

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik

Innere Teilentladungen bei Gleichspannungsbelastung

Lucas Georg Adam Höfer, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Josef Sebastian Kindersberger
2. Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
Technische Universität Braunschweig
3. Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Markus Becherer

Die Dissertation wurde am 17.06.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 06.03.2021 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von 2014 bis 2019 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Universität München.

An dieser Stelle möchte ich jenen Menschen danken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. So gebührt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger, sowohl für die Anregung des Forschungsthemas als auch die hervorragende fachliche und wissenschaftliche Anleitung während der Forschungsarbeit.

Weiterhin möchte ich den Herren Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat und PD Dr.-Ing. habil. Markus Becherer für das Interesse an meiner Arbeit und der Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Sehr herzlich möchte ich mich bei allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Hochspannungs- und Anlagentechnik für die gute Zusammenarbeit, das produktive und freundschaftliche Arbeitsklima sowie für den exzellenten fachlichen Austausch bedanken. Besondere Erwähnung verdienen die jederzeit hilfsbereiten Mitarbeiter der Werkstatt, welche bei der Herstellung der Prüfanordnungen und Versuchsaufbauten eine überaus geschätzte Hilfe waren.

Außerdem danke ich allen Studenten, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten, Forschungspraktika und Werkstudententätigkeiten an dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie und insbesondere meiner Frau bedanken, die jederzeit an mich geglaubt und mich unterstützt haben, wann immer es nötig war.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Erkenntnisstand	3
2.1	Geschichtliche Entwicklung	3
2.2	Teilentladungen bei Gleich- und Wechselspannungsbelastung	5
2.3	Elektrisches Feld und Grenzflächenladung	6
2.4	Bereitstellung des Anfangselektrons	17
2.4.1	Erzeugung im Gasvolumen	18
2.4.2	Erzeugung an Oberflächen	19
2.5	Entladung und Teilentladungsstromimpuls	20
2.5.1	Streamerartige Teilentladungen	21
2.5.2	Townsendartige Teilentladungen	23
2.6	Schädigungsmechanismen	25
2.7	Teilentladungsmodelle bei Gleichspannungsbelastung	26
2.7.1	Kapazitiv-resistives Modell	27
2.7.2	Feldtheoretisches Modell nach Pedersen	34
2.7.3	Feldtheoretisches Modell nach Lemke	43
3	Aufgabenstellung	48
4	Versuchsanordnungen	51
4.1	Langsame Änderung der Prüfspannung	51
4.1.1	Gesamtbeschreibung und Durchführung	51
4.1.2	Galvanisch getrennte Potentialmessung	52
4.1.3	Konventionelle Teilentladungsmessung	54
4.1.4	Prüfkörper	55
4.2	Impulsstrommessung	56
4.2.1	Gesamtbeschreibung und Durchführung	57
4.2.2	Hochspannungskreis und Prüfkörper	58
4.2.3	Konventionelle Teilentladungsmessung	60
4.2.4	Teilentladungsstrommessung	61

Inhaltsverzeichnis

4.2.5	Datenfusion und Aufbereitung	62
4.2.6	Prüfkörper	63
4.3	Ortsaufgelöste Teilentladungsmessung	63
4.3.1	Gesamtbeschreibung und Durchführung	63
4.3.2	Konventionelle Teilentladungsmessung	66
4.3.3	Optische Teilentladungsmessung	67
4.3.4	Messung der akkumulierten Ladung nach dem Öffnen der Fehlstelle	68
4.3.5	Datenaufbereitung und Datenfusion	69
4.3.6	Prüfkörper	73
5	Messergebnisse	74
5.1	Langsame Änderung der Prüfspannung	74
5.1.1	Nadel-Platte-Anordnung	74
5.1.2	Nadel-Platte-Anordnung mit Isolierstoffbarriere	75
5.1.3	Stab-Platte-Anordnung	80
5.1.4	Einfluss der Zirkulation der umgebenden Luft	83
5.1.5	Einfluss der relativen Feuchte der Luft	84
5.1.6	Lunker mit einseitigem Elektrodenkontakt	84
5.1.7	Lunker ohne direkten Elektrodenkontakt	86
5.2	Impulsstrommessung	88
5.2.1	Vergleich der Messdaten mit dem townsend-basierten Modell nach Fromm	90
5.2.2	Einfluss der Fehlstellenhöhe	91
5.2.3	Einfluss des Fehlstellendurchmessers	97
5.2.4	Einfluss des Barrierenmaterials	100
5.2.5	Einfluss der Temperatur	102
5.2.6	Einfluss der relativen Feuchte der Luft	105
5.3	Ortsaufgelöste Teilentladungsmessung	108
5.3.1	Ladungsträgerabbau	108
5.3.2	Einfluss der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit	110
5.3.3	Einfluss der Spannungshöhe	120
5.3.4	Alterungseffekte	122
5.4	Zusammenfassung und Gesamtinterpretation der Messungen	131
6	Teilentladungssimulation	133

6.1	Stand der Wissenschaft, Möglichkeiten und Grenzen	133
6.2	Aufbau der ablaufgesteuerten Simulation	133
6.2.1	Abschnittsweise Simulation	134
6.2.2	Elektrisches Feld	136
6.2.3	Bereitstellung des Anfangselektrons	136
6.2.4	Nachbildung der Teilentladung	137
6.2.5	Nachbildung der Oberflächenleitfähigkeit	138
6.2.6	Prüfkörper	139
7	Simulationsergebnisse	140
7.1	Teilentladungsverhalten über der Zeit	140
7.2	Einfluss der Schichtdicke der Isolierstoffbarriere	144
7.3	Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit	146
8	Vergleich Simulation und Messung	150
9	Zusammenfassung	152
10	Literatur	155
11	Normen	164
12	Formelzeichen und Abkürzungen	165

1 Einleitung

Der Bedarf an elektrischer Energie wächst zunehmend. Mit Blick auf die negativen Umweltfolgen durch die Verbrennung fossiler Energieträger und der Abkehr von Atomkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland steigt der Bedarf an elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen stark an [BÜR-12].

Bisher war es mit Ausnahme der Braunkohlekraftwerke üblich, die Erzeuger nahe an den Lastschwerpunkten zu platzieren. Das Verbundnetz hat dann hauptsächlich stabilisierende Aufgaben übernommen und stellte Reserveleistung im Falle eines Ausfalls zur Verfügung. Aufgrund der Geografie ist der Norden Deutschlands bezüglich des Windes privilegiert, sodass dort bevorzugt Windenergieanlagen (WEA) installiert werden, sowohl an Land (onshore) als auch in der Nord- und Ostsee (offshore). Die Lastzentren sind jedoch überwiegend in Süddeutschland, sodass nun im Rahmen der Energiewende die elektrische Energie über große Strecken transportiert werden muss. Aufgrund der Streckenlänge und der Energiemenge empfehlen sich für diese Verbindungen Hochspannungsgleichstromübertragungssysteme (HGÜ) [KNO-11].

Ebenso werden für die Anbindung der Offshore-Windparks Seekabel verwendet, welche aufgrund des Blindleistungsbedarfs bei Wechselspannungsbelastung bei längeren Leitungsstrecken möglichst als Gleichspannungskabel ausgeführt werden sollten [POP-13].

Bedingt durch die hohe Übertragungsleistung hat ein Ausfall einer der Nord-Süd-Verbindungen ernste Folgen für die Netzstabilität. Diese hohe Anforderung an die Zuverlässigkeit weckt den Bedarf an Diagnosemitteln [THE-13].

Die Teilentladungsdiagnose gilt als bewährtes, zerstörungsfreies Diagnoseinstrument bei Betriebsmitteln unter Wechselspannungsbelastung. Aufgrund des hochfrequenten Charakters der Teilentladungsimpulse ist die Messausrüstung mit Ausnahme des Spannungsmessteilers bei Wechsel- und Gleichspannung identisch.

Bedingt durch die Physik der Entladungsentwicklung weisen asymmetrische Fehlstellen, wie Spitze-Platte-Anordnungen, ein polaritätsabhängiges Teilentladungsverhalten auf. Bei Gleichspannungsbelastung dominiert insbesondere bei inneren Teilentladungen die nach einer Teilentladung an den Grenzflächen akkumulierte Ladung das weitere Verhalten. Daher finden unter Gleichspannungsbelastung wesentlich weniger Teilentladungen im Vergleich zur Wechselspannungsbelastung statt, was die Messung und die

Dateninterpretation erschwert. Durch das Fehlen des periodischen Polaritätswechsels beziehungsweise Spannungsnulldurchgangs kann die Interpretation von Teilentladungsmessergebnissen unter Gleichspannungsbelastung nicht analog zu den Messergebnissen unter Wechsellspannungsbelastung erfolgen [BER-12], [KUE-17].

Die für die Teilentladungsmessung relevante Norm DIN EN 60270 beschreibt primär die Messung bei Wechsellspannungsbelastung. Aktuell beschäftigt sich die CIGRÉ-Arbeitsgruppe D1.63 damit, eine Grundlage für die Aktualisierung dieser Norm bezüglich der Teilentladungsmessung und -interpretation zu schaffen. Es besteht bezüglich der teilentladungsrelevanten physikalischen Vorgänge Forschungsbedarf. In dieser Arbeit soll der Einfluss des elektrischen Feldes auf das Teilentladungsverhalten untersucht werden. Außerdem wird die Impulsform der einzelnen Teilentladungsaktivitäten und deren räumliche Ausdehnung sowie die Verteilung aufeinanderfolgender Teilentladungsereignisse innerhalb einer großen Fehlstelle untersucht.

2 Erkenntnisstand

Die Norm DIN EN 60270 definiert eine Teilentladung als „eine örtlich beschränkte elektrische Entladung, welche die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt und welche angrenzend an einem Leiter auftreten kann, aber nicht muss“.

Im folgenden Kapitel wird zuerst die historische Entwicklung der Teilentladungsmessung und -diagnostik nachgezeichnet. Anschließend wird die Situation bei inneren Fehlstellen ohne direkten Elektrodenkontakt genauer betrachtet. Die beiden notwendigen Bedingungen für Teilentladungen, die Bereitstellung eines lawinenwirksamen Anfangselektrons und das elektrische Feld im Prüfkörper, werden näher betrachtet. Bisher gemessene Teilentladungsstromverläufe und die durch Teilentladungen auftretenden Schädigungsmechanismen werden anschließend diskutiert. Im letzten Unterkapitel werden die in der Literatur bekannten Teilentladungsmodelle vorgestellt.

2.1 Geschichtliche Entwicklung

Die vermutlich ersten Oberflächenteilentladungen erzeugte Lichtenberg 1777 in Göttingen. Mittels Staub wurden polaritätsabhängig verschiedene Figuren auf der Oberfläche des Isolierstoffs erzeugt [LIC-77]. 1919 erfand Schering die nach ihm benannte Verlustfaktormessbrücke [SCH-19]. Damit konnte erstmals die durch Teilentladungsaktivität generierte Verlustleistung messtechnisch nachgewiesen werden. Schwaiger wies im Jahre 1925 den Hochfrequenzcharakter der äußeren Teilentladung nach [SCH-25]. Durch den Einbau von zwei Ablenkplatten in die Braunsche Röhre ertüchtigten Lloyd und Starr diese 1927 zur Teilentladungsmessung [LLO-27]. Im Jahre 1932 wurde mittels einer Oszilloskopröhre von Gemant und Philippoff „Die Funkenstrecke mit Vorkondensator“ untersucht und beschrieben [GEM-32]. Diese Veröffentlichung bildete die Grundlage für das kapazitive Teilentladungsersatzschaltbild.

Zur Detektion von Teilentladungen wurden seinerzeit schmalbandige Resonanzkreise verwendet [ARM-36]. Im Feld wurden entweder tragbare Radioempfänger und insbesondere bei Transformatoren Stethoskope verwendet. Diese ermöglichten erstmals die orts aufgelöste Teilentladungsdetektion. Erste kommerzielle, portable Geräte zur Teilentladungsmessung wurden 1953 von Mole vorgestellt [MOL-53]. Er definierte zudem 1970 die wichtigsten Eigenschaften von Teilentladungskalibratoren [MOL-70]. Damit war erstmals der quantitative Vergleich der Messergebnisse möglich. 1960 wurde die Brückenschaltung mit simultaner Teilentladungsmessung im Zweig des Prüfkörpers und

des Koppelkondensators von Dakin und Malinaric eingeführt [DAK-60]. Das erste computerbasierte Teilentladungsmesssystem wurde 1978 von Tanaka und Okamoto vorgestellt [TAN-78a]. Gulski gab 1995 einen Überblick über die digitale Analyse von Teilentladungen [GUL-95].

Die Impulsdauer von Teilentladungen wurde von Bailey im Jahre 1966 erstmals bei inneren Fehlstellen zu „wenigen Nanosekunden“ bestimmt [BAI-66]. Dies wurde später von Boggs und Stone mittels eines Oszilloskops mit einer Bandbreite von 1 GHz bestätigt [BOG-82].

In der Frühzeit der Teilentladungsmessung wurde die sinusförmige Prüfspannung meist als Ellipse auf dem Schirm der Braunschen Röhre dargestellt, was eine Phasenzuordnung der hierauf überlagerten Teilentladungsaktivität und damit eine Klassifizierung der Teilentladungsquelle ermöglichte. Später setzte sich die getriggerte Darstellung durch, das heißt auf der Bildröhre des Teilentladungsmessgerätes wird eine volle Periode der Prüfspannung dargestellt. Eine Korrelation verschiedener Parameter der einzelnen Impulse erfolgte mittels der Impulsfolgenanalyse durch Hoof [HOO-97]. Diese ermöglicht eine im Vergleich zur phasenkorrelierten Teilentladungsmessung verfeinerte Bestimmung der Fehlstellenart(en). Fromm und Hoogenraad übertrugen diese Erkenntnisse auf die Teilentladungsanalyse bei Gleichspannungsbelastung, welche Prinzip bedingt keine Phasenauflösung erlaubt [FRO-95], [HOO-00].

Simultan mit den sich messtechnisch neu ergebenden Möglichkeiten der Teilentladungsmessung wurden auch immer weitere Werkstoffklassen wie Polymere allgemein [TAN-78b], Polyethylen im Speziellen [MAY-76] sowie Porzellan [JOL-64] samt den isolierstofftypischen Fehlstellen untersucht. Außerdem wurden an den hiermit isolierten Betriebsmitteln, wie PVC-isolierten Kabeln [STA-63], ölgefüllten Durchführungen [CON-69] und Transformatoren [IWE-66], Messungen durchgeführt. Mittels der hierbei gewonnenen Erfahrungen wurden entsprechende Normen entwickelt. Natrass gibt hierüber einen Überblick [NAT-93].

Im Falle von Wechselspannungsbelastung handelt es sich bei der Teilentladungsdiagnose um eine bewährte Diagnosemethode mit dem Vorteil, dass sie zerstörungsfrei und sogar während des Betriebs (sogenanntes „Online-Monitoring“) möglich ist. Aufgrund der periodischen Spannungsänderung und des Polaritätswechsels treten Teilentladungen regelmäßig auf, sodass sich Teilentladungsein- und Teilentladungsaussetzspannung einfach ermitteln lassen. Über die Phasenlage der Teilentladungen bei Spannungen knapp über der Teilentladungseinsetzspannung lässt sich eine Klassifizierung der Fehlerart durchführen. Eine Zusammenfassung der Zuordnung anhand der Phasenlage und der Korrelation zwischen scheinbarer Ladung und Prüfspannung gibt Küchler [KUE-17]. Durch den Einsatz nichtkonventioneller Teilentladungsmessmethoden wie der

akustischen oder der ultrahochfrequenten Teilentladungsmessung kann über Laufzeitunterschiede bei einem System mit mehreren Sensoren der Ort der Teilentladung bei ausgedehnteren Betriebsmitteln wie Transformatoren und Kabeln ermittelt werden [MAK-08], [GÖT-08]. Dank der rasant gestiegenen Rechenkapazitäten können selbstlernende Algorithmen in Form von neuronalen Netzwerken inzwischen die Fehlerarten bestimmen [WAN-18].

2.2 Teilentladungen bei Gleich- und Wechselspannungsbelastung

Mit der zunehmenden Verbreitung von Hochspannungsgleichstromübertragungssystemen entsteht der Wunsch, das bei Wechselspannungsbelastung bewährte Diagnoseverfahren auch hierfür einzusetzen. Das Ziel ist das rechtzeitige und sichere Erkennen der Verschlechterung und des drohenden Ausfalls eines Betriebsmittels, sodass durch adäquate Handlungen wie Umschaltungen und Reparaturen ein plötzlicher Ausfall des Systems verhindert werden kann.

Aufgrund des hochfrequenten Charakters des Teilentladungsimpulses ist die Messtechnik sowohl der konventionellen als auch der nicht-konventionellen¹ Teilentladungsmessung unabhängig von der Form der Prüfspannung. Lediglich für die Aufzeichnung der Klemmenspannung des Prüfkörpers muss der bei Wechselspannungsbelastung aus Koppelkondensator und Kapazität des Ankoppelvierpols gebildete kapazitive Spannungsteiler durch einen resistiven Spannungsteiler ersetzt werden.

Die Interpretation der Messergebnisse unterscheidet sich bei Gleichspannungsbelastung jedoch deutlich von jener bei Wechselspannungsbelastung. Bei letzterer kann ein Phasenbezug der Teilentladungsereignisse hergestellt werden und die Teilentladungsein- und Teilentladungsaussetzspannung einfach bestimmt werden. Setzt man das Vorhandensein eines lawinenwirksamen Anfangselektrons voraus, so reicht als Messdauer eine Periodendauer, also 20 ms bei 50 Hz aus. Vor allem bei symmetrischen Anordnungen bilden die Ladungsträger in jeder Halbschwingung eine neue, entgegengesetzt gerichtete Ladungsträgerlawine. Das elektrische Feld ist ab dem Moment des Einschaltens kapazitiv verteilt. Der Einfluss der Temperatur und der Feuchte auf die Verteilung des elektrischen Feldes des Prüfkörpers ist sehr gering.

Bei Gleichspannungsbelastung hingegen fällt die Phasenkorrelation weg, die Bestimmung der Teilentladungsein- und Teilentladungsaussetzspannung ist schwierig und nach

¹ Mit nicht-konventioneller Teilentladungsmesstechnik werden in dieser Arbeit die ultrahochfrequente, die akustische und die optische Teilentladungsmesstechnik bezeichnet.

DIN EN 60270 abhängig von dem gewählten Zeitfenster, in dem keine Teilentladung stattfinden darf. Die Ladungen vorangegangener Teilentladungsereignisse akkumulieren bei inneren Teilentladungen in einem gasgefüllten Lunker an den Grenzflächen zwischen dem Feststoffdielektrikum und dem Gas. Durch das hierdurch entstehende Raumladungsfeld wird das resultierende elektrische Feld in der Fehlstelle reduziert. Zusammen mit der Tatsache, dass Ladungsträger aus vorangegangenen Entladungen nicht als lawinenwirksames Anfangselektron wirken können, ist die Teilentladungswiederholrate sehr gering. Dies macht die Messung langwierig und externe Störungen stehen nur relativ wenigen Teilentladungssignalen gegenüber. Nach dem Zuschalten der Gleichspannung geht die elektrische Feldverteilung im Bereich der Fehlstelle mit der Zeit von der anfänglich kapazitiven in die resistive Feldverteilung über. Die stationäre resistive elektrische Feldverteilung ist stark abhängig von der Temperatur und der Feuchte der elektrisch belasteten Isolierstoffe.

Daher sollen im Folgenden das elektrische Feld und die Bereitstellung eines lawinenwirksamen Anfangselektrons bei Teilentladungen unter Gleichspannungsbelastung detaillierter betrachtet werden.

2.3 Elektrisches Feld und Grenzflächenladung

Das elektrische Feld im Prüfkörper bei Gleichspannungsbelastung ist eine Superposition aus zwei Komponenten: Dem kapazitiven elektrischen Verschiebungsfeld mit der elektrischen Feldstärke \vec{E}_ϵ und dem Raumladungsfeld mit der elektrischen Feldstärke \vec{E}_ρ . Unter der Annahme, dass die elektrische Permittivität konstant ist, ergibt sich folgende resultierende elektrische Feldstärke \vec{E}_{DC} bei Gleichspannungsbelastung [FRO-95]:

$$\vec{E}_{DC}(t) = \vec{E}_\epsilon + \vec{E}_\rho(t) \quad (\text{Gl. 1})$$

Für das kapazitive elektrische Verschiebungsfeld berechnet sich die Verschiebungsstromdichte bei konstanter Permittivität ϵ mittels der Maxwellschen Gleichung zu:

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Gl. 2})$$

Das Raumladungsfeld lässt sich über die Divergenz seiner elektrischen Flussdichte berechnen zu:

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{Gl. 3})$$

Für das resistive elektrische Strömungsfeld berechnet sich die Leitungsstromdichte mittels des ohmschen Gesetzes und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit κ zu:

$$\vec{j} = \kappa \vec{E} \quad (\text{Gl. 4})$$

Aufgrund der Änderung des elektrischen Feldes finden Polarisationsvorgänge, das heißt die feldstärkebedingte Ausrichtung von Ladungsträgern statt. Nach [BEY-86] können drei Mechanismen unterschieden werden:

- **Deformationspolarisation**
Mit Deformationspolarisation wird die Verschiebung positiver und negativer Ladungsschwerpunkte eines neutralen Moleküls bezeichnet [PHI-76]. Der Vorgang dauert mehrere Femtosekunden bis Pikosekunden [KAH-89]. Alle Stoffe weisen die Deformationspolarisation auf. Wenn keine weiteren Polarisationsmechanismen auftreten, wird der Stoff daher als unpolar bezeichnet [BEY-86].
- **Orientierungspolarisation**
Die Orientierungspolarisation tritt auf, wenn sich durch ein von außen eingepprägtes elektrisches Feld im Stoff vorhandene permanente Dipole entsprechend ausrichten [BEY-86]. Dies ist bei organischen Werkstoffen mit polaren Molekülen und Gruppen, wie zum Beispiel Epoxidharzformstoff und einigen Thermoplasten der Fall [KUE-17]. Die Orientierungspolarisation findet im Zeitbereich von Milli- und Mikrosekunden statt [KUE-17].
- **Raumladungspolarisation**
Die Raumladungspolarisation ist die Polarisierung durch Akkumulation von Ladungsträgern im Isolierstoff. Da diese Akkumulation häufig an Grenzflächen verschiedener Isolierstoffe auftritt, wird häufig nur der Spezialfall der Grenzflächenpolarisation betrachtet. Grenzflächenpolarisation ist ein vergleichsweise langsamer Vorgang und läuft im Zeitbereich zwischen Sekunden und Stunden ab [KUE-17]. Es wird zwischen Homo- und Heteroladung unterschieden: Homoladung bedeutet, dass negative Ladungsträger kathodennah akkumulieren und positive Ladungsträger in der Nähe der Anode. Bei Heteroladung akkumulieren positive Ladungsträger in der Nähe der Kathode und negative Ladungsträger nahe der Anode.

Die Zeitdauer der Neuordnung der Ladungen wird als Relaxationszeit bezeichnet und bedingt den Polarisationsstrom $i_p(t)$.

Nach dem Abklingen aller Polarisationsvorgänge tritt in dem stationären Strömungsfeld eine Leckstromdichte auf, welche den Leckstrom i_L an den Klemmen verursacht [KRE-95].

Dieser Übergang wird als kapazitiv-resistiver Feldübergang bezeichnet und ist ein Grund für die Zeitabhängigkeit der Teilentladungsaktivität bei Gleichspannungsbelastung. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Ströme.

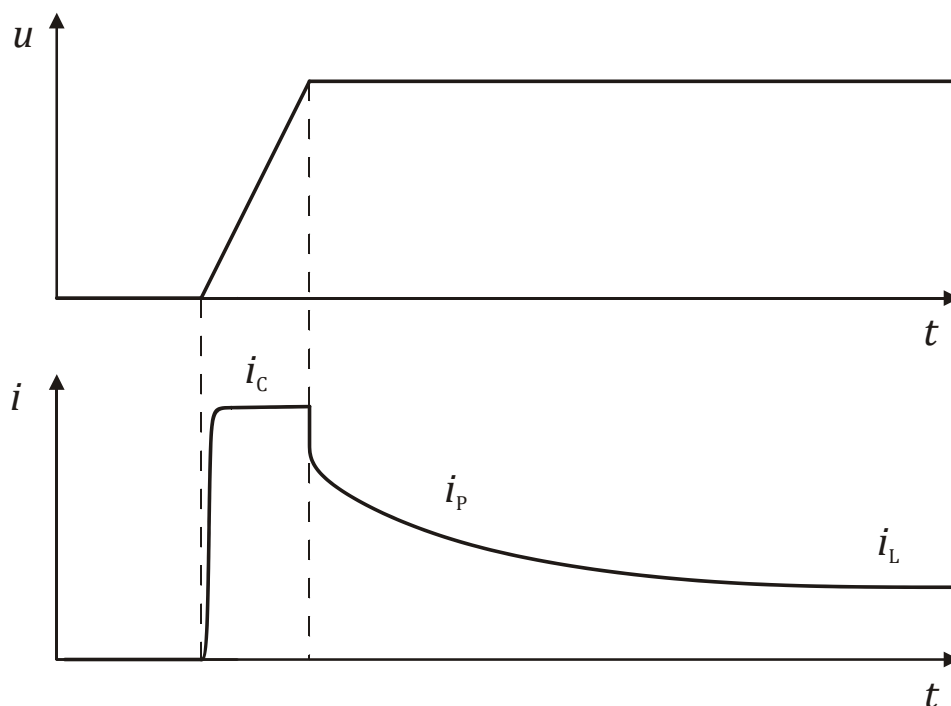


Abbildung 1 Schematischer Verlauf des Stromes durch einen Isolierstoffprüfling bei Zuschalten einer Gleichspannung mit rampenförmigem Anstieg nach [KRE-95]

Für sehr hohe elektrische Feldstärken sinkt der spezifische Durchgangswiderstand ρ bei polymeren Dielektrika bei weiter zunehmender Feldstärke aufgrund zusätzlich auftretender Leitungsmechanismen [OLS-79], [BEY-86]. Dies wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die in dieser Arbeit untersuchten Prüfkörper mit innerer Fehlstelle bestehen aus mehreren Isolierstoffen und weisen somit Grenzflächen im feldbelasteten Raum auf. Der Maxwell-Wagner-Kondensator dient als hypothetische Anordnung zur Beschreibung der Vorgänge in einer Plattenkondensatoranordnung mit zwei Dielektrika [WAG-24]. Diese weisen eine Grenzfläche orthogonal zu den elektrischen Feldlinien auf und werden im Folgenden mit „a“ und „b“ bezeichnet.

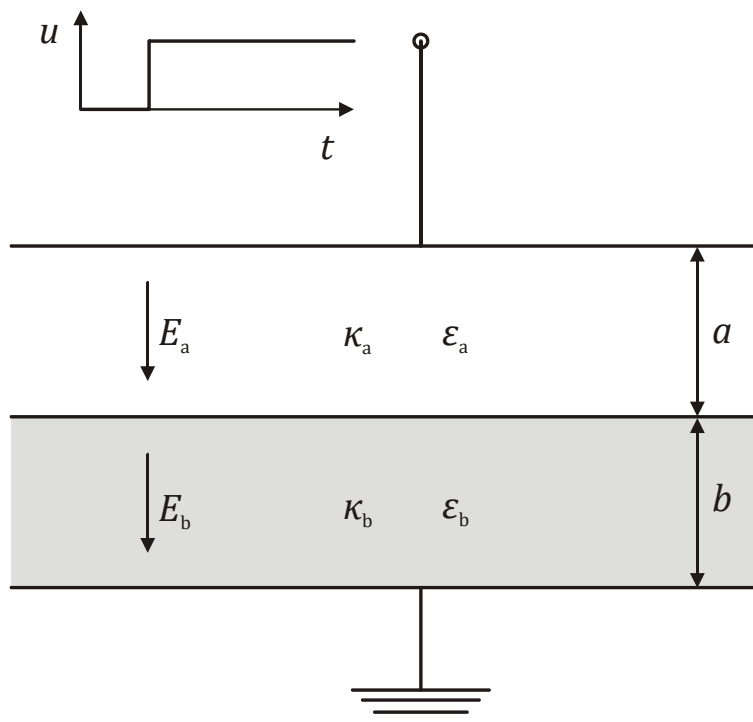


Abbildung 2 Der Maxwell-Kondensator nach [WAG-24]

An der oberen Elektrode wird ab dem Zeitpunkt $t = 0$ sprunghaft eine Spannung U angelegt. An der Grenzfläche zwischen den Dielektrika a und b ergibt sich aufgrund des Kontinuitätsgesetzes nach Maxwell [HIP-54]:

$$\kappa_a E_a(t) + \frac{\partial \varepsilon_a E_a(t)}{\partial t} + \frac{\partial P_a(t)}{\partial t} = \kappa_b E_b(t) + \frac{\partial \varepsilon_b E_b(t)}{\partial t} + \frac{\partial P_b(t)}{\partial t} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit der zeitabhängigen Polarisation $P_n(t)$ des Dielektrikums n. Durch Vernachlässigung der langsamen Polarisationsmechanismen und Annahme konstanter Permittivitäten ergibt sich aus Gl. 5:

$$\kappa_a E_a(t) + \frac{\varepsilon_a \partial E_a(t)}{\partial t} = \kappa_b E_b(t) + \frac{\varepsilon_b \partial E_b(t)}{\partial t} \quad (\text{Gl. 6})$$

Für die über den Maxwell-Kondensator anliegende Gleichspannung gilt:

$$U = \int_0^{a+b} E(t) dx = E_a(t) a + E_b(t) b \quad (\text{Gl. 7})$$

Wird nun Gl. 7 nach der elektrischen Feldstärke im Bereich b umgestellt, so ergibt sich:

$$E_b(t) = \frac{1}{b}U - \frac{a}{b}E_a(t) \quad (\text{Gl. 8})$$

Die in Gl. 8 ermittelte elektrische Feldstärke im Material b wird nun in die Gl. 6 eingefügt und es ergibt sich:

$$(b\varepsilon_a + a\varepsilon_b)\frac{\partial E_a(t)}{\partial t} + (b\kappa_a + a\kappa_b)E_a(t) = \kappa_b U \quad (\text{Gl. 9})$$

In Gl. 9 wurde die Ableitung der angelegten Klemmenspannung weggelassen, da sie bei Gleichspannungsbelastung konstant ist und daher ihre Ableitung Null ergibt.

Unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ des Zuschaltens der Spannung U keine Ladung im Kondensator gespeichert ist und ein rein kapazitiver Spannungsteiler vorliegt, löst die folgende Gleichung die Differentialgleichung Gl. 9 [HIP-54]:

$$E_a(t) = \frac{\kappa_b}{b\kappa_a + a\kappa_b}U(1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\varepsilon_b}{b\varepsilon_a + a\varepsilon_b}Ue^{-t/\tau} \quad (\text{Gl. 10})$$

Entsprechend gilt für die elektrische Feldstärke in Material b:

$$E_b(t) = \frac{\kappa_a}{b\kappa_a + a\kappa_b}U(1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\varepsilon_a}{b\varepsilon_a + a\varepsilon_b}Ue^{-t/\tau} \quad (\text{Gl. 11})$$

Für die Zeitkonstante τ in Gl. 10 und Gl. 11 gilt:

$$\tau = \frac{b\varepsilon_a + a\varepsilon_b}{b\kappa_a + a\kappa_b} \quad (\text{Gl. 12})$$

Während des Einschaltvorgangs liegt eine rein kapazitive Feldstärkeverteilung vor:

$$\frac{E_a(0)}{E_b(0)} = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \quad (\text{Gl. 13})$$

Im stationären Fall ($t \rightarrow \infty$) gilt:

$$\frac{E_a(\infty)}{E_b(\infty)} = \frac{\kappa_b}{\kappa_a} \quad (\text{Gl. 14})$$

Im stationären Zustand ist die Stromdichte in beiden Materialien gleich groß und es ergibt sich Gl. 15 zu:

$$J_a(\infty) = \kappa_a E_a(\infty) = J_b(\infty) = \kappa_b E_b(\infty) \quad (\text{Gl. 15})$$

Während des Ausgleichsvorgangs ist die Stromdichte in den beiden Materialien unterschiedlich, was zu einer Ladungsträgerakkumulation an der Grenzfläche zwischen den beiden Materialien führt. Mittels der Maxwellschen Quellengleichung $\text{div}(D) = \rho$ ergibt sich über die Quergrenzfläche die Flächenladungsdichte σ zu:

$$\sigma(t) = \varepsilon_b E_b(t) - \varepsilon_a E_a(t) \quad (\text{Gl. 16})$$

Die Flächenladungsdichte $\sigma(t)$ lässt sich durch die zeitliche Integration der Stromdichten in den beiden Dielektrika bestimmen [LUT-11]:

$$\sigma(t) = \int_0^t (\kappa_a E_a(t) - \kappa_b E_b(t)) dt = \frac{\kappa_a \varepsilon_b - \kappa_b \varepsilon_a}{b\kappa_a + a\kappa_b} U (1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{Gl. 17})$$

Die Zeitkonstante τ berechnet sich nach Gl. 12.

Basierend auf den obigen Gleichungen und auf den Arbeiten von Fromm und Kreuger hat sich für innere Fehlstellen ein Modell entwickelt, welches im Folgenden vorgestellt werden soll [FRO-95], [KRE-95].

In einem Prüfkörper mit innerer Fehlstelle des Typs Lunker akkumulieren die Ladungen an der Grenzfläche zwischen Gas und Feststoff. Dies geschieht sowohl durch den kapazitiv-resistiven Übergang als auch durch Teilentladungsereignisse. Dies soll in den folgenden Abbildungen dargestellt werden. Es handelt sich um eine Modelldarstellung der bei den Messungen verwendeten Prüfkörpern in Sandwich-Anordnung. Zwischen den schwarz dargestellten Elektroden, deren Polarität mit „+“ und „-“ gekennzeichnet ist, befindet sich der in den Abbildungen grau dargestellte feste Isolierstoff. Im zentralen Bereich befindet sich ein luftgefüllter Lunker. Dieser gasförmige Isolierstoff ist weiß dargestellt. In Abbildung 3 ist die Rotationsachse der Anordnung gestrichelt angedeutet. In den danach folgenden Abbildungen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf diese Achse verzichtet.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ des Zuschaltens der Spannung U herrscht im Prüfkörper eine kapazitive Feldverteilung ohne akkumulierte Ladung an den Grenzflächen der Dielektrika. Abbildung 3 zeigt die aufgrund der anliegenden Klemmenspannung auftretende elektrische Feldstärke E_{ext} im Lunker bei der vorliegenden kapazitiven Feldstärkeverteilung.

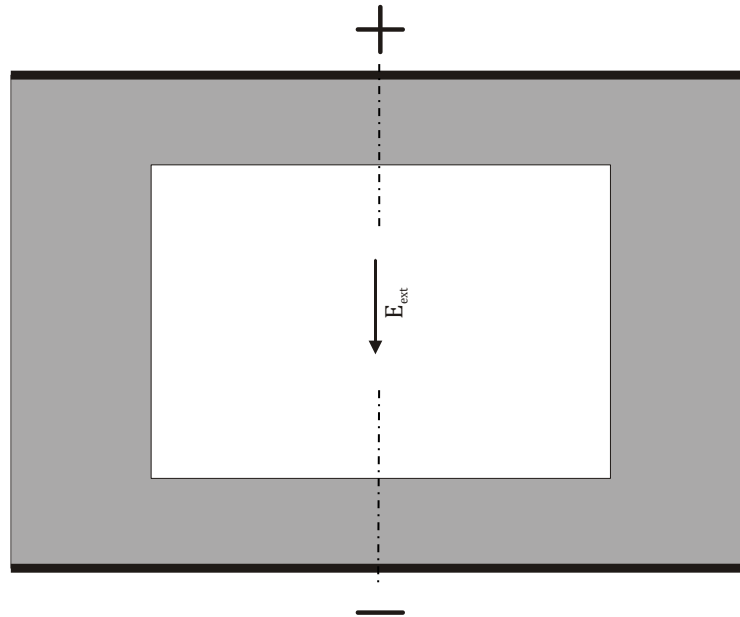


Abbildung 3 Elektrisches Feld in der Fehlstelle eines Prüfkörpers beim sprunghaften Zuschalten der Spannung
 Grau: Fester Isolierstoff
 Weiß: Luft
 Strichliert dargestellt die Rotationsachse

Unter der Annahme, dass keine Teilentladung stattfindet, stellt sich als stationärer Zustand eine resistiv verteilte elektrische Feldstärke ein. Aufgrund des Unterschiedes der spezifischen Leitfähigkeit der beiden Dielektrika (κ_a zu κ_b) um bis zu mehreren Größenordnungen nimmt die Belastung des niedriger leitfähigen Dielektrikums (Luft) drastisch zu [KUE-17]. Im stationären Zustand ist die Stromdichte in beiden Dielektrika gleich, an den Grenzflächen zwischen den beiden Dielektrika sind Homoladungen akkumuliert. Abbildung 4 zeigt diese Situation für die Zeit $t \rightarrow \infty$ im Lunker. Die Homoladungen sind rot dargestellt. Aufgrund der Superposition der beiden elektrischen Felder mit der durch die Klemmenspannung verursachten Feldstärke E_{ext} und der durch die Raumladungen verursachten Feldstärke E_{RL} steigt durch die Ladungsträgerakkumulation die resultierende elektrische Feldstärke E_{ges} in der Fehlstelle an.

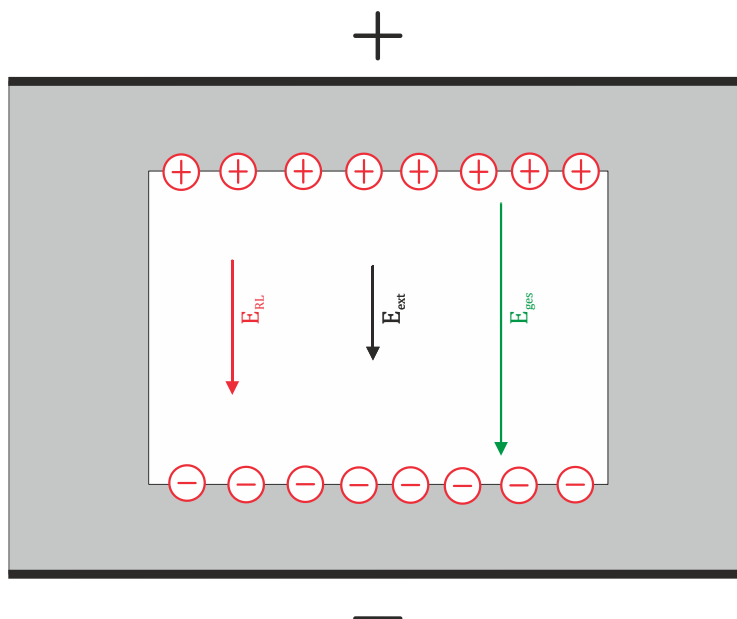


Abbildung 4 Elektrisches Feld in der Fehlstelle eines Prüfkörpers im stationären Zustand, das heißt mit an den Isolierstoffgrenzflächen akkumulierten Ladungen ohne Teilentladungen

Unter der Annahme, dass die elektrische Feldstärke in dem Lunker während des kapazitiv-resistiven Feldübergangs die Zündfeldstärke überschreitet, können im Falle des Vorhandenseins eines lawinenwirksamen Anfangselektrons Teilentladungen stattfinden. Dabei werden im Gasraum durch Stoßionisation freie Elektronen und positive Ionen generiert. Diese Ladungsträger driften aufgrund der im Lunker vorhandenen elektrischen Feldstärke zu den Grenzflächen der Dielektrika, wo sie zunächst die resistiv angesammelten Homoladungen beziehungsweise kompensieren und dann als Heteroladung akkumulieren. Abbildung 5 zeigt diese Situation nach der teilentladungsbedingten Umladung im Lunker.

Der Abbau dieser akkumulierten Ladungen kann auf drei verschiedenen Wegen erfolgen:

- Abbau durch das Isolierstoffvolumen
Aufgrund der geringen Leitfähigkeit des Feststoffdielektrikums fließt die Ladung nur sehr langsam ab. Durch die Entlastung der Fehlstelle steigt jedoch die elektrische Feldstärke über dem Feststoff, was diesen Prozess hingegen beschleunigt. Messungen von Baum in Polyethylen legen nahe, dass bei den üblichen atmosphärischen Bedingungen die Ladungsträger nach ihrer Injektion in den Feststoff üblicherweise durch diesen zur korrespondierenden Elektrode abfließen [BAU-77a], [BAU-77b].

- **Abbau entlang der Grenzflächen**
Hierbei spielt die Oberflächenleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Bei Teilentladungen bilden sich oftmals leitfähige Nebenprodukte, welche die Leitfähigkeit der Oberfläche um mehrere Größenordnungen erhöhen. Für Epoxidharzformstoff wies dies Hudon nach [HUD-90], [HUD-91], [HUD-93] und [HUD-95], für PE Gamez-Garcia [GAM-88]. Daher trägt dieser Prozess vor allem bei durch Teilentladungen gealterten Fehlstellen zum Ladungsträgerabbau bei. In Abschnitt 2.6 wird auf die durch die Teilentladungsaktivität entstehenden Alterungseffekte näher eingegangen.
- **Rekombination im Gasraum**
Für die Rekombination im Gasraum müssen die jeweils entgegengesetzt geladenen Moleküle als Rekombinationspartner zur Verfügung stehen. Dies macht die Rekombination bei Lunkern mit kleinen Gasvolumina sehr unwahrscheinlich.

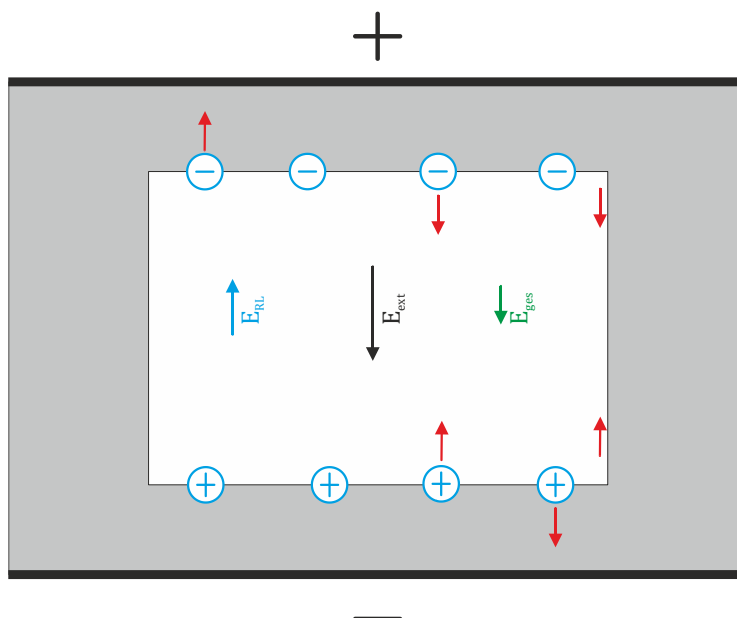


Abbildung 5 Elektrisches Feld in der Fehlstelle eines Prüfkörpers im stationären Zustand nach einem Teilentladungsereignis; mögliche Wege des Ladungsabbaus mit roten Pfeilen gekennzeichnet

Wird nun die Klemmenspannung zeitnah nach einem Teilentladungsereignis abgeschaltet, so ist die in der Fehlstelle durch die akkumulierte Ladung wirkende elektrische Feldstärke geometrieabhängig. Bei einer kleinen Fehlstellenhöhe in Bezug auf den Elektrodenabstand kann durch die akkumulierte Ladung die elektrische Feldstärke in der Fehlstelle ihre Polarität wechseln. Dieser Prozess wird Feldinversion genannt und kann im Extremfall, wenn die elektrische Feldstärke größer als die Zündfeldstärke ist, zu Teilentladungen entgegen der ursprünglichen Richtung führen. Diese Rückentladungen lassen sich bei Messungen anhand der im Vergleich zu den Teilentladungen bei angelegter

Klemmenspannung invertierten Polarität der scheinbaren Ladung identifizieren. Abbildung 6 zeigt die Feldstärke im Lunker nach dem Abschalten der Klemmenspannung, wenn zuvor Teilentladungen in der Fehlstelle aufgetreten sind unter Vernachlässigung der Ladung an den Elektroden.

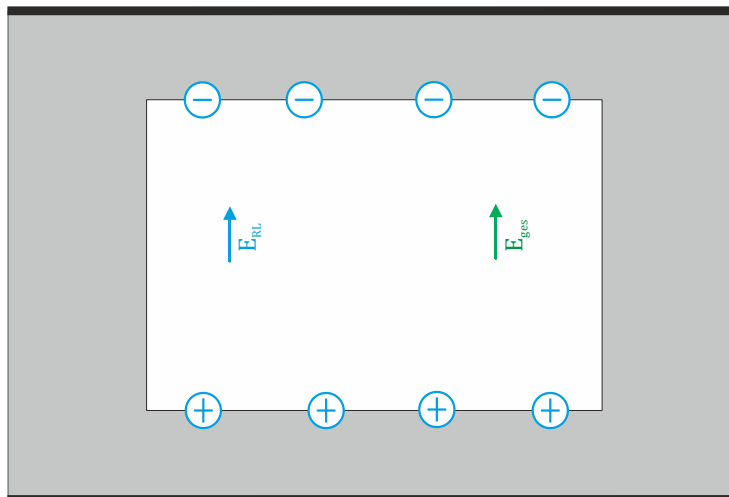


Abbildung 6 Elektrisches Feld in der Fehlstelle eines Prüfkörpers direkt nach dem Abschalten nach einer Spannungsbelastung mit Teilentladungsaktivität

Von Niemeyer wird basierend auf der Modellvorstellung von Pedersen, McAllister und Crichton angenommen, dass Teilentladungen Fehlstellen mit einer großen räumlichen Ausdehnung rechtwinklig zu den elektrischen Feldlinien nicht vollständig entladen [NIE-91]. Hierdurch entsteht nach einem Teilentladungsereignis eine inhomogene, ortsabhängige Verteilung der an den Grenzflächen akkumulierten Ladungen und somit ein inhomogenes, ortsabhängiges elektrisches Feld. Dieses Phänomen erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass aufeinanderfolgende Teilentladungen an unterschiedlichen Positionen innerhalb der räumlich weit ausgedehnten Fehlstelle stattfinden. Dem gegenüber steht die Tatsache, dass durch die Rauheit der Lunkergrenzfläche das elektrische Feld an Erhebungen lokal erhöht wird. Dies vergrößert die Wahrscheinlichkeit, dass aufeinanderfolgende Teilentladungen standorttreu sind.

Die spezifische Leitfähigkeit der verschiedenen Isolierstoffe variiert untereinander um mehrere Größenordnungen und ist stark abhängig von der Temperatur und Feuchte des Isolierstoffes. Die Permittivität verschiedener Isolierstoffe liegt hingegen in derselben Größenordnung und ist nur sehr schwach temperatur- und feuchteabhängig. Bei Teilentladungsmessungen an Prüfkörpern unter Gleichspannungsbelastung spielen deshalb die Temperatur und die Feuchte sowie die Belastungsdauer eine signifikante Rolle. Diese Daten müssen daher bei der Messung mit aufgezeichnet werden.

Die Entladung der Fehlstelle kann entweder als streamerartige oder als townsendartige Teilentladung auftreten. Deren jeweilige Auftrittswahrscheinlichkeit wird unter anderem durch die elektrische Feldstärke im Gasraum, der Fehlstellengröße sowie des Alterungszustandes beschrieben.

Die townsendartige Teilentladung wird von Fromm und Kreuger als großflächige, vergleichsweise langsame Entladung bestehend aus vielen einzelnen Elektronenlawinen beschrieben [FRO-95], [KRE-95]. Sie tritt vermehrt bei gealterten Prüfkörpern, kleinen Fehlstellen und elektrischen Feldstärken knapp über der Zündfeldstärke im Gasraum auf [FRO-95]. Diese lässt sich mittels des Paschengesetzes bestimmen. Bei townsendartigen Teilentladungen ist die Restfeldstärke direkt nach dem Auftritt eines Entladungsereignisses gleich der Zündfeldstärke.

Unter der Leitung von Dakin wurde für das CIGRÉ-Studienkomitee Nr. 15 ein Literaturüberblick zur Gewinnung einer Paschenkurve in Luft mittels Messwerten aus verschiedenen Vorarbeiten durchgeführt [DAK-74]. Mason wies nach, dass die Abweichung des Entladungseinsatzes zwischen blanken Elektroden (Paschens ursprünglicher Anordnung) und inneren Fehlstellen mit Isolierstoff zwischen den Elektroden und dem Gasraum sehr klein ist und daher vernachlässigt werden kann [MAS-78].

Bei größeren Fehlstellen, höheren elektrischen Feldstärken im Gasraum und kürzerer Belastungsdauer treten überwiegend streamerartige Teilentladungen auf. Crichton gibt folgende Streamereinsatzfeldstärke E_{Str} für innere Fehlstellen an [CRI-89]:

$$E_{\text{Str}} = p \left(\frac{E}{p} \right)_0 \left(1 + \frac{B}{(pd)^n} \right) \quad (\text{Gl. 18})$$

mit den für das Gas charakteristischen Werten $\left(\frac{E}{p} \right)_0$, B und n . Für Luft gilt: $\left(\frac{E}{p} \right)_0 = 24,2 \text{ V/mPa}$, $B = 8,6 \sqrt{\text{Pa m}}$ und $n = 0,5$ [PED-89], [CRI-89]. Nach Gallimberti erlischt ein Streamer, wenn das mittlere elektrische Feld in der Fehlstelle kleiner als das Streamerstabilitätsfeld E_g ist, welches sich für positive Streamer nach Gl. 19 berechnen lässt [GAL-79], [NIE-91]:

$$E_g = \gamma E_0 = \gamma \left(\frac{E}{p} \right)_0 p \quad (\text{Gl. 19})$$

mit dem Koeffizienten $\gamma = 0,2$ für positive Polarität und $\gamma = 0,5$ für negative Polarität des Streamers in Luft [NIE-95]. Für symmetrische Prüfkörper beziehungsweise Fehlstellen gilt der niedrigere Wert von 0,2.

In Kapitel 2.5 wird gezeigt, dass streamerartige und townsendartige Teilentladungen in inneren Fehlstellen unter Gleichspannungsbelastung auftreten können.

2.4 Bereitstellung des Anfangselektrons

Neben dem lokalen Überschreiten der Zündfeldstärke ist das Vorhandensein eines lawinenwirksamen Anfangselektrons die zweite notwendige Bedingung für das Auftreten einer Teilentladung. Im Folgenden soll dies für luftgefüllte Lunker unter atmosphärischen Normalbedingungen näher betrachtet werden.

Aufgrund von natürlicher terrestrischer und kosmischer Strahlung befinden sich ortsabhängig circa 500 IP/cm^3 in Luft bei Normbedingungen und auf Seehöhe. Durch den die Fehlstelle umgebenden Isolierstoff wird die α -Strahlung abgeschirmt und das Gleichgewicht stellt sich aufgrund der geringeren Ionisierungsrate auf einen wesentlich geringeren Wert ein [KIN-86].

Beim Anlegen der Klemmenspannung an den Prüfkörper werden ab einer elektrischen Feldstärke von 30 V/m im Lunker alle dort anfangs vorhandenen Ladungsträger abgesaugt. Diese akkumulieren an den Grenzflächen des Lunkers. Aufgrund der niedrigen elektrischen Feldstärke erfolgt bei dieser Bewegung keine Stoßionisation, sodass keine Teilentladungen auftreten. Wird die Spannung nun weiter erhöht und überschreitet die elektrische Feldstärke die Zündfeldstärke, dann kann eine Teilentladung nur stattfinden, sofern ein lawinenwirksames Anfangselektron generiert wurde. Dies kann entweder als Volumeneffekt im Gasraum oder als Oberflächeneffekt an der Grenzfläche Gas-Feststoff erfolgen. Abbildung 7 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Bereitstellung eines lawinenwirksamen Anfangselektrons auf.

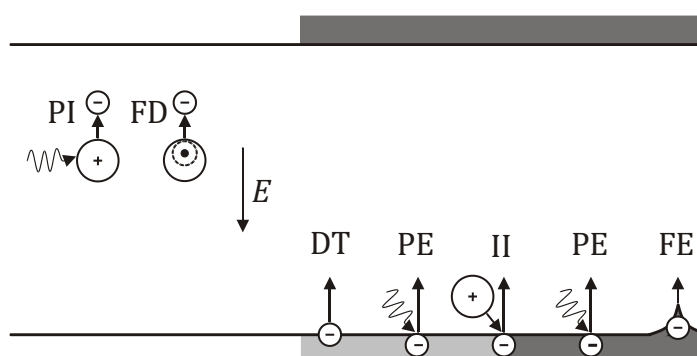


Abbildung 7 Volumen- (links) und Oberflächenprozesse (rechts) zur Bereitstellung lawinenwirksamer Anfangselektronen nach [NIE-95]
 Hellgrau: Isolierstoff
 Dunkelgrau: Leiter
 Erläuterungen der Abkürzungen im Text

2.4.1 Erzeugung im Gasvolumen

Die in Abbildung 7 links gezeigte Bereitstellung des Anfangselektrons im Volumen kann nach Niemeyer entweder durch Photoionisation (PI) aufgrund von Photonenbestrahlung oder durch feldbedingte Elektronenablösung (FD) aus negativ geladenen Ionen erfolgen. Nach Niemeyer gilt [NIE-95]:

$$\dot{N}_e = \eta_i (\text{Gas}, E, \dots) p V_{\text{eff}} \left(1 - \frac{\eta}{\alpha}\right) \quad (\text{Gl. 20})$$

Die Erzeugungsrate von Anfangselektronen \dot{N}_e skaliert mit dem Gasdruck p und dem der Strahlung und dem Feld ausgesetzten Volumen V_{eff} . η_i beschreibt den Ionisationsmechanismus in Abhängigkeit unter anderem des Gases sowie der elektrischen Feldstärke im Gasraum. Der Legler-Term $\left(1 - \frac{\eta}{\alpha}\right)$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass sich aus einem einzelnen Elektron in elektronenaffinen Gasen bei homogenem elektrischem Feld eine Entladungslawine entwickelt [LEG-61]. Nach Niemeyer ist das elektrische Feld beim Auftreten einer Teilentladung so groß, dass der Legler-Term gegen eins konvergiert [NIE-95]. Bei inneren Fehlstellen ohne direkten Kontakt zur metallischen Anode spielt die feldbedingte Elektronenablösung keine Rolle, sodass im Volumen einzig der Erzeugungsmechanismus Photoionisation, verursacht durch kosmische Strahlung, Gammastrahlung, Röntgenstrahlung oder harte UV-Strahlung wirkt [NIE-91]. Für diesen Fall gibt Niemeyer für die Erzeugungsrate von Anfangselektronen folgende Formel an [NIE-91]:

$$\dot{N}_e = C_{\text{rad}} \phi_{\text{rad}} \rho \pi r^2 (d - l_{\text{min}}) \quad (\text{Gl. 21})$$

mit dem Strahlungsabsorptionskoeffizienten C_{rad} , der Strahlungsflussdichte ϕ_{rad} , der Gasdichte ρ , dem Radius des Entladungsquerschnitts r , dem Abstand zwischen den Grenzflächen im Bereich der Entladung d und der Mindestlänge l_{min} . Abbildung 8 zeigt die geometrischen Parameter in der Fehlstelle.

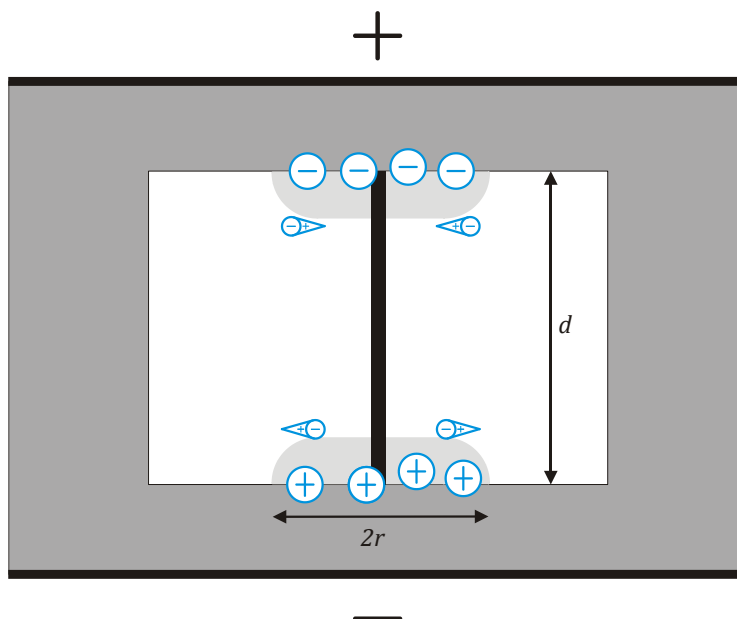


Abbildung 8 Für die Bestimmung der Teilentladungsaktivität relevante geometrische Parameter in der Fehlstelle nach [NIE-91]
 Schwarz: Entladungskanal
 Hellgrau: Bereich, in dem sich die akkumulierte Ladung aufgrund des horizontalen elektrischen Feldes verteilt

Nur wenn das Anfangselektron hinreichend weit von der anodischen Grenzfläche generiert wurde, kann sich ein Streamer ausbilden. Dies wird mit der Mindestlänge l_{\min} ausgedrückt. Diese berechnet sich zu [NIE-91]:

$$l_{\min} = \left[\frac{B}{\frac{E}{E_0} - 1} \right]^{1/n} \frac{1}{p} \quad (\text{Gl. 22})$$

Im Falle einer natürlichen kosmischen und radioaktiven Bestrahlung kann der Ionisationsfaktor $C_{\text{rad}}\phi_{\text{rad}}$ im Lunker mittels der atmosphärischen Volumenionisationsrate von $\dot{N}_e = 2 * 10^6 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$ abgeschätzt werden zu $(C_{\text{rad}}\phi_{\text{rad}})_{\text{nat}} \approx 2 * 10^6 \text{ kg}^{-1}\text{s}^{-1}$ [NIE-91].

2.4.2 Erzeugung an Oberflächen

Nach Niemeyer treten an der Oberfläche von Isolierstoffen und Elektroden vier mögliche Mechanismen zur Bereitstellung freier Elektronen auf (siehe Abbildung 7) [NIE-95]:

1. Detrapping (DT):

Mit Detrapping wird das Herauslösen von Elektronen aus sogenannten Fallen oder Traps, einem energetischen Zustand zwischen dem besetzten Valenz- und dem unbesetzten Leitungsband des Isolierstoffs nahe der Oberfläche bezeichnet. Bei

Wechselspannung können hierfür teilweise die Elektronen der Teilentladungen der vorangegangenen Halbwelle genutzt werden. Bei Gleichspannung findet jedoch keine Umpolung statt, sodass Detrapping eine untergeordnete Rolle spielt.

2. Photoemission (PE):

Die Photoemission kann sowohl an der Oberfläche von Isolierstoffen als auch an Leitern Anfangselektronen bereitstellen. Weil die Freisetzungstiefe der durch Strahlung generierten Elektronen typischerweise weniger als 10 nm beträgt, ist das für die Ionisation zur Verfügung stehende Volumen sehr gering und die Photoionisation im Gasraum ist bei inneren Teilentladungen für die Erzeugung von Anfangselektronen dominierend [NIE-91].

3. Aufprallionisation (II):

Die Ionisation durch Aufprall von Ionen auf Oberflächen wird auch als zweiter Townsendscher Ionisationsmechanismus bezeichnet und tritt sowohl an Isolierstoff-Gas-Grenzflächen als auch an Grenzflächen zwischen Elektroden und Gasen auf. Für leitende Grenzflächen wurde der Effekt von Bowls untersucht [BOW-38]. Mayoux untersuchte die Sekundärelektronenbereitstellung bei inneren Fehlstellen in PE basierend auf der Vorarbeit von Bruining durch Bestrahlung mit Elektronen und positiven Ionen [MAY-76], [BRU-54]. Bei Letzteren konnte er bei einem Beschleunigungspotential von 200 V bis 2 kV Stromdichten zwischen $0,25 \text{ nA/mm}^2$ und 5 nA/mm^2 nachweisen [MAY-76].

4. Feldemission (FE):

Feldemission tritt in kathodischen Bereichen mit lokal überhöhtem elektrischem Feld auf. Dies sind vor allem Kanten und Spitzen an der Elektrode mit negativer Polarität. Da bei den untersuchten Prüfkörpern der Lunker geschlossen ist und somit kein direkter Kontakt zwischen Gasraum und Elektrode besteht, spielt dieser Generationsmechanismus in diesem Fall keine Rolle. Außerdem ist die Rautiefe der Isolierstoffoberfläche der untersuchten Prüfkörper vergleichsweise gering, sodass in Luft unter atmosphärischen Normalbedingungen keine Feldemission stattfinden sollte.

