

ZUR BEWERTUNG DER EINFLÜSSE AUF DIE PRÜFUNG DER DURCHSCHLAGFESTIGKEIT POLYMERER ISOLIERSTOFFE

Sebastian Braun^{1*}, Henry Hirte², Peter Werle¹, Stefan Kornhuber²

¹Leibniz Universität Hannover

²Hochschule Zittau / Görlitz

Dieser Beitrag dient der zusammenfassenden Darstellung der versuchstechnischen Parameter, die die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit polymerer Isolierstoffe beeinflussen. Da die Messmethode verschiedene spezifische Ausprägungen besitzt, sei angemerkt, dass hier ausschließlich die Untersuchung polymerer Plattenprüflinge betrachtet wird. Der Fokus soll dabei gezielt auf den vorbereitenden Tätigkeiten, wie der Einbettung der Probekörper sowie dem Einfluss der Elektrodenanordnung liegen, da hier viele Feinheiten einer präzisen Ausführung bedürfen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Hierzu werden mehrere Versuchsreihen aus zwei verschiedenen Laboren mit verschiedenen Parametern in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt und evaluiert. Die Auswahl des Prüfmaterials und der Elektrodenform zeigen sich hierbei als die entscheidenden Faktoren, wie auch durch die Ergebnisse der Versuche bestätigt wird.

1. Einleitung

Für die Qualifizierung eines Materials als Prüfmaterial für Langzeitversuche muss zur Adaption an die späteren Prüfparameter ggf. von normativen Vorgaben abgewichen werden. Vergleichende Voruntersuchungen geben Aufschluss über das zu erwartende Durchschlagverhalten während langwieriger Lebensdaueruntersuchungen. Zudem sollte mit den hier dargestellten Voruntersuchungen der Versuchsablauf in beiden Laboren gegenseitig validiert werden.

2. Versuchsdurchführung und die Norm DIN EN 60243

Die in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen basieren auf der Norm DIN EN 60243, welche die Prüfung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen beschreibt. Die aktuelle Version dieser Norm für Wechselspannung ist die DIN EN 60243-1 in ihrer dritten Ausführung, die seit Januar 2014 gültig ist.[1]

Die Anforderungen an die zu untersuchenden Probekörper werden gemäß den Vorgaben der DIN EN 60212 festgelegt, die Standardbedingungen für die Anwendung vor und während der Prüfung von festen Elektroisolierstoffen definiert. Ferner wird in der DIN EN 60243-1 auf mögliche Umgebungsmedien, die Art der Spannungssteigerung und Auswertungskriterien der Ergebnisse eingegangen. [2]

2.1. Verwendete Probekörper

Für die hier vorliegenden Untersuchungen werden zwei Sorten Polyethylen verwendet, deren Eigenschaften in Tabelle 1 dargestellt sind.

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe

	HDPE	PE
Hersteller	Simona AG	unbekannt
Bezeichnung	PE-HD Natur	PE 300 natur
Mittlere gemessene Dicke	1,07 mm	1,00 mm
Elektrische Festigkeit	45 kV/mm	45 kV/mm
Rel. Permittivität	2,4	2,4
Diel. Verlustfaktor	0,0004	0,0004
Temperaturbereich	-50 bis 80°C	-50 bis 80°C

Die Eigenschaften für Temperaturbereich und elektrische Festigkeit sind den jeweiligen Datenblättern entnommen worden. Die relative Permittivität und der dielektrische Verlustfaktor wurden bei Raumtemperatur gemessen und geben die Werte bei einer Frequenz von 50 Hz wieder. Beide Prüfmaterialien werden in Platten geliefert und anschließend, wie in Abbildung 1 gezeigt, zu runden Probekörpern weiterverarbeitet.

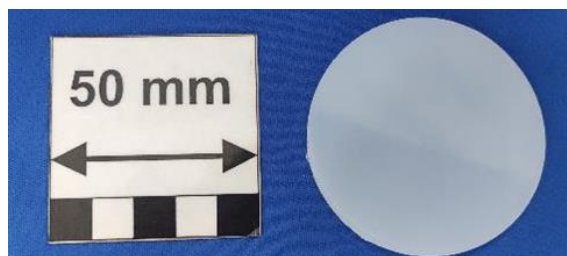


Abbildung 1: Verwendete PE-Prüflinge mit einem Durchmesser von 40 mm

Bezüglich des Durchmessers der Probekörper ist, hinsichtlich des verwendeten Elektroden-durchmessers, kein Mindestmaß in der DIN EN 60243-1 angegeben. Die Fläche der Probekörper sollte jedoch groß genug gewählt werden, so dass Überschläge vermieden werden.[1] Der Durchmesser wird im Verlauf der Prüfungen variiert.

