungen auf. Erst nach Erhöhen der Spannung können einzelne stärker ausgeprägte Entladungsimpulse gemessen werden.

Zum Vergleich dazu zeigen die nachfolgenden Bilder (Bild 3-58 und Bild 3-59) die Coronafinderaufnahmen des Stab-Stab-Modells mit Spacer und einem Abstand von $d = 15,6 \text{ mm}$, ausgewertet bei Temperatur B und 30 % r.F. sowie 80 % r.F.

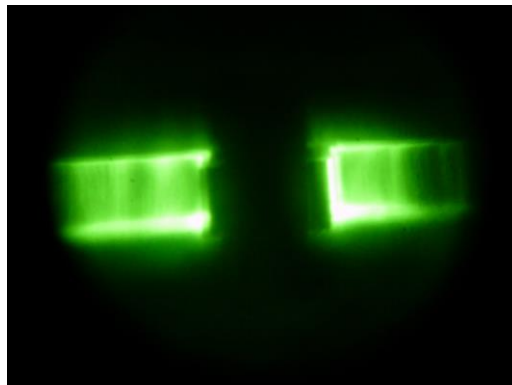


Bild 3-58: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{CIV} = 34,7 \text{ kV}$) am Stab-Stab-Modell mit Spacer für $d = 15,6 \text{ mm}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 30 % und Temperatur B

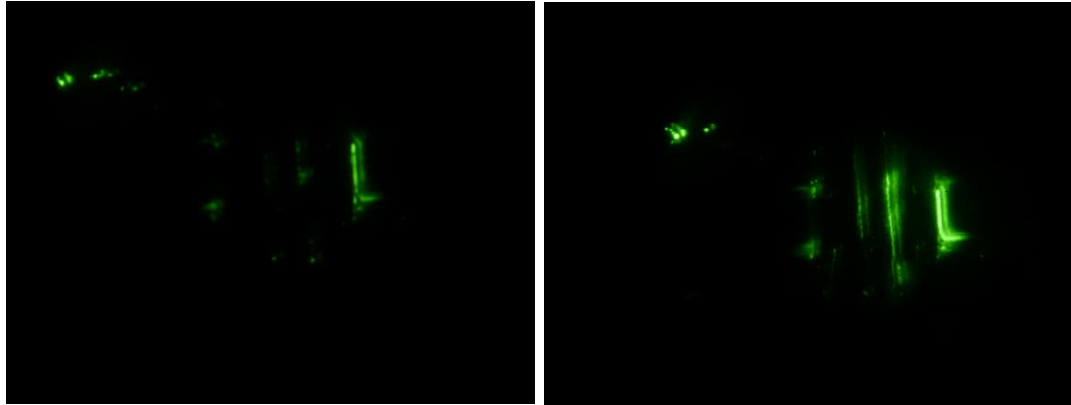


Bild 3-59: Coronafinderaufnahme bei Einsetzen der Entladungen ($\hat{U}_{\text{CIV}} = 25,8 \text{ kV}$ links) sowie nach Erhöhung der Spannung ($\hat{U} = 28,4 \text{ kV}$ rechts) am Stab-Stab-Modell mit Spacer für $d = 15,6 \text{ mm}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % und Temperatur B

Die Aufnahmen der Entladungen am Stab-Stab-Modell mit Spacer zeigen ein ähnliches Verhalten, wie die Bilder des Stab-Stab-Modells ohne Spacer. Bei niedriger Luftfeuchte kann ein sofortiges Einsetzen der Entladungen im Luftspaltbereich detektiert werden. Steigt die Luftfeuchtigkeit an, kommt es zu Punktentladungen vor allem im Kantenbereich des Spacers. Nach Erhöhen der Spannung können Oberflächenentladungen entlang der Spacerkontur festgestellt werden. Die Entladungen treten hauptsächlich im Nahbereich des Spacers auf.

Die Ergebnisse der optischen Teilentladungsdetektion des Stab-Stab-Modells ohne Spacer sowie mit Spacer sind sehr gut mit der elektrischen Teilentladungsmessung korrelierbar. Unter hoher Luftfeuchte kommt es zu einer Vielzahl von Entladungsimpulsen mit niedriger Intensität, im Gegensatz zu weniger stärker ausgeprägten Entladungsimpulsen unter niedriger Luftfeuchte. Somit finden sich auch die Kernaussagen der Literatur hier wieder.

3.6.9 Interpretation des Temperatur- und Feuchteinflusses

Eine erste Abschätzung, welche Auswirkungen das vorherrschende Klimat auf die Teilentladungseinsetzspannung hat, kann über die schon zuvor erwähnte Formel (9) getroffen werden.

$$U = \frac{U_n}{1 + \frac{k_n \cdot (11 - F)}{100 - k_n \cdot (11 - F)}} \quad (9)$$

Über diese Formel lässt sich ermitteln, um wieviel Prozent sich die Einsetzspannung bei Änderung der absoluten Feuchte verändert. Allerdings müssen dafür die Parameter U_n , die Einsetzspannung für die verwendete Anordnung bei normaler absoluter Feuchte, sowie der Korrekturfaktor k_n , der je nach Anordnung und Bauart unterschiedlich ist, bekannt sein. Für Spitzen- beziehungsweise Stabfunkenstrecken bewegt sich dieser Korrekturfaktor zwischen 1,0 und 1,6. Allerdings nimmt dieser Korrekturfaktor bei Spannungen unter 100 kV stetig ab und wird bei 30 kV null. Des Weiteren ist zu beachten, dass die normale absolute Feuchte international mit 11 g/m^3 festgelegt wurde, das entspricht ca. einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von 60 %.

Es wurde versucht, einen entsprechenden Korrekturfaktor, für die in dieser Arbeit untersuchten Anordnungen, zu finden. Durch eine geeignete Parametervariation ergeben sich für verschiedene Temperaturen unterschiedliche Korrekturfaktoren. Angewandt wurde diese Formel auf die Ergebnisse der Messungen am Modell B1, dem Stab-Stab-Modell mit und ohne

Spacer. Für die Modelle mit eingebautem Abstandhalterpaket verändern sich die Faktoren, da die Bauform beziehungsweise die Oberflächenbeschaffenheit von vorigen Modellen deutlich abweicht. Tabelle 3-6 fasst die gewählten Korrekturfaktoren für die einzelnen Modelle und Temperaturen zusammen.

Tabelle 3-6: Gewählte Korrekturfaktoren zur Abschätzung der Teilentladungseinsetzspannung

Modell	Temperatur	Korrekturfaktor
Modell B1	A	-1,50
	B	-2,50
	C	-1,50
	D	-0,80
Modell B1 mit Spacer	A	-1,25
	B	-2,50
	C	-1,25
	D	-0,25

Mit dieser Abschätzung kann für 95 % der Messwerte eine Genauigkeit von +/- 18 % erreicht werden.

Tabelle 3-7 und Bild 3-60 beinhalten den Vergleich zwischen Messergebnissen und Berechnungsergebnissen anhand des Stab-Stab-Modells ohne Spacer.

Tabelle 3-7: Gegenüberstellung der Messwerte und Berechnungsergebnisse

Temperatur/Feuchte-Punkt	CIV gemessen [kV]	CIV berechnet [kV]
A/60	45,45	45,61
A/80	37,67	44,40
B/30	44,70	45,86
B/40	44,32	44,78
B/60	42,19	42,57
B/80	36,20	40,42
C/20	44,14	45,29
C/70	-	35,73
C/80	33,69	33,77
D/20	42,65	42,70
D/40	38,76	36,24
D/60	37,34	29,79
D/70	-	26,56
D/80	33,87	23,33

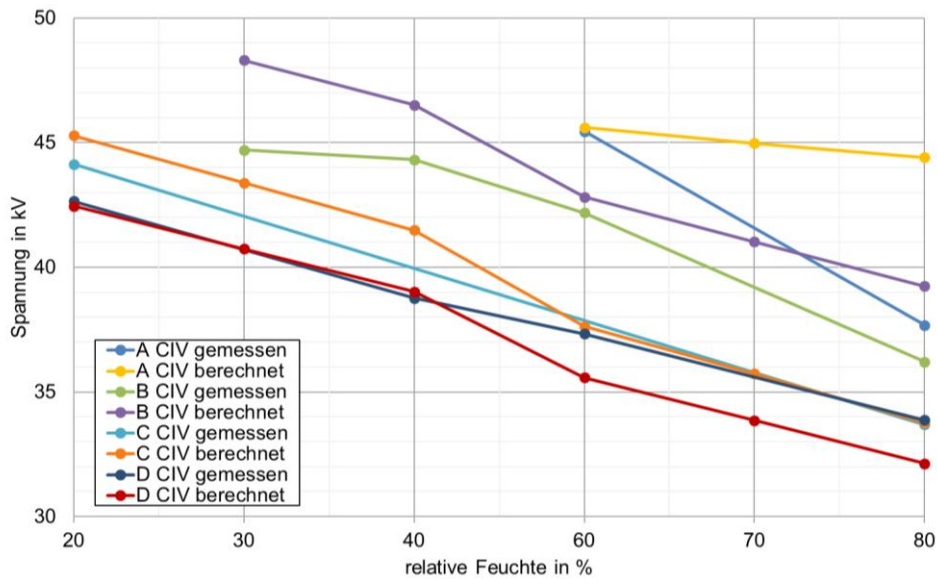


Bild 3-60: Vergleich der Messergebnisse und Berechnungsergebnisse anhand des Stab-Stab-Modells ohne Spacer mit Abstand $d = 15,6$ mm

3.6.10 Anwendbarkeit des Paschengesetzes

Zur Feststellung der Anwendbarkeit des Paschengesetzes auf die vorliegenden Anordnungen wurden Messungen bei Raumtemperatur und dementsprechend niedriger Luftfeuchtigkeit am Prüfling A1 durchgeführt. Das Paschengesetz gilt prinzipiell nur für Anordnungen mit Luftspalt und nicht für eine Elektrodenanordnung mit Isolierschicht und Luftspalt, wie sie im Wickelkopf eines Generators vorkommt. Daher ist besonders zu beachten, dass für einen Vergleich der Messwerte mit dem Paschengesetz eine Umrechnung der anliegenden Spannung in jene welche direkt am Luftspalt der Anordnung abfällt, erfolgen muss. Die Umrechnung ist anhand der Formeln (4), (5) und (6) aus Kapitel 2 durchzuführen.

Die auf den Luftspalt bezogenen Messergebnisse wurden schließlich noch auf Scheitelwerte umgerechnet, da die Werte der Paschenkurve ebenfalls Scheitelwerte darstellen. Des Weiteren musste die Paschenkurve noch auf den während der Messung vorherrschenden Temperaturwert von $22,6$ °C bezogen werden. Der Vergleich beider Kurven zeigt, dass es eine vernachlässigbare Abweichung in einigen Messpunkten gibt, die durchaus auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind. Bild 3-61 veranschaulicht den Vergleich der gemessenen Werte mit der Paschenkurve.

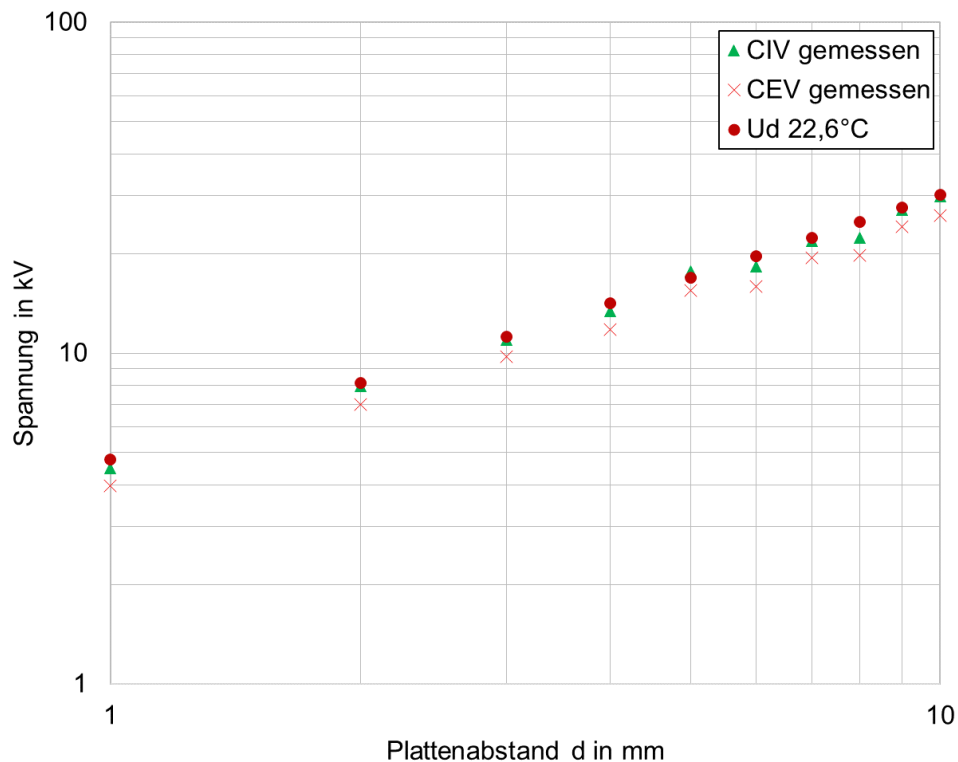


Bild 3-61: Gemessene Werte am Prüfling A1 verglichen mit der Paschenkurve

Die Messung verdeutlicht, dass nach Umrechnung der gemessenen Spannungswerte auf den Luftspalt der Anordnung ein sehr guter Vergleich zwischen den Messergebnissen und der Paschenkurve hergestellt werden kann. Die Kernaussage dieser Untersuchung liegt darin, dass das Paschengesetz als erste Näherung für eine Abschätzung der Teilentladungseinsetzspannung herangezogen werden kann. Allerdings ist daraus keine Aussage über den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Teilentladungseinsetzspannung abzuleiten [4, 34].

3.7 Diskussion

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es bei jedem getesteten Modell zu einem Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung unter hoher Feuchte kommt. Jedoch ist der Feuchteinfluss, wie vorige Auswertungsdiagramme zeigen, je nach Modell unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die homogene Isolierstoffoberfläche der Platte-Platte-Anordnung zeigt einen geringeren Feuchteinfluss als die Stabisolierung, die durch ihre gewickelte Form inhomogener ist.

Ein guter Vergleich kann zwischen Platte-Platte-Modell mit Spacer und Stab-Stab-Modell ohne Spacer erstellt werden. Der Einbau des Abstandshalterpaketes stellt eine zusätzliche Inhomogenität für das Platte-Platte-Modell dar und ist somit ähnlich dem komplexeren Stab-Stab-Modell ohne Spacer.

Der Einbau eines Abstandshalterpaketes in das Stab-Stab-Modell mit $d = 15,6$ mm senkt die Koronaein- und -aussetzspannung zusätzlich in allen gemessenen Punkten ab. Nicht so stark ausgeprägt ist dieses Phänomen für das Modell mit einem Luftspalt von $d = 7,5$ mm. Das heißt, es existieren geringe Unterschiede der Modelle in den unterschiedlichen Luftspaltabständen. Besonders deutlich wird dies bei jenem Modell mit $d = 5$ mm. Auf Grund des sehr kleinen Abstandes ist der Feuchteinfluss noch deutlicher ausgeprägt. Dies sollte für Entscheidungen über das Abstandsdesign der Maschinen in jedem Fall mitberücksichtigt werden.

Bild 3-62 zeigt, welche Temperatur/Feuchte-Bereiche als kritisch, weniger kritisch sowie unbedenklich anzusehen sind. Somit lässt sich eine erste Aussage darüber treffen, wie die klima-

tischen Bedingungen am Endaufstellungsort aussehen sollten, um keinen verfrühten Teilentladungseinsatz, ausgelöst durch zu hohe Luftfeuchtigkeiten, zu erhalten. Für dieses Diagramm wurden die Ergebnisse des Stab-Stab-Modells ausgewählt, da diese dem realen Wickelkopf einer Maschine ähnlich sind und mehrere Messpunkte enthalten als das Wickelkopfmodell.

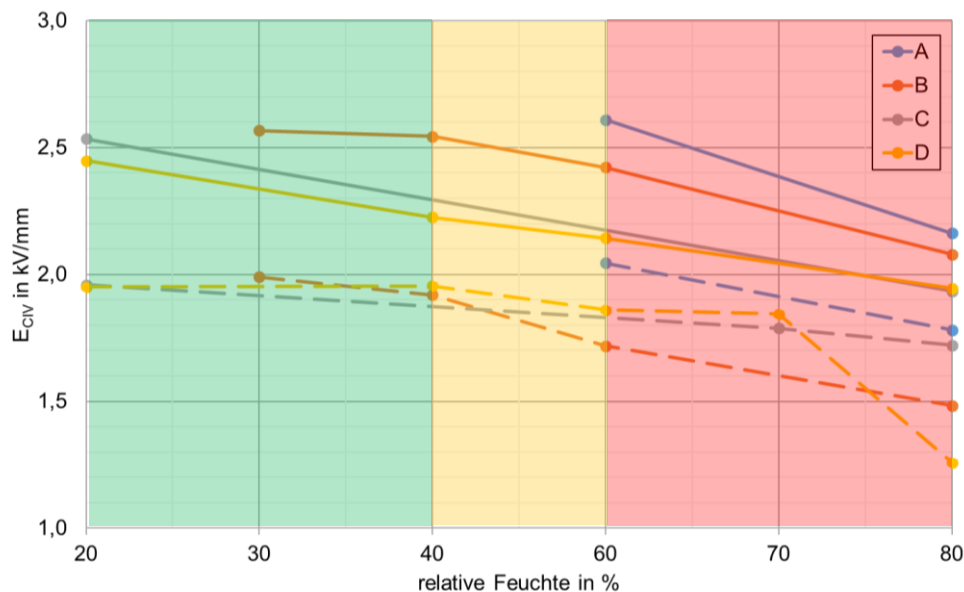


Bild 3-62: Kritische Temperatur/Feuchte-Bereiche anhand des Stab-Stab-Modells ohne Spacer (durchgezogen) und mit Spacer (strichliert) $d = 15,6$ mm

Die Auswertungsdiagramme aller Modelle verdeutlichen, dass die Temperatur nachrangig zu betrachten ist, da das erhebliche Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung durch die Luftfeuchtigkeit ausgelöst wird. Allerdings kommt es zu einem stärkeren Absinken der Koronaein- und aussetzspannung bei höheren Temperaturen für nahezu alle Modelle.

Das Wickelkopfmodell stellt die komplexeste Anordnung dieser Arbeit dar und die Ergebnisse sollten, auf Grund der verwendeten Stäbe, dem Teilentladungseinsatz im Wickelkopf einer Maschine am nächsten kommen. Dieses Modell weist den höchsten Feuchteinfluss auf. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % kommt es zu einem Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung von rund 50 % gegenüber den Messwerten bei niedriger Luftfeuchtigkeit. Dieses Ergebnis bestätigt, dass unter solchen Bedingungen eine Abnahmeprüfung keinesfalls durchgeführt werden sollte, beziehungsweise, dass andere Maßnahmen, die die Einsatzspannung unter feuchter Luft erhöhen, zur Anwendung kommen müssen.

Die Modelle sind bei hoher Luftfeuchtigkeit sehr sensitiv und schon kleinste Unebenheiten, Inhomogenitäten, Tripelpunkte etc. fördern das Auftreten von Entladungen. Es lagert sich Wasser an die Isolierstoffoberfläche an und es entstehen leitfähige Bereiche beziehungsweise sogar eine leitfähige Schicht. Das bedeutet, es ändert sich die elektrische Feldverteilung und es kommt zu Feldverdrängungen aus den leitfähigen Bereichen und somit zu Feldstärkeüberhöhungen am Rande der Wasseranlagerungen. Entstehen nicht einzelne Wassertropfen sondern eine Wasserschicht, so verringert sich der Abstand zwischen den einzelnen Tröpfchen und es kommt zu einer weiteren Erhöhung der Feldstärke, welche noch stärker ausgeprägt ist je flacher die Tropfen sind [31]. Diese Feldstärkeüberhöhungen fördern nun den Teilentladungseinsatz und es kommt zu einem Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung.

Des Weiteren kommt es zu einem erheblichen Absinken der Teilentladungsintensität unter feuchter Luft. Die detaillierte Auswertung der PRPD-Pattern zeigt, dass für nahezu alle Modelle ein Absinken der Entladungen um rund 65 % zu erwarten ist. Ein Grund für das Absinken der Teilentladungsintensität und die Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit von Luft unter

hoher Luftfeuchtigkeit ist die Anlagerung freier Elektronen an Wassermoleküle sowie die Anlagerung ganzer Wassermoleküle an Sauerstoffionen. Es entstehen somit große negativ geladene Ionen, die nicht bewegungsfreundlich sind. Außerdem nimmt Wasserdampf UV-Strahlung auf und die Photoionisation wird limitiert. Das bedeutet, die Wahrscheinlichkeit, freie Elektronen zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Bildung eines Streamers zu finden, ist sehr gering beziehungsweise höhere Feldstärken sind nötig, um einen Streamer auszubilden. Auch die Teilentladungsmuster verändern sich unter feuchter Luft drastisch. Es darf bei diesen Betrachtungen nicht außer Acht gelassen werden, dass sich der Oberflächenwiderstand sowie die Leitfähigkeit der Isolierstoffoberfläche unter feuchter Luft verändern. Der erhöhte Wasserdampfgehalt in Luft führt dazu, dass sich Wassermoleküle an der Isolierstoffoberfläche anlagern. Auf Grund der erhöhten Leitfähigkeit sind die Ladungen an der Oberfläche nun sehr beweglich, so dass sie sich über die gesamte Isolierstoffoberfläche verteilen. Dies führt zu vielen kleinen Entladungsimpulsen auf der gesamten Oberfläche, im Gegensatz zu einigen großen Entladungserscheinungen unter niedriger Luftfeuchtigkeit. Dies erklärt auch die veränderten Teilentladungsmuster. Es ist deutlich zu erkennen, dass unter feuchter Luft die Teilentladungsintensität einerseits vermindert wird, andererseits tritt aber auch eine erhöhte Anzahl an Entladungsimpulsen auf.

Auch andere Bereiche, wie zum Beispiel die Elektronikindustrie, nutzen das Phänomen, dass Entladungen unter hoher Feuchte sinken. Für die Leiterplattenproduktion sind definierte Bedingungen ohne statische Aufladungen besonders relevant, um Beschädigungen der Platinen während der Produktion vorzubeugen. Bekannt unter dem Begriff ESD-Schutz (Electro Static Discharge) wird durch Erhöhung der Luftfeuchtigkeit versucht, elektrostatische Aufladungen zu vermeiden.

Tabelle 3-8 zeigt, dass sich in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit unterschiedliche Werte für die elektrostatische Spannung ergeben.

Tabelle 3-8: Typische Werte von elektrostatischen Spannungen [47]

Quelle	10 % bis 20 % Luftfeuchte	65 % bis 90 % Luftfeuchte
Gehen auf Teppich	35.000 Volt	1.500 Volt
Gehen auf Kunststoffboden	12.000 Volt	250 Volt
Arbeiten an Arbeitstisch	6.000 Volt	100 Volt
Vinylhüllen (Arbeitsanweisungen)	7.000 Volt	600 Volt
Plastiktüte (vom Arbeitstisch aufgehoben)	20.000 Volt	1.200 Volt
Arbeitsstuhl mit Schaumstoffkissen	18.000 Volt	1.500 Volt

Unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von rund 50 % - 55 % lagern sich, wie schon zuvor beschrieben, Wassermoleküle an Ionen an, wodurch diese schwerer und unbeweglicher sind. Die Anzahl freier Elektronen beziehungsweise Ladungen sinkt. Auf Grund des entstandenen Wasserfilms an der Materialoberfläche kommt es nicht zu gefährlichen Ansammlungen von Ladungen an der Oberfläche. Darüber hinaus wird die Staubanziehungskraft sowie die Partikelablagerung an der Oberfläche reduziert [48].