2.5 Entladung und Teilentladungsstromimpuls

Basierend auf der Arbeit von Mason unter Wechselspannungsbelastung, in welcher er das feld- und druckabhängige Auftreten von unterschiedlichen Entladungstypen vorstellt,

wird in der Literatur seit langer Zeit über das Auftreten verschiedener Typen von Teilentladungen bei Prüfkörpern mit innerer Fehlstelle unter Gleichspannungsbelastung berichtet [MAS-78]. Devins legte an die Prüfkörper eine Gleichspannung knapp unterhalb der Teilentladungseinsetzspannung an und startete die Teilentladung kontrolliert durch Anlegen eines Überspannungsimpulses [DEV-84a], [DEV-84b]. Daraufhin wurde mittels kombinierter optischer und konventioneller Teilentladungsmesstechnik von Holbøll nachgewiesen, dass townsend- und streamerartige Teilentladungen unterschiedliche geometrische Ausdehnungen in der Fehlstelle aufweisen [HOL-91]. Fromm wies an Sandwich-Prüfkörpern aus drei Folien mit innerer Fehlstelle durch Strommessung nach, dass unter Gleichspannungsbelastung sowohl schnelle, streamerartige, als auch langsame, townsendartige Teilentladungen auftreten können [FRO-94]. Mit Zunahme der Überspannung steigt die Auftrittswahrscheinlichkeit der streamerartigen Teilentladungen, mit zunehmender Belastungsdauer steigt die Auftrittswahrscheinlichkeit der townsendartigen Teilentladungen [FRO-95]. Entsprechend des Auftretens der Entladungen wird im Folgenden zuerst auf die streamerartigen und dann auf die townsendartigen Entladungen näher eingegangen.

2.5.1 Streamerartige Teilentladungen

Morshuis stellte fest, dass vor allem bei der Erstbelastung von Prüfkörpern mit innerer Fehlstelle vom Typ Luncker streamerartige Teilentladungen in Form von hochfrequenten Impulsgruppen auftreten [MOR-90]. Abbildung 9 stellt den idealtypischen Stromverlauf eines streamerartigen Teilentladungsereignisses in blau dar. In rot ist das optional direkt nachfolgende zweite Teilentladungsereignis dargestellt. Konventionelle Teilentladungsmesstechnik mit vergleichsweise beschränkter Bandbreite detektiert hierbei nur ein Teilentladungsereignis mit einer vergleichsweise großen Teilentladung [MOR-90].

Durch die große Überspannung ist die elektrische Feldstärke in der Fehlstelle so hoch, dass beim Eintreten einer Entladung die kritische Anzahl an Elektronen im Lawinenkopf überschritten wird und hierdurch Photoionisation in der Fehlstelle auftreten kann. Dies kann sowohl optisch detektiert werden (siehe Kapitel 5.3) als auch durch mehrere, sich zu einem Gesamtimpuls überlagernde Einzelimpulse, welche sich mittels der Strommessung nachweisen lassen. Durch den dünnen Entladungskanal, welcher sich optisch detektieren lässt, ist die Ladungsträgerdichte an den jeweiligen Kanalfußpunkten sehr hoch [MOR-90], [HOL-91]. Die hierdurch entstehende hohe elektrische Feldstärke²

² Die Feldstärke durch die hohe Dichte der akkumulierten Ladungen ist auch parallel zur Grenzfläche und damit orthogonal zur externen elektrischen Feldstärke

führt zu Teilentladungen parallel zur Lunkergrenzfläche. Dies kann laut Engel durch die hierdurch ermöglichte Photoionisation zu weiteren lawinenwirksamen Anfangselektronen führen [ENG-98].

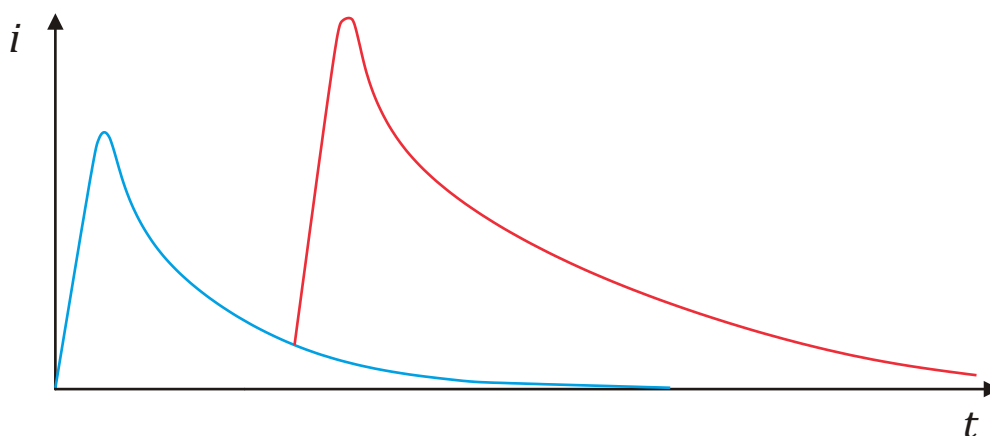


Abbildung 9 Schematischer Stromverlauf streamerartiger Teilentladungen nach Fromm [FRO-95]
 Blau: Erste Teilentladung
 Rot: Häufig, jedoch nicht zwangsläufig nachfolgende zweite Teilentladung
 Impulsdauer der einzelnen Impulse in der Größenordnung zehn Nanosekunden [FRO-95]; Scheitelwert des Stromes um zehn Milliampere [FRO-95]

Streamerartige Teilentladungsvorgänge sind vergleichsweise schnell mit Anstiegszeiten unter einer Nanosekunde und Impulsdauern unter zehn Nanosekunden. Die Impulsdauer wird definiert als die Zeit, in der der Impulsstrom mindestens 50 % seines Maximalwertes beträgt. Streamerartige Teilentladungsvorgänge weisen hohe Maximalwerte des Stromes auf [FRO-95].

Bedingt durch die hohe Anzahl an Ladungsträgern im Kopf der Lawine wird das elektrische Feld dort lokal verstärkt und es tritt Photoionisation auf. Durch die Photonen können Teilbereiche der Fehlstelle mit Lichtgeschwindigkeit überbrückt werden, sodass innerhalb kurzer Zeit hohe Ladungsmengen ausgetauscht werden können. Ebenso können auch feldschwächere Bereiche überbrückt werden. Dies führt zu Restspannungen über der Fehlstelle direkt nach streamerartigen Teilentladungen nahe null [FRO-95], beziehungsweise circa 20 % der Zündspannung bei symmetrischen Fehlstellen, siehe Gl. 19. Dadurch verstreicht nach einer streamerartigen Teilentladung eine längere Zeit, bis die elektrische Feldstärke in der Fehlstelle wieder über der Zündfeldstärke liegt und die nachfolgende Teilentladung stattfinden kann. Daher treten bei streamerartigen Teilentladungen weniger Teilentladungsereignisse pro Zeit auf im Vergleich zu townsendartigen

Teilentladungen. Einzelne Teilentladungsereignisse können auch aus mehreren Einzelimpulsen bestehen [FRO-95]. Durch die in Kapitel 2.6 beschriebenen Alterungsmechanismen treten jedoch bei kleinen inneren Fehlstellen schnell townsendartige Teilentladungen auf.

2.5.2 Townsendartige Teilentladungen

Townsendartige Teilentladungen treten bei geringen Überspannungen über der Zündspannung auf. Bei gealterten inneren Fehlstellen ist die Grenzschicht mit einem leitfähigen Oxidfilm überzogen. Flache Haftstellen in diesem Film sorgen für die Anfangselektronenbereitstellung, sodass die Entladung mit nur marginalem Zündverzug starten kann [MOR-93]. Ebenso sorgt ein langsamer Anstieg der Potentialdifferenz über der Fehlstelle aufgrund einer vergleichsweise niedrigen stationären Potentialdifferenz statistisch gesehen zum Auftritt eines lawinenwirksamen Anfangselektrons und somit einer Teilentladung bei kleiner Überspannung. Positive Ionen sorgen mittels Aufprallionisation für die Erzeugung weiterer Lawinen. Ebenso spielt die Photoionisation an der Grenzfläche eine gewisse Rolle. Dies führt zu einem örtlich und zeitlich sehr diffusen Entladevorgang [KRE-95].

Bei townsendartigen Teilentladungen wird die gesamte Fehlstelle beziehungsweise ein großer Bereich hiervon auf eine Restspannung knapp unterhalb der Zündspannung entladen [FRO-95]. Die vergleichsweise kleinen Ströme und Ladungen [FRO-95] lassen sich oftmals nur schwer mittels konventioneller Teilentladungsmesstechnik detektieren [NIE-95]. Optisch sind diese Teilentladungen diffus [MOR-90], [HOL-91].

Gulski hat den Einfluss der geometrischen Parameter (Fehlstellenhöhe und -durchmesser sowie Oberflächenrauheit) dreilagiger Sandwich-Prüfkörper mit innerer Fehlstelle untersucht. Diese Parameter haben Einfluss auf das Auftreten der unterschiedlichen Teilentladungsarten und wirken sich somit auch auf das Klemmenverhalten aus [GUL-91].

Devins führte Messungen an Platte-Platte-Elektroden mit symmetrisch eingelegten Isolierstoffplatten, welche jedoch nicht die gesamte Schlagweite ausfüllten, unter Gleichspannungsbelastung in der Nähe der Teilentladungseinsetzspannung durch. Hierbei stellte er fest, dass die Impulsdauer proportional zur Fehlstellenhöhe ist. Die Impulsdauer und das Produkt aus Beweglichkeit der positiven Ionen unter den gegebenen Randbedingungen (elektrische Feldstärke, Luftdruck) und elektrischer Feldstärke stimmen hinreichend gut überein, sodass er schlussfolgert, dass die im Gasraum vorhandenen und zur Isolierstoffgrenzfläche hin beschleunigten Ionen für die Bereitstellung weiterer lawinenwirksamer Anfangselektronen verantwortlich sind [DEV-84b]. Bei der Betrachtung der Ströme postuliert er, dass der Anteil der positiv geladenen Ionen an der umgesetzten Ladung wesentlich größer (um den Faktor $ad - 1$) als der der Elektronen

ist [DEV-84b]. Der Elektronenstrom ist steilflankig, während der Ionenstrom sich durch die lange Phase mit näherungsweise konstantem Wert auszeichnet. Dies führt Devins darauf zurück, dass die meisten Stoßionisationsvorgänge aufgrund des Anwachsens der Ladungsträgerlawine in der Nähe der anodischen Fehlstellengrenze stattfinden und die langsamen positiven Ionen somit den weiteren Weg durch den Gasraum zurücklegen müssen. Abbildung 10 zeigt diesen Stromverlauf.

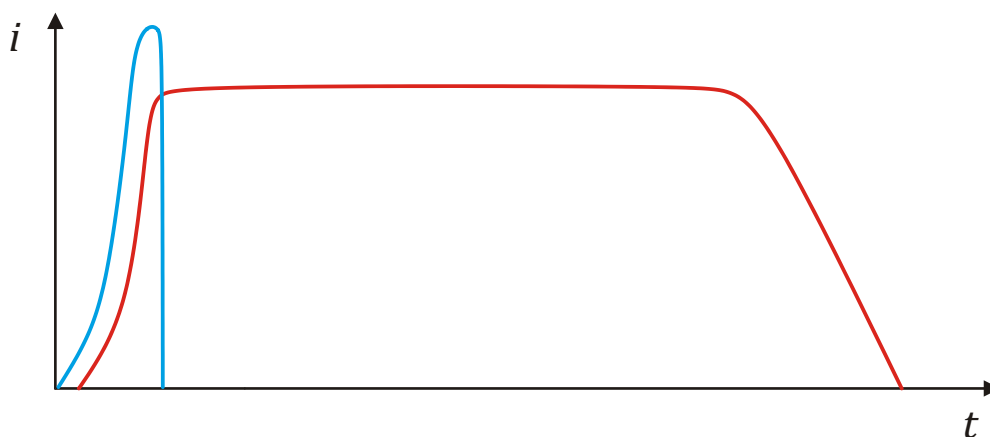


Abbildung 10 Schematischer Stromverlauf townsendartiger Teilentladungen nach Devins [DEV-84b]
 Blau: Durch Elektronenbewegung verursachter Strom
 Rot: Durch Ionenbewegung verursachter Strom
 Impulsdauer fehlstellenhöhenabhängig circa 550 ns/mm aus Messwerten von [DEV-84b], [MOR-93] und [FRO-95]; Scheitelwert des Stromes proportional zur Überspannung unter einem Milliampere [FRO-95]

Die durch die Elektronenbewegung transportierte Ladung wird von Devins angegeben zu [DEV-84b]:

$$Q_e = C \Delta U \quad (\text{Gl. 23})$$

mit der Fehlstellenkapazität C und der Spannungsänderung ΔU . Die in der Fehlstelle umgesetzte Ladung Q ergibt sich mittels des obigen Faktors zwischen Elektronen- und Ionenstrom [DEV-84b]:

$$Q = Q_+ + Q_e = \bar{\alpha} d C \Delta U \quad (\text{Gl. 24})$$

mit dem effektiven Ionisationskoeffizienten $\bar{\alpha}$ und der Fehlstellenhöhe d .

Die Impulsdauer ist durch die Driftzeit der Ladungsträger geprägt und proportional zur Ausdehnung der inneren Fehlstelle in Richtung des elektrischen Feldes [DEV-84a].

Basierend auf den Messergebnissen von Devins, Morshuis und Fromm lässt sich eine fehlerstellenhöhenabhängige Impulsdauer von circa 550 ns/mm angeben [DEV-84b], [MOR-93], [FRO-95].

Fromm hat für Teilentladungen nach dem Townsend-Mechanismus die in Kapitel 2.7.1 gezeigten Zusammenhänge zwischen dem zeitlichen Abstand und den Ladungen aufeinanderfolgender Teilentladungsereignisse aufstellen können.

2.6 Schädigungsmechanismen

Das ultimative Ziel der Teilentladungsdiagnostik – wie im Prinzip aller Diagnoseverfahren – ist die Ermittlung der Restlebensdauer des Betriebsmittels. Hierbei spielen die alterungsbedingten Veränderungen der Teilentladungsaktivität eine zentrale Rolle. Diese teilentladungsbedingten Alterungsprozesse wurden erstmals von McMahon an Stab-Platte-Anordnungen mit aufgelegten Folienprüfkörpern unter Wechsellastspannungsbelastung nachgewiesen [MCM-68]. Mayoux untersuchte die hierfür relevanten Vorgänge der Aufprallionisation erstmals 1973 [MAY-73].

Die Untersuchungen wurden seinerzeit unter Wechsellastspannungsbelastung durchgeführt. Schon nach sehr kurzer Belastungszeit bildet sich an der teilentladungsbelasteten Isolierstoffoberfläche eine leitfähige Schicht aus. Diese ist bei lokal begrenzten Teilentladungen ortsabhängig, wie Gamez-Garcia ebenfalls an Stab-Platte-Anordnungen mit aufgelegten Folienprüfkörpern feststellte [GAM-88]. Sie erhöht die Leitfähigkeit der Isolierstoffoberfläche binnen kürzester Zeit um mehrere Größenordnungen, wie Hudon für Epoxidharzformstoff als Überzug auf Platte-Platte-Elektrodenanordnungen nachweist [HUD-90]. Die bei der Teilentladung akkumulierte Ladung verringert sich hierdurch. Dies wurde von Mayoux für PA, PET und Epoxidharzformstoff mit inneren Fehlstellen nachgewiesen [MAY-95].

Auch der Entladungsmechanismus verändert sich, was von Fromm für Gleichspannungsbelastung nachgewiesen wurde: Mit zunehmender Alterung wächst die Oxidschicht der Lunkergrenzfläche und bedingt durch die Bereitstellung von Anfangselektronen aus flachen Haftstellen in dieser Schicht nimmt die Auftrittswahrscheinlichkeit von räumlich größeren townsendartigen Teilentladungen zu [FRO-95]. Das Auftreten dieser leitfähigen Schicht, welche aus Wassermolekülen und sauren Oxalkristallen besteht, hängt von der Konzentration von Kohlenstoffmono- und Kohlenstoffdioxid in der Fehlstelle ab [WOL-82]. Für PET-Folienmaterial wurde von Schon eine reversible Erhöhung der Leitfähigkeit durch Salpetersäure bedingt durch Teilentladungen bei Wechsellastspannungsbelastung nachgewiesen [SCH-75].

Als zweite Stufe beschreibt Engel die Erosionsbildung [ENG-98]. Durch die Bestrahlung der Isolierstoffoberfläche mit Elektronen, Ionen und harter UV-Strahlung wird die Oberfläche sichtbar geschädigt [MAY-76]. Polaritätsabhängig fallen diese Schäden unterschiedlich aus, wie Hudon und Engel für Epoxidharzformstoff aufzeigten [HUD-90], [ENG-98].

Aufgrund des Bruchs der Kohlenstoffketten entstehen an den Kettenenden reaktionsfreudige Radikale, welche unter anderem mit dem Sauerstoff in der Fehlstelle oxidative Verbindungen eingehen [BRU-94]. Es bilden sich sichtbare leitfähige Kristalle und Salze an der Isolierstoffoberfläche aus [HUD-90], [FRO-95], [ENG-98]. Aufgrund des in inneren Fehlstellen stark begrenzten Gasvolumens ändern sich die Konzentrationen vergleichsweise schnell. Dies muss bedacht werden, wenn Ergebnisse, welche mit belüfteten Prüfkörpern oder gar bei schnell veränderlicher impulsförmiger Prüfspannung, wie sie Thomas durchgeführt hat [THO-50], mit jenen bei Gleichspannungsbelastung und geschlossenen inneren Fehlstellen verglichen werden [GAM-88].

Bei spaltförmigen inneren Fehlstellen unter Wechsellastbelastung wird Treeing als finale Alterungsstufe vor dem Ausfall beschrieben [ENG-98]. Dies konnte unter Gleichspannungsbelastung bisher nur bei Prüfkörpern mit eingebettetem Draht als Elektrode nach vorangegangenen elektrothermischer Alterung nachgewiesen werden [CHE-14].

Sofern die Fehlstelle auch messtechnisch zugänglich ist, kann nach einer Spannungsbelastung die Oberflächenleitfähigkeit orts aufgelöst gemessen werden. Florkowski wies hiermit die zeitliche Veränderung der Teilentladungsaktivität als Folge von Wechsellastbelastung nach [FLO-18].

Für die Interpretation der gemessenen Teilentladungsdaten bei Gleichspannungsbelastung ist somit nicht nur die aktuelle Belastungsdauer wegen des kapazitiv-resistiven Feldübergangs wichtig, sondern auch die gesamte Belastungsdauer aufgrund möglicher Alterungseffekte und Alterungsnebenprodukte.

2.7 Teilentladungsmodelle bei Gleichspannungsbelastung

Modelle dienen der vereinfachten Nachbildung komplexer Vorgänge. Mit steigender Anforderung an die realitätsnahe Nachbildung der verschiedenen physikalischen Vorgänge nimmt die Komplexität der Modelle zu. Daher werden je nach Anforderung unterschiedliche Modelle für Teilentladungen in inneren Fehlstellen verwendet. In den folgenden Abschnitten sollen die drei häufigsten Modelle, die für Teilentladungen bei Gleichspannungsbelastung anwendbar sind, vorgestellt und ihre Grenzen sowie ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt werden.

2.7.1 Kapazitiv-resistives Modell

Für die Nachbildung innerer Fehlstellen bei Wechselspannung wird meist ein Modell bestehend aus drei Kapazitäten verwendet, welches 1932 von Gemant und von Philippow entwickelt wurde [GEM-32]. Zur Nachbildung der Teilentladungssituation bei Gleichspannungsbelastung wird parallel zu jeder Kapazität ein Widerstand verschalten, sodass der kapazitiv-resistive Feldübergang nachgebildet werden kann [FRO-94], [FRO-95]. Die Fehlstelle wird mittels der Elemente C_1 und R_1 nachgebildet. Die Teilentladung wird durch Zündung einer hierzu parallelen Funkenstrecke nachgebildet. Abbildung 11 zeigt das Ersatzschaltbild. C_2 und R_2 bilden den festen Isolierstoff in Serie zum Lunker nach, C_3 und R_3 jenen um den Lunker herum.

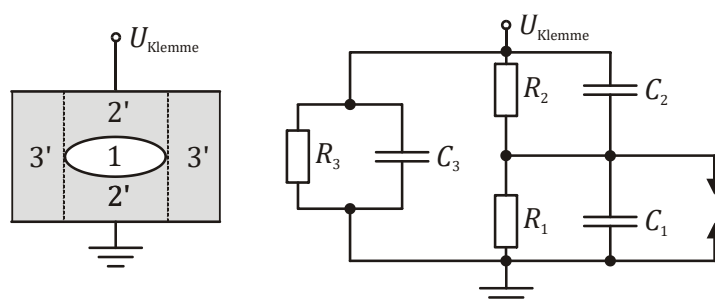


Abbildung 11 Links: Skizze des Prüfkörpers mit einer inneren Fehlstelle (Bereich 1)
Rechts: Kapazitiv-resistives Ersatzschaltbild

Dieses Modell bildet komplexe physikalische Vorgänge durch die Verschaltung von konzentrierten idealen Widerständen und Kondensatoren nach. Daher können manche Vorgänge nachgebildet werden, wie der kapazitiv-resistive Feldübergang, andere jedoch nicht, wie die statistisch streuende Bereitstellung eines lawinenwirksamen Anfangselektrons oder die Feldsituation an einem beliebigen Punkt im Prüfkörper.

Abbildung 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung über der Fehlstelle beim Einschalten der Spannung beziehungsweise nach dem Auftreten einer Teilentladung. Gestrichelt ist der Verlauf jeweils ohne Teilentladung dargestellt. Fromm nutzt hierfür die von von Hippel aufgestellte Gleichung zur Bestimmung der Zeitkonstante des exponentiellen Spannungsaufbaus über der Fehlstelle [HIP-54], [FRO-95].

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} \quad (\text{Gl. 25})$$

Nach dem Zuschalten der Spannung oder nach einer vorangegangenen Teilentladung dauert es eine gewisse Zeit bis die Spannung über der Fehlstelle so groß ist (Zündspannung U_Z), dass das elektrische Feld im Gasraum lokal die Zündfeldstärke E_Z übersteigt. Diese Zeit wird Erholungszeit, kurz t_R , genannt.

In der Fehlstelle ist jedoch nicht permanent ein lawinenwirksames Anfangselektron vorhanden. Bei Feldstärken kleiner als der für eine erfolgreiche Lawinenbildung notwendigen Feldstärke E_Z werden die im Gasraum des Lunkers vorhandenen Ladungsträger abgesaugt. Dabei reicht die zwischen den einzelnen Stößen aufgenommene kinetische Energie nicht für eine Stoßionisation aus, sodass sie an der Gegenelektrode bzw. der hierzu vorgelagerten Grenzfläche akkumulieren ohne eine Teilentladungslawine initiiert zu haben. Aufgrund des Ausbleibens des Polaritätswechsels bei Gleichspannungsbelastung im Vergleich zur Wechsellastbelastung stehen diese Ladungsträger nicht mehr für weitere Teilentladungen zur Verfügung.

Eine Teilentladung kann nur auftreten, wenn das elektrische Feld in der Fehlstelle lokal größer als die Zündfeldstärke E_Z ist und dann ein lawinenwirksames Anfangselektron mit hinreichend großem Abstand zur anodischen Grenzfläche bereitgestellt wird. Diese Zeit zwischen Überschreiten der Zündfeldstärke in der Fehlstelle und dem Einsetzen der Entladungslawine wird bei Gasdurchschlägen üblicherweise als Zündverzug t_L bezeichnet. Aufgrund der Schirmung sowie der typischerweise kleinen Volumina der Lunker tritt diese Zeit bei inneren Teilentladungen besonders stark zur Geltung. Während dieser Zeit steigt die Spannung über der Fehlstelle und somit das elektrische Feld im Gasraum an. Die scheinbare Ladung der dann auftretenden Teilentladung wird theoretisch umso größer, je größer der Zündverzug ist.

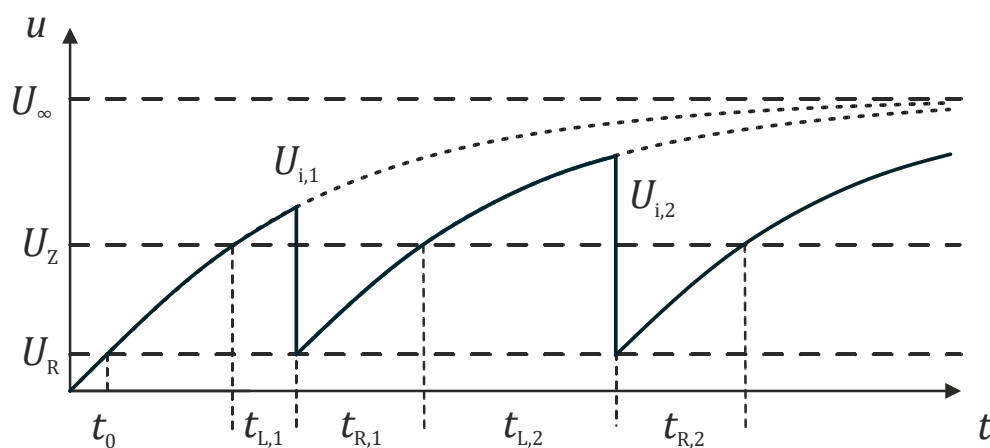


Abbildung 12 Zeitlicher Verlauf der Spannung über der Fehlstelle bei streamerartiger Teilentladung, gestrichelt der Spannungsverlauf ohne Teilentladungen nach [FRO-94]

Die Werte der Zündspannung U_Z und der Restspannung U_R sind bei gegebener Fehlstellengeometrie abhängig davon, ob es sich um eine streamerartige oder eine townsendartige Teilentladung handelt. Bei streamerartigen Teilentladungen lässt sich die Zünd-

spannung über die Streamereinsatzfeldstärke E_{Str} mit Hilfe von Gl. 18 und die Restspannung über das Streamerstabilitätsfeld aus Gl. 19 berechnen. Bei townsendartigen Teilentladungen kann die Zündspannung U_Z über das Paschengesetz bestimmt werden und die Restspannung U_R liegt nur knapp darunter.

Da das Modell aus konzentrierten Elementen aufgebaut ist, kann es den theoretischen Spannungsverlauf über der Fehlstelle als auch die Folgefrequenz von Teilentladungen (unter Vernachlässigung der statistischen Streuzeit durch das lawinenwirksame Anfangselektron) gut nachbilden. Die zeitabhängige Spannung über der Fehlstelle berechnet sich nach [Fro-95] zu:

$$U(t) = U_\infty - (U_\infty - U_R)e^{\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right)} \quad (\text{Gl. 26})$$

mit der Spannung U_∞ im stationären Zustand ohne Teilentladung:

$$U_\infty = U_{\text{Klemme}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (\text{Gl. 27})$$

und der Restspannung U_R direkt nach einer Teilentladung.

Es ergibt sich nach einer Teilentladung eine Erholungszeit t_R bei der die Spannung über den Lunker von der Restspannung U_R auf die Zündspannung U_Z ansteigt von

$$t_R = -\tau \ln\left(\frac{U_\infty - U_Z}{U_\infty - U_R}\right) \quad (\text{Gl. 28})$$

mit der Restspannung U_R direkt nach einer Teilentladung und der minimalen Teilentladungseinsatzspannung U_Z , bei der das elektrische Feld im Gasraum lokal die Zündfeldstärke E_Z erreicht, kann die minimale Zeit zwischen zwei Teilentladungen bestimmt werden.

Nach Fromm ergibt sich unter Vernachlässigung der statistischen Streuzeit eine Teilentladungsfolgefrequenz von [FRO-95]:

$$f_{\text{TE}} = \frac{-1}{\tau \ln\left(\frac{U_R(k_{\text{DC}} - 1)}{k_{\text{DC}}U_Z - U_R}\right)} \quad (\text{Gl. 29})$$

sofern die theoretische Endspannung über der Fehlstelle U_∞ größer als die Zündspannung U_Z ist. k_{DC} ist der Quotient hiervon, also $k_{\text{DC}} = \frac{U_\infty}{U_Z}$.

Mittels Statistik kann ein Zusammenhang zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungen abhängig der jeweils umgesetzten Ladung aufgestellt werden. Hierzu wird der in Abbildung 12 gezeigte Spannungsverlauf linearisiert. Aufgrund der kleinen Spannungsänderung bei townsendartigen Entladungen kann dies mit nur geringer Abweichung durchgeführt werden.

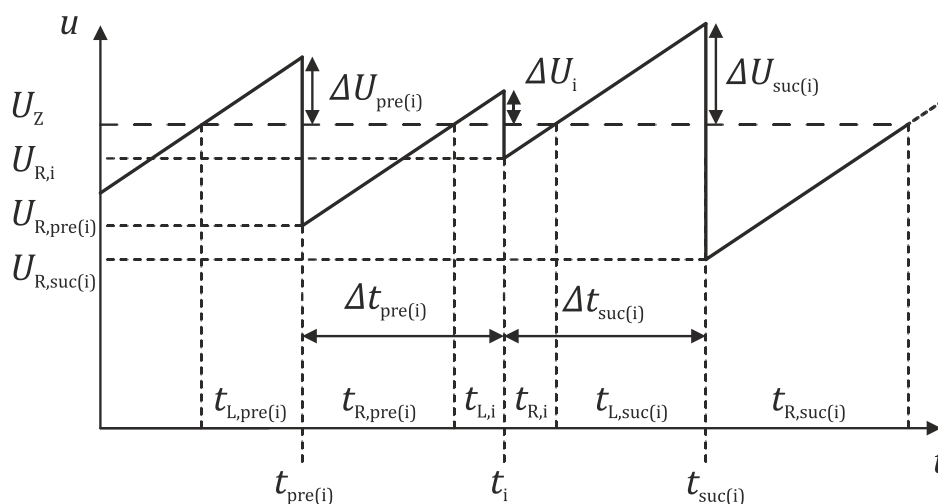


Abbildung 13 Linearisierter zeitlicher Verlauf der Spannung über der Fehlstelle nach [FRO-94]

Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Erholungszeit t_R , dem Zündverzug t_L , der Zündüberspannung ΔU und der Restspannung U_R macht Fromm folgende Annahmen [FRO-95]:

1. Es dominieren townsendartige Teilentladungen.
2. Es wird die gesamte Fehlstelle entladen.
3. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Zündverzugszeit beziehungsweise der statistischen Streuzeit t_L , also der Zeit zwischen Überschreiten der Zündfeldstärke im Lunker und dem Teilentladungseinsatz und der Ladung q einer Teilentladung.
4. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Ladung q und der Erholungszeit t_R bis die Feldstärke im Lunker wieder die Zündfeldstärke erreicht hat.
5. Die Ladung der aktuellen Teilentladung q ist unabhängig von der Ladung der vorangegangenen Teilentladung q_{pre} .

Die Zeitdifferenz zur vorangegangenen Teilentladung berechnet sich nach Fromm zu [FRO-95]:

$$\Delta t_{\text{pre}(i)} = t_{\text{R,pre}(i)} + t_{\text{L},i} \quad (\text{Gl. 30})$$

Nun soll die mittlere Zeit seit der vorangegangenen Teilentladung $\overline{\Delta t_{\text{pre}}}(q)$ berechnet werden. Hierbei soll nur die Ladung der aktuellen Teilentladung eine Rolle spielen, für die vorangegangene Teilentladung wird ein Mittelwert angenommen. Somit gilt für den ladungsunabhängigen Mittelwert der Erholungszeit der vorangegangenen Teilentladung nach Fromm [FRO-95]:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{R,pre}(i)} = \bar{t}_{\text{R}} \quad (\text{Gl. 31})$$

Somit ist die statistische Streuzeit ausschlaggebend für die Ladung q der aktuellen Teilentladung. Die mittlere Zeit zwischen vorangegangener und aktueller Teilentladung beträgt somit [FRO-95]:

$$\overline{\Delta t_{\text{pre}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{\text{R,pre}(i)} + t_{\text{L},i}) \quad (\text{Gl. 32})$$

Beziehungswise mit Gl. 31 und unter der Annahme, dass alle n Entladungen die Ladung q aufweisen [FRO-95]:

$$\overline{\Delta t_{\text{pre}}}(q) = \bar{t}_{\text{R}} + t_{\text{L}}(q) \quad (\text{Gl. 33})$$

Daher ist die mittlere Zeit zwischen der aktuellen und der vorangegangenen Teilentladung gleich der mittleren Erholungszeit, sofern die Ladung der aktuellen Teilentladung gegen null geht [FRO-95]:

$$\overline{\Delta t_{\text{pre}}}(q \rightarrow 0) = \bar{t}_{\text{R}} \quad (\text{Gl. 34})$$

In Abbildung 14 zeigt Fromm den Zusammenhang zwischen der Zeit zur vorangegangenen Teilentladung und der Ladung der aktuellen Teilentladung. Insbesondere für kleine Ladungen ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang. Der Abszissenabschnitt zeigt die mittlere Erholungszeit \bar{t}_{R} .

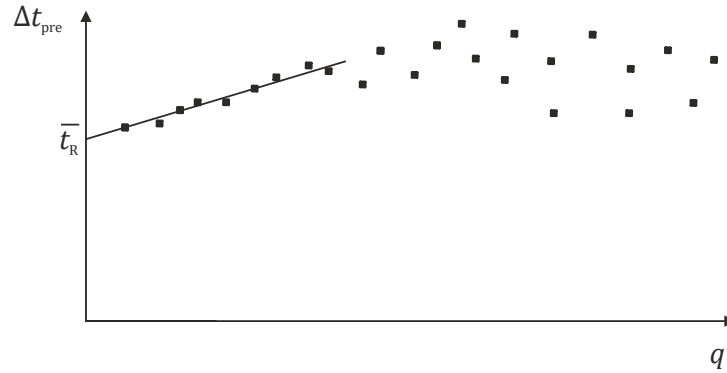


Abbildung 14 Schematischer Zusammenhang zwischen der Zeit zur vorangegangenen Teilentladung und der scheinbaren Ladung der aktuellen Teilentladung nach [FRO-95]

Analog hierzu gilt für die Zeitdifferenz zur nachfolgenden Teilentladung $\Delta t_{\text{suc}(i)}$ nach Fromm [FRO-95]:

$$\Delta t_{\text{suc}(i)} = t_{R,i} + t_{L,\text{suc}(i)} \quad (\text{Gl. 35})$$

Die Zeit zur nachfolgenden Teilentladung wird nun berechnet. Unter der Annahme, dass die statistische Streuzeit der nachfolgenden Teilentladung eine statistisch verteilte Größe ist, ergibt sich für die mittlere Streuzeit [FRO-95]:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{L,\text{suc}(i)} = \bar{t}_L \quad (\text{Gl. 36})$$

Die Erholungszeit der aktuellen Teilentladung ist abhängig von der Ladung dieser Teilentladung [FRO-95]:

$$\overline{\Delta t_{\text{suc}}}(q) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{L,\text{suc}(i)} + t_{R,i}(q)) \quad (\text{Gl. 37})$$

Beziehungsweise mit Gl. 36 und unter der Annahme, dass alle n Entladungen die Ladung q aufweisen:

$$\overline{\Delta t_{\text{suc}}}(q) = t_R(q) + \bar{t}_L \quad (\text{Gl. 38})$$

Somit ist die Zeit zwischen der aktuellen und der nachfolgenden Teilentladung gleich der mittleren statistischen Streuzeit, sofern die Ladung der aktuellen Teilentladung gegen null geht [FRO-95]:

$$\overline{\Delta t_{\text{pre}}}(q \rightarrow 0) = \bar{t}_L \quad (\text{Gl. 39})$$

In Abbildung 15 zeigt Fromm den Zusammenhang zwischen der Zeit zur nachfolgenden Teilentladung und der Ladung der aktuellen Teilentladung. Insbesondere für kleine Ladungen ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang. Der Abszissenabschnitt zeigt die mittlere statistische Streuzeit \bar{t}_L .

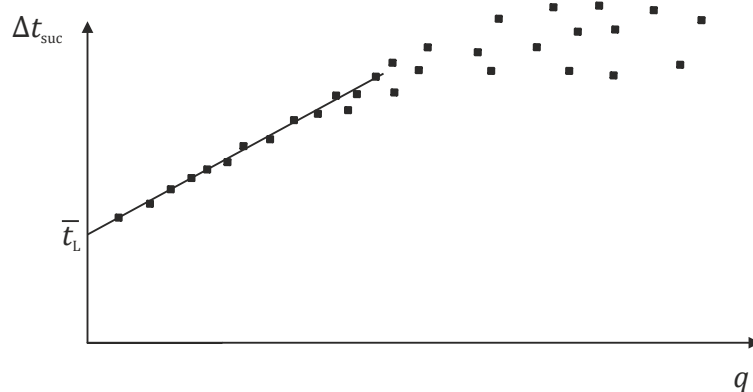


Abbildung 15 Schematischer Zusammenhang zwischen der Zeit zur nachfolgenden Teilentladung und der scheinbaren Ladung der aktuellen Teilentladung nach [FRO-95]

Während der Teilentladung, welche in dem Modell als kontinuierlicher Stromfluss über die Schaltfunkenstrecke nachgebildet wird, wird die Kapazität der Fehlstelle (C_1) bis zum Erreichen der Restspannung entladen. Da das Potential an den Rändern der Fehlstelle in technischen Anordnungen jedoch nicht zugänglich ist, wird der an den Klemmen fließende Ausgleichsstrom gemessen und mittels Integration die Ladung q ermittelt. Mittels der Formel

$$q = \frac{C_2}{C_1 + C_2} q_{FS} \quad (\text{Gl. 40})$$

lässt sich der Zusammenhang zwischen der an den Klemmen des Prüfkörpers ermittelbaren scheinbaren Ladung q und der in der Fehlstelle umgesetzten Ladung q_{FS} herstellen. Nach DIN EN 60270 wird die scheinbare Ladung als Maß für eine Teilentladung verwendet, auch wenn diese nicht direkt proportional zur Schädigung ist. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass die Anforderungen an die Messkette zur Messung der scheinbaren Ladung in Bezug auf die Bandbreite wesentlich geringer ist.

Es wird jedoch aus Gl. 40 ersichtlich, dass das Verhältnis zwischen der in der Fehlstelle umgesetzten Ladung und der scheinbaren Ladung von den beteiligten Kapazitäten abhängt und daher das Wissen der geometrischen und werkstoffphysikalischen Eigenschaften im Prüfkörper wünschenswert wäre. Da diese in der Praxis im Allgemeinen nicht bekannt sind, ist ein Vergleich der scheinbaren Ladungen bei inneren Teilentladungen wenig aussagekräftig.

Aufgrund der sehr schnellen Umladungsvorgänge kann die Nachladung der Kapazitäten durch die Quelle während einer Teilentladungsaktivität vernachlässigt werden. Daher ist die Situation während einer Teilentladung bei Gleich- und Wechselspannungsbelastung bezüglich des Einflusses der Spannungsquelle wie auch der Messtechnik identisch.

Den Zeitverzug aufgrund des statistischen Auftretens des Anfangselektrons sowie die Restspannung über der Fehlstelle kann das in Abbildung 11 gezeigte Modell nicht nachbilden. Es sind zusätzliche Randbedingungen einzufügen. Auch die Situation während einer Teilentladung kann mit diesem sehr einfachen Modell nicht adäquat nachgebildet werden.

2.7.2 Feldtheoretisches Modell nach Pedersen

Der dänische Elektrotechniker und Physiker Aage Pedersen begann Ende der 1980er Jahre basierend auf Vorarbeiten von Repp, Nissen und Röhl [REP-83] ein Modell für innere Teilentladungen zu entwickeln, welches die Entladungsvorgänge und insbesondere die darauffolgenden Ladungsbewegungen im Prüfkörper raum aufgelöst darstellen kann. Bis zu seinem Tode entwickelte er dieses Modell immer weiter und veröffentlichte es abschnittsweise. Aufgrund der Komplexität ist es unter Ingenieuren bis heute nicht sehr verbreitet. Im Gegensatz zum verbreiteten kapazitiven Modell bildet es die Situation im Isolierstoff nicht mittels konzentrierten Kapazitäten nach, welche Elektroden voraussetzen und die Ladungsträgerakkumulation im Isolierstoff nicht nachbilden können, sondern mittels eines feldtheoretischen Ansatzes. Da bei inneren Teilentladungen unter Gleichspannungsbelastung entladungsphysikalische Effekte das Auftreten weiterer Teilentladungen signifikant beeinflussen, kann das feldtheoretische Modell nach Pedersen bei dieser Aufgabenstellung weiterhelfen.

Grundsätzlich wird bei diesem Modell die bei einem Teilentladungsereignis umgesetzte Ladung als Differenz der Ladung an der Elektrode mit Fehlstelle im Vergleich zu der identischen Anordnung ohne Fehlstelle angesehen. Somit wird bei dieser Betrachtung der kapazitiv-resistive Feldübergang nicht der Teilentladung zugeordnet [REP-83]. Da bei praktischen Anordnungen in der Regel die Fehlstellenanzahl und -geometrie nicht bekannt ist, kann dieses Modell nur mit Schätzwerten arbeiten.

Ebenso kann das Modell auch als Superposition der Polarisation [PED-86] oder des elektrischen Verschiebungsfeldes [PED-87] der fehlerstellenfreien Anordnung mit der Fehlerstelle angesehen werden. Im Folgenden wird zuerst der Maxwellsche Ansatz vorgestellt und danach der quasimolekulare Ansatz. Abgeschlossen wird dieses Unterkapitel mit einem typischen Beispielsystem aus dem Experimentalbereich mit drei Elektroden.

Maxwellscher Ansatz

Ein unter der Spannung U stehender Prüfkörper hat an der Hochspannungselektrode eine hierzu proportionale Ladung Q . Findet nun eine Teilentladung in einer inneren Fehlerstelle im Prüfkörper statt, verursacht diese eine Umverteilung von Ladungsträgern an der Lunkergrenzfläche. Zusätzliche Ladungen dq an der Hochspannungs- und dq' an der Erdelektrode stellen sich so ein, dass die Ladung im Gesamtsystem bestehend aus Prüfkörper und Elektroden konstant bleibt. Eine infinitesimal kleine Ladung dQ an einem gewissen Ort im Prüfkörper induziert eine Ladung dq an der Hochspannungselektrode, welche proportional zu dQ ist. Somit lautet Gl. 41 nach [PED-87]:

$$dq = -\lambda dQ \quad (\text{Gl. 41})$$

mit der kontinuierlichen, dimensionslosen positiven skalaren Antwortfunktion λ , welche nur vom Ort der Ladung dQ abhängig ist.

Für die induzierte Ladung q an der Hochspannungselektrode gilt nach [PED-87]:

$$q = - \iiint_{\Omega} \lambda \rho \, d\Omega - \sum_{j=1}^N \iint_{S_j} \lambda \sigma \, dS \quad (\text{Gl. 42})$$

mit dem Gesamtvolumen des Prüfkörpers Ω und N Fehlerstellen mit den jeweiligen Lunkergrenzflächen S_j . ρ ist die Raumladungsdichte, σ die Oberflächenladungsdichte an der jeweiligen Lunkergrenzfläche. Der erste Teil der Gl. 42 repräsentiert somit den fehlerstellenfreien Prüfkörper, der zweite Teil den Einfluss der Fehlerstellen.

Zur Ermittlung der Antwortfunktion λ wird angenommen, dass die resultierende Ladung auf der Hochspannungselektrode gleich der induzierten Ladung q ist, wenn der Prüfkörper kurzgeschlossen und geerdet ist und alle Raum- und Flächenladungen an ihrem Platz sind. Dieses Ergebnis wird nun verglichen mit der Situation ohne Raum- und Flächenladung, aber mit einer Potentialdifferenz U zwischen den Elektroden. Nach dem Greenschen Umkehrtheorem ergibt sich Gl. 43 [PED-87]:

$$Uq + \iiint_{\Omega} V\rho \, d\Omega + \sum_{j=1}^N \iint_{S_j} V\sigma \, dS = 0 \quad (\text{Gl. 43})$$

mit der skalaren Potentialverteilung V im Prüfkörper.

Beim Vergleich der beiden Gleichungen Gl. 42 und Gl. 43 ergibt sich Gl. 44 [PED-87]:

$$V = \lambda U \quad (\text{Gl. 44})$$

V gibt die skalare Potentialverteilung im Prüfkörper an, sofern keine Raum- und Flächenladungen vorhanden sind. Daher muss die Antwortfunktion λ dieselben Differentialgleichungen wie die Potentialverteilung V erfüllen und kann somit mit folgender bekannter Gl. 45 ermittelt werden [PED-87]:

$$\vec{\nabla} \cdot (\varepsilon \vec{\nabla} \lambda) = 0 \quad (\text{Gl. 45})$$

mit den beiden Extrema $\lambda = 1$ an der Hochspannungs- und $\lambda = 0$ an der Erdelektrode. Zusätzlich muss an den Grenzflächen der Fehlstellen die Ableitung der skalaren Antwortfunktion λ normal zur Oberfläche folgende Bedingung erfüllen [PED-87]:

$$\varepsilon_r \left(\frac{\partial \lambda}{\partial n} \right)_I = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial n} \right)_{\text{FS}} \quad (\text{Gl. 46})$$

mit der relativen Permittivität ε_r des Isolierstoffs. I ist die Seite zum Isolierstoff hin, FS jene zur Fehlstelle hin.

Quasimolekularer Ansatz

Der quasimolekulare Ansatz³, welcher auf der Superposition eines raumladungsfreien Laplace-Feldes und dem Polarisationsfeld besteht, wurde erstmals 1986 von Pedersen beschrieben [PED-86]. Weiterentwickelt wurde er einige Jahre später, da er zwar für praktische Anwendungen weniger eingängig ist, jedoch den Vorteil bietet, dass er die realen Polarisationsvorgänge im Prüfkörper nachbildet [PED-89]. Es handelt sich bei der Modellanordnung um ein Isoliersystem mit mehreren Elektroden, welche mit dem Index i bezeichnet werden.

³ Das „quasimolekular“ bezieht sich auf die Polarisierungseffekte, welche in Molekülen und Atomen stattfinden

Sind durch Entladung im Inneren einer Fehlstelle zwei betragsmäßig gleich große Ladungen Q und $-Q$ im infinitesimal kleinen Abstand $d\vec{r}$ voneinander entfernt, so beträgt das durch diesen Dipol hervorgerufene gerichtete Dipolmoment $d\vec{\mu}$:

$$d\vec{\mu} = Qd\vec{r} \quad (\text{Gl. 47})$$

Dieses Dipolmoment sorgt für induzierte Ladungen auf den Elektroden. Sei nun φ die skalare Antwortfunktion λ im Vakuum, so ergibt sich für die Antwortfunktion φ_i der i -ten Elektrode [PED-89]:

$$\varphi_i(\vec{r} + d\vec{r}) = \varphi_i(\vec{r}) + d\vec{r} \cdot \vec{\nabla}\varphi_i \quad (\text{Gl. 48})$$

mit dem Positionsvektor \vec{r} des Dipols der angenommenen Fehlstelle. Somit wird die auf der i -ten Elektrode induzierte Ladung nach [PED-89] zu:

$$dq_i = -d\vec{\mu} \cdot \vec{\nabla}\varphi_i \quad (\text{Gl. 49})$$

Die Antwortfunktion φ_i für das Vakuum lässt sich mittels der Laplaceschen Formel bestimmen [PED-89]:

$$\nabla^2\varphi_i = 0 \quad (\text{Gl. 50})$$

Die Randbedingungen lauten, dass $\varphi_i = 1$ auf der Oberfläche der i -ten Elektrode ist und auf allen anderen Elektrodenflächen gilt $\varphi_i = 0$. Bei einem Laplaceschen Feld weisen die dielektrischen Grenzflächen der inneren Fehlstellen keine Ladungsträgerakkumulation auf. Somit kann das elektrische Feld im Prüfkörper analog zu jenem im Vakuum mittels der gleichen Formeln berechnet werden [PED-89]:

$$\nabla^2V_{vi} = 0 \quad (\text{Gl. 51})$$

Hierbei ist V_{vi} das skalare Potential der raumladungsfreien Anordnung im Vakuum unter der Bedingung, dass an der i -ten Elektrode die Spannung U_i anliegt, alle anderen Elektroden hingegen geerdet sind. Die skalare Antwortfunktion φ_i im Vakuum ist also der Quotient aus dem skalaren Potential V_{vi} im Vakuum und der Spannung U_i [PED-89]:

$$\varphi_i = \frac{V_{vi}}{U_i} \quad (\text{Gl. 52})$$

Die Polarisierung \vec{P} in dem mit Dielektrikum gefüllten Prüfkörper besteht aus zwei Komponenten: Einerseits der Polarisierung \vec{P}_a aufgrund der anliegenden Spannung und andererseits der Polarisierung \vec{P}_s aufgrund der Raumladungen zwischen den Elektroden. Es ergibt sich also nach [PED-89]:

$$\vec{P} = \vec{P}_a + \vec{P}_s \quad (\text{Gl. 53})$$

Die an der i-ten Elektrode durch Teilentladungsaktivitäten induzierte Ladung q_i lässt sich mittels Gl. 54 nach [PED-89] bestimmen zu:

$$q_i = - \iiint_{\Omega} (\varphi_i \rho + \vec{P}_s \cdot \vec{\nabla} \varphi_i) d\Omega - \iint_S \varphi_i \sigma dS \quad (\text{Gl. 54})$$

Klemmenstrom

Durch Anwendung der Ladungserhaltung ergibt sich an der i-ten Elektrode des Isoliersystems folgender Klemmenstrom I_i [PED-89]:

$$I_i = \left(\frac{dQ_i}{dt} \right) + I_{ti} \quad (\text{Gl. 55})$$

mit der Gesamtladung Q_i . I_{ti} beschreibt einen möglichen Ladungsübertritt von der i-ten Elektrode in den Isolierstoff.

Der Teil des Klemmenstroms, der nur durch die Entladungen an der i-ten Elektrode verursacht wird, wird mit I_{di} bezeichnet und beträgt nach Gl. 56 [PED-87]:

$$I_{di} = \left(\frac{dq_i}{dt} \right) + I_{ti} \quad (\text{Gl. 56})$$

mit der Ladung $dq_i = \lambda_i dQ_i$. Eingesetzt in Gl. 42 ergibt sich [PED-87]:

$$I_{di} = - \iiint_{\Omega} \lambda_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) d\Omega - \sum_{j=1}^N \iint_{S_j} \lambda_i \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right) dS + I_{ti} \quad (\text{Gl. 57})$$

Unter der Annahme, dass die Leitfähigkeit der Grenzflächen vernachlässigt werden kann und mit Hilfe der Kontinuitätsgleichungen ergibt sich für Gl. 57 nach [PED-87]:

$$I_{di} = - \iiint_{\Omega} \lambda_i \vec{\nabla} \cdot \vec{j} d\Omega - \sum_{j=1}^N \iint_{S_j} \lambda_i \vec{n} \cdot (\vec{j}_I - \vec{j}_{FS}) dS + I_{ti} \quad (\text{Gl. 58})$$

mit der Stromdichte \vec{j}_I im Isolierstoff und der Stromdichte \vec{j}_{FS} in der Fehlstelle sowie dem Einheitsvektor \vec{n} normal zur Oberfläche und aus der Fehlstelle herauszeigend. Mit der Vektoridentität [PED-87]:

$$\vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{j}) = \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \vec{j} \cdot \vec{\nabla} \lambda \quad (\text{Gl. 59})$$

und dem Gaußschen Divergenztheorem bei dem Vektor $\lambda \vec{j}$ ergibt sich für Gl. 58 nach [PED-87]:

$$I_{\text{di}} = - \iiint_{\Omega} \lambda_i \vec{j} \cdot \vec{\nabla} d\Omega - \iint_{S_0} \vec{n} \cdot \vec{j} dS + I_{\text{ti}} \quad (\text{Gl. 60})$$

Daher beschreibt das Oberflächenintegral über die Fläche S_0 gerade den von der i -ten Elektrode in den Isolierstoff fließenden Strom I_{ti} . Der durch die Entladungen im Prüfkörper generierte Klemmenstrom ist gegeben zu [PED-87]:

$$I_{\text{di}} = - \iiint_{\Omega} \vec{j} \cdot \vec{\nabla} \lambda_i d\Omega \quad (\text{Gl. 61})$$

Den Zusammenhang zwischen der Stromdichte \vec{j} , der Ladungsträgerdichte ρ und der Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger \vec{v} beschreibt Gl. 62 allgemein [PED-87]:

$$\vec{j} = \sum_{k=0}^m \rho_k \vec{v}_k \quad (\text{Gl. 62})$$

$k = 0$ bezieht sich auf die Elektronen und m gibt die Anzahl möglicher positiver und negativer Ionen an.

Scheinbare Ladung

Gemessen werden kann nur die scheinbare Ladung q , welche während eines Teilentladungsimpulses an den Klemmen des Prüfkörpers fließt. Dies ist der über die Impulsdauer integrierte Klemmenstrom I_d oder die Änderung der auf der Elektrode induzierten Ladung. Auch wenn einige schwere und damit langsame Ionen sich noch im Gasraum bewegen, endet jede Entladung mit der Anlagerung der Ladungsträger an der Grenzfläche. Die Gesamtladungsmenge wird durch eine Teilentladung nicht verändert, daher kann das resultierende Ladungsmuster als elektrischer Dipol angesehen werden.

Ein elementarer Dipol besteht aus der Ladung Q und der Spiegelladung $-Q$ und wird über den Dipolvektor \vec{s} , welcher von $-Q$ nach Q verläuft, getrennt. Das Dipolmoment ist definiert als $\vec{\mu} = Q\vec{s}$. Unter Berücksichtigung der Antwortfunktion, welche entlang des Dipolvektors \vec{s} zwischen λ_i und $(\lambda_i + \vec{s} \cdot \vec{\nabla} \lambda)$ schwankt, ergibt sich für die durch den Dipol induzierte Ladung an der i -ten Elektrode $-\vec{\mu} \cdot \vec{\nabla} \lambda_i$ [PED-87].

Gl. 63 gibt das durch die Raum- und Flächenladung resultierende Dipolmoment an [PED-87]:

$$\vec{\mu} = - \iiint_{\Omega} \rho \vec{r} d\Omega + \iint_{S_0} \sigma \vec{r} dS \quad (\text{Gl. 63})$$

mit dem Positionsvektor \vec{r} der jeweiligen Ladung.

Unter der Annahme, dass die Fehlstellen hinreichend klein sind, sodass sich der Gradient der Antwortfunktion λ_i in ihnen näherungsweise konstant bleibt, kann die scheinbare Ladung q_{ni} des n-ten Impulses an der i-ten Elektrode nach Gl. 64 berechnet werden zu [PED-87]:

$$q_{ni} = -(\vec{\mu}_n - \vec{\mu}_{n-1}) \vec{\nabla} \lambda_i \quad (\text{Gl. 64})$$

In der Praxis sind die Positionen der Fehlstellen nicht bekannt. Somit ist der Gradient der Antwortfunktion λ_i unbekannt. Da er jedoch den selben physikalischen Gesetzen wie das Skalarpotential für ladungsfreie Systeme folgt, kann er analog zum Maximalwert der elektrischen Feldstärke in möglichen Fehlstellen abgeschätzt werden [PED-87]:

$$\vec{\nabla} \lambda_i = k \vec{\nabla} \lambda_0 \quad (\text{Gl. 65})$$

mit dem Geometriefaktor der Fehlstelle k , welcher Werte zwischen 1 und ϵ_r annehmen kann. λ_0 ist die Antwortfunktion für einen idealisierten Prüfkörper ohne Fehlstelle.

Die scheinbare Ladung q_i an der i-ten Elektrode lässt sich nach [PED-91] bestimmen zu:

$$q_i = \Delta Q_i + \sum_{j=0}^N C_{ij} (\Delta U_i - \Delta U_j) \quad (\text{Gl. 66})$$

mit der Anzahl Elektroden N , der Kapazität C_{ij} zwischen der i-ten Elektrode und der j-ten Elektrode sowie den umladungsbedingten Potentialänderungen ΔU_i und ΔU_j der i-ten und j-ten Elektrode. Die zusätzliche Ladung ΔQ_i der i-ten Elektrode kann entweder durch Nachladung über die verbundene externe Quelle oder durch Ladungsaustausch mit dem die i-te Elektrode umgebenden Dielektrikum verursacht werden. In Gl. 66 zeigt sich, dass der feldtheoretische Teilentladungsmodellansatz nach Pedersen im Gegensatz zum üblicherweise verwendeten kapazitiven Teilentladungsmodell auch die Umladung im Dielektrikum zwischen den Elektroden ΔQ_i berücksichtigt. Mit Hilfe eines zeitabhängigen Ansatzes soll auf den Verlauf des Stromes geschlossen werden. Hierzu wird Gl. 66 erweitert [PED-91]:

$$q_i(t) = \Delta Q_i(t) + \sum_{j=0}^N C_{ij} (\Delta U_i(t) - \Delta U_j(t)) \quad (\text{Gl. 67})$$

Die Potentialdifferenzen ΔU_i und ΔU_j sind vor Beginn einer Entladung sowie im stationären Zustand lange nach einer Teilentladung wieder gleich null. Somit ergibt sich aus Gl. 67 für den stationären Fall nach [PED-91]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q_i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta Q_i(t) \quad (\text{Gl. 68})$$

Nach [PED-91] kann die ins Dielektrikum fließende Ladung $Q_i(t)$ in der Praxis durch Integration des Klemmenstroms $I_{\rho i}$ während des Teilentladungsereignisses gewonnen werden. Dieser Klemmenstrom lässt sich bestimmen zu [PED-91]:

$$I_{\rho i} = - \iiint_{\Omega} \vec{j} \cdot \vec{\nabla} \lambda_i d\Omega - \sum_{j=0}^N C_{ij} \left(\frac{d\Delta U_i}{dt} - \frac{d\Delta U_j}{dt} \right) \quad (\text{Gl. 69})$$

Für den Maxwell'schen beziehungsweise den quasimolekularen Ansatz gilt [PED-91]:

$$I_{\rho i} = - \iiint_{\Omega} \left(\vec{j} + \frac{\partial \Delta \vec{P}}{\partial t} \right) \cdot \vec{\nabla} \varphi_i d\Omega - \sum_{j=0}^N C_{ij} \left(\frac{d\Delta U_i}{dt} - \frac{d\Delta U_j}{dt} \right) \quad (\text{Gl. 70})$$

Der Klemmenstrom $I_{\rho i}$ während des Teilentladungsereignisses ist verbunden mit der Bewegung von Elektronen und Ionen in der Fehlstelle, welche nach Gl. 62 die Stromdichte \vec{j} ergeben. Diese Stromdichte ist jedoch unbekannt und messtechnisch nicht zugänglich. Mit Hilfe der Gl. 67 kann der Klemmenstrom bestimmt werden unter der Annahme, dass kein Ladungsaustausch zwischen Elektrode und Dielektrikum stattfindet [Ped-91]:

$$I_{\rho i} = \frac{d\Delta Q_i}{dt} \quad (\text{Gl. 71})$$

Beziehungsweise:

$$I_{\rho i} = \frac{dq_i}{dt} - \sum_{j=0}^N C_{ij} \left(\frac{d\Delta U_i}{dt} - \frac{d\Delta U_j}{dt} \right) \quad (\text{Gl. 72})$$

Der vordere Term in Gl. 72 beschreibt die an der Elektrode induzierte Ladung. Dieser Prozess korreliert mit dem Aufbau der Teilentladung und ist daher üblicherweise sehr schnell. Der hintere Term in dieser Gleichung hängt stark von der Impedanz der äußeren Beschaltung ab und ist daher üblicherweise der langsamere, zeitlich dominierende Faktor

bei der Aufzeichnung der Transienten durch Teilentladungen. Daher wird in der konventionellen Teilentladungsmesstechnik versucht, die Umladevorgänge über einen niederohmig angeschlossenen Koppelkondensator zu speisen.

Anwendung auf Systeme mit drei Elektroden

Als Beispiel soll hier ein System mit drei Elektroden betrachtet werden. Häufig werden Prüfkörper mit innerer Fehlstelle mit geteilter Erdelektrode ausgeführt. Die äußere Erdelektrode dient als Schirmelektrode, die innere Elektrode dient als Messelektrode. Durch die Aufteilung fließen auch Ausgleichsströme zwischen dem in Abbildung 11 mit C_3 bezeichneten fehlerstellenfreien Bereich des Dielektrikums und der Fehlstelle über das Messgerät, was die kleinstmögliche mit dem Messgerät messbare Ladung verringert. Abbildung 16 zeigt einen solchen Prüfkörper.