2.2. Vorbehandlung und Konditionierung der Probekörper

Vor den Prüfungen werden die Probekörper, wenn nötig, an den Rändern entgratet, um spitze Ecken und Kanten zu vermeiden und anschließend mit Reinigungsalkohol gereinigt.

Weiterhin werden die Prüflingskollektive vor den Untersuchungen, wie in [1] vorgegeben, nicht weniger als 24 Stunden konditioniert. Alle hier beschriebenen Untersuchungen wurden zudem bei Raumtemperatur durchgeführt.

2.3. Verwendete Elektrodenkonfigurationen

Die in dieser Arbeit verwendeten Elektrodenanordnungen sind eine Platte-Platte Anordnung nach Norm, eine Platte-Platte Anordnung mit Rogowski-Elektroden und ferner eine Kugel-Platte Anordnung. Abbildung 2 zeigt die an der Hochschule Zittau/Görlitz verwendete Elektrodenanordnung. Hierbei handelt es sich um Stahlelektroden mit einem Radius am Rand von 3 mm.

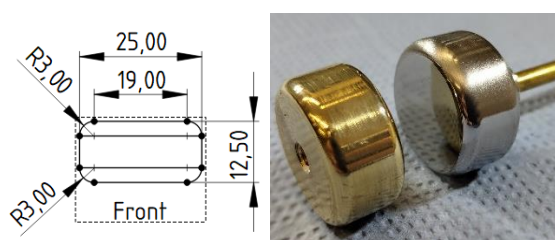


Abbildung 2: Verwendete Platte-Platte Anordnung mit 3 mm Radius (Zittau)

Dieses Elektrodendesign entspricht somit den Anforderungen der Norm in Bezug auf Durchmesser und Außenradius. Das an der Leibniz Universität Hannover verwendete Elektrodendesign unterscheidet sich in sofern, dass die Ränder, wie in Abbildung 3 dargestellt, über eine Rogowskikontur verfügen und zudem einen Radius von 2,5 mm an der Innenseite aufweisen.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass mit Stahl und Messing unterschiedliche Materialien für die Hochspannungselektroden verwendet wurden. Trotz dieser Unterschiede

konnte gemäß Oesterhelds [3] Untersuchungen kein signifikanter Einfluss aufgezeigt werden. Vielmehr zeigt sich, dass die Einbettung der Elektroden und die Haftung des Einbettungsmaterials am Probekörper einen wesentlich größeren Effekt auf die Durchschlagspannung haben.

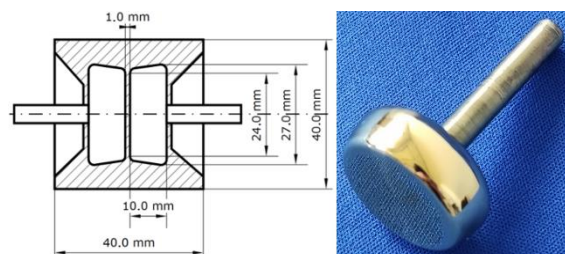


Abbildung 3: Verwendete Platte-Platte Anordnung mit Rogowski-Elektroden (Hannover)

Als dritte Elektrodenkonfiguration wird eine Kugel-Platte-Anordnung verwendet, wie in Abbildung 5 (Mitte) gezeigt ist. Die Kugelelektrode hat, wie in [1] vorgegeben, einen Durchmesser von 25 mm und die untere Plattenelektrode entspricht der aus Abbildung 3. Die Variation der Elektrodenanordnungen findet sich in den Untersuchungen und der Auswertung wieder und diese werden wie folgt bezeichnet.

Tabelle 2: In der Auswertung verwendete Bezeichnungen für unterschiedliche Elektrodenanordnungen

	Bezeichnung
Platte-Platte	EAP
Platte-Platte Rogowski	EAR
Kugel-Platte	EAK

2.4. Verwendete Einbettungsflüssigkeiten

In [1] wird empfohlen Durschlagprüfungen in einem Umgebungsmedium durchzuführen, welches eine genügend hohe elektrische Festigkeit besitzt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die gemessene Durchschlagfestigkeit in Flüssigkeiten, mit höherer relativer Permittivität als die von Transformatorenöl, höher ausfallen kann. Dies kann ebenso der Fall sein, wenn die Durchschlagfestigkeit des Öles durch Verunreinigungen verringert wird [1].