Zusätzlich zu den Messergebnissen wurde mit Hilfe einer Formel aus der Literatur eine Abschätzung der Koronaein- und -aussetzspannung durchgeführt. Hierfür musste ein Korrektur-

turfaktor gewählt werden, der eine genaue Abschätzung unter allen klimatischen Bedingungen ermöglicht. Die Formel bietet einen ersten Anhaltspunkt bezüglich der Teilentladungseinsetzspannung unter kritischen klimatischen Bedingungen. Für die Verwendung dieser Formel, beziehungsweise des Korrekturfaktors für den realen Wickelkopf, muss jedoch eine Optimierung erfolgen. Die Versuche dieser Arbeit geben keine Garantie darüber, dass das Verhalten des realen Wickelkopfes ident mit den Ergebnissen des Modells B2 ist. Unterschiedliche Kapazitätsverhältnisse, verschiedene Abstandshalterpakete, die Oberflächenbeschaffenheit des Isolierstoffes etc. beeinflussen das Teilentladungsverhalten erheblich. Hierfür müssten Messwerte aus der Praxis mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden. Ausgehend davon, kann die verwendete Formel, beziehungsweise vor allem der Korrekturfaktor, welcher die Bauform, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die aktuelle Temperatur berücksichtigt, optimiert werden. Dennoch stellen die Berechnungsergebnisse eine erste Abschätzung bezüglich der Teilentladungseinsetzspannung dar. Mit einer geeigneten Weiterentwicklung des Korrekturfaktors für den realen Wickelkopf kann es, ausgehend davon, zu einer Ermittlung von individuellen kritischen Bereichen für jede Maschine kommen.

4 Finite-Elemente-Simulationen

4.1 Methode der Finiten Elemente

Bei der Methode der Finiten Elemente wird die zu untersuchende Geometrie mit einem Gitternetz überzogen. Die Gitterweite kann örtlich unterschiedlich gewählt werden, zum Beispiel in besonders feldstarken Bereichen muss ein sehr feines Gitter vorliegen und in feldschwächeren Gebieten kann ein gröberes Netz zur Anwendung kommen. Die Berechnung der Potentiale erfolgt jeweils in den Knotenpunkten des gewählten Rasters. Es ist ein guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand zu finden [3].

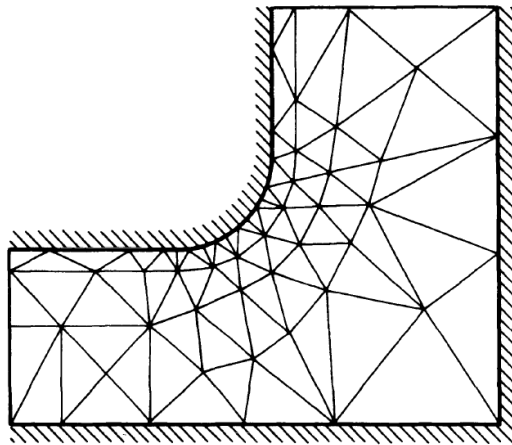


Bild 4-1: Gitternetz zur Berechnung des elektrischen Feldes mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode [3]

Dieses Berechnungsverfahren geht davon aus, dass sich ein elektrostatisches Feld immer mit einem minimal kleinen Energieinhalt ausbildet. Jedes Dreieck im Gitternetz repräsentiert ein Volumen. Mit $\mathcal{E} = \epsilon_0 \epsilon_r$ ist die in einem Dreiecksvolumen gespeicherte Energie gegeben durch:

$$W = \frac{\epsilon}{2} \int_V E^2 dV \quad (12)$$

Die Potentialverteilung innerhalb jeden Dreiecks muss durch eine Potentialgleichung $\varphi = f(x,y)$ angenähert werden, wobei sich als einfachste Form die lineare Gleichung

$$\varphi = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (13)$$

ergibt.

Wird die Gleichung auf alle Eckpunkte des Dreiecks angewandt, ergibt sich ein Gleichungssystem aus dem die Bestimmung der Koeffizienten a_0 , a_1 und a_2 erfolgt. Mit $\delta\varphi / \delta x = a_1$ und $\delta\varphi / \delta y = a_2$ ist der Betrag der Feldstärke $E = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ innerhalb eines jeden Dreiecks konstant. Daraus wird deutlich, dass in Bereichen mit großen Feldstärkegradienten die Dreiecksfläche klein gehalten werden soll [3].

4.2 FEM-Modelle

4.2.1 Modellbildung

Es wurden sechs Modelle entwickelt, die in vereinfachter Form die Materialverhältnisse im Wickelkopfbereich elektrischer Maschinen nachbilden. Die Modelle wurden so konzipiert, dass unterschiedliche Geometrie- und Materialverhältnisse vorliegen, um Aussagen bezüglich der unterschiedlichen Anordnungen treffen zu können.

Die Kupferelektroden werden in den nachfolgenden Modellen in orange dargestellt, die Isolierung in blau, das Vlies gelb und der HGW-Spacer (Hartgewebe-Spacer) grün.

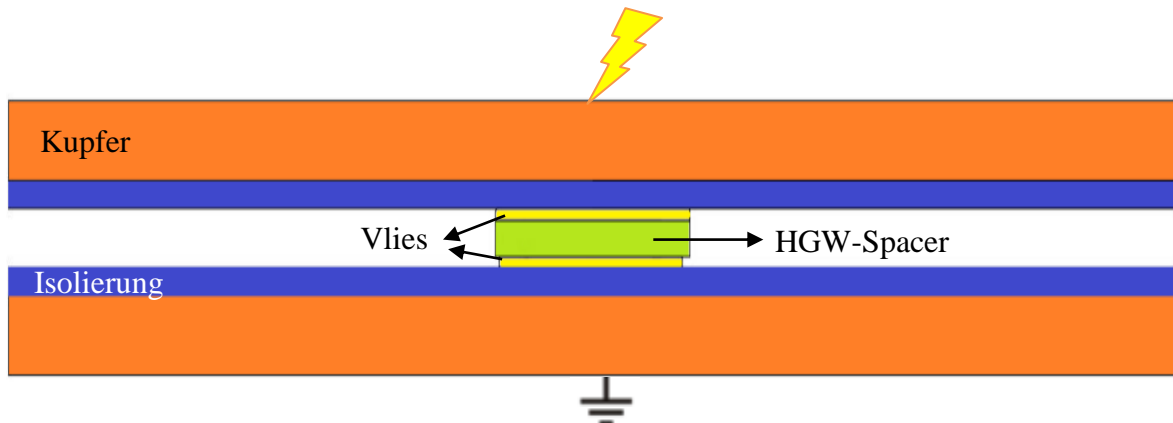


Bild 4-2: Allgemeines Modell

Alle Berechnungen werden mit der Software ElecNet (Version 7.5) durchgeführt. ElecNet ist ein 2D/3D-Feldberechnungsprogramm, basierend auf der Finiten-Elemente-Methode. Das Programm löst statische, AC (zeitharmonische) und transiente elektrische Felder sowie Strömungsfeldprobleme. Für alle verwendeten Modelle wurde das statische elektrische Feld berechnet [49].

Die nachfolgende Tabelle 4-1 beinhaltet die verwendeten Werte der Dielektrizitätszahlen gültig für eine Temperatur von 50 °C, welche mit Hilfe einer Messung an den realen Wickelkopfkomponenten bestimmt wurden.

Tabelle 4-1: Dielektrizitätszahlen der verschiedenen Materialien gültig für eine Temperatur von 50 °C

Material	Dielektrizitätszahl
Isolation	3,75
Vlies	3,3
HGW-Spacer	5,2
Stützschlauch	3,8 / 11,7
Füllung Stützschlauch	4,5

Die Maßangaben aller Modelle beziehen sich auf Millimeter.

4.2.2 Modell 1

Die erste Anordnung ist ein Orientierungsmodell und stellt die einfachste Konfiguration dar. Sie besteht aus einer Elektrode auf Hochspannungspotential und einer geerdeten Elektrode umgeben von Isolationsmaterial und einem Luftspalt dazwischen. Diese Anordnung ähnelt dem Prüfling A beziehungsweise B1 ohne Spacer aus den messtechnischen Untersuchungen.

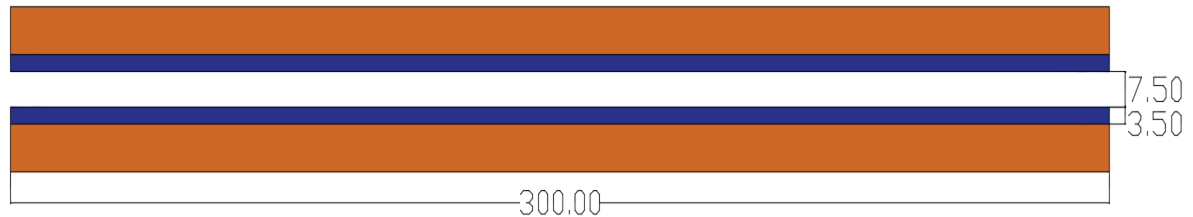


Bild 4-3: Aufbau Modell 1

4.2.3 Modell 2 und Modell 3

Modell 2 und 3 bilden das Modell A und Modell B1 mit Spacer der messtechnischen Untersuchungen nach. In dieser Anordnung wird ein Hartgewebe-Spacer, ummantelt mit einer Vlies-schicht, eingefügt. Die beiden Modelle sollen Aufschluss darüber geben, welche Auswirkungen eine nicht vollständige Ummantelung des Spacers mit Vlies hat. Die Vlies-schicht ist in Modell 2 an der unteren Seite des Spacers rechts 2 mm eingerückt und links 1 mm. Das Modell 3 weist an der oberen und unteren Seite des Spacers eine Vlieseinrückung auf. Wieder wird das Vlies rechts 2 mm und links 1 mm eingerückt. Modell 2 sowie Modell 3 wurden jeweils mit zwei verschiedenen Vliesdicken berechnet. Modell 2 besitzt in der ersten Konfiguration eine Vliesdicke von 0,25 mm. Die Kanten wurden abgerundet ausgeführt und haben in diesem Fall einen Radius von 0,1 mm. Die zweite Konfiguration beinhaltet eine Vliesdicke von 1,5 mm mit abgerundeten Kanten, deren Radius 0,3 mm ist.

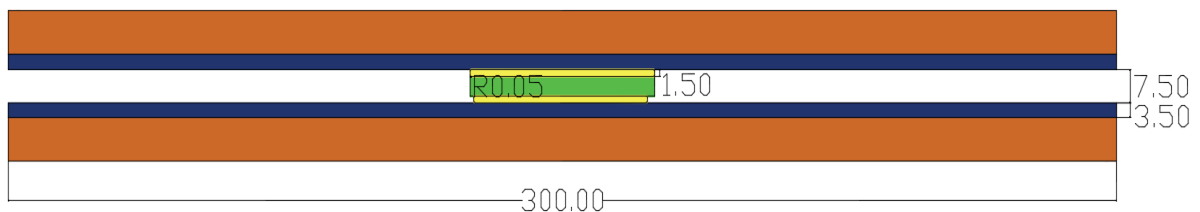


Bild 4-4: Aufbau Modell 2 in Konfiguration 2

Das dritte Modell weist in der ersten Konfiguration eine Vliesdicke von 0,5 mm auf, mit abgerundeten Kanten und einem Radius von 0,1 mm. Die zweite Konfiguration besteht aus einer Vlies-schicht mit einer Dicke von 1 mm und die abgerundeten Kanten weisen einen Radius von 0,3 mm auf.

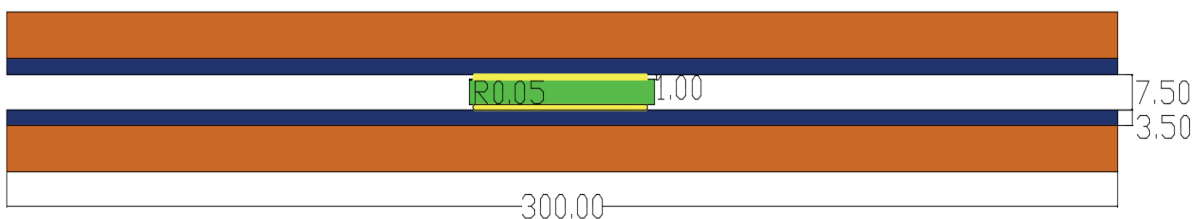


Bild 4-5: Aufbau Modell 3 in Konfiguration 2

4.2.4 Modell 4 und Modell 5

Modell 4 und 5 betrachten die gleichen Anordnungen wie schon Modell 2 und 3, allerdings von einer anderen Perspektive. Hierbei ist der seitliche Schnitt zweier Stäbe im Wickelkopf mit dazwischen liegendem Spacer abgebildet. Wiederum wurden pro Modell zwei Konfigurationen berechnet. Für Modell 4 besteht die erste Konfiguration aus einer Vlies-schicht mit einer

Dicke von 0,25 mm mit abgerundeten Kanten und einem Radius von 0,1 mm. Die zweite Konfiguration weist eine Vliesdicke von 1,5 mm mit abgerundeten Kanten mit einem Radius von 0,3 mm auf.

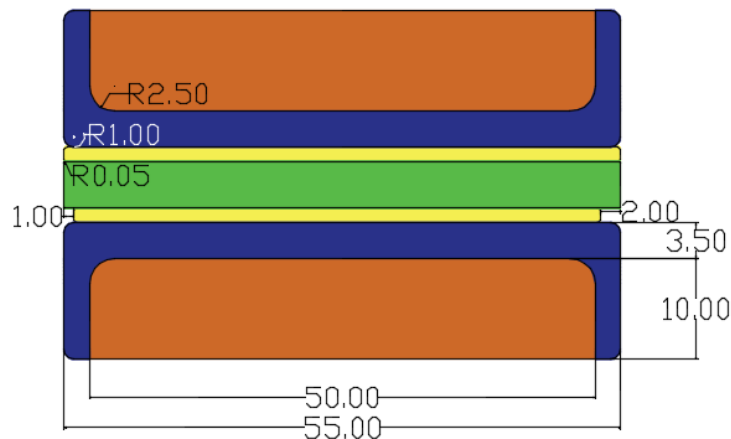


Bild 4-6: Aufbau Modell 4 in Konfiguration 2

Die beiden Konfigurationen von Modell 5 enthalten die gleichen Bemaßungen wie schon Modell 4.

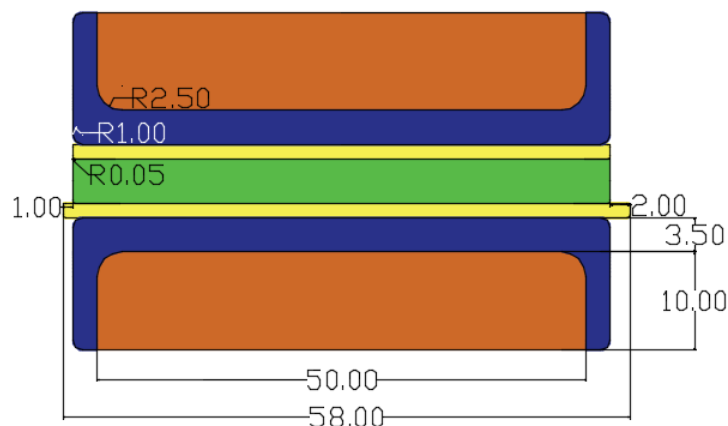


Bild 4-7: Aufbau Modell 5 in Konfiguration 2

4.2.5 Modell 6

Modell 6 bildet schließlich den Abstand zwischen Oberlage und Unterlage nach. Wie schon zuvor bei den messtechnischen Untersuchungen erwähnt, wird ein Stützschauch zwischen Oberlage und Unterlage eingebaut, um einen definierten Abstand zu gewährleisten. Mit Hilfe des Modells 6 soll nun die Feldstärkeverteilung dieser realen Anordnung berechnet werden.

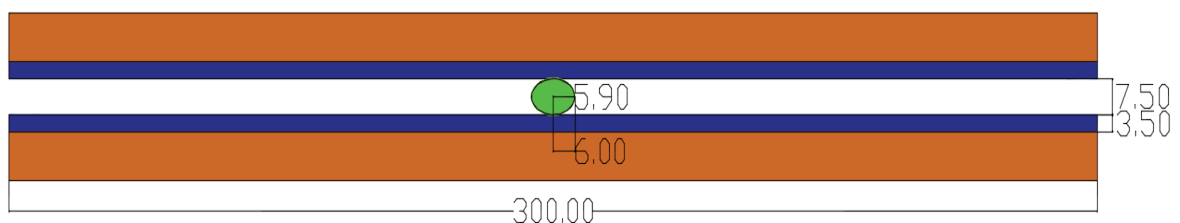


Bild 4-8: Aufbau Modell 6

4.3 Auswertemethodik

Für die Berechnungen ist zu beachten, dass die Wahl der Maschenweite des Lösungsgitters eine große Rolle bei der Finiten-Elemente-Methode spielt. Jene Bereiche, in denen höhere Feldstärken zu erwarten sind, sollen mit einem feineren Gitter versehen werden und Bereiche niedrigerer Feldstärken mit größerem Gitter. Um dies zu realisieren, wurden die bestehenden Modelle in einzelne Bereiche unterteilt, um die Maschenweite individuell festlegen zu können. Die Wahl des Gitters muss so erfolgen, dass es an den feldstarken Bereichen keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis gibt. Um dies zu prüfen, wurde eine Gitterunabhängigkeitsanalyse durchgeführt. Das bedeutet, das Gitter wurde stetig feiner gewählt, bis kein Einfluss auf das Berechnungsergebnis mehr gegeben war. Ab diesem Zeitpunkt kann das Gitter als hinreichend fein eingestuft werden.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die gewählten Lösungsgitter. Die linke Anordnung beschreibt die Modelle 1, 3 und 6 und die rechte Anordnung die Modelle 4 und 5.

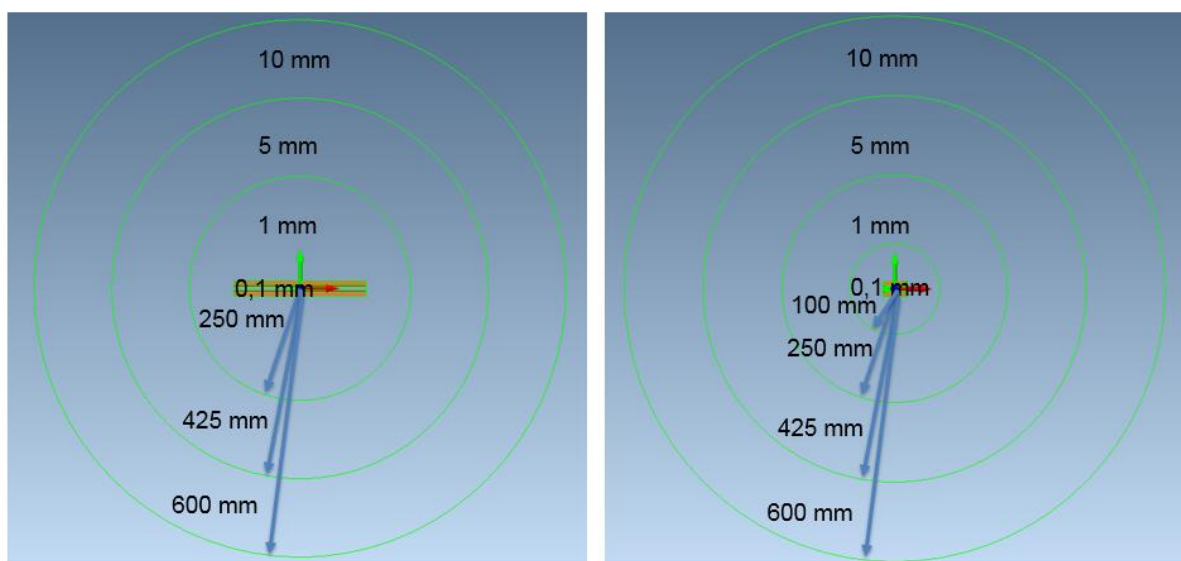


Bild 4-9: Modellbildung und gewähltes Gitternetz der FEM-Modelle

Das Gitter wurde im Nahbereich des Modells mit einer Maschenweite von 0,1 mm gewählt. Rund um die Modelle befinden sich Kreise mit unterschiedlichen Maschenweiten. Die Bereiche weiter weg vom zu betrachtenden Modell werden mit einer größeren Maschenweite ausgestattet, um die Rechenzeit zu verkürzen.

Bild 4-10 zeigt das Gitter im Bereich des Spacers anhand von Modell 2. Es ist sehr gut zu erkennen, dass das Programm die Kantenbereiche mit einem sehr feinen Gitter ausgestattet hat. In Bereichen wo eine homogenere Feldverteilung zu erwarten ist, wurde ein Gitternetz mit einer größeren Maschenweite hinterlegt.

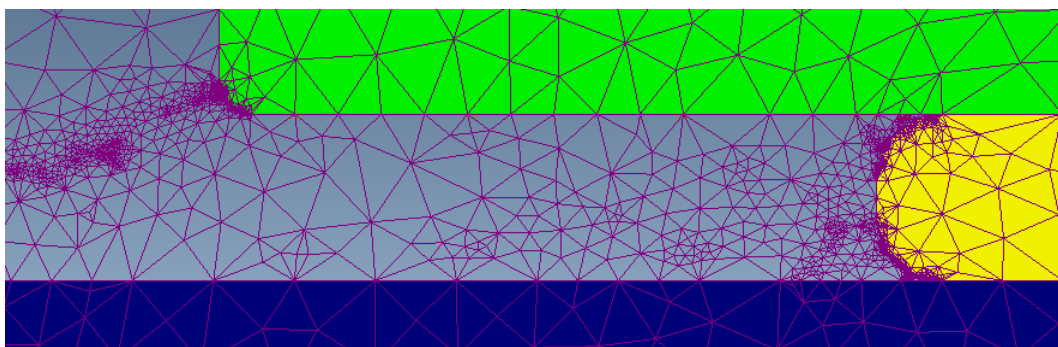


Bild 4-10: Festgelegtes Gitternetz anhand von Modell 2

Des Weiteren mussten kritische, feldstarke Bereiche der jeweiligen Modelle definiert werden. Ausgehend davon wurden bestimmte Auswertepunkte festgelegt. Für die Festlegung der Abstände im Wickelkopf elektrischer Maschinen müssen die vorherrschenden Feldstärken bekannt sein. Die kritischen Bereiche der Modelle befinden sich im Randbereich des Abstandshalterpaketes, da es an den Kanten der Materialien sehr schnell zu Feldüberhöhungen kommt. Es wurde daher die Kontur des Abstandshalters zur Feldstärkeauswertung ausgewählt, um die Bereiche der maximal auftretenden Feldstärke zu definieren. Nachfolgende Bilder (Bild 4-11 bis Bild 4-15) zeigen die Auswertepunkte entlang der Spacerkonturen. Links und rechts wurden jeweils die gleichen Punkte ausgewertet. Die Auswertung beider Seiten musste auf Grund der unsymmetrischen Geometrien erfolgen.

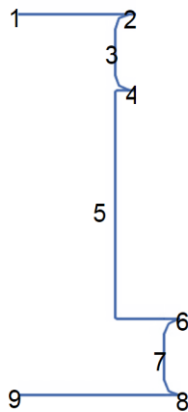


Bild 4-11: Auswertepunkte Modell 2

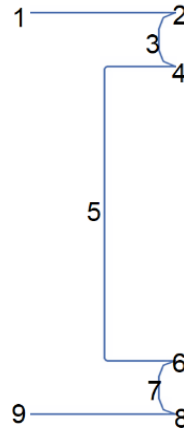


Bild 4-12: Auswertepunkte Modell 3

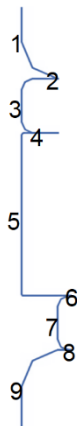
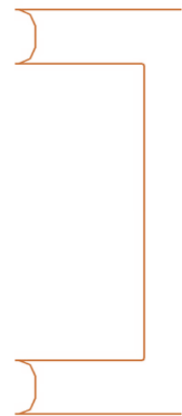


Bild 4-13: Auswertepunkte Modell 4

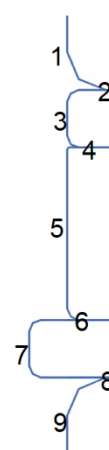


Bild 4-14: Auswertepunkte Modell 5

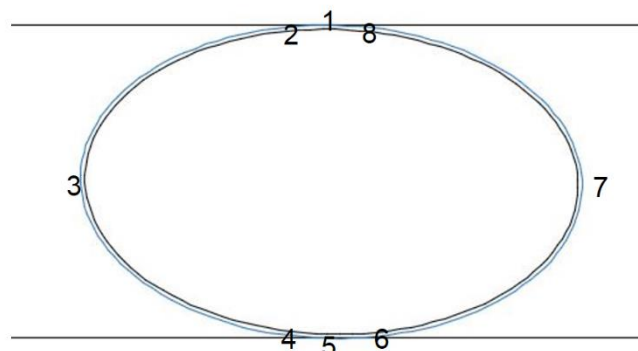


Bild 4-15: Auswertepunkte Modell 6

4.4 Berechnungsergebnisse

Dieses Kapitel enthält die Feldbilder aus dem Programm ElecNet sowie die ausgewerteten Feldstärkeverläufe entlang der Konturen der einzelnen Modelle. In den Bildern zeigen die blauen Balken jeweils die linke Kontur, sowie die orangen Balken die rechte Kontur des jeweiligen Modells.