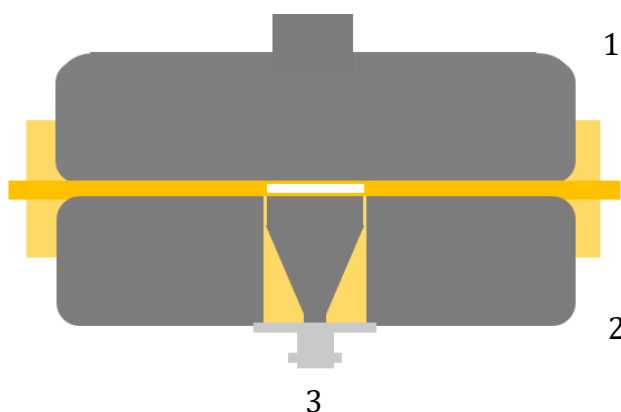


Abbildung 16 Beispiel eines Prüfkörpers mit geteilter Erdelektrode

Die Anzahl der Elektroden ist $N = 3$. Elektrode 1 ist die Hochspannungselektrode, Elektrode 2 die äußere Erdelektrode und Elektrode 3 die Messelektrode. Nach Gl. 67 beträgt die an der Messelektrode durch die Teilentladung induzierte Ladung q_3 nach [PED-91]:

$$q_3 = \Delta Q_3 + C_{30}\Delta U_3 + C_{31}(\Delta U_3 - \Delta U_1) + C_{32}\Delta U_3 \quad (\text{Gl. 73})$$

mit der Kapazität C_{30} der Messelektrode gegen die unendlich ferne Erde, den Kapazitäten gegenüber den anderen beiden Elektroden C_{31} und C_{32} ergibt sich die Gesamtkapazität $C_3 = C_{30} + C_{31} + C_{32}$ der Elektrode 3 und Gl. 73 vereinfacht sich zu [PED-91]:

$$q_3 = \Delta Q_3 + C_3\Delta U_3 - C_{31}\Delta U_1 \quad (\text{Gl. 74})$$

Zur Bestimmung des transienten Klemmenstroms wird Gl. 74 in Gl. 72 eingesetzt [PED-91]:

$$I_{\rho 3} = \frac{dq_3}{dt} - C_3 \frac{d\Delta U_3}{dt} + C_{31} \frac{d\Delta U_1}{dt} \quad (\text{Gl. 75})$$

Zur Bestimmung des Verhältnisses aus induzierter Ladung q_3 und der in der Fehlstelle umgesetzten Raumladung muss die skalare Antwortfunktion λ_3 bestimmt werden. Dies setzt eine genaue Kenntnis der geometrischen Parameter der Fehlstelle voraus. Da diese üblicherweise nicht vorhanden ist, kann hilfsweise die Antwortfunktion des fehlerstellenfreien Prüfkörpers λ_{30} berechnet werden. Hierbei gilt, dass $\lambda_{30} = 1$ auf der Oberfläche der Elektrode 3 ist und $\lambda_{30} = 0$ auf den anderen beiden Elektrodenoberflächen. An den Grenzflächen des Dielektrikums gilt außerdem Gl. 46 [PED-91]. Gl. 65 ermöglicht die Abschätzung der skalaren Antwortfunktion λ_3 , wenn neben der skalaren Antwortfunktion des fehlerstellenfreien Prüfkörpers dessen relative Permittivität des Dielektrikums bekannt ist.

Messtechnisch wurde der Einfluss der Prüfkörper- und Defektgeometrie auf die Detektierbarkeit der Teilentladungen von Boggs untersucht [BOG-87].

2.7.3 *Feldtheoretisches Modell nach Lemke*

Eberhard Lemke vergleicht die beiden bisher vorgestellten Teilentladungsmodelle. Er stellt die Vorteile des feldtheoretischen Modells nach Pedersen heraus und versucht durch eine Vereinfachung des Modells seine Verbreitung zu erhöhen [LEM-12]. Kernziel ist – wie bei jedem Teilentladungsmodell – eine Korrelation zwischen der in der Fehlstelle umgesetzten Ladung und der an den Klemmen messtechnisch erfassbaren scheinbaren Ladung.

Lemke vereinfacht die Formeln von Pedersen, reduziert ihre Anzahl auf die Notwendigsten und erstellt Graphen zur Erklärung. Abbildung 17 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Modells. Der fehlerstellenfreie Bereich des Dielektrikums wird analog zum klassischen Teilentladungsmodell durch die Kapazität C_3 repräsentiert. Nach einer Teilentladung befindet sich an der Grenzfläche der Fehlstelle jeweils an den Polstellen eine Heteroladung in Bezug auf die nächstliegende Elektrode. Das dadurch entstehende Raumladungsfeld ist durch die Feldlinien angedeutet. Es wird angenommen, dass die Klemmenspannung U_{Klemme} während der Dauer der Teilentladung konstant bleibt. Somit ändert sich das hierdurch erzeugte Laplace-Feld nicht und es wird in Abbildung 17 vernachlässigt.

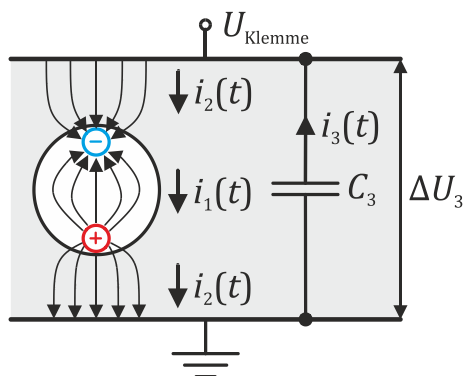


Abbildung 17 Dipol-Modell nach Lemke mit positiver Klemmenspannung U_{Klemme} , nach [LEM-12]

Der durch die teilentladungsbedingte Ladungstrennung in der Fehlstelle fließende Strom ist in Abbildung 17 mit $i_1(t)$ bezeichnet. Der durch das Dielektrikum in Serie zur Fehlstelle fließende Verschiebungsstrom ist mit $i_2(t)$, der durch das fehlerstellenfreie Dielektrikum fließende Ausgleichsstrom ist mit $i_3(t)$ bezeichnet. Der Ausgleichsstrom entlädt das die Fehlstelle umgebende Dielektrikum, in Abbildung 17 mit der Kapazität C_3 nachgebildet, teilweise. Diese Entladung ist ursächlich für die Spannungsreduktion ΔU_3 . Nach Lemke gilt [LEM-12]:

$$\int_0^{t_e} i_1 dt = \int_0^{t_e} i_2 dt = \int_0^{t_e} i_3 dt \quad (\text{Gl. 76})$$

Die Zeit, welche für den Aufbau des Dipolmoments notwendig ist, wird mit t_e bezeichnet. Aus Gl. 76 ergibt sich, dass die Ladungen in den einzelnen Regionen gleich sind und es gilt [LEM-12]:

$$q_1 = q_2 = q_3 = \Delta U_3 C_3 \quad (\text{Gl. 77})$$

Mit dem feldtheoretischen Grundgedanken aus [PED-87] ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen den Ladungen und dem Dipolmoment μ sowie der skalaren Antwortfunktion λ :

$$q_1 = q_2 = q_3 = \mu \frac{\partial \lambda}{\partial d} = \mu \vec{\nabla} \lambda \quad (\text{Gl. 78})$$

Der von Pedersen und seinen Kollegen entwickelte feldtheoretische Ansatz ist sehr allgemein gehalten und kann auf Prüfkörper mit komplexen Geometrien, mehreren Dielektrika und mehreren Elektroden angewendet werden. Dafür ist er jedoch sehr komplex, was

seine Verbreitung im Vergleich zum kapazitiven Teilentladungsmodell stark eingeschränkt hat. Lemke reduziert die Komplexität drastisch indem er folgende Annahmen trifft:

- Homogenes elektrisches Feld
- Fehlstelle symmetrisch in der Mitte zwischen den Elektroden
- Fehlstellenbreite gleich Prüfkörperbreite; Vernachlässigung der Effekte an den Ecken und den zu den Elektroden vertikalen Rändern der Fehlstelle
- Nur ein festes Dielektrikum (sowie ein üblicherweise gasförmiges in der Fehlstelle)

Abbildung 18 zeigt die Geometrie, die dem Ersatzschaltbild zugrunde liegt. Die Höhe der Fehlstelle wird mit d_1 bezeichnet, der Elektrodenabstand mit d_3 .

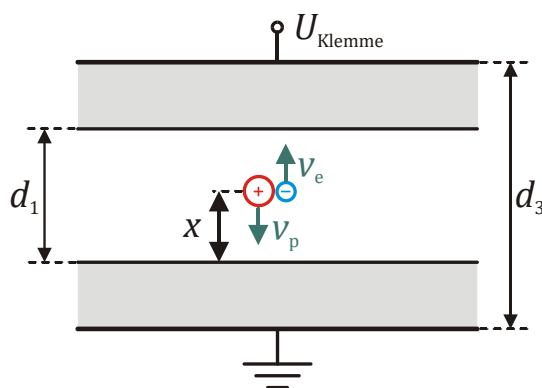


Abbildung 18 Geometrische Parameter des Dipol-Modells nach Lemke mit positiver Klemmenspannung U_{Klemme} , nach [LEM-12]

Im ersten Schritt wird nun angenommen, dass nur ein Elektron mit einer Elementarladung e und der Driftgeschwindigkeit v_e die Entladung darstellt. Der daraus resultierende Verschiebestrom $i_e(t)$ ist gegeben zu [RAE-64]:

$$i_e(t) = \frac{e v_e}{d_3} = \frac{e}{d_3} * \frac{dx_e}{dt} \quad (\text{Gl. 79})$$

Die Bewegung der Ladungsträger wird durch das feste Dielektrikum gehindert, welches sich in der in Abbildung 18 gezeigten Modellanordnung symmetrisch vor den Elektroden befindet. Gl. 79 kann auch mittels des Ramo-Shockley Theorems [SHO-38] oder mittels des Konzepts der Spiegelladungen [FRO-56] hergeleitet werden [LEM-12]. Bei Ionisationsprozessen im Gasraum (siehe Kapitel 2.5) wird pro Ionisationsvorgang neben einem Elektron (mit einer negativen Elementarladung) auch ein positives Ion mit einer positiven Elementarladung zur Verfügung gestellt. Für ein solches Paar ergibt sich folgender Verschiebestrom $i_d(t)$ nach [LEM-12]:

$$i_d(t) = i_e(t) + i_p(t) = \frac{e}{d_3} \left(\frac{dx_e}{dt} + \frac{dx_p}{dt} \right) \quad (\text{Gl. 80})$$

Zur Abschätzung der induzierten Ladung wird nun angenommen, dass die Ionisation an einem Punkt x innerhalb der Fehlstelle stattfindet. Das Elektron driftet von diesem Punkt bis zur Grenzfläche die Strecke $d_1 - x$, das positiv geladene Ion die Strecke x . Unter der Annahme, dass n_i Ladungsträgerpaare, jeweils mit den Ladungen q_e und q_p , während der betrachteten Teilentladung im Gasraum ionisiert werden, lässt sich die hieraus an den Elektroden des Prüfkörpers induzierte Ladung berechnen zu [LEM-12]:

$$q_a = n_i(q_e + q_p) = n_i \frac{e}{d_3} \left(\int_x^{d_1-x} dx_e + \int_0^x dx_p \right) = n_i e \frac{d_1}{d_3} \quad (\text{Gl. 81})$$

Die an den Elektroden induzierte Ladung ist proportional zur Ladung der Teilentladungslawine $n_i e d_1$. Des Weiteren ist die induzierte Ladung antiproportional zum Elektrodenabstand d_3 , was im Teilentladungsmodell nach Pedersen durch die skalare Antwortfunktion $\lambda = \frac{1}{d_3}$ für diese Anordnung ausgedrückt wird [PED-91], [LEM-12].

Lemke unterscheidet in seinem Aufsatz drei Grenzfälle des Verhältnisses aus Fehlstellenhöhe d_1 und Elektrodenabstand d_3 , welche in Abbildung 19 dargestellt werden.

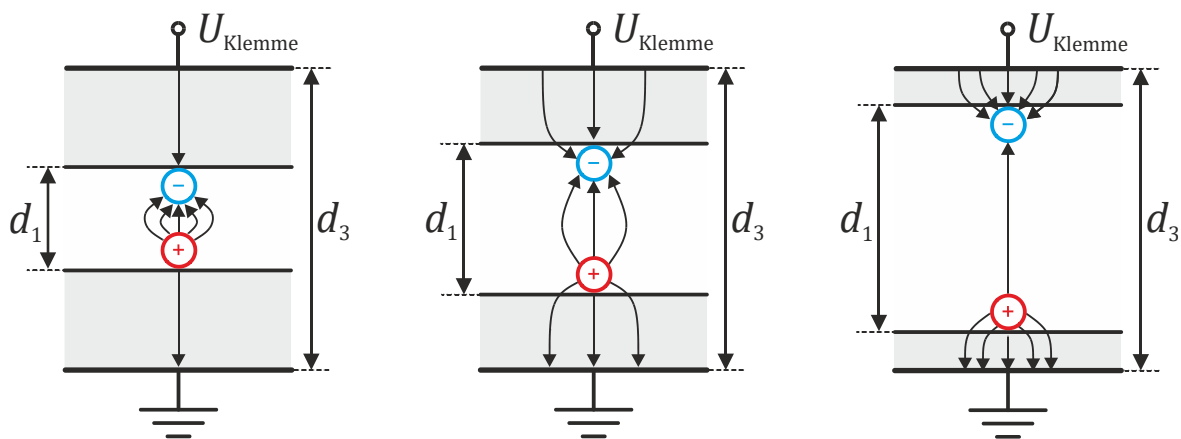


Abbildung 19 Dipol-Modell nach Lemke mit Fehlstellenhöhe d_1 und Elektrodenabstand d_3 sowie der positiven Klemmenspannung U_{Klemme}
Grenzfälle:
Links: Kleine Fehlstellenhöhe im Verhältnis zum Elektrodenabstand
Mitte: Mittlere Fehlstellenhöhe im Verhältnis zum Elektrodenabstand
Rechts: Große Fehlstellenhöhe im Verhältnis zum Elektrodenabstand
[Lem-12]

Je nach Verhältnis der Fehlstellenhöhe und des Elektrodenabstandes verlaufen die in Abbildung 19 eingezeichneten elektrischen Feldlinien unterschiedlich:

- Falls die Fehlstellenhöhe klein ist im Vergleich zum Elektrodenabstand schließen sich die meisten Linien des elektrischen Verschiebungsflusses direkt in der Fehlstelle. Dies bedeutet, dass an den Elektroden nur eine sehr kleine Ladung induziert wird und die in der Fehlstelle stattfindenden Teilentladungsvorgänge an den Klemmen des Prüfkörpers nur sehr schwer oder gar nicht zu detektieren sind. Die scheinbare Ladung ist somit deutlich kleiner als die in der Fehlstelle umgesetzte Ladung.
- Falls die Fehlstellenhöhe ungefähr die Hälfte des Elektrodenabstandes ist, schließen sich ungefähr die Hälfte der Verschiebungsdichtelinien direkt in der Fehlstelle. Die zweite Hälfte schließt sich über das Dielektrikum, die Elektroden und die externe Beschaltung. Hierbei wird eine im Vergleich zum ersten Fall wesentlich größere Ladung auf den Elektroden induziert. Da die scheinbare Ladung ungefähr halb so groß wie die in der Fehlstelle umgesetzte Ladung ist, ist in diesem Fall die Teilentladung in der Fehlstelle einfacher detektierbar verglichen mit der vorher genannten Situation der sehr kleinen Fehlstelle.
- Ist die Fehlstellenhöhe ungefähr gleich dem Elektrodenabstand, das heißt die Fehlstelle füllt den Großteil des Volumens zwischen den Elektroden aus und das feste Dielektrikum nur einen sehr kleinen Teil, dann schließen sich die meisten Verschiebungsdichtelinien über das Dielektrikum, die Elektroden und die externe Beschaltung. Die hierbei induzierte Ladung ist näherungsweise gleich der in der Fehlstelle tatsächlich umgesetzten Ladung. Dies macht die Detektion sehr einfach. In den für die Messung des Entladestroms eingesetzten Folienprüfkörpern herrscht aus Gründen der einfacheren Messung überwiegend diese Situation, siehe Kapitel 4.

3 Aufgabenstellung

Durch die Energiewende werden Erzeugungs- und Lastschwerpunkte räumlich voneinander getrennt. Daher wird eine zuverlässige und wirtschaftliche Energieübertragung über lange Distanzen notwendig. Aufgrund des Wegfalls des Blindleistungsbedarfs stellt die Hochspannungsgleichstromübertragung für Distanzen über 600 km die wirtschaftlichste Alternative dar. Bedingt durch die hohe Leistung ist ein Ausfall eines Betriebsmittels für das Netz sehr ungünstig und muss vermieden werden. Daher sollen für die Betriebsmittel unter Gleichspannungsbelastung die aus der Wechselspannungstechnik bekannten Diagnosemittel eingesetzt werden. Insbesondere die Teilentladungsanalyse ist ein Kernelement des Diagnoseportfolios, da diese je nach Vorinstallation und Messgerät teils online während des Betriebs durchgeführt werden kann. Selbst bei offline-Messungen kostet die Teilentladungsmessung im Gegensatz zu anderen Diagnosetechniken keine Restlebensdauer des Betriebsmittels. Aufgrund des hochfrequenten Charakters der Teilentladungsimpulse ist der Signalpfad und die Messkette bei Teilentladungen unter Gleich- und Wechselspannungsbelastung identisch.

Für das Entstehen einer Teilentladung müssen zwei Voraussetzungen erfüllt werden. Einerseits muss die elektrische Feldstärke lokal hinreichend hoch sein, andererseits muss in diesem hochbelasteten Feldraum mit genügend Abstand zur anodischen Grenzfläche ein lawinenwirksames Anfangselektron zur Verfügung stehen.

Bei Wechselspannungsbelastung ändert sich die elektrische Feldstärke periodisch und invertiert bei einer Frequenz von 50 Hz ihre Polarität alle 10 ms. Auch im Falle einer Superposition der von außen in die innere Fehlstelle eingeprägten elektrischen Feldstärke mit dem Raumladungsfeld, bedingt durch die akkumulierte Ladung vorangegangener Teilentladungen, ändert sich die resultierende elektrische Feldstärke ständig. Sie überschreitet aufgrund der Änderung der von außen eingeprägten Feldstärke unter der Annahme, dass die angelegte Spannung größer als die Teilentladungseinsetzspannung ist, regelmäßig die Zündfeldstärke. Falls hinreichend viele lawinenwirksame Anfangselektronen zur Verfügung stehen, finden die Teilentladungen regelmäßig statt.

Die an den Grenzflächen akkumulierten Elektronen können sich nach einer Polaritätsumkehr unter Umständen von dem festen Isolierstoff lösen und als lawinenwirksames Anfangselektron einer sich in die entgegengesetzte Richtung entwickelnden Teilentladung dienen.

Unter Gleichspannungsbelastung ändert sich die von außen eingeprägte elektrische Feldstärke nicht mehr, sofern der stationäre Zustand erreicht wurde. Durch das Raumladungsfeld aufgrund der an den Lunkergrenzflächen akkumulierten Ladung vorangegangener Teilentladungen ist das resultierende elektrische Feld im Gasraum kleiner als die Zündfeldstärke, sodass eine Bedingung für die Teilentladung nicht erfüllt wird. Erst nach einem hinreichend großen Abbau der akkumulierten Ladung kann die nächste Teilentladung stattfinden. An der Fehlstellengrenzfläche akkumulierte Elektronen können wegen des Ausbleibens der Polaritätsumkehr bei Gleichspannungsbelastung nicht für nachfolgende Teilentladungen als lawinenwirksame Anfangselektronen dienen.

Somit finden bei Gleichspannungsbelastung wesentlich weniger Teilentladungen statt, was die Teilentladungsmessung störanfälliger macht und die Detektion erschwert. Eine Phasenkorrelation kann es bei Gleichspannungsbelastung nicht geben, sodass auch keine grobe Abschätzung der Fehlerart stattfinden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, tiefere Erkenntnisse über die physikalischen Vorgänge bei Teilentladungen in inneren Fehlstellen zur Verbesserung der Teilentladungsdiagnostik zu erlangen.

Zur Bestimmung der Fehlerart beim Zuschalten des Betriebsmittels unter Gleichspannungsbelastung soll untersucht werden, welchen Einfluss die Änderung der Klemmenspannung auf das Teilentladungsverhalten verschiedener Anordnungen hat.

Durch die Auswertung des zur scheinbaren Ladung integrierten Klemmenstroms gehen Informationen verloren. Es soll untersucht werden, ob mittels hochfrequenter Strommessung weitere Informationen, wie die Art der Teilentladung, gewonnen werden können, sodass diese Informationen in die Zustandsbewertung des Betriebsmittels mit einfließen können.

Zur Bewertung der diagnostischen Aussagekraft ortsaufgelöster Teilentladungsmessverfahren soll außerdem ermittelt werden, welchen Einfluss die Spannungssteigerungsgeschwindigkeit, die Art der Teilentladung und die Alterung auf die örtliche Verteilung der Teilentladungen hat.

Um diese Ziele zu erreichen sind folgende Teilaufgaben zu lösen:

- Bestimmung des Einflusses der Änderung des elektrischen Feldes auf Mehrschichtdielektrika mit äußerer Fehlstelle und Anordnungen mit innerer Fehlstelle.
- Messung des Entlades bei inneren Teilentladungen und Bestimmung des Einflusses äußerer Parameter (wie Temperatur und Feuchte) auf das Teilentladungsverhalten (Häufigkeit, umgesetzte Ladung, Art der Entladung).

- Ortsaufgelöste Teilentladungsmessung (eindimensional online und zweidimensional offline) sowie Identifikation der unterschiedlichen Entladungstypen anhand der optischen Messergebnisse.

4 Versuchsanordnungen

In diesem Kapitel werden die drei Versuchsanordnungen beschrieben. Das ist die Teilentladungsmessung bei langsam veränderlicher Prüfspannung, die Messung des Teilentladungsimpulsstromes und die orts aufgelöste Messung der Teilentladungsaktivität und des Oberflächenpotentials der Isolierstoffoberfläche durch die akkumulierte Ladung. Abschließend werden in jedem Unterkapitel die bei den jeweiligen Messungen verwendeten Prüfkörper vorgestellt.

4.1 Langsame Änderung der Prüfspannung

Eine der beiden notwendigen Bedingungen für eine Teilentladung ist ein lokal hinreichend hohes elektrisches Feld in der Fehlstelle. Bei Gleichspannungsbelastung dauert das Erreichen eines stationären Endwertes der elektrischen Feldverteilung werkstoff- und geometrieabhängig meist sehr lange. Mit der folgenden Versuchsanordnung soll untersucht werden, welchen Einfluss das elektrische Feld und dessen zeitliche Änderung auf die Teilentladungsaktivität hat. Hierzu wird die Klemmenspannung zeitlich variiert.

4.1.1 Gesamtbeschreibung und Durchführung

Die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes im Prüfkörper wird durch ein langsames Abklingen seiner Klemmenspannung realisiert. Hierzu wird ein modifizierter Stoßspannungsgeneratorkonstruktion verwendet. Die fallende Flanke der Spannung wurde deshalb gewählt, weil in dieser Zeit keine Schaltvorgänge in der Funkenstrecke stattfinden und der Prüfkörper galvanisch vom speisenden Transformator entkoppelt ist. Dadurch ist der Grundstörpegel sehr niedrig. Nachteilig ist jedoch die Teilentladungsbelastung des Prüfkörpers durch den vorherigen Spannungsanstieg.

Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit wird ein möglichst langsam abklingender Spannungsimpuls mit vergleichsweise niedriger Maximalspannung (\hat{u} zwischen 4 kV und 30 kV) benötigt. Daher wird im Vergleich zu einem Blitzstoßspannungsgenerator zur Erzeugung einer genormten Blitzstoßspannung einerseits der Entladewiderstand R_E weggelassen, die Klemmenspannung $u(t)$ galvanisch getrennt gemessen und andererseits für Spitzenspannungen unter 10 kV ein pneumatisch betätigter Schalter an Stelle der Schaltfunkenstrecke eingesetzt. Bei Einsatz der üblicherweise verwendeten Zündfunkenstrecke würde der Abstand der Kugeln nur wenige Millimeter betragen.

Durch das Weglassen des Entladewiderstandes R_E sowie durch die galvanisch getrennte Messung der Klemmenspannung mittels einer Feldmühle wird die Belastungskapazität nur über ihren eigenen parasitären Widerstand sowie den Widerstand über den Prüfkörper entladen. Leermessungen haben ergeben, dass der Widerstand über einen teilentladungsfreien Prüfkörper im Vergleich zum parasitären Widerstand der Belastungskapazität vernachlässigt werden kann. Es ergeben sich Rückenhalbwertszeiten im Bereich von Minuten.

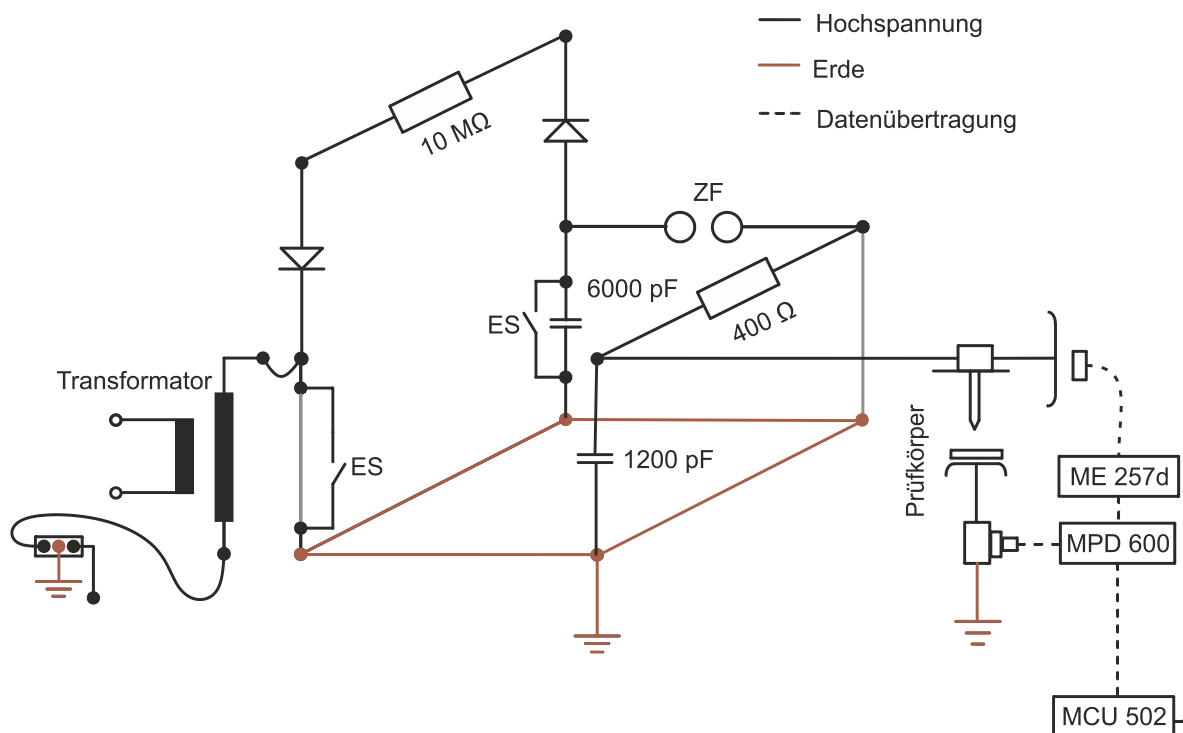


Abbildung 20 Modifizierter Stoßspannungsgenerator zur Erzeugung langer Rückenhalbwertszeiten mit Spannungs- und Teilentladungsmesstechnik

In Abbildung 20 wird die Variante des Versuchsaufbaus für höhere Spannungen in der Variante mit der Schaltfunkenstrecke dargestellt. Der Aufbau erfolgt mittels Bauelementen des Hochspannungsbaukastens.

4.1.2 Galvanisch getrennte Potentialmessung

Aufgrund des langsamen Impulsverlaufes könnte nur ein resistiver Teiler verwendet werden. Dieser weist jedoch prinzipbedingt immer einen Stromfluss auf, welcher in diesem Anwendungsfall die Belastungskapazität C_B entladen würde. Zur Vermeidung der unerwünschten Entladung wird daher das Potential an der Hochspannungsklemme des Prüfkörpers galvanisch getrennt mittels eines elektrostatischen Voltmeters des Typs

257D des Herstellers *Monroe Electronics* gemessen. Dieses Voltmeter weist eine Messunsicherheit von 5 % und eine Anstiegszeit von 10 % auf 90 % von 250 ms auf. Diese Anstiegszeit ist für die Aufzeichnung des Verlaufs der steigenden Flanke des Spannungsimpulses nicht hinreichend, jedoch für die Aufzeichnung der fallenden Flanke. Der Rauschpegel ist kleiner 10 V/m, die Drift kleiner 30 V/(m h) [MON-00]. Als Sensor wird ein *1036F* in der Ausführung für eine maximale Feldstärke von 20 kV/cm, ebenfalls von *Monroe Electronics* verwendet. Seine Messunsicherheit ist kleiner 3 %, das Rauschen kleiner als 0,03 % und die Langzeitdrift unter 1 %. Die Anstiegszeit von 10 % auf 90 % wird mit 150 ms angegeben. Das Ausgangssignal des Messgerätes beträgt laut Datenblatt 1/10.000 m des Eingangssignals [MON-00]. Die Eingangsgröße des Messsystems ist die elektrische Feldstärke, ausgangsseitig wird ein Spannungssignal bereitgestellt. Die Sonde wird mittels vier Plastikbolzen in einem Abstand von 3 cm entfernt von einer Plattenelektrode montiert. Abbildung 21 zeigt das elektrostatische Voltmeter samt Befestigung und Plattenelektrode. Simulativ wurde ein nahezu homogener elektrischer Feldverlauf im Bereich um das Sensorfenster nachgewiesen. Mittels eines kalibrierten Messteilers wurde eine Kalibrierung durchgeführt.

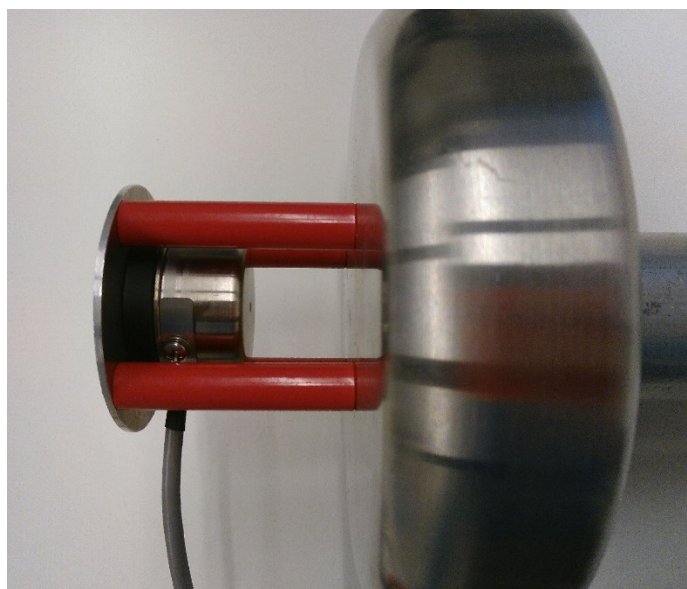


Abbildung 21 Foto des elektrostatischen Voltmeters mit Plattenelektrode und Distanzbolzen

Das Ausgangssignal des Messgerätes wird über einen Tiefpass mit einer 3 dB-Eckfrequenz von 10 Hz an den Spannungseingang des Teilentladungsmessgerätes *MPD 600* der Firma *Omicron* weitergeleitet.

4.1.3 Konventionelle Teilentladungsmessung

Für die konventionelle Teilentladungsmessung in Anlehnung an DIN EN 60270 wird ein *MPD 600* der Firma *Omicron* verwendet. Die Teilentladungsmessung findet in Serie zum Prüfkörper statt. Die Koppereinheit *CPL 542* wird zwischen die niederspannungsseitige Plattenelektrode und die Erdung eingeschleift. Die Koppereinheit hat neben der Schaltung zur Auskopplung des Teilentladungssignals auch noch den Niederspannungsteil für einen kapazitiven Teiler verbaut. Dieser kann jedoch in diesem Versuch nicht genutzt werden, da die Spannungsänderung zu gering ist. Daher bleibt dieser Ausgang der Koppereinheit unbeschaltet. Das *MPD 600* besitzt zwei Eingänge. Der Teilentladungseingang wird mit dem Teilentladungssignal der Koppereinheit, der Spannungseingang wird mit dem Ausgang des elektrostatischen Voltmeters *257D* über einen Tiefpass verbunden. Das *MPD 600* wird mittels eines Glasfaserpaares mit der Übersetzungseinheit *MCU 502* verbunden. Diese wiederum wird per *USB*-Anschluss mit dem Messrechner verbunden. Durch die Glasfaserverbindung und die Speisung des Teilentladungsmessgeräts aus einer Batterie ist eine vollständige galvanische Trennung des Teilentladungsmesssystems gewährleistet. Dies verhindert nicht nur das Signalrauschen durch die Vermeidung von Masseschleifen, sondern erhöht auch die Sicherheit für den Bediener, da keine leitenden Verbindungen die Zonengrenze zwischen Hochspannungs- und Bedienbereich passieren und somit auch im Fehlerfall keine Spannungsverschleppung zum Bediener hin auftreten kann. Der Belastungskondensator hat eine Kapazität von 1,2 nF und dient gleichzeitig auch als Koppelkondensator für die Teilentladungsmessungen. Abbildung 20 zeigt den Gesamtaufbau.

Zur Kalibrierung wird für Messungen, bei denen scheinbare Ladungen über 100 pC erwartet werden, ein Kalibrierimpulsgenerator *CAL 542* von *Omicron* verwendet. Dieser bietet die Möglichkeit einer normgerechten Kalibrierung mit Ladungen zwischen 100 pC und 10 nC. Für kleinere zu erwartende scheinbare Ladungen steht ein Kalibrierimpuls-generator *CAL2A* der Firma *Power Diagnostix Systems* mit einer Kalibrierladung zwischen 0,1 pC und 50 pC zur Verfügung. Die Kalibrierung erfolgt am Prüfkörper möglichst nahe dem vermuteten Ort der Teilentladungen.

Es wird möglichst breitbandig und niederfrequent gemessen. Hierdurch kann die Impulsform und insbesondere die Impulspolarität der Teilentladungen möglichst präzise bestimmt werden. Die Mittenfrequenz der Teilentladungsmessungen beträgt 750 kHz bei einer Bandbreite von 1,5 MHz. Somit wird ab einer Frequenz von 0 Hz bis 1,5 MHz gemessen. Die hardwarebedingte untere Grenzfrequenz des Ankoppelvierpols *CPL 542* beträgt 20 kHz [OMI-07]. Das Gating wird auf den systembedingten Minimalwert von 1,54 μ s gesetzt. Die Totzeit nach einer Teilentladungsdetektion ist länger als die Anstiegszeit der impulsförmigen Klemmenspannung. Somit kann in der steigenden Flanke

des Spannungsimpulses weder die Spannung mit dem elektrostatischen Voltmeter gemessen werden noch kann die Teilentladungsaktivität mit dem *MPD 600* adäquat aufgezeichnet werden.

Die Messungen wurden in einer Schirmkabine mit einer Schirmdämpfung von 120 dB bis zu Frequenzen im Gigahertzbereich durchgeführt. Hierdurch liegt der Grundstörpegel ohne angelegte Spannung im Bereich der Detektionsgrenze des Teilentladungsmesssystems um 1 pC und auch mit einem fehlerstellenfreien Prüfkörper übersteigt der Grundstörpegel bei den während den Versuchen vorherrschenden klimatischen Bedingungen⁴ bei der maximalen Prüfspannung von 30 kV niemals Werte über 2 pC. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist somit sehr gut, sodass keine weiteren Anstrengungen zur Verbesserung desselben unternommen werden müssen.

Das verwendete Teilentladungsmesssystem zeichnet die scheinbare Ladung, die mittels des elektrostatischen Voltmeters gemessene Klemmenspannung und den Zeitpunkt des Teilentladungsereignisses auf. Zur Reduktion der Datenmenge speichert das verwendete System diese Daten nur ereignisbezogen ab. Daher ist in Phasen ohne Teilentladungsaktivität kein Verlauf der Klemmenspannung im Speicher verfügbar. Diese Spannung wird daher bei der Datenauswertung für teilentladungsfreie Zeitbereiche approximiert. Grundlage ist hierfür eine teilentladungsfreie Leermessung der Anordnung, welche einen exponentiellen Spannungsabfall der Klemmenspannung aufgezeigt hat.

4.1.4 Prüfkörper

Es wurden folgende Anordnungen und Prüfkörper untersucht:

- a) Nadel-Platte-Anordnung mit einer Schlagweite von 5 mm sowie Nadeln des Herstellers *Ogura Jewel* mit einem Durchmesser von 1 mm und einem Spitzenradius von $r = 5 \mu\text{m}$.
- b) Nadel-Platte-Anordnung mit dielektrischer Barriere. Hierbei bleiben die Abmessungen im Vergleich zur Nadel-Platte-Anordnung unverändert, allerdings wird auf die geerdete Plattenelektrode zentriert eine 1 mm starke Platte aus Epoxidharzformstoff *CY-228* der Firma *Huntsman Advanced Materials* aufgelegt. Der Elektrodenabstand beträgt 5 mm, sodass zwischen der Oberseite der Isolierstoffbarriere und der Nadelspitze ein Abstand von 4 mm verbleibt.
- c) Stab-Platte-Anordnung mit dielektrischer Barriere. Der Stabdurchmesser beträgt 10 mm, der Kantenradius des Messingstabes ist durch einen frischen Schnitt kleinstmöglich gewählt.

⁴ Temperatur $\vartheta \approx 22^\circ\text{C}$, relative Feuchte der Luft $\approx 25\%$, keine Befeuchtungsmöglichkeit

- d) Prüfkörper aus Epoxidharzformstoff mit innerer Fehlstelle mit einseitigem Elektrodenkontakt nach Kodoll [KOD-88]. Hierbei beträgt in der Rotationsachse die minimale Schichtdicke des Epoxidharzformstoffes *CY-228* 0,5 mm und die maximale Fehlstellenhöhe 1,15 mm.
- e) Prüfkörper aus Epoxidharzformstoff mit innerer Fehlstelle ohne direkten Elektrodenkontakt in Prüfkörpern nach Henriksen [HEN-82]. Hierbei liegt zwischen den beiden abgerundeten Plattenelektroden (Elektrodenabstand 3 mm) in der Mitte ein kugelförmiger Lunker mit einem Durchmesser von 1,5 mm eingebettet. Der Epoxidharzformstoff wird ebenfalls aus *CY-228* der Firma *Huntsman Advanced Materials* hergestellt.

In Abbildung 22 werden diese fünf Anordnungen und Prüfkörper dargestellt.

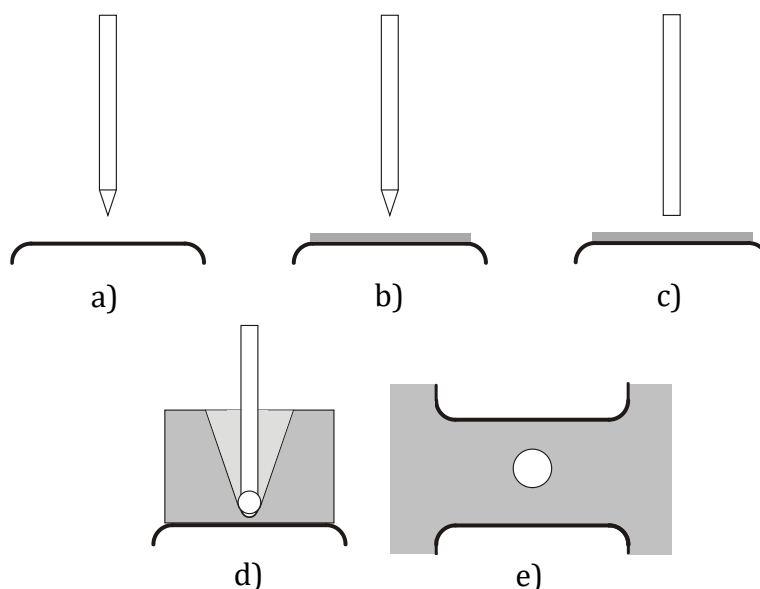


Abbildung 22 Nicht maßstabsgetreue Darstellung der untersuchten Anordnungen und Prüfkörper

4.2 Impulsstrommessung

Üblicherweise wird bei der konventionellen Teilentladungsmessung die scheinbare Ladung gemessen. Dies hängt damit zusammen, dass die Ladung unabhängig vom Übertragungsverhalten des Signalpfades der gesamten Messkette ist. Somit spielt die Entfernung zwischen dem Ort der Teilentladung und dem Ort des Teilentladungsmesssystems nur in Form der Sensitivität eine Rolle. Dies vereinfacht Messungen und reduziert die Kosten für die Messinstrumente. Jedoch hat die scheinbare Ladung keine direkte Korrelation mit den durch Teilentladungen verursachten Schädigungen [TAN-86], [HOL-92], [MON-95]. Bei Teilentladungsmessungen unter Wechselspannung können die Parameter Phasenlage und Teilentladungsein- sowie Teilentladungsaussetzspannung zur Identifikation der Art

der Störung genutzt werden. Da diese Parameter bei Teilentladungen unter Gleichspannungsbelastung nicht zur Verfügung stehen, wird bei diesen Labormessungen unter definierten Bedingungen mittels einer breitbandigen Messkette der Impulsstrom aufgezeichnet. Hierdurch sollen sich Rückschlüsse über die Teilentladungssituation im Prüfkörper ziehen lassen. Um auch den Einfluss der Temperatur und der relativen Feuchte der Luft auf das Teilentladungsverhalten untersuchen zu können befindet sich der Prüfkörper in einem Klimaschrank. Mit dem Teilentladungsstrommesssystem können auch direkt hintereinander stattfindende Mehrfachentladungen aufgezeichnet werden. Simultan zur Strommessung wird eine konventionelle Teilentladungsmessung durchgeführt.

4.2.1 Gesamtbeschreibung und Durchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus dem Hochspannungsbereich, welcher sich im Klimaschrank befindet und einem Gerätebereich mit Raumklima. Im Klimaschrank *KMF 240* der Firma *Binder* befindet sich die Elektrodenanordnung für Folienprüfkörper, der Koppelkondensator, die Messimpedanz *CPL 542* und die für die Versuchsdurchführung und die Kalibrierung notwendige Verkabelung. Zusätzlich werden die Prüfkörperfolien für die nachfolgenden Versuche zur Akklimatisierung in der Klimakammer gelagert. Dieser Hochspannungsbereich wird von einer Sicherheits-SPS verriegelt und sicher überwacht.

Über eine Durchführung wird das geschirmte Hochspannungskabel, die niederinduktive Masseverbindung und die beiden Messkabel (zum Oszilloskop und zum konventionellen Teilentladungsmesssystem) zum Gerätebereich geführt.

Im Gerätebereich befindet sich ein über den Messrechner fernsteuerbares Hochspannungsnetzteil. Des Weiteren befindet sich hierin das konventionelle Teilentladungsmesssystem sowie das Oszilloskop. Der Gerätebereich ist während des Betriebs aus Sicherheitsgründen verschlossen und alle drei darin befindlichen Geräte werden über den Messrechner ferngesteuert. Zur Vermeidung von Erdschleifen sowie aus Sicherheitsgründen (Vermeidung der Spannungsverschleppung) ist mindestens das Teilstück an der Zonengrenze zwischen Bedien- und Gerätebereich als optische Übertragungsstrecke ausgelegt: Das konventionelle Teilentladungsmesssystem kommuniziert zwischen dem *MPD 600* und dem *MCU 502* über eine faseroptische Verbindung. Das Oszilloskop hat einen Netzwerkanschluss. Mittels zweier Übersetzer Kupfer-Glasfaser wird eine galvanisch getrennte Kommunikationsverbindung aufgebaut. Das Hochspannungsgleichstromnetzteil kommuniziert mittels einer seriellen Schnittstelle. An der Zonengrenze wird hier ein Optokopplermodul mit einem Isoliervermögen über 3,5 kV eingebaut.

Im Gerätebereich befindet sich der zentrale Masseanschlusspunkt. Durch eine sternförmige Masseverteilung mit Zentralpunkt werden Erdschleifen mit Störeinkopplung vermieden. Das Oszilloskop und der oszilloskopseitige Kupfer-Glasfaserumsetzer wird über einen Trenntransformator gespeist. Abbildung 23 zeigt schematisch diesen Versuchsaufbau.

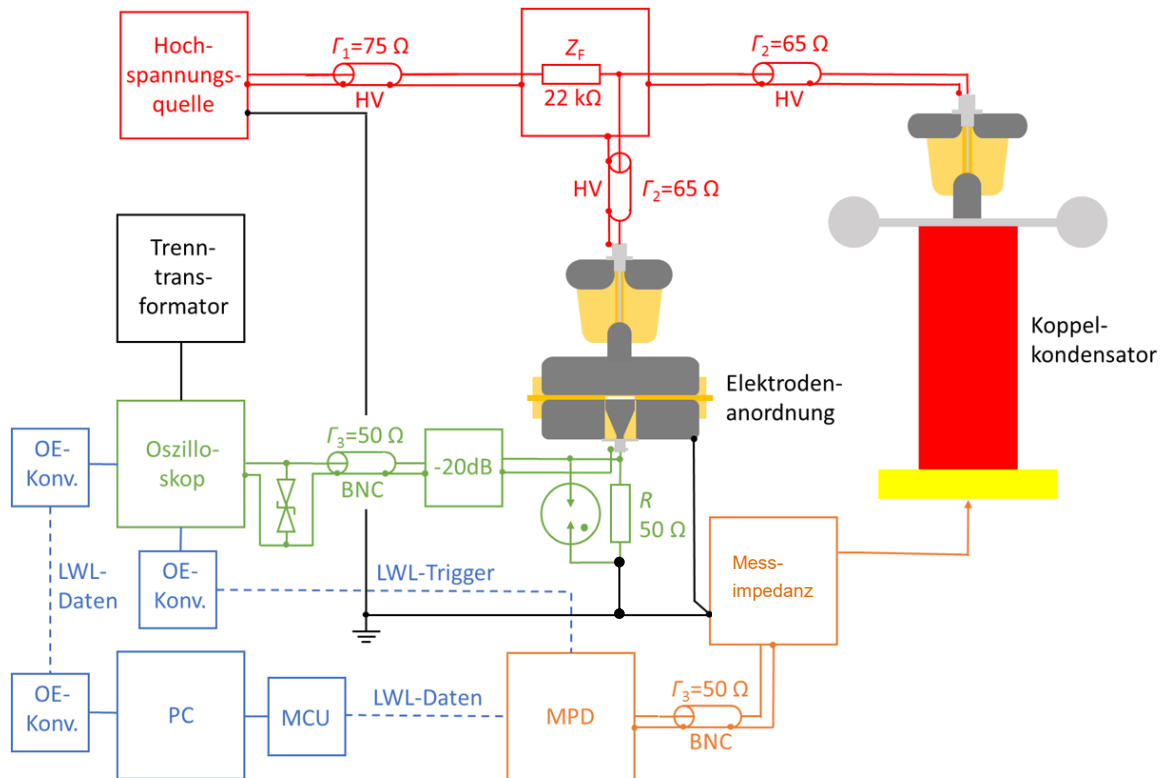


Abbildung 23 Schematischer Aufbau der Impulsstrommessung

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten näher erläutert.

4.2.2 Hochspannungskreis und Prüfkörper

Die Hochspannung wird mit einem Netzteil des Typs *HCP 35-35000* der Firma *FuG* bereitgestellt. Sie weist eine maximale Restwelligkeit von 10^{-4} des Ausgangswertes sowie einen Offset von 50 mV auf. Bei einem maximalen Strom von 1 mA und einer maximalen Ausgangsspannung von 35 kV beträgt somit die Welligkeit (Spitze-zu-Spitze des Spannungsverlaufs) 3,55 V [FUG-12]. Mittels des Messrechners wird beim Zu- und Abschalten der Hochspannung eine Rampe mit einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von 100 V/s gefahren. Das Netzteil besitzt eine *F3430*-Buchse an der Geräterückseite. Mittels eines passenden Steckers und eines circa zwei Meter langen, geschirmten Hochspannungskabels mit einer maximalen Betriebsspannung von 50 kV und einem Wellenwiderstand

von 75Ω wird die Hochspannung in den Hochspannungsbereich im Klimaschrank geführt. In der geschirmten Verteilerdose befindet sich eingangsseitig ein Dämpfungswiderstand mit $22 \text{ k}\Omega$. Dieser entkoppelt gemeinsam mit den Leitungsbelägen die Hochspannungsquelle im Falle eines Teilentladungsereignisses. Ausgangsseitig sind zwei Hochspannungskabel mit jeweils 65Ω Wellenwiderstand an der Verteilerdose montiert. Eines wird mittels einer feldoptimierten Steckverbindung samt Schirmelektrode mit dem Koppelkondensator verbunden. Das andere wird mit einer Hochspannungssteckverbindung an die Hochspannungselektrode ankontaktiert.

Die zylinderförmige Hochspannungselektrode ist aus Aluminium gefertigt und hat einen Durchmesser von 70 mm. Der Kantenradius beträgt 10 mm (oberseitig in Luft) sowie 5 mm (unterseitig in Epoxidharzformstoff). Das Epoxidharz des Typs „L“ der Firma *R&G Faserverbundwerkstoffe*, wird zur Vermeidung von unerwünschten Teilentladungen im Randbereich angegossen. Niederspannungsseitig ist die Elektrode zweigeteilt: Die äußere Elektrode (Durchmesser des Durchgangslochs 22 mm beziehungsweise 12 mm je nach Fehlstellendurchmesser) ist zur Verringerung der Kapazität im Messkreis und somit zur Erhöhung der Sensitivität niederinduktiv geerdet. Die äußeren Kanten sind jeweils mit einem Radius von 10 mm verrundet. Die innere Messelektrode hat prüfkörperseitig einen Außendurchmesser von 20 mm beziehungsweise 10 mm, sodass zwischen den beiden Elektroden ein Isolierabstand von 1 mm verbleibt. In Richtung des koaxialen Messkabels verjüngt sich die Messelektrode auf 4 mm. Die Elektrodenanordnung ist in Abbildung 24 dargestellt. Mittels vier Gewindestangen und zwei Platten wird mechanisch Druck auf die Elektroden aufgebracht, sodass in Kombination mit einem dünnen Film Silikonöl unerwünschte Teilentladungen außerhalb der künstlichen inneren Fehlstelle vermieden werden.

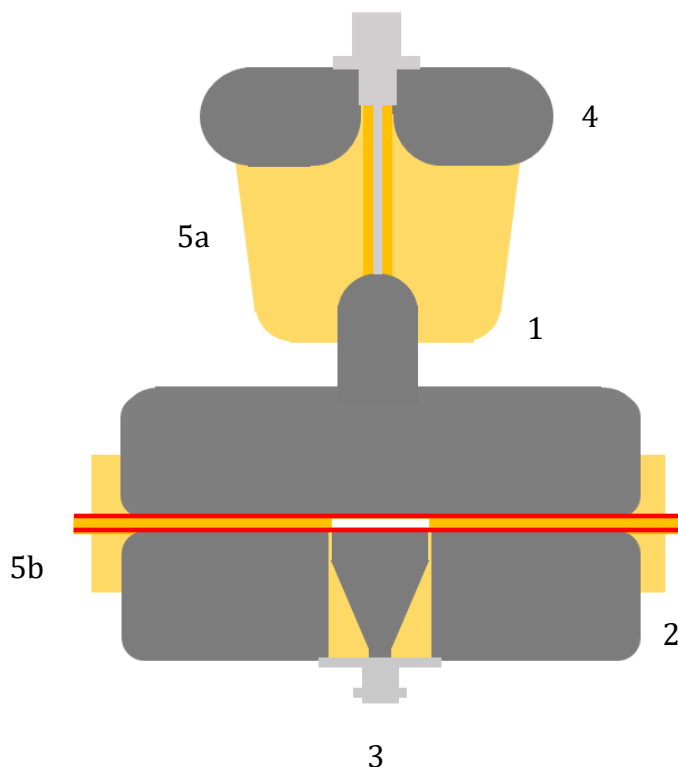


Abbildung 24 Elektrodenanordnung mit dreilagigem Sandwich-Prüfkörper (dunkelgelb-rot) samt Fehlstelle.
1: Hochspannungselektrode
2: Erdelektrode
3: Messelektrode
4: Erdelektrode zur Feldsteuerung am Ende des koaxialen Kabels
5a und 5b: Epoxidharzformstoff zur Vermeidung unerwünschter Teilentladungen

Der Koppelkondensator *MCC 205L* der Firma *Omicron* hat eine Kapazität von 1 nF. An seiner Niederspannungsseite wird das konventionelle Teilentladungsmesssignal ausgekoppelt.

4.2.3 Konventionelle Teilentladungsmessung

Für die konventionelle Teilentladungsmessung wird das *MPD 600* der Firma *Omicron* verwendet. Als Messimpedanz dient die in Serie zum Koppelkondensator ebenfalls im Klimaschrank installierte *CPL 542*. Das *MPD 600* ist zusammen mit dem Akkupack *MPP 600*, welcher gemeinsam mit der faseroptischen Datenübertragung zwischen Messgerät und Messrechner eine potentialfreie Messung ermöglicht, im Gerätebereich untergebracht. Die Messimpedanz bildet gemeinsam mit dem Koppelkondensator einen kapazitiven Spannungsteiler, sodass bei Wechselspannungsbelastung hiermit die Prüfspannung gemessen werden kann. Bei Gleichspannung wird jedoch ein resistiver Teiler benötigt.

Aus Platzgründen lässt sich im Hochspannungsbereich kein resistiver Teiler teilentladungsarm unterbringen. Daher wird bei diesen Experimenten auf einen Spannungsteiler verzichtet und stattdessen wird der Sollwert der Ausgangsspannung des Hochspannungsnetzteils verwendet. Bedingt durch den extrem niedrigen Strom ist der Spannungsabfall im Netzteil und in den Leitungen vernachlässigbar klein.

Das Teilentladungssignal wird breitbandig mit einer Bandbreite von 750 kHz und einer Mittenfrequenz von 400 kHz aufgezeichnet. Es ergibt sich softwareseitig daher eine Bandbreite von 25 kHz bis 775 kHz. Die Messimpedanz hat hardwarebedingt eine untere 3 dB-Eckfrequenz von 20 kHz, welche hier nicht beschränkend ist. Somit kann die Polarität der Impulse meist korrekt aufgezeichnet werden. Wegen des Aufbaus in der Klimakammer ergibt sich ein Grundstörpegel von 145 pC ohne Spannung und 200 pC bei maximaler Prüfspannung an den Klemmen. Aufgrund der ereignisbasierten Aufzeichnung nur dreier Werte (scheinbare Ladung, Spannung und Zeit) kann das konventionelle Teilentladungsmesssystem viele Teilentladungsereignisse mit wenig Speicherbedarf aufzeichnen. Das Messsystem wird mit der systembedingt kleinsten Totzeit von 1,54 μs betrieben, da möglichst alle Teilentladungsereignisse aufgezeichnet werden sollen.

Zur Vermeidung von über Masseschleifen eingekoppelten Störungen, zur Ermöglichung der potentialfreien Teilentladungsmessung und zur Verhinderung gefährlicher Spannungsverschleppungen ist das Teilentladungsmesssystem batteriegespeist und kommuniziert über ein Glasfaserpaar mit dem zentralen Controller *MCU 502*. Da für mehrkanalige Teilentladungsmessungen und zur Teilentladungsartung mehrere *MPD 600* zusammengeschaltet werden können, besitzen diese zwei Glasfaserpaare: Eines verläuft in Richtung *MCU 502*, das andere zu eventuell weiteren *MPDs*. Dieses Ausgangspaar kann auch als optischer Triggerausgang genutzt werden. In diesem Versuchsaufbau triggert er über den optisch-elektrischen Wandler *TTA-525* der Firma *TTI* das digitale Speicheroszilloskop, welche die Teilentladungsströme aufzeichnet.

Zur normgerechten Kalibrierung stehen zwei Kalibratoren zur Verfügung: Einerseits ein Kalibrator *CAL2A* der Firma *Power Diagnostix Systems* mit einer Kalibrierladung zwischen 0,1 pC und 50 pC und andererseits ein Kalibrator *CAL 542* von *Omicron* mit Ladungen zwischen 100 pC und 10 nC. Mittels für die jeweiligen Kabel geeigneter T-Stücke wird der Kalibrierimpuls an Hochspannungs- und Erdelektrode eingespeist. Bis auf die T-Stücke, welche für die Messung entfernt werden, ist der Messkreis bei Kalibrierung und Messung somit identisch.

4.2.4 Teilentladungsstrommessung

Der teilentladungsinduzierte Strom wird mit einem digitalen Speicheroszilloskop *DSOS254A* der Firma *Keysight Technologies* aufgezeichnet. Mit einer analogen Bandbreite

von 2,5 GHz zeichnet es pro Aufnahme bis zu 500 Millionen Messpunkte auf. Der Analog-Digital-Wandler hat eine Auflösung von 10 Bit [KEY-16]. Nach jeder Aufnahme erfolgt die Datenübertragung per Netzwerk auf den Messrechner. Dieser Prozess ist nicht echtzeitfähig und dauert typischerweise um 400 ms. Aufgrund der hierzu vergleichsweise niedrigen Pretrigger-Zeit kann mit einer Totzeit von ca. 400 ms kalkuliert werden.

Für die Messelektrode wird ein Wellenwiderstand von 50Ω angenommen. Direkt an der BNC-Buchse der Messelektrode wird ein T-Stück verbaut, sodass neben dem 50Ω -Widerstand auch ein Gasableiter als Grobschutz im Fehlerfall am Leitungsanfang zur Verfügung steht. Der Gasableiter hat eine Zündspannung von 150 V und eine Kapazität kleiner 1 pF. Ein 20 dB-Dämpfungsglied mit einer oberen Grenzfrequenz von 6 GHz der Firma *Telegärtner* sorgt für die Signalanpassung und dient als weiteres Schutzelement. Direkt vor dem Eingang des digitalen Speicheroszilloskops, dessen Eingänge hochohmig beschalten werden, befindet sich ein weiteres BNC-T-Stück. Hier wird ein Halbleiterableiter mit einer Durchbruchspannung von 5,0 V und einer Streukapazität ebenfalls kleiner 1 pF als Feinschutz eingebaut. Die analoge Gesamtbandbreite des Systems bestehend aus Oszilloskop und 20 dB-Dämpfungsglied berechnet sich zu 2,31 GHz. Das Oszilloskop wird vertikal auf 200 mV/Einheit eingestellt, sodass 1,6 V hohe Impulse ohne zu übersteuern dargestellt werden können. Bei einem wirksamen Widerstand von 50Ω entspricht dies einem Strom von 32 mA. Horizontal wird eine Einstellung von 200 ns/Einheit gewählt. Mit den 500 Millionen Messpunkten kann somit eine Messdauer von 2 μ s realisiert werden.

Zur Vermeidung von Störeinkopplungen über Masseschleifen wird das digitale Speicheroszilloskop sowie der per Netzwerkkabel daran angeschlossene Lichtwellenleiterkonverter über einen Trenntransformator betrieben. Die Messdaten werden faseroptisch übertragen und außerhalb des Gerätebereichs wieder elektrisch umgesetzt und vom Messrechner aufgezeichnet.

4.2.5 Datenfusion und Aufbereitung

Durch das konventionelle Teilentladungsmesssystem wird das digitale Speicheroszilloskop zur Teilentladungsstrommessung getriggert. Zusätzlich wird jedem aufgezeichneten Teilentladungsimpuls ein Zeitstempel gegeben. Somit können anschließend alle gespeicherten Teilentladungsimpulse zeitlich verortet werden. Es werden aufgrund des begrenzten Speicherplatzes pro Messung maximal 125 Teilentladungsereignisse registriert. Bedingung ist jedoch, dass sie mindestens 400 ms nach dem vorangegangenen Teilentladungsereignis aufgetreten sind, da dies die systembedingte Totzeit ist. Die lange Totzeit ist der nicht echtzeitfähigen Datenübertragung zwischen Oszilloskop und Computer geschuldet.

4.2.6 Prüfkörper

Zwischen den in Abbildung 24 dargestellten Elektroden befindet sich ein dreilagiger Prüfkörper in Sandwich-Anordnung. Die beiden äußeren, bei den Elektroden liegenden Schichten sind die untersuchten Folien mit Schichtdicken zwischen 100 μm und 420 μm . In der Mitte befindet sich je nach Experiment eine 1 mm bis 2,25 mm starke Platte mit einem Durchgangsloch mit einem Durchmesser von 10 mm beziehungsweise 20 mm.