In den hier dargestellten Versuchen wurden für die Durchschlagsuntersuchungen zwei verschiedene Transformatorenöle verwendet, welche in Tabelle 3 dargestellt sind.

Tabelle 3: Verwendete Einbettungsflüssigkeiten im jeweiligen Labor

	Labor
Nynas Taurus (S2 Äquivalent)	Hannover
Shell Diala S3	Zittau

Weiterhin wurden die Probekörper mit den Elektroden in Silikon vergossen, um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Vorentladungen und Überschlügen zu verringern. Auf die Art und Weise des Vergusses und die Kompatibilität des Vergussmaterials mit der umgebenden Einbettungsflüssigkeit wird in Abschnitt 3 eingegangen.

2.5. Art der Spannungssteigerung

Alle hier gezeigten Untersuchungen wurden im Ramp-Test bei konstanter Spannungssteigerungsgeschwindigkeit durchgeführt, so dass der Durchschlag des Prüflings nach circa einer Minute eintrat.

2.6. Auswertung der Ergebnisse

Als Wert für die berechnete Durchschlagfestigkeit wird, wie in [1] beschrieben, der Median berechnet. Liegt eine gerade Zahl an Prüfungen vor, wird aus den beiden mittleren Werten der Mittelwert berechnet. Als Streuungsmaß soll die relative Abweichung vom Median herangezogen werden. Für jede Versuchsreihe wurden, wie in [1] beschrieben, mindestens fünf Prüfungen durchgeführt. Weicht die gemessene Durchschlagspannung mehr als 15 % vom Median ab, so wurden mindestens 10 Prüfungen durchgeführt.

3. Einbettung der Probekörper und Notwendigkeit des Polymervergusses

Die Erfahrungen zeigen, dass die Einbettung der Probekörper ausschließlich in Mineralöl als Isoliermedium zu deutlich geringeren Durchschlagspannungen führt. Aufgrund der niedrigeren Spannungsfestigkeit von Öl, im Vergleich zu polymeren Feststoffen, bricht das Öl an den Tripelpunkten der Elektrodenanordnung zusammen, was den vorzeitigen Durchschlag des Probekörpers verursacht. Zudem verfälscht die unterschiedliche Permittivität von Mineralöl (ca. 2,2) die homogene Feldverteilung und beeinträchtigt die Messung der Durchschlagfestigkeit. Durch den Verguss mit einem Silikonelastomer, welches einen ähnlichen Wert für die relative Permittivität aufweist, kann dieser Effekt gemindert werden und die Anordnung spannungsfester. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass auch mit einer Einbettung in Silikon eine Feldverzerrung entsteht, sofern nicht dasselbe Silikon geprüft wird. Der Idealfall wäre ein Einstoffsystem. Dies ist jedoch aus technischen und wirtschaftlichen Gründen meist nicht realisierbar. Zudem ist zu betonen, dass allein ein Polymerverguss für

hohe Durchschlagspannungen nicht ausreichend ist. Es ist weiterhin praktikabel die Anordnung in eine Isolierflüssigkeit wie Mineralöl einzubetten, um Überschlüge zu vermeiden.

3.1. Langzeitverhalten von Silikon in Mineralöl und synthetischem Ester

Für die Ermittlung der Kurzzeitdurchschlagspannung (Belastungszeit im Minutenbereich) ist das Langzeitverhalten des Silikonvergusses in Mineralöl nicht relevant. Soll hingegen das Langzeitverhalten untersucht werden, stellt dies ein erhebliches Problem dar. Ein Lagerungsversuch mit einer vergossenen Elektrodenanordnung zeigte, dass der Verguss nach wenigen Tagen durch den Kontakt mit Mineralöl aufquillt. Dies führt dazu, dass die Elektroden ihre Position im Verguss verlieren, Öl eindringt und dies die Spannungsfestigkeit beeinträchtigt. In Abbildung 4 ist der Unterschied einer vergossenen Anordnung vor und nach 10-tägiger Lagerung in Shell Diala S3 Mineralöl ohne Spannungsbelastung dargestellt. Durch das Quellen des Silikons entstand ein 2 mm breiter Hohlraum um die Erdelektrode, die Kontaktierung der Hochspannungselektrode lockerte sich ebenfalls und der Silikonverguss verfärbte sich stark gelb im Gegensatz zu seiner ursprünglichen milchig weißen Farbe.