In der nachfolgenden Auswertung werden nur zwei Modelle näher diskutiert. Die detaillierte Auswertung der restlichen Modelle befindet sich im Anhang.

Modell 2

Zur Auswertung der Finite-Elemente-Berechnungen wurde als erstes das Modell 2 ausgewählt. Es stellt ein hinreichend komplexes Modell dar und soll mögliche Produktionsfehler an der Vliesummantelung des HGW-Spacers nachbilden. Für die Auswertung wurde das Modell mit einer Vliesdicke von 1,5 mm herangezogen.

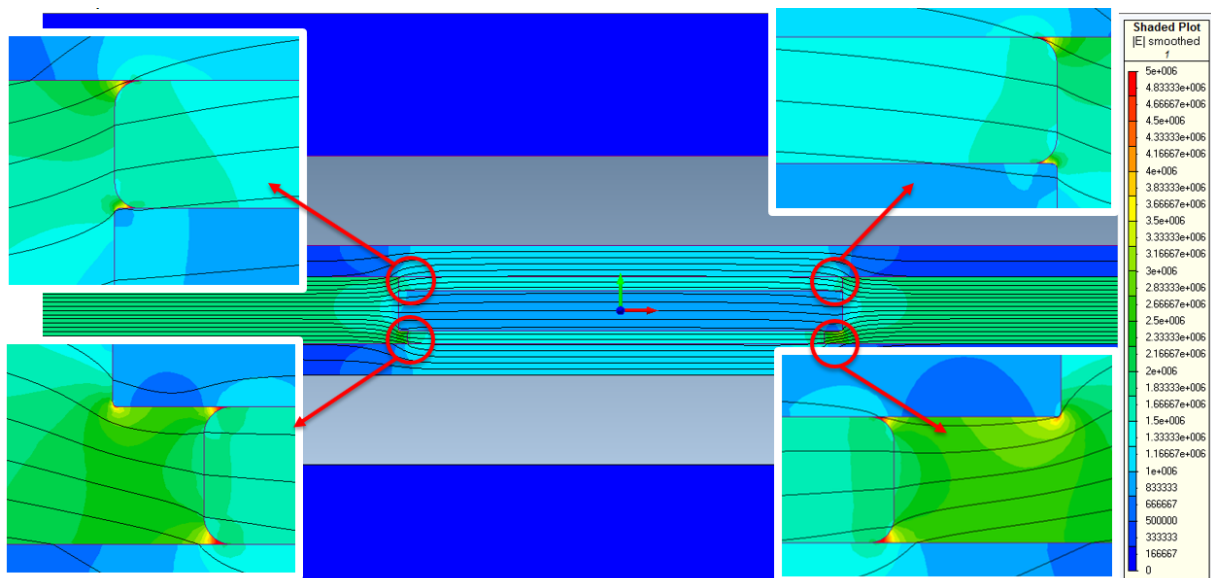


Bild 4-16: Feldbild Modell 2 - Konfiguration 2

Das Feldbild zeigt, dass es an den Kanten beziehungsweise Übergangsbereichen der einzelnen Materialien zu Feldstärkeüberhöhungen kommt. Es ist daher besonders wichtig, dass diese Bereiche sehr exakt gefertigt werden. Wie auch schon die Messungen zeigten, kann eine kleine Ungenauigkeit in der Vliesummantelung die Teilentladungseinsetzspannung erheblich absenken.

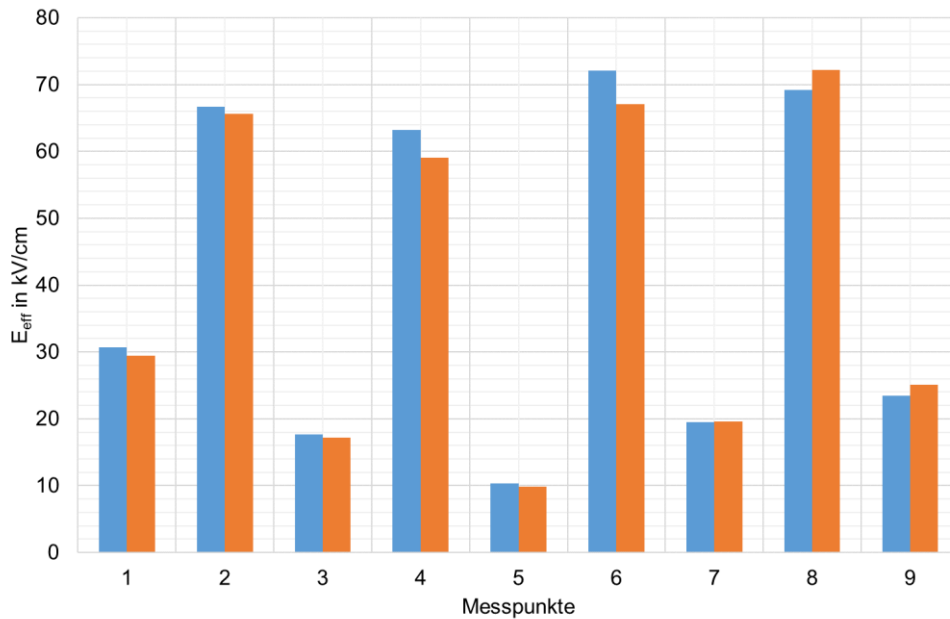


Bild 4-17: Feldstärkeverlauf Modell 2 - Konfiguration 2

Der Feldstärkeverlauf weist an den Tripelpunkten der einzelnen Materialien, beispielsweise zwischen Isolierung, Luft und Vlies, einen Anstieg der Feldstärke auf. Am geraden Teil des Vlieses beziehungsweise Hartgewebespacers, sinkt die Feldstärke wieder ab und steigt erst im Kantenbereich beziehungsweise dem Zwickelbereich zwischen Vlies und Spacer sowie Vlies und Isolierung wieder an.

Modell 6

Das Modell 6 wurde als zweites Modell für diese Auswertung ausgewählt, da die Anordnung sehr gut mit der Konfiguration 3 der Messungen am Wickelkopfmodell verglichen werden kann. Dieses Modell soll den abstandshaltenden Stützschauch zwischen Oberlage und Unterlage simulieren.

Es handelt sich hier um das Modell mit einer Dicke der Silikonschlauchhülle von 0,1 mm. Für die relative Permittivität dieser Hülle wurde in dieser Auswertung ein Wert von 3,8 verwendet.

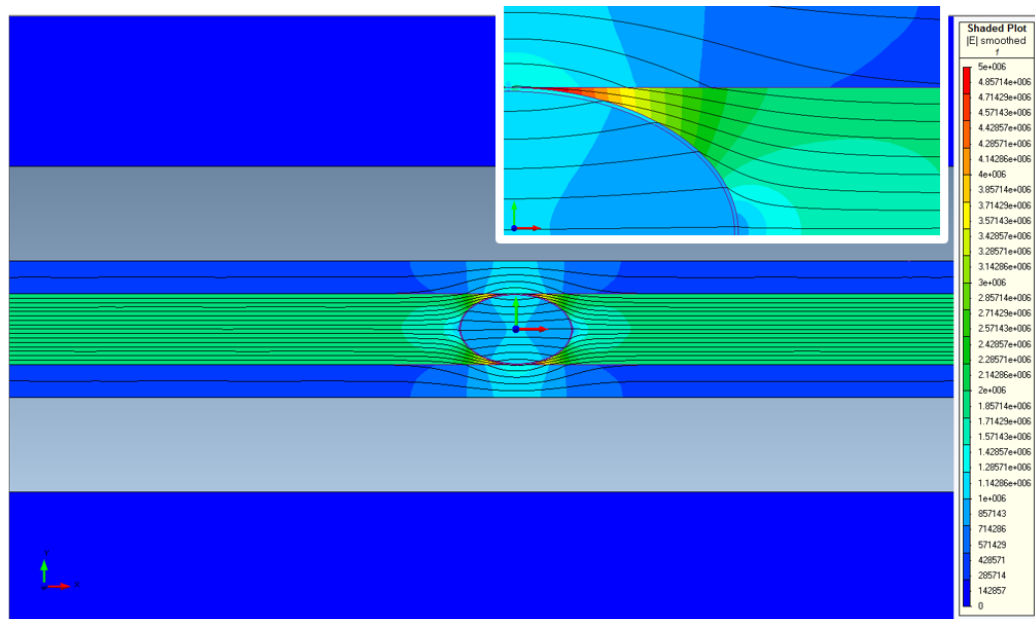


Bild 4-18: Feldbild Modell 6

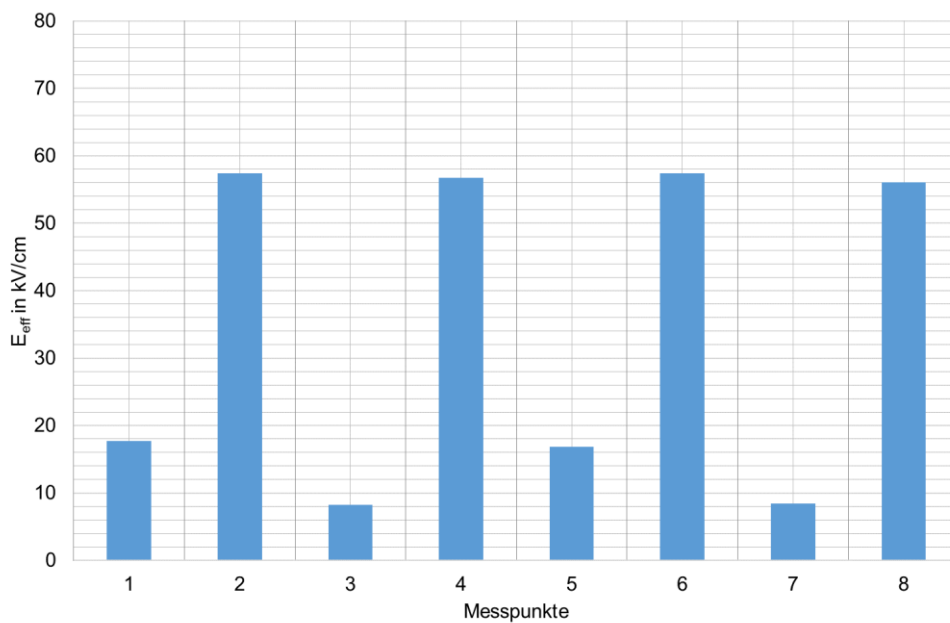


Bild 4-19: Feldstärkeverlauf Modell 6

Es wird sowohl im Feldbild als auch im ausgewerteten Feldstärkeverlauf deutlich, dass es wieder im Tripelpunkt zwischen Stützschlauch und Isoliermaterial der Stäbe zu Feldstärkeüberhöhungen kommt, welche in allen Zwickelbereichen annähernd gleich stark ausgeprägt sind. Dies war durchaus zu erwarten, da dieses Modell symmetrisch aufgebaut ist.

Der Vergleich der beiden Berechnungsmodelle zeigt, dass die Feldstärkeüberhöhung bei Modell 6 nicht so stark ausgeprägt ist wie bei Modell 2. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Stützschlauch durch seine runde Formgebung nicht so kritische Zwickelbereiche ausbildet wie die Abstandshalterpakete in Modell 2. Zwischen Vlies und Isolierung, beziehungsweise auch Vlies und Spacer, kommt es auf Grund der sehr schmalen Zwickelbereiche zu starken

Feldstärkeüberhöhungen. Dies ist noch stärker ausgeprägt je dünner die Vliesschicht ausgeführt wird.

4.5 Diskussion

Die Berechnungen zeigen, dass sich das elektrische Feld, beeinflusst durch die gewählten Materialien, verteilt. Dies war zu erwarten, da die einzelnen Materialien eine unterschiedliche relative Permittivität aufweisen. Dieser Parameter gibt die Durchlässigkeit für elektrische Felder beziehungsweise Isoliereigenschaften eines Materials an. Auf Grund der komplexen Geometrie und dem Zusammentreffen verschiedener Materialien im Bereich der Abstandshalterpakete, kommt es zu einer Verdrängung des elektrischen Feldes und somit zu Feldüberhöhungen in den Kantenbereichen. Diese Gebiete sind als kritische Regionen einzustufen, an welchen es als erstes zu Teilentladungen kommen kann. Besonders unter klimatischen Bedingungen mit hohen Luftfeuchtigkeiten, kommt es an jenen Stellen zu einem verfrühten Teilentladungseinsatz.

Modell 1 weist nur zwei Kupferelektroden mit jeweils einer Isolierschicht und einem Luftabstand dazwischen auf. Die höchste Feldstärke wird im Luftraum detektiert, das Feld wird allerdings durch die Isolierschichten abgeschwächt. Die maximale Feldstärke im Luftraum wurde mit $E_{\text{eff}} = 17,7 \text{ kV/cm}$ berechnet. Bezogen auf eine Teilentladungseinsatzfeldstärke von 30 kV/cm in der Luft, ergibt sich daraus eine theoretische Einsatzspannung von $\hat{U} = 28,1 \text{ kV}$. Das Stab-Stab-Modell weist beim internationalen Normalwert der absoluten Feuchte (11 g/m^3) einen Teilentladungseinsatz bei $\hat{U}_{\text{CIV}} = 24,9 \text{ kV}$ auf. Für das Platte-Platte-Modell wurde unter gleichen klimatischen Bedingungen die Koronaeinsatzspannung mit $\hat{U}_{\text{CIV}} = 25,4 \text{ kV}$ detektiert.

Die Messwerte beider Modelle weichen nur leicht von dem Berechnungsergebnis ab. Die Abweichung kann auf die in der Berechnung nicht berücksichtigte relative Feuchte zurückgeführt werden, auch die Messergebnisse zeigen leichte Schwankungen je Messzyklus.

Die Modelle 2 bis 5 zeigen jeweils Feldüberhöhungen an den Ecken des Spacers beziehungsweise an den Zwickelbereichen der einzelnen Materialien. Es ist nicht möglich die Ergebnisse dieser Modelle in direkte Relation mit den Messergebnissen zu stellen, da keine unterschiedlichen Spacerkonfigurationen hinsichtlich der Vliesummantelung vermessen wurden.

Das Modell 6 besteht aus den Kupferelektroden, einer Isolierschicht und einem harzgefüllten Silikon-Stützschlauch. Hierbei ist zu erkennen, dass eine Feldüberhöhung am Berührungspunkt zwischen Schlauch und Isolierung zustande kommt. Ähnliches wurde auch schon durch die messtechnischen Untersuchungen am Wickelkopfmodell aufgezeigt. Die Konfiguration 3 der Wickelkopfanordnung betrachtet im Speziellen die Anordnung des Stützschlauches zwischen Oberlage und Unterlage, wie sie in diesem Berechnungsmodell nachgebildet wurde. Wird die maximale Feldstärke dieses Modells auf eine Teilentladungseinsatzfeldstärke in Luft von 30 kV/cm bezogen, so liegt die theoretische Teilentladungseinsatzspannung bei $\hat{U} = 8,6 \text{ kV}$. In den messtechnischen Untersuchungen wurde für die Konfiguration 3 des Wickelkopfmodells der Teilentladungseinsatz bei niedriger Luftfeuchtigkeit mit $\hat{U}_{\text{CIV}} = 27,8 \text{ kV}$ detektiert. Bei Temperatur D und 80 % relativer Feuchte sinkt die Koronaeinsatzspannung allerdings auf $\hat{U}_{\text{CIV}} = 13,2 \text{ kV}$ ab. Da die Zwickelbereiche im Berechnungsmodell viel stärker ausgeprägt sind als in einer realen Anordnung, kommt es zu dieser starken Abweichung unter niedriger Luftfeuchtigkeit. Deutlich erkennbar ist jedoch, dass kritische Klimabedingungen mit diesem Modell sehr gut abgebildet werden können. Es bleibt nur eine Abweichung zwischen Berechnungsergebnis und Messwert von $\Delta U = 4,6 \text{ kV}$. Ein exakter Vergleich von Berechnungen und Messergebnissen ist natürlich nicht möglich, da hierfür eine genauere An-

realen Verhältnisse angepasste Modellbildung erfolgen müsste und auch die Luftfeuchte in die Berechnungsergebnisse miteinbezogen werden sollte.

Nachfolgende Aufnahme des Coronafinders zeigt, dass die Entladungen im Zwickelbereich zwischen Stützschlauch und Generatorstab auftreten.



Bild 4-20: Wickelkopfanordnung mit eingebautem Stützschlauch zwischen Oberlage und Unterlage

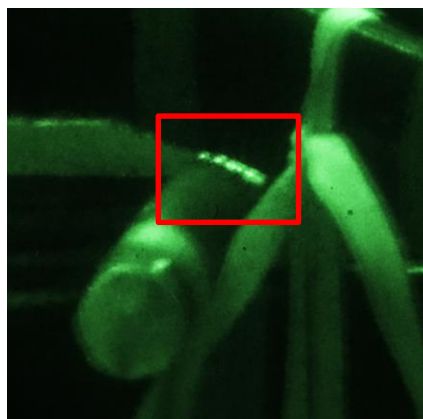


Bild 4-21: Aufnahme des Coronafinders bei Messung des Wickelkopfmodells Konfiguration 3

Eine Umrechnung der berechneten Feldstärken in eine theoretische Einsetzspannung bezogen auf 30 kV/cm für den Luftraum zeigt, dass es in allen Modellen außer dem Modell 1 zu einem Teilentladungseinsatz unter der Nennspannung kommen würde.

Die nachfolgende Tabelle 4-2 fasst die ausgewerteten maximalen Feldstärken der sechs Modelle zusammen. Die maximalen Feldstärken der Berechnung wurden anschließend auf eine Teilentladungseinsatzfeldstärke von $E_{\text{eff}} = 21,2$ kV/cm bezogen, dies entspricht dem zuvor erwähnten Scheitelwert von 30 kV/cm. Somit ergibt sich die theoretische Einsetzspannung für alle Modelle.

Tabelle 4-2: Ausgewertete maximale Feldstärkewerte inklusive Umrechnung auf die theoretische Teilentladungseinsetzspannung

Modell	Variante		E_{max} [kV/cm] bei 16,6 kV Effektivwert in Luft	Ort / Position E_{max}	CIV theoretisch [kV] bezogen auf 21,2 kV/cm Effektivwert
1	A	-	17,7	Mitte	19,9
2	A	Vlies: 0,25 mm	91,5	links unten	3,8
	B	Vlies: 1,5 mm	72,2	links unten	4,9
3	A	Vlies: 0,5 mm	85,5	links oben	4,1
	B	Vlies: 1 mm	68,6	links unten	5,1
4	A	Vlies: 0,25 mm	61,6	links unten	5,7
	B	Vlies: 1,5 mm	56,8	rechts unten	6,2
5	A	Vlies: 0,25 mm	47,0	links unten	7,5
	B	Vlies: 1,5 mm	44,0	rechts oben	8,0
6	A	Schlauch: 0,1 mm $\epsilon_r = 3,8$	57,4	rechts unten	6,1
	B	Schlauch: 0,1 mm $\epsilon_r = 11,7$	66,3	rechts unten	5,3
	C	Schlauch: 0,75 mm $\epsilon_r = 3,8$	58,8	links unten	6,0
	D	Schlauch: 0,75 mm $\epsilon_r = 11,7$	17,7	links oben	5,3

Es muss auch hier darauf hingewiesen werden, dass die relativen Permittivitäten der FEM-Simulationen auf einer Temperatur von 50 °C beruhen und somit schon einen kritischen Fall darstellen. Jedoch wird der Feuchteinfluss im Berechnungsprogramm nicht berücksichtigt und es ist anzunehmen, dass daraus ein weiteres Absinken der Teilentladungseinsetzspannung abzuleiten ist. Die erarbeiteten Modelle stellen des Weiteren Extremfälle dar, die ausgeprägte Zwickel- sowie Kantenbereiche aufweisen. Diese Zwickelbereiche und die damit verbundenen drastisch niedrigen Berechnungsergebnisse sind sehr stark von den verwendeten Radien von Vlies sowie HGW-Spacer abhängig und stellen darüberhinaus extreme Bereiche dar, welche in der Praxis in dieser Form nicht vorhanden sind. Auf Grund der Produktion der vliesummantelten Spacer können nicht so exakte scharfe Konturen nachgebildet werden. Das Imprägnieren des Vlieses mit flüssigem Harz füllt die zuvor beschriebenen Zwickelbereiche vollständig mit Harz aus und es kommt nicht zu solchen kritischen Stellen, wie sie im Berechnungsmodell auftreten. Darauf sind schließlich auch die entstandenen Abweichungen zwischen Berechnungs- und Messergebnissen sowie die sehr niedrige theoretische Einsetzspannung zurückzuführen.

Dennoch zeigen die Berechnungen, wie auch die Messergebnisse deutlich, dass die Tripelpunkte zwischen Isolierschicht, Vlies und Luft beziehungsweise auch HGW-Spacer, Vlies und Luft kritische Stellen in der Versuchsanordnung darstellen. Bild 4-22 zeigt den für die Messungen am Stab-Stab-Modell verwendeten unvorteilhaften Spacer und Bild 4-23 zeigt die dazugehörigen Aufnahmen des Coronafinders. Dieses Modell orientiert sich stark an den FEM-Modellen und die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine nicht gänzlich ausgeführte Vliesummantelung zu verfrühten Entladungen an dieser Stelle führt. Der auf Grund der unvorteilhaften Vliesummantelung entstandene Zwickelbereich hat vor allem unter hoher Luftfeuchtigkeit ein starkes Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung zur Folge.

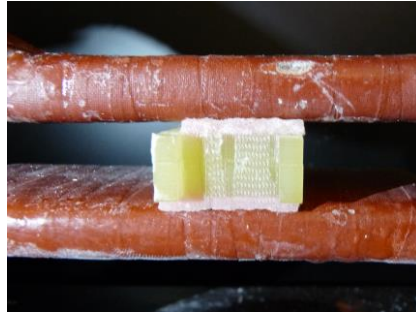


Bild 4-22: Stab-Stab-Anordnung mit unvorteilhaftem Spacer



Bild 4-23: Aufnahme des Coronafinders der Stab-Stab-Anordnung mit unvorteilhaftem Spacer – Links bei 30 % r.F. und Temperatur B, Rechts bei 80 % r.F. und Temperatur B

Für einen weiteren Vergleich zwischen Messergebnissen und Berechnungsergebnissen wurde in das Berechnungsmodell 1 eine definierte Inhomogenität eingebaut. Das angebrachte Gewe-
beplättchen weist für das Berechnungsmodell eine Höhe von 3 mm auf und eine Dicke von 0,5 mm. Die relative Permittivität wurde gleich wie jene des Isoliermaterials gewählt.