Vor der Montage werden alle Oberflächen gründlich mit Isopropanol gereinigt. Auf die Elektroden wird jeweils ein Tropfen Silikonöl aufgetragen und verteilt. Das Öl dient aufgrund der Oberflächenspannung zur Fixierung der Folien und zur Verhinderung unerwünschter Teilentladungen durch Vermeidung von zusätzlichen Hohlräumen zwischen Elektrode und Folie. Dies ist insbesondere bei der Untersuchung dünner Folien im Bereich der Fehlstelle notwendig, da diese nicht hinreichend steif sind und im Bereich der Fehlstelle über die Gewindestangen und die äußeren Kunststoffplatten keine Anpresskraft aufgebracht werden kann. Zwischen den Folien und der mittleren Platte wird kein Silikonöl aufgebracht.

4.3 Ortsaufgelöste Teilentladungsmessung

Die ortsaufgelöste Teilentladungsmessung besteht aus drei verschiedenen Teilmessungen. Während der Gleichspannungsbelastung wird mittels eines konventionellen Teilentladungsmesssystems die scheinbare Ladung und mittels eines optischen Systems (UV-sensitive Digitalkamera) die eindimensionale Teilentladungsverteilung in der Fehlstelle des Prüflings ermittelt. Nach dem Abschalten der Spannung und dem Öffnen des Prüfkörpersandwichs kann jeweils seitenweise die zweidimensionale Verteilung der an der Grenzfläche Gas-Feststoff akkumulierten Ladung mittels eines elektrostatischen Voltmeters ermittelt werden. Durch Kombination dieser drei Messungen entsteht ein umfassendes Bild über die Teilentladungsaktivität im untersuchten Prüfkörper.

4.3.1 Gesamtbeschreibung und Durchführung

Die Bereitstellung der Spannung erfolgt mittels eines teilentladungsarmen, ölgefüllten 100 kV-Prüftransformators. Über zwei Dioden wird die Spannung halbwellengleichgerichtet und mittels einer Kondensatorbank mit 22 nF Kapazität gleichgerichtet. Hierdurch ergibt sich bei den Versuchen eine Restwelligkeit kleiner 1 %, sodass Rückwirkungen durch die Welligkeit der Prüfspannung wesentlich geringer sind, verglichen zur normgerechten Prüfspannung mit einer Restwelligkeit kleiner 3 % nach DIN EN 60060-1. Nach einem Schutzwiderstand mit 50 k Ω , welcher zur Strombegrenzung und in Kombination mit den parasitären Kapazitäten und Induktivitäten auch als Filterimpedanz zur

hochfrequenten Entkopplung von Prüfkörper und Einspeisung dient, folgen die beiden resistiven Teiler. Das Steuerpult sowie das konventionelle Teilentladungsmesssystem *MPD 600* der Firma *Omicron* besitzen jeweils einen eigenen resistiven Spannungsteiler. Der Koppelkondensator der Firma *Phenix Technologies* hat eine Kapazität von 1,043 nF. Über ein geschirmtes Hochspannungskabel wird parallel zum Koppelkondensator die Hochspannungselektrode des Prüfkörpers mit der Prüfspannung beaufschlagt. Niederspannungsseitig werden die Teilentladungsimpulse über die Messimpedanz *CPL 542* ausgekoppelt. Dessen Massebuchse wird als zentraler Massepunkt genutzt. Zur Vermeidung von Störungseinkopplungen über Masseschleifen werden alle Masseverbindungen sternförmig von diesem Punkt aus hergestellt. Weitere, redundante Masseverbindungen werden durch beispielsweise das Unterlegen von Isolierstoffplatten vermieden.

Der Prüfkörpersandwich ist auf einem x-y-Koordinatentisch montiert. Dies dient zum Verfahren des geöffneten Prüfkörpersandwichs nach der Spannungsbelastung zur Messung der an der Grenzfläche akkumulierten Ladung. Die hierfür benötigte elektrostatische Voltmetersonde *3455ET* der Firma *Trek Inc.* ist am Grundrahmen des Koordinatentischs isoliert befestigt. Während der Spannungsbelastung wird der Koordinatentisch so verfahren, dass der Prüfkörper den maximal möglichen Abstand zur Sonde des elektrostatischen Voltmeters einnimmt.

Eine UV-sensitive Kamera ist in der optischen Achse des Prüfkörpersandwichs installiert, sodass sie die durch die Teilentladungen emittierte UV-Strahlung reflexionsarm detektieren kann. Sie kommuniziert ebenso wie das konventionelle Teilentladungsmesssystem per Lichtwellenleiter mit dem Messrechner im Steuerbereich. Somit sind keine leitenden Verbindungen zwischen Hochspannungs- und Steuerbereich notwendig, was die Spannungsverschleppung verhindert und der Personensicherheit dient.

Abbildung 25 zeigt ein Prinzipschaltbild der Gesamtanordnung in der Konfiguration zur Teilentladungsmessung unter Spannungsbelastung.

Abbildung 26 ist eine Fotografie des Versuchsaufbaus vom Steuerstand aus gesehen, Abbildung 27 zeigt den Messaufbau in Gegenrichtung mit Blick zum Steuerbereich.

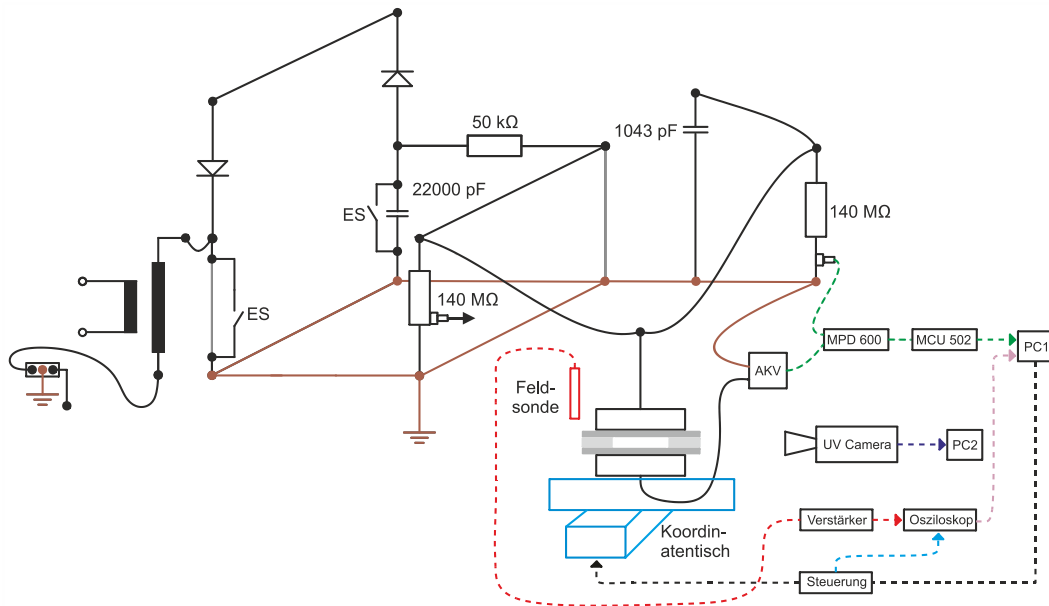


Abbildung 25 Prinzipschaltbild der gesamten Prüf- und Messanordnung zur orts aufgelösten Teilentladungsmessung

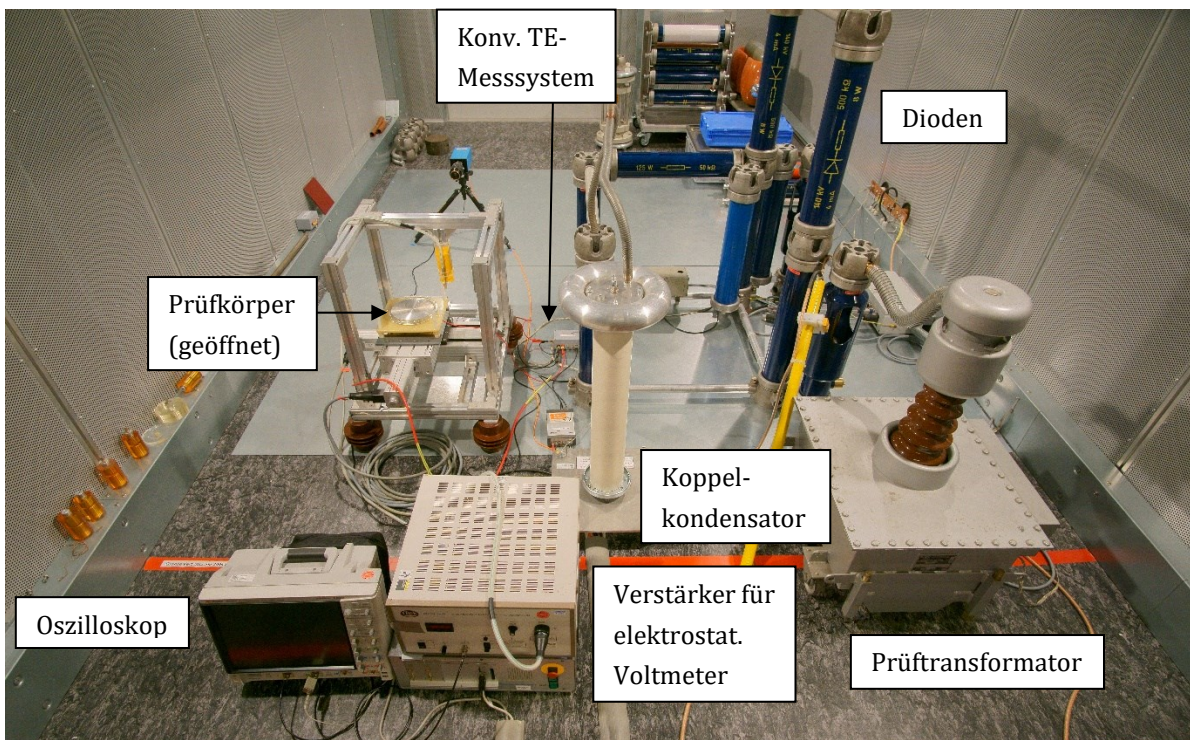


Abbildung 26 Foto des Versuchsaufbaus bei der orts aufgelösten Teilentladungsmessung vom Steuerbereich aus gesehen

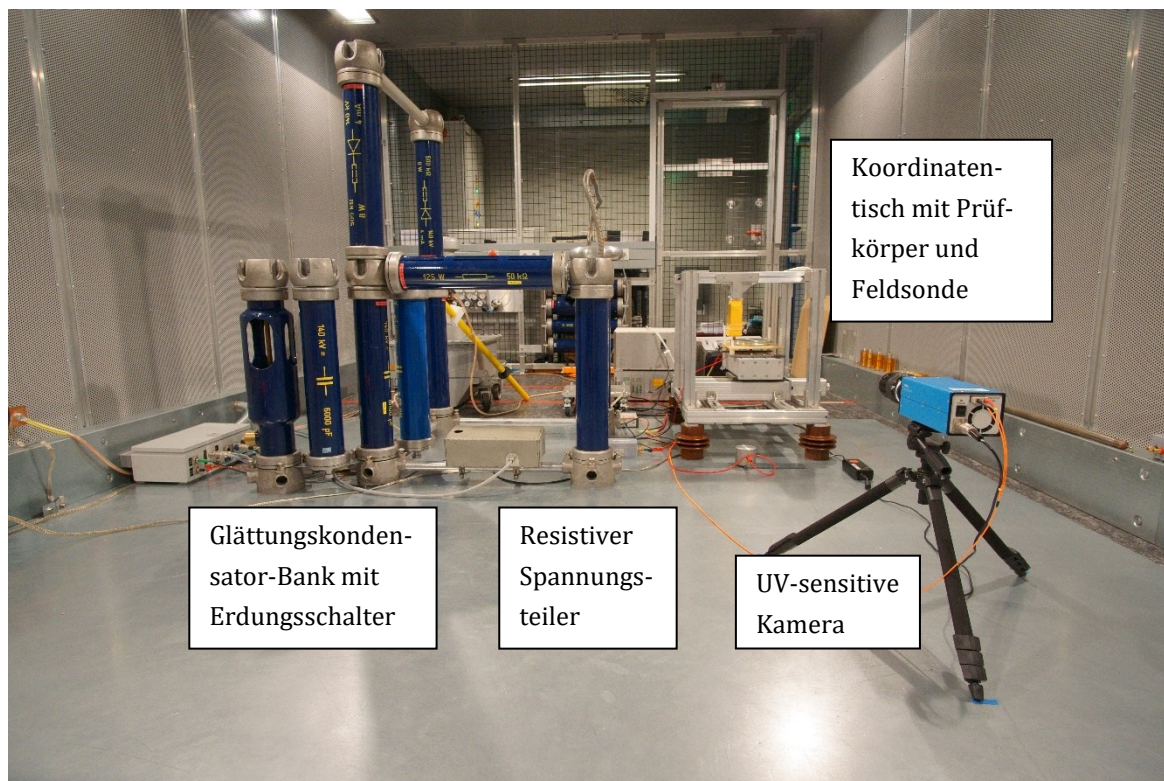


Abbildung 27 Foto des Versuchsaufbaus bei der orts aufgelösten Teilentladungsmessung zum Steuerbereich hin gesehen

4.3.2 Konventionelle Teilentladungsmessung

Die konventionelle Teilentladungsmessung wird in Serie zum Prüfkörper durchgeführt. Dies ermöglicht einerseits eine höhere Sensitivität der Teilentladungsmessung, andererseits kann mittels der Impulspolarität unterschieden werden, ob Teilentladungen im Strang des Prüfkörpers oder im übrigen Bereich des Versuchsaufbaus stattfinden. Deshalb wird die Aufzeichnungsbandbreite des konventionellen Teilentladungsmesssystems *MPD 600* möglichst breitbandig und niederfrequent gewählt. Mit einer Mittenfrequenz von 750 kHz und einer Bandbreite von 1,5 GHz wird dank der geschirmten Messumgebung ein Grundstörpegel unter 2 pC erzielt. Es ergibt sich durch die untere 3-dB-Eckfrequenz des Ankoppelvierpols *CPL 542* eine realisierbare Bandbreite der konventionellen Teilentladungsmessung von 20 kHz bis 1,5 GHz.

Die Kalibrierung erfolgt mittels der beiden Kalibrierimpulsgeneratoren *CAL2A* der Firma *Power Diagnostix Systems* mit einer Kalibrierladung zwischen 0,1 pC und 50 pC sowie dem Kalibrierimpulsgenerator *CAL 542* von *Omicron* mit Ladungen zwischen 100 pC und 10 nC. Diese werden möglichst nahe an der Fehlstelle platziert. Hochspannungsseitig kann die Elektrode direkt kontaktiert werden. Niederspannungsseitig findet sich

zwischen Elektrodenhalterung und dem Koordinatentisch bauraumbedingt keine Anschlussmöglichkeit für das Anschlusskabel des Kalibrators. Daher wird dieser am messimpedanzseitigen Ende der Messleitung angeschlossen.

Wie bei den vorangegangenen Versuchen wird das konventionelle Teilentladungsmesssystem zur potentialfreien Messung batteriegespeist und die Kommunikation mit dem Messrechner erfolgt über eine faseroptische Schnittstelle. Hierdurch wird die Störeinkopplung durch Vermeidung von Masseschleifen verhindert. Durch den faseroptischen Kommunikationspfad kann kein Potential vom Hochspannungs- in den Bedienbereich verschleppt werden.

4.3.3 Optische Teilentladungsmessung

Die optische Teilentladungsmessung findet simultan zur konventionellen Teilentladungsmessung während der Gleichspannungsbeanspruchung des Prüfkörpers statt. Hierzu wird eine UV-empfindliche Kamera *sensicam-UV 680UL* des Herstellers *PCO Computer Optics* verwendet. Diese Kamera hat eine spektrale Empfindlichkeit von 190 nm bis 1100 nm, sodass für die optischen Teilentladungsmessungen das Labor abgedunkelt werden muss. Der 8,03 mm auf 8,03 mm große CCD-Sensor hat 1002 auf 1004 Pixel bei einem Dynamikumfang von 12 Bit und wird mittels eines Peltier-Elements auf $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ gekühlt. Hierdurch wird das thermische Rauschen vermindert und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis somit verbessert. Die Quanteneffizienz beträgt im UV-Bereich bei 193 nm circa 10 %, die Belichtungszeit kann zwischen 75 μs und einer Stunde frei gewählt werden. Zur Verringerung der während der Auslesezeit des CCD-Sensors auftretenden Totzeit kann der auszulesende Bereich der UV-sensitiven Kamera ausgewählt werden [PCO-08]. Gleichzeitig sinkt hierdurch die Datenmenge, da nur die versuchsrelevanten Messdaten der Fehlstelle ausgelesen und gespeichert werden. Zur Ermittlung der Totzeit wurde die Gesamtmessdauer über 100 Messungen mit dem ausgewählten Bereich (1002*64 Pixel) und einer jeweiligen Belichtungsdauer von 100 ms ermittelt. Hierbei ergibt sich eine Totzeit von 45 ms, also 31 % der Gesamtzeit.

Die UV-sensitive Kamera kommuniziert mit einer speziellen, im Messrechner eingebauten Karte mittels einer faseroptischen Duplexverbindung. Die Energieversorgung erfolgt über das Niederspannungsnetz mittels eines Schaltnetzteils. Die Kamera ist isoliert gegenüber dem restlichen Versuchsaufbau installiert, sodass sich hierdurch keine Störeinkopplungen ergeben.

Am *C-Mount*-Flansch der UV-sensitiven Kamera wird mittels Adapter das *UV-Nikkor*, ein UV-durchlässiges Objektiv mit sechs Linsen in sechs Gruppen der Firma *Nikon* angeflanscht. Das Objektiv hat eine Brennweite von 105 mm und wird im Versuch mit maximal

geöffneter Blende $f/4,5$ genutzt. Die Durchlässigkeit beträgt ab 200 nm 60 %, ab 220 nm 70 % und bleibt dann bis 860 nm um 75 % [NIK-89].

Mittels eines Stativs ist die optische Achse der Kamera auf die Mitte der Fehlstelle ausgerichtet. Damit die 80 mm breite Fehlstelle sensorfüllend dargestellt wird, wird ein Abstand von 155 cm zwischen Sensor und Mitte der Fehlstelle eingestellt. Mit dem System bestehend aus Kamera, Adapter und Objektiv wird bei einer Blendenzahl von $f/4,5$ bei einem Abstand von 155 cm zwischen Gegenstands- und Bildebene ein Schärfentiefebereich von 2,5 cm ermittelt. Damit die gesamte Fehlstelle scharf abgebildet werden kann, wird die Fehlstellentiefe zu 20 mm gewählt. Zur Vermeidung unerwünschter Reflexionen werden die beiden Seitenwände und die Rückwand der Fehlstelle geschwärzt. Die Fehlstelle befindet sich als Aussparung in einer 2 mm starken *Acryl XT-klar*-Platte. Der Typ *XT 0A070* ist UV-durchlässig [PLE-13]. Die Dicke von 2 mm wurde gewählt, da sie zur Vermeidung von Totalreflexionen an der ober- und unterseitigen Prüfkörpergrenzfläche notwendig ist.

4.3.4 Messung der akkumulierten Ladung nach dem Öffnen der Fehlstelle

Nach dem Abschalten der Prüfspannung wird der Aufbau möglichst schnell geerdet, das Hochspannungskabel und die Hochspannungselektrode samt der sich an ihr befindlichen Folie des Prüfkörpersandwichs und die mittlere *Acryl XT-klar*-Platte entfernt. Auf dem Koordinatentisch befindet sich dann nur noch die an der Messimpedanz des konventionellen Teilentladungsmesssystems angeschlossene Erdelektrode samt der sich auf ihr befindlichen Folie des Prüfkörpersandwichs.

Nun wird die verbleibende Folie samt Erdelektrode mittels des Koordinatentisches unter die Sonde *3455ET* der Firma *Trek Inc.* verbracht. Das elektrostatische Voltmeter besteht neben der Sonde noch aus dem Messwandler *341B* desselben Herstellers. Dieser setzt das Messsignal um den Faktor 1.000 herab. Der Messbereich des Systems beträgt ± 20 kV bei einer maximalen Messabweichung von ± 20 V. Die Bandbreite reicht von Gleichspannung bis 25 Hz [TRE-07]. Der Abstand zwischen Sonde und Folienoberseite wird auf 10 mm eingestellt.

Der Koordinatentisch ist in Kreuzkonfiguration aufgebaut und besteht aus zwei Linearantrieben mit Schrittmotoren. Diese stammen ebenso wie der Controller *C142-4.1* von der Firma *isel automation*. Der Fahrweg der Achsen beträgt jeweils 420 mm, die Schrittweite 2 μ m. Mittels der proprietären Software *PAL-PC* kann der Koordinatentisch über den Messrechner ferngesteuert und automatisiert werden. Zur Untersuchung der Randeffekte und zum Erhalt von Reserve bei mechanischer Ungenauigkeit wird ein 100 mm auf 32 mm großer Bereich des Prüfkörpers mit einer Schrittweite von 2 mm

abgetastet. Die Fahrtdauer von Punkt zu Punkt dauert 100 ms, die Messdauer circa 900 ms, somit benötigt die gesamte Messung ungefähr 750 s.

Mittels des digitalen Speicheroszilloskops *DSOS254A* der Firma *Keysight Technologies* werden einerseits die Messwerte des elektrostatischen Voltmeters und andererseits die Synchronisierungsimpulse des Schrittmotorcontrollers aufgezeichnet. Hierdurch kann anschließend jedem Messwert der Ort und der Messzeitpunkt zugeordnet werden. Nach Ende der Messung werden die Daten exportiert.

4.3.5 Datenaufbereitung und Datenfusion

Die Aufbereitung der Daten nimmt in diesem Experiment einen großen Raum ein. Zuerst werden die Daten der Messung unter Gleichspannungsbelastung, also die mittels UV-sensitiver Kamera und konventionellem Teilentladungsmesssystem generierten Ergebnisse verarbeitet. Anschließend werden die Messdaten, welche mittels des elektrostatischen Voltmeters gewonnen werden, aufbereitet. Final werden diese beiden Teilergebnisse zusammengeführt. Hierbei dienen die Zeitpunkte der Teilentladungsaktivität als Synchronisationsgeber, da sie sowohl bei der optischen Messung (hierbei nur diskret) als auch bei der konventionellen Teilentladungsmessung (hierbei quasikontinuierlich) bekannt sind.

Optische und konventionelle Teilentladungsmessung

Die UV-sensitive Kamera nimmt Serien von bis zu 2400 Bildern mit 1024 x 64 Pixeln⁵ auf. Die Aufnahmen erfolgen mit der kleinstmöglichen Totzeit, sodass während einer Zeitspanne von 348 Sekunden die Teilentladungsaktivität im Prüfkörper möglichst lückenlos aufgezeichnet wird. Für die Detektion der streamerartigen Teilentladungen werden mittels der konventionellen Teilentladungsmessung, welche ereignisbasiert aufzeichnet, diejenigen Bilder ausgewählt, während deren Belichtungszeit im Prüfkörper Teilentladungen auftraten. Abbildung 28 zeigt beispielhaft die Auswahl von sechs mittels der UV-sensitiven Kamera aufgezeichneten Bilder. Bild 1 wird ausgewählt und in Abbildung 28 grün markiert, weil währenddessen mit dem konventionellen Teilentladungsmesssystem eine Teilentladung mit einer scheinbaren Ladung größer dem festgelegten Grenzwert aufgetreten ist (Markierung „A“). Während der Belichtung von Bild 2 zeichnete das konventionelle Teilentladungsmesssystem keine Ereignisse mit einer scheinbaren Ladung größer dem festgelegten Grenzwert auf, weshalb das Bild 2 verworfen wird und

⁵ Aufgrund unterschiedlicher Seitenverhältnisse des Sensors und der Signalverarbeitung sind die gespeicherten Bilder 22 Pixel breiter als die Sensorauflösung. Daher sind die linken 22 Pixel bei der Auswertung zu verwerfen.

daher in Abbildung 28 rot markiert ist. Während der Aufzeichnung von Bild 3 zeichnete das konventionelle Messsystem die beiden in Abbildung 28 mit „B“ gekennzeichneten Teilentladungsereignisse auf. Daher wird Bild 3 auch ausgewählt und grün markiert. Die Bilder 4 und 5 werden verworfen und daher in Abbildung 28 ebenfalls rot markiert, da das mit „C“ gekennzeichnete Teilentladungsereignis während der Totzeit der UV-sensitiven Kamera aufgetreten ist. Bild 6 in Abbildung 28 ist orange markiert, da seine Auswahl von der Wahl des Grenzwertes der mit dem konventionellen Teilentladungsmesssystem ermittelten scheinbaren Ladung abhängt.

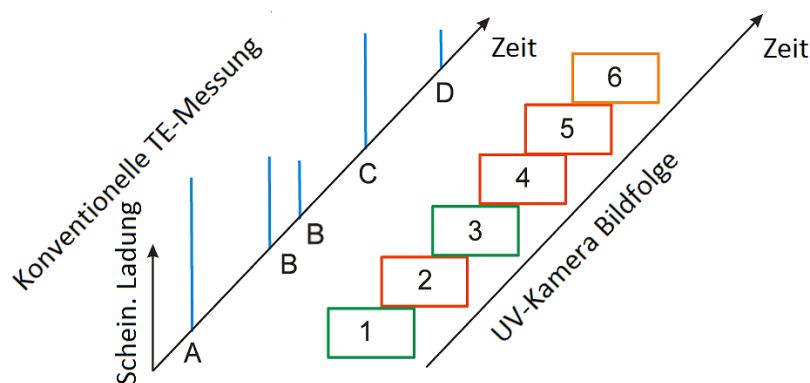


Abbildung 28 Auswahl der mittels der UV-sensitiven Kamera aufgenommenen Bilder

Aufgrund des schwachen Signals im Verhältnis zum Sensorrauschen ist das Erkennen von Teilentladungen erst nach der Reduktion des Rauschens möglich. Hierzu wird jedes 1024 x 64 Pixel große Bild horizontal in je 32 Blöcke mit einer Breite von jeweils 32 Pixeln und einer Höhe von 64 Pixeln aufgeteilt. Jeder Block bildet somit jeweils einen 2,5 mm breiten Streifen der Fehlstelle ab. Abbildung 29 zeigt diese Aufteilung. Dabei wird erkennbar, dass es in dem Beispielbild mehrere helle Bereiche gibt. Dies deutet auf mehrere Teilentladungsereignisse hin.

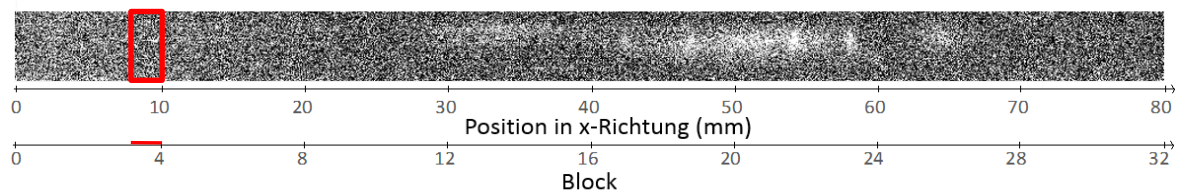


Abbildung 29 Aufteilung der ausgewählten Bilder in 32 Blöcke, Block vier zur Verdeutlichung rot markiert

Anschließend wird für jeden Block ein Mittelwert der Helligkeit gebildet. Mittels einer Messung ohne Spannung können permanente Störer wie Reflexionen von nicht vollständig abgedunkelten Signalleuchten eliminiert werden. Abhängig von der mittels der

konventionellen Teilentladungsmessung ermittelten Anzahl der Teilentladungsereignisse während der Belichtungszeit wird die Anzahl der hellsten Blöcke ausgewählt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Helligkeit des Blocks proportional zur scheinbaren Ladung ist. Nun steht für jedes Teilentladungsereignis, welches während der Belichtungszeit der UV-sensitiven Kamera auftritt und eine hinreichend große Energie im UV-Spektrum emittiert, die Position entlang der x-Richtung der Fehlstelle, die scheinbare Ladung und als verknüpfender Parameter der Zeitpunkt des Auftretens zur Verfügung. Somit können, wie in Abbildung 30 gezeigt, die einzelnen mittels der UV-sensitiven Kamera aufgezeichneten Bilder zeitlich korrekt angeordnet werden und schließlich die einzelnen streamerartigen Teilentladungsereignisse zeitlich und eindimensional räumlich rekonstruiert werden.

Zuerst werden alle Kameraaufnahmen markiert, während deren Aufnahmezeit das konventionelle Messsystem Teilentladungen aufzeichnet.

Durch die Arbeit von Devins ist bekannt, dass sich townsendartige Teilentladungen nur teilweise mittels konventioneller Teilentladungsmesstechnik aufzeichnen lassen [DEV-84b]. Daher müssen die bisher unmarkierten Kameraaufnahmen in einem zweiten Schritt nach townsendartigen Entladungen mit ihrer markant großen räumlichen Ausdehnung durchsucht werden. Bei den Teilentladungen, welche nicht vom konventionellen Teilentladungsmesssystem erfasst werden, fehlt der genaue Auftrittszeitpunkt sowie die scheinbare Ladung.

Abschließend können alle unmarkierten Bilder verworfen werden. Aufgrund des Löschens von Kameraaufnahmen, die keine Teilentladungen aufweisen, und der Blockbildung in den ausgewählten Bildern, ist die Datenmenge nach der Auswertung um Größenordnungen geringer als die Menge an Eingangsdaten.

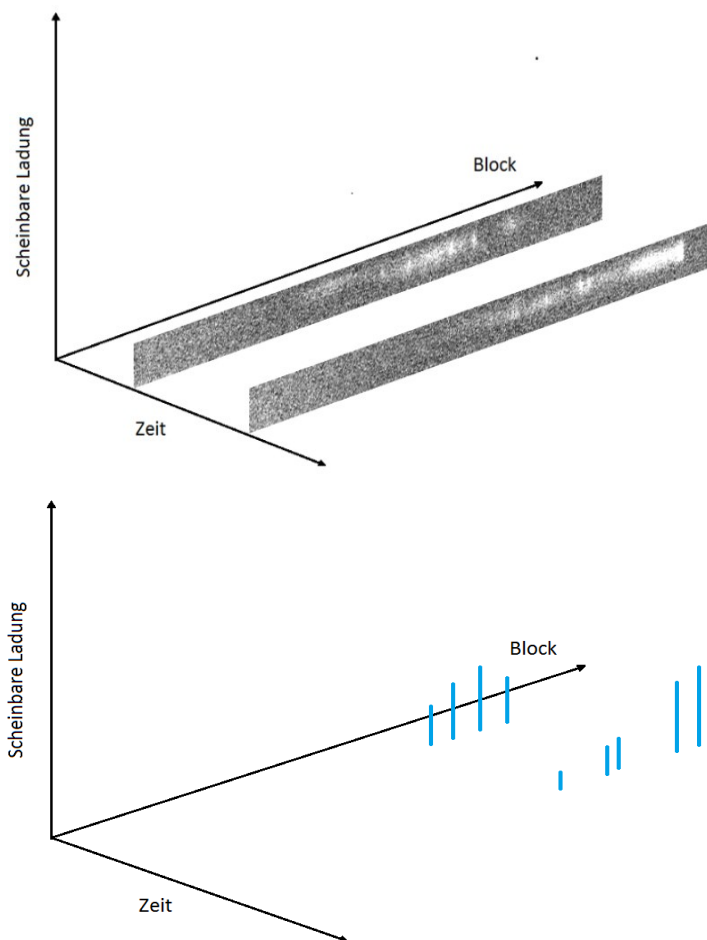


Abbildung 30 Oben: Zeitliche Anordnung der Kameraaufnahmen
Unten: Extraktion und Anordnung der einzelnen streamerartigen Teilentladungsereignisse

Messung des Oberflächenpotentials und Ermittlung der Ladung

Das digitale Speicheroszilloskop zeichnet sowohl die Messergebnisse des elektrostatischen Voltmeters als auch das Synchronisationssignal des Schrittmotorcontrollers auf. Somit kann nach dem Ende der Messung jedem Messwert eine Position und ein Messzeitpunkt zugeordnet werden, unabhängig von eventuellem zeitlichen Jitter der nicht echtzeitfähigen Schrittmotorsteuerung. Mittels einer Messserie, bestehend aus 16 einzelnen Messungen⁶, wurde eine Näherungsfunktion für den Ladungsträgerabbau ermittelt. Damit kann der während der Messung auftretende Abbau der akkumulierten Oberflächenladung, welcher zu einer Verzerrung der Messdaten führt, bestimmt werden.

⁶ Fünfzehn Messungen wurden jeweils im Viertelstundentakt gestartet, die letzte Messung 24 Stunden nach Abschalten der Klemmenspannung

Mit der Software *MatLab* wird das zweidimensionale Oberflächenpotential $\varphi(x, y)$ dreidimensional dargestellt und die orts aufgelöste Oberflächenladungsdichte $\sigma(x, y)$ berechnet. Hierzu wird die folgende Gl. 82 verwendet [HOA-14]:

$$\sigma(x, y) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d} * \varphi(x, y) \quad (\text{Gl. 82})$$

mit der Dicke d der Isolierstoffschicht.

Zusammenführung der Messergebnisse

Durch die während der Spannungsbelastung durchgeführten elektrischen und optischen Messungen stehen Messdaten zur scheinbaren Ladung, dem Zeitpunkt der Teilentladungsaktivität und des eindimensionalen Ortes quer zur Beobachtungsrichtung zur Verfügung. Durch die Messung des Oberflächenpotentials nach Abschalten und Öffnen des Prüfkörpers kann eine zweidimensionale Verteilung der an der Grenzfläche akkumulierten Ladung ermittelt werden. In Kombination ergibt sich somit ein detailliertes Bild der Teilentladungsaktivität in der Fehlstelle des dreilagigen Prüfkörpersandwichs.

4.3.6 Prüfkörper

Der fehlstellenbehaftete Mittelteil des Prüfkörpers besteht aus einer 2 mm starken Platte aus *Acryl XT-klar*. Die rechteckige Fehlstelle hat Kantenlängen von 80 mm auf 20 mm. Zu den Elektroden hin werden dünne Folien aus PA6 mit Schichtdicken von 20 μm und 25 μm verwendet.

5 Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die bei der Teilentladungsmessung bei langsamer Änderung der Prüfspannung gewonnenen Ergebnisse, der Verlauf des Teilentladungsimpulstromes sowie die Ergebnisse der orts aufgelösten kombinierten Teilentladungsmessung vorgestellt und interpretiert.

5.1 Langsame Änderung der Prüfspannung

Für das Auftreten einer Teilentladung sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen: Erstens muss das elektrische Feld lokal hinreichend groß sein und zweitens muss ein lawinenwirksames Anfangselektron an diesem Ort zur Verfügung stehen. Bei der allerersten Teilentladung ist der zweite Punkt unabhängig davon, ob es sich um Wechsel- oder Gleichspannung handelt. Bei nachfolgenden Entladungen spielt es jedoch eine Rolle, ob möglicherweise Elektronen aus vorangegangenen Teilentladungsereignissen als neue lawinenwirksame Anfangselektronen dienen können (im Falle eines Polaritätswechsels) oder nicht.

Das elektrische Feld im gesamten Prüfkörper und somit auch in der Fehlstelle ändert sich bei den in diesem Kapitel vorgestellten Versuchen unter Impulsspannungsbelastung in der steigenden Flanke sehr schnell, in der fallenden Flanke jedoch sehr langsam. Der Fokus bei diesen Messungen soll auf die langsame Änderung der Prüfspannung während des Abklingens des Spannungsimpulses gelegt werden.

5.1.1 Nadel-Platte-Anordnung

Bei einer Nadel-Platte-Anordnung handelt es sich um eine äußere Teilentladung, da die Entladungsstrecke durch das stark inhomogen verlaufende elektrische Feld begrenzt ist. Insbesondere bei negativer Polarität der Impulsspannung an der Nadel kann davon ausgegangen werden, dass die Nadel mit einem Spitzenradius von $5\ \mu\text{m}$ Elektronen emittiert, sodass am idealen Ort hinreichend lawinenwirksame Anfangselektronen zur Verfügung stehen und somit bei einem Überschreiten der Teilentladungseinsetzspannung Teilentladungen auftreten. Diese beträgt bei einer Schlagweite von $5\ \text{mm}$ bei negativer Polarität der Impulsspannung an der Nadelelektrode $2,7\ \text{kV}$ bei den gegebenen, näherungsweise bei allen Versuchen konstanten Umgebungsbedingungen. Unterschreitet das elektrische Feld während des Abklingens der Impulsspannung die Zündfeldstärke, so

setzt die Teilentladungsaktivität der Nadel-Platte-Anordnung ohne zusätzliche dielektrische Barriere dauerhaft aus. Mit dieser Anordnung kann die Teilentladungsaussetzspannung zu 2,6 kV bestimmt werden.

5.1.2 Nadel-Platte-Anordnung mit Isolierstoffbarriere

Wird nun auf die geerdete Platte der Nadel-Platte-Anordnung eine Isolierstoffplatte aufgelegt, so dient diese als Barriere an der sich die bei der Teilentladungsaktivität erzeugten Ladungsträger ansammeln.

Während des Anstiegs der Impulsspannung mit positiver Polarität werden mit dem konventionellen Teilentladungsmesssystem wenige Teilentladungen mit überwiegend negativer Impulspolarität aufgezeichnet. Aufgrund der im Vergleich zur Anstiegszeit langen Totzeit des konventionellen Teilentladungsmesssystems wird nur ein geringer Teil der tatsächlich auftretenden Teilentladungen damit erfasst. Wie Abbildung 20 zeigt, befindet sich die Messimpedanz des konventionellen Teilentladungsmesssystems in Serie zum Prüfkörper. Aus Vorversuchen ist bekannt, dass das konventionelle Teilentladungsmesssystem Teilentladungsimpulse, bei denen Elektronen in die Messimpedanz fließen, als Impulse mit positiver Polarität aufzeichnet. Beim Erreichen des Scheitels der Impulsspannung setzt die Teilentladung aus. Nach ungefähr 200 Sekunden ist die Impulsspannung auf unter 3,8 kV gesunken. Bei diesem Wert, welcher weniger als die Hälfte des Scheitelwertes beträgt, setzt die Teilentladung wieder ein. Es treten sehr regelmäßig Teilentladungsimpulse auf. Diese weisen eine scheinbare Ladung von entweder circa 50 pC oder circa 35 pC auf und haben eine positive Polarität. Die Teilentladungsaktivität findet auch bei sehr niedrigen Klemmenspannungen, bei denen die durch die Klemmenspannung verursachte elektrische Feldstärke kleiner als die Zündfeldstärke der Anordnung ist, noch statt. Je niedriger die Klemmenspannung, desto dominanter sind die Teilentladungen mit kleiner scheinbarer Ladung. Abbildung 31 zeigt die Messergebnisse bei einer Scheitelspannung von 9,2 kV und einer relativen Feuchte der Luft von 15 %.

Während der Teilentladungsaktivität in der steigenden Impulsflanke lagert sich auf der Oberfläche der Isolierstoffbarriere Ladung an. Das hierdurch erzeugte Raumladungsfeld ist dem durch die Klemmenspannung bedingten elektrischen Feld im Gasraum entgegen gerichtet. Hierdurch wird das resultierende elektrische Feld kleiner als die Zündfeldstärke für diese Anordnung, sodass zu Beginn des Abklingens der Impulsspannung keine Teilentladungen auftreten können. Erst nach Unterschreitung eines gewissen Wertes der Impulsspannung ist das resultierende elektrische Feld umgepolt und wieder hinreichend groß, sodass „Rückentladungen“ stattfinden. Daher haben die nun auftretenden Teilentladungsimpulse im Gegensatz zu den vorangegangenen Impulsen eine positive Polarität. Des Weiteren können sie auch noch auftreten, wenn das durch die Klemmenspannung

resultierende elektrische Feld kleiner als die Zündfeldstärke ist, da für die Teilentladungen das resultierende elektrische Feld, also die Superposition aus externem elektrischen Feld und Raumladungsfeld entscheidend ist.

Bei Teilentladungsmessungen dieser Anordnung unter Wechselspannungsbelastung wurde eine Teilentladungseinsetzspannung von 2,0 kV (Effektivwert) und eine Teilentladungsaussetzspannung von 1,8 kV (Effektivwert) ermittelt. Dies entspricht Scheitelwerten von 2,6 kV beziehungsweise 2,8 kV. Die Summe aus diesen beiden Scheitelwerten beträgt 5,4 kV und entspricht ungefähr der Differenz aus Teilentladungsaussetz- und Teilentladungswiedereinsetzspannung bei der Impulsspannungsbelastung. Da die Experimente bei vergleichsweise geringer relativer Feuchte der Luft durchgeführt wurden, ist davon auszugehen, dass während der Inaktivität der Teilentladungen nur eine sehr geringe Menge der akkumulierten Oberflächenladung abgeflossen ist. Daher kann das hierdurch entstehende Raumladungsfeld als näherungsweise konstant angenommen werden. Die Änderung des durch die Impulsspannung eingprägten externen elektrischen Feldes verursacht den Wiedereinsatz von Teilentladungen in Form von Rückentladungen. Diese weisen im Vergleich zu den Teilentladungen in der ansteigenden Impulsflanke eine umgekehrte Polarität der scheinbaren Ladung auf.

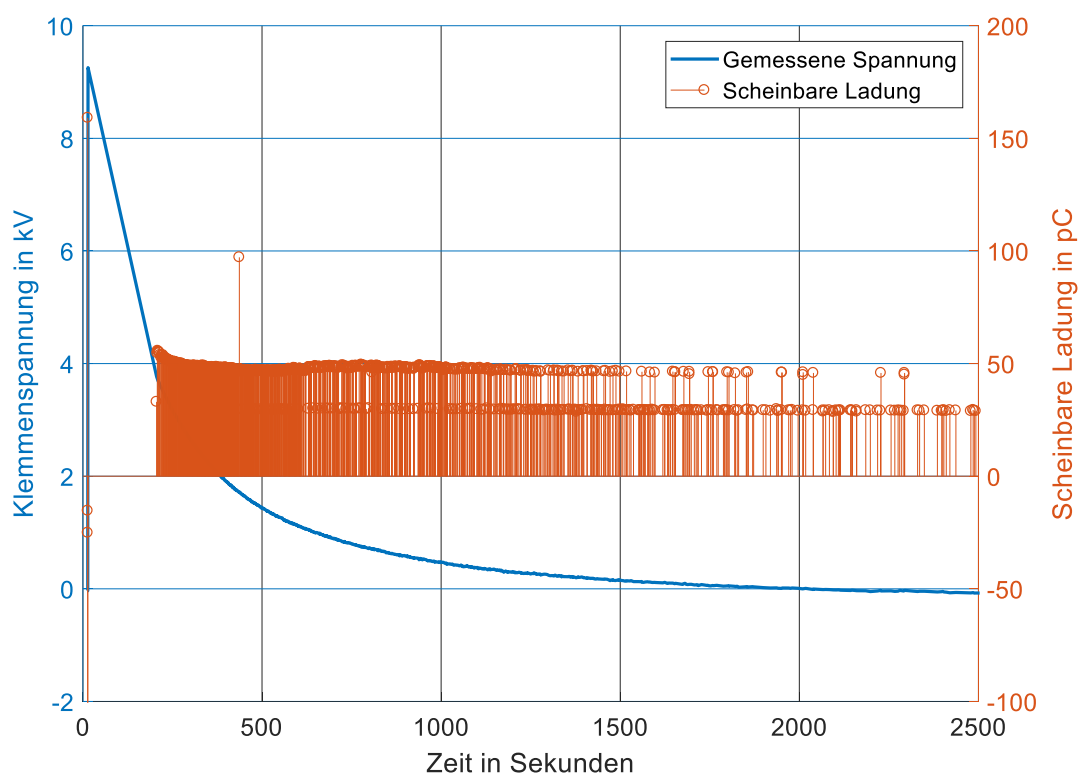


Abbildung 31 Teilentladungsaktivität bei langsam abklingender positiver Impuls-
spannung an einer Nadel-Platte-Anordnung mit einer zusätzlichen
Isolierstoffplatte aus Epoxidharzformstoff direkt auf der erdseitigen
Plattenelektrode bei 15 % relativer Feuchte der Luft

Wird nun diese scheinbare Ladung jeweils über 50 Sekunden akkumuliert und gemein-
sam mit der Änderung der Klemmenspannung in einem Diagramm aufgezeichnet, wird
deutlich, dass die durch die Teilentladungsaktivität umgesetzte Ladung⁷ proportional zur
Änderung der Klemmenspannung ist. Dies zeigt den Einfluss des elektrischen Feldes auf
die Teilentladungsaktivität. Abbildung 32 zeigt diese Tatsache ab Teilentladungswieder-
einsatz.

⁷ Unter der Annahme, dass die scheinbare Ladung in einer gegebenen, geometrisch unveränderlichen Anordnung
proportional zur durch die Teilentladung umgesetzten Ladung ist.

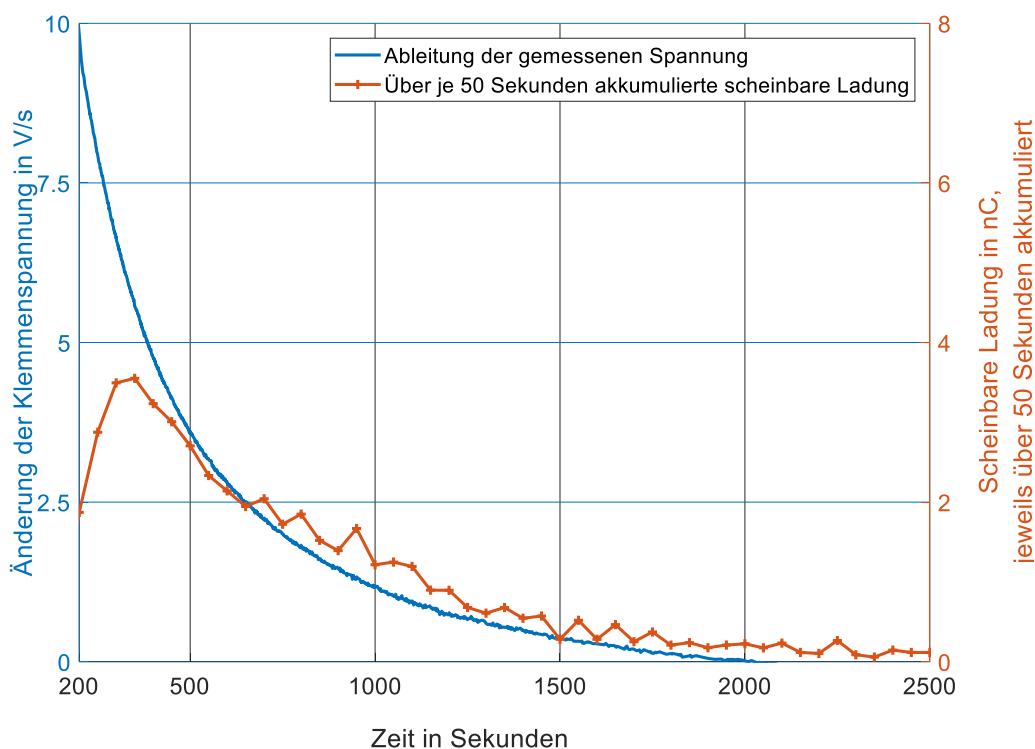


Abbildung 32 Ableitung der Klemmenspannung und jeweils über 50 Sekunden kumulierte scheinbare Ladung bei langsam abklingender positiver Impulsspannung an einer Nadel-Platte-Anordnung mit einer zusätzlichen Isolierstoffplatte aus Epoxidharzformstoff direkt auf der erdseitigen Plattenelektrode bei 15 % relativer Feuchte der Luft ab dem Zeitpunkt des Wiedereinsatzes der Teilentladungsaktivität. Beginn der Impulsspannung bei $t = 0$ Sekunden

Wird nun die Polarität der Impulsspannung gewechselt und der Betrag des Scheitelwertes erhöht, so werden während der steilen Flanke zu Impulsbeginn wesentlich mehr Teilentladungen vom konventionellen Teilentladungsmesssystem aufgezeichnet. Diese haben überwiegend eine positive scheinbare Ladung bis 200 pC. Nach einer etwas kürzeren Pausenzeit treten Rückentladungen auf. Diese haben bis auf sehr wenige Ausnahmen, welche vom Autor als Messfehler aufgrund der begrenzten Bandbreite des konventionellen Teilentladungsmesssystems gedeutet werden, eine negative scheinbare Ladung. Sie haben, mit Ausnahme der Entladungen direkt nach dem Wiedereinsatz, scheinbare Ladungen von circa 80 pC, ihre Auftretshäufigkeit nimmt mit dem Abklingen der Impulsspannung ab. Aufgrund des näherungsweise exponentiellen Abklingens der Impulsspannung nimmt auch deren Änderung exponentiell ab, sodass hier auch die in Abbildung 32 gezeigte Abhängigkeit zwischen Spannungsänderung und akkumulierter scheinbarer Ladung zu bestehen scheint. Analog zum Verhalten bei positiver Polarität des Impulses treten auch bei negativer Polarität des Impulses Teilentladungen bei sehr

kleinen Klemmenspannungen auf, sodass auch hier eine Überlagerung des externen elektrischen Feldes durch ein Raumladungsfeld stattfinden muss. Abbildung 33 zeigt die gemessenen Ergebnisse bei einer relativen Feuchte der Luft von 15 %.

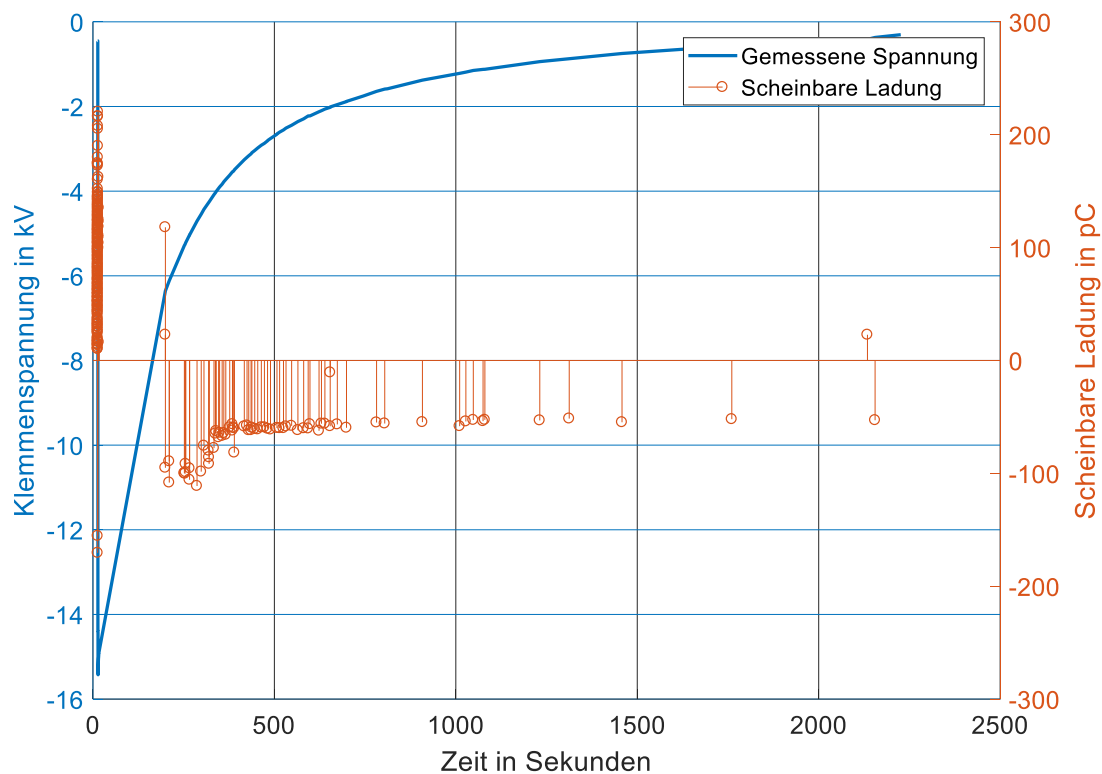


Abbildung 33 Teilentladungsaktivität bei langsam abklingender negativer Impulsspannung an einer Nadel-Platte-Anordnung mit einer zusätzlichen Isolierstoffplatte aus Epoxidharzformstoff direkt auf der erdseitigen Plattenelektrode bei 15 % relativer Feuchte der Luft

Beim Vergleich der Messergebnisse der beiden Polaritäten (Abbildung 31 und Abbildung 33) fällt auf, dass bei negativer Impulspolarität zu Beginn mehr Teilentladungsereignisse mit insgesamt größerer scheinbarer Ladung aufgezeichnet werden. Dies leuchtet ein, da hier die Nadel als Kathode lawinenwirksame Anfangselektronen bereitstellen kann und somit kein Zündverzug auftritt. Die höhere Spannung und somit größere umgesetzte Ladung wurde gewählt, damit auch im Impulsrücken ein Teilentladungs-wiedereinsatz stattfindet ohne Bereitstellung der Anfangselektronen durch die Nadel-elektrode.

Umgekehrt stellt sich die Situation in der abklingenden Impulsflanke dar. Im Falle der positiven Impulspolarität ist aufgrund der Inversion des Gesamtfeldes durch die Superposition die Nadelelektrode kathodisch und wirkt als Quelle für lawinenwirksame Anfangselektronen. Dadurch treten, wie in Abbildung 31 zu sehen ist, die Rückentladungen

sehr regelmäßig und häufig auf. Ist hingegen bei negativer Impulspolarität die Nadelelektrode während der fallenden Impulsflanke aufgrund der Superposition der elektrischen Felder anodisch, so müssen die lawinenwirksamen Anfangselektronen im Gasraum zur Verfügung gestellt werden. Die hierfür notwendigen Ionisationsprozesse sind stochastischer Natur, daher treten wesentlich weniger Teilentladungen auf. Des Weiteren finden sie unregelmäßig statt.

Dieses Verhalten bezüglich Anzahl und Regelmäßigkeit des Auftritts ist auch bei Nadel-Platte-Anordnungen ohne Isolierstoffbarriere bekannt und wird in der Literatur als Burst- und Trichelentladung bezeichnet [TRI-38], [TRI-39].

Die scheinbare Ladung beträgt bei den Rückentladungen während des abklingenden positiven Klemmenspannungsimpulses wie in Abbildung 31 gezeigt, entweder circa 35 pC oder 50 pC. Während des Abklingens des Klemmenspannungsimpulses mit negativer Polarität beträgt die scheinbare Ladung um 80 pC. Da die Anzahl der Teilentladungsereignisse hierbei jedoch um mindestens eine Größenordnung geringer ist, ist die gesamte umgesetzte scheinbare Ladung in der abklingenden Flanke des Klemmenspannungsimpulses bei negativer Impulspolarität jedoch signifikant geringer.

5.1.3 Stab-Platte-Anordnung

Nun soll der Geometrieinfluss der stärker gekrümmten Elektrode untersucht werden. Hierzu wird die Nadel mit einem Spitzenradius von 5 μm durch einen frisch geschnittenen, möglichst scharfkantigen Messingstab mit 15 mm Durchmesser ersetzt. Das elektrisch hoch belastete Volumen wird durch den Austausch der Elektroden vergrößert. Der Scheitelwert der Teilentladungseinsetzspannung liegt bei circa 13,5 kV.

Bei positiver Impulsbelastung treten während der steigenden Flanke überwiegend Teilentladungen mit negativer Polarität der scheinbaren Ladung auf. Analog zur in Abbildung 31 vorgestellten Messung der Nadel-Platte-Anordnung zeichnet das konventionelle Teilentladungsmesssystem auch bei der Stab-Platte-Anordnung vereinzelt Teilentladungen mit positiver Polarität der scheinbaren Ladung während der steigenden Impulsflanke auf. Aufgrund der höheren Spannung und der veränderten Elektrodengeometrie schwingt im letzteren Fall der Entladestrom deutlich stärker, sodass die Polaritätserkennung des konventionellen Teilentladungsmesssystems im Vergleich zur Nadel-Platte-Anordnung häufiger falsch liegt.

Während der Pause der Teilentladungsaktivität zu Beginn des Abfalls der Klemmenspannung treten Teilentladungen mit vergleichsweise kleiner scheinbarer Ladung auf, welche vom Autor als Grundstörpegel identifiziert werden. Nach einem Abfall der

Impulsspannung um circa 14 kV setzen die Rückentladungen ein. Diese treten vergleichsweise unregelmäßig auf und haben (bis auf eine Ausnahme) eine positive Polarität der scheinbaren Ladung. Diese ist ungefähr um den Faktor fünf größer im Vergleich zur Nadel-Platte-Anordnung, was sich auf die unterschiedliche Geometrie und die entsprechend höhere Teilentladungseinsetzspannung zurückführen lässt. Analog zu den Ergebnissen der Nadel-Platte-Anordnung zeigt sich, bedingt durch die Superposition von extern eingeprägtem elektrischen Feld und dem Feld durch die auf der Oberfläche der Isolierstoffbarriere akkumulierte Ladung, ein Polaritätswechsel nach Wiedereinsetzen der Teilentladung sowie ein Auftreten bei sehr kleinen Klemmenspannungen. Abbildung 34 zeigt die gemessene scheinbare Ladung und die Klemmenspannung bei 15 % relativer Feuchte der Luft.

Bei einem Wechsel der Polarität zeigt sich, dass die scharfkantige Elektrode bei negativer Polarität als Quelle für die lawinenwirksamen Anfangselektronen dient. Das konventionelle Teilentladungsmesssystem kann die Polarität der Teilentladungen in der vorderen, schnellen Impulsflanke komplett polaritätsrichtig aufzeichnen. Nach einer teilentladungsfreien Pausenzeit, während der die Impulsspannung an dem Stab um circa 13 kV abfällt, setzt die Teilentladungsaktivität wiederum ein (siehe Abbildung 35). Im Gegensatz zur Nadel-Platte-Anordnung mit Isolierstoffbarriere ist die Differenz zwischen Teilentladungsaussetz- und Teilentladungswiedereinsetzspannung bei der Stab-Platte-Anordnung mit Isolierstoffbarriere polaritätsabhängig leicht unterschiedlich.

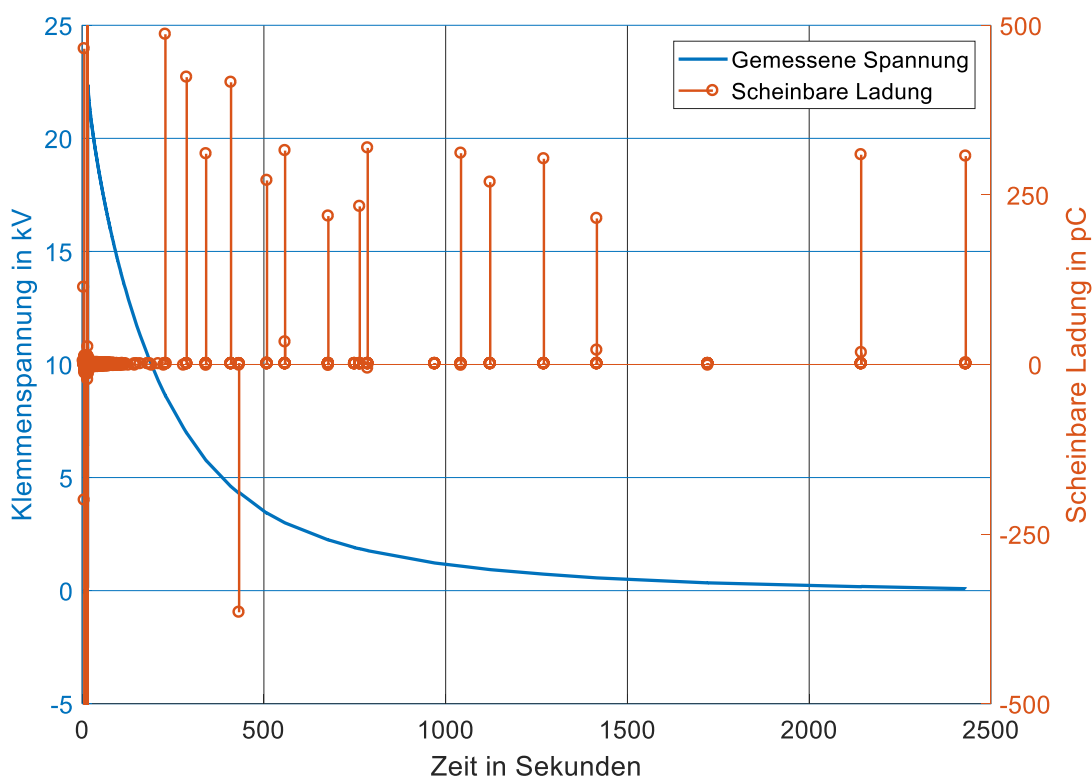


Abbildung 34 Teilentladungsaktivität bei langsam abklingender positiver Impulsspannung an einer Stab-Platte-Anordnung mit einer zusätzlichen Isolierstoffplatte aus Epoxidharzformstoff direkt auf der erdseitigen Plattenelektrode bei 15 % relativer Feuchte der Luft

Analog zu den in Abbildung 34 gezeigten Messergebnissen zeichnet das konventionelle Teilentladungsmesssystem bei negativer Impulsspannung Teilentladungsimpulse mit einer scheinbaren Ladung zwischen 550 pC (direkt bei Teilentladungswiedereinsatz) und circa 400 pC (im weiteren Verlauf) auf, siehe Abbildung 35. Bei allen Teilentladungen mit nennenswerter scheinbarer Ladung wird die Polarität korrekt bestimmt, lediglich Teilentladungen mit vergleichsweise kleiner scheinbarer Ladung werden manchmal nicht polaritätsrichtig erfasst. Diese könnten möglicherweise Überschwinger direkt vorangegangener Teilentladungen sein. Darauf deutet, dass sie meist direkt nach der Totzeit einer vorangegangenen Teilentladung mit größerer scheinbarer Ladung auftreten.