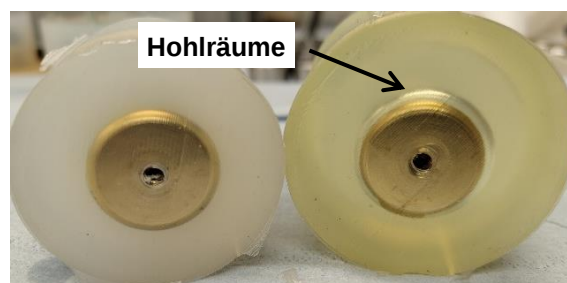


Abbildung 4: Vergossene Anordnung vor (links) und nach (rechts) 10-tägiger Öllagerung

Die Ergebnisse in Tabelle 4 dokumentieren die Ölmigration in den Verguss durch einen Gewichtsvergleich vor und nach der Lagerung. Es zeigt sich eine Gewichtszunahme von 7,6 % (ca. 14 g).

Tabelle 4: Gewichtsvergleich Lagerungsversuche

Gewicht	Gewicht	Änderung
Vor Öllagerung	183,45 g	
Nach 10-tägiger Öllagerung	197,52 g	+14,1 g
Vor Esterlagerung	184,41 g	
Nach 10-tägiger Esterlagerung	185,63 g	+1,2 g

Da Mineralöl als Einbettungsflüssigkeit für Langzeitversuche ungeeignet ist, wurde an der Leibniz Universität Hannover eine synthetische Esterflüssigkeit (MIDEL 7131) als Alternative

getestet. Ein Lagerungsversuch zeigte, dass das Silikon darin nur geringfügig, mit einer Gewichtszunahme von 0,6 % (ca. 1,22 g) aufquillt.

3.2. Vergleich Probekörperverguss

Der Verguss der Prüfanordnung erfolgt in beiden Laboren, bis auf die Verwendung unterschiedlicher Formen, demselben Ablauf. Einer gründlichen Reinigung der Elektroden sowie der Vergussform folgt die optische Oberflächenkontrolle. Elektroden mit tiefen Kratzern oder Einschlüssen vorangegangener Durchschläge dürfen nicht verwendet werden, da andernfalls nicht mehr von einer homogenen Feldverteilung auszugehen ist. Als Vergussform wird in Hannover eine horizontal gelagerte Form und in Zittau eine 3D-gedruckte vertikal zu befüllende Form verwendet. Die Probekörper und Elektroden werden mittig positioniert. Im nächsten Schritt wird das Vergusssilikon nach Herstellervorgabe angemischt und zunächst für eine Minute evakuiert. Das nun vom Großteil der Luft befreite Silikon wird anschließend in die Formen gegeben. Es werden stets mehrere Prüflinge gleichzeitig vergossen. Zwischen 65 g und 80 g Silikon werden pro Probekörper benötigt. Die vergossenen Probekörper werden für weitere ca. 5-10 Minuten evakuiert, bis wenig bis keine erkennbaren Luftblasen mehr entweichen. Auf eine zügige Verarbeitung des Silikons innerhalb von 15-20 Minuten ist dabei zu achten. Die Vernetzung findet anschließend bei Raumtemperatur ohne Vakuum für mehrere Stunden statt. Wie in Abbildung 5 (links) zu erkennen, umschließt der ideale Verguss die Elektroden knapp und beinhaltet keinerlei Lufteinschlüsse.

Ein mangelhafter Verguss dagegen führt zu Lufteinschlüssen im Silikon (Abbildung 5, rechts), wodurch die elektrische Festigkeit der Anordnung drastisch reduziert wird und somit keine reproduzierbaren Messungen mehr möglich sind.

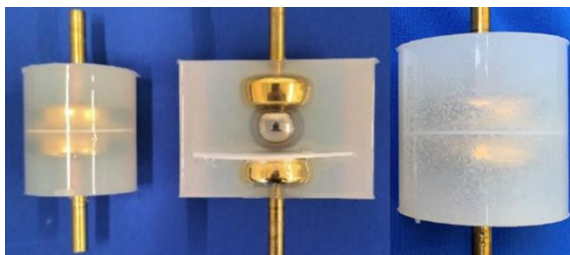


Abbildung 5: Verwendete Elektrodenanordnungen (links, Mitte) und fehlerhafter Silikonverguss (rechts)