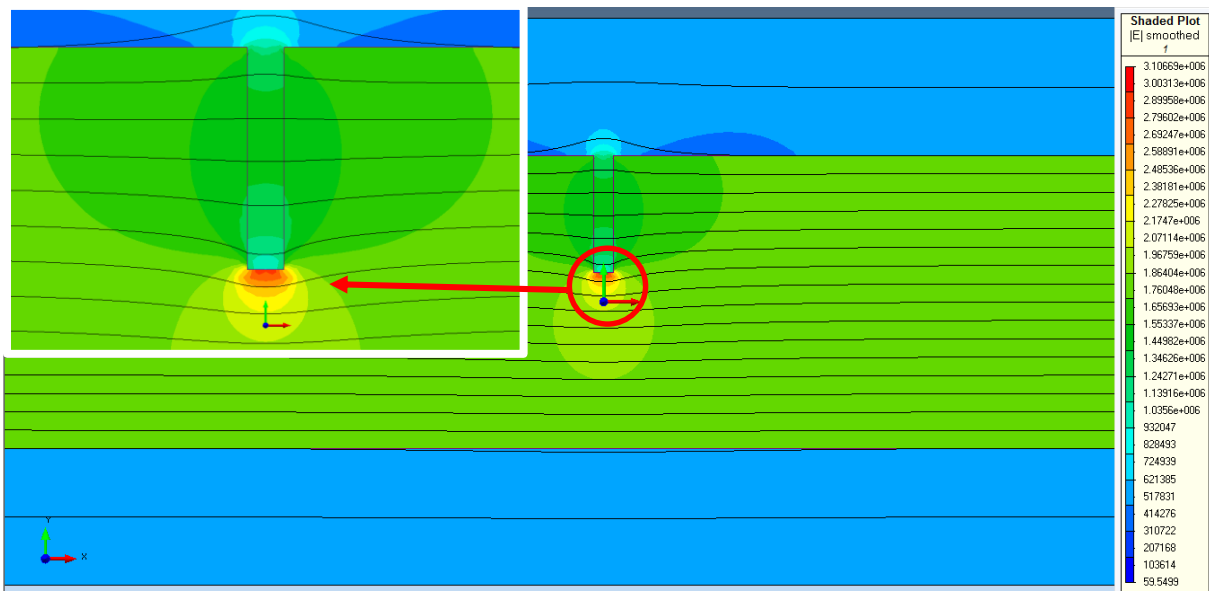


Bild 4-24: Feldbild des Modells mit definierter Inhomogenität



Bild 4-25: Aufnahme des Coronafinders bei Messung des Stab-Stab-Modells mit definierter Inhomogenität bei 80 % r.F. und Temperatur B

Der Vergleich des Feldbildes mit der Coronafinderaufnahme der Messung am Stab-Stab-Modell mit definierter Inhomogenität zeigt deutlich, dass sowohl bei der Messung als auch bei der Berechnung die ersten Entladungen am Ende der Inhomogenität auftreten müssen. Die Inhomogenität stellt eine unvorteilhafte Spitze im Luftraum dar, an welcher Feldstärkeüberhöhungen auftreten. Die Auswertung der Berechnung zeigt eine maximale Feldstärke von $E_{\text{eff}} = 28,4 \text{ kV/cm}$ an der Spitze der Inhomogenität. Bezogen auf 30 kV/cm Einsatzfeldstärke unter Luft ergibt dies eine theoretische Einsatzspannung von $\hat{U} = 17,5 \text{ kV}$. Bei 30 % relativer Feuchte wurde eine Teilentladungseinsetzspannung von $\hat{U}_{\text{CIV}} = 26,3 \text{ kV}$ ermittelt, bei 80 % relativer Feuchte $\hat{U}_{\text{CIV}} = 11,1 \text{ kV}$. Im Mittelwert stimmen diese Ergebnisse sehr gut mit dem Berechnungsergebnis überein. Schon die Messungen haben gezeigt, dass höhere Luftfeuchten stärkere Auswirkungen solcher Inhomogenitäten mit sich bringen. Ein exakter wertmäßiger Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen kann, auf Grund der bereits zuvor erwähnten nicht berücksichtigten Luftfeuchtigkeit im Berechnungsmodell, nicht erfolgen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass jene Bereiche, an welchen es zu Feldverdrängungen und in weiterer Folge zu Feldüberhöhungen in den Kantenbereichen kommt, kritische Regionen darstellen. Diese kritischen Regionen können mit Hilfe der FEM-Berechnung definiert werden und stellen eine erste Orientierung für die messtechnischen Untersuchungen dar. Vor allem unter hoher Luftfeuchtigkeit sind Tripelpunkte besonders zu betrachten, da es an jenen Stellen häufiger zu Wasseranlagerungen kommt, welche in weiterer Folge zu einem verfrühten Teilentladungseinsatz führen.

Um die elektrische Festigkeit dieser Grenzflächen und kritischer Punkte zu erhöhen, wäre es anzudenken, geeignete Maßnahmen zu treffen. Dies könnte zum Beispiel die gezielte Entlastung des Feldes am Tripelpunkt sein, um Elektronenemissionen an dieser Stelle zu vermeiden. Des Weiteren würde das Schleifen der Oberfläche eine geeignete Möglichkeiten darstellen, um den Teilentladungseinsatz an dieser Stelle zu verzögern und somit eine erhöhte Teilentladungsfestigkeit unter hoher Luftfeuchte gewährleisten zu können.

5 Ausblick

Die durchgeführten messtechnischen Untersuchungen zeigen einen deutlichen Einfluss der Luftfeuchtigkeit und Temperatur auf die Teilentladungseinsetzspannung. Die Temperatur zeigt einen geringeren Einfluss auf die Koronaeinsetzspannung und Koronaaussetzspannung und ist im Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit eher nachrangig zu behandeln.

Um den erhöhten Feuchteinfluss an Modell B2 (Wickelkopfmodell) genauer zu erklären, wäre der Einbau eines zweiten Abstandshalters in Modell B1 (Stab-Stab-Modell) sinnvoll. Es kann überprüft werden, ob die zusätzliche Inhomogenität eines weiteren Abstandshalterpaketes einen so erheblichen Feuchteinfluss mit sich bringt. Außerdem kann untersucht werden, ob tatsächlich die Abstandsverhältnisse, die Oberflächenbeschaffenheit und Isolationsdicke des Modells B2 für das drastische Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung verantwortlich sind. Hinsichtlich dieser Tatsache wäre auch eine genauere Untersuchung der Staboberflächen sinnvoll. Möglicherweise kann durch Veränderungen der Staboberfläche, wie zum Beispiel eine Behandlung mit Lacken, eine Verminderung der Einflüsse von klimatischen Bedingungen auf die Teilentladungseinsetzspannung erfolgen.

Des Weiteren sollte ein Fokus auf dem Kreuzungsbereich zwischen Oberstäben und Unterstäben des Modells B2, in welchem sich ein Stützschlauch befindet, liegen. Es ist zu erwarten, dass durch Materialveränderungen am Stützschlauch eine Verzögerung des Teilentladungseinsatzes möglich ist. Auch die Behandlung mit leitfähigem Lack könnte ein zufriedenstellenderes Ergebnis bringen, allerdings sollte um dies zu prüfen eine gesonderte Laborstudie durchgeführt werden.

Eine Gegenüberstellung der aktuellen Ergebnisse aus den messtechnischen Untersuchungen mit Messwerten aus der Praxis sollte erfolgen. Somit kann eine Aussage darüber, welches der geprüften Modelle am ehesten dem realen Wickelkopf entspricht und welche Messergebnisse für eine Abschätzung der Teilentladungseinsetzspannung in der Realität betrachtet werden müssen, erfolgen. Dies ermöglicht auch eine Weiterentwicklung der Abschätzungsformel, da die Bestimmung eines geeigneten Korrekturfaktors für den realen Wickelkopf ermöglicht wird. In weiterer Folge könnte die Formel zur Abschätzung der Teilentladungseinsetzspannung bei beliebigen klimatischen Bedingungen verwendet werden.

Für einen Vergleich zwischen den Berechnungsergebnissen der FEM-Simulationen und den Messergebnissen muss überlegt werden, wie die relative Luftfeuchte in der Simulation berücksichtigt werden kann. Mit Hilfe der relativen Permittivität kann ein Teil des Feuchteinflusses integriert werden, jedoch sollten die Modelle für die Simulation hoher Luftfeuchten Wasseranlagerungen an den Oberflächen berücksichtigen.

6 Zusammenfassung

Zu Beginn dieser Arbeit wurde eine Literaturrecherche betreffend dem Temperatur- und Feuchteinfluss auf Teilentladungen durchgeführt. Diese Recherche sollte vor allem dazu dienen, bereits untersuchte Phänomene auf diesem Gebiet zusammenzufassen beziehungsweise natürlich auch die Erkenntnisse dieser bereits durchgeführten Studien mit den nachfolgenden Messergebnissen zu vergleichen. Die Literaturrecherche gibt einerseits einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und stellt andererseits einen ersten Anhaltspunkt hinsichtlich des weiteren Aufbaus und der Interpretation der Ergebnisse der Arbeit dar. In weiterer Folge wurden messtechnische Untersuchungen an drei verschiedenen Modellen durchgeführt. Die Modelle spiegeln in mehr oder weniger komplexer Art die Materialverhältnisse und den Aufbau des realen Wickelkopfes elektrischer Maschinen wieder. Eine Temperatur/Feuchte-Matrix wurde definiert, um so viele Messpunkte wie möglich in verschiedensten Klimaten aufnehmen zu können. Des Weiteren wurden die einzelnen Modelle teilweise auch im Luftspaltabstand variiert, um etwaige gegebene Einflüsse des Abstandes in den Untersuchungen zu berücksichtigen. Den Abschluss dieser Arbeit bilden Finite-Elemente-Berechnungen an sechs unterschiedlichen Modellen. Die Modelle sollen, ähnlich wie jene der messtechnischen Untersuchungen, den realen Wickelkopf der Maschine möglichst ideal darstellen. Die Berechnungen ermöglichen es, einen Vergleich zwischen Messergebnissen und Berechnungsergebnissen zu ziehen.

Die Kernaussagen aus Literaturrecherche, messtechnischen Untersuchungen sowie Finite-Elemente-Berechnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es existiert ein signifikanter Temperatur- und Feuchteinfluss auf Teilentladungen im Wickelkopfbereich elektrischer Maschinen. Ein drastisches Absinken der Koronaein- und -aussetzspannung unter hoher Luftfeuchtigkeit wird detektiert, da Wasseranlagerungen am Isolierstoff zu lokalen Feldstärkeüberhöhungen führen, die Entladungen hervorrufen.
- Ein drastisches Absinken der Teilentladungseinsetzspannung ist ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % bei allen Modellen zu erwarten.
- Auf Grund der homogeneren Oberflächenbeschaffenheit des Isolierstoffes zeigt das Platte-Platte-Modell einen geringeren Feuchteinfluss auf die Koronaein- und -aussetzspannung. Das Wickelkopfmodell weist auf Grund der hohen Komplexität einen zusätzlich ausgeprägten Feuchteinfluss auf.
- Des Weiteren kann mit einem Absinken der Teilentladungsintensität unter hoher Luftfeuchtigkeit gerechnet werden. Dies ist durch den Einfluss des Wasserdampfes in der Luft auf den Gasentladungsprozess begründet. Erhöht sich die Luftfeuchtigkeit, so lagern sich freie Elektronen an Wassermoleküle an beziehungsweise Wassermoleküle an Sauerstoffionen. Es entstehen negativ geladene Ionen, die nicht mehr so bewegungsfähig sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass freie Elektronen zur richtigen Zeit am richtigen Ort vorhanden sind, um einen Streamer auszubilden, ist erheblich gesenkt und somit steigt in weiterer Folge die Durchschlagsfestigkeit der Luft. Das bedeutet, die Durchschlagsspannung unter feuchter Luft wird erhöht. Es kommt allerdings zu einer Verminderung der Teilentladungseinsetzspannung, auf Grund der zuvor beschriebenen Tatsache der Wasseranlagerungen am Isolierstoff.
- Dieses Absinken der Teilentladungsintensität unter hoher Feuchte zeigt sich bei allen gemessenen Modellen sehr deutlich. Für alle Modelle, mit Ausnahme der Konfiguration 3 des Wickelkopfmodells, ist eine Reduktion der Teilentladungen bei einer relati-

ven Feuchte von 80 % um rund 65 % detektiert worden, verglichen mit den Entladungen bei einer relativen Feuchte von 20 %.

- Eine erhöhte Teilentladungsintensität bei höheren Temperaturen wurde detektiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei höheren Temperaturen eine höhere thermische Energie vorhanden ist. Eine effizientere Ionisation kann erfolgen und es kommt zur Bildung einer größeren Anzahl von Startelektronen.
- Steigt die relative Luftfeuchtigkeit, erhöht sich auch der Wasserdampfgehalt in der Luft. Es kommt in weiterer Folge durch die Anlagerung von Wassermolekülen an der Isolierstoffoberfläche zu einer erhöhten Leitfähigkeit der Oberflächen beziehungsweise zu einem verminderten Oberflächenwiderstand. Die Leitfähigkeit fördert die Elektronenbeweglichkeit und Ladungen verteilen sich auf der gesamten Isolierstoffoberfläche. Dies führt zu zahlreichen kleinen Entladungsimpulsen. Somit lässt sich auch der in den messtechnischen Untersuchungen detektierte Unterschied der Teilentladungsmuster erklären. Unter hoher Feuchte sinkt die Teilentladungsintensität erheblich und es entstehen eine Vielzahl von Entladungsimpulsen. Bei niedriger Luftfeuchtigkeit zeigt das PRPD-Pattern eine sehr hohe Teilentladungsintensität mit einer verminderten Anzahl an Entladungsimpulsen.
- Eine Formel aus der Literatur, die für Freileitungsisolatoren verwendet wird, ermöglicht es eine Abschätzung bezüglich der Koronaeinsatzspannung unter hoher Luftfeuchtigkeit zu treffen. Diese Formel arbeitet mit einem Korrekturfaktor, welcher je nach Bauform, Oberflächenbeschaffenheit des Modells sowie Temperatur unterschiedlich ist. In dieser Arbeit wurde versucht einen Korrekturfaktor für das Stab-Stab-Modell zu entwickeln. Für 95 % der Werte ist die Abweichung zwischen Berechnungsergebnissen und Messergebnissen kleiner als 18 %. Diese Formel stellt einen ersten Anhaltspunkt zur Abschätzung der Teilentladungseinsatzspannung unter hoher Luftfeuchtigkeit dar. Für den realen Wickelkopf sollte allerdings ausgehend davon ein neuer Korrekturfaktor ermittelt werden, mit dem eine erste Einschätzung der Koronaeinsatzspannung für jede klimatische Bedingung sowie jede beliebige Maschine möglich wird.
- Die Finiten-Elemente-Berechnungen zeigen, dass die Kanten- beziehungsweise Zwickelbereiche zwischen Vlies und Isolierung sowie Vlies und Spacer kritische Bereiche hinsichtlich des Teilentladungseinsatzes darstellen. Auf Grund der Feldverdrängung im Isoliermedium beziehungsweise im Vlies und Spacermaterial kommt es zu Feldstärkeüberhöhungen in den Zwickelbereichen. Dies fördert den Teilentladungseinsatz.
- Eine möglichst exakte und genaue Produktion der Isolationswicklungen sowie Einbau der Abstandhalter können die Koronaeinsatzspannung erhöhen. Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen zeigt, dass die zuvor definierten kritischen Bereiche vor allem unter hoher Luftfeuchte zu einem verfrühten TE-Einsatz führen.

Zusammengefasst wurden in dieser Arbeit ausgehend von der Literaturrecherche, messtechnische Untersuchungen sowie Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt. Die Messungen an den unterschiedlichen Modellen weisen jenes Verhalten, welches teilweise aus der Literaturrecherche zu erwarten war, auf. Die Berechnungen stellen einen Anhaltspunkt bezüglich kritischer Bereiche dar. Es kann wertmäßig kein idealer Vergleich mit den Messergebnissen erstellt werden, da auch der Feuchteinfluss in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurde. Allerdings wurde messtechnisch belegt, dass die in den Berechnungen ermittelten Schwachstellen der Modelle, vor allem unter hoher Luftfeuchte, starke Auswirkungen auf die Koronaein- und -aussetzspannung zeigen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] A. Küchler: „Hochspannungstechnik – Grundlage – Technologie – Anwendung“, Springer-Verlag, 3. Auflage, 2009
- [2] M. Lerchbacher: „Teilentladungen bei Generatorstabilisiersystemen“, Dissertation TU Graz, Österreich, 2014
- [3] G. Hilgarth: „Hochspannungstechnik“, B.G. Teubner Stuttgart, 3. Auflage, 1997
- [4] C. Franck: „Durchschlag in Festenstoffen – Vorlesung Hochspannungstechnologie“, ETH Zürich, Schweiz, 2009
- [5] M. Schüller: „Auswirkungen erhöhter 1-Minuten Stehspannungsprüfungspegel auf die elektrische Lebensdauer des Isolationssystems rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen“, Diplomarbeit TU Graz, Österreich, 2009
- [6] DIN EN 60034, „Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-34: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen - Prüfverfahren für Wicklungen mit vorgeformten Elementen - Thermomechanische Bewertung von Isoliersystemen, DIN EN 60034-18-34:2012, 2012
- [7] F. H. Kreuger: „Industrial High Voltage“, Delft University Press, 1992
- [8] A. Roth: „Hochspannungstechnik“, Springer-Verlag, 4. Auflage, 1959
- [9] T. W. Dakin, u. a.: „Breakdown of gases in uniform fields – Paschencurves for Nitrogen, Air and Sulfur Hexafluoride“, Cigre Working Group 03 of Study Committee 15 Insulating Materials, 1974
- [10] M. Lerchbacher, u. a.: „Anwendung des Paschen-Gesetzes für die Optimierung des Wickelkopf-Abstandsdesigns von großen rotierenden elektrischen Maschinen“, Elektrotechnik & Informationstechnik, Heft 5, September 2012
- [11] IEEE Std. 1799: „IEEE Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars, and Windings“, IEEE Std. 1799-2012, 2012
- [12] J. Zhang, u. a.: „Application of Hourly Meteorological Records to Atmospheric Correction Factors in Insulation Coordination under Switching Impulse Voltage“, International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, 2008
- [13] „Online Wetterdaten des Landes Steiermark“, URL: <http://www.umwelt.steiermark.at/cms/ziel/2060750/DE/> (Stand: 04.07.2017)
- [14] W. O. Schumann: „Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen“, Springer-Verlag, 1923
- [15] X. Wang, N. Taylor, H. Edin: „Effect of humidity on partial discharge in a metal-dielectric air gap on machine insulation at trapezoidal testing voltages“, Journal of Electrostatics 83, 2016
- [16] M. Fenger, G. C. Stone: „Investigation of the Effect of Humidity on Partial Discharge Activity in Stator Windings“, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, 2003
- [17] J. Schmid: „Influence of Absolute Humidity on the Electrical Breakdown in Air“, ETEP, Vol. 2, No. 5, September / Oktober 1992
- [18] Y. Kikuchi, T. Murata: „Effects of Ambient Humidity and Temperature on Partial Discharge Characteristics of Conventional and Nanocomposite Enamelled Magnet Wires“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15 No. 6, Dezember 2008
- [19] Z. Nawawi, Y. Muramoto Naohiro Hozumi, M. Nagao: „Effect of Humidity on Partial Discharge Characteristics“, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, 2003

-
- [20] Z. Nawawi, u. a.: „Effect of Humidity on Time Lag of Partial Discharge in Insulation-Gap-Insulation System”, International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials, Bali, Indonesien, 2006
- [21] T. Soban, R. Ohyama: „A Study on the Humidity Effect of AC Corona Discharge for a Thin-Wire Electrode Arrangement”, Proceedings of the School of Engineering, Tokio University, Series E, 2016
- [22] X. Wang, C. You: „Effect of Humidity on Negative Corona Discharge of Electrostatic Precipitators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20 No. 5, Oktober 2013
- [23] M. Fenger, G. C. Stone, B. A. Lloyd: „The Impact of Humidity on PD inception Voltage as a Function of Rise-Time in Random Wound Motors of Different Designs”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 2002
- [24] P. Ortega, u. a.: „Influence of negative ions on the humidity effect on the first corona inception”, Journal of Physics D: Applied Physics, No. 40, 2007
- [25] E. Binder, u. a.: „Effects of Air Humidity and Temperature to the Activities of External Partial Discharges of Stator Windings”, International Symposium of High Voltage Engineering, London, 1999
- [26] F. Guastavino, E. Torello: „PD Pattern dependence on relative humidity in twisted pairs“, Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, Quebec, Kanada, 2008
- [27] R. Soltani, E. David, L. Lamarre: „Study on the Effect of Humidity on Dielectric Response and Partial Discharges Activity of Machine Insulation Materials”, IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, Kanada, 2009
- [28] K. Younsi, u. a.: „Seasonal Changes in Partial Discharge Activity on Hydraulic Generators”, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference, Ohio, USA, 2001
- [29] M. Lèvesque, u. a.: „Contribution of Humidity to the Evolution of Slot Partial Discharges“, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 1, 2012
- [30] B. Lutz, J. Kindersberger: „Influence of Relative Humidity on Surface Charge Decay on Epoxy Resin Insulators“, Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China, 2009
- [31] T. Braunsberger, A. Dziubek, M. Kurrat: „Untersuchungen zur Hydrophobieabnahme von Silikonoberflächen durch Teilentladungen an Wassertropfen-Tauschichten“, ETG Fachtagung, Hanau, Deutschland, 2005
- [32] IEC 60270, „International Standard High Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements”, IEC 60270:2000 + Cor.: 2001 + A1:2015, 2016
- [33] E. Lemke: „Guide for Electrical Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270”, Electra Technical Brochure No. 241, 2008
- [34] E. Gulski, u. a.: „Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods”, Cigre Technical Brochure No. 662, 2016
- [35] „Skriptum Hochspannungstechnik 2 - Labor 2016”, TU Graz, Österreich, 2016
- [36] L. E. Lundgaard: „Partial Discharge - Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection - Fundamental Considerations“, IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 8 No. 4, 1992
- [37] R. Bartnikas, E. J. McMahon: „Engineering Dielectrics Volume I Corona Measurement and Interpretation”, American Society for Testing and Materials, Technical Publication 669, 1979
- [38] C. Hudon, M. Bèlec: „Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2, 2005
- [39] „Datenblatt Coronafinder“, URL: <http://www.syntronics.net/coronafinder.html> (Stand: 07.08.2017)
-

- [40] „Daten Klimaschrank“, URL:
<http://www.cts-umweltsimulation.at/produkte/umweltsimulation/klima-pruefschraenke/> (Stand: 06.10.2017)
- [41] H. Immink: „Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration“, Dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Deutschland, 2009
- [42] D. K. Das-Gupta: „Electrical Properties of Surfaces of Polymeric Insulators“, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 27, No. 5, 1992
- [43] „Grundbegriffe der Sorption - Skriptum für Radiochemie“, URL:
https://www.hzdr.de/FWR/DOCS/Sorption_Skript_2011.pdf (Stand: 31.10.2017)
- [44] Y. Awakuni, J. H. Calderwood: „Water vapour adsorption and surface conductivity in solids“, Journal of Physics D: Applied Physics Vol. 5, 1972
- [45] H. J. Breen, u. a.: „The Importance on Generator Operating Conditions on PD data Evaluation“, IEEE Internation Symposium Electrical Insulation, Boston, USA, 2002
- [46] M. Kurrat, M. Budde: „Grundlagen der physikalischen Vorgänge II – Äußere Teilentladungen“, Technische Akademie Esslingen, 2011
- [47] „Leitfaden ESD-Schutzmaßnahmen“, URL:
http://www.tridonic.com/com/de/download/technical/Richtlinie_EOS_ESD_de.pdf (Stand: 07.10.2017)
- [48] „Vor Elektrostatik schützen“, URL: <https://www.condair-systems.at/m/0/fronius-frequentis-ge-healthcare-luftbefeuchtung-elektronikindustrie.pdf> (Stand 07.10.2017)
- [49] K. Brandisky: „ElecNet Manual for modelling ECT Sensors“, 2010

8 Anhang

8.1 Anhang A: Detaillierte Auswertung der messtechnischen Untersuchungen

8.1.1 Auflistung der detaillierten Messwerte

Die Messwerte sind in Scheitelwerten angegeben und entsprechen den auf den Luftspalt bezogenen Messwerte.