Auch bei dieser Messung treten aufgrund der bekannten Superposition von extern verursachtem Feld und Raumladungsfeld Teilentladungen bei vergleichsweise geringer Klemmenspannung auf. Abbildung 35 zeigt die Messergebnisse bei einem Scheitelwert der Impulsspannung von 20,5 kV und einer relativen Feuchte der Luft von ebenfalls 15 %.

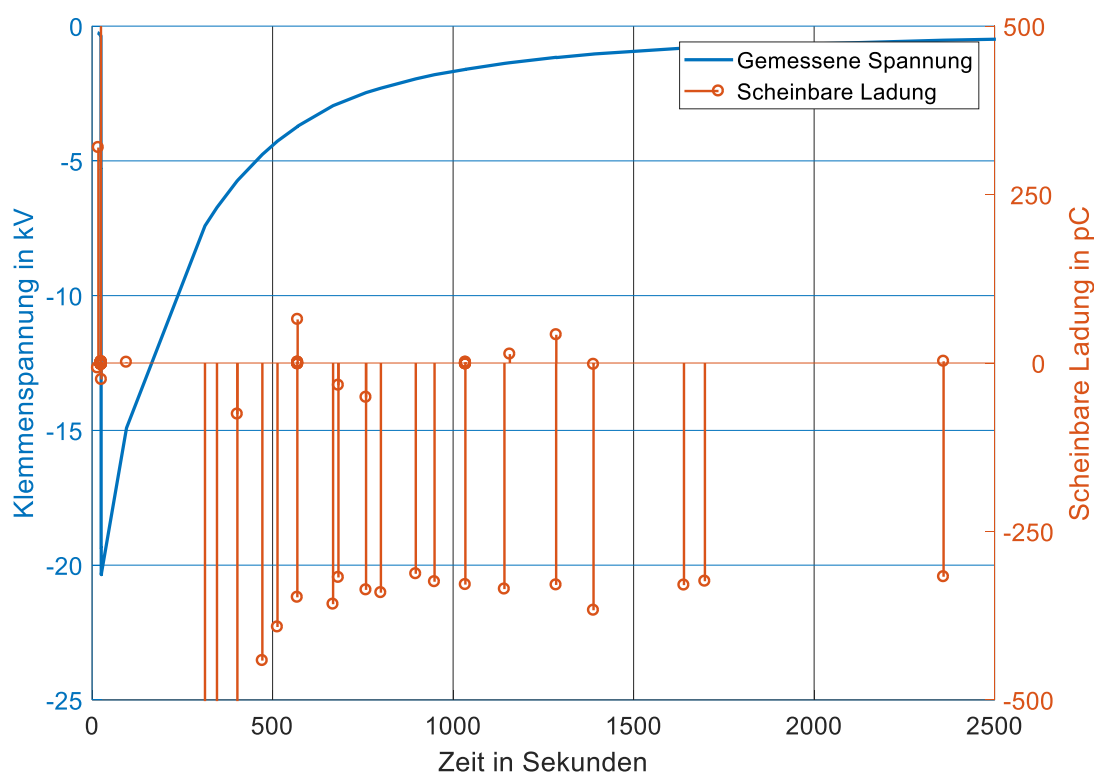


Abbildung 35 Teilentladungsaktivität bei langsam abklingender negativer Impulsspannung an einer Stab-Platte-Anordnung mit einer zusätzlichen Isolierstoffplatte aus Epoxidharzformstoff direkt auf der erdseitigen Plattenelektrode bei 15 % relativer Feuchte der Luft

Während des Abklingens der Impulsspannung ist bis auf die Polarität der scheinbaren Ladung kein Unterschied zwischen positiver und negativer Impulsspannung zu erkennen. Dies lässt sich einerseits damit erklären, dass die Stabelektrode aus Messing auch als Kathode keine lawinenwirksamen Anfangselektronen für die Rückentladungen bereitstellen kann. Diese benötigen polaritätsunabhängig lawinenwirksame Anfangselektronen durch Ionisation in dem Gasbereich, in welchem die resultierende elektrische Feldstärke größer als die Zündfeldstärke ist. Andererseits kann auch der Zündverzug der Stabelektrode geringer ausgeprägt sein im Vergleich zur Nadel, da das kritische Volumen größer ist.

5.1.4 Einfluss der Zirkulation der umgebenden Luft

Abschließend soll bei den äußeren Teilentladungen noch der Einfluss der Zirkulation des Isoliergases (Luft) während der Messung untersucht werden. Bedingt durch eine Lüftung des Messplatzes mit fünffachem Luftwechsel pro Stunde wird bei den in Abbildung 31 bis Abbildung 35 gezeigten Messungen angenommen, dass die Luft gewechselt wird, wodurch sich im Gasraum befindliche positive Ionen weggespült werden. Allerdings ist

deren Beweglichkeit hinreichend groß, sodass diese auch in der Pausenzeit kurz vor und kurz nach der Feldinversion trotz der vergleichsweise geringen elektrischen Feldstärke von den Elektroden abgesaugt werden sollten.

Mittels einer Kapselung wurde der Luftaustausch im Bereich der Versuchsanordnung verhindert. Das Anspülen von im Raum entstehenden Ionen zu den Elektroden wird so ebenfalls unterbunden. Die hierbei gewonnenen Messergebnisse decken sich voll mit jenen, die bei Zirkulation ermittelt wurden. Daher kann angenommen werden, dass die Belüftung des Versuchsstandes, wie angenommen, keinen Einfluss auf die äußere Teilentladungsaktivität der vorgestellten Anordnungen hat.

5.1.5 Einfluss der relativen Feuchte der Luft

Der Einfluss der relativen Feuchte der Luft auf die spezifische Leitfähigkeit des Isolierstoffes wurde von Lutz untersucht [LUT-10]. Bei einer relativen Feuchte über 30 % nimmt die spezifische Oberflächenleitfähigkeit üblicher Isolierwerkstoffe (PET, Epoxidharzformstoff) so stark zu, dass die akkumulierte Ladung schneller abfließt.

Bei Teilentladungsmessungen bei einer relativen Feuchte der Luft des Versuchsstandes von 40 % konnte bei den oben gezeigten Anordnungen bei den üblichen Werten der Impulsspannung kein Wiedereinsetzen der Teilentladungsaktivität bei abklingender Impulsspannung festgestellt werden.

5.1.6 Lunker mit einseitigem Elektrodenkontakt

Für die nun folgenden Messungen wird der in Kapitel 4.1.4 vorgestellte Prüfkörper mit innerer Fehlstelle mit einseitigem direkten Elektrodenkontakt genutzt, siehe Abbildung 22d). Im Schnittbild ist die Fehlstelle linsenförmig, es ergibt sich somit eine vom Ort innerhalb der Fehlstelle abhängige Teilentladungsein- und Teilentladungsaussetzspannung. Dies erklärt, warum sich sowohl bei positiver Polarität der Impulsspannung (Abbildung 36) als auch bei negativer Polarität (Abbildung 37) keine teilentladungsfreie Zeit ergibt. In den Randbereichen, in welchen die Fehlstellenhöhe gegen Null geht, setzt die Teilentladung nicht messbar aus.

Jedoch zeigt sich bei beiden Polaritäten der impulsförmigen Prüfspannung sowohl die Polaritätsumkehr der scheinbaren Ladung als auch das Auftreten von Teilentladungen bei einer Klemmenspannung kleiner der Teilentladungsaussetzspannung. Abbildung 36 zeigt die gemessenen Ergebnisse bei einem Scheitelwert der Impulsspannung von 28 kV und einer relativen Feuchte der Luft von 15 %.

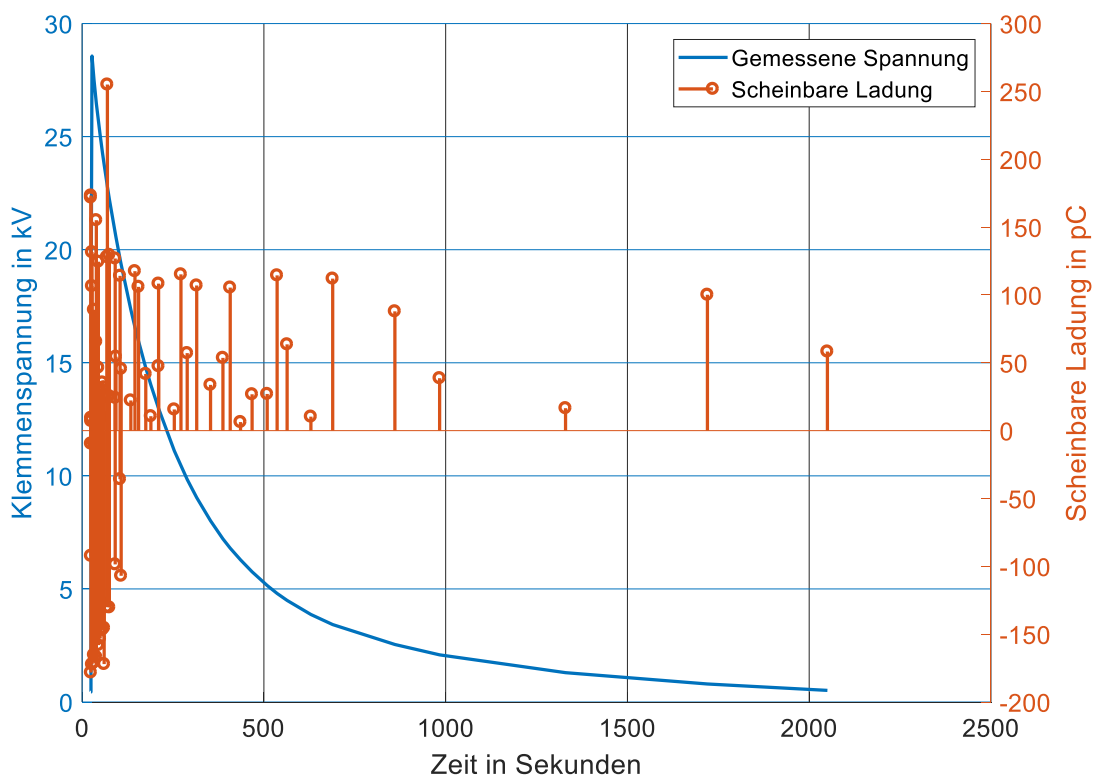


Abbildung 36 Teilentladungsaktivität bei langsam abklingender positiver Impulsspannung an einem Prüfkörper nach Kodoll [KOD-88] aus Epoxidharzformstoff bei 15 % relativer Feuchte der Luft

Bei einem Wechsel der Polarität der impulsförmigen Prüfspannung ergibt sich, wie Abbildung 37 zeigt, ein näherungsweise ähnliches Ergebnis, jedoch mit umgekehrter Polarität der Teilentladungsimpulse. Analog zur Stab-Platte-Anordnung dient auch hier die Kugelelektrode mit einem Kugeldurchmesser von 3 mm nicht als Quelle für lawinenwirksame Anfangselektronen während des Wiedereinsetzens der Teilentladung.

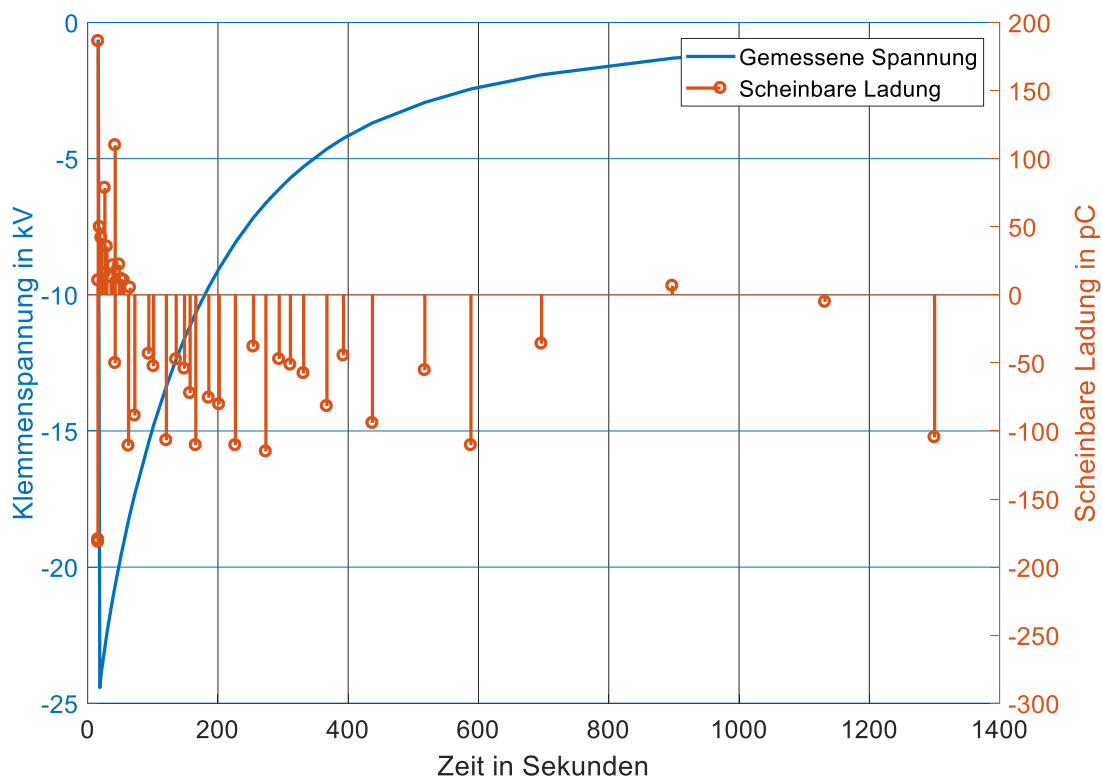


Abbildung 37 Teilentladungsaktivität bei langsam abklingender negativer Impulsspannung an einem Prüfkörper nach Kodoll [KOD-88] aus Epoxidharzformstoff bei 15 % relativer Feuchte der Luft

Aufgrund des vergleichsweise kleinen Gasraumes und der eng begrenzten Grenzfläche Gas-Feststoff wird eine kleinere scheinbare Gesamtladung während der fallenden Impulsflanke im Vergleich zu den offenen Anordnungen, welche in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellt wurden, umgesetzt.

5.1.7 Lunker ohne direkten Elektrodenkontakt

Abschließend werden die an einem Prüfkörper mit Lunker ohne direkten Elektrodenkontakt (siehe Abbildung 22e) ermittelten Messergebnisse vorgestellt. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus reicht es hierbei aus, nur die Ergebnisse der Messung mit einer Polarität darzustellen, welche Abbildung 38 zeigt. Während der vorderen Impulsflanke finden nur wenige Teilentladungen statt, welche das konventionelle Teilentladungsmesssystem hinsichtlich ihrer Polarität nicht eindeutig zuordnen kann. Nach circa 150 Sekunden findet nochmals eine Teilentladung mit negativer Polarität der scheinbaren Ladung statt. Dann ändert sich die Polarität der scheinbaren Ladung und es treten zwei weitere Entladungen auf. Die zweite davon bei einer Klemmenspannung unter 1 kV. Daher kann auch bei diesem Prüfkörper davon ausgegangen werden, dass trotz der

geringen Anzahl an Teilentladungsereignissen mit kleiner Ladung und somit einer sehr geringen umgesetzten akkumulierten Gesamtladung auch hier die Superposition der beiden elektrischen Felder das Teilentladungsverhalten dominiert. Die geringe Anzahl der auftretenden Teilentladungsereignisse kann auf den fehlenden Elektrodenkontakt der Fehlstelle und ihr kleines Volumen zurückgeführt werden. Durch die Kombination dieser beiden Tatsachen stehen nur sehr wenige lawinenwirksame Anfangselektronen zur Verfügung.

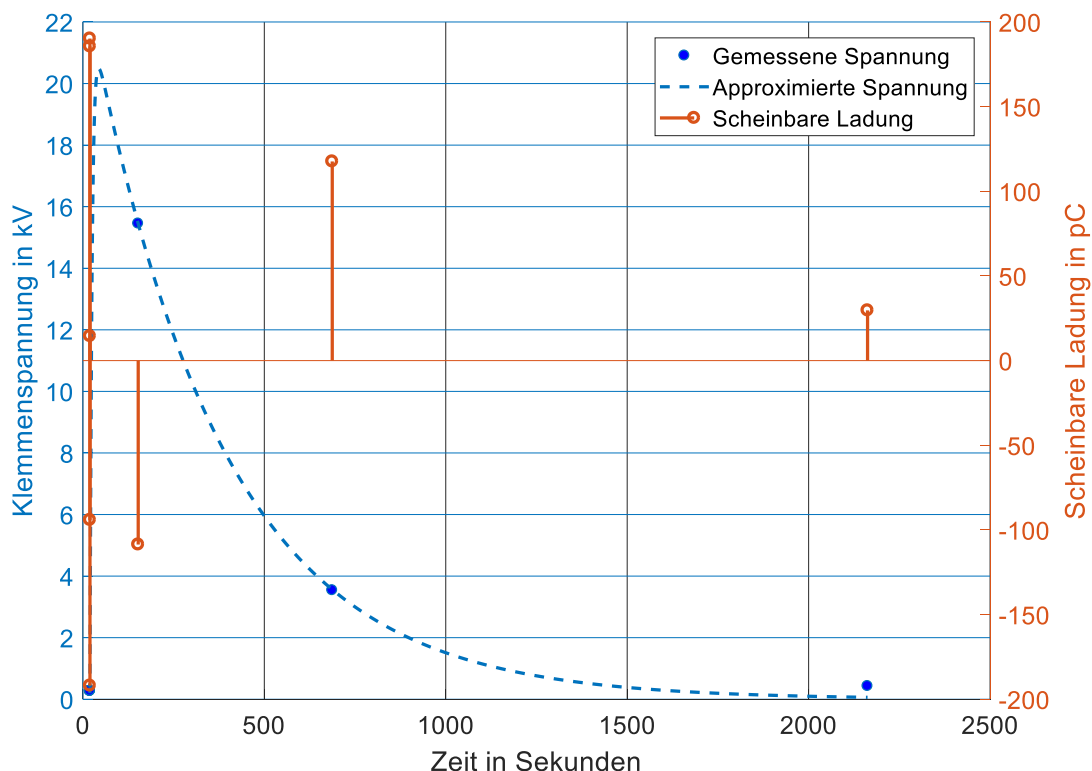


Abbildung 38 Teilentladungsaktivität bei langsam abklingender positiver Impulsspannung an einem Prüfkörper nach Henriksen [HEN-82] aus Epoxidharzformstoff bei 15 % relativer Feuchte der Luft

Da aufgrund der ereignisbasierten Messwertaufzeichnung beim konventionellen Teilentladungsmesssystem bei einer derart geringen Anzahl an Teilentladungsereignissen nur wenige Werte für den Spannungsverlauf vorhanden sind, ist die Kurve der Klemmenspannung gestrichelt dargestellt und basiert auf einem exponentiellen Fit an die gemessenen Spannungswerte.

5.2 Impulsstrommessung

Mittels der breitbandigen Strommessung wird erkennbar, dass die meisten Teilentladungsereignisse, welche bei den untersuchten Prüfkörpern in Sandwich-Bauweise aufgezeichnet werden, aus mehreren überlagerten Teilentladungsimpulsen bestehen. Da auch Teilentladungsereignisse, welche nur aus einem einzelnen Teilentladungsimpuls bestehen, aufgezeichnet werden, wird ausgeschlossen, dass es sich um Reflexionen im Messaufbau handelt. Abbildung 39 zeigt beispielhaft einen solchen Impulsverlauf. Anhand der in Kapitel 2.5 vorgestellten Impulsformen und -zeiten lässt er sich als streamerartige Teilentladung klassifizieren, siehe hierzu auch Abbildung 9 auf Seite 22.

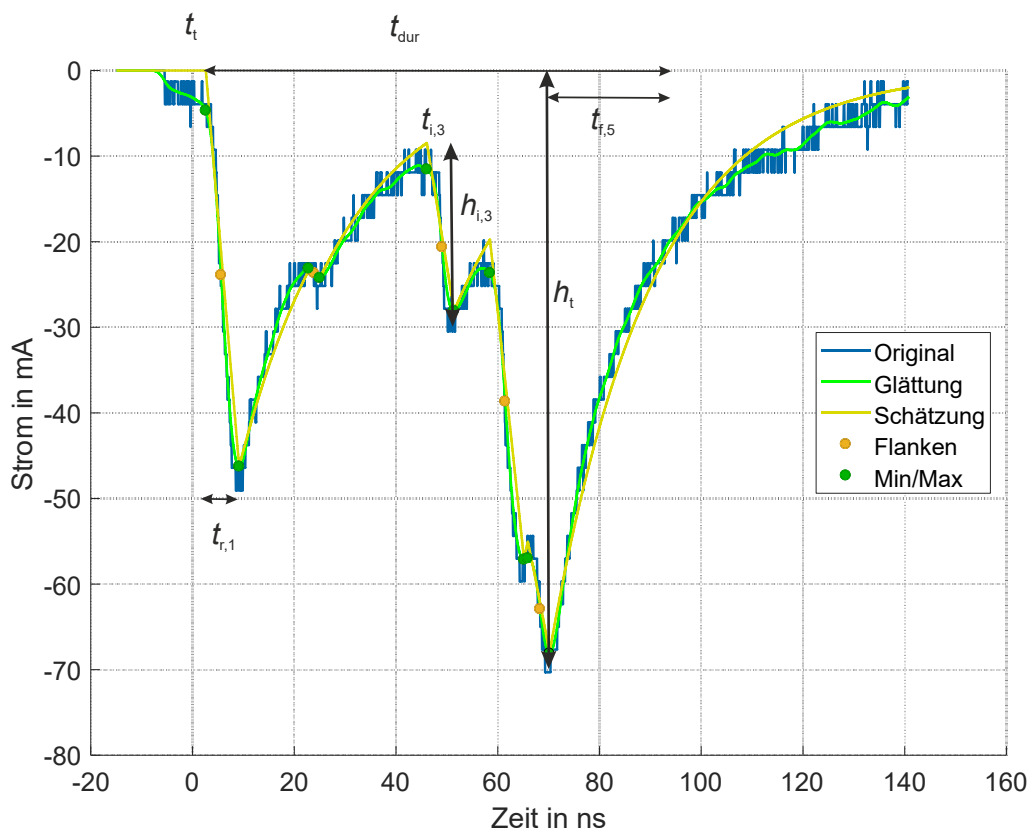


Abbildung 39

Exemplarischer Stromverlauf eines Teilentladungsereignisses bestehend aus mehreren Teilentladungsimpulsen (blau), dessen geglätteter Verlauf (hellgrün), der durch Approximation geschätzte Verlauf (gelb), die hierfür angenommenen Flanken (gelbe Punkte) und Minima sowie Maxima (grüne Punkte). Erläuterung der Parameter siehe Fließtext.

Prüfkörper- und Versuchsdaten: 2 x 300 μm GY250 als Außenlage, 1 x 1,3 mm CY228 als Zentrallage mit 10 mm Fehlstellendurchmesser; 8 kV/mm Feldstärke in der Fehlstelle ohne Teilentladungsaktivität

In Abbildung 39 ist der gemessene Verlauf der einzelnen Teilentladungsimpulse in Blau dargestellt. In Hellgrün ist der geglättete Verlauf aufgetragen. Mittels dieses Verlaufs werden die Minima und die Maxima (grüne Punkte) sowie die Mitten der ansteigenden Flanken (gelbe Punkte) bestimmt. Es wird angenommen, dass die Impulse einen linearen Anstieg bis zum Maximum und einen exponentiellen Abfall aufweisen. Die somit gewonnene Approximation des Stromverlaufs des Teilentladungsereignisses ist in Gelb aufgetragen. Die Linearisierung der Stirnflanke reduziert den Rechenaufwand signifikant, der Informationsverlust ist jedoch, bedingt durch die Abtastrate der Messung, vernachlässigbar.

Folgende Parameter des Stromverlaufs eines Teilentladungsimpulses werden ermittelt und stehen zur Auswertung zur Verfügung:

- Gesamthöhe h_t in Milliampere
- Dauer des Teilentladungsereignisses t_{dur} in Nanosekunden
- Gesamtladung q_t in Nanocoulomb
- Zeitpunkt des Teilentladungsereignisses t_t in Sekunden
- Anzahl der Teilstromimpulse des Teilentladungsereignisses n

Für die einzelnen Teilstromimpulse werden folgende Parameter ermittelt und stehen zur Auswertung zur Verfügung:

- Impulshöhe h_i in Milliampere
- Impulsladung q_i in Pikocoulomb
- Zeitpunkt des Teilstromimpulses t_i in Nanosekunden
- Anstiegszeit t_r in Nanosekunden
- Rückzeitkonstante t_f in Nanosekunden⁸

Der mittlere Entladestrom $I(t)$ wird gemäß Gl. 83 definiert zu:

$$I(t) = \frac{q_a(t)}{(t - t_t)} \quad (\text{Gl. 83})$$

Hierbei ist $q_a(t)$ die kumulierte scheinbare Ladung, welche vom Aufzeichnungsbeginn zum Zeitpunkt t_t bis zum Zeitpunkt t gemessen wird.

Im Folgenden soll zuerst ermittelt werden, um welchen Teilentladungsmechanismus es sich handelt. Anschließend soll der Einfluss einzelner Eigenschaften der inneren Fehlstelle (wie zum Beispiel die Fehlstellenhöhe oder der Fehlstellendurchmesser) der in

⁸ Die fallende Flanke der Impulse wird als exponentiell abfallend angenommen, entsprechend wird die Rückzeitkonstante definiert

Kapitel 4.2.6 vorgestellten Prüfkörper in Sandwich-Bauweise auf die obigen Parameter dargestellt werden.

5.2.1 Vergleich der Messdaten mit dem townsend-basierten Modell nach Fromm

Der Stromverlauf der Teilentladungsereignisse besteht meist aus der Superposition mehrerer Teilentladungsimpulse, was ein starkes Argument für eine streamerartige Teilentladung, bestehend aus mehreren einzelnen, durch Photoionisation initiierten Teilentladungsimpulsen, ist. Trotzdem wird zuerst die Ladung des gesamten Teilentladungsereignisses über der Zeitdifferenz zum vorausgegangenen Teilentladungsereignis (Abbildung 40) sowie die Ladung der einzelnen Teilentladungsimpulse über der Zeit zum vorausgegangenen Teilentladungsimpuls (Abbildung 41) aufgetragen.

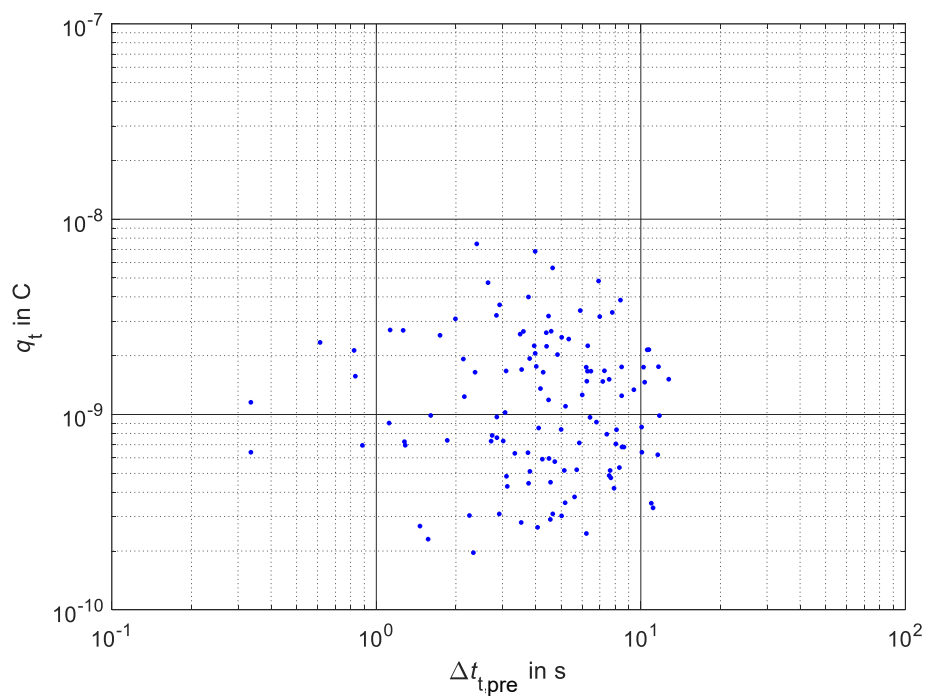


Abbildung 40 Sandwich-Prüfkörper bestehend aus zwei 300 μm dicken Folien aus dem Epoxidharzwerkstoff GY250 sowie einer dazwischenliegenden Polyethylenplatte der Höhe 1 mm und mit einer Fehlstelle mit einem Durchmesser von 10 mm. Klemmenspannung 10 kV, Temperatur 25 $^{\circ}\text{C}$, relative Feuchte der Luft 50 %. Messdauer 30 Minuten, beginnend zehn Minuten nach Spannungszuschaltung. Gesamtladung des Teilentladungsereignisses über der Zeit zum jeweils vorausgegangenen Teilentladungsereignis

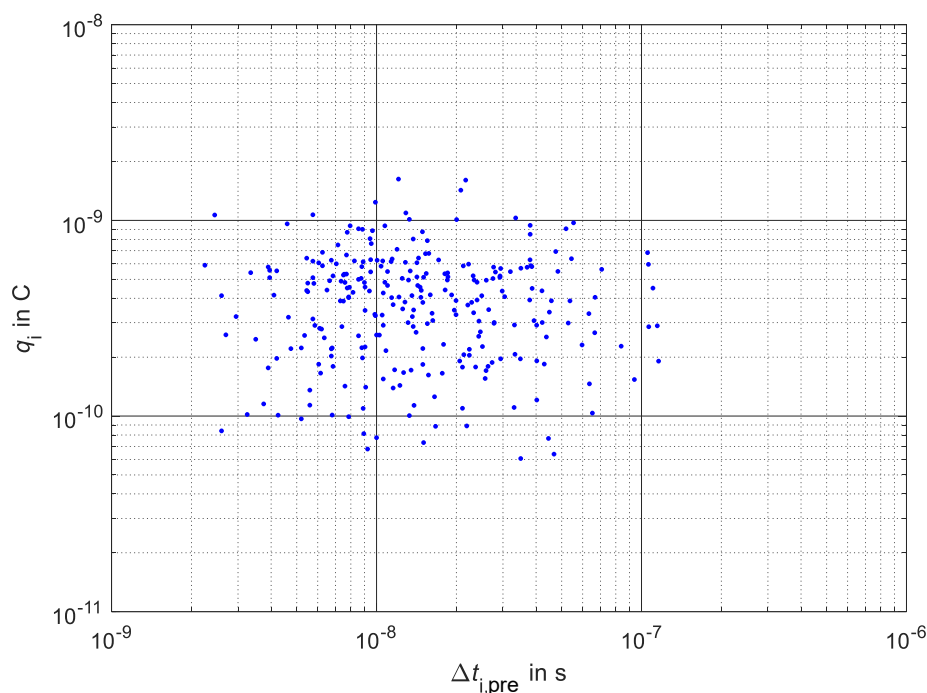


Abbildung 41 Ladung des Teilentladungsimpulses über der Zeit zum jeweils vorausgegangenen Teilentladungsimpuls bei identischen Prüfungsbedingungen und identischem Prüfkörper wie in Abbildung 40

In beiden Diagrammen zeigt sich, dass der von Fromm für innere Fehlstellen bei Gleichspannungsbelastung bekannte Zusammenhang [FRO-94], [FRO-95] welcher in Abbildung 14 dargestellt wird, in den Diagrammen nicht erkannt werden kann. Auch kann keine Abhängigkeit zwischen der scheinbaren Ladung des aktuellen Teilentladungsergebnisses und dem jeweils zuvor aufgetretenen Teilentladungsereignis bei den Messungen nachgewiesen werden. Die Messdaten scheinen stochastisch verteilt zu sein. Dies wird, neben den vergleichsweise hohen Werten der scheinbaren Ladung, als weiteres Indiz aufgefasst, dass es sich bei den hier beobachteten Teilentladungen um streamerartige Teilentladungen handelt. Bei Prüfkörpern mit 2 mm Fehlstellenhöhe fallen die Ergebnisse qualitativ näherungsweise gleich aus.

5.2.2 Einfluss der Fehlstellenhöhe

Der Einfluss der Fehlstellenhöhe soll ebenso wie die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Parameter an einem Sandwich-Prüfkörper bestehend aus zwei Platten mit jeweils der Dicke $d_2 = 300 \mu\text{m}$ aus dem Epoxidharzwerkstoff *GY250* sowie einer dazwischenliegenden Polyethylenplatte untersucht werden. Die Höhe d_1 dieser Kunststoffplatte in der Prüfkörpermitte beträgt entweder 1 mm oder 2 mm. Sie besitzt als Fehlstelle eine

Durchgangsbohrung mit einem Durchmesser D von 10 mm. Die Feldstärke in der Fehlstelle liegt zwischen 7 kV/mm und 10 kV/mm. In den folgenden Kapiteln beträgt die Temperatur 25 °C und die relative Feuchte der Luft im Klimaschrank 50 %. Um Einflüsse durch vorangegangene Versuche zu vermeiden, wird der Sandwichprüfkörper zwischen den einzelnen Messungen geöffnet und zerlegt. Alle Oberflächen werden mit Isopropanol gereinigt und anschließend alle Komponenten bei 50 °C für mindestens 48 Stunden zur Depolarisation gelagert. Vor dem Zusammenbau werden alle Flächen nochmals mit einem Isopropanol-getränkten Tuch abgewischt. Nach Verdunstung des Flüssigkeitsfilms wird der Prüfkörpersandwich montiert und im Klimaschrank bis zum Erreichen der stationären Temperaturverteilung gelagert. Erst dann wird die Prüfspannung an die Klemmen angelegt.

Es zeigt sich, dass die Gesamtladung der Teilentladungsereignisse q_t (Median und Spannweite) mit zunehmender Fehlstellenhöhe d_1 signifikant für alle Feldstärken in der Fehlstelle zunimmt, siehe Abbildung 42.

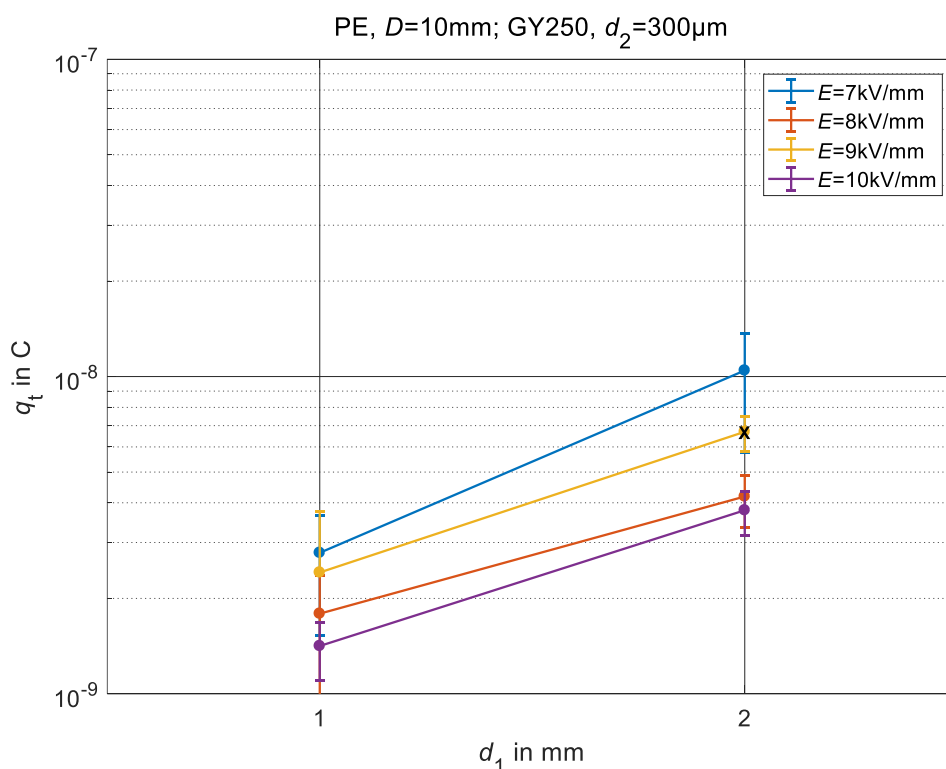


Abbildung 42 Ladung der Teilentladungsereignisse über der Fehlstellenhöhe d_1 für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. Median und Spannweite aller Teilentladungsereignisse innerhalb 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Die Messergebnisse für 2 mm Fehlstellenhöhe und 9 kV/mm elektrische Feldstärke fallen durch den Kolmogoroff-Smirnoff-Test. Das heißt, dass die Ladungsverteilung der Stichprobe von der angenommenen logarithmischen Verteilung der Ladung zu stark abweicht. Daher ist das Ergebnis für eine elektrische Feldstärke von 9 kV/mm und 2 mm Fehlstellenhöhe mit einem schwarzen Kreuz markiert.

Die Zunahme der Gesamtladung der Teilentladungsereignisse mit der Fehlstellenhöhe kann damit begründet werden, dass die Teilentladungen eine längere Wegstrecke im Gasraum zur Ionisation zur Verfügung haben.

Die Zeit zwischen den einzelnen Teilentladungsereignissen Δt_t nimmt mit zunehmender Fehlstellenhöhe signifikant ab. Einzige Ausnahme hiervon sind die Messungen mit einer elektrischen Feldstärke von 7 kV/mm. Hierbei bleibt die Zeit zwischen zwei Teilentladungsereignissen fehlstellenhöhenunabhängig konstant. Abbildung 43 zeigt Median und Spannweite der Messergebnisse.

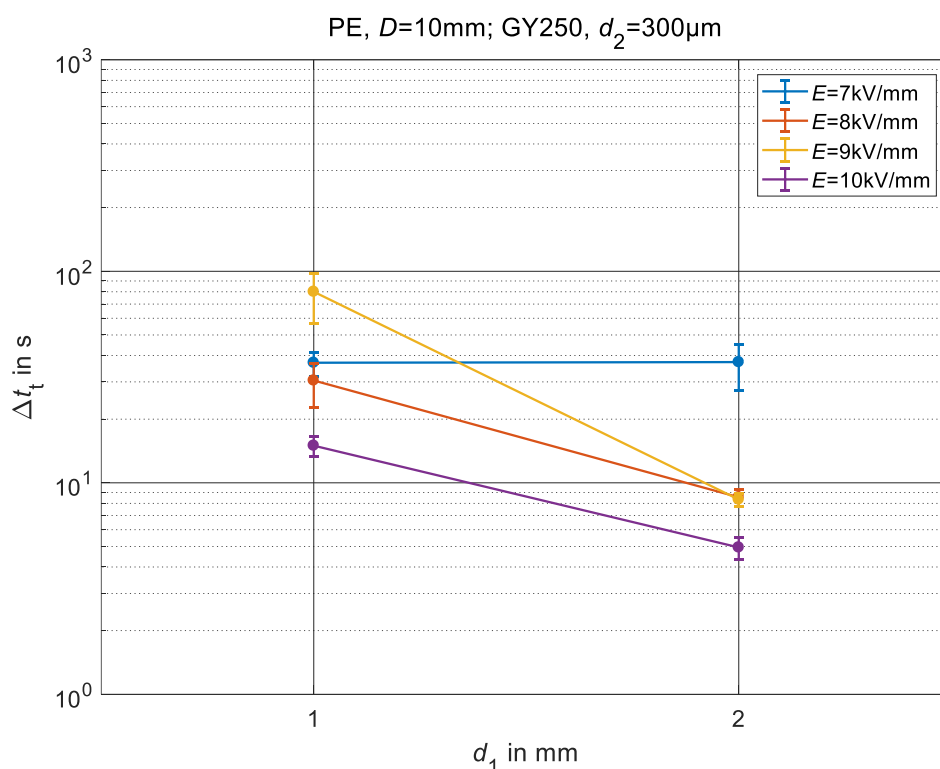


Abbildung 43 Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen über der Fehlstellenhöhe d_1 für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. Median und Spannweite aller Teilentladungsereignisse innerhalb 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Für die Teilentladungsereignisse gilt, dass die Zeit zwischen den einzelnen Teilentladungsereignissen (bis auf die elektrische Feldstärke von 7 kV/mm) bei Zunahme der

Fehlstellenhöhe d_1 abnimmt. Bei einer Fehlstellenhöhe von 2 mm ist die Klemmenspannung bei gleicher elektrischer Feldstärke im Gasraum nahezu⁹ doppelt so hoch im Vergleich zu den Prüfkörpern mit 1 mm Fehlstellenhöhe. Da die Restspannung über der Fehlstelle vergleichsweise klein ist, kann davon ausgegangen werden, dass unmittelbar nach einem Teilentladungsereignis die Potentialdifferenz über den Folien bzw. Platten zwischen Elektrode und Fehlstelle bei einer Fehlstellenhöhe von 2 mm nahezu doppelt so groß ist, wodurch der Abbau der akkumulierten Ladungsträger durch den Isolierstoff beschleunigt wird. Die Teilentladungseinsetzspannung erhöht sich um weniger als den Faktor zwei bei Verdoppelung der Fehlstellenhöhe d_1 . Somit kann die nachfolgende Teilentladung bei größeren Fehlstellenhöhen schneller wieder einsetzen.

Die Ladung der einzelnen, sich teilweise überlagernden Teilentladungsimpulse q_i steigt im Mittel ebenfalls signifikant mit zunehmender Fehlstellenhöhe d_1 , wie Abbildung 44 zeigt. Analog zum Ergebnis für die Teilentladungsereignisse in Abbildung 42 fällt auch hier die Stichprobe für die elektrische Feldstärke von 9 kV/mm und 2 mm Fehlstellenhöhe durch den Kolmogoroff-Smirnoff-Test und ist daher mit einem schwarzen Kreuz markiert. Erklären lässt sich der Anstieg der Einzelimpulsladungen über dem Anstieg der Fehlstellenhöhe gleich wie der Anstieg der Gesamtladung der Teilentladungsereignisse mit der längeren Ionisationsstrecke.

Die mittlere Anzahl der Teilentladungsimpulse je Teilentladungsereignis n nimmt mit zunehmender Fehlstellenhöhe ab. Ebenso nimmt sie (mit Ausnahme des Ergebnisses für eine elektrische Feldstärke von 9 kV/mm und 1 mm Fehlstellenhöhe) auch mit zunehmender elektrischer Feldstärke im Lunker ab, wie Abbildung 45 zeigt.

Die Abnahme der Anzahl der Teilentladungsimpulse je Teilentladungsereignis mit zunehmender Fehlstellenhöhe lässt sich mit dem exponentiellen Anwachsen der Ladungsträgerlawinen begründen. Bei größeren Fehlstellenhöhen können die einzelnen Ladungsträgerlawinen ungestörter anwachsen und somit mehr Ladungen umsetzen, wodurch die Restspannung schneller unterschritten wird.

⁹ Da die Dicke der dielektrischen Folie zwischen gasgefülltem Lunker und metallischer Elektrode nicht skaliert wird, tritt keine genaue Verdopplung der Spannung auf

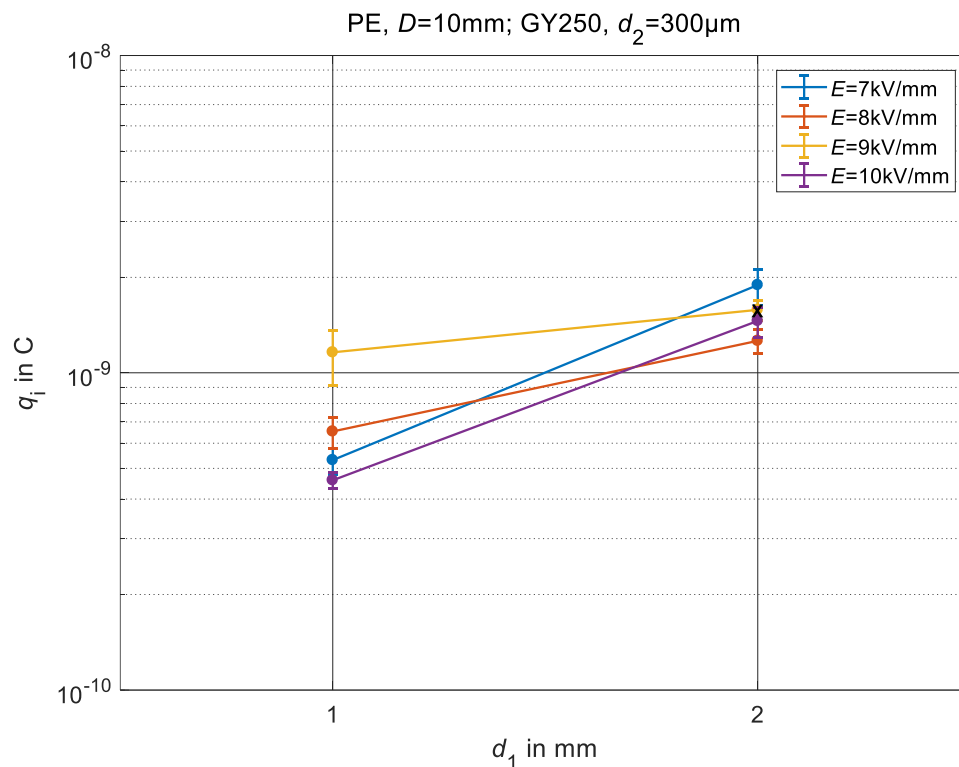


Abbildung 44 Ladung der einzelnen, sich teilweise überlagernden Teilentladungsimpulse über der Fehlstellenhöhe d_1 für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. Median und Spannweite aller Teilentladungsereignisse innerhalb 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Bei Erhöhung der elektrischen Feldstärke in der Fehlstelle steigt der effektive Ionisationskoeffizient $\bar{\alpha}$ an, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Ionisation im Vergleich zu einer Anlagerung bei einem Stoß zunimmt. Somit wachsen die einzelnen Teilentladungslawinen schneller an und transportieren nach der gleichen zurückgelegten Wegstrecke mehr Ladung. Dadurch reichen weniger Teilentladungsimpulse aus, bis ausreichend Ladungsträger umgesetzt wurden, sodass die Spannung über der Fehlstelle unter die Restspannung fällt und das elektrische Feld somit zu niedrig für weitergehende Teilentladungsaktivitäten ist.

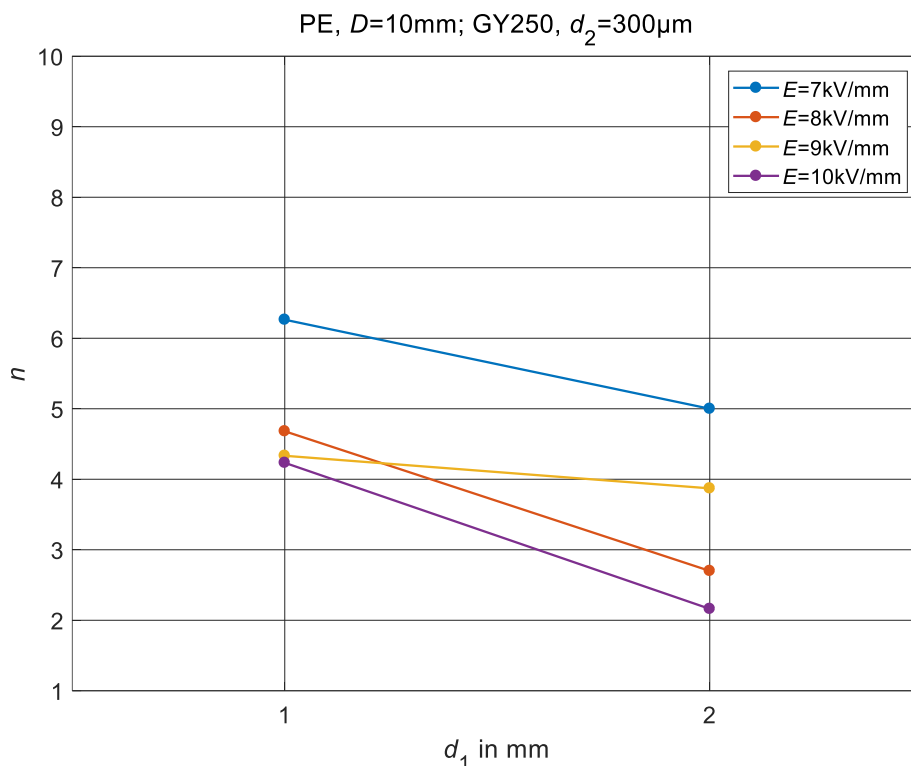


Abbildung 45 Mittlere Anzahl an Teilentladungsimpulsen je Teilentladungsereignis über der Fehlstellenhöhe d_1 für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Die Zeit zwischen den einzelnen, teilweise überlagerten Teilentladungsimpulsen Δt_i innerhalb der Teilentladungsereignisse ist in Abbildung 46 dargestellt. Diese beträgt bei einer Fehlstellenhöhe von 1 mm im Mittel circa 8,5 ns (bei elektrischen Feldstärken von 8 kV/mm und 9 kV/mm) beziehungsweise 14 ns (bei elektrischen Feldstärken von 7 kV/mm und 10 kV/mm). Bei einer Fehlstellenhöhe von 2 mm ist der Mittelwert des zeitlichen Abstandes der einzelnen Teilentladungen 28 ns beziehungsweise 22 ns (für eine elektrische Feldstärke von 9 kV/mm).

Diese Zeitdifferenzen entsprechen ungefähr den Zeiten, die positive Ionen bei den gegebenen elektrischen Feldstärken zur Überbrückung einer Strecke von wenigen zehn Mikrometern benötigen [BEY-86]. Dies legt nahe, dass die positiven Ionen aus dem Entladungsbeginn nahe der kathodischen Grenzfläche zu dieser zurückwandern und dort als townsendische Rückwirkung per Stoßionisation weitere lawinenwirksame Anfangselektronen generieren. Des Weiteren ist die Bereitstellung von lawinenwirksamen Anfangselektronen über Photonen möglich.

Eine weitere mögliche Erklärung ist, dass die Ladungsträger, welche sich in einem Teilentladungskanal mit einem Durchmesser von circa 10 μm bewegen, auch auf dieser

Fläche auf der Grenzfläche zwischen dem gasgefüllten Lunker und dem festen Dielektrikum auftreffen. Durch die hohe Ladungsträgerkonzentration entsteht ein starkes elektrisches Feld parallel zu dieser Grenzfläche, sodass hier aufgrund des Vorhandenseins von Anfangselektronen weitere Teilentladungsaktivität stattfindet. Diese verteilt einerseits die akkumulierten Ladungen auf einen größeren Bereich, was durch die hierdurch erhöhte Querschnittsfläche des Abflusses durch den Isolierstoff zu einem schnelleren Abbau der an der Isolierstoffoberfläche akkumulierten Ladungsträger führt. Dadurch wird die Teilentladungseinsetzspannung schneller wieder erreicht. Andererseits stellen diese Verteilungsentladungen auch freie Elektronen bereit, welche an der kathodischen Grenzfläche auch als lawinenwirksame Anfangselektronen dienen können. Sie initiieren Teilentladungslawinen, welche die gesamte Fehlstelle überbrücken und so die maximal mögliche Ladung umsetzen.

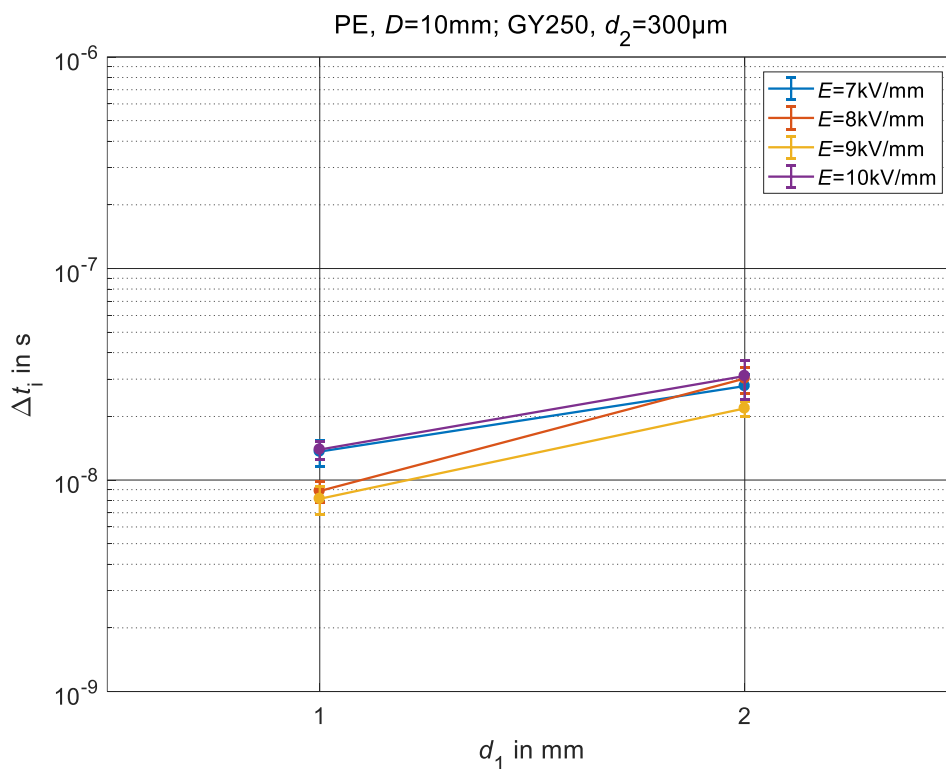


Abbildung 46 Zeit zwischen aufeinanderfolgenden, sich teilweise überlagerten Teilentladungsimpulsen je Teilentladungsereignis über der Fehlstellenhöhe d_1 für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. Median und Spannweite aller Teilentladungsereignisse innerhalb 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

5.2.3 Einfluss des Fehlstellendurchmessers

Als zweiter geometrischer Parameter soll der Einfluss des Fehlstellendurchmessers untersucht werden. Als Dielektrikum, angrenzend zu den Elektroden, werden weiterhin

zwei jeweils 300 μm starke Platten aus dem Epoxidharz *GY250* verwendet, wie auch schon im Abschnitt 5.2.2. Als mittlere Platte wird hier jedoch nicht Polyethylen verwendet, sondern ein Formstoff aus dem Epoxidharz *CY228*. Hierdurch kann zusätzlich in einem weiteren Abschnitt der Einfluss dieses Materials auf das Teilentladungsverhalten untersucht werden. In Abbildung 47 wird der mittlere Entladestrom I für Fehlstellen mit 10 mm und 20 mm Durchmesser dargestellt.

Bei einer elektrischen Feldstärke von 7 kV/mm in der Fehlstelle nimmt der mittlere Entladestrom um den Faktor 6,5 zu, wenn der Fehlstellendurchmesser von 10 mm auf 20 mm verdoppelt wird. Bei elektrischen Feldstärken von 8 kV/mm und 9 kV/mm steigt der mittlere Strom um den Faktor 3,1 beziehungsweise 2,8. Bei einer elektrischen Feldstärke von 10 kV/mm ist der Anstieg mit Faktor 2,7 am Geringsten.

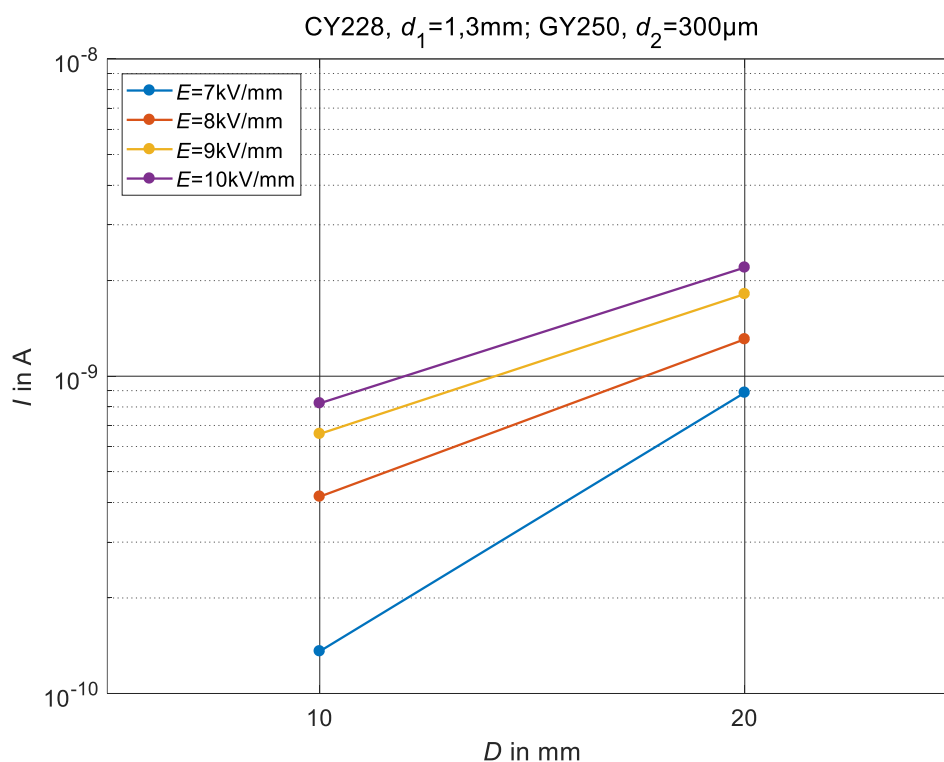


Abbildung 47 Mittlerer Entladestrom in Abhängigkeit des Fehlstellendurchmessers D für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Mittels dieser Ergebnisse kann jedoch noch nicht bestimmt werden, ob die einzelnen Teilentladungsereignisse eine größere Ladung umsetzen oder ob bei Anstieg der belasteten Fläche häufiger Teilentladungen stattfinden. Letzteres würde sich in einem mit zunehmender Fläche verringernden zeitlichen Abstand der einzelnen Teilentladungsereignisse bemerkbar machen.

Dieser zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Teilentladungsereignissen ist in Abbildung 48 dargestellt. Es zeigt sich eine Abnahme der Zeit um den Faktor 31 beziehungsweise 14 bei Feldstärken von 7 kV/mm beziehungsweise 8 kV/mm. Ab einer elektrischen Feldstärke von 9 kV/mm sinkt die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen bei Verdoppelung des Durchmessers um den Faktor 3.