4. Verwendete Prüfgefäße

Die Prüfgefäße für die Durchschlagversuche waren in beiden Laboren nicht identisch. In Zittau kam ein einfaches zylindrisches Plexiglasgefäß zum Einsatz (Abbildung 6, links). In Hannover wurde das Gefäß auf der rechten Seite in Abbildung 6 verwendet. Beide waren mit den in Tabelle 3 aufgelisteten Mineralölen

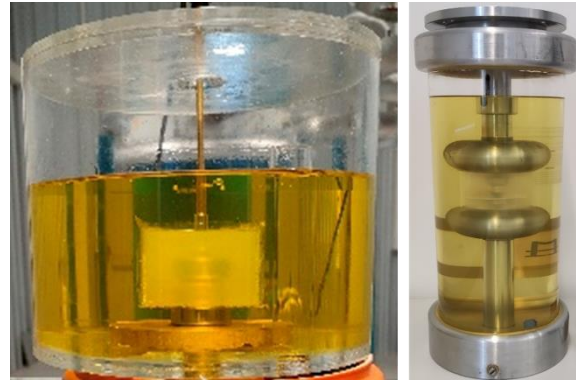


Abbildung 6: In Zittau (links) und Hannover (rechts) verwendete Prüfgefäße

gefüllt. Die Gefäße sind nicht hermetisch verschlossen und die Probekörper werden jeweils von oben auf die Erdelektroden gesteckt bzw. geschraubt. Der Hauptunterschied besteht in den Steuerelektroden, die im Gefäß aus Hannover auf beiden Seiten zu erkennen sind. Deren Einfluss auf die Durchschlagversuche wird im nächsten Abschnitt erläutert.

4.1. Einfluss der Steuerelektroden auf die Feldverteilung im Prüfling

Zur Bewertung des Einflusses der Steuerelektroden auf die Feldverteilung im Prüfling wurde eine vergleichende Simulation des elektrischen Feldes durchgeführt, wobei zwei zylindrische Elektroden mit 3 mm Radius und 25 mm Durchmesser als Prüfanordnung dienten. Der Vergleich der Äquipotentiallinien in Abbildung 7 zeigt, dass eine Feldvergleichmäßigkeit lediglich weit außerhalb des Probekörpers stattfindet. Der Bereich der Höchstfeldstärke zwischen und am Rand der Zylinder ist für beide Anordnungen unverändert, wie anhand der Farbskala zu erkennen ist. Die Steuerelektroden haben somit auf die Feldverteilung im Bereich des Probekörperdurchmessers keinen signifikanten Einfluss. Der Vorteil der Steuerelektroden besteht dennoch darin, dass die Teilentladungseinsetzspannung aufgrund der Feldvergleichmäßigkeit innerhalb des Prüfgefäßes wesentlich reduziert wird.

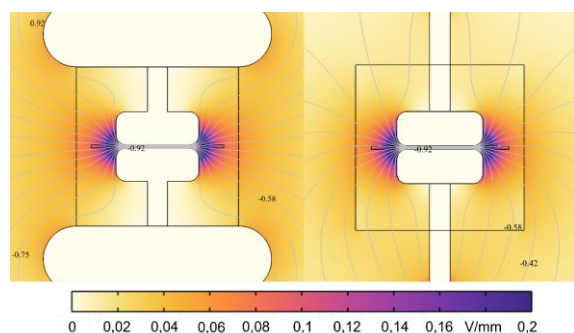


Abbildung 7: Verteilung des elektrischen Feldes ohne (rechts) und mit Steuerelektroden (links)

5. Versuchsauswertung und Materialqualifizierung

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über die durchgeführten Versuche und die variierten Parameter gegeben. Außerdem werden die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse gezeigt, umso die Einflüsse der Parameter darzustellen und eine entsprechende Auswahl in Bezug auf das zu prüfende Material zu treffen.

5.1. Herstellung eigener Probekörper

Für die späteren Langzeitversuche soll neben Polyethylen auch ein Silikonelastomer ausgewählt werden. Zu Gunsten nachvollziehbarer Herstellungsbedingungen, wurde sich dazu entschieden die Probekörper aus Silikon selbst herzustellen. Hierzu wurde ein handelsübliches, ungefülltes, raumtemperaturvernetzendes Silikon gewählt. Dieses wurde im vorgegebenen Mischungsverhältnis angemischt und zunächst kurz vakuiert, um die durch das Anmischen eingearbeitete Luft aus dem Material gasen zu lassen. Mit einem Filmziehgerät wurde das Silikon anschließend als eine 1 mm dicke Schicht auf einer PMMA-Platte ausgezogen. Zuletzt wurde der gezogene Silikonfilm für weitere 10 min evakuiert. Der gesamte Prozess ab dem Anmischen dauerte dabei nicht länger als 20 min, um eine ausreichende Fließfähigkeit während der letzten Vakuumierphase zu gewährleisten. Der fertige Probekörper wurde nach 24 h von der PMMA Platte abgelöst. Äußerlich waren die Probekörper stets homogen und von gleicher Stärke. Es folgte die Reinigung und Konditionierung nach Norm. Trotz großer Sorgfalt bei der Herstellung gelang es nicht identische Probekörper herzustellen. Die Ursache hierfür blieb ungeklärt. Aufgrund dessen wurde auf die weitere Herstellung eigener Probekörper verzichtet.