Tabelle 8-1: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{\text{CIVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{\text{CEVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	16,57	0,61	15,70	0,68
A/80	17,48	0,56	15,60	0,61
B/30	15,56	0,60	13,76	0,55
B/40	15,90	0,47	14,35	0,52
B/60	17,62	0,43	15,77	0,64
B/80	17,18	0,35	15,56	0,80
C/20	15,30	0,45	13,27	0,48
C/80	13,75	0,77	12,22	0,60
D/20	14,79	0,28	12,47	0,92
D/40	15,94	0,43	13,75	0,52
D/60	16,50	0,49	14,97	0,44
D/80	12,27	0,65	10,51	0,68

Tabelle 8-2: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	3,31	3,14
A/80	3,50	3,12
B/30	3,11	2,75
B/40	3,18	2,87
B/60	3,52	3,15
B/80	3,44	3,11
C/20	3,06	2,65
C/80	2,75	2,44
D/20	2,96	2,49
D/40	3,19	2,75
D/60	3,30	2,99
D/80	2,45	2,10

Tabelle 8-3: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	21,74	0,76	20,62	0,81
A/80	21,02	0,80	20,10	0,83
B/30	21,61	0,45	19,73	0,27
B/40	21,35	0,29	20,24	0,44
B/60	21,17	0,39	20,00	0,49
B/80	19,74	1,41	18,87	1,56
C/20	20,96	0,52	19,38	0,28
C/80	16,68	0,56	14,97	0,77
D/20	20,79	0,36	18,66	0,57
D/40	20,71	0,75	19,92	0,55
D/60	21,94	0,51	20,33	0,49
D/80	14,13	0,69	12,86	0,44

Tabelle 8-4: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,90	2,75
A/80	2,80	2,68
B/30	2,88	2,63
B/40	2,85	2,70
B/60	2,82	2,67
B/80	2,63	2,52
C/20	2,79	2,58
C/80	2,22	2,00
D/20	2,77	2,49
D/40	2,76	2,66
D/60	2,92	2,71
D/80	1,88	1,71

Tabelle 8-5: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 10 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{\text{CIVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{\text{CEVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	28,93	0,32	26,87	0,67
A/80	27,28	1,02	25,69	0,89
B/30	28,35	0,77	25,90	0,35
B/40	28,26	0,60	26,89	0,60
B/60	27,94	0,59	26,84	0,59
B/80	26,42	1,46	25,10	1,31
C/20	28,01	0,61	25,29	0,50
C/80	24,23	0,99	21,99	1,00
D/20	27,53	0,86	24,90	0,75
D/40	26,92	1,11	25,43	0,77
D/60	29,08	0,94	26,43	0,65
D/80	24,30	0,77	22,07	1,31

Tabelle 8-6: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 10 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,89	2,69
A/80	2,73	2,57
B/30	2,83	2,59
B/40	2,83	2,69
B/60	2,79	2,68
B/80	2,64	2,51
C/20	2,80	2,53
C/80	2,42	2,20
D/20	2,75	2,49
D/40	2,69	2,54
D/60	2,91	2,64
D/80	2,43	2,21

Tabelle 8-7: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	16,50	0,53	12,80	0,86
A/80	13,26	0,92	11,25	0,70
B/30	15,42	0,94	13,91	0,61
B/40	15,83	0,61	14,13	0,61
B/60	15,30	0,65	13,81	0,57
B/80	10,75	0,35	9,23	0,36
C/20	16,55	0,45	13,49	0,42
C/80	11,85	0,41	9,80	0,54
D/20	16,04	0,51	13,15	0,58
D/40	15,04	0,46	13,09	0,56
D/60	14,79	0,87	12,83	0,44
D/80	13,83	1,04	12,22	0,55

Tabelle 8-8: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	3,30	2,56
A/80	2,65	2,25
B/30	3,08	2,78
B/40	3,17	2,83
B/60	3,06	2,76
B/80	2,15	1,85
C/20	3,31	2,70
C/80	2,37	1,96
D/20	3,21	2,63
D/40	3,01	2,62
D/60	2,96	2,57
D/80	2,77	2,44

Tabelle 8-9: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 7,3$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	14,72	0,88	13,96	0,30
A/80	16,38	0,70	15,54	0,73
B/30	20,16	2,23	17,89	1,80
B/40	16,82	1,02	14,96	0,61
B/60	15,50	1,02	14,61	0,94
B/80	18,64	0,73	18,05	0,66
C/20	20,16	1,52	18,05	0,66
C/80	19,74	1,32	18,61	1,55
D/20	18,95	2,06	16,88	1,33
D/40	16,31	1,10	14,82	0,35
D/60	17,90	1,21	15,90	1,18
D/80	19,42	1,15	18,49	0,92

Tabelle 8-10: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 7,3$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,02	1,91
A/80	2,24	2,13
B/30	2,76	2,45
B/40	2,30	2,05
B/60	2,12	2,00
B/80	2,55	2,47
C/20	2,76	2,47
C/80	2,70	2,55
D/20	2,60	2,31
D/40	2,23	2,03
D/60	2,45	2,18
D/80	2,66	2,53

Tabelle 8-11: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 10$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	24,94	3,17	21,47	1,92
A/80	19,55	0,96	17,60	1,06
B/30	30,79	1,12	25,61	0,72
B/40	22,27	2,68	19,48	0,65
B/60	20,81	0,90	19,64	0,99
B/80	18,89	0,98	17,39	0,53
C/20	30,29	0,31	25,79	0,73
C/80	24,40	0,69	22,74	0,65
D/20	29,89	0,39	26,10	0,54
D/40	23,60	3,41	20,40	2,61
D/60	21,48	0,79	18,96	1,45
D/80	17,72	2,36	16,83	2,17

Tabelle 8-12: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 10$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,49	2,15
A/80	1,96	1,76
B/30	3,08	2,56
B/40	2,23	1,95
B/60	2,08	1,96
B/80	1,89	1,74
C/20	3,03	2,58
C/80	2,44	2,27
D/20	2,99	2,61
D/40	2,36	2,04
D/60	2,15	1,90
D/80	1,77	1,68

Tabelle 8-13: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{\text{CIVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{\text{CEVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	11,49	0,71	9,43	0,34
A/80	7,55	0,84	6,29	0,24
B/30	12,87	0,47	11,17	0,72
B/40	12,64	0,71	10,74	0,75
B/60	8,39	0,58	6,57	0,41
B/80	5,56	0,33	4,47	0,24
C/20	11,62	0,27	10,21	0,36
C/70	7,53	0,46	5,31	0,48
C/80	5,37	0,43	4,36	0,00
D/20	11,28	0,35	9,96	0,42
D/40	10,27	0,67	8,33	0,41
D/60	7,93	0,60	6,57	0,73
D/70	7,04	0,31	5,80	0,03
D/80	5,69	0,63	4,42	0,25

Tabelle 8-14: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,30	1,89
A/80	1,51	1,26
B/30	2,57	2,23
B/40	2,53	2,15
B/60	1,68	1,31
B/80	1,11	0,89
C/20	2,32	2,04
C/70	1,51	1,06
C/80	1,07	0,87
D/20	2,26	1,99
D/40	2,05	1,67
D/60	1,59	1,31
D/70	1,41	1,16
D/80	1,14	0,88

Tabelle 8-15: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	22,21	0,76	20,58	0,89
A/80	13,40	0,84	11,69	0,60
B/30	20,54	1,00	18,35	0,47
B/40	19,61	0,68	18,44	0,50
B/60	20,02	1,00	18,35	0,43
B/80	16,31	0,92	13,72	0,64
C/20	20,65	0,62	18,30	0,86
C/70	16,25	0,96	14,40	1,03
C/80	16,70	0,73	14,90	0,73
D/20	20,00	0,86	18,12	0,69
D/40	19,32	0,62	17,82	0,70
D/60	18,91	1,02	17,21	1,08
D/70	16,45	1,22	14,30	1,62
D/80	13,44	0,72	10,76	0,85

Tabelle 8-16: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,96	2,74
A/80	1,79	1,56
B/30	2,74	2,45
B/40	2,61	2,46
B/60	2,67	2,45
B/80	2,17	1,83
C/20	2,75	2,44
C/70	2,17	1,92
C/80	2,23	1,99
D/20	2,67	2,42
D/40	2,58	2,38
D/60	2,52	2,29
D/70	2,19	1,91
D/80	1,79	1,43

Tabelle 8-17: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit unvorteilhafter Bandage $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	22,31	2,11	19,10	1,45
A/80	16,77	0,70	15,47	0,57
B/30	21,84	2,83	18,87	1,50
B/40	20,27	0,72	17,80	0,68
B/60	20,97	0,68	17,51	0,87
B/80	14,59	0,83	11,20	0,71
C/20	22,75	1,42	19,25	0,72
C/70	17,45	0,69	13,93	1,53
C/80	14,09	1,02	12,09	0,87
D/20	24,20	1,15	20,15	0,60
D/40	18,34	0,75	16,09	0,55
D/60	17,64	0,75	15,57	1,12
D/70	13,74	0,91	12,25	1,20
D/80	9,86	0,28	7,65	0,71

Tabelle 8-18: Berechnete Werte der Koronaeinsetzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit unvorteilhafter Bandage $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,97	2,55
A/80	2,24	2,06
B/30	2,91	2,52
B/40	2,70	2,37
B/60	2,80	2,33
B/80	1,95	1,49
C/20	3,03	2,57
C/70	2,33	1,86
C/80	1,88	1,61
D/20	3,23	2,69
D/40	2,44	2,15
D/60	2,35	2,08
D/70	1,83	1,63
D/80	1,31	1,02

Tabelle 8-19: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit geschmiregelter Bandage $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
B/30	24,65	0,79	21,33	1,12
B/80	18,97	1,79	15,25	0,80

Tabelle 8-20: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit geschmirgelter Bandage $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
B/30	3,29	2,84
B/80	2,53	2,03

Tabelle 8-21: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit definierter Inhomogenität $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
B/30	21,17	1,72	18,55	2,32
B/80	8,91	0,61	6,87	0,79

Tabelle 8-22: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit definierter Inhomogenität $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
B/30	2,82	2,47
B/80	1,19	0,92

Tabelle 8-23: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 15,6$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	40,71	0,79	39,71	0,58
A/80	33,74	3,02	31,98	3,53
B/30	40,04	0,33	38,67	0,28
B/40	39,69	0,09	38,86	0,35
B/60	37,78	1,75	36,55	2,45
B/80	32,42	2,10	30,50	3,12
C/20	39,53	0,27	38,09	0,30
C/80	30,17	1,42	28,23	1,60
D/20	38,20	0,36	36,55	0,58
D/40	34,72	0,80	32,98	0,49
D/60	33,44	0,92	31,92	0,71
D/80	30,33	0,83	29,12	0,77

Tabelle 8-24: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 15,6 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,61	2,55
A/80	2,16	2,05
B/30	2,57	2,48
B/40	2,54	2,49
B/60	2,42	2,34
B/80	2,08	1,96
C/20	2,53	2,44
C/80	1,93	1,81
D/20	2,45	2,34
D/40	2,23	2,11
D/60	2,14	2,05
D/80	1,94	1,87

Tabelle 8-25: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 7,5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	21,34	0,67	19,38	0,65
A/80	15,49	0,99	13,92	1,27
B/30	21,66	0,71	19,38	0,69
B/40	19,25	0,54	18,05	0,33
B/60	18,70	0,99	16,03	1,11
B/80	17,97	0,81	15,99	0,49
C/20	20,42	0,58	18,72	0,71
C/70	17,93	0,57	16,11	0,49
C/80	16,95	0,60	15,46	0,45
D/20	19,85	0,51	18,59	0,28
D/40	18,67	0,42	17,07	0,46
D/60	18,35	0,51	16,06	0,71
D/70	18,23	0,44	16,93	0,41
D/80	16,40	0,57	15,05	0,59

Tabelle 8-26: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,85	2,58
A/80	2,07	1,86
B/30	2,89	2,58
B/40	2,57	2,41
B/60	2,49	2,14
B/80	2,40	2,13
C/20	2,72	2,50
C/70	2,39	2,15
C/80	2,26	2,06
D/20	2,65	2,48
D/40	2,49	2,28
D/60	2,45	2,14
D/70	2,43	2,26
D/80	2,19	2,01

Tabelle 8-27: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
A/60	31,90	1,15	28,65	3,93
A/80	27,78	1,13	24,61	1,31
B/30	31,04	0,50	27,80	1,00
B/40	29,94	0,69	27,86	0,56
B/60	26,80	0,97	22,86	0,83
B/80	23,14	4,01	21,13	2,69
C/20	30,55	0,99	27,37	0,62
C/70	27,89	0,57	24,50	1,02
C/80	26,84	1,88	24,65	1,02
D/20	30,42	0,65	27,08	0,61
D/40	30,50	1,04	26,94	1,18
D/60	29,02	1,73	23,94	0,85
D/70	28,78	0,92	25,23	1,26
D/80	19,63	1,28	18,87	1,35

Tabelle 8-28: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
A/60	2,05	1,84
A/80	1,78	1,58
B/30	1,99	1,78
B/40	1,92	1,79
B/60	1,72	1,47
B/80	1,48	1,35
C/20	1,96	1,75
C/70	1,79	1,57
C/80	1,72	1,58
D/20	1,95	1,74
D/40	1,96	1,73
D/60	1,86	1,53
D/70	1,84	1,62
D/80	1,26	1,21

Tabelle 8-29: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Stab-Stab-Modell mit unvoreilhaftem Spacer $d = 15,6$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
B/30	27,03	0,59	21,37	1,81
B/80	10,30	0,51	6,98	0,78

Tabelle 8-30: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Stab-Stab-Modell mit unvoreilhaftem Spacer $d = 15,6$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
B/30	1,73	1,37
B/80	0,66	0,45

Tabelle 8-31: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 1)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{\text{CIVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{\text{CEVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
B/30	26,56	0,73	23,13	0,72
B/40	18,58	0,93	14,07	1,06
B/60	17,66	0,92	14,70	1,16
B/80	8,83	0,69	5,90	0,32
D/20	23,87	0,95	18,91	0,66
D/40	20,16	1,56	16,85	0,99
D/60	18,42	1,22	10,99	0,83
D/80	10,20	0,67	7,09	0,51

Tabelle 8-32: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 1)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
B/30	1,70	1,48
B/40	1,19	0,90
B/60	1,13	0,94
B/80	0,57	0,38
D/20	1,53	1,21
D/40	1,29	1,08
D/60	1,18	0,70
D/80	0,65	0,45

Tabelle 8-33: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 2)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{\text{CIVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{\text{CEVLuftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
B/30	31,21	0,34	28,56	0,62
B/40	31,78	0,84	28,48	0,95
B/60	23,70	0,76	20,28	1,16
B/80	12,96	1,02	10,60	0,80
D/20	30,50	0,66	27,65	0,96
D/40	31,17	0,44	26,78	0,93
D/60	19,23	0,50	15,50	0,70
D/80	10,98	0,65	8,31	1,28

Tabelle 8-34: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 2)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
B/30	2,00	1,83
B/40	2,04	1,83
B/60	1,52	1,30
B/80	0,83	0,68
D/20	1,96	1,77
D/40	2,00	1,72
D/60	1,23	0,99
D/80	0,70	0,53

Tabelle 8-35: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung sowie die jeweilige Standardabweichung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 3)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CIV	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ [kV]	Standard- abweichung CEV
B/30	21,18	1,33	18,72	1,08
B/40	23,09	0,82	19,86	0,63
B/60	24,88	1,09	21,53	0,96
B/80	16,35	1,52	13,82	1,92
D/20	21,56	0,66	18,69	1,07
D/40	25,31	0,92	22,48	1,21
D/60	17,69	0,73	12,91	0,53
D/80	11,82	1,60	8,47	0,96

Tabelle 8-36: Berechnete Werte der Koronaeinsatzfeldstärke für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 3)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	E_{CIV} [kV/mm]	E_{CEV} [kV/mm]
B/30	1,36	1,20
B/40	1,48	1,27
B/60	1,59	1,38
B/80	1,05	0,89
D/20	1,38	1,20
D/40	1,62	1,44
D/60	1,13	0,83
D/80	0,76	0,54

Tabelle 8-37: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 4) - Eins entspricht jeweils den Entladungen in der Unterlage und zwei in der Oberlage

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ 1 [kV]	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ 1 [kV]	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ 2 [kV]	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ 2 [kV]
B/30	27,72	22,82	30,28	28,73
B/40	25,89	23,41	30,63	27,56
B/60	17,30	14,08	25,18	22,13
B/80	8,79	7,26	11,60	10,12
D/20	23,90	19,37	30,49	27,36
D/40	20,47	17,53	30,92	28,17
D/60	14,15	10,25	18,07	13,79
D/80	10,75	7,52	13,59	10,47

Tabelle 8-38: Messwerte der Koronaein- und -aussetzspannung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 4) - Drei entspricht den Entladungen zwischen Oberlage und Unterlage.

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV\text{Luftspalt}}$ 3 [kV]	$\hat{U}_{CEV\text{Luftspalt}}$ 3 [kV]
B/30	24,67	22,24
B/40	20,49	16,63
B/60	20,14	17,96
B/80	11,60	10,12
D/20	23,56	19,37
D/40	23,53	19,97
D/60	18,07	13,79
D/80	10,75	7,84

Tabelle 8-39: Berechnete Werte der Standardabweichung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 4) für die Fälle 1 und 2

Temperatur/ Feuchte-Punkt	Standard- abweichung CIV 1 [kV]	Standard- abweichung CEV 1 [kV]	Standard- abweichung CIV 2 [kV]	Standard- abweichung CEV 2 [kV]
B/30	0,99	0,49	0,45	0,43
B/40	1,29	0,98	0,90	1,13
B/60	1,51	0,84	1,07	1,18
B/80	0,54	0,52	1,12	1,01
D/20	1,68	1,16	0,36	0,95
D/40	1,37	1,00	0,76	0,67
D/60	1,49	0,96	0,71	1,70
D/80	0,85	0,70	1,24	0,72

Tabelle 8-40: Berechnete Werte der Standardabweichung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 4) für den Fall 3

Temperatur/ Feuchte-Punkt	Standard- abweichung CIV 3 [kV]	Standard- abweichung CEV 3 [kV]
B/30	0,91	0,73
B/40	0,53	0,93
B/60	1,65	1,21
B/80	1,12	1,01
D/20	0,93	1,16
D/40	0,47	1,20
D/60	0,71	1,70
D/80	0,85	1,13

Tabelle 8-41: Berechnete Werte der Koronaeinsetzungsfeldstärke für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 4)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	ECIV 1 [kV/mm]	ECEV 1 [kV/mm]	ECIV 2 [kV/mm]	ECIV 2 [kV/mm]	ECIV 3 [kV/mm]	ECEV 3 [kV/mm]
B/30	1,78	1,46	1,94	1,84	1,58	1,43
B/40	1,66	1,50	1,96	1,77	1,31	1,07
B/60	1,11	0,90	1,61	1,42	1,29	1,15
B/80	0,56	0,47	0,74	0,65	0,74	0,65
D/20	1,53	1,24	1,95	1,75	1,51	1,24
D/40	1,31	1,12	1,98	1,81	1,51	1,28
D/60	0,91	0,66	1,16	0,88	1,16	0,88
D/80	0,69	0,48	0,87	0,67	0,69	0,50

8.1.2 Diagrammauswertung

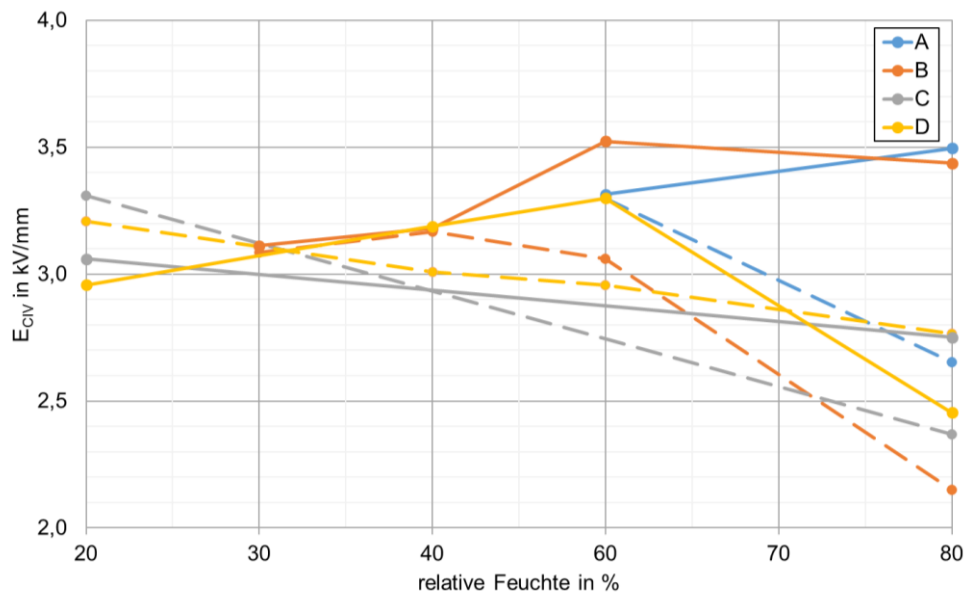


Bild 8-1: Verlauf der Koronaeinsatzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Platte-Platte-Modell ohne Spacer (durchgezogen) / mit Spacer (strichliert) für $d = 5$ mm)

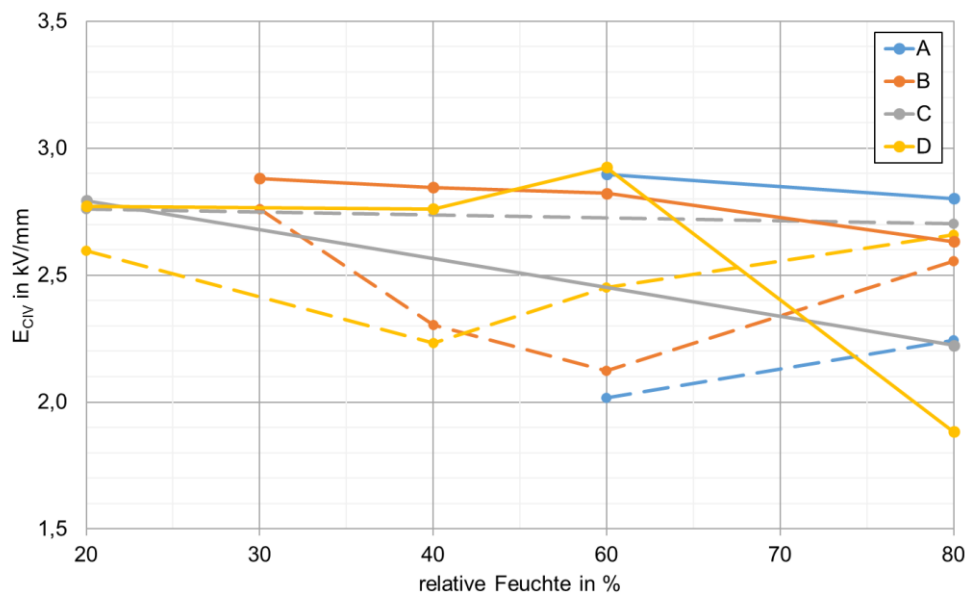


Bild 8-2: Verlauf der Koronaeinsatzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Platte-Platte-Modell ohne Spacer (durchgezogen) / mit Spacer (strichliert) für $d = 7,5$ mm)

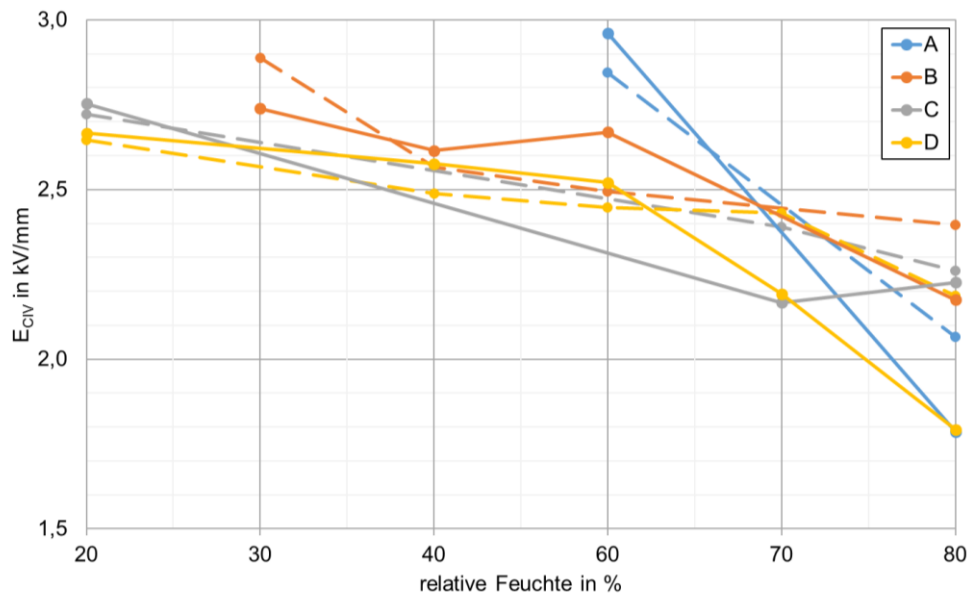


Bild 8-3: Verlauf der Koronaeinsetzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Stab-Stab-Modell ohne Spacer (durchgezogen) / mit Spacer (strichliert) für $d = 7,5$ mm)