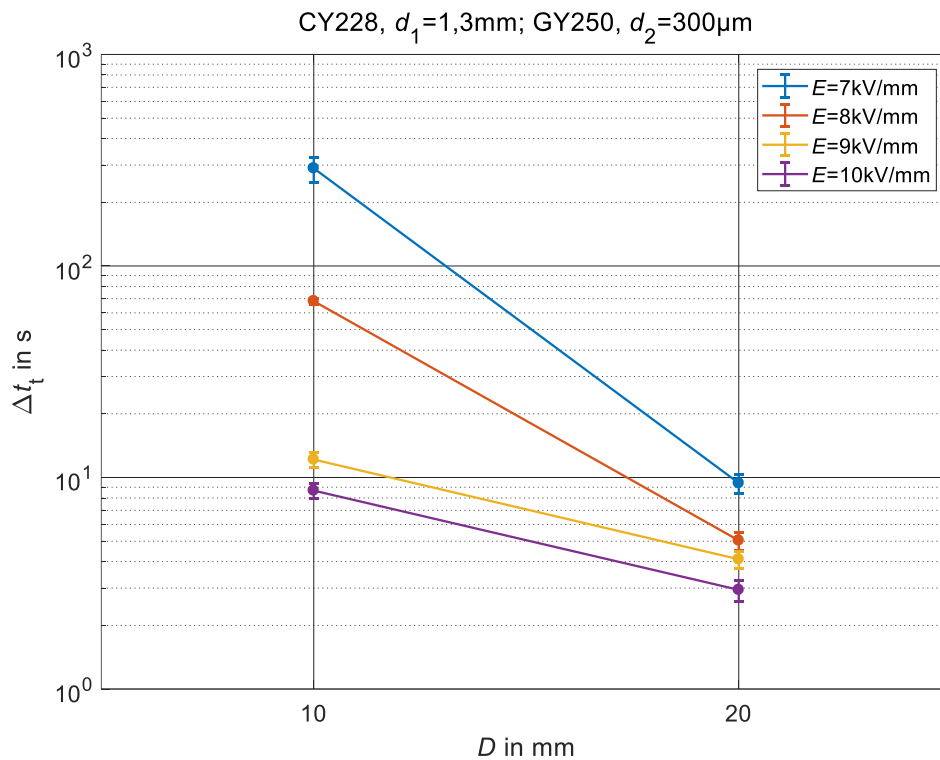


Abbildung 48 Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen in Abhängigkeit des Fehlstellendurchmessers D für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Die scheinbare Ladung je Teilentladungsereignis kann mittels dem mittleren Entladestrom aus Abbildung 47 und der Zeit zwischen den aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen bestimmt werden.

Ab einer elektrischen Feldstärke von 9 kV/mm im Lunker ist die scheinbare Ladung je Teilentladungsereignis nahezu unabhängig vom Fehlstellendurchmesser. Der Anstieg des mittleren Entladestroms resultiert aus der größeren Anzahl an Teilentladungsereignissen je Zeiteinheit. Die Messergebnisse des mittleren Entladestroms und der Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen deuten darauf hin, dass bei elektrischen Feldstärken ab 9 kV/mm in der Fehlstelle streamerartige Teilentladungen auftreten.

Bei einer elektrischen Feldstärke bis 8 kV/mm im Lunker sinkt die scheinbare Ladung je Teilentladungsereignis mit zunehmendem Fehlstellendurchmesser. Eine mögliche Ursache hierfür könnte der mit steigendem Durchmesser geringer werdende Zündverzug aufgrund eines größeren elektrisch belasteten Volumens darstellen. In Folge dessen tritt eine geringere Überspannung und somit eine kleinere Ladung je Teilentladungsereignis auf.

5.2.4 Einfluss des Barrierenmaterials

In diesem Abschnitt soll der Einfluss des Isolierstoffs untersucht werden, indem Teilentladungsmessungen mit Isolierstoffbarrieren aus den beiden Epoxidharzen *CY228* und *GY250* sowie dem Polyethylenterephthalat (PET) *Hostaphan RN 50-350* ausgewertet werden. Folgende Werte werden in den Datenblättern angegeben und durch eigene, orientierende Messungen ermittelt:

Tabelle 1: Spezifischer Volumenwiderstand der Werkstoffe *CY228*, *GY250* und *Hostaphan*

Werkstoff	Temperatur	Spezifischer Volumenwiderstand in Ωm	
		Datenblatt	Eigene Messung
<i>CY228</i> ¹⁰	23 °C	$1,0 \cdot 10^{13}$ [HUN-14]	$\geq 10^{17}$ (ungefüllt ¹¹)
	60 °C	$1,1 \cdot 10^{13}$ [HUN-14]	-
<i>GY250</i> ¹²	23 °C	-	$3 \cdot 10^{15}$
<i>Hostaphan</i> (PET)	23 °C	$>10^{15}$ [MIT-19]	$\geq 10^{17}$
	150 °C	$>10^9$ [MIT-19]	-

In Abbildung 49 sind Teilentladungsmessergebnisse mit den drei unterschiedlichen Isolierstoffbarrieren, aber ansonsten identischem Prüfkörper aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass bei Messungen mit Prüfkörpern mit zwei Lagen je 180 μm dicken Isolierstoffplatten aus Epoxidharz *CY228* ohne dem Füllstoff Quarzmehl genau wie bei Prüfkörpern

¹⁰ 100 Gewichtsteile Harz *CY228*, 85 Gewichtsteile Härter *Araldur 918*, 20 Gewichtsteile Flexibilisator *DY045* und 0,8 Gewichtsteile Abbindebeschleuniger *DY062*, 385 Gewichtsteile Quarzmehl als Füllstoff

¹¹ 100 Gewichtsteile Harz *CY228*, 85 Gewichtsteile Härter *Araldur 918*, 20 Gewichtsteile Flexibilisator *DY045* und 0,8 Gewichtsteile Abbindebeschleuniger *DY062*

¹² 100 Gewichtsteile Harz *GY250* und 45 Gewichtsteile Härter *Araldur 2963*

mit zwei Lagen je 190 μm dickem *Hostaphan* ungefähr alle 100 Sekunden Teilentladungsereignisse auftreten. Es ist daher anzunehmen, dass die spezifischen Volumenwiderstände der beiden Isolierstoffe nahezu identisch sind, was auch die eigenen Messungen zeigen.

Die Auswertung des zeitlichen Abstandes zwischen den einzelnen Teilentladungen in Abbildung 49 zeigt für *Hostaphan* eine Verringerung der Zeit zwischen zwei Teilentladungsereignissen beim Anstieg der Foliendicke von 100 μm auf 125 μm um den Faktor zwei. Dieses Verhalten trat wiederholbar auf und wird auf mögliche Unterschiede in den einzelnen Folienchargen zurückgeführt. Eine weitere Erhöhung der Schichtdicke von 125 μm auf 190 μm bringt keine nennenswerte Änderung der Häufigkeit der Teilentladungsereignisse mit sich.

Für den ungefüllten Epoxidharzformstoff *CY228* ergibt sich hingegen mit zunehmender Schichtdicke ein Anwachsen des zeitlichen Abstandes zwischen zwei aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen, also eine Verringerung der Teilentladungsereignisse pro Zeitabschnitt.

Auffällig ist die vergleichsweise große Spannweite der Ergebnisse und der signifikante Unterschied für die beiden dickeren Epoxidharzformstoffplatten (Stärken von 320 μm und 420 μm). Beim *Hostaphan* nimmt die vergleichsweise kleine Spannweite hingegen mit Erhöhung der Schichtdicke von 125 μm auf 190 μm nochmals deutlich ab.

Beim Epoxidharzformstoff *GY250* beträgt die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen circa 350 ms und liegt damit um circa zweieinhalb Größenordnungen unter dem Wert, welcher bei *CY228* gemessen wird. Dies bestätigt die Werte der Messung des spezifischen Volumenwiderstandes und die Annahme, dass der Abfluss der akkumulierten Ladung durch das Isolierstoffvolumen den dominanten Ladungsträgerabbauprozess darstellt.

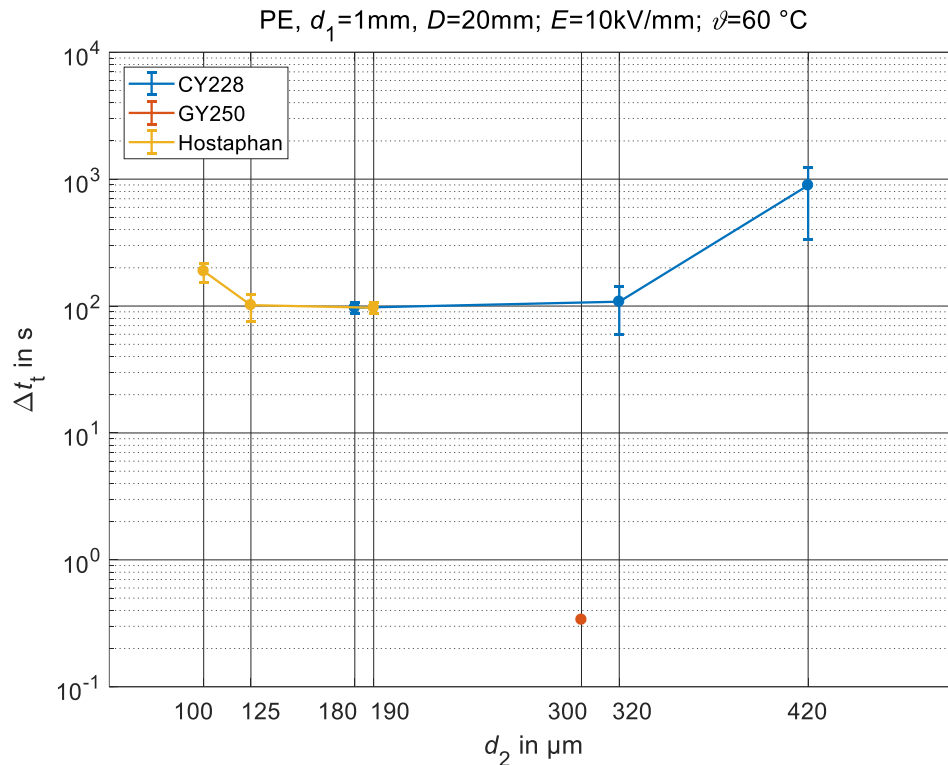


Abbildung 49 Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen über der Isolierstoffbarriertendicke d_2 für verschiedene Isolierstoffe. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung. Klemmenspannung angepasst an die Eigenschaften der Isolierstoffbarrieren zur Erzielung einer identischen elektrischen Feldstärke in der Fehlstelle

5.2.5 Einfluss der Temperatur

Aus der Literatur ist bekannt, dass die spezifische Leitfähigkeit mit ansteigender Temperatur des polymeren Isolierwerkstoffs zunimmt, also der spezifische Widerstand abnimmt [KRE-95], [KUE-17]. Dies bestätigen auch die Datenblätter der in Tabelle 1 aufgeführten Werkstoffe [HUN-14], [MIT-19]. Somit wird erwartet, dass aufgrund des schnelleren Abbaus der an der Grenzfläche Gas-Feststoff akkumulierten Ladung bei ansteigender Temperatur die Zeit zwischen den einzelnen Teilentladungsereignissen kürzer und somit der mittlere Entladestrom höher ist.

Es wird bei den drei Temperaturen 25 °C, 40 °C und 60 °C gemessen. Niedrigere Temperaturen führen zu geringerer Teilentladungsaktivität, was die Messungen entweder länger oder ungenauer macht. Höhere Temperaturen waren nicht möglich, da aus messtechnischen Gründen die Messimpedanz und der Koppelkondensator möglichst nahe am

Prüfkörper im Klimaschrank platziert sein müssen und der Hersteller dieser Komponenten im Datenblatt 60 °C als höchste zugelassene Temperatur während des Betriebs spezifiziert [OMI-07].

In dem untersuchten Temperaturbereich von 25 °C bis 60 °C zeigt sich ein näherungsweise linearer Anstieg des mittleren Entladestroms für elektrische Feldstärken im Lunker zwischen 7 kV/mm und 10 kV/mm. Im Mittel führt eine Erhöhung der Prüfkörpertemperatur um 15 K bis 20 K zu einer Verzehnfachung des mittleren Entladestroms, wie Abbildung 50 zeigt. Dies lässt sich auf die oben erwähnte Verringerung des spezifischen Widerstandes und dem damit einhergehenden beschleunigten Abbau der an den Grenzflächen akkumulierten Ladungsträgern zurückführen. Bei *Hostaphan* sinkt der spezifische Widerstand bei einer Temperaturerhöhung von 127 K um sechs Größenordnungen, siehe Tabelle 1. Dies ergibt, unter der Annahme eines exponentiellen Zusammenhanges, eine Verringerung des spezifischen Widerstandes um eine Größenordnung je 21 K.

Auch bei den in Abbildung 50 gezeigten Messergebnissen des mittleren Entladestroms für den Epoxidharzformstoff *GY250*, welches aus einer anderen Polymerfamilie stammt, lässt sich eine Erhöhung des mittleren Entladestroms um eine Größenordnung bei Erhöhung der Temperatur um je 20 K erkennen.

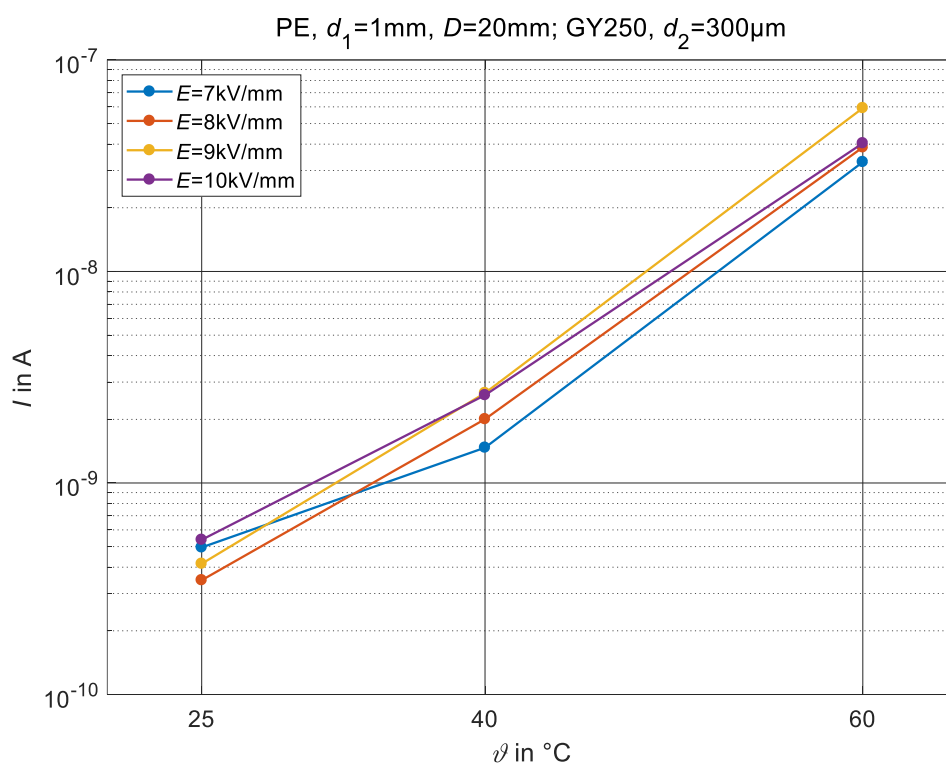


Abbildung 50 Mittlerer Entladestrom über der Temperatur ϑ für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Der feldstärkeabhängig etwas unterschiedliche Verlauf des mittleren Entladestroms liegt im Rahmen der für Teilentladungsmessungen unter Gleichspannungsbelastung üblichen Schwankungen und ist erwartungsgemäß vergleichsweise klein, vor allem für elektrische Feldstärken ab 8 kV/mm im Lunker.

Wie schon in den vorigen Kapiteln soll mittels der Auswertung des zeitlichen Abstandes der einzelnen Teilentladungsereignisse geklärt werden, ob bei zunehmender Temperatur die Erhöhung der Teilentladungsfrequenz oder die Erhöhung der Ladung der einzelnen Teilentladungsereignisse den Anstieg des Teilentladungsstroms verursachen.

Es zeigt sich, dass sich die Zeit zwischen den einzelnen Teilentladungsereignissen bei einem Temperaturanstieg um 20 K ungefähr um den Faktor zehn verringert. Dies lässt sich auf den schnelleren Ladungsabbau aufgrund der durch den Temperaturanstieg erhöhten spezifischen Leitfähigkeit zurückführen und entspricht den Erwartungen.

Dies bedeutet in Kombination mit dem Verlauf des mittleren Entladestroms über der Temperatur, dass die umgesetzte Ladungsmenge je Teilentladungsereignis nahezu temperaturunabhängig ist.

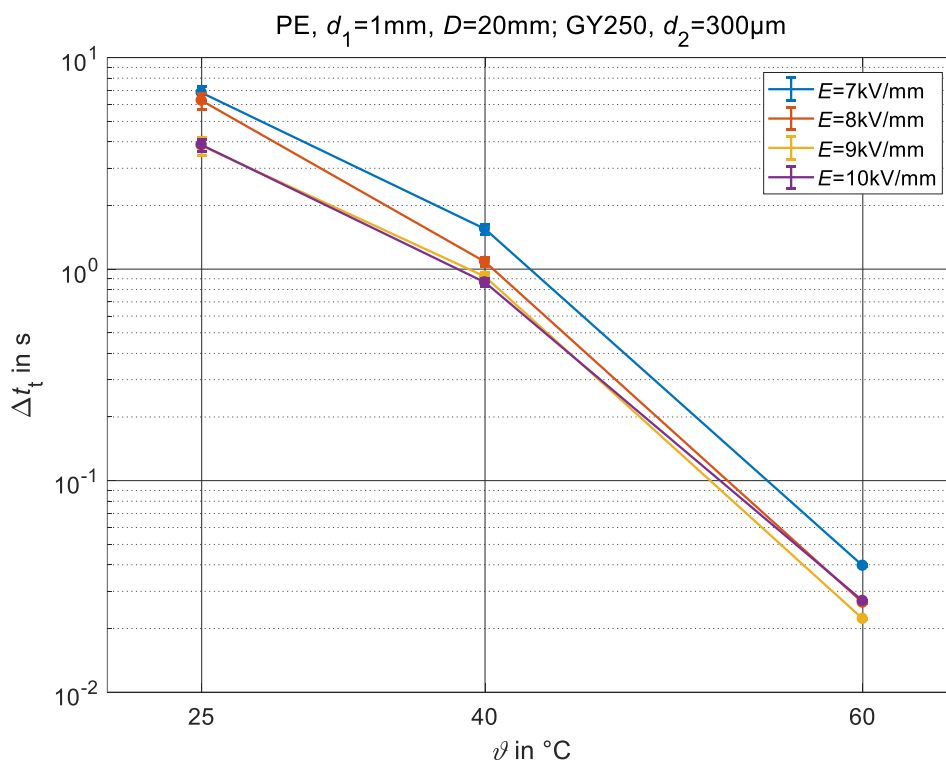


Abbildung 51 Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen über der Temperatur für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Die in Abbildung 51 gezeigten Messergebnisse des zeitlichen Abstandes zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen weisen ebenso wie der in Abbildung 50 gezeigte mittlere Entladestrom nur sehr geringe feldstärkeabhängige Abweichungen auf, welche für Teilentladungsmessungen unter Gleichspannungsbelastung als sehr klein zu betrachten sind. Fast immer entspricht die Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke der Erwartung, das heißt je höher die elektrische Feldstärke in der Fehlstelle, desto größer der mittlere Entladestrom und desto kleiner die Zeit zwischen den aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen. Da für jeden Messpunkt der Prüfkörperaufbau mit frisch depolarisierten Folien neu aufgebaut wird, lässt sich damit die gute Prüfkörperpräparation und die robust wiederholbare Versuchsdurchführung bestätigen.

5.2.6 Einfluss der relativen Feuchte der Luft

Nach dem Temperatureinfluss soll abschließend der Einfluss der relativen Feuchte der Luft auf das Teilentladungsverhalten untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Isolierstoffe bei verschiedenen relativen Feuchten vorkonditioniert. Wie in Vorarbeiten am Lehrstuhl nachgewiesen wurde, erhöht Feuchtigkeit im Epoxidharzformstoff die spezifische Volumenleitfähigkeit und den Stromfluss bei anliegender Potentialdifferenz über dem Isolierstoff und somit den Abbau der an der Lunkergrenzfläche akkumulierten Ladungsträger. Die Diffusion der Feuchte in den Isolierstoff erfolgt gemäß dem Fickschen Diffusionsgesetz [LUT-10].

Da die Diffusion der Feuchte in den Isolierwerkstoff aufgrund des Stofftransports lange dauert, wird nach Änderung der relativen Feuchte der Luft der geöffnete Prüfkörper für mindestens zwei Wochen im Klimaschrank konditioniert. Dabei wird er komplett zerlegt gelagert, damit die Diffusion von beiden Seiten in die einzelnen Lagen des Sandwich-Prüfkörpers erfolgen kann. Damit der gesamte Prüfaufbau im Feuchtegleichgewicht ist, wird auch die relative Feuchte der Luft in der Fehlstelle durch die Montage des Prüfkörpers im Ofen bei nur leicht geöffneter Tür durchgeführt. Vor Durchführung der Teilentladungsmessungen wird der Prüfkörper nochmals eine Stunde im Klimaschrank gelagert.

Dominante Einflussfaktoren auf die Teilentladungsaktivität sind die Bereitstellung von lawinenwirksamen Anfangselektronen einerseits sowie der Abbau der akkumulierten Ladung andererseits. Diese beide Vorgänge hängen von der spezifischen Leitfähigkeit des festen Isolierstoffs ab. Da die Feuchte des Isolierstoffs in der gegebenen Anordnung nicht gemessen werden kann wird stattdessen hilfsweise die relative Feuchte der umgebenden Luft zur Auswertung herangezogen. Durch die lange Lagerung der Prüfkörper bei konstanten Bedingungen kann angenommen werden, dass der stationäre Zustand der Feuchteverteilung vor der Messung erreicht wurde.

Der mittlere Entladestrom steigt bei Erhöhung der relativen Feuchte der Luft von 30 % auf 50 % vor allem für elektrische Feldstärken von 7 kV/mm und 10 kV/mm, wie Abbildung 52 zeigt. Bei einer weiteren Erhöhung der relativen Feuchte der Luft auf 70 % steigt der mittlere Entladestrom näherungsweise feldstärkeunabhängig um fast eine Größenordnung an.

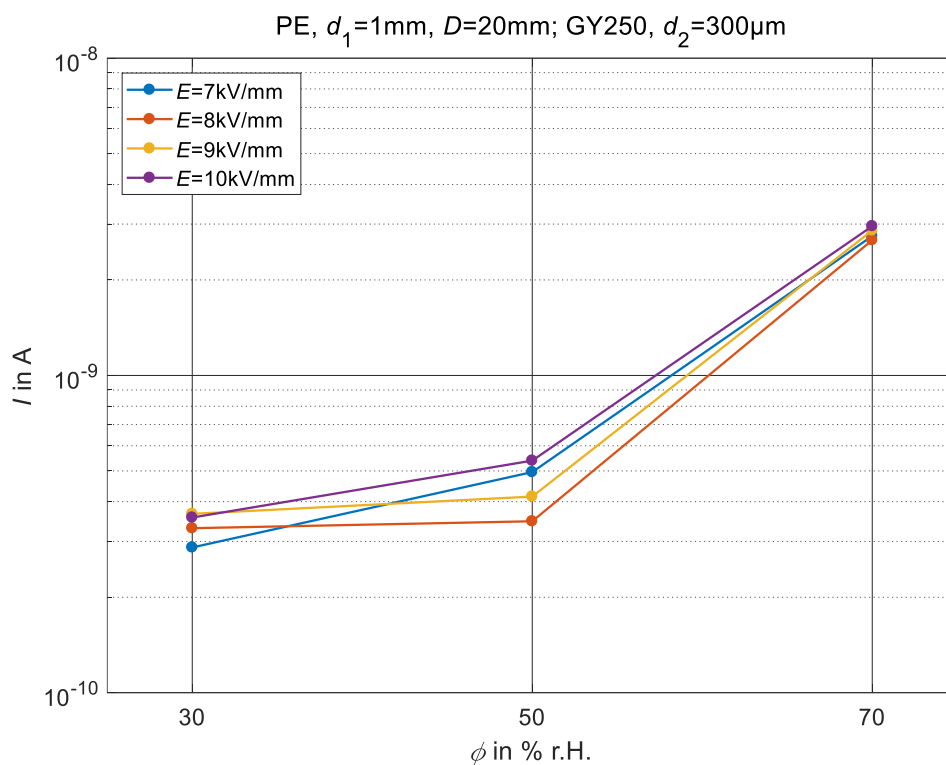


Abbildung 52 Mittlerer Entladestrom über der relativen Feuchte der Luft Φ für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten wird auch beim Einfluss der relativen Feuchte der Luft mittels der Zeitdifferenz aufeinanderfolgender Teilentladungen gezeigt, dass vor allem die Erhöhung der Teilentladungshäufigkeit und nicht die Vergrößerung der Ladung der einzelnen Teilentladungsereignisse ursächlich für die Erhöhung des mittleren Entladestroms ist.

Die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen sinkt bei Erhöhung der relativen Feuchte der Luft von 30 % auf 50 % leicht, vor allem bei einer elektrischen Feldstärke von 7 kV/mm, siehe Abbildung 53. Dies zeigt sich auch in dem überproportionalen Anstieg des mittleren Entladestromes bei diesen Parametern, siehe Abbildung 52. Bei elektrischen Feldstärken von 8 kV/mm und 9 kV/mm steigt der mittlere Entladestrom bei diesem Anstieg der relativen Feuchte der Luft nicht nennenswert, die Zeit

zwischen den einzelnen Teilentladungen nimmt jedoch leicht ab (8 kV/mm) beziehungsweise merklich ab (9 kV/mm). Somit verringert sich die Ladung pro Teilentladungsereignis bei einer elektrischen Feldstärke von 9 kV/mm bei einer Erhöhung der relativen Feuchte der Luft auf 50 %. Dies deutet darauf hin, dass die feuchtigkeitsbedingte erhöhte spezifische Volumenleitfähigkeit bei einer elektrischen Feldstärke von 7 kV/mm die Zeit bis zum nachfolgenden Teilentladungsereignis dominiert. Bei höheren elektrischen Feldstärken können möglicherweise noch weitere Effekte, wie zum Beispiel Ladungsverteilungslawinen entlang der Lunkeroberfläche, das zeitliche Verhalten der Teilentladungsaktivität zusätzlich beeinflussen.

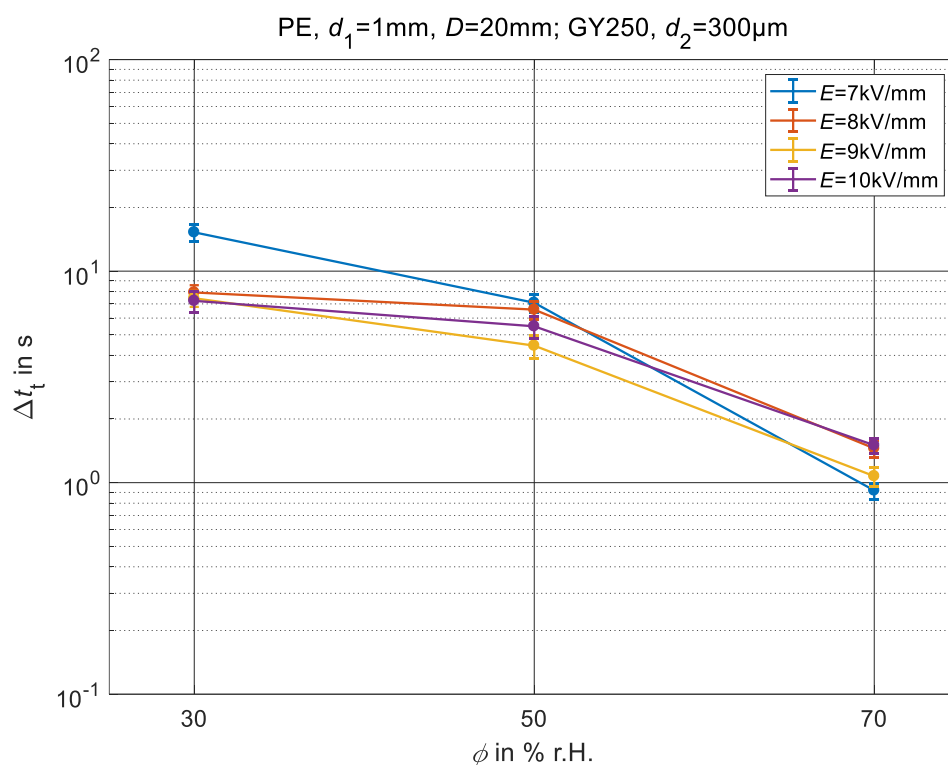


Abbildung 53 Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungsereignissen über der relativen Feuchte der Luft ϕ für verschiedene Feldstärken in der Fehlstelle. 30 Minuten Messdauer, beginnend zehn Minuten nach der Spannungszuschaltung

Bei der Erhöhung auf 70 % relative Feuchte der Luft unterscheidet sich die Zeit zwischen den Teilentladungsereignissen im Mittel um weniger als den Faktor zwei, der mittlere Entladestrom sogar nur um einige Prozent für elektrische Feldstärken zwischen 7 kV/mm und 10 kV/mm.

Es wird vermutet, dass die Anfangselektronenbereitstellung bei höherer relativer Feuchte der Luft vereinfacht wird. Dies betrifft sowohl die Ionisation im Gasraum als auch die Bereitstellung lawinenwirksamer Anfangselektronen durch Oberflächenprozesse [LEM-91].

Dies sorgt für einen Teilentladungseinsatz zeitnah nach Überschreitung der Zündfeldstärke, sodass nur eine geringe Überspannung vorliegt und die Streuung der Parameter Ladung und Zeitdifferenz vergleichsweise gering ist.

5.3 Ortsaufgelöste Teilentladungsmessung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der ortsaufgelösten Teilentladungsmessung vorgestellt. Es handelt sich hierbei einerseits um eindimensional orts- und zeitaufgelöste Messergebnisse, welche während der Spannungsbelastung mittels der UV-sensitiven Kamera aufgezeichnet werden und andererseits um zweidimensional ortsaufgelöste Messergebnisse, welche mittels elektrostatischem Voltmeter nach Ende der Spannungsbelastung und Öffnen des Sandwich-Prüfkörpers, bestehend aus UV-transparenter Mittelplatte und zwei Isolierstofffolien an den Elektroden anliegend, ermittelt werden. Die letztgenannte Messung benötigt einerseits Zeit für die Vorbereitung des Prüfkörpers, andererseits dauert die Abtastung des Prüfkörpers mit einer Schrittweite von 2 mm circa 15 Minuten. Daher muss die Ladungsabbaugeschwindigkeit zuerst untersucht werden, damit beurteilt werden kann, ob und wie die Messwerte korrigiert werden müssen.

5.3.1 Ladungsträgerabbau

In Kapitel 2.3 wird beschrieben, dass der Abbau der Ladungsträger entweder durch die Volumen- oder die Oberflächenleitfähigkeit entlang des Dielektrikums oder durch Rekombination mit beziehungsweise Neutralisation durch Ionen aus dem Gasraum erfolgen kann. In Vorarbeiten wurde aufgezeigt, dass je nach Abbauart der Ladung sich ihre Verteilung charakteristisch einstellt [KIN-08]. Bei den Messungen zeigt sich ein glockenförmiger Verlauf des Oberflächenpotentials und somit der akkumulierten Ladung ohne nennenswerte Änderung der Verteilungsform während des Abbaus. Dieses Verhalten wird in der Literatur als Zeichen des Ladungsträgerabbaus durch die Volumenleitfähigkeit des Isolierstoffs interpretiert [KIN-08].

Durch das Öffnen des Prüfkörpers, welches systembedingt vor der Messung des Oberflächenpotentials erfolgen muss, werden die beiden mit Ladungen belegten Grenzflächen getrennt und die obere Elektrode samt Isolierstofffolie entfernt. Daher wird zuerst die untere, nicht bewegte Folie gemessen. Anschließend wird fallweise die Elektrode samt Folie ausgewechselt. Dann ist aber der obere Teil des Prüfkörpers zwei Mal bewegt worden, was trotz sorgfältiger Arbeit das Messergebnis verfälschen kann.

Durch Wechsel der Einbaurichtung der Gleichrichtungsdioden kann die Polarität der Prüfspannung gewechselt werden, sodass Untersuchungen mit beiden Polaritäten der unterseitigen Elektrode durchgeführt werden können.

Zuerst wird die Ladungsträgerverteilung auf der Unterseite des Prüfkörpers für mehrere Stunden regelmäßig gemessen, letztmalig nach 24 Stunden. Der Potentialabfall am Punkt mit dem ursprünglich betragsmäßig höchsten Potential wird in Abbildung 54 gezeigt. Aus Darstellungsgründen sind nur die ersten 15 Messungen während den ersten 4,5 Stunden dargestellt. Der Zeitpunkt Null markiert das Ausschalten der Klemmenspannung am Prüfkörper.

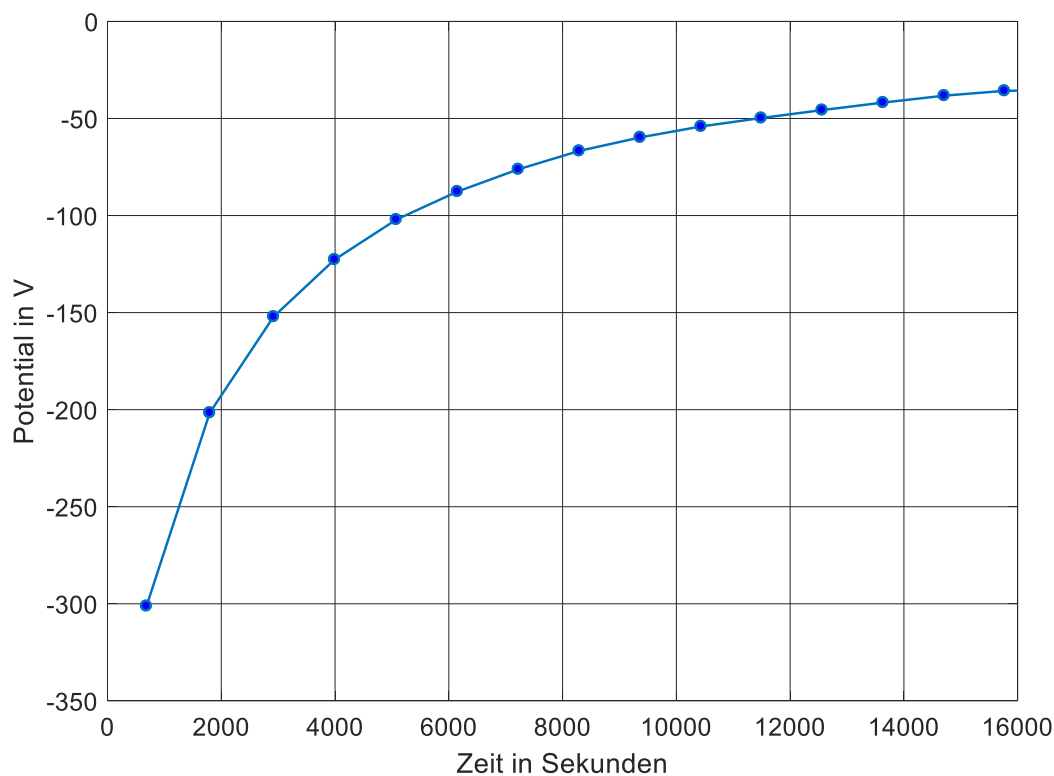


Abbildung 54 Verlauf des Potentials an einem ausgewählten Punkt (betragsmäßig höchstes Potential während der ersten Oberflächenpotentialmessung nach Abschalten der Klemmenspannung und Öffnen des Prüfkörpers)

An drei weiteren, zufällig ausgewählten Punkten ergibt sich ein ebensolcher näherungsweise exponentiell abfallender Verlauf des Oberflächenpotentials. Somit ist der Ladungsträgerabbau durch den Isolierstoff der dominante Prozess.

Wie in den Kapiteln 5.2.5 und 5.2.6 schon ermittelt wurde und aus Vorarbeiten bekannt ist, verursacht eine Erhöhung der Temperatur und der relativen Feuchte der Luft eine Beschleunigung des Ladungsträgerabbaus. Sämtliche Messungen in diesem und den folgenden Kapiteln wurden daher bei möglichst geringer relativer Feuchte (zwischen 15 % und 22 %) der Luft durchgeführt. Dadurch soll ein möglichst langsamer Ladungsträgerabbau und somit eine möglichst genaue Messung der akkumulierten Ladung gewährleistet werden.

Es wird eine Zeitkonstante des Abbaus der akkumulierten Ladungsträger an 20 μm starken PA6-Folien bei Raumtemperatur und ca. 25 % relativer Feuchte der Luft um 4.000 Sekunden ermittelt. Dies entspricht etwas über einer Stunde und ermöglicht kurzzeitige Messungen im Minutenbereich ohne Kompensation des Abbaus der Ladungen.

Im Rahmen der Inbetriebnahme des Messsystems wurden zwei Leermessungen durchgeführt. Einerseits wurde die geerdete Elektrode mit der Oberflächenpotentialmesssonde abgetastet, wodurch das Messrauschen zu $\pm 4\text{ V}$ ermittelt werden konnte. Dies ist im Vergleich zu den maximal gemessenen Signalen sehr klein (circa 1 %) und kann daher vernachlässigt werden, was die folgenden Ergebnisgraphen so auch nahelegen. Andererseits wurde die Elektrode samt neuer, depolarisierter PET-Folie mit 190 μm Stärke abgetastet. Die hierbei erzielten Messwerte schwanken vereinzelt zwischen $\pm 6\text{ V}$, sind jedoch meist nicht größer im Vergleich zur Messung ohne Folie. Somit ist sichergestellt, dass die nachfolgend gemessenen Oberflächenpotentiale aufgrund der durch vorangegangene elektrische Belastungen akkumulierten Ladungen entstanden sind.

5.3.2 Einfluss der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit

Im nächsten Schritt soll der Einfluss der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit auf die zweidimensionale Verteilung der akkumulierten Ladung betrachtet werden. Hierfür wird die Klemmenspannung mit der langsamst möglichen Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von circa 1 kV/s hochgefahren, bis mittels des konventionellen Teilentladungsmesssystems Teilentladungen detektiert werden. Anschließend wird die Klemmenspannung mit der höchstmöglichen Änderungsgeschwindigkeit wieder heruntergefahren, der Prüfkörper geöffnet und das Oberflächenpotential abgetastet.

Im zweiten Experiment wird die Spannung stufenweise angehoben. Hierzu wird die Primärspannung in kleinstmöglichen Schritten (jeweils eine Windung des Stelltransformators) erhöht. Dies entspricht einer Klemmenspannungsänderung von circa 300 V. Anschließend wird circa zehn Sekunden gewartet, dann wird die Spannung abermals erhöht. Bei Annäherung an die Teilentladungseinsetzspannung wird die Wartezeit pro Stufe auf circa 30 Sekunden erhöht. Nach Auftritt der ersten Teilentladung wird die Klemmenspannung schnellstmöglich heruntergefahren und die Messung des Oberflächenpotentials gestartet. Üblicherweise tritt hierbei jedoch nicht nur ein, sondern einige wenige Teilentladungsereignisse auf.

Hohe Spannungssteigerungsgeschwindigkeit (ca. 1 kV/s)

Es ergibt sich reproduzierbar über die gesamte Fehlstelle ein Oberflächenpotential, welches mehrere Maxima und Minima aufweist. Die Maxima befinden sich sowohl an den

Rändern als auch in der Fehlstellenmitte. Sie weisen wiederholbar ein um circa ein Drittel höheres Oberflächenpotential im Vergleich zu den Minima auf. Die Abbildung 55 zeigt den Verlauf des Oberflächenpotentials zweidimensional über der gesamten Fehlstelle der Größe 20 mm x 80 mm sowie über einen in x-Richtung 10 mm und in y-Richtung 6 mm breiten Randstreifen. Dieser wird zusätzlich gemessen, da einerseits die Ausbreitung der Ladung untersucht werden soll. Andererseits ist eine genaue Positionierung vor allem der oberen Elektrode samt Folie, welche nach der Teilentladungsmessung zur Oberflächenpotentialmessung an Stelle der Erdelektrode gebracht wird, anfällig für Positionsabweichungen.

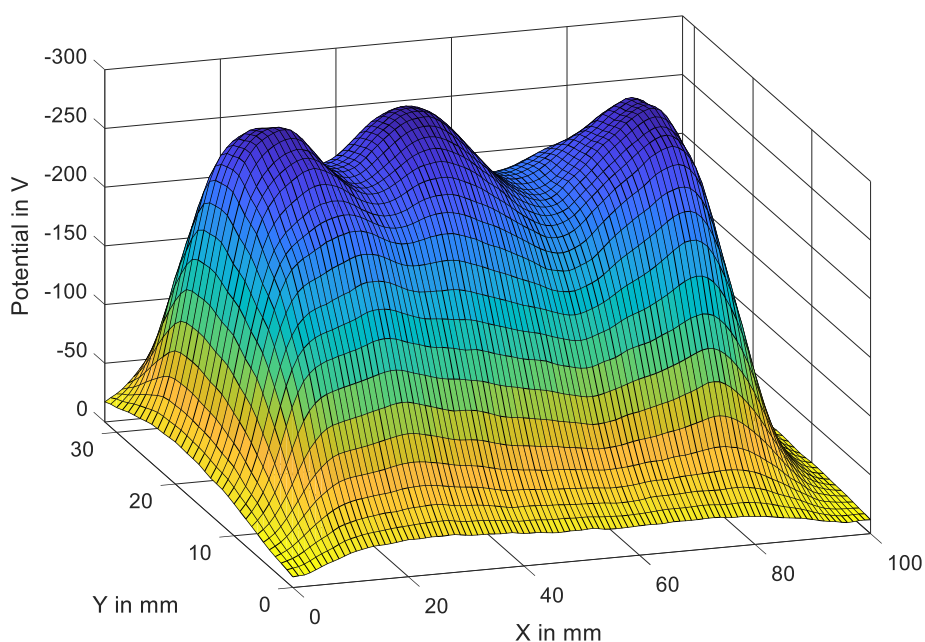


Abbildung 55 Zweidimensionale Oberflächenpotentialverteilung der unteren Folie nach ersten Teilentladungen bei vergleichsweise schneller Spannungssteigerung mit negativer Polarität; erste Messung nach Spannungsabschaltung und Öffnung des Prüfkörpersandwichs, 20 μm starke PA6-Folie

Bei der in Abbildung 55 gezeigten Messung, welche direkt nach Abschaltung der Klemmenspannung und Öffnung des Prüfkörpers durchgeführt wird, zeigt sich im Bereich der gesamten Fehlstelle ein deutlich erhöhtes Oberflächenpotential mit drei lokalen Maxima. Zwei davon befinden sich nahe zu den Rändern der Fehlstelle, das dritte zentral. Dies kann mit Feldüberhöhungen an den Kanten der Fehlstelle erklärt werden.

Die in Abbildung 55 genutzte Darstellung der Oberflächenpotentialverteilung ist sehr anschaulich, hat jedoch den Nachteil, dass mit einem Bild nicht die gesamte Ladungsdichteverteilung sichtbar ist, da der hintere Bereich (hohe Werte der X- und Y-Achse) durch die

hohen Werte im zentralen Bereich verdeckt wird. Daher wird hier, analog zur Kartografie, eine Darstellung mit Isolinien gewählt. Die Isopotentiallinien erlauben eine Darstellung der Potentialverteilung über der gesamten Fehlstellenoberfläche. Die Abstufung wird so gewählt, dass eine möglichst übersichtliche und genaue Darstellung der Ergebnisse möglich ist, das heißt in den Randbereichen mit hohem räumlichen Potentialgradienten ist der Abstand der Isopotentiallinien groß gewählt, im zentralen Fehlstellenbereich mit geringem räumlichen Potentialgradienten ist der Abstand wesentlich kleiner, sodass hier auch geringere Änderungen sichtbar werden.

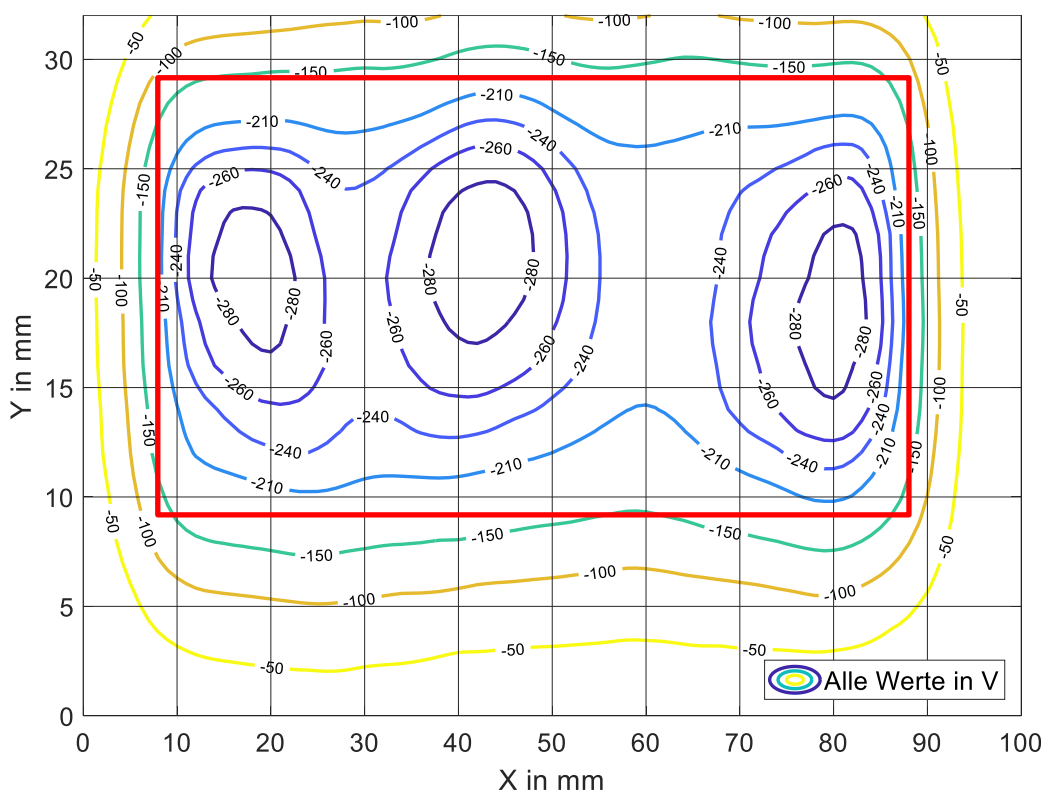


Abbildung 56 Zweidimensionale Oberflächenpotentialverteilung der unteren Folie nach ersten Teilentladungen bei vergleichsweise schneller Spannungssteigerung mit negativer Polarität in Isopotentialdarstellung; erste Messung nach Spannungsabschaltung und Öffnung des Prüfkörpersandwichs, 20 µm starke PA6-Folie; Rot: Fehlstellengeometrie

Abbildung 56 zeigt die schon in Abbildung 55 dargestellten Messdaten. Dabei wird deutlich, dass der gemessene Bereich nicht zentriert über der Fehlstelle liegt und die Darstellung des oben besprochenen Randbereichs somit sinnvoll ist. Außerdem ist erkennbar, dass der Potentialgradient im Bereich des Fehlstellenrandes an allen Seiten ähnlich ist. Ebenso ist der Potentialgradient im Bereich um die drei Spitzenwerte jeweils ähnlich.

Dies lässt die Vermutung aufkommen, dass die physikalischen Prozesse der Ladungsdichteverteilung bei der Akkumulation jeweils gleich sind. Das orts aufgelöste Oberflächenpotential auf der Folie an der oberseitigen Elektrode zeigt Abbildung 57. Zur Reduktion des unerwünschten Abbaus der akkumulierten Ladung wurde beim Vorbereiten der Oberflächenpotentialverteilungsmessung der Fokus auf einen zügigen Umbau des Prüfkörpersandwichs bei möglichst geringer Anzahl an Handgriffen gelegt. Eine Verdrehung der unteren Folie um circa 8° im Uhrzeigersinn mit Drehachse nahe des rechten Fehlstellenrandes wurde daher in Kauf genommen. Eine Neuausrichtung kann erst nach Aufzeichnung und Auswertung der ersten Messung erfolgen, sodass nach dieser Zeit der Ladungsabbau schon fortgeschritten ist.

Es zeigt sich eine ähnliche Verteilung des Oberflächenpotentials wie auf der Unterseite in Bezug auf den Maximalwert, die Gesamtausbreitung (Fehlstellengröße) und die drei Maxima. Allerdings nimmt das Potential der Maxima von links nach rechts signifikant zu. Dies kann nicht durch die Abtastung zu unterschiedlichen Zeitpunkten begründet werden, da diese zeilenweise erfolgt. Das heißt, es wird immer 100 mm in x-Richtung abgetastet, dann in y-Richtung versetzt und in $-x$ -Richtung zurückgefahren. Somit ist der Einfluss des Messzeitpunktes in x-Richtung kompensiert und tritt nur in y-Richtung auf.

Auch das Tal zwischen den beiden rechten Maxima ist nur sehr schwach ausgeprägt im Vergleich zur in Abbildung 56 dargestellten Unterseite. Außerdem fällt vor allem im Bereich der rechten Maxima anhand der teilweise geknickt verlaufenden Isopotentiallinien auf, dass auf der oberseitigen Folie die Potentialverteilung nicht so glatt ist. Dies lässt sich auf die polaritätsabhängig unterschiedliche Verteilung der Ladungsträger bei der Akkumulation zurückführen. Elektronen und Ionen unterscheiden sich bezüglich ihrer Masse um mehrere Größenordnungen. In der Literatur wird angenommen, dass die leichten Elektronen in oberflächennahen Haftstellen gefangen werden, während die schweren positiven Ionen auf der Oberfläche verbleiben [THO-50].

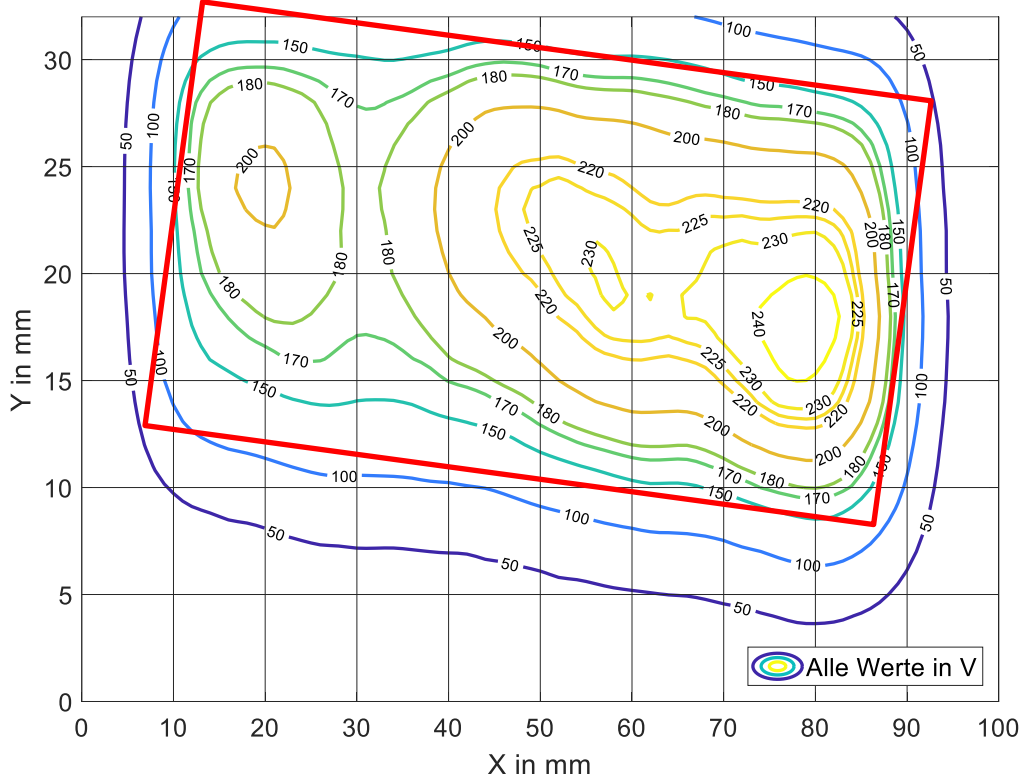


Abbildung 57 Zweidimensionales Oberflächenpotential der oberen Folie nach ersten Teilentladungen bei vergleichsweise schneller Spannungssteigerung mit negativer Polarität in Isopotentialdarstellung; erste Messung nach Spannungsabschaltung, Öffnung des Prüfkörpersandwichs, Messung des Oberflächenpotentials der unterseitigen Folie und Umbau des Prüfkörpersandwichs, 20 μm starke PA6-Folie
 Rot: Fehlstellengeometrie (circa 8° im Uhrzeigersinn verdreht gegenüber Abbildung 56)

Werden nun die Isopotentialdarstellungen der Unterseite (blau durchgezogen, aus Abbildung 56) und der Oberseite (rot gestrichelt, aus Abbildung 57) übereinandergelegt, so ergibt sich die in Abbildung 5 gezeigte Darstellung.

Neben der bereits erwähnten Drehung der Oberseite fällt auf, dass der Bereich der akkumulierten Ladung ober- und unterseitig näherungsweise gleich groß und ähnlich ausgeprägt ist. Daraus lässt sich rückschließen, dass die Fehlstellenränder die Ladungsverteilung der Elektronen und Ionen nahezu gleich behindern und die Oberflächenleitfähigkeit zu gering ist, als dass eine weitere Verteilung der akkumulierten Ladung an den Folienoberflächen außerhalb der Fehlstelle stattfinden kann. Die beiden Maxima am Rand liegen unter Berücksichtigung der Drehung übereinander.

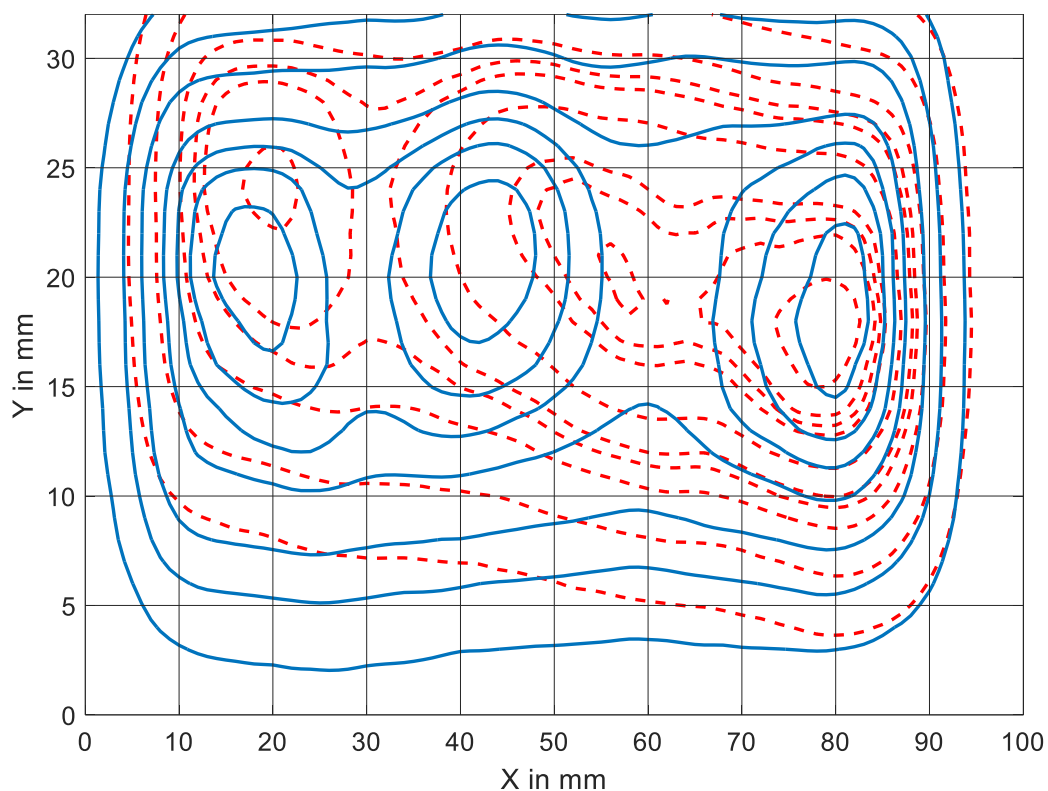


Abbildung 58 Zweidimensionale Oberflächenpotentialverteilung nach ersten Teilentladungen bei vergleichsweise schneller Spannungssteigerung in Isopotentialdarstellung.
 Blau durchgezogen: Erste Messung nach Spannungsabschaltung und Öffnung des Prüfkörpersandwichs (Unterseite)
 Rot gestrichelt: Erste Messung nach Spannungsabschaltung und Umbau des Prüfkörpersandwichs (Oberseite)

Im Widerspruch hierzu steht das Potential im mittleren Bereich. Hier ist das Maximum auf der oberen Folie wesentlich näher am rechten Maximum, sodass sich dazwischen nur eine kleine Potentialabsenkung befindet. Auf der Unterseite jedoch ist das Maximum um circa 15 mm nach links verschoben und weist zu den beiden anderen Maxima klare Abgrenzungen durch Potentialabfall auf. Die durch Teilentladungsaktivität generierten Ladungsträger werden immer entlang der elektrischen Feldlinien beschleunigt, sodass die Maxima ober- und unterseitig daher deckungsgleich sein sollten. Möglicherweise wurde beim Umbau der Elektrode samt Folie versehentlich die Ladungsverteilung verändert.

Aufgrund der jahreszeitlich bedingten Erhöhung der relativen Feuchte der Luft im Labor konnte die Messung nach Entdeckung dieser Abweichung nicht mehr wiederholt werden.

Niedrige Spannungssteigerungsgeschwindigkeit (stufenförmig mit ca. 10 V/s)

Bei niedrigerer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit beträgt die Spannungsänderung im Mittel circa 10 V/s und ist insbesondere während der statistischen Streuzeit geringer. Daher erfolgt einerseits der Teilentladungseinsatz bei niedrigerer Spannung und andererseits ist aufgrund der geringeren Überspannung die umgesetzte Ladung im Mittel zwischen 30 % und 50 % geringer. Dies zeigt sich beim Vergleich der Ergebnisse bei Messungen mit unterschiedlichen Spannungssteigerungsgeschwindigkeiten, bei denen sich die Maximalwerte des Oberflächenpotentials um den Faktor zwei unterscheiden.

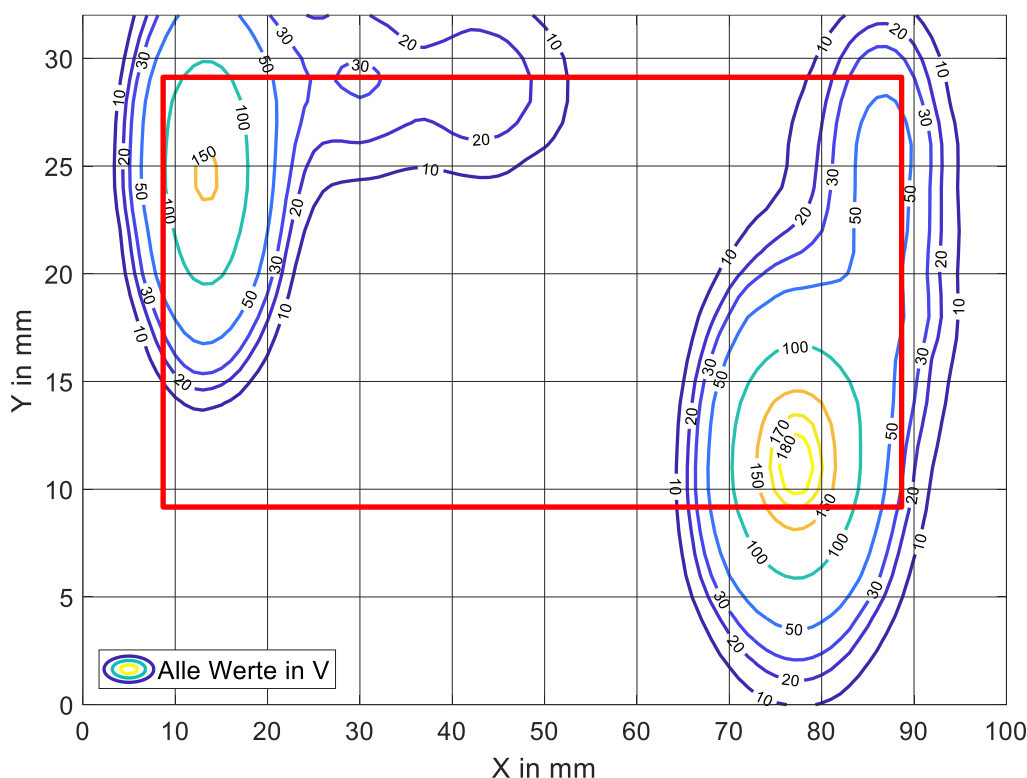


Abbildung 59 Zweidimensionale Oberflächenpotentialverteilung der unteren Folie nach ersten Teilentladungen bei vergleichsweise langsamer Spannungssteigerung mit positiver Polarität in Isopotentialdarstellung; erste Messung nach Spannungsabschaltung und Öffnung des Prüfkörpersandwichs, 20 µm starke PA6-Folie; Rot: Fehlstellengeometrie

Bei der in Abbildung 59 gezeigten orts aufgelösten Oberflächenpotentialverteilung der unteren Isolierstofffolie zeigt sich, dass die Teilentladungen meist am Rand stattfanden. Es zeigen sich zwei große Maxima. In deren Nähe treten noch zwei (linke Teilentladungsregion) lokale Maxima oder ein (rechte Teilentladungsregion) lokales Maximum auf. Das

Oberflächenpotential im mittleren Bereich der Fehlstelle ist im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen klein, das heißt in diesem Bereich wurde nur wenig Ladung umgesetzt. Dies spricht für einzelne Entladungen, wie sie typisch für innere Fehlstellen unter Gleichspannungsbelastung sind.