5.2. Versuchsübersicht

Eine Übersicht über die Versuche sowie die Variation der verschiedenen Parameter, ist in Tabelle 5 dargestellt. Es wurden insgesamt 113 Versuche durchgeführt und dabei die fünf gezeigten Parameter verändert. Auf die detaillierten Messwerte der einzelnen Versuche wird aus Gründen der Übersicht verzichtet.

Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Versuche und Variation der Parameter

Parameter	Anzahl der Prüfungen
Prüfmaterial	PE-HD 48
	PE300 39
	SIR 26
Elektrodenanordnung	EAP 67
	EAR 30
	EAK 16
	40 mm 83
Prüflingsdurchmesser	46 / 47 mm 12
	50 mm 8
	60 mm 10
Vergussmaterial	SF45 85
	RT625 8
	SILGLAS 20
Einbettungsflüssigkeit	S2 Äquivalent 40
	Diala S3 73

5.3. Korrelationsanalyse und Versuchsauswertung

Der lineare Zusammenhang zweier metrischer Variablen wird durch die bivariate Pearson-Korrelation r , Gl. (1) geschätzt.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n - 1) \cdot s_x \cdot s_y} \quad (1)$$

Dieser Wert kann nur zwischen -1 und 1 liegen und beschreibt den Zusammenhang zweier Variablen x und y über die Stichprobengröße n hinaus verallgemeinert. Für die Bewertung der Korrelation gibt es allgemein anerkannte Grenzwerte. Nach denen besteht eine geringe Korrelation bei Werten ab $\pm 0,3$, eine mittlere Korrelation ab $\pm 0,5$ und eine starke ab $\pm 0,7$. Das Vorzeichen gibt dabei die Richtung der Korrelation an, wobei die Annahme erfolgt, dass der Zusammenhang ein linearer ist.

Zusätzlich wird die Korrelation mit Hilfe der statistischen Signifikanz bewertet. Nimmt diese Werte $\leq 0,05$ an, so gilt eine Korrelation als statistisch signifikant und stellt damit einen tatsächlich beobachteten Effekt und keine zufällige Wertestreuung dar. Diese wurde durch die Statistiksoftware PSPP in Kombination mit der Korrelation durch einen zweiseitigen Einstichproben t-Test bestimmt.

Tabelle 6: Übersicht über die Versuchsparameter und ihre Korrelation mit verschiedenen Bewertungskriterien

	Signifikanz Korrelation		Signifikanz Korrelation		Signifikanz Korrelation		Signifikanz Korrelation		Signifikanz Korrelation		Signifikanz Korrelation	
	Durchmesser	Prüfkörper	Überschlags-	rate	Abweichung von	Median	Durchschlagsrate	Randfeld	Auswahl	Prüfmateri-	Elektroden-	anordnung
Überschlagsrate	0,195	-0,274	0,466	0,156	0,68	-0,089	0	0,687	0,004	0,569	0,188	0,278
Abweichung von Median	0,837	0,044	0,591	0,115	0,522	0,137	0	0,739	0,004	0,569	0,188	0,278
Durchschlagsrate Randfeld	0,367	-0,193	0,591	0,115	0,522	0,137	0	0,739	0,004	0,569	0,188	0,278
Auswahl Prüfmateri-	0,632	0,103	0,139	0,311	0,506	-0,143	0	0,739	0,004	0,569	0,188	0,278
Elektrodenanordnung	0,944	-0,015	0,049	0,405	0,29	-0,225	0,84	0,044	0,581	0,119	0,188	0,278
Auswahl Vergussmaterial	1	0	0,508	-0,142	0,29	-0,225	0,84	0,044	0,581	0,119	0,188	0,278

Für die Bewertung der Parametervariationen aus Tabelle 5 werden diese mit drei Kriterien korreliert. Dies ist zum einen die Überschlagsrate in Prozent, die Abweichung vom Medianwert der Durchschlagsspannung sowie die Anzahl der Durchschläge, welche im Randbereich auftraten. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 6 dargestellt. Hierbei steht jeweils links in grüner Farbskala die statistische Signifikanz und rechts in roter Skalierung die Korrelation. Bestimmte Korrelationspaarungen sind aus der Bewertung ausgeschlossen und ausgekreuzt. Dies sind vor allem Korrelationen auswählbarer Versuchsparameter, die zwar von der Software automatisch berechnet werden aber praktisch bedeutungslos sind.