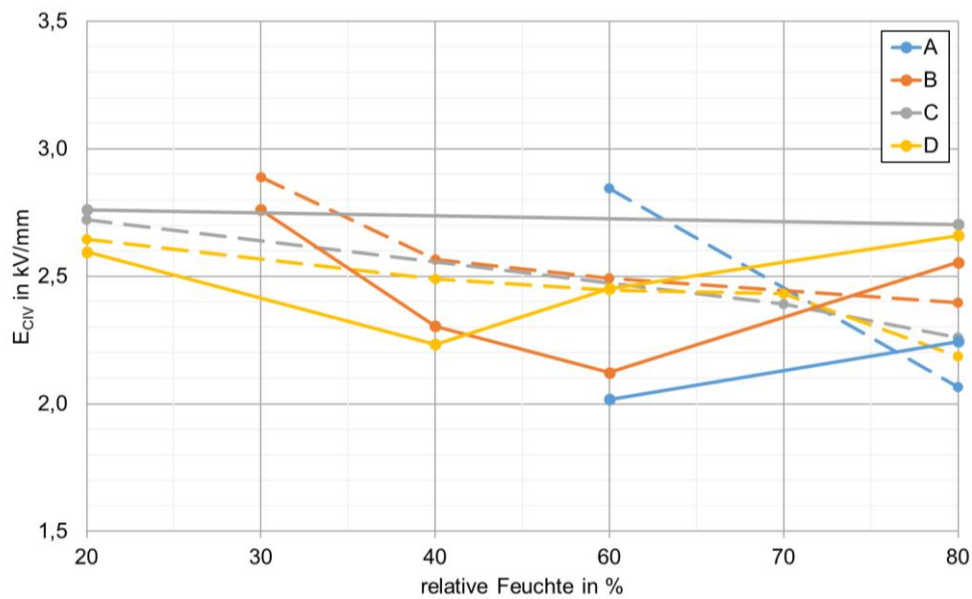


Bild 8-4: Vergleich der Feldstärkeverläufe E_{CIV} des Platte-Platte-Modells mit Spacer (durchgezogen) mit dem Stab-Stab-Modell mit Spacer (strichliert) für $d = 7,5$ mm

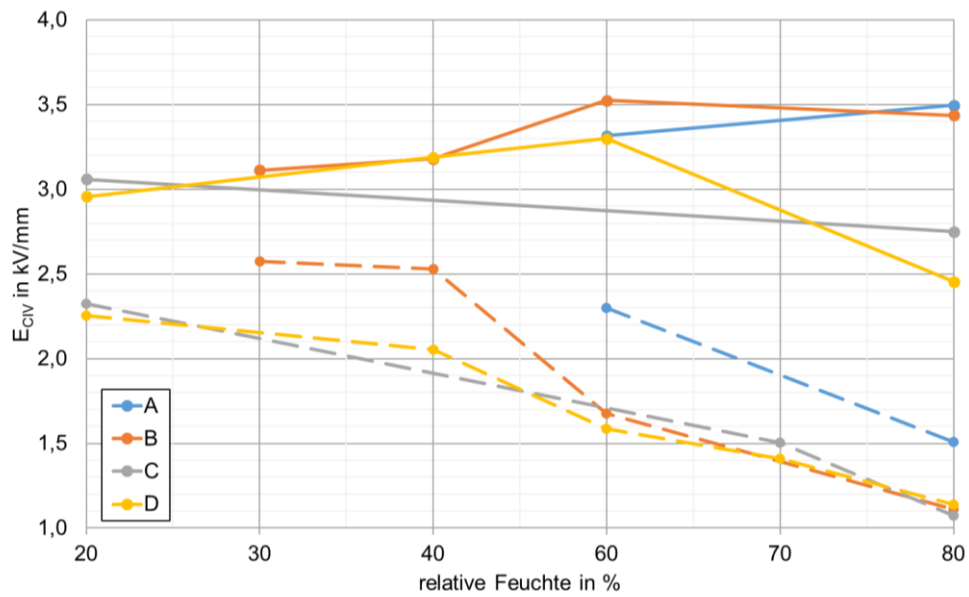


Bild 8-5: Vergleich der Feldstärkeverläufe E_{CIV} des Platte-Platte-Modells mit Spacer (durchgezogen) mit dem Stab-Stab-Modell mit Spacer (strichliert) für $d = 5$ mm

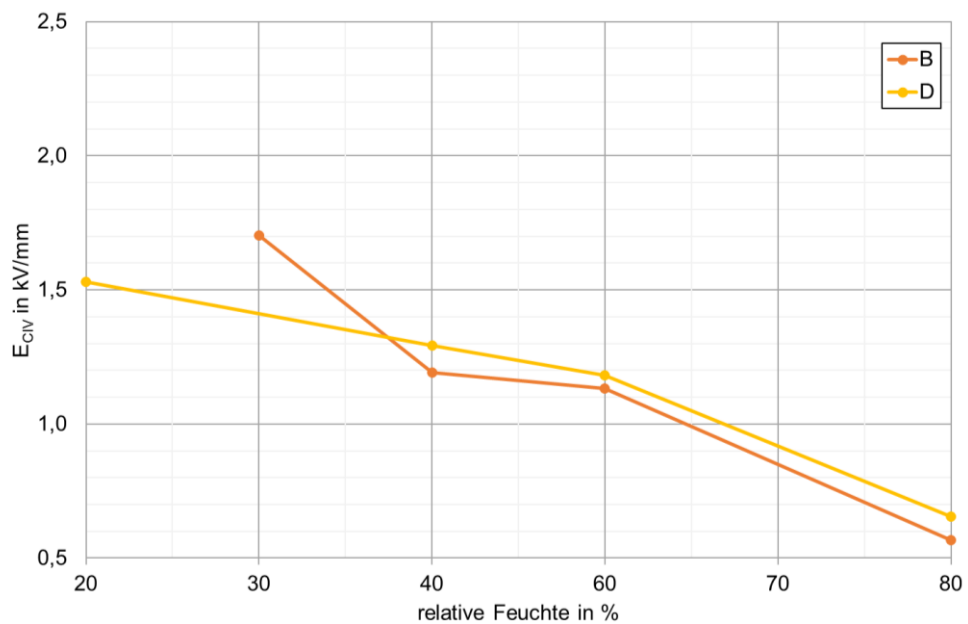


Bild 8-6: Verlauf der Koronaeinsetzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Wickelkopfmodell Konfiguration 1)

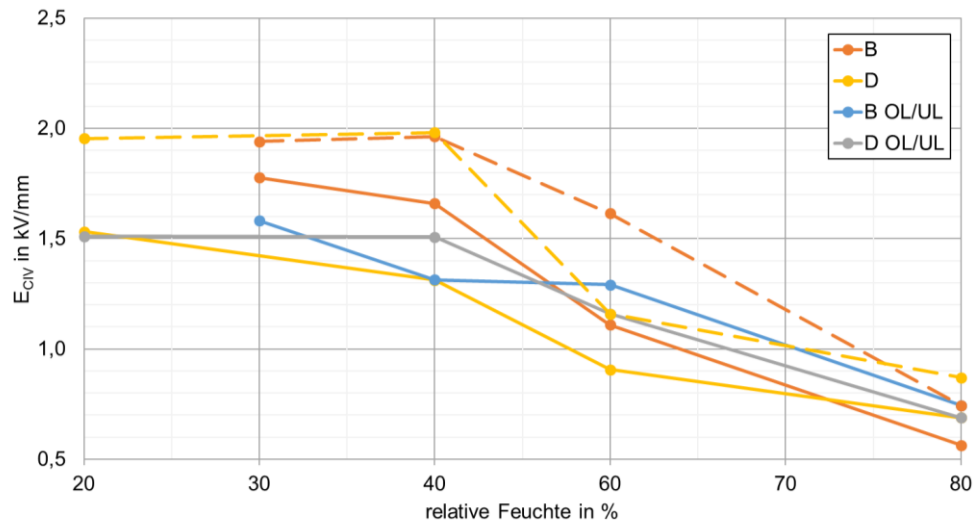


Bild 8-7: Verlauf der Koronaeinsatzfeldstärke E_{CIV} über der relativen Feuchte (Wickelkopfmodell Konfiguration 4 – Phasentrennstelle Unterlage (durchgezogen), Phasentrennstelle Oberlage (strichliert))

8.1.3 Detaillierte Auswertung der elektrischen Teilentladungsmessungen

In dieser Auswertung entsprechen die Einsatzspannungen dem tatsächlich an der gesamten Anordnung anliegenden Spannungswert und nicht dem auf den Luftspalt umgerechneten Wert. Die Teilentladungswerte entsprechen dem Q_{IEC} -Wert beim Einsetzen der Entladungen (Q_{CIV}) sowie beim Auftreten stationärer Entladungen (Q_{stat}).

Tabelle 8-42: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspalt von $d = 5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	21,5	106,7	106,7	295,8	295,8
A/80	22,7	112,1	158,0	276,4	296,0
B/30	20,2	163,3	163,3	296,4	298,4
B/40	20,6	190,6	190,6	295,6	295,6
B/60	22,9	189,2	189,2	297,2	297,2
B/80	22,3	76,9	176,8	274,0	298,0
C/20	19,9	125,9	125,9	292,4	292,4
C/80	17,9	0,5	4,1	296,8	283,2
D/20	19,2	128,5	128,5	294,6	294,6
D/40	20,7	261,3	261,3	295,8	295,8
D/60	21,4	110,8	110,8	295,6	295,6
D/80	15,9	0,1	2,3	305,6	295,6

Tabelle 8-43: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspalt von $d = 7,5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	26,1	5,8	122,1	288,2	295,4
A/80	25,2	4,8	32,9	288,0	293,2
B/30	25,9	141,0	141,0	294,6	294,6
B/40	25,6	169,4	169,4	296,2	296,2
B/60	25,4	9,9	164,0	293,6	295,8
B/80	23,7	0,1	7,6	287,2	298,6
C/20	25,1	147,3	147,3	295,2	295,2
C/80	20,0	1,3	10,5	289,6	299,4
D/20	24,9	143,3	143,3	295,6	295,6
D/40	24,8	255,3	255,3	295,4	295,4
D/60	26,3	17,8	258,9	296,6	296,8
D/80	16,9	0,2	4,5	288,6	284,8

Tabelle 8-44: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Platte-Platte-Modell mit einem Luftspalt von $d = 10 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	33,2	17,6	199,4	296,6	293,6
A/80	31,4	11,8	36,6	292,4	291,6
B/30	32,6	139,2	139,2	293,8	293,8
B/40	32,5	127,7	127,7	293,8	293,8
B/60	32,1	0,2	181,7	279,0	295,4
B/80	30,4	0,1	13,9	276,6	297,2
C/20	32,2	157,0	157,0	293,0	293,0
C/80	27,8	0,1	13,4	319,6	290,0
D/20	31,6	159,1	159,1	294,0	294,0
D/40	30,9	187,1	187,1	295,0	295,0
D/60	33,4	4,8	309,6	285,0	295,6
D/80	27,9	0,3	55,1	303,6	297,4

Tabelle 8-45: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	21,4	9,8	42,5	288,6	293,8
A/80	17,2	1,1	27,8	297,6	289,2
B/30	20,0	48,3	48,3	296,6	296,6
B/40	20,6	46,0	46,0	296,8	296,8
B/60	19,9	3,3	33,4	289,0	291,2
B/80	14,0	0,2	26,5	272,4	293,8
C/20	21,5	66,0	66,0	297,2	297,2
C/80	15,4	0,2	2,9	268,0	308,0
D/20	20,8	66,9	66,9	295,2	295,2
D/40	19,5	7,1	38,9	287,8	293,8
D/60	19,2	1,9	33,2	299,6	295,0
D/80	18,0	0,2	3,7	277,4	295,2

Tabelle 8-46: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 7,3 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV} \text{ [kV]}$	$Q_{CIV} \text{ [nC]}$	$Q_{stat} \text{ [nC]}$	$n_{CIV} \text{ [PD/}2\pi\text{]}$	$n_{stat} \text{ [PD/}2\pi\text{]}$
A/60	17,7	0,8	39,2	297,0	291,6
A/80	19,7	0,7	7,6	292,4	287,2
B/30	24,3	1,8	67,0	292,6	292,8
B/40	20,3	1,8	51,5	297,2	294,0
B/60	18,7	4,0	48,6	285,0	292,8
B/80	22,5	0,1	1,4	346,0	294,0
C/20	24,3	11,3	84,2	266,0	295,6
C/80	23,8	1,5	9,6	296,0	288,6
D/20	22,8	8,5	84,7	292,6	297,2
D/40	19,6	3,2	32,0	287,8	293,2
D/60	21,6	1,6	63,7	292,6	294,2
D/80	23,4	0,7	7,4	298,2	290,4

Tabelle 8-47: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Platte-Platte-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 10 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	$\hat{U}_{CIV} \text{ [kV]}$	$Q_{CIV} \text{ [nC]}$	$Q_{stat} \text{ [nC]}$	$n_{CIV} \text{ [PD/}2\pi\text{]}$	$n_{stat} \text{ [PD/}2\pi\text{]}$
A/60	28,7	7,3	58,4	293,0	296,8
A/80	22,5	2,5	18,3	303,2	292,0
B/30	35,4	115,9	115,9	295,4	295,4
B/40	25,6	5,4	42,0	293,6	294,4
B/60	23,9	2,4	14,9	288,8	292,0
B/80	21,7	0,9	9,6	315,8	287,4
C/20	34,8	120,2	120,2	291,6	291,6
C/80	28,0	4,4	20,8	300,4	291,6
D/20	34,4	114,2	114,2	295,2	295,2
D/40	27,1	12,1	83,9	285,8	295,8
D/60	24,7	0,5	12,5	300,8	291,2
D/80	20,4	0,4	4,8	344,0	290,6

Tabelle 8-48: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{civ} [kV]	Q_{civ} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{civ} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	15,7	2,1	6,6	303,2	293,8
A/80	10,3	0,4	3,7	292,8	312,8
B/30	17,6	1,9	11,9	303,4	290,4
B/40	17,2	4,6	17,7	289,4	294,2
B/60	11,4	0,5	4,5	292,2	300,4
B/80	7,6	0,2	2,9	289,0	313,2
C/20	15,9	3,3	41,0	289,4	294,0
C/70	10,3	0,3	4,4	288,6	289,4
C/80	7,3	0,1	2,5	301,6	302,4
D/20	15,4	1,7	42,3	284,0	293,4
D/40	14,0	0,9	15,4	293,6	293,6
D/60	10,8	0,6	3,6	292,0	306,0
D/70	9,6	0,2	3,2	288,0	312,0
D/80	7,8	0,1	4,4	294,4	314,4

Tabelle 8-49: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 7,5 \text{ mm}$

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{civ} [kV]	Q_{civ} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{civ} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	27,6	7,7	65,2	304,4	304,0
A/80	16,6	0,7	11,0	312,4	300,6
B/30	25,5	5,3	55,5	300,0	294,4
B/40	24,4	1,5	67,9	299,2	301,8
B/60	24,9	6,7	25,8	300,6	297,4
B/80	20,3	5,9	9,2	320,6	295,0
C/20	25,7	7,7	84,5	293,4	296,0
C/70	20,2	0,4	14,1	315,6	299,2
C/80	20,7	3,5	13,1	310,2	296,0
D/20	24,8	18,9	75,6	295,0	293,4
D/40	24,0	2,2	55,8	296,0	293,6
D/60	23,5	7,2	16,2	292,6	298,0
D/70	20,4	4,9	15,6	291,0	302,2
D/80	16,7	1,3	10,9	316,4	293,6

Tabelle 8-50: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Stab-Stab-Modell mit einem Luftspaltabstand von $d = 15,6$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{civ} [kV]	Q_{civ} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{civ} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	45,5	466,1	466,1	297,0	297,0
A/80	37,7	1,2	21,2	328,2	302,6
B/30	44,7	282,4	282,4	295,4	295,4
B/40	44,3	320,7	320,7	296,2	296,2
B/60	42,2	0,9	334,2	326,0	297,0
B/80	36,2	0,8	99,8	327,6	296,4
C/20	44,1	261,1	261,1	294,6	294,6
C/80	33,7	0,6	45,6	310,2	300,2
D/20	42,7	242,1	242,1	293,6	333,6
D/40	38,8	67,8	67,8	297,4	297,4
D/60	37,3	0,5	155,4	295,8	313,0
D/80	33,9	0,5	24,5	330,2	298,4

Tabelle 8-51: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Stab-Stab-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{civ} [kV]	Q_{civ} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{civ} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	26,5	20,3	47,8	290,6	297,4
A/80	19,2	2,8	10,8	303,0	296,8
B/30	26,9	44,3	110,6	298,0	295,0
B/40	23,9	9,1	58,8	296,4	294,6
B/60	23,2	12,1	56,7	292,4	297,0
B/80	22,3	5,5	16,9	308,0	303,6
C/20	25,4	43,6	102,4	297,2	296,2
C/70	22,3	3,9	31,6	311,8	301,0
C/80	21,1	4,0	8,6	303,8	292,0
D/20	24,7	39,6	73,9	298,0	295,8
D/40	23,2	3,8	48,9	288,8	296,6
D/60	22,8	3,0	35,6	290,6	295,6
D/70	22,7	3,2	21,2	292,8	299,2
D/80	20,4	3,2	25,3	297,4	297,6

Tabelle 8-52: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Stab-Stab-Modell mit Spacer mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	35,6	16,7	89,4	297,0	297,6
A/80	31,0	3,6	14,5	300,2	298,8
B/30	34,7	10,8	100,0	296,2	298,4
B/40	33,4	2,5	168,0	298,2	298,6
B/60	29,9	4,1	24,5	296,8	298,8
B/80	25,8	0,7	5,1	324,2	308,4
C/20	34,1	1,9	286,1	295,2	297,4
C/70	31,1	3,2	14,9	318,2	297,6
C/80	30,0	1,3	11,6	330,4	300,6
D/20	34,0	6,9	195,2	297,8	296,4
D/40	34,1	6,2	212,1	301,0	295,8
D/60	32,4	5,4	48,2	299,2	298,2
D/70	32,1	2,1	11,7	318,6	301,8
D/80	21,9	0,3	5,8	314,0	302,2

Tabelle 8-53: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Stab-Stab-Modell mit unvorteilhafter Bandage $d = 7,5$ mm

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
A/60	27,7	54,3	151,2	296,2	295,8
A/80	20,8	3,2	9,8	307,6	300,2
B/30	27,1	9,2	148,0	291,6	297,2
B/40	25,2	3,5	65,0	288,4	296,8
B/60	26,0	5,2	81,3	300,4	296,2
B/80	18,1	0,5	8,5	311,8	297,6
C/20	28,3	83,5	260,1	297,2	294,8
C/70	21,7	1,9	14,2	307,0	297,8
C/80	17,5	3,3	14,9	310,0	302,4
D/20	30,1	123,9	286,5	284,4	295,8
D/40	22,8	1,1	47,9	312,2	296,4
D/60	21,9	1,1	21,7	316,6	293,8
D/70	17,1	0,2	3,6	309,0	293,0
D/80	12,2	0,3	2,6	294,4	307,8

Tabelle 8-54: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 1)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
B/30	29,7	5,3	12,0	294,2	287,6
B/40	20,7	0,4	5,0	280,2	300,8
B/60	19,7	0,2	7,4	319,2	297,0
B/80	9,9	0,1	0,6	307,8	314,4
D/20	26,7	2,1	15,1	284,4	288,8
D/40	22,5	1,6	4,0	306,4	306,6
D/60	20,6	0,3	2,3	314,8	294,2
D/80	11,4	0,2	2,8	299,2	313,0

Tabelle 8-55: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 2)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
B/30	34,8	14,1	14,1	293,8	293,8
B/40	35,5	10,0	34,2	290,6	297,0
B/60	26,5	0,7	2,4	285,0	292,2
B/80	14,5	0,1	0,1	265,0	312,2
D/20	34,1	8,4	57,6	287,8	293,8
D/40	34,8	8,0	21,6	296,0	291,4
D/60	21,5	0,1	2,6	280,2	302,6
D/80	12,3	0,1	0,6	251,4	287,6

Tabelle 8-56: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 3)

Temperatur/ Feuchte-Punkt	\hat{U}_{CIV} [kV]	Q_{CIV} [nC]	Q_{stat} [nC]	n_{CIV} [PD/2 π]	n_{stat} [PD/2 π]
B/30	23,6	0,7	3,1	301,2	306,6
B/40	25,8	0,9	8,0	304,8	302,4
B/60	27,8	0,6	2,3	294,8	301,2
B/80	18,3	0,2	2,3	305,0	301,2
D/20	24,1	0,7	2,5	302,8	305,0
D/40	28,3	1,1	3,7	298,6	296,0
D/60	19,8	0,1	1,2	308,0	299,6
D/80	13,2	0,2	2,2	304,6	310,4

Tabelle 8-57: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung (Entladungsamplitude) für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 4) - Eins entspricht jeweils den Entladungen in der Unterlage, zwei in der Oberlage und drei zwischen Oberlage und Unterlage.

Temperatur/ Feuchte- Punkt	$\hat{U}_{\text{CIV 1}}$ [kV]	$\hat{U}_{\text{CIV 2}}$ [kV]	$\hat{U}_{\text{CIV 3}}$ [kV]	$Q_{\text{CIV 1}}$ [nC]	$Q_{\text{CIV 2}}$ [nC]	$Q_{\text{CIV 3}}$ [nC]
B/30	31,0	33,8	27,5	5,9	18,6	0,9
B/40	28,9	34,2	22,9	11,3	20,7	1,1
B/60	19,3	28,1	22,5	0,3	4,3	1,3
B/80	9,8	13,0	13,0	0,2	0,2	0,2
D/20	26,7	34,0	26,3	4,0	23,6	4,0
D/40	22,9	34,5	26,3	1,3	37,1	3,5
D/60	15,8	20,2	20,2	0,1	0,3	0,3
D/80	12,0	15,2	12,0	0,1	0,2	0,1

Tabelle 8-58: Messwerte der elektrischen Teilentladungsmessung (Anzahl der Entladungen) für das Wickelkopfmodell mit einem Abstand von $d = 15,6$ mm (Konfiguration 4) - Eins entspricht jeweils den Entladungen in der Unterlage, zwei in der Oberlage und drei zwischen Oberlage und Unterlage.