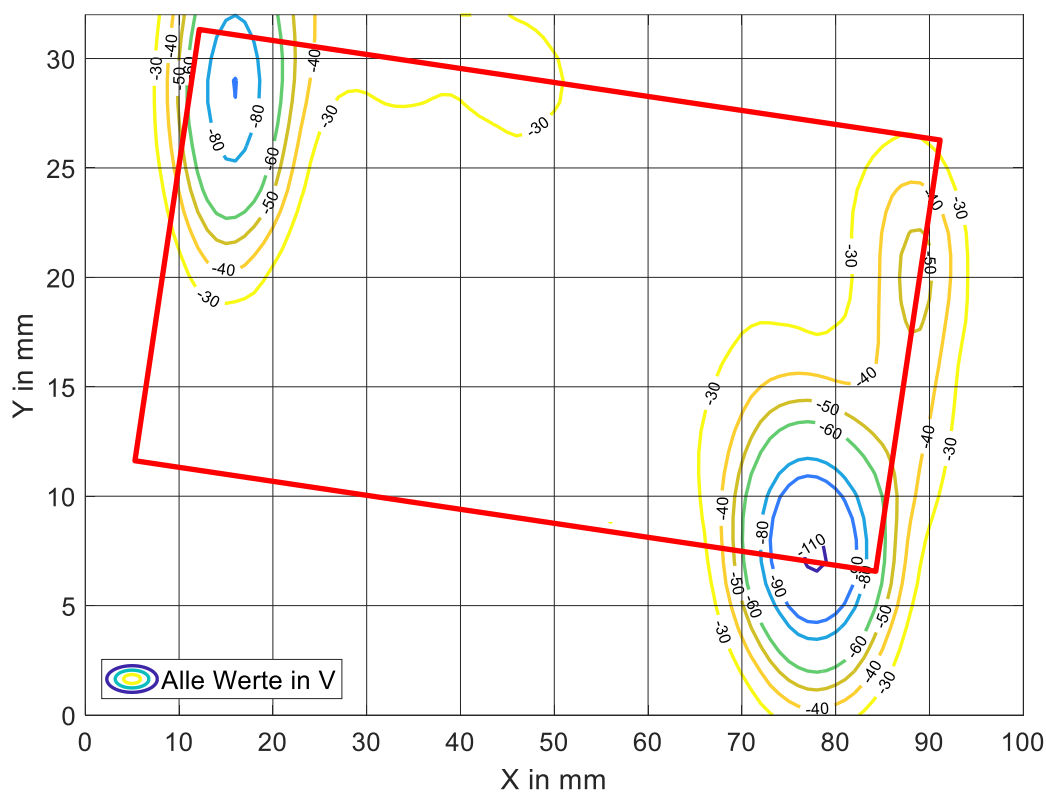


Abbildung 60 Zweidimensionale Oberflächenpotentialverteilung der oberen Folie nach ersten Teilentladungen bei vergleichsweise langsamer Spannungssteigerung mit positiver Polarität in Isopotentialdarstellung; erste Messung der oberen Folie nach Spannungsabschaltung, Öffnung des Prüfkörpersandwichs, Messung des Oberflächenpotentials der unterseitigen Folie und Umbau des Prüfkörpersandwichs, 20 μm starke PA6-Folie
Rot: Fehlstellengeometrie (circa 8° im Uhrzeigersinn verdreht gegenüber Abbildung 59)

Die Oberflächenpotentialverteilung der oberen Folie ist wiederum um 8° im Uhrzeigersinn im Vergleich zur unteren Folie gedreht. Allerdings ist die Rotationsachse nun zentral in der Fehlstellenmitte. In Abbildung 60 sind auch wieder die beiden großen Maxima und die drei Nebenmaxima erkennbar. Aufgrund des späteren Zeitpunkts der Messungen sind die Absolutwerte um circa 40 % reduziert. Dies entspricht dem in Abbildung 54 gezeigten Potentialabbau über der Zeit, wenn neben dem Zeitbedarf für die Messung der unteren Folie auch noch der Zeitbedarf für den Umbau der Oberflächenpotentialmessung mit

eingerechnet wird. In Abbildung 60 ist eine sehr ähnliche Verteilung der akkumulierten positiven Ladung im Vergleich zur negativen Ladungsverteilung auf der unteren Folie in Abbildung 59 zu erkennen.

Werden nun die beiden Messergebnisse der unteren (blau durchgezogen in Abbildung 61) und der oberen Folie (rot gestrichelt in Abbildung 61) zusammengefasst, so ergibt sich (wiederum unter Berücksichtigung der Drehung) eine sehr gute Deckung aller Maxima. Dies entspricht der Theorie, dass die bei der Teilentladung generierten Ladungsträger entlang der elektrischen Feldlinien in der Fehlstelle beschleunigt werden und sich entsprechend an den Grenzflächen akkumulieren.

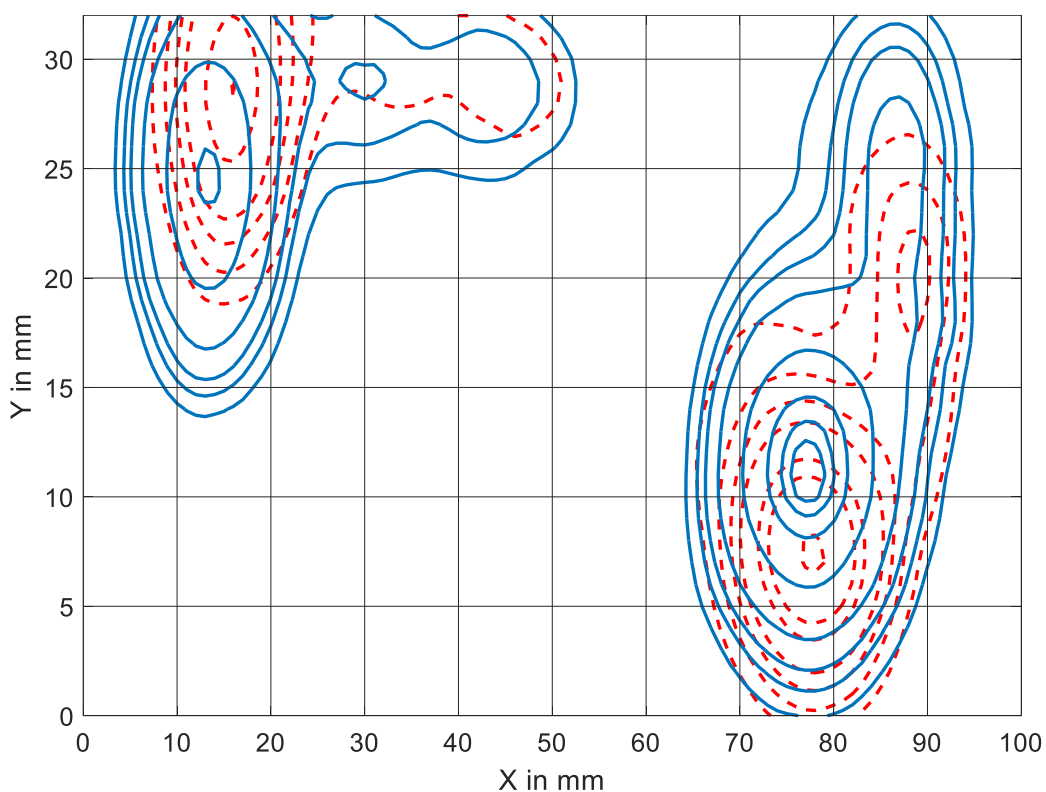


Abbildung 61 Zweidimensionales Oberflächenpotential nach ersten Teilentladungen bei vergleichsweise langsamer Spannungssteigerung in Iso-potentialdarstellung, jeweils erste Messung nach Spannungsabschaltung.
 Blau durchgezogen: Erste Messung nach Spannungsabschaltung und Öffnung des Prüfkörpersandwichs (Unterseite)
 Rot gestrichelt: Erste Messung nach Spannungsabschaltung und Umbau des Prüfkörpersandwichs (Oberseite)

Während der Spannungsbelastung wird neben der konventionellen Teilentladungsmessung auch mittels UV-sensitiver Kamera eine eindimensionale, optisch zeitaufgelöste Aufzeichnung der Teilentladungen durchgeführt. In Abbildung 62 ist oben die Ladungs-

dichtedarstellung der oberen und unteren Isolierstoffolie aus Kameraperspektive (eindimensional) dargestellt. Mittels der Gl. 82 kann die Ladungsdichte σ aus dem Oberflächenpotential φ bestimmt werden.

Darunter sind die drei ausgewählten Bilder der UV-sensitiven Kamera aufgeführt, welche das Auftreten der Teilentladungen zeigen. Es zeigt sich, dass hier erst nach Auftreten der dritten mit der UV-sensitiven Kamera sichtbaren Teilentladung (4,6 Sekunden nach der ersten Teilentladung) die Klemmenspannung heruntergefahren wurde und keine weitere Teilentladung mehr stattfand. Die Kameraaufzeichnung wird vor dem Erreichen der Teilentladungseinsetzspannung eingeschaltet.

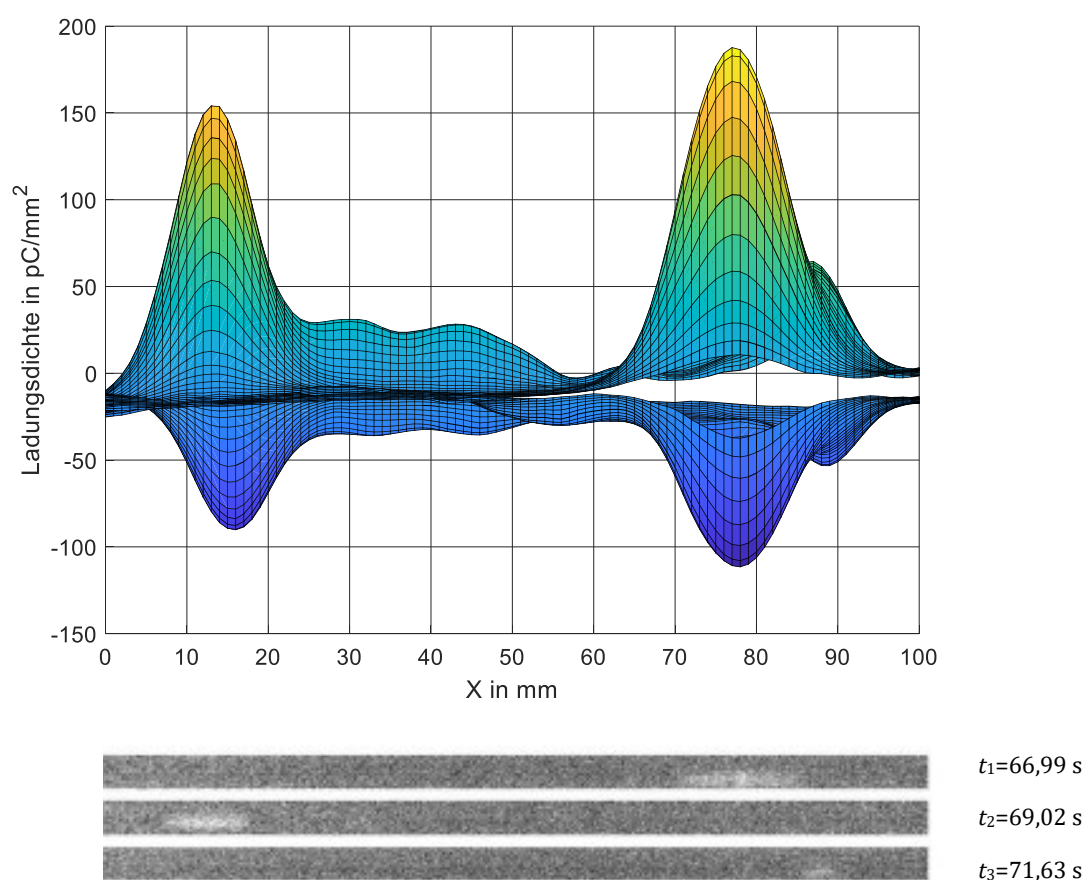


Abbildung 62 Ladungsdichteverteilung und Teilentladungsaktivität bei langsamer Spannungssteigerung
 Oben: Eindimensionale, ausgerichtete Darstellung der Ladungsdichteverteilung der oberen und unteren Isolierstoffolie, zwei je 20 μm starke PA6-Folien
 Unten: Die drei ausgewählten Bilder der UV-sensitiven Kamera, welche die Teilentladungsereignisse zeigen

In Abbildung 62 zeigt sich eine sehr gute örtliche Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Messverfahren. Knapp 67 Sekunden nach Einschalten nimmt die UV-sensitiven

Kamera eine Entladung im rechten Bildbereich auf. Diese korreliert örtlich mit den Maxima der Oberflächenpotentialverteilung beziehungsweise der Ladungsdichte, welche nach Abschalten der Spannung gemessen wird.

Weitere zwei Sekunden später registriert die Kamera ein Entladungsereignis im linken Bildbereich. An der entsprechenden Position kann bei der Oberflächenpotentialmessung nach Abschalten der Spannung ebenfalls ein lokales Maxima der Ladungsdichte festgestellt werden.

Das dritte Kamerabild zeigt eine vergleichsweise schwache Entladung ganz rechts. Diese korreliert mit einer kleineren Ladungsträgeransammlung an der gleichen Position.

5.3.3 Einfluss der Spannungshöhe

Im nächsten Schritt soll der Einfluss der Spannungshöhe auf die Art der Teilentladung untersucht werden. Hierzu wird primär die UV-sensitive Kamera genutzt, da bei höheren Klemmspannungen mehrere Teilentladungen direkt hintereinander stattfinden und die Oberflächenpotentialmessung aufgrund der Superposition der einzelnen Teilentladungen sowie der vermutlich ähnlichen Verteilung bei der Akkumulation diese Fragestellung nicht beantworten kann. Mittels der konventionellen Teilentladungsmessung wird die scheinbare Ladung der streamerartigen Teilentladungen bestimmt. Die townsendartigen Teilentladungen können teilweise mittels konventioneller Teilentladungsmesstechnik nicht erfasst werden [NIE-95].

Die folgenden Messungen werden an Prüfkörpern aus zwei je 25 μm starken PA6-Folien mit 2 mm Fehlstellenhöhe durchgeführt. Die relative Feuchte der Luft beträgt über 50 %, sodass die Leitfähigkeiten leicht erhöht sind und durch den hierdurch schnelleren Ladungsträgerabbau die Teilentladungsfrequenz etwas erhöht ist. Hierdurch werden innerhalb der durch den Bildspeicher begrenzten Zeit mehr Teilentladungen aufgezeichnet.

Zuerst wird eine Gleichspannung von 7,7 kV an den Prüfkörper angelegt. Diese Spannung ist knapp über der Teilentladungseinsetzspannung, weshalb die scheinbare Ladung vergleichsweise gering ist und nur einige Pikocoulomb beträgt. Während der Messdauer von 2,5 Minuten treten insgesamt vier Teilentladungen auf. Die ersten drei in Abbildung 63 gezeigten Teilentladungsereignisse treten innerhalb einer Minute auf und lassen sich aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung eindeutig als townsendartige Teilentladungen klassifizieren. Sie entladen fast den gesamten Bereich der Fehlstelle. Dank ihrer vergleichsweise großen scheinbaren Ladung lassen sie sich auch mit dem konventionellen Teilentladungsmesssystem aufzeichnen, sodass für sie auch die scheinbare Ladung als Messwert zur Verfügung steht. Kurz vor Ende der Messung findet nahe

des rechten Fehlstellenrandes eine weitere Teilentladung mit noch größerer scheinbarer Ladung statt.

Diese könnte, da ihre räumliche Ausdehnung wesentlich kleiner ist und ihre scheinbare Ladung größer als der in der Literatur als Grenzwert angegebene Wert der scheinbaren Ladung von 10 pC, auch als streamerartige Teilentladung klassifiziert werden [NIE-95].

Vor allem die ersten drei Teilentladungen zeigen, dass das elektrische Feld bedingt durch die akkumulierten Ladungen nach Teilentladungsereignissen inhomogen ist und nachfolgende Teilentladungen an einem anderen Ort stattfinden.

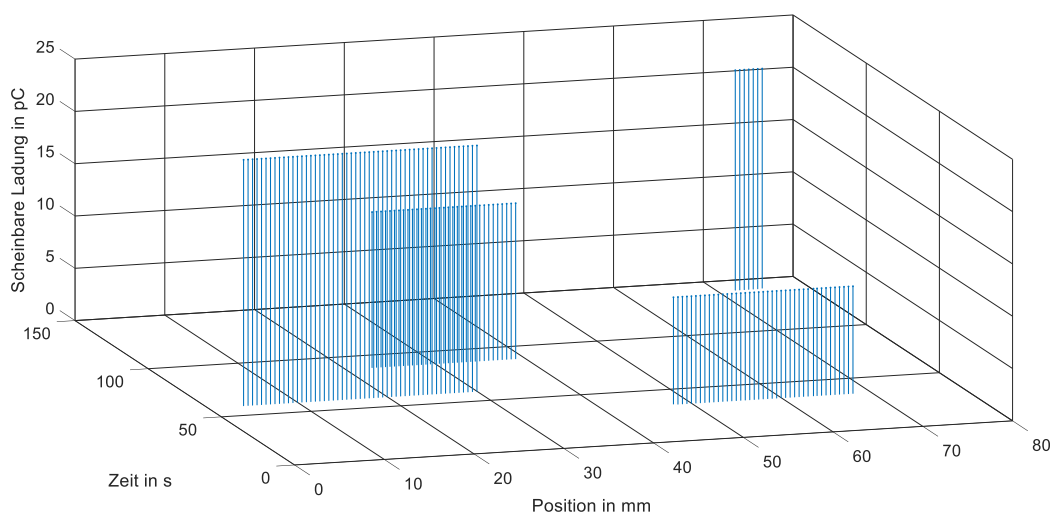


Abbildung 63 Zeitliche Abfolge und räumliche Verteilung der Teilentladungen bei einer Klemmenspannung von 7,7 kV. Prüfkörpersandwich mit 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je 25 μm starke PA6-Folien. Die Gruppe der Balken gibt den Bereich an, in welchem bei Auswertung der Kameraaufnahmen Teilentladungsaktivität detektiert wurde

Wird nun die Klemmenspannung des Prüfkörpers um 1 kV auf 8,7 kV erhöht, so treten wesentlich häufiger Teilentladungsereignisse auf. Diese sind örtlich nicht so stark ausgeht. Aufgrund der höheren Überspannung ist die umgesetzte Ladung größer, wie in Abbildung 64 erkennbar ist. Dies hat zwei Auswirkungen: Einerseits ist auch die an den Klemmen mit dem konventionellen Teilentladungsmesssystem aufzeichnenbare scheinbare Ladung höher und andererseits ist die Anzahl an Elektronen im Kopf der Teilentladungslawine höher. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit der Photoionisation, was letzten Endes zur Steigerung der Auftrittshäufigkeit streamerartiger Teilentladungen führt. Dies ist aus der Literatur bekannt [FRO-95].

In Abbildung 64 zeigt sich, dass die räumliche Ausdehnung der Teilentladungen bei höherer Klemmenspannung geringer ist, was auch für streamerartige Entladungen

spricht. Hierdurch bedingt wird der entladene Bereich kleiner, sodass in nicht entladenen Bereichen der Fehlstelle zeitlich im Anschluss Teilentladungen stattfinden können.

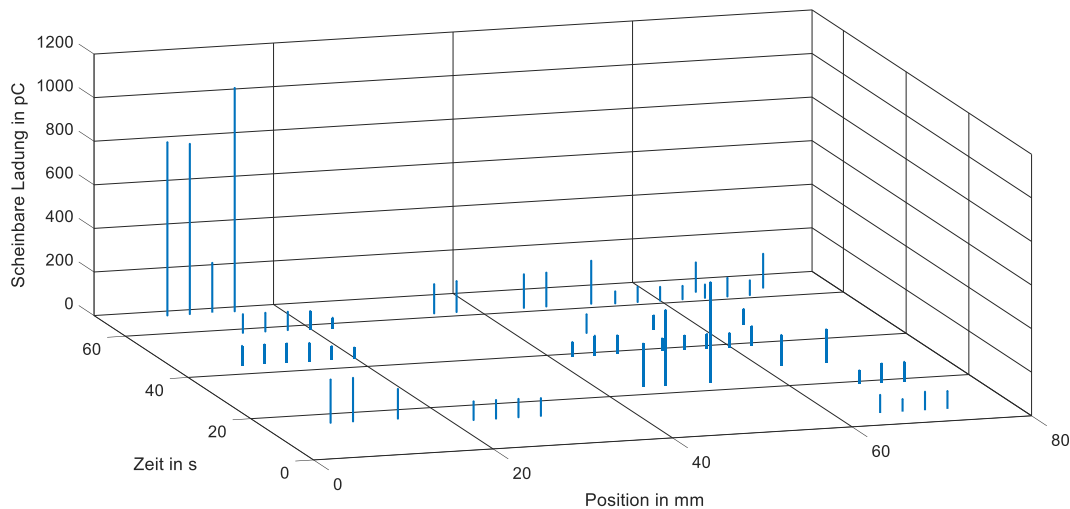


Abbildung 64 Zeitliche Abfolge und räumliche Verteilung der Teilentladungen bei einer Klemmenspannung von 8,7 kV. Prüfkörpersandwich mit 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je 25 μm starke PA6-Folien

In Abbildung 64 ist erkennbar, dass häufig Teilentladungen örtlich und zeitlich nahe beieinander stattfinden. Nach einem Teilentladungsereignis treffen die Ladungsträger mit hoher Dichte auf die Grenzfläche auf. Vor allem bei frischen, hochohmigen Grenzflächen treten bei höheren Spannungen Entladungen längs der Isolierstoffgrenzfläche und somit orthogonal zum externen elektrischen Feld auf. Hierdurch werden Elektronen generiert, welche, sofern sie sich an der kathodenseitigen Isolierstoffgrenzfläche befinden, möglicherweise als Startelektron fungieren können und daher aufeinanderfolgende Teilentladungen örtlich und zeitlich nahe beieinander stattfinden.

5.3.4 Alterungseffekte

Zur Untersuchung der Alterungseffekte wird der Prüfkörper zuerst für 30 Minuten mit 8,3 kV Gleichspannung positiver Polarität belastet und hierbei wird optisch und konventionell permanent die Teilentladungsaktivität überwacht. Simultan dazu nimmt die UV-sensitive Kamera Bilderserien auf. Aus Speichergründen sind diese Serien jeweils sechs Minuten lang. Diese werden in Abbildung 65 grün dargestellt, die beiden dunkelgrünen Bereiche zu Beginn und am Ende der Spannungsbelastung werden im Folgenden detailliert betrachtet. Die Spannungserhöhung und -erniedrigung erfolgt mit der geringstmöglichen konstanten Geschwindigkeit von circa 1 kV pro Sekunde.

Nach Abschaltung der Klemmenspannung wird die Oberflächenpotentialverteilung gemessen. Diese Messung wird in Abbildung 65 durch den orangenen Block dargestellt und im Folgenden näher betrachtet. Danach werden beide Elektroden samt den daran anhaftenden Isolierstofffolien für eine Woche bei 60 °C und 70 % relativer Feuchte der Luft im Klimaschrank zur Depolarisation gelagert. Anschließend wird die Oberflächenpotentialverteilung nochmals gemessen. Diese Messung wird im Folgenden nicht detailliert betrachtet und ist in Abbildung 65 hellorange dargestellt.

Nach dem Zusammenbau wird der Prüfkörper für 5 Minuten mit 7 kV Gleichspannung belastet. Nach einer weiteren Messung der Oberflächenpotentialverteilung wird er wiederum im Klimaschrank bei den bekannten Parametern für einen Tag depolarisiert.

Danach erfolgt nach einer weiteren Oberflächenpotentialmessung die finale Spannungsbelastung, bis die erste Teilentladung auftritt. Abschließend wird nochmals die Oberflächenpotentialverteilung gemessen. Abbildung 65 zeigt den Versuchsablauf mit den Messungen und relevanten Parametern.

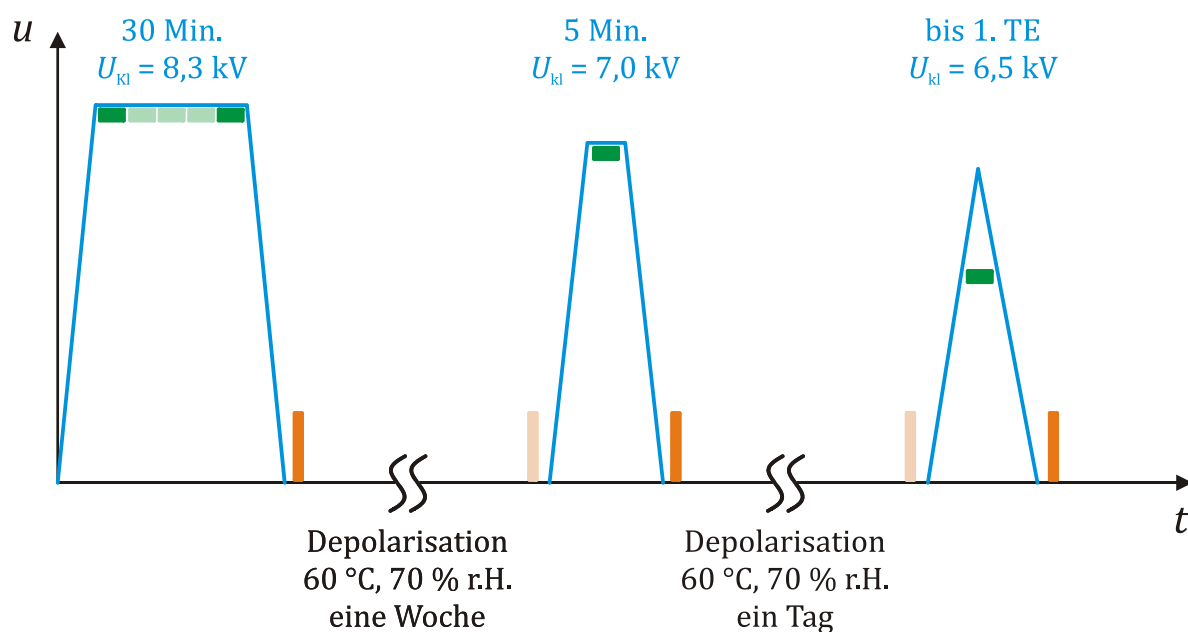


Abbildung 65 Zeitliche Abfolge der Messungen (grün: Optische Teilentladungsmessung, orange: Oberflächenpotentialmessung) und der Spannungsbelastung. Die dunkler markierten Messungen werden im Folgenden näher betrachtet

In der Literatur ist bekannt, dass sich bei Einwirkung von Teilentladungen die Oberflächenleitfähigkeit polymerer Isolierstoffe innerhalb kürzester Zeit drastisch verändert [GAM-88], [MAY-95], [FLO-18].

Während des Hochfahrens der Spannung treten vermehrt townsendartige Entladungen auf, wie in Abbildung 66 erkennbar ist. Aufgrund der hohen Spannungsänderungsrate ist

die mit dem konventionellen Teilentladungsmesssystem ermittelte scheinbare Ladung sehr groß. Dies sorgt für ein schnelles Erreichen der stationären Feldverteilung nach Ende der Spannungserhöhung. Nach Ende der Spannungssteigerung wird die erste Messung der UV-sensitiven Kamera gestartet. Nach circa 20 Sekunden treten dann überwiegend streamerartige Teilentladungen auf. Ebenso wie die townsendartigen Teilentladungen im nichtstationären Zustand zu Messbeginn, finden nachfolgende Teilentladungsereignisse an jeweils anderen Stellen der Fehlstelle statt. Diese räumliche Wanderung aufeinanderfolgender Teilentladungen ist das Resultat der Feldbeeinflussung durch die an den Isolierstoffgrenzflächen akkumulierten Ladungen, wie sie in Kapitel 2.3 vorgestellt wird.

Die scheinbare Ladung der streamerartigen, räumlich eng begrenzten Teilentladungen ist in der Regel kleiner als jene der weit ausgedehnten Teilentladungen zu Beginn der Messung.

In Abbildung 66 sind die während des ersten, fünfminütigen Messintervalls aufgezeichneten Teilentladungen dargestellt. Da nach etwas mehr als einer Minute die Teilentladungsaktivität ausblieb, werden in der Graphik nur die ersten 100 Sekunden dargestellt.

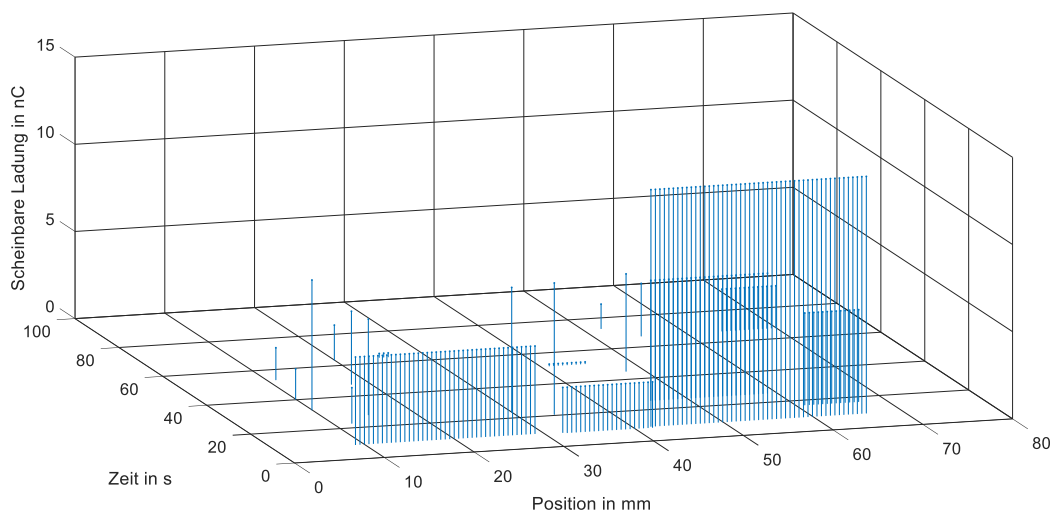


Abbildung 66 Zeitliche Abfolge und räumliche Verteilung der Teilentladungen bei der ersten Teilentladungsmessung bei der ersten Spannungsbelastung bei einer Klemmenspannung von 8,3 kV. Prüfkörpersandwich mit 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je 25 μm starke PA6-Folien

Nun soll die letzte Messung vor dem Herunterfahren der Klemmenspannung betrachtet werden. Diese wurde circa 25 Minuten nach der in Abbildung 66 gezeigten Messung aufgezeichnet.

Bei den in Abbildung 67 gezeigten Ergebnissen fällt auf, dass die Teilentladungsaktivität mit zunehmender Zeit der Spannungsbelastung rückläufig ist. Dies bestätigten auch die drei Messungen dazwischen, welche hier nicht detailliert vorgestellt werden. Es treten überwiegend townsendartige Teilentladungen auf, welche bis auf eine Ausnahme auch mittels des konventionellen Teilentladungsmesssystems aufgezeichnet werden können. Gegen Ende der Messung tritt eine streamerartige Teilentladung mit signifikant höherer scheinbarer Ladung auf. Aufgrund der geringen Anzahl an Teilentladungen kann keine Aussage über deren örtliche Verteilung getroffen werden. Es deutet sich jedoch die Tendenz an, dass aufeinanderfolgende Teilentladungen nicht am selben Ort stattfinden.

Gelb umrandet ist in Abbildung 67 eine townsendartige Teilentladung, welche nur mittels der UV-sensitiven Kamera detektiert wurde, nicht jedoch mit dem konventionellen Teilentladungsmesssystem.

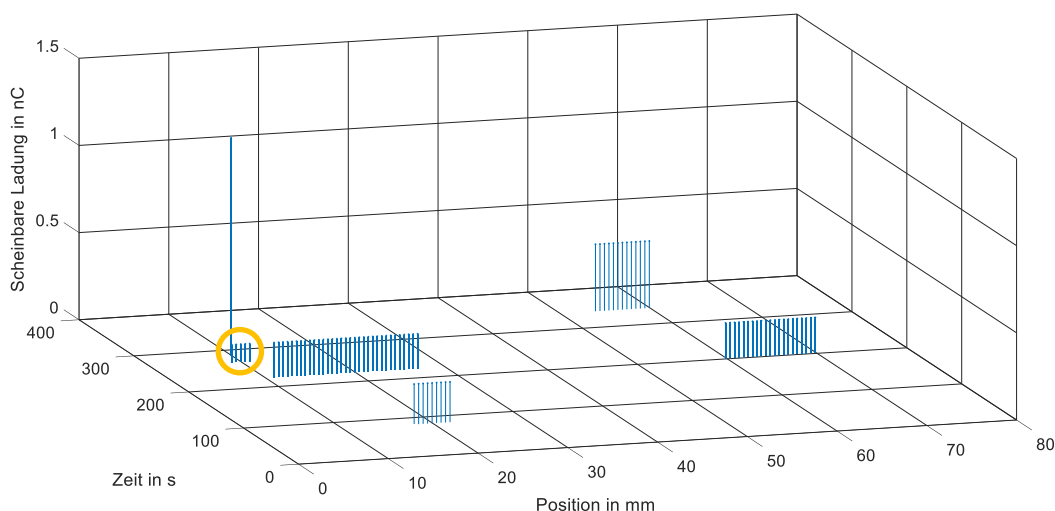


Abbildung 67 Zeitliche Abfolge und räumliche Verteilung der Teilentladungen bei der fünften und somit letzten Teilentladungsmessung bei der ersten Spannungsbelastung bei einer Klemmenspannung von 8,3 kV. Prüfkörpersandwich mit 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je 25 μm starke PA6-Folien

Die pro Teilentladungsereignis umgesetzte scheinbare Ladung ist nach einer Spannungsbelastung von 30 Minuten um eine Größenordnung gesunken, ebenso auch die Auftrittshäufigkeit. Somit sinkt der mittlere Entladestrom, was im Widerspruch zu den in Kapitel 5.2 genannten Ergebnissen steht. Allerdings handelt es sich um unterschiedliche Prüfkörper mit unterschiedlichen Isolierstoffen.

Nach Abschalten und Öffnen des Prüfkörpers wird die Oberflächenpotentialverteilung der erdseitigen Folie mit dem elektrostatischen Voltmeter ermittelt und mittels Gl. 82 in die Dichte der akkumulierten Ladung umgerechnet. Es ergibt sich eine Ladungsdichte mit

einem Mittelwert von circa 500 pC/mm^2 mit Schwankungen um 50 % innerhalb der Fehlstelle. Das globale Maximum befindet sich nahe des Seitenrandes der Fehlstelle. Dieser Effekt wurde auch bei den vorangegangenen Messungen schon beobachtet und lässt sich auf die Inhomogenität des elektrischen Feldes im Randbereich und die hierdurch begünstigte Teilentladungsaktivität zurückführen. Insgesamt ist der Verlauf der Ladungsträgerdichte in Abbildung 68 vergleichsweise glatt.

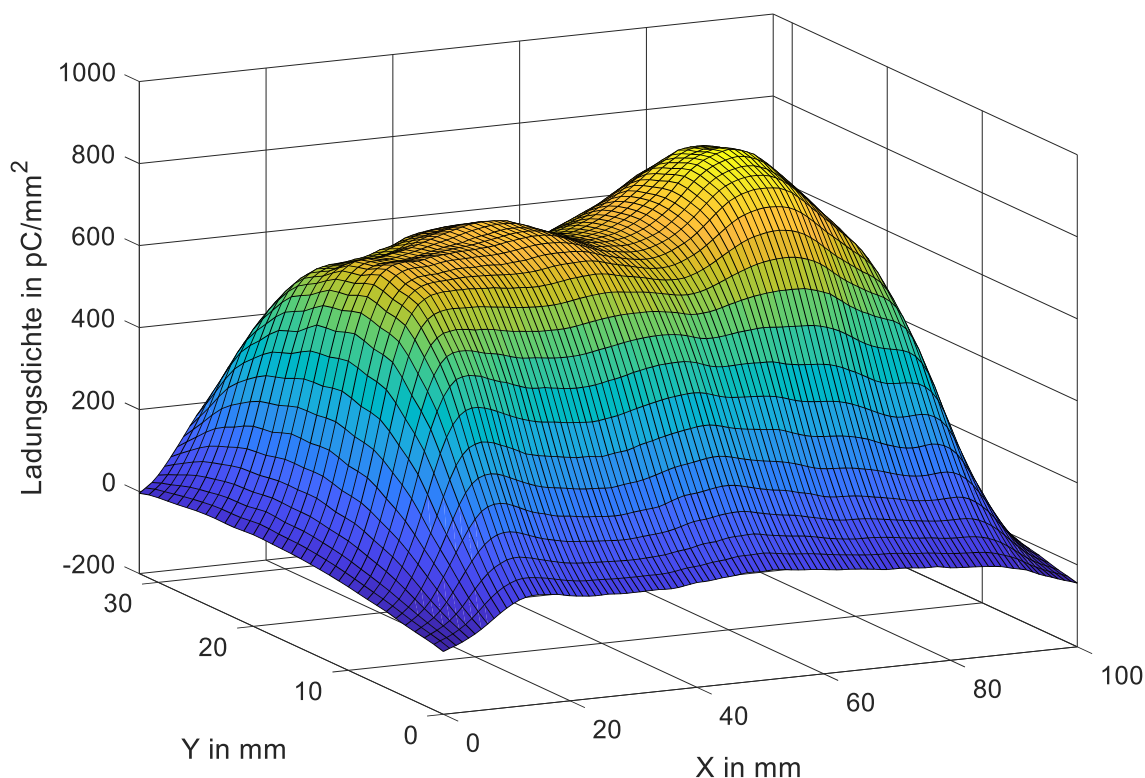


Abbildung 68 Zweidimensionale Oberflächenpotentialverteilung der unteren Folie nach Spannungsabschaltung der ersten Belastung und Öffnung des Prüfkörpersandwichs. 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je $25 \mu\text{m}$ starke PA6-Folien. 30 Minuten mit 8,3 kV Gleichspannung belastet

Nun wird der geöffnete Prüfkörper für sieben Tage im Klimaschrank bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte der Luft von 70 % gelagert. Dies soll den Ladungsträgerabbau beschleunigen, ohne dass die Prüfkörperoberfläche dabei abgewischt wird und eventuelle Alterungsnebenprodukte hierdurch entfernt werden.

Nach einer Woche wird mittels einer Oberflächenpotentialmessung festgestellt, dass der Prüfkörper nahezu frei von akkumulierten Oberflächenladungen ist. Der Prüfkörpersandwich wird wieder montiert und nochmals für fünf Minuten mit Spannung beaufschlagt. Währenddessen wird mittels UV-sensitiver Kamera und konventioneller Teilentladungsmesstechnik die Teilentladungsaktivität aufgezeichnet.

In Abbildung 69 ist erkennbar, dass bedingt durch das Hochfahren der Klemmenspannung zu Beginn der Messung zwei Teilentladungen mit sehr großer scheinbarer Ladung auftreten. Diese laden die Fehlstelle auf nahezu der gesamten Breite fast zeitgleich um, sodass davon ausgegangen werden kann, dass danach der Zustand „Teilentladungen treten auf“ aus Kapitel 2.3 erreicht ist. Anschließend treten sowohl townsendartige als auch streamerartige Teilentladungen auf. Sie sind örtlich nahezu gleichmäßig verteilt und haben eine um eine Größenordnung kleinere scheinbare Ladung als die ersten beiden Entladungen.

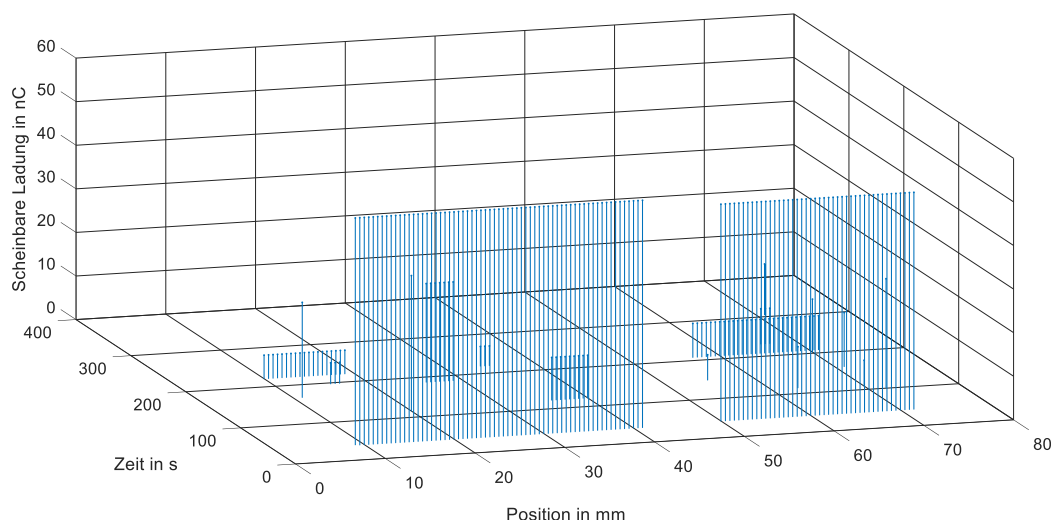


Abbildung 69 Zeitliche Abfolge und räumliche Verteilung der Teilentladungen bei der Teilentladungsmessung bei der zweiten Spannungsbelastung bei einer Klemmenspannung von 7,0 kV. Prüfkörpersandwich mit 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je 25 μm starke PA6-Folien

Nach fünf Minuten wird die Klemmenspannung abgeschaltet und der Prüfkörper geöffnet. Mittels der Oberflächenpotentialmessung wird die Dichte der akkumulierten Ladungen bestimmt und in Abbildung 70 dargestellt. Der Verlauf der Ladungsträgerverteilung ist global vergleichsweise gleichmäßig, es treten fast keine Spitzen auf. Allerdings treten häufig lokal Schwankungen der Ladungsdichte auf. Dieses Phänomen wird bei gealterten Prüfkörpern mehrfach beobachtet. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass Alterungsnebenprodukte in Form von Kristallen mit erhöhter Leitfähigkeit dafür sorgen, dass die Ladungen sich kleinräumig ungleichmäßig akkumulieren beziehungsweise ungleich schnell abbauen.

Außerdem ist die akkumulierte Ladung auch in Bereiche außerhalb der ursprünglichen Fehlstelle geflossen. Dies lässt sich mit einer alterungsbedingt erhöhten Oberflächenleitfähigkeit, wie sie in Kapitel 2.6 vorgestellt wird, begründen.

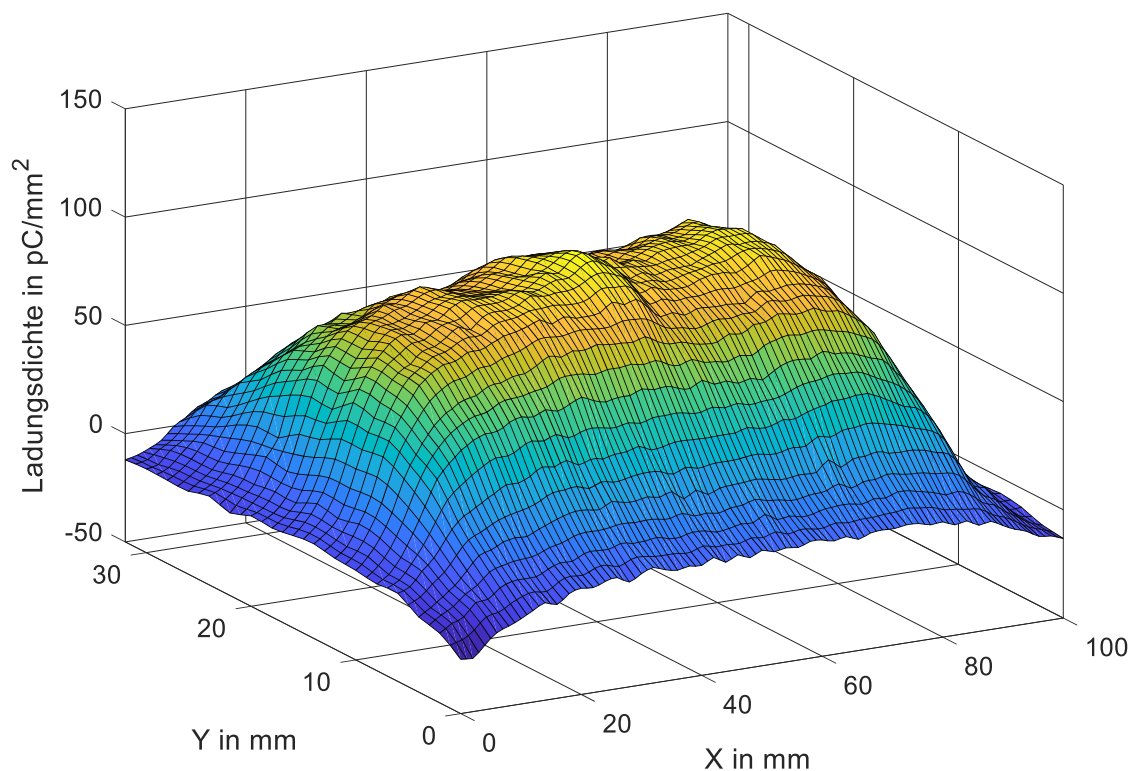


Abbildung 70 Zweidimensionale Oberflächenpotentialverteilung der unteren Folie nach Spannungsabschaltung der zweiten Belastung und Öffnung des Prüfkörpersandwichs. 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je 25 μm starke PA6-Folien. 5 Minuten mit 7,0 kV Gleichspannung belastet

Anschließend wird der Prüfkörper in geöffnetem Zustand für einen Tag im Klimaschrank bei einer Temperatur von 60 °C und einer relativen Feuchte der Luft von 70 % zur nochmaligen Depolarisation gelagert. Mittels Messung des Oberflächenpotentials wird der näherungsweise vollständige Abbau der an der Grenzfläche akkumulierten Ladung nach einem Tag nachgewiesen und der Prüfkörper nochmals zusammengebaut und mit Spannung beaufschlagt.

Bei der dritten und finalen Spannungsbelastung wird versucht, direkt nach dem Auftreten des ersten Teilentladungsereignisses die Klemmenspannung abzuschalten. Es wird eine Klemmenspannung von 6,5 kV erreicht. Es treten vier verteilte räumlich weit ausgehende Teilentladungen auf. Bedingt durch die Spannungsänderung ist die scheinbare Ladung der in Abbildung 71 gezeigten Teilentladungsereignisse sehr groß. Es ist erkennbar, dass an keinem Punkt der Fehlstelle während dieser Messung mehrere Teilentladungen stattfinden. Dies deutet darauf hin, dass die nach einem Teilentladungsereignis akkumulierte Ladungsmenge das elektrische Feld dergestalt beeinflusst, dass an diesem Ort nachfolgende Teilentladungen temporär gehindert werden.

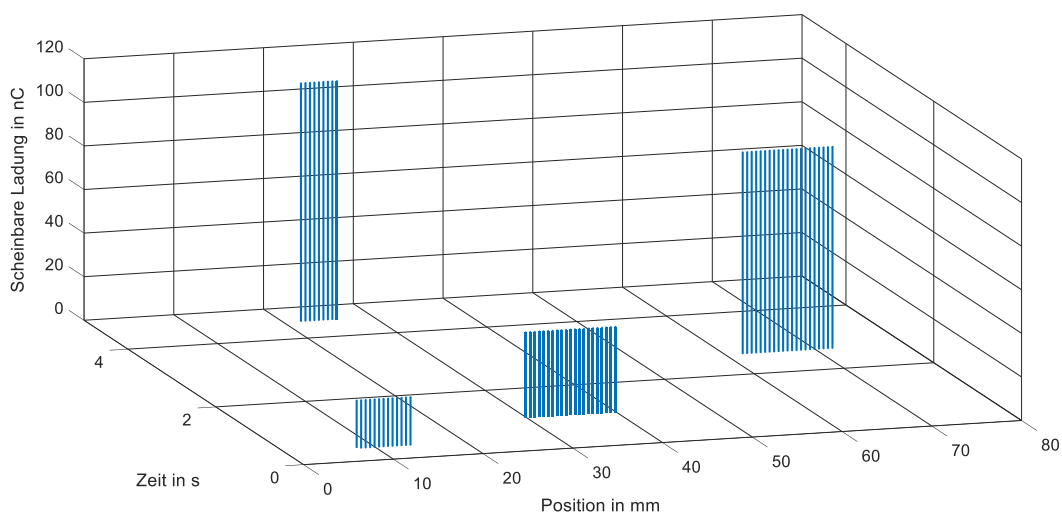


Abbildung 71 Zeitliche Abfolge und räumliche Verteilung der Teilentladungen bei der Teilentladungsmessung bei der dritten Spannungsbelastung bei einer Klemmenspannung von 6,5 kV. Prüfkörpersandwich mit 2 mm Fehlstellenhöhe und zwei je 25 μm starke PA6-Folien

Nach dem Abschalten der Spannung wird der Prüfkörpersandwich wiederum geöffnet und das Oberflächenpotential abgetastet. Die mittels Gl. 82 berechnete akkumulierte Ladungsdichte an der Grenzfläche der unteren Isolierstofffolie ist in Abbildung 72 oben dargestellt. Darunter sind die vier Bilder der UV-sensitiven Kamera abgebildet, welche die Teilentladungsaktivität zeigen.

Die vier Teilentladungsereignisse sind sowohl in den ausgewerteten Daten in Abbildung 71 als auch in den Kamerarohbildern in Abbildung 72 unten ersichtlich. Bei der Bestimmung der akkumulierten Ladungsdichte in Abbildung 72 oben zeigt sich wiederum eine sehr gute Übereinstimmung der akkumulierten Ladungsdichte mit den Orten der Teilentladungsereignisse, wie es auch schon in Abbildung 62 gezeigt wird. Dort wird allerdings eine frische Fehlstelle erstmals mit Spannung beaufschlagt und es sind keine Alterungsnebenprodukte vorhanden. Daher ist in Abbildung 62 oben der Potentialverlauf glatt, während der Potentialverlauf und somit die Dichte der akkumulierten Ladung bei den Messungen mit dem gealterten Prüfkörper in Abbildung 72 benachbarter Messpunkte häufig schwankt und die Verteilung eine hohe lokale Variation aufweist.

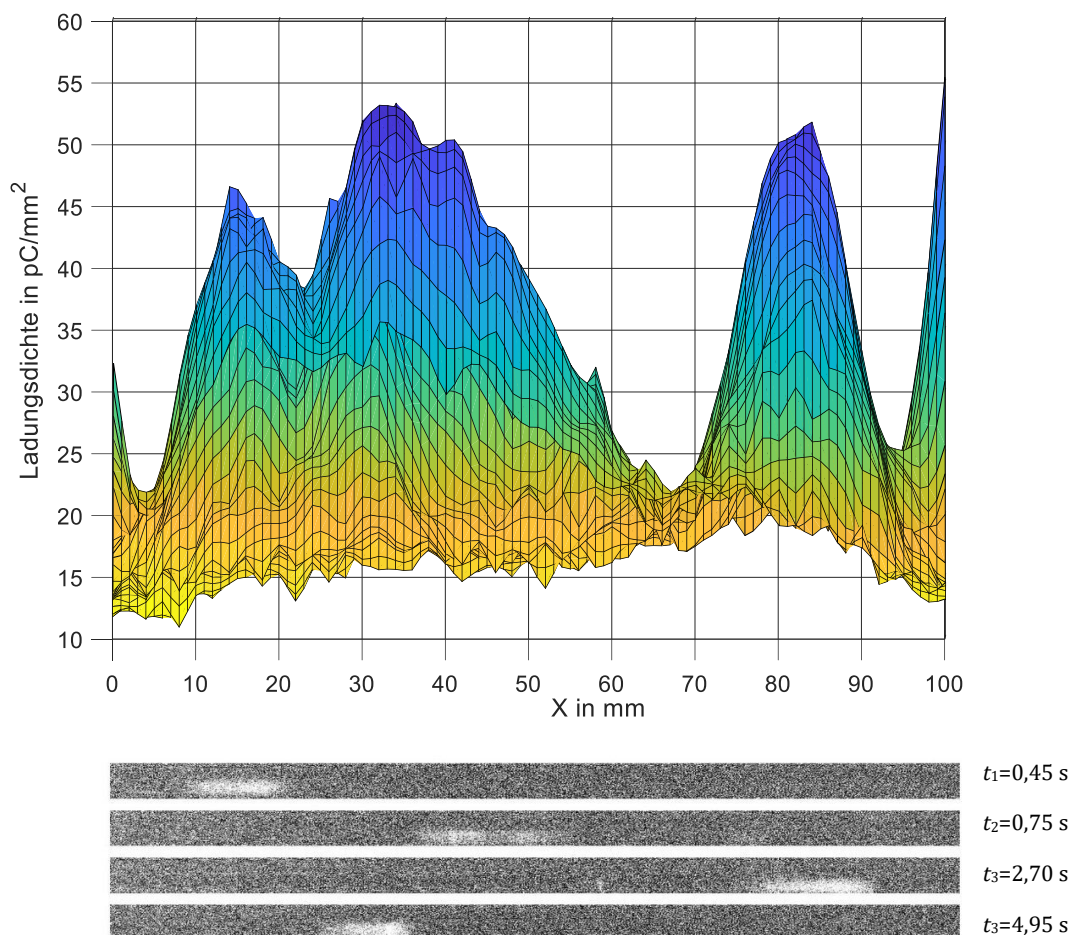


Abbildung 72 Ladungsdichteverteilung und Teilentladungsaktivität bei der zweiten Spannungsbelastung
 Oben: Eindimensionale Darstellung der Ladungsdichteverteilung der unteren Isolierstoffolie, zwei je 25 μm starke PA6-Folien. 6,5 kV Spannungsbelastung
 Unten: Die vier ausgewählten Bilder der UV-sensitiven Kamera, welche die Teilentladungsereignisse zeigen

Auch bei dieser Messserie zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ortsauflösung zwischen den Messungen des Oberflächenpotentials und der UV-sensitiven Kamera sowie eine gute zeitliche Übereinstimmung zwischen den Messungen mit der Kamera und dem konventionellen Teilentladungsmesssystem.

Die scheinbaren Ladungen sind verglichen mit anderen Arbeiten sehr groß. Dies lässt sich jedoch durch die Prüfkörperanordnung mit vergleichsweise großer Fehlstelle und dünnen Isolierstoffbarrieren erklären und war zur Erhöhung der Sensitivität auch so gewünscht.

5.4 Zusammenfassung und Gesamtinterpretation der Messungen

In Kapitel 5.1 wird gezeigt, dass das resultierende elektrische Feld eine dominante Einflussgröße des Teilentladungsverhaltens unter Gleichspannungsbelastung ist. Rückentladungen, wie sie beim Polaritätswechsel auftreten, konnten so im Versuch nachgewiesen werden. Ebenso konnte der Einfluss der Elektroden- und Prüfkörpergeometrie auf die Teilentladungshäufigkeit aufgezeigt werden.

Anschließend wird in Kapitel 5.2 dargestellt, dass ein Teilentladungsereignis bei inneren Fehlstellen unter Gleichspannungsbelastung oftmals aus mehreren Teilentladungsimpulsen besteht. Es wird zwischen Teilentladungsereignis und Teilentladungsimpuls unterschieden und für Sandwich-Prüfkörper der Einfluss der Fehlstellenhöhe, des Fehlstellendurchmessers, der Materialien und Schichtdicken sowie der Temperatur und der relativen Feuchte der Luft auf den mittleren Entladestrom, die Zeit zwischen den einzelnen Entladungsereignissen, der Einzelimpulsladung und der Anzahl der Einzelimpulse je Teilentladungsereignis dargestellt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge.

Tabelle 2: Zusammenhänge zwischen mittlerem Entladestrom, Zeit zwischen den Teilentladungsereignissen, der mittleren Einzelimpulsladung und der mittleren Anzahl Einzelimpulse pro Entladung in Abhängigkeit der Fehlstellenhöhe, des Fehlstellendurchmessers, der Leitfähigkeit des Barrierenmaterials, sowie der Temperatur und der relativen Feuchte der Luft sowie der Isolierstoffe von Sandwich-Prüfkörpern

	Mittlerer Entladestrom	Zeit zwischen Ereignissen	Mittlere Einzelimpulsladung	Mittlere Anzahl Einzelimpulse pro Ereignis
Fehlstellenhöhe	Steigt	Sinkt	Steigt	Sinkt
Fehlstellendurchmesser	Steigt	Sinkt stark	Sinkt schwach	Kein Einfluss
Leitfähigkeit des Barrierenmaterials	Steigt stark	Sinkt	Kein Einfluss	Kein Einfluss
Temperatur	Steigt	Sinkt stark	Kein Einfluss	Kein Einfluss
Relative Feuchte	Steigt	Sinkt	Kein Einfluss	Kein Einfluss

Im Kapitel 5.3 wird das örtliche Verhalten von Teilentladungen unter Gleichspannungsbelastung in vergleichsweise großen inneren Fehlstellen untersucht. Es wird gezeigt, dass der Ladungsabbau durch das Isolierstoffvolumen der dominante Abbauprozess der an der Grenzfläche akkumulierten Ladung ist. Es wird der Einfluss der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit, der Überspannung und der Alterung auf das orts aufgelöste Teilentladungsverhalten untersucht. Bei Erstbelastung der Prüfkörperfolie mit einer hohen Spannungssteigerungsgeschwindigkeit treten hohe Überspannungen und in Folge dessen kleinräumige streamerartige Teilentladungen auf. Deren akkumulierte Ladung aufgrund der hohen Ladungsträgerdichte an der Grenzfläche eine im Vergleich zum Entladungskanalquerschnitt größere Fläche einnehmen. Bei geringer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit treten aufgrund des im statistischen Mittel bei geringeren Überspannungen verfügbaren lawinenwirksamen Anfangselektrons örtlich diffusere townsendartige Teilentladungen auf. Dies lässt sich online mit der Kamera und offline beim Abtasten des Oberflächenpotentials zeigen. Bei gealterten Prüfkörpern sind aufgrund der flachen Haftstellen in der Oxidschicht auf der Isolierstoffoberfläche ebenfalls bei geringen Überspannungen lawinenwirksame Anfangselektronen verfügbar, sodass in diesem Fall ebenfalls townsendartige Teilentladungen auftreten. Aufeinanderfolgende Teilentladungsereignisse finden immer an einem anderen Ort in der Fehlstelle statt, da die akkumulierten Ladungen vorangegangener Teilentladungsereignisse das elektrische Feld in der Fehlstelle lokal beeinflussen und hierdurch die weitere Teilentladungsaktivität lokal hemmen.

6 Teilentladungssimulation

Zusätzlich zu den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Messungen sollen die grundsätzlichen Vorgänge der inneren Teilentladung unter Gleichspannungsbelastung auch simulativ nachgebildet werden, da sich hierbei der Einfluss der einzelnen Parameter (insbesondere die anliegende elektrische Spannung und die elektrische Feldverteilung sowie die spezifischen Leitfähigkeiten) einfacher isoliert betrachten und somit leichter nachvollziehen lassen.

6.1 Stand der Wissenschaft, Möglichkeiten und Grenzen

Mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) wird ein dreilagiger Sandwich-Prüfkörper mit innerer Fehlstelle bei Gleichspannungsbelastung nachgebildet und simuliert. Der Schwerpunkt liegt auf den bei Gleichspannungsbelastung besonders dominierenden physikalischen Effekten des kapazitiv-resistiven Feldübergangs sowie der Ladungsträgerakkumulation. Bisherige Simulationen bildeten meist nur den Teilentladungsvorgang ab [NIE-91], [NIE-95]. Aufgrund der Beschränkung der unteren Grenzfrequenz der Klemmenspannung auf 10 MHz wurde in früheren Arbeiten die Ladungsträgerakkumulation vernachlässigt [FOR-08]. Die Anfangselektronenbereitstellung erfolgt mittels statistischer Prozesse.

Durch Einfügen einer leitfähigen Schicht auf der fehlestellenseitigen Grenzfläche des Isolierstoffs kann die teilentladungsbedingte Alterung der fehlestellenseitigen Isolierstoffoberfläche nachgebildet und ihre Rückwirkung auf das Teilentladungsverhalten untersucht werden. Damit können Rückschlüsse zu den Messergebnissen gezogen werden und diese verifiziert werden.