Die stärkste Korrelation tritt zwischen der Rate der Durchschläge im Randfeldbereich und der gewählten Elektrodenanordnung bzw. der Auswahl des Prüfmateri- als. Allerdings sind die Ergebnisse in der Bewertungsmatrix ausgekreuzt, da eine Signifikanz von null praktisch auf eine fehlerlose Messung hindeuten würde und daher aufgrund der geringen Stichprobenzahl auf einen Rundungsfehler zurückzuführen ist. Dennoch entspricht die Berechnung der Tatsache, dass mit dem PE300 Werkstoff wesentlich reproduzierbarere Ergebnisse erzielt wurden als mit HDPE und SIR.

Die ebenfalls starke aber auf Rundungsfehler zurückzuführende Korrelation zwischen der Elektrodenanordnung und der Durchschlagsrate im Randfeldbereich (Tabelle 6) lässt sich durch die drei unterschiedlichen Elektrodenkonfigurationen erklären. Für den Fall der Kugel-Platte-Anordnung traten, wie zu erwarten war, keine Durchschläge im Randfeldbereich auf. Der Vergleich zwischen der Platte-Platte und der Rogowski-Anordnung ergab, dass für die Rogowski-Anordnung die Durchschläge vermehrt im Randbereich auftraten. Dies könnte

im größeren Radius der Plattenelektrode begründet sein, welcher 3 mm im Vergleich zu 2 mm an der Rogowski-Elektrode beträgt. Die Ergebnisse einer vergleichenden Feldberechnung (Abbildung 8) zeigen einen minimal erhöhten Betrag der maximalen elektrischen Feldstärke sowie einen weiter außen befindlichen Tripelpunkt der Anordnung, was diese Annahme bestätigen könnte.

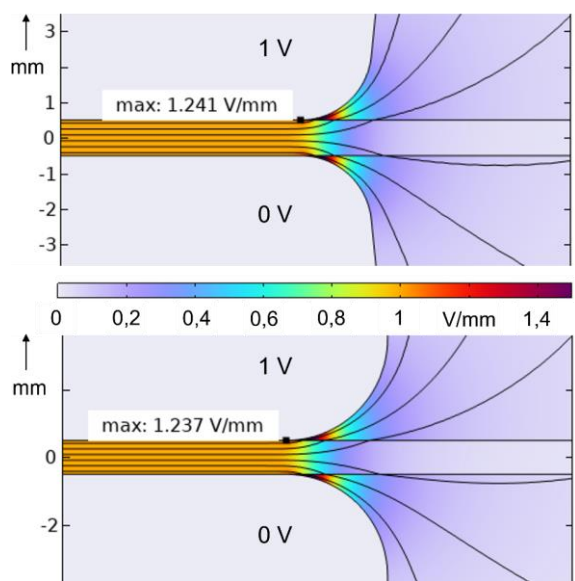


Abbildung 8: Feldüberhöhung am Tripelpunkt an Rogowski- (oben) und Plattenelektroden (unten)

Eine geringe bis mittlere Korrelation bei guter bis starker Signifikanz ergibt sich weiterhin für den Zusammenhang zwischen der Überschlagsrate und der Auswahl des Prüfmateri- als sowie der genutzten Elektrodenanordnung. Dies ist ebenfalls durch die im vorherigen Absatz beschriebenen Gründe erklärbar. Eine höhere Feldbelastung im Randbereich der Elektroden kann zu Vorentladungen führen und somit die Entstehung eines leitfähigen Kanals am Probekörper vorbei, begünstigen.

Abhilfe kann hier mit der Vergrößerung des Probekörperdurchmessers geschaffen werden.

Dies spiegelt sich in der Bewertungsmatrix nur durch eine sehr geringe Korrelation wider. Während der Versuch zeigte sich aber, dass die Überschlagshäufigkeit mit Erhöhung des Probekörperdurchmessers signifikant reduziert werden konnte. Da allerdings nicht für jedes Prüfmaterial und jede Elektrodenanordnung mehrere Durchmesser getestet wurden, ist der Wert der Korrelation mit Abstand zu betrachten und praktisch höher zu erwarten.