Temperatur/ Feuchte- Punkt	$\hat{U}_{\text{CIV 1}}$ [kV]	$\hat{U}_{\text{CIV 2}}$ [kV]	$\hat{U}_{\text{CIV 3}}$ [kV]	$n_{\text{CIV 1}}$ [PD/2 π]	$n_{\text{CIV 2}}$ [PD/2 π]	$n_{\text{CIV 3}}$ [PD/2 π]
B/30	31,0	33,8	27,5	298,4	288,8	300,0
B/40	28,9	34,2	22,9	295,8	308,2	302,2
B/60	19,3	28,1	22,5	304,2	303,6	300,6
B/80	9,8	13,0	13,0	307,2	310,0	310,0
D/20	26,7	34,0	26,3	300,0	286,6	300,0
D/40	22,9	34,5	26,3	301,4	296,0	296,0
D/60	15,8	20,2	20,2	307,4	306,2	306,2
D/80	12,0	15,2	12,0	307,8	308,4	307,8

8.2 Anhang B: Detaillierte Auswertung der Finiten-Elemente-Berechnungen

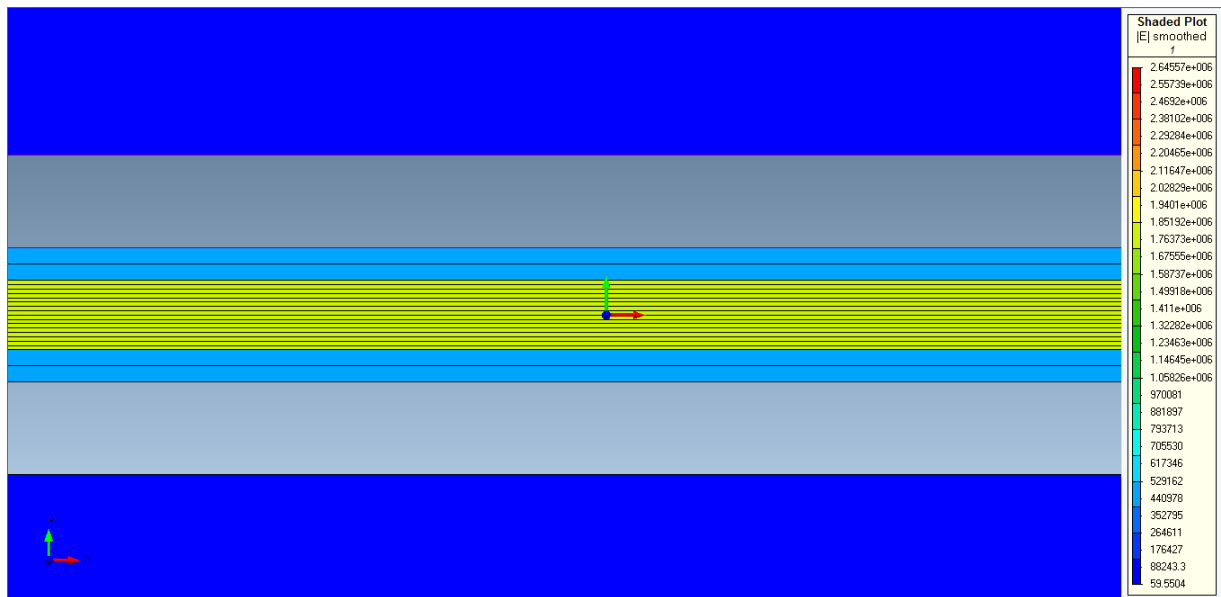


Bild 8-8: Feldbild Modell 1

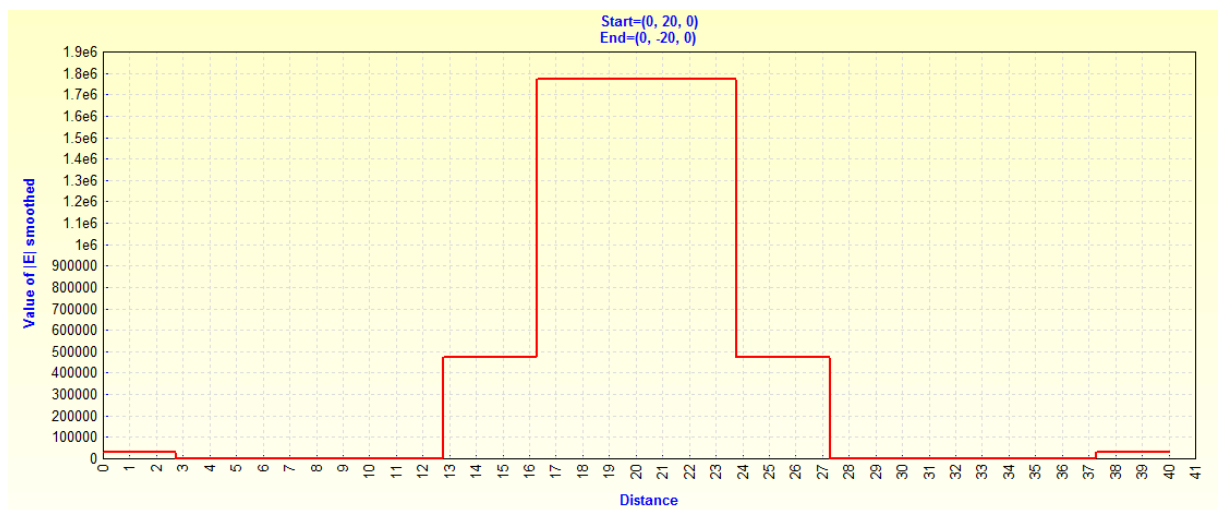


Bild 8-9: Feldstärkeverlauf Modell 1 ausgewertet in der Mitte des Modells

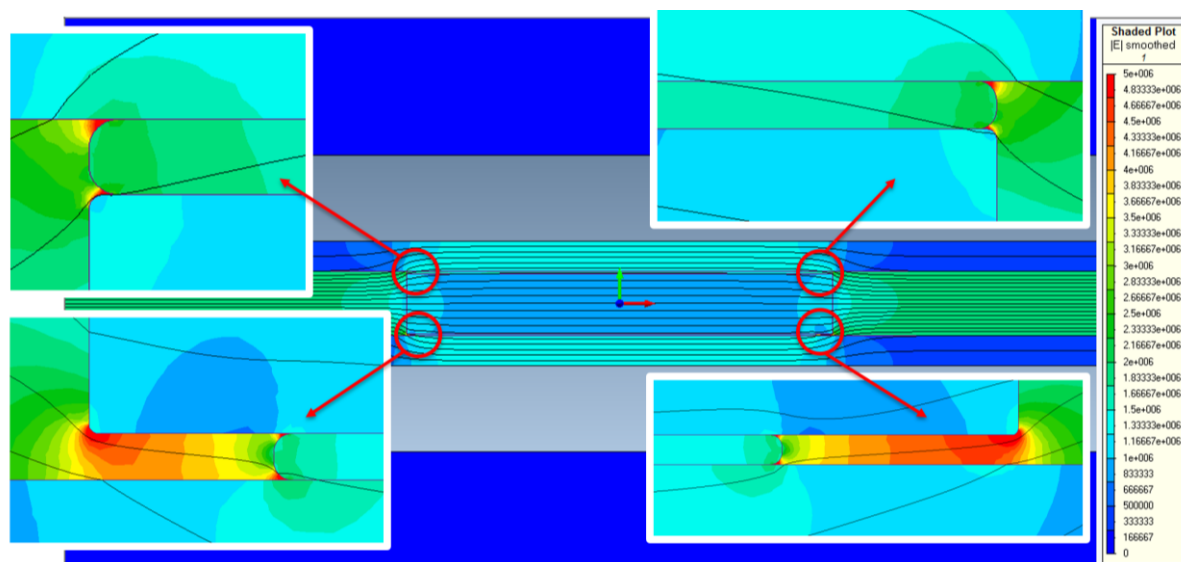


Bild 8-10: Feldbild Modell 2 - Konfiguration 1 (0,25 mm Vlies)

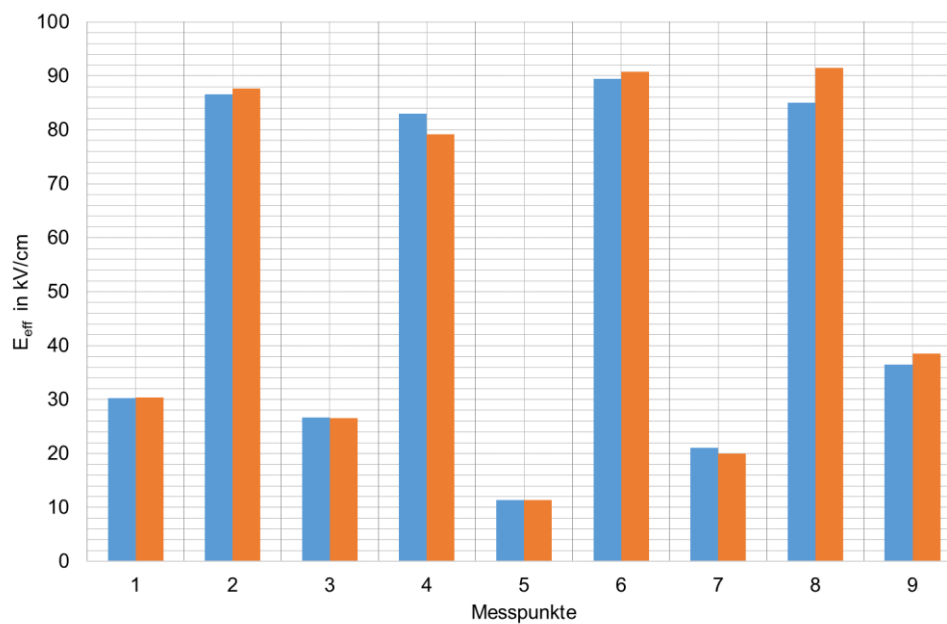


Bild 8-11: Feldstärkeverlauf Modell 2 - Konfiguration 1 (0,25 mm Vlies)

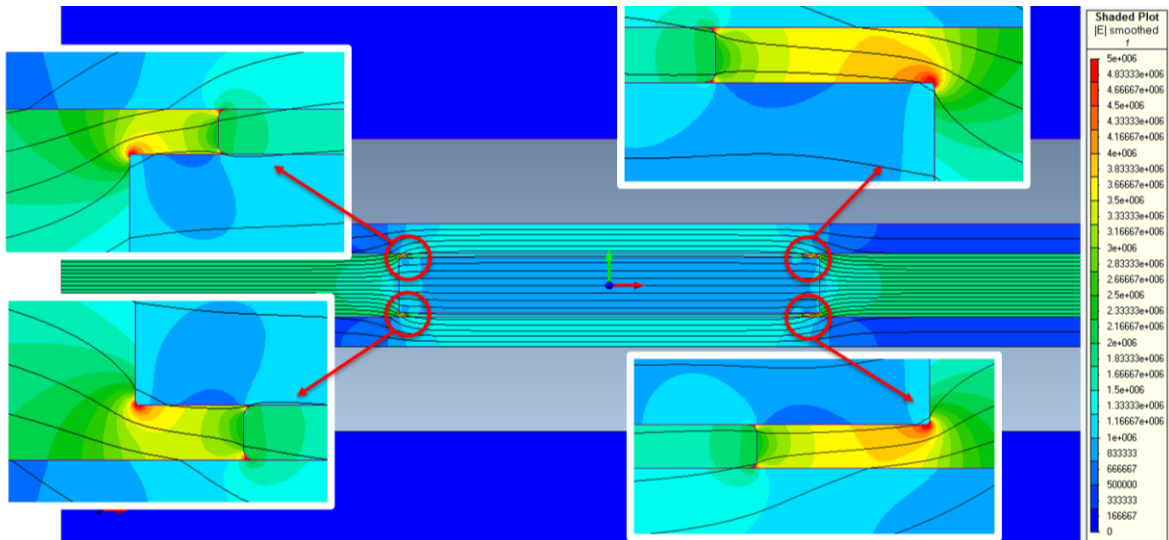


Bild 8-12: Feldbild Modell 3 - Konfiguration 1 (0,5 mm Vlies)

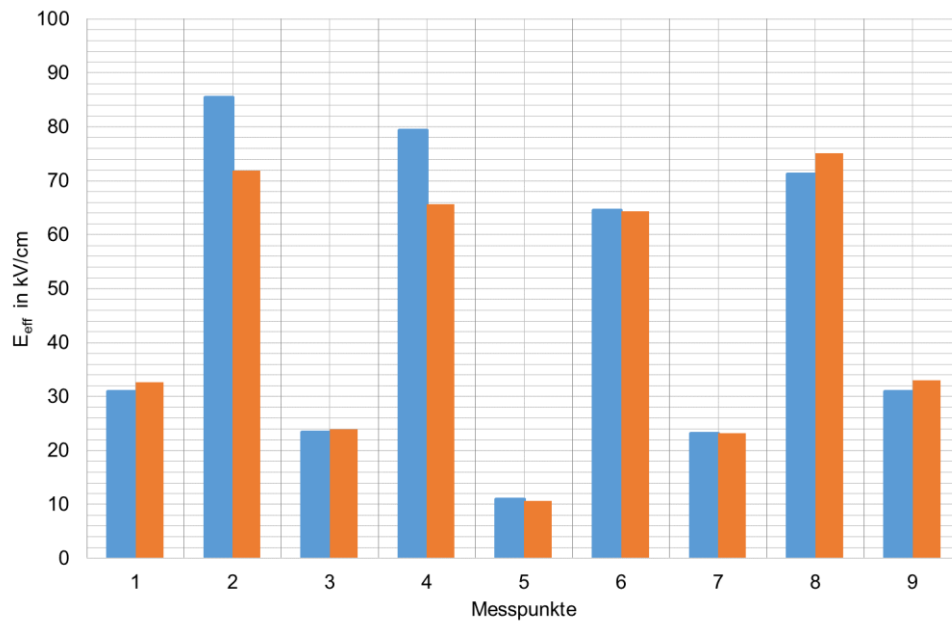


Bild 8-13: Feldstärkeverlauf Modell 3 - Konfiguration 1 (0,5 mm Vlies)

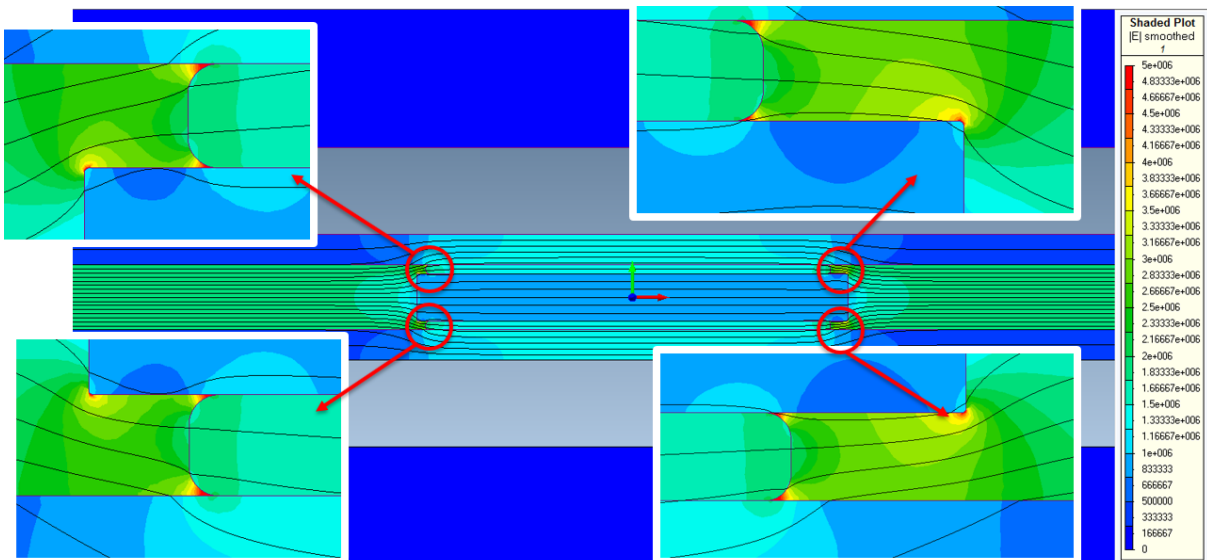


Bild 8-14: Feldbild Modell 3 - Konfiguration 2 (1 mm Vlies)

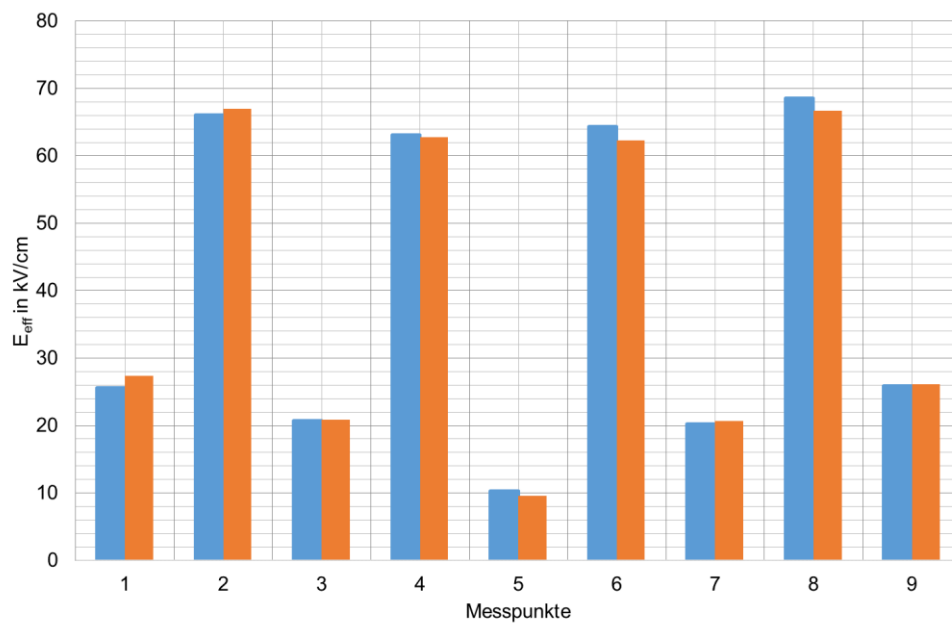


Bild 8-15: Feldstärkeverlauf Modell 3 - Konfiguration 2 (1 mm Vlies)

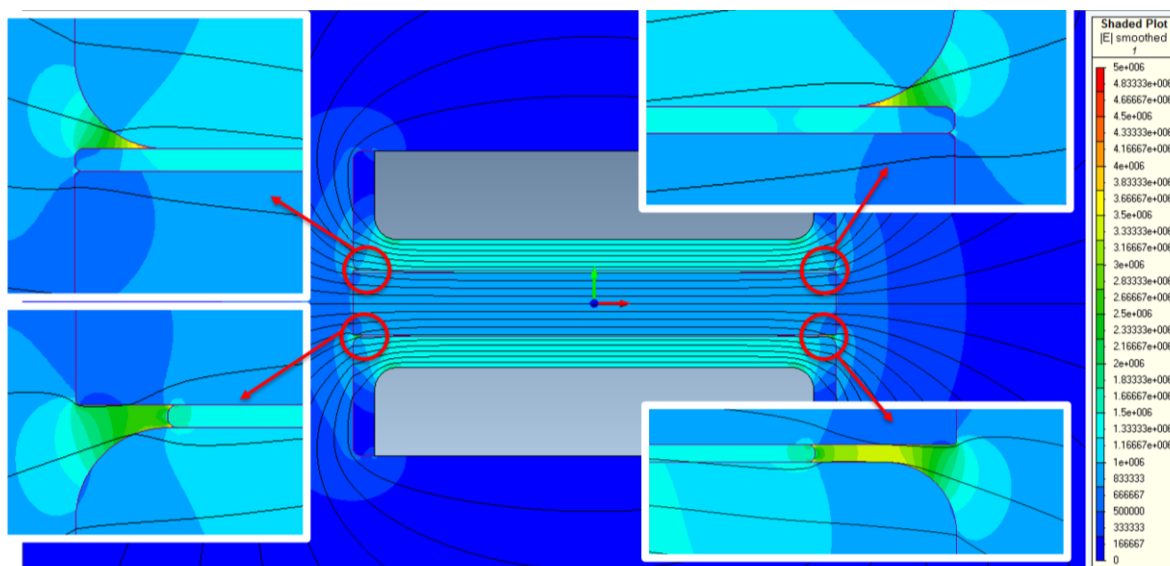


Bild 8-16: Felddbild Modell 4 - Konfiguration 1 (0,25 mm Vlies)

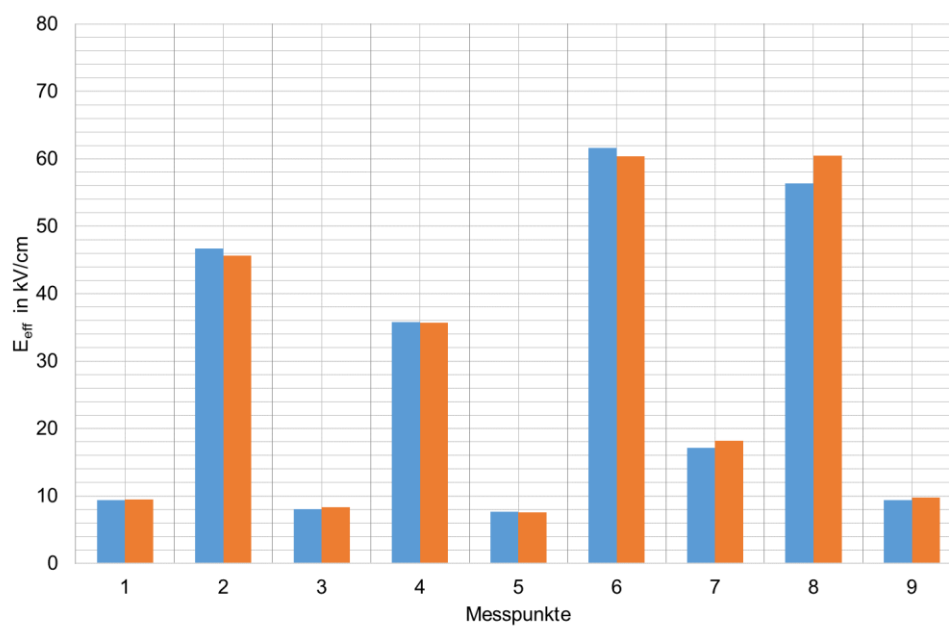


Bild 8-17: Feldstärkeverlauf Modell 4 - Konfiguration 1 (0,25 mm Vlies)

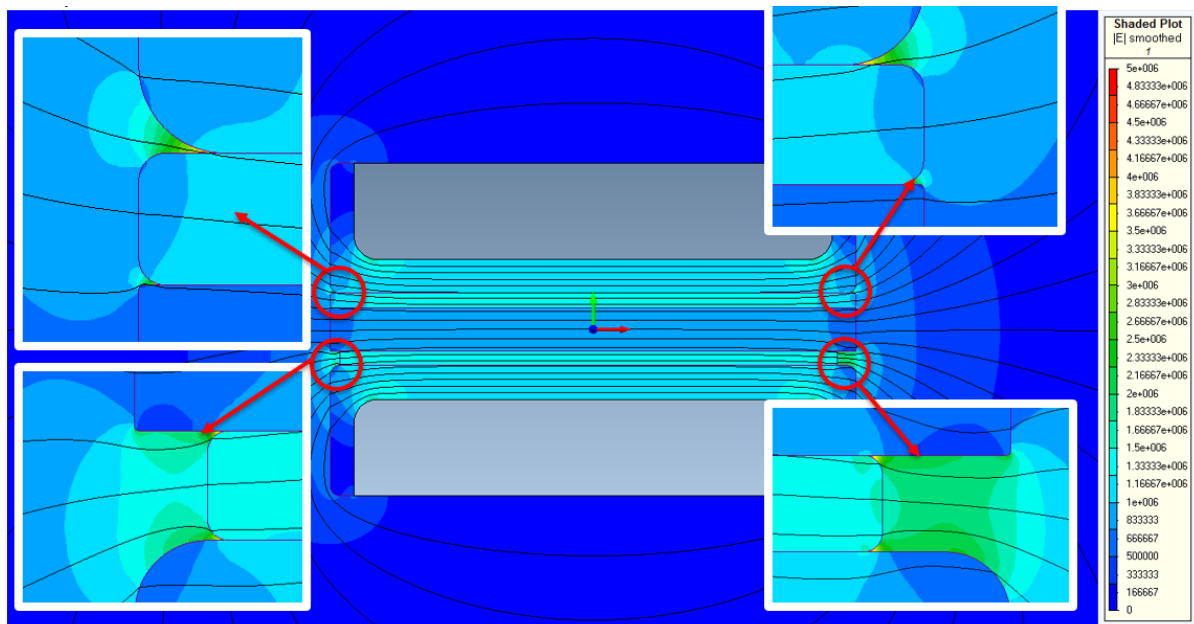


Bild 8-18: Feldbild Modell 4 - Konfiguration 2 (1,5 mm Vlies)