Zur Begrenzung der Rechenzeit wird eine rotationssymmetrische Anordnung nachgebildet. Dies bedeutet, dass alle Teilentladungen nur in der Mitte der Fehlstelle auf der Rotationsachse stattfinden können. Weiter außen liegende Bereiche der Fehlstelle sind nicht vom Teilentladungsgeschehen betroffen. Ebenso können in der Simulation keine Teilentladungen entlang der äußeren Grenzflächen nachgebildet werden.

6.2 Aufbau der ablaufgesteuerten Simulation

In diesem Kapitel sollen die für die Teilentladungssimulation unter Gleichspannungsbelastung relevanten Besonderheiten vorgestellt werden.

6.2.1 Abschnittsweise Simulation

Bei Gleichspannungsbelastung kann die Zeitspanne zwischen den einzelnen Teilentladungen oftmals sehr groß sein. Zur Beschleunigung der Simulation ist somit eine große zeitliche Schrittweite der numerischen Simulation sinnvoll. Um aber andererseits während dem schnell ablaufenden Teilentladungsereignis hinreichend genaue Simulationsergebnisse zu erhalten, ist es sinnvoll, für die unterschiedlichen Situationen im Prüfkörper unterschiedliche Teilsimulationen mit unterschiedlichen Zeitschritten zu verwenden. Mittels einer Ablaufsteuerung in *MatLab* können für die Entladephase, während des Lawinenprozesses und für die wesentlich längere Nachladephase unterschiedliche Zeitschritte in der Simulation gewählt werden. Die Ergebnisse der vorangegangenen Teilsimulationen können ebenfalls mit übergeben werden. Parameter können je nach Bedarf entweder global oder lokal definiert werden.

Die numerische Simulation besteht daher aus vier Teilen, welche über *MatLab* gesteuert werden:

1. Zuerst wird der aufgrund des Spannungssprungs beim Einschalten entstehende Anfangszustand inklusive dem resultierenden elektrischen Feld E_{res} ermittelt.

Im anschließenden Simulationsabschnitt ändert sich die Feld- und Potentialverteilung im Prüfkörper. Diese Teilsimulation besteht aus drei Teilen:

2. Bis die Spannung U_{FS} der Fehlstelle die Zündspannung U_{z} erreicht, wird nur der Abbau der an der Grenzfläche akkumulierten Ladung berechnet.
3. Übersteigt das elektrische Feld in der Fehlstelle die Zündfeldstärke, dann wird bei jedem Zeitschritt überprüft, ob entsprechend der statistischen Streuzeit ein lawinenwirksames Anfangselektron zur Verfügung steht. Dies geschieht durch den Vergleich der Zufallszahl R mit der Verteilfunktion F . Falls die Zufallszahl größer als die Verteilfunktion ist, steht kein lawinenwirksames Anfangselektron zur Verfügung, es wird die Feldverteilung im nächsten Zeitschritt berechnet und anschließend wiederum das Auftreten eines lawinenwirksamen Anfangselektrons geprüft.
4. Sobald diese Bedingung auch erfüllt ist, folgt die Simulation des Entladungsaufbaus mit geeignet kleineren Zeitschritten im dritten Teil der Simulation. Unterschreitet die Spannung über der Fehlstelle die für das Aufrechterhalten der Entladung notwendige Mindestspannung, dann endet die Entladungsnachbildung, über der Fehlstelle verbleibt die Restspannung U_{R} und die Simulation springt wieder in den zweiten Simulationsteil.

Abbildung 73 zeigt das Ablaufdiagramm der numerischen Feldsimulation.

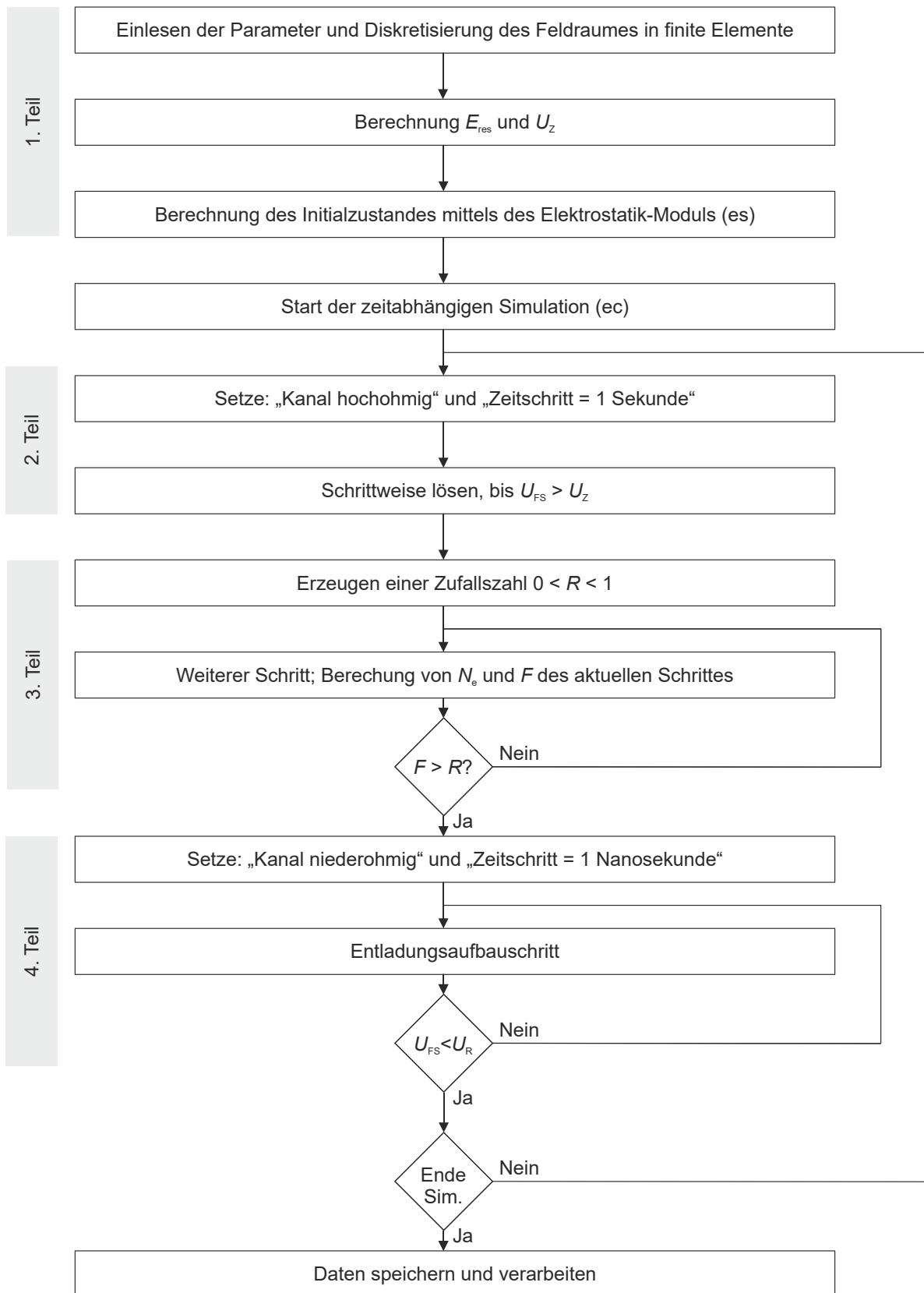


Abbildung 73 Ablaufschema der numerischen Simulation innerer Teilentladungen bei Gleichspannungsbelastung. Erklärung der Variablen im Fließtext

6.2.2 Elektrisches Feld

Beim Einschalten der Spannung liegt eine kapazitive elektrische Feldverteilung vor, welche als Startbedingung mittels der elektrostatischen Feldberechnung ermittelt wird. Die hierbei ermittelten Daten dienen als Startwert für die daran anschließende Berechnung des kapazitiv-resistiven Feldübergangs. Nach dem Teilentladungsereignis beeinflussen die an den Grenzflächen zwischen der gasgefüllten Fehlstelle und dem Feststoff-dielektrikum akkumulierten Ladungsträger die Feldverteilung. Deren Abbau ist die Ursache des Wiederansteigens des elektrischen Feldes in der Fehlstelle, sodass nach einer hinreichend langen Zeit des Abbaus der akkumulierten Ladung die nächste Teilentladung stattfinden kann.

6.2.3 Bereitstellung des Anfangselektrons

Beim Überschreiten der Zündspannung U_Z der Fehlstelle wird mittels Software eine Zufallszahl R mit einem Wert zwischen null und eins generiert. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Elektronengeneration in der Fehlstelle durch Emission aus den Fehlstellengrenzflächen dominiert wird. Dieser Effekt lässt sich nach dem Richardson-Schottky-Gesetz feldstärkeabhängig näherungsweise beschreiben mit [NIE-95], [FOR-08]:

$$N_e(t) = N_{e0} e^{\left| \frac{U_{FS}(t)}{U_Z} \right|} \quad (\text{Gl. 84})$$

Aus Gründen der schnelleren Berechnung wird in der Simulation nicht die elektrische Feldstärke, sondern die Spannung über der Fehlstelle in der Rotationsachse des Prüfkörpers $U_{FS}(t)$ zur Berechnung der zeitabhängigen Elektronenerzeugungsrate $N_e(t)$ genutzt. Analog zur bekannten Zündfeldstärke wird die Zündspannung U_Z neben der Konstanten N_{e0} zur Berechnung genutzt.

Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass in einem gegebenen Zeitintervall, in dem die Spannung entlang der Rotationsachse der Fehlstelle $U_{FS}(t)$ größer als die Zündspannung U_Z ist, wird folgende Verteilungsfunktion genutzt [FOR-08]:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t N_e(t') dt'} \quad (\text{Gl. 85})$$

Grundlage für die Gl. 84 und Gl. 85 ist die Annahme, dass die Anfangselektronen aus der Isolierstoffoberfläche bereitgestellt werden. Aufgrund der an den Grenzflächen akkumulierten Heteroladung sollte dies bei Gleichspannungsbelastung jedoch nicht der dominierende Effekt sein. Viel mehr wird von einer strahlungsbasierten Volumenbereitstellung im Gasraum ausgegangen.

Beim Vergleich der statistischen Streuzeit zwischen der Simulation basierend auf der Annahme der Anfangselektronenbereitstellung an der Isolierstoffoberfläche und Messungen, insbesondere in der Arbeit von Fromm [FRO-95], ergab sich eine gute Übereinstimmung. Der Autor führt dies darauf zurück, dass die Effizienz der Elektronenbereitstellung im Gasraum ebenfalls exponentiell von der Überspannung in der Fehlstelle abhängig ist und verwendet daher die von Forssén aufgestellten Gl. 84 und Gl. 85 in dieser Arbeit.

6.2.4 Nachbildung der Teilentladung

Die Teilentladung besteht aus einer oder mehreren Ladungsträgerlawinen. Diese Lawinen bilden einen sehr schmalen Kanal mit einem Durchmesser unter einem Millimeter [WAG-66]. Beim Auftreffen der Ladungsträger auf die Grenzfläche Gas-Feststoff stellt sich jedoch aufgrund der hohen Ladungsträgerkonzentration ein hohes elektrisches Feld parallel zu dieser Grenzfläche ein. Je nach Oberflächenleitfähigkeit fließen entweder Ausgleichsströme oder es finden Teilentladungen längs zu dieser Grenzfläche statt.

In der Arbeit wird die Entladung zur Reduktion des Rechenaufwandes nicht lawinenförmig nachgebildet, sondern als leitfähiger Kanal in Anlehnung an Niemeyer [NIE-95]. Dieser Kanal hat einen Durchmesser von 5,6 mm bei einer spezifischen Leitfähigkeit von 10^{-4} S/m. Der Kanaldurchmesser wurde so abgeschätzt, dass die transferierte Ladungsmenge mit der mittels konventioneller Teilentladungsmessung an geometrisch identischen Prüfkörpern ermittelten und anhand der Geometrie umgerechneten Ladung übereinstimmt. Die Leitfähigkeit des Kanals wurde so gewählt, dass die Entladezeit mit den mittels Strommessung ermittelten Entladezeiten übereinstimmt. Diese werden detailliert in Kapitel 5.2 vorgestellt und können direkt aus dem Stromverlauf, wie er beispielsweise in Abbildung 39 auf Seite 88 dargestellt ist, entnommen werden. Zur Vermeidung der Unstetigkeit der Ladungsverteilung nimmt die Leitfähigkeit des Kanals im Randbereich über eine Strecke von $\Delta r = 0,8$ mm ab. Abbildung 74 zeigt die Kanalleitfähigkeit über seinem Radius.

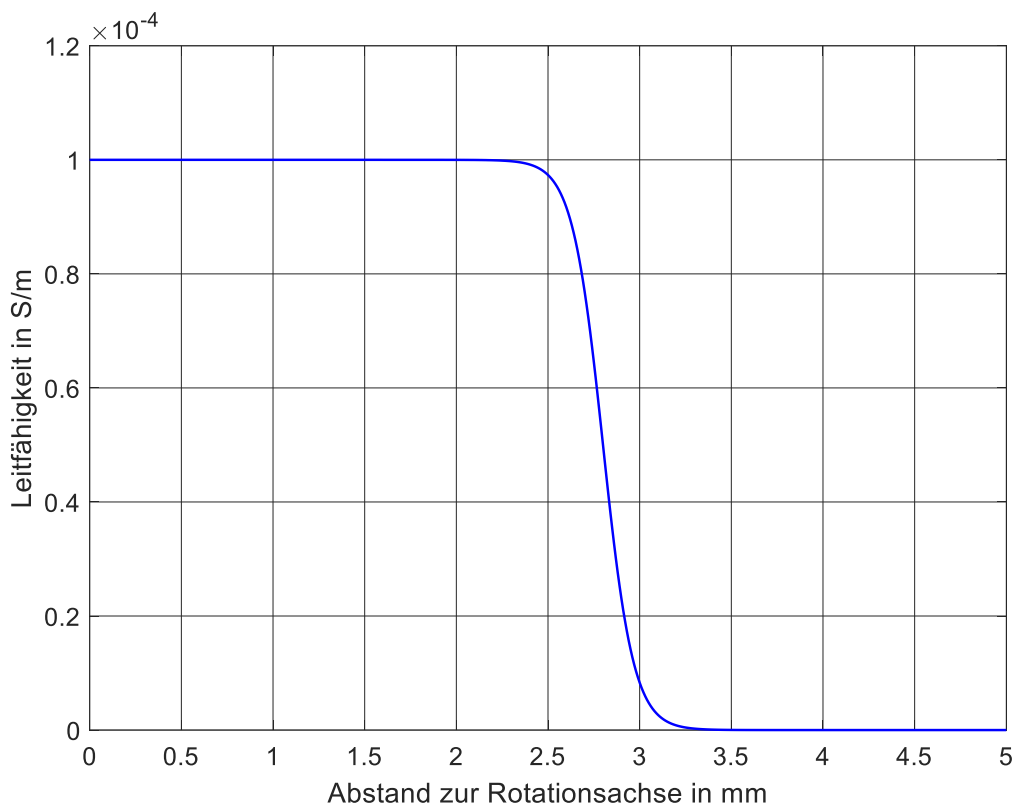


Abbildung 74 Spezifische Leitfähigkeit des Kanals zur Nachbildung der Teilentladung über dem Fehlstellenradius

Während den teilentladungsfreien Zeiten wird der gesamte Gasraum als hochohmig angenommen.

6.2.5 Nachbildung der Oberflächenleitfähigkeit

Das Grundprinzip der Finite-Elemente-Methode ist es, den Raum in kleine Teilbereiche mit linearen Eigenschaften aufzuteilen und die Energie in diesen Teilbereichen jeweils zu minimieren.

In der vorliegenden zweidimensional-rotationssymmetrischen Anordnung wird die Ebene, welche durch den Radius r und die Höhe s aufgespannt wird, nachgebildet. Diese wird zur Berechnung in Dreiecke aufgeteilt. Je stärker der lokale Gradient des Feldes ist und je größer das Interesse an genauen Ergebnissen in dem Bereich, desto feinmaschiger wird der Bereich vernetzt, was allerdings zu Lasten der Berechnungszeit geht.

Das Nachbilden infinitesimal dünner Schichten, wie die Oberflächenleitfähigkeit angenommen wird, ist somit nicht möglich. Stattdessen wird diese als eine Schicht mit höherer Volumenleitfähigkeit im Vergleich zum restlichen Isolierstoff der Prüfkörperfolie nachgebildet. Die Schichtdicke wird aus Gründen der Diskretisierung zu einem Prozent der

Schichtdicke der jeweils untersuchten Prüfkörperfolie ausgewählt. Dies stellt den Kompromiss zwischen der realitätsnahen Nachbildung und einem hinnehmbaren Rechenaufwand dar.

6.2.6 Prüfkörper

Als Prüfkörper wird eine dreilagige Sandwichkonstruktion in Anlehnung an in dieser Arbeit experimentell untersuchten Prüfkörper verwendet. Die Teilentladung findet in der Simulation immer zentral statt, wie in Kapitel 6.2.4 erläutert wird. Die Hauptabmessungen und wichtigsten Daten sind:

- Fehlstellenhöhe: 1 mm
- Fehlstellendurchmesser: 10 mm
- Durchmesser der aktiven Teilentladung (blau in Abbildung 75): 5,6 mm
- Schichtdicke der Isolierstofffolien: 30 μm , 100 μm , 1.000 μm
- Dicke der leitfähigen Schicht (bei gealterten Prüfkörpern; rot markiert in Abbildung 75): 1 % der Foliendicke

Abbildung 75 zeigt die in der Simulation verwendete Prüfkörpergeometrie.

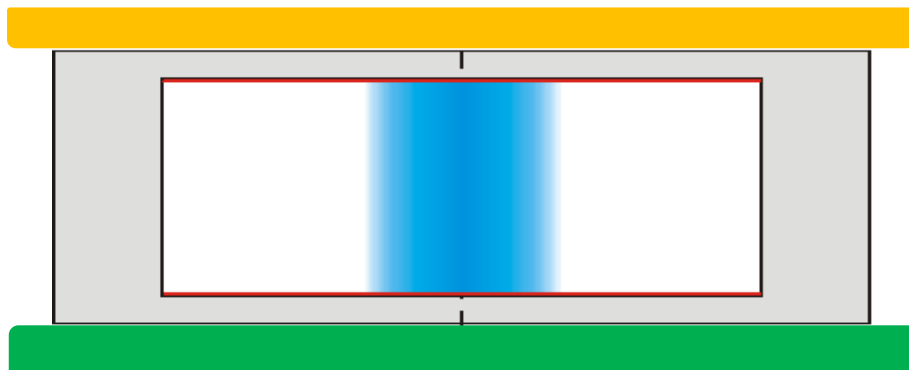


Abbildung 75 In der Simulation verwendeter Prüfkörper mit innerer Fehlstelle; rot markiert ist die Nachbildung der Alterungseffekte durch Erhöhung der spezifischen Volumenleitfähigkeit in einem dünnen Film an der Grenzfläche.

Schwarze Linie: Angedeutete Rotationsachse

Blau: Während der Teilentladung leitfähiger Kanal

Orange: Hochspannungselektrode

Grün: Erdelektrode

Rot: Leitfähige Schicht an der Lunkergrenzfläche

Die Skizze ist nicht maßstäblich.

7 Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Simulationsergebnisse des in Kapitel 6 vorgestellten Simulationsmodells präsentiert und diskutiert werden. Es wird der in Abbildung 75 gezeigte Prüfkörper mit einer Klemmenspannung von 10 kV nachgebildet. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit der PA6-Isolierstoffolie beträgt nach eigenen Messungen $6,5 \cdot 10^{-15}$ S/m, ihre relative Permittivität 3,4. Es werden in der Simulation nur streamerartige Teilentladungen nachgebildet.

7.1 Teilentladungsverhalten über der Zeit

Im ersten Schritt soll das Teilentladungsverhalten eines ungealterten Prüfkörpers über einen längeren Zeitraum simuliert werden. Hierzu wird die leitfähige Schicht an der Grenzfläche nicht implementiert beziehungsweise ihre Leitfähigkeit gleich der Volumeneitfähigkeit der gesamten Isolierstoffolie gesetzt. Abbildung 76 zeigt den Verlauf der Potentialdifferenz über der Fehlstelle über der Zeit bei einer Fehlstellenhöhe von 1 mm und einer Schichtdicke der Isolierstoffolien von je $30 \mu\text{m}$. Es zeigt sich das kapazitiv-resistive Verhalten, welches auch das in Kapitel 2.7.1 vorgestellte Modell voraussagt.

Neben dem statistischen Prozess des Vorhandenseins eines lawinenwirksamen Anfangselektrons ist die Potentialdifferenz über der Fehlstelle das zweite notwendige Kriterium für das Auftreten einer Teilentladung. Daher starten die Entladungsvorgänge nicht unmittelbar nach Überschreiten der Potentialdifferenz über der Fehlstelle von 4,65 kV. Diese Potentialdifferenz lässt sich mittels der Geometrie und des Streamereinsatzes nach Gl. 18 berechnen.

Ab diesem Zeitpunkt wird lediglich mittels der Gl. 84 und Gl. 85 entschieden, ob im aktuellen Zeitschritt ein lawinenwirksames Anfangselektron vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall, so steigt die Potentialdifferenz weiter an und im nächsten Zeitschritt findet wieder dieselbe Abfrage statt.

Dieser Simulationsverlauf ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 73 ersichtlich.

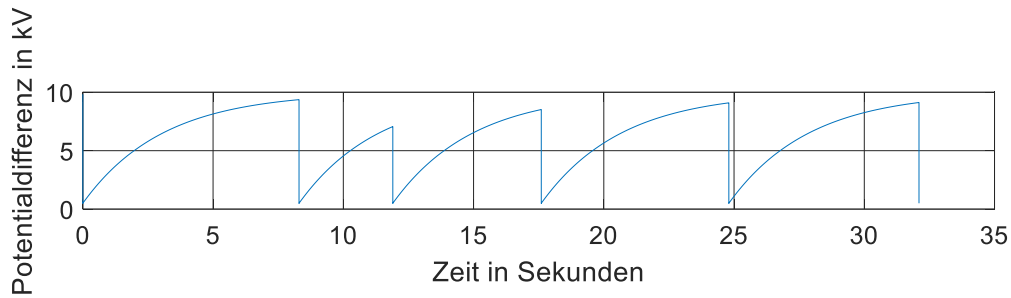


Abbildung 76 Simulierte Potentialdifferenz über einer Fehlstelle von 1 mm Höhe bei 10 kV Klemmenspannung, zwei Isolierstofffolien mit je $30\ \mu\text{m}$ Schichtdicke und einer spezifischen Volumenleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-15}\ \text{S/m}$ sowie einer relativen Permittivität von 3,4. Die Zündspannung über der Fehlstelle entspricht in der Simulation der Streamereinsatzspannung und beträgt 4,65 kV. Die Restspannung ergibt sich aus der Streamerstabilitätsfeldstärke und beträgt 0,5 kV

Unterschreitet die Potentialdifferenz über der Fehlstelle die Restspannung gemäß des Streamerstabilitätsfeldes nach Gl. 19, so endet die Teilentladung mit dem Zeitschritt.

Die Dauer des simulierten Stromflusses je Teilentladungsereignis beträgt circa 150 ns und wird in der Simulation an der Erdelektrode (grün in Abbildung 75) ermittelt. In Abbildung 77 wird der Stromverlauf des ersten Teilentladungsereignisses aus Abbildung 76 dargestellt.

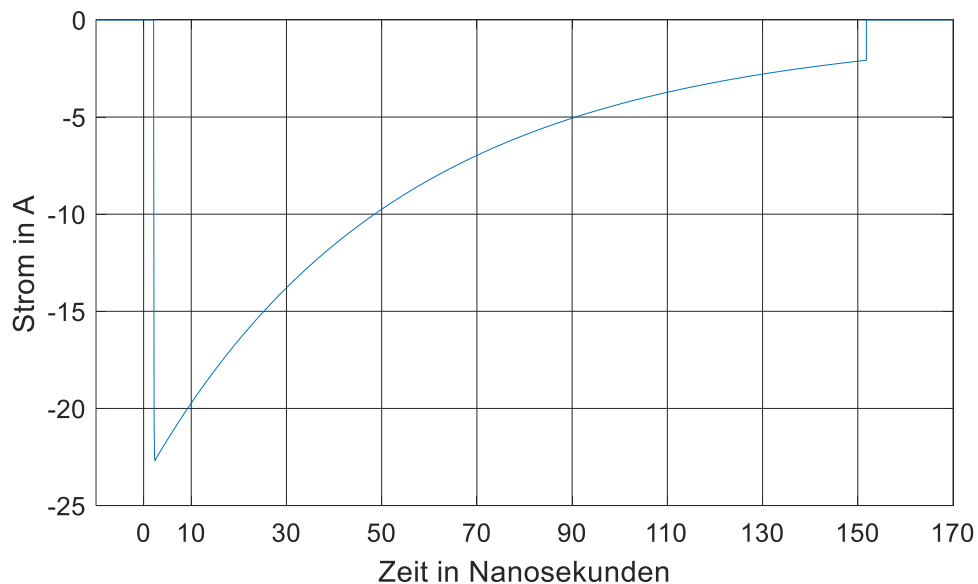


Abbildung 77 Simulierter Klemmenstrom des ersten Teilentladungsereignisses aus Abbildung 76

Wird nun dieser Klemmenstrom über der Zeit integriert, so erhält man die scheinbare Ladung. Für den in Abbildung 76 gezeigten Verlauf der Potentialdifferenz über der Fehlstelle ergibt sich der in Abbildung 78 dargestellte zeitliche Verlauf der scheinbaren Ladung über der Zeit.

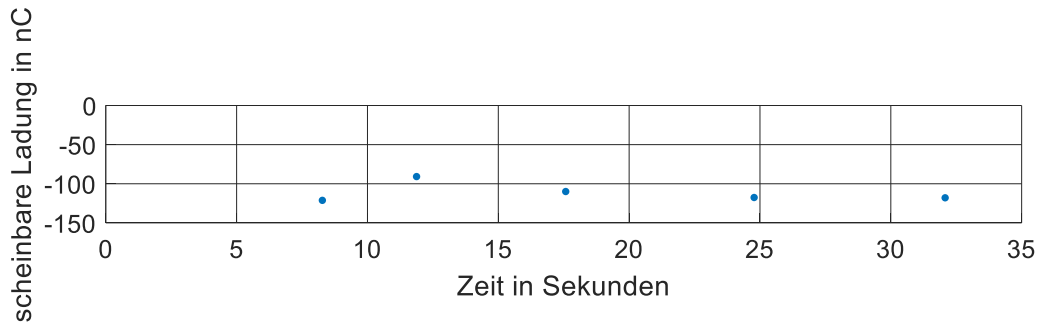


Abbildung 78 Simulierte scheinbare Ladung der in Abbildung 76 gezeigten Abfolge von Teilentladungen über einer Fehlstelle von 1 mm Höhe bei 10 kV Klemmenspannung, zwei Isolierstofffolien mit je 30 μm Schichtdicke und einer spezifischen Volumenleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-15}$ S/m sowie einer relativen Permittivität von 3,4

Die Größenordnung der scheinbaren Ladung ist in guter Übereinstimmung mit begleitend zur Simulation durchgeführten Messungen an geometrisch identischen Prüfkörpern und kann auch mit den in Kapitel 5.2 vorgestellten Messergebnissen bestätigt werden. Dies spricht dafür, dass das entladene Volumen je Teilentladung bei der Simulation und der Messung näherungsweise übereinstimmen. Das Auftreten von Teilentladungsereignissen ist jedoch wesentlich seltener, da wie eingangs schon beschrieben wurde, nur der zentrale Teil der Fehlstelle in der Simulation entladen wird. Teilentladungen finden in der Simulation nur in einem Zylinder mit einem Grundflächenradius von 2,8 mm statt, während in dem realen Prüfkörper Teilentladungen auf der gesamten Grundfläche (Radius 10 mm) stattfinden können. Somit kann im Prüfkörper bei einer realen Messung eine Teilentladung stattfinden, während an der Stelle der vorangegangenen Teilentladung noch nicht wieder die für einen Teilentladungseinsatz notwendige Potentialdifferenz vorherrscht.

Auch die Abhängigkeit zwischen der scheinbaren Ladung und der Zeitdifferenz zur vorangegangenen Teilentladung bei der Simulation entspricht den Vorhersagen, welche sich mittels des kapazitiv-resistiven Modells machen lassen. Abbildung 79 zeigt diesen Zusammenhang. Eine Mindestzeitdifferenz von circa 30 Sekunden ist notwendig, damit die Potentialdifferenz in der Mitte der Fehlstelle wieder die Teilentladungseinsetzspannung überschreitet. Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der Potentialdifferenz über der Fehlstelle (siehe Abbildung 76) ist die Ladung über der Zeitdifferenz zur vorangegangenen Teilentladung in dieser Simulation nicht proportional, wie es Abbildung 14 zeigt. Im Bereich kleinerer Zeiten (bis circa 60 Sekunden) ist die Abweichung jedoch so

gering, dass näherungsweise ein linearer Verlauf, wie von Fromm angenommen, vorliegt [FRO-95].

Zwischen der scheinbaren Ladung des aktuellen Teilentladungsereignisses und der Zeitdauer bis zum Auftreten des nachfolgenden Teilentladungsereignisses gibt es keine Korrelation, wie Abbildung 80 zeigt. Diese statistische Unabhängigkeit der nachfolgenden Teilentladung basiert auf den Annahmen der stochastischen Bereitstellung der lawinenwirksamen Anfangselektronen.

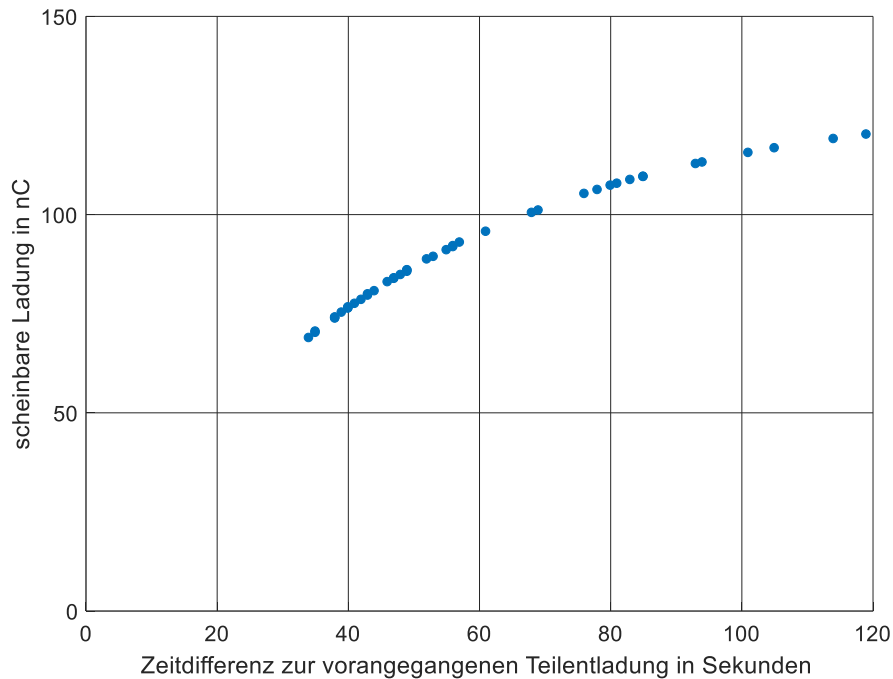


Abbildung 79 Simulierte scheinbare Ladung über der Zeitdifferenz zum vorangegangenen Teilentladungsereignis. Simulationsdauer eine Stunde, Klemmenspannung 10 kV, weitere Simulationsdaten wie in den vorherigen Abbildungen

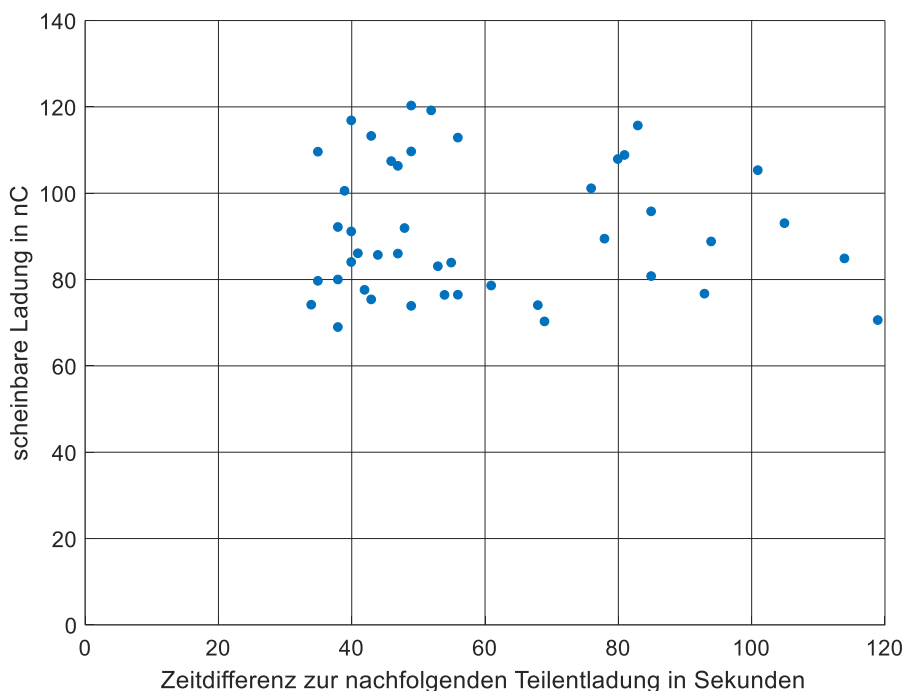


Abbildung 80 Simulierte scheinbare Ladung über der Zeitdifferenz zum nachfolgenden Teilentladungsereignis. Simulationsdauer eine Stunde, Klemmenspannung 10 kV, weitere Simulationsdaten wie in den vorherigen Abbildungen

7.2 Einfluss der Schichtdicke der Isolierstoffbarriere

Zur Untersuchung des Einflusses der Schichtdicke der Isolierstoffbarriere werden zwei weitere Fälle simuliert: 100 μm und 1 mm Barrierendicke. Bei einer Fehlstellenhöhe von ebenfalls 1 mm kann im ersten Fall mit 100 μm Barrierendicke bezugnehmend auf das vereinfachte Teilentladungsmodell von Lemke (Kapitel 2.7.3) von einer vergleichsweise großen Fehlstelle ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass sich die meisten Feldlinien über die Elektroden und die externe Beschaltung schließen und die gemessene scheinbare Ladung näherungsweise der in der Fehlstelle umgesetzten Ladung entspricht. Im zweiten Fall mit 1 mm Barrierendicke hat die Fehlstelle die gleiche Höhe wie eine Lage Isolierstoff. Es kann somit von einer mittelgroßen Fehlstelle ausgegangen werden. Somit besteht eine deutliche Differenz zwischen der an den Klemmen messbaren scheinbaren Ladung und der in der Fehlstelle umgesetzten Ladung. Die in der Simulation ermittelte scheinbare Ladung der Teilentladungen bei den beiden Anordnungen unterscheidet sich um eine Größenordnung aufgrund der unterschiedlichen Schichtdicken der Isolierstofffolienbarrieren: Bei einer Schichtdicke von 100 μm (Abbildung 81) fällt die scheinbare Ladung mit 15 nC bis 20 nC schon deutlich geringer aus, verglichen mit jener bei einer Schichtdicke von 30 μm (Abbildung 78). Wird die Dicke der isolierenden Schicht

verzehnfacht, so sinkt die scheinbare Ladung wiederum deutlich, siehe Abbildung 82. Dies lässt sich mit der Verringerung der Kapazität der Isolierstofffolie mit zunehmender Dicke und dem sich hierdurch ändernden Verhältnis aus Fehlstellen- und Isolierstofffolienkapazität (siehe Gl. 40) erklären. Die Zeit zwischen den einzelnen Teilentladungseignissen steigt mit zunehmender Schichtdicke leicht an.

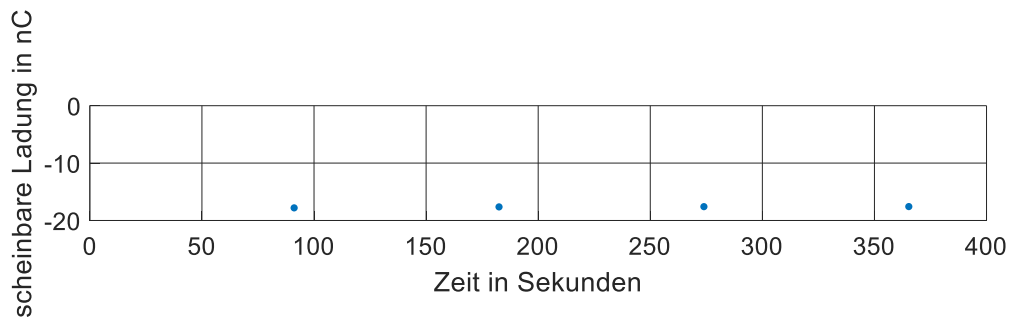


Abbildung 81 Scheinbare Ladung über der Zeit; Fehlstellenhöhe 1 mm, Isolierstofffoliendicke 100 μm , spezifische Volumenleitfähigkeit $6,5 \cdot 10^{-15}$ S/m, relative Permittivität 3,4 bei 10 kV Klemmenspannung

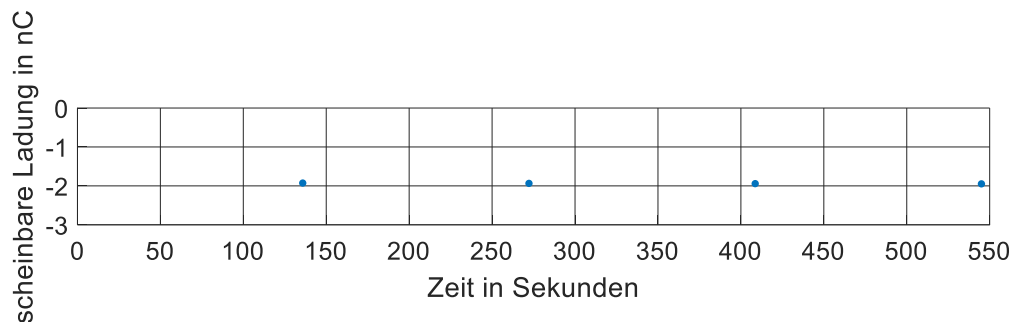


Abbildung 82 Scheinbare Ladung über der Zeit; Fehlstellenhöhe 1 mm, Isolierstofffoliendicke 1000 μm , spezifische Volumenleitfähigkeit $6,5 \cdot 10^{-15}$ S/m, relative Permittivität 3,4 bei 10 kV Klemmenspannung

Die Ursache für das schwache Ansteigen der Zeit mit dem Zuwachs der Schichtdicke der Isolierstoffbarriere ist einerseits das nichtlineare zeitabhängige Verhalten der Potentialdifferenz über der Fehlstelle (siehe Abbildung 76) und andererseits die Notwendigkeit des Vorhandenseins eines lawinenwirksamen Anfangselektrons. Dessen Auftretswahrscheinlichkeit hängt vom Fehlstellenvolumen ab und nicht von der Isolierstofffoliendicke. In den vorliegenden Simulationen ist das Vorhandensein eines lawinenwirksamen Anfangselektrons ein stark begrenzender Faktor. Hierdurch ist die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilentladungseignissen in der Simulation nur schwach von der Schichtdicke der Isolierstofffolien abhängig.

7.3 Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit

Zur Nachbildung der in Kapitel 2.6 erwähnten Alterungsmechanismen wird in der Simulation eine leitfähige Schicht mit einer Dicke von 1 % der Isolierstofffolie implementiert. Dies ermöglicht die Verkleinerung des leitfähigen Teilentladungskanals auf 10 μm , da sich die auf den jeweiligen Grenzflächen auftretenden Ladungsträger aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit der obersten Isolierstoffschicht verteilen können. Somit kann der Entladungskanal simulativ mit einem realistischen Querschnitt nachgebildet werden.

In der Literatur sind orts aufgelöste Oberflächenleitfähigkeitsmessungen an *Micafil*-Bändern unter Teilentladungsbelastung bekannt. Bei diesen Messungen sind die Orte mit hoher Teilentladungsdichte und hoher lokaler Oberflächenleitfähigkeit korreliert [FLO-18]. In der Simulation findet die Teilentladung aus Gründen der Rechendauer nur zentral statt, ebenso wird die Leitfähigkeit der gesamten orthogonal zum elektrischen Feld liegenden Grenzfläche erhöht, sodass ein über die gesamte Fehlstelle homogener Verlauf der Alterung nachgebildet wird.

Wird eine Steigerung der Oberflächenleitfähigkeit um mehrere Größenordnungen implementiert, wie es von Hudon nach wenigen Stunden Teilentladungsaktivität bei Wechselspannungsbelastung nachgewiesen wurde [HUD-90], so treten zwei Effekte zu Tage:

- In der Simulation endet die Teilentladung, sobald die Potentialdifferenz über der Fehlstelle in der Rotationsachse die Mindestspannung unterschreitet. Die an der Grenzfläche Lunker-Festkörper im Bereich des Entladungskanals akkumulierte Ladung verteilt sich anschließend sehr rasch über die ganze Fehlstellengrenzfläche, sodass die Potentialdifferenz in der Rotationsachse sehr schnell wieder steigt und die Zündspannung überschreitet. Somit können weitere Teilentladungen sehr schnell nachfolgen.
- Aufgrund der im Vergleich zu den umgebenden Medien sehr hohen spezifischen Volumenleitfähigkeit der Alterungsschicht wird das Potential vom äußeren Rand der Fehlstelle nach innen verschleppt. Da außerhalb der Fehlstelle ein näherungsweise homogener Potentialverlauf vorherrscht, reduziert sich hierdurch die Potentialdifferenz über der Fehlstelle.

Zur Verdeutlichung dieses Effekts wird ein Sandwich-Prüfkörper mit zwei je 1 mm starken Isolierstofffolien nachgebildet. Dies hat den Vorteil, dass die leitfähige Schicht 10 μm dick und somit in beide Raumrichtungen hinreichend groß ist, sodass eine Diskretisierung in Dreiecke („Mesh“) sinnvoll erfolgen kann.

In Abbildung 83 ist der Verlauf der Potentialdifferenz über der Fehlstelle im ungealterten Prüfkörper mit zwei je 1 mm starken Isolierstofffolien dargestellt. Die unregelmäßigen

Zusammenbrüche der Potentialdifferenz rühren daher, dass das Anfangselektron nicht sofort nach Überschreiten der Zündfeldstärke beziehungsweise in der Simulation der Zündspannung bereitgestellt wird. Aufgrund der Erhöhung der Foliendicke im Vergleich zum Prüfkörper in Abbildung 76 verläuft der Abbau der Ladungsträger und somit der Aufbau der Potentialdifferenz signifikant langsamer.

Wird nun die Alterung durch eine Erhöhung der spezifischen Volumenleitfähigkeit der Alterungsschicht um sechs Größenordnungen nachgebildet, so erfolgt der Abbau der an der Grenzfläche Lunker-Festkörper akkumulierten Ladungen rascher. Daher steigt die Potentialdifferenz über dem Lunker beim gealterten Prüfkörper in Abbildung 84 nach einer Teilentladung schneller als beim ungealterten Prüfkörper in Abbildung 83. Da in der Simulation nur streamerartige Teilentladungen nachgebildet werden können, kann nur das schnellere Wiederansteigen des Potentials und nicht der veränderte, von Morshuis beschriebene Entlademechanismus beobachtet werden [MOR-93].

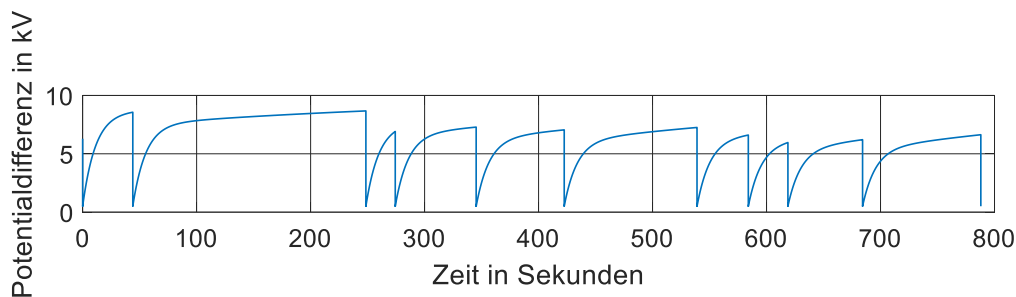


Abbildung 83 Simulierte Potentialdifferenz über einer Fehlstelle von 1 mm Höhe bei 10 kV Klemmenspannung, zwei Isolierstofffolien mit je 1 mm Schichtdicke und einer spezifischen Volumenleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-15}$ S/m sowie einer relativen Permittivität von 3,4. Die Zündspannung über der Fehlstelle entspricht in der Simulation der Streamereinsatzspannung und beträgt 4,65 kV. Die Restspannung ergibt sich aus der Streamerstabilitätsfeldstärke und beträgt 0,5 kV. Das dazugehörige Diagramm der scheinbaren Ladung ist in Abbildung 85 dargestellt

Durch die Verteilung der im Bereich des Entladungskanals an der Grenzfläche akkumulierten Ladungsträger direkt nach Beendigung des Entladungsvorgangs steigt die Potentialdifferenz über der Fehlstelle in Rotationsachse innerhalb kürzester Zeit wieder über die Teilentladungseinsatzspannung. Hierdurch kann, sofern ein lawinenwirksames Anfangselektron vorhanden ist, sofort eine nachfolgende Teilentladung stattfinden.

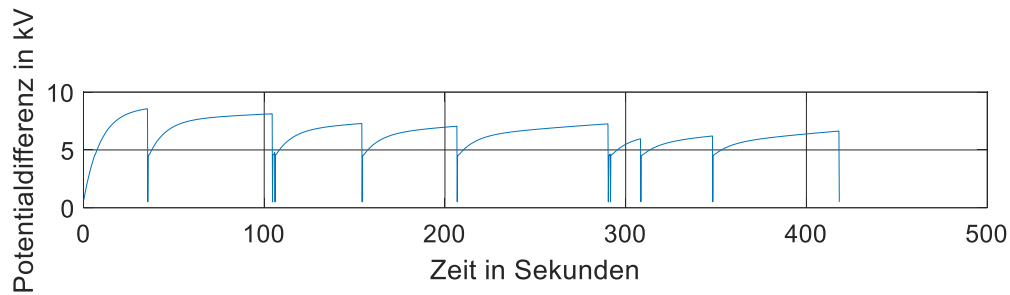


Abbildung 84 Simulierte Potentialdifferenz über einer Fehlstelle von 1 mm Höhe bei 10 kV Klemmenspannung, zwei Isolierstofffolien mit je 30 μm Schichtdicke und einer spezifischen Volumenleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$ sowie einer relativen Permittivität von 3,4. Alterung nachgebildet mit einer 10 μm dicken Schicht mit einer erhöhten spezifischen Volumenleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-9} \text{ S/m}$ und somit einer spezifischen Schichtleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-14} \text{ S}$. Die Zündspannung über der Fehlstelle entspricht in der Simulation der Streamereinsatzspannung und beträgt 4,65 kV. Die Restspannung ergibt sich aus der Streamerstabilitätsfeldstärke und beträgt 0,5 kV. Das dazugehörige Diagramm der scheinbaren Ladung ist in Abbildung 86 dargestellt

Aufgrund des schnelleren Ladungsträgerabbaus bedingt durch die Verteilung der umgesetzten Ladung und der Möglichkeit der rasch aufeinanderfolgenden Teilentladungen finden mehr Teilentladungsereignisse pro Zeiteinheit beim gealterten Prüfkörper statt.

Die durch Integration des Klemmenstroms an der Erdelektrode gewonnenen Diagramme der scheinbaren Ladung sind im Falle des ungealterten Prüfkörpers in Abbildung 85 und im Falle des gealterten Prüfkörpers in Abbildung 86 dargestellt. Der Mittelwert der scheinbaren Ladung ist bei der Simulation nicht signifikant von der Alterung abhängig.

Durch den vergleichsweise schnellen Abbau der akkumulierten Ladung hat in dieser Simulation die Statistik der Anfangselektronenbereitstellung einen signifikanten Einfluss auf das Teilentladungsverhalten. Daher streuen die Zeitdifferenzen und die scheinbaren Ladungen selbst beim ungealterten Prüfkörper, wie in Abbildung 85 zu erkennen ist.

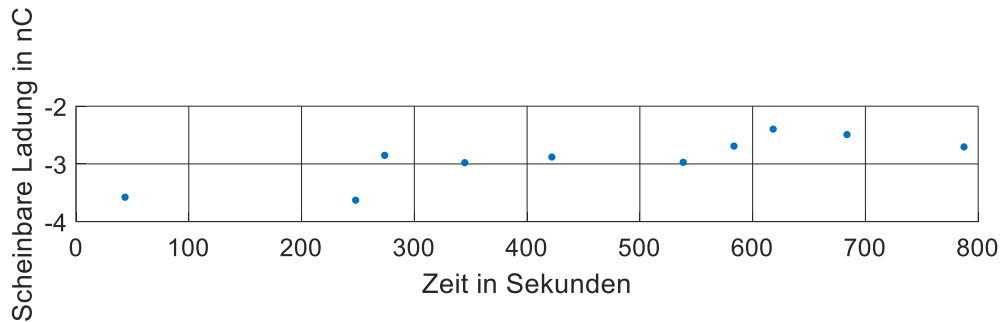


Abbildung 85 Scheinbare Ladung im ungealterten Zustand über der Zeit; Isolierstofffoliendicke 1 mm, spezifische Volumenleitfähigkeit $6,5 \cdot 10^{-15}$ S/m, relative Permittivität 3,4 bei 10 kV Klemmenspannung. Das dazugehörige Diagramm des Potentialverlaufs ist in Abbildung 83 dargestellt

Beim gealterten Prüfkörper können Teilentladungen sehr schnell aufeinander folgen, da die Potentialdifferenz sehr schnell wieder die Teilentladungseinsetzspannung überschreitet. Dies ist der Grund, warum der mittlere Entladestrom bei gealterten Prüfkörpern in der Simulation um nahezu den Faktor zwei ansteigt.

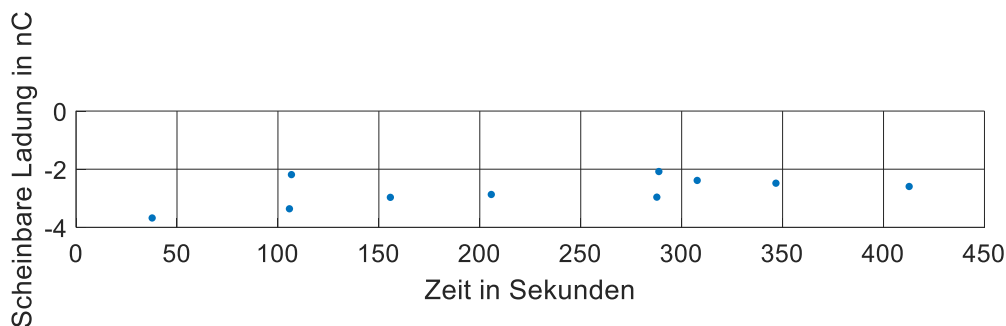


Abbildung 86 Scheinbare Ladung im gealterten Zustand über der Zeit; Isolierstofffoliendicke 1 mm, spezifische Volumenleitfähigkeit $6,5 \cdot 10^{-15}$ S/m, $10 \mu\text{m}$ starke Alterungsschicht mit einer spezifischen Volumenleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-9}$ S/m und somit einer spezifischen Schichtleitfähigkeit von $6,5 \cdot 10^{-14}$ S. Relative Permittivität 3,4 bei 10 kV Klemmenspannung. Das dazugehörige Diagramm des Potentialverlaufs ist in Abbildung 84 dargestellt

8 Vergleich Simulation und Messung

In diesem Kapitel sollen die in Kapitel 5 messtechnisch und in Kapitel 0 simulativ gewonnenen Ergebnisse miteinander verglichen werden.

In Kapitel 5.1 wird der Einfluss des resultierenden elektrischen Feldes auf die Teilentladungsaktivität aufgezeigt. In der Simulation kann im Gegensatz zur Messung auf die Potentialdifferenz über der Fehlstelle zugegriffen werden. Es zeigt sich, dass diese auch in der Simulation einen signifikanten Einfluss auf die scheinbare Ladung hat (Abbildung 79).

Der simulierte Potentialverlauf über der Fehlstelle entspricht dem mittels des kapazitiv-resistiven Modells vorausgesagten Verlauf aus Kapitel 2.7.1. Dies lässt sich damit erklären, dass in der Simulation der Ladungsträgerabbau nur mit einem konstantem spezifischen Leitwert nachgebildet werden. Des Weiteren wird die stark feldstärkeabhängige Rekombination von Ladungsträgern im Gasraum vernachlässigt.

Das Modell bildet nur eine Teilentladung in der Mittelachse einer rotationssymmetrischen Fehlstelle nach. Die in Kapitel 5.3 hingegen nachgewiesene Wanderung des Ortes der Teilentladung wird nicht nachgebildet. Ebenso wird der Mechanismus der Gasentladung nicht nachgebildet, sodass Teilentladungsereignisse in der Simulation immer aus einem Teilentladungsimpuls bestehen und nicht aus mehreren, wie dies in Kapitel 5.2 messtechnisch nachgewiesen wurde. Diese beiden Vereinfachungen verhindern einen direkten Vergleich der Teilentladungshäufigkeit zwischen den Messwerten und den simulativ ermittelten Werten. Für einen solchen Vergleich muss die in der Simulation ermittelte Anzahl an Teilentladungen pro Zeit mit dem Quotient Gesamtfläche des Lunkers geteilt durch die von der Teilentladung umgeladene Fläche multipliziert werden. Mit diesem Faktor muss auch der mittlere Entladestrom umgerechnet werden. Als Beispiel sollen die Simulationsergebnisse des ungealterten Prüfkörpers aus Abbildung 85 dienen. Der mittlere Entladestrom beträgt hier 38 pA bei einer entladenen Kreisfläche mit 2,8 mm Radius (siehe Abbildung 74). Wird nun der mittlere Strom auf eine entladene Kreisfläche mit 10 mm Durchmesser hochskaliert, so erreicht dieser 121 pA. Dies liegt leicht unterhalb, jedoch noch in der Größenordnung des mittleren Entladestromes aus Abbildung 47 in Kapitel 5.2.3. Der in der Messung erhöhte mittlere Entladestrom deutet auf eine leichte Alterung während der elektrischen Belastung hin.

Im Modell wird die Alterung mittels einer leitfähigen Schicht an der Lunker Oberfläche nachgebildet. Dies erhöht die Teilentladungsaktivität aufgrund des schnelleren Ladungsabbaus. Dies wurde bei orts aufgelösten Teilentladungsmessungen, deren Ergebnisse in Abschnitt 5.3.4 vorgestellt werden, ebenfalls nachgewiesen. Eine Änderung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Typs der Teilentladung (mit zunehmendem Alter abnehmende Wahrscheinlichkeit des Auftretens streamerartiger Teilentladungen und zunehmende Wahrscheinlichkeit des Auftretens townsendartiger Teilentladungen) kann simulativ nicht nachgewiesen werden, da wie oben schon erwähnt, Teilentladungen nur als leitfähiger Kanal unter Vernachlässigung der Mechanismen der Gasentladung nachgebildet werden. Aufgrund der schnellen und vergleichsweise breiten Verteilung der akkumulierten Ladung bei zunehmender Oberflächenleitfähigkeit ist es nachvollziehbar, dass mit zunehmender Alterung die Wahrscheinlichkeit des Auftretens großflächiger townsendartiger Teilentladungen zunimmt.

Alle drei in Kapitel 2.7 vorgestellten Teilentladungsmodelle berücksichtigen das Verhältnis zwischen der in der Fehlstelle durch die Teilentladung umgesetzten Ladung und der an den Klemmen messbaren scheinbaren Ladung. Hierzu wird entweder das Verhältnis der Kapazitäten angesetzt oder es wird die λ -Funktion ausgewertet. Die Notwendigkeit hierfür (und somit für das Kalibrieren vor dem Messen) wird bei den Simulationsergebnissen ersichtlich: Eine Verzehnfachung der Schichtdicke der isolierenden Folie reduziert bei ansonsten gleichen Bedingungen die scheinbare Ladung um den Faktor zehn, wie in Kapitel 7.2 gezeigt wird.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit inneren Teilentladungen unter Gleichspannungsbelastung. Im Fokus hierbei steht der Einfluss der akkumulierten Ladungen auf das elektrische Feld in der Fehlstelle und somit auf die nachfolgenden Teilentladungen. Ebenso wird der zeitliche und örtliche Verlauf der Teilentladungsaktivität bei Gleichspannungsbelastung betrachtet. Bedingt durch die im Rahmen der Energiewende zunehmende Verbreitung von Hochspannungsgleichstromübertragung wird für diese Betriebsmittel ein tiefgreifendes Verständnis dieser physikalischen Vorgänge im Rahmen von Teilentladungen notwendig als Voraussetzung, dass die Teilentladungsdiagnostik auch für diese Betriebsmittel als zuverlässiges und zerstörungsfreies Diagnosewerkzeug zur Verfügung steht.

Zuerst wird der Einfluss des elektrischen Feldes auf äußere Teilentladungen an Prüfkörpern mit polymerer Isolierstoffbarriere sowie auf innere Teilentladungen an Prüfkörpern mit Lunkern mit und ohne direkten Elektrodenkontakt aufgezeigt. Es wird der Einfluss der Anfangselektronenbereitstellung durch den Einsatz verschiedener Elektroden (Nadelelektrode und Stabelektrode) bei beiden Polaritäten sowie der Einfluss der relativen Feuchte der Luft auf das Teilentladungsverhalten äußerer Teilentladungsanordnungen mit Isolierstoffbarriere nachgewiesen. Im Vergleich hierzu weisen innere Fehlstellen aufgrund des stärkeren Einflusses des durch die an der Grenzfläche akkumulierte Flächenladung deutlich geringere Teilentladungsaktivität auf. Dies trifft für Lunker ohne direkten Elektrodenkontakt umso stärker zu.

Bei Belastung mit einer Impulsspannung mit kurzer Stirnzeit und einer extrem langen Rückenhalbwertszeit im Minutenbereich wird durch die Teilentladungsaktivität und die Akkumulation der Ladungsträger an Isolierstoffgrenzflächen das elektrische Feld in der Fehlstelle dahingehend beeinflusst, dass beim Abklingen der Impulsspannung Rückentladungen mit entgegengesetzter Polarität der scheinbaren Ladung auftreten. Dieser Effekt ist vor allem bei der Umpolung von Hochspannungsgleichstrombetriebsmitteln zu beachten. Bei hoher Verfügbarkeit lawinenwirksamer Anfangselektronen (Nadelanordnung) kann eine Proportionalität zwischen der Änderung der Klemmenspannung und der scheinbaren Ladung von Teilentladungen nachgewiesen werden.

Die Interpretation der Messergebnisse bei Teilentladungen unter Wechselspannungsbelastung fußt hauptsächlich auf dem Phasenwinkel des Auftritts sowie der Teilentladungseinsetz- und -aussetzspannung. Ersteres ist bei der Interpretation von Messergebnissen

unter Gleichspannungsbelastung nicht vorhanden, zweiteres aufgrund der geringen Anzahl an Teilentladungsereignissen sehr schwierig zu bestimmen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit mittels breitbandiger Strommessung der einzelne Teilentladungsimpuls genauer betrachtet. Beim Vergleich der Messdaten mit dem townsendbasierten Modell nach Fromm, mit Hilfe dessen eine Korrelation zwischen der umgesetzten Ladung und der Zeit seit der letzten Teilentladungsaktivität hergestellt werden kann, kann nachgewiesen werden, dass in den untersuchten Dreilagigen-Sandwich-Prüfkörpern auch streamerartige Teilentladungen stattfinden. Der Einfluss geometrischer Parameter wie der Fehlstellenhöhe und der ϕ -Durchmesser auf das Impulsverhalten wird untersucht und dargestellt. Ebenso wird der Einfluss der Materialien sowie der Temperatur und der relativen Feuchte der umgebenden Luft beziehungsweise der Isolierstoffe nachgewiesen. Mit Zunahme der Oberflächen- und Volumenleitfähigkeit wird der Abbau der nach einer Teilentladung an der Grenzfläche Gas-Feststoff akkumulierten Ladung beschleunigt, sodass das resultierende elektrische Feld im Gasraum des Lunkers schneller wieder die Zündfeldstärke überschreitet und bei Auftreten eines lawinenwirksamen Anfangselektrons die nächste Teilentladung stattfinden kann. Die überwiegende Mehrzahl der in den Dreilagigen-Sandwich-Prüfkörpern auftretenden