Ein weiterer Zusammenhang besteht zwischen Auswahl des Vergusses und der Überschlagsrate. Zwar wird dieser mit niedriger Korrelation berechnet, wäre aber zumindest mit höherer Signifikanz zu erwarten. Dies trifft hier nicht zu, da nicht jedes Vergussmaterial mit jedem Prüfmaterial getestet wurde. Da sich SF45 frühzeitig als günstigstes und am besten zu handhabendes Vergussmaterial herausstellte, gibt es für die anderen Materialien nur wenige Daten. Dennoch spielt zum Beispiel die Shore-Härte in Bezug auf die Haftung am Probekörper eine große Rolle und damit auch für die Überschlagsrate.

Es ist zudem zu erkennen, dass die Abweichung vom Median der Durchschlagsspannung im Wesentlichen einer statistischen Streuung unterliegt.

Die weiteren Zusammenhänge in Tabelle 6 weisen keine signifikante Korrelation auf.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag gibt einen Überblick über den Einfluss von Parametern und Randbedingungen auf die Untersuchung der elektrischen Festigkeit polymerer Isolierstoffe, unter Bezugnahme auf die Norm DIN EN 60243-1. Es wird auf Unterschiede und Ergänzungen im eigenen Vorgehen eingegangen.

Ein Vergießen der Probekörper hat einen erheblichen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse im Vergleich zur Prüfung nur mit einer Isolierflüssigkeit als Einbettungsmedium. Um einen Einfluss der umgebenden Flüssigkeit auf die vergossenen Probekörper zu vermeiden, sollte für Langzeitversuche eine Esterflüssigkeit Transformatorenöl vorgezogen werden, wobei deren Einfluss auf die Durchschlagsspannung noch zu untersuchen ist.

Des Weiteren werden Unterschiede in der Versuchstechnik beider Labore verglichen. Auf Basis einer FEM-Berechnung kann gezeigt werden, dass der Aufbau der Prüfgefäße keinen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Eine Korrelationsanalyse setzt die genannten Parameter und weitere Faktoren in Bezug zu

verschiedenen Bewertungskriterien. Hierbei zeigt sich, dass die Auswahl des Prüfmaterials und der Elektrodenform den größten Einfluss auf die Überschlagsrate hat, wie auch durch die Versuchsergebnisse bestätigt wird. Trotz vieler Parameter ist die Bewertungsmatrix zum Teil mit Abstand und ausschließlich in Bezug mit tatsächlichen physikalischen Zusammenhängen zu betrachten. Aufgrund einer teilweise geringen Datenmenge, sind nicht alle Berechnungen auch aussagekräftig. Dennoch konnten einige der tatsächlich beobachteten und zu erwartenden Effekte bei Durchschlagversuchen durch die Berechnung bestätigt werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kombination des PE300 Materials und der Plattenelektroden die besten reproduzierbaren Ergebnisse mit der geringsten Überschlagsrate und geringsten Rate der Randfelddurchschläge aufweist.

Die Ergebnisse der durchgeführten Wechsellspannungsuntersuchungen sollen in erster Linie als Orientierung für weitere Untersuchungen bei Gleichspannungsbelastung dienen. Erste Messungen haben hier bereits eine wesentlich höhere Durchschlagfeldstärke ergeben, welche im Bereich von 130 bis 140 kV/mm liegt. Dies macht eine genaue Kenntnis über den Einfluss aller relevanten Parameter und Randbedingungen umso wichtiger.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 464489575. Außerdem danken wir Lucas Richter (TU Dresden) für die Unterstützung bei statistischen Fragen.

Literatur

- [1] DIN EN 60243-1; VDE 0303-21, „Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen - Prüfverfahren - Teil 1: Prüfungen bei technischen Frequenzen (IEC 60243-1:2013); Deutsche Fassung EN 60243-1:2013“, Jan. 2014.
- [2] DIN EN 60212 (VDE 0308-1), „Standardbedingungen für die Anwendung vor und während der Prüfung von festen Elektroisolierstoffen (IEC 60212:2010); Deutsche Fassung EN 60212:2011“, Okt. 2011.
- [3] J. Oesterheld, „Dielektrisches Verhalten von Silikongummi-Isolierungen bei hohen elektrischen Feldstärken“, Dissertation, TU Dresden, 1994.