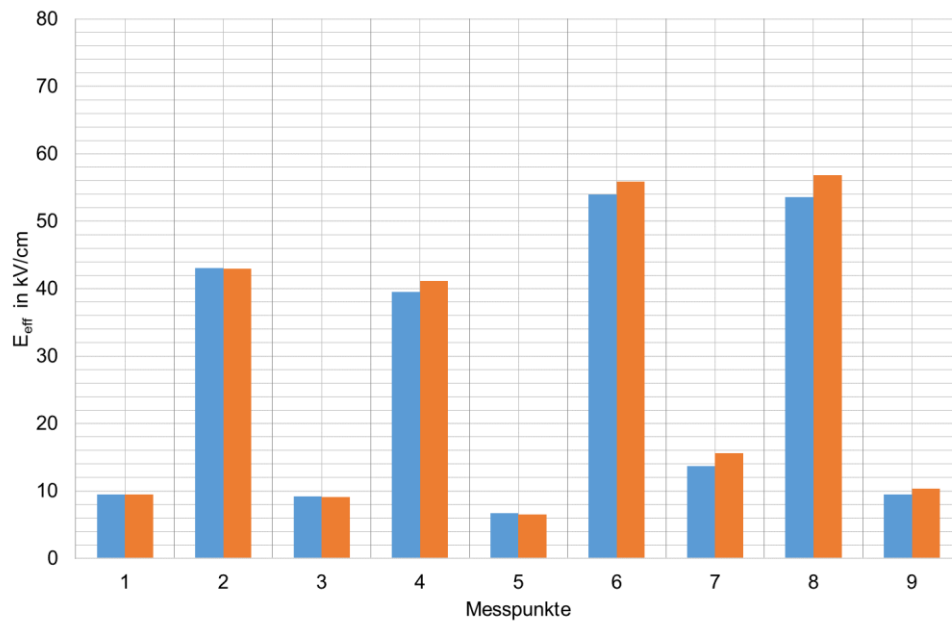


Bild 8-19: Feldstärkeverlauf Modell 4 - Konfiguration 2 (1,5 mm Vlies)

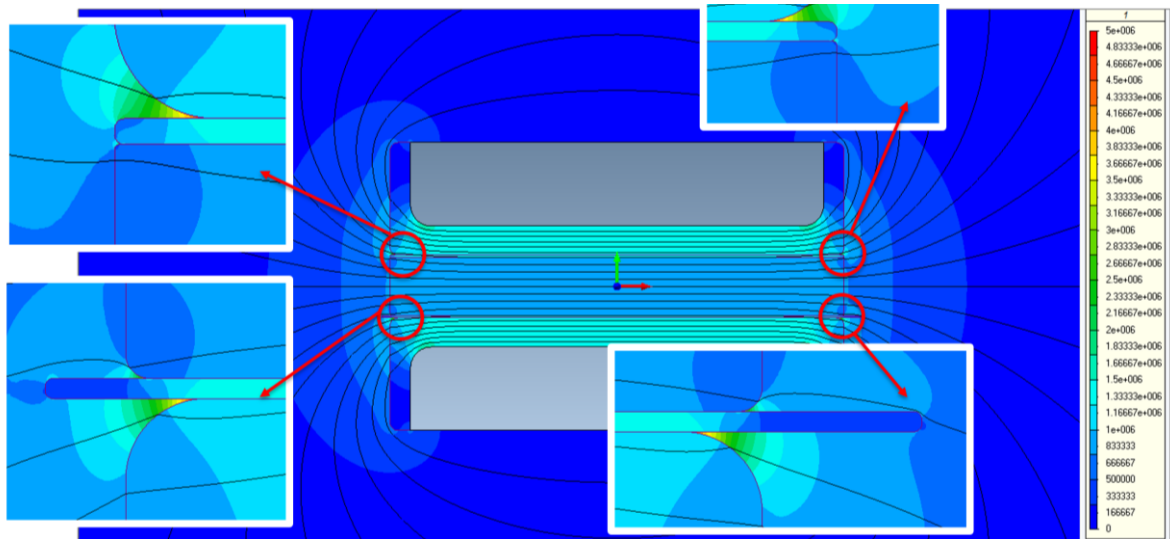


Bild 8-20: Feldbild Modell 5 - Konfiguration 1 (0,25 mm Vlies)

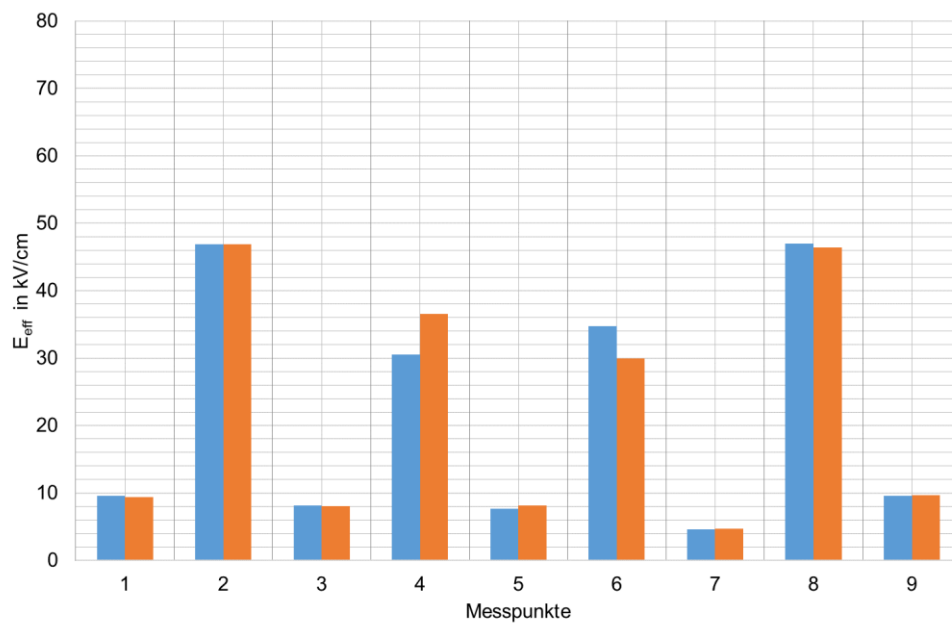


Bild 8-21: Feldstärkeverlauf Modell 5 - Konfiguration 1 (0,25 mm Vlies)

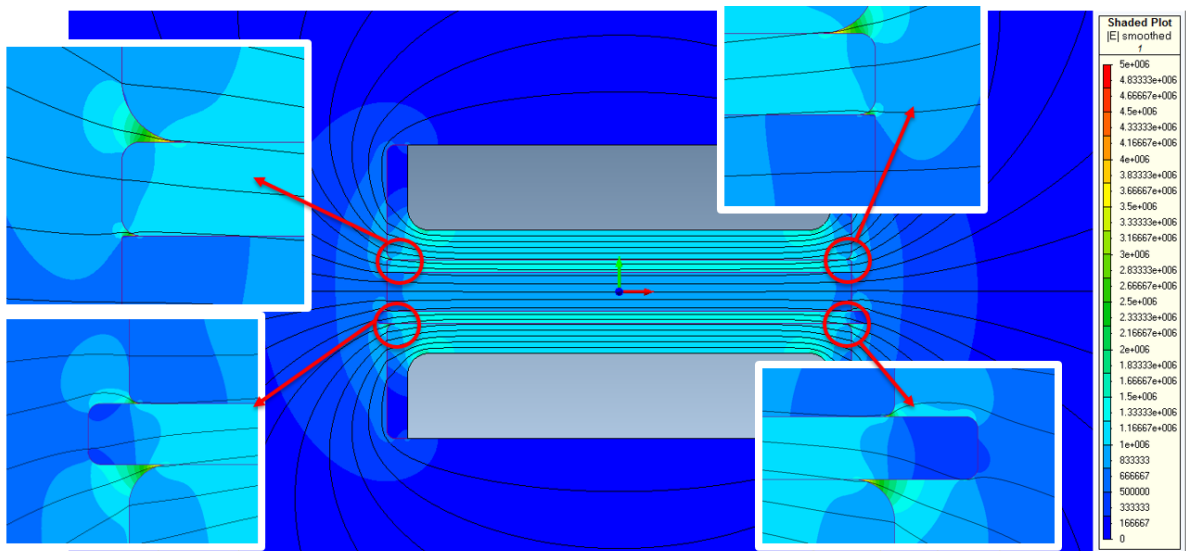


Bild 8-22: Feldbild Modell 5 - Konfiguration 2 (1,5 mm Vlies)

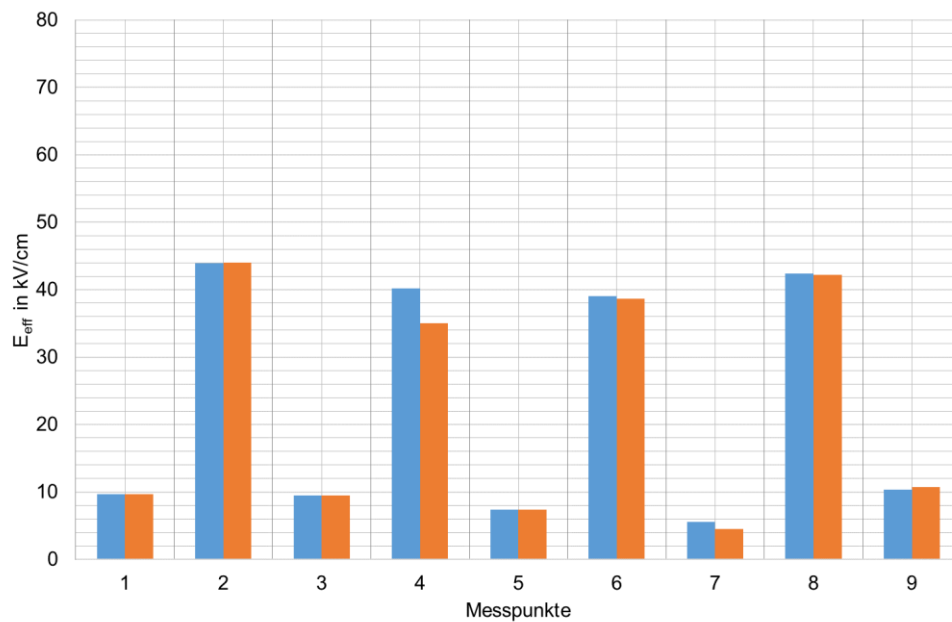


Bild 8-23: Feldstärkeverlauf Modell 5 - Konfiguration 2 (1,5 mm Vlies)

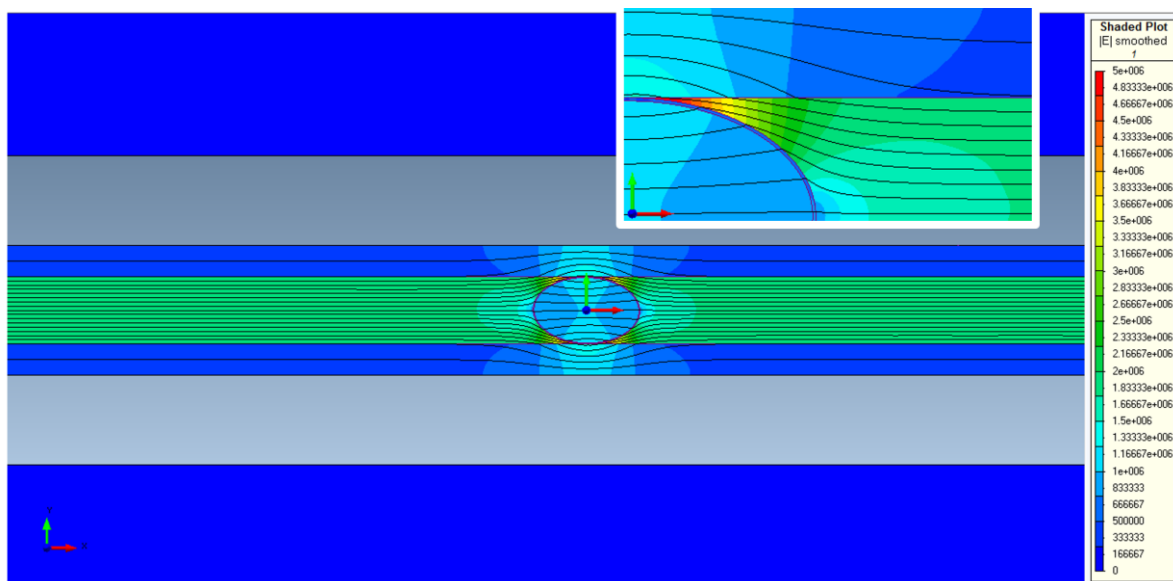


Bild 8-24: Feldbild Modell 6 - 0,1 mm Hülle Stützschlauch (relative Permittivität 11,7)

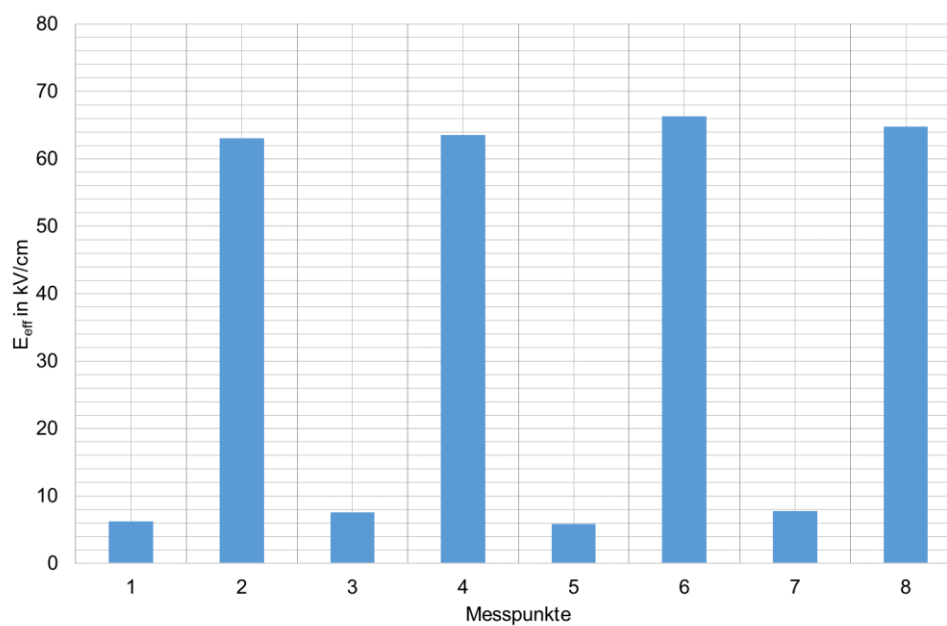


Bild 8-25: Feldstärkeverlauf Modell 6 - 0,1 mm Hülle Stützschlauch (relative Permittivität 11,7)

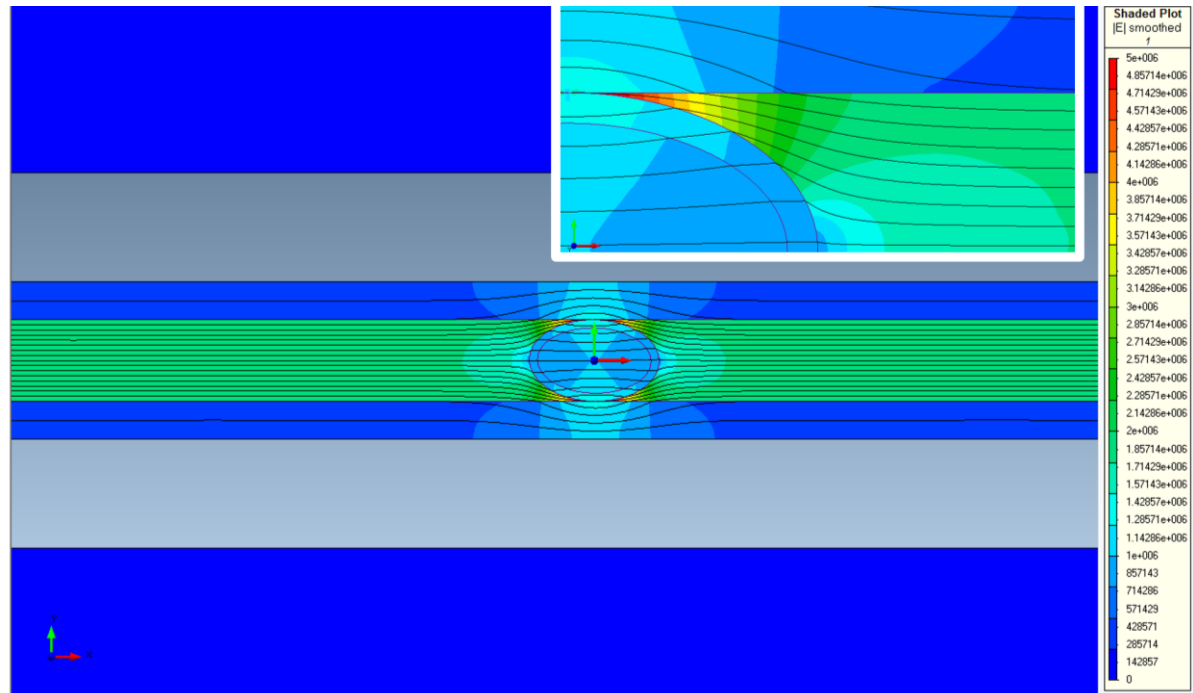


Bild 8-26: Feldbild Modell 6 - 0,75 mm Hülle Stützschlauch (relative Permittivität 3,8)

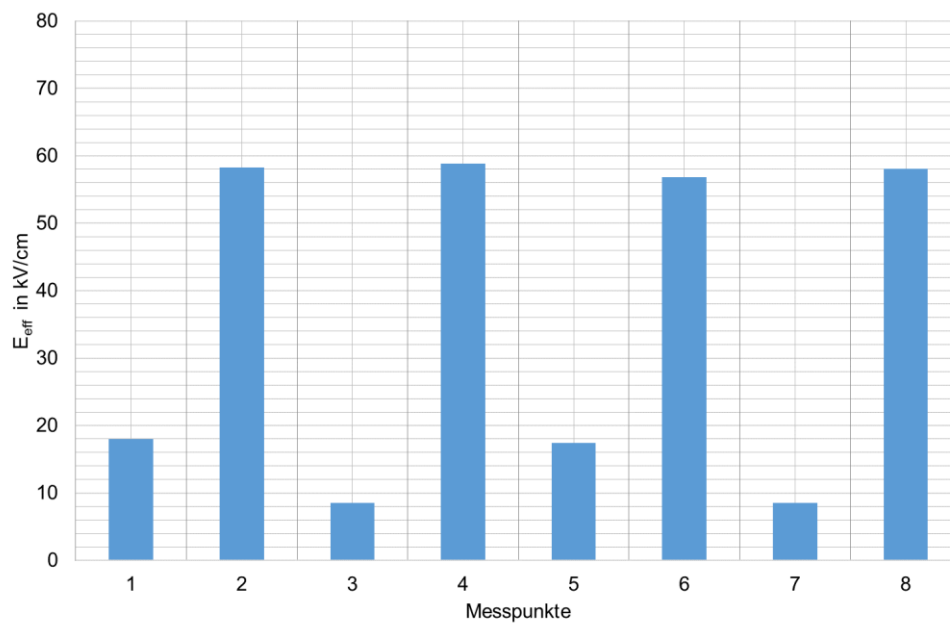


Bild 8-27: Feldstärkeverlauf Modell 6 - 0,75 mm Hülle Stützschlauch (relative Permittivität 3,8)

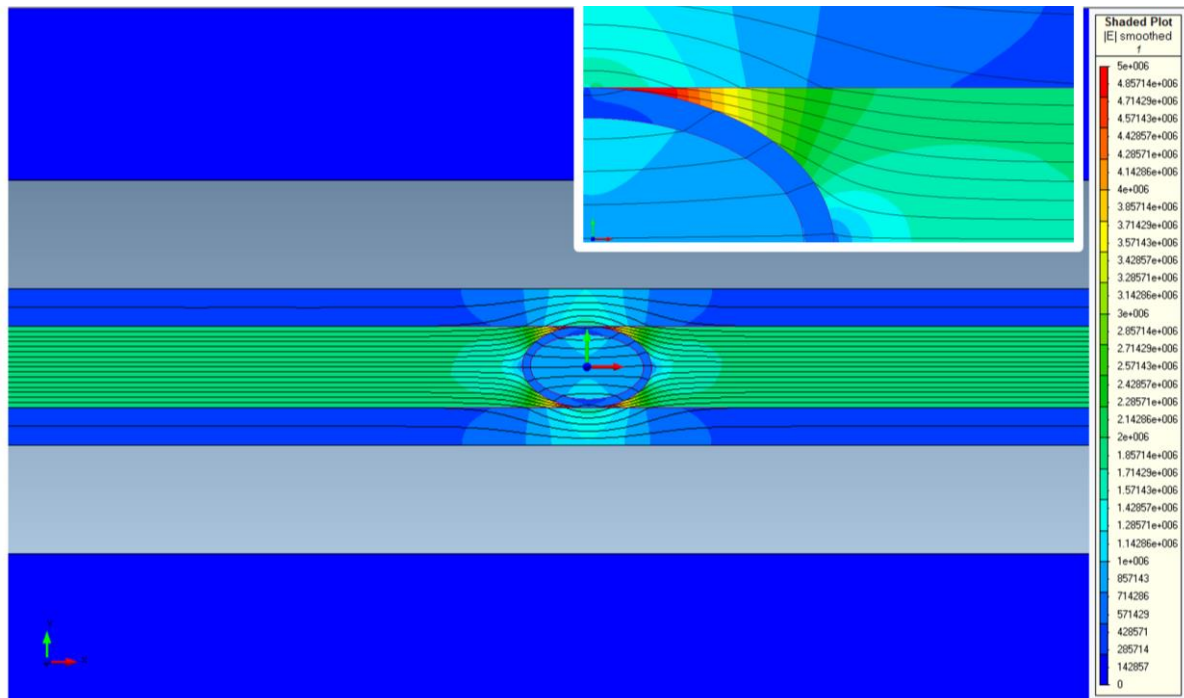


Bild 8-28: Felddiagramm Modell 6 - 0,75 mm Hülle Stützschauch (relative Permittivität 11,7)

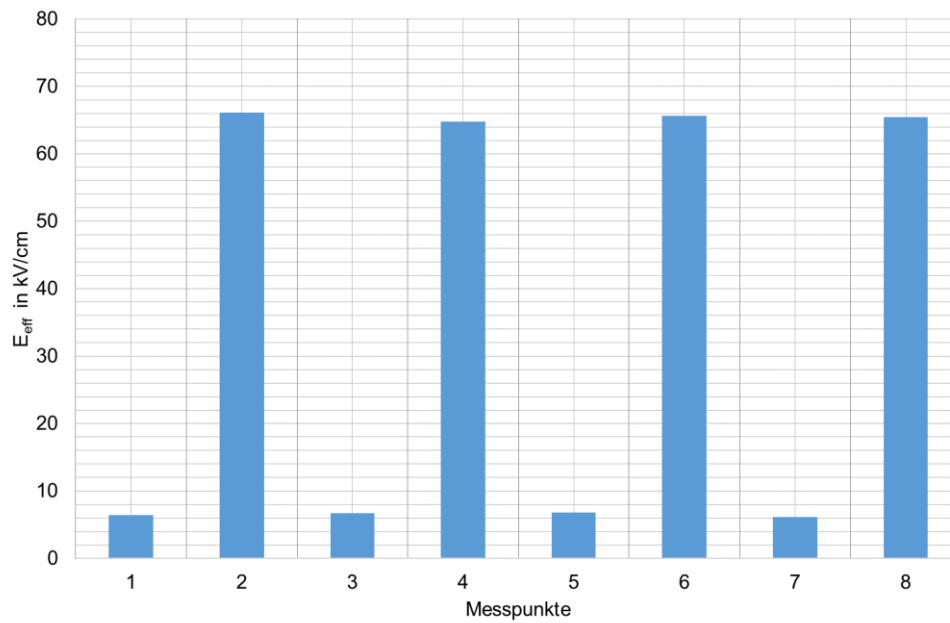


Bild 8-29: Feldstärkeverlauf Modell 6 - 0,75 mm Hülle Stützschauch (relative Permittivität 11,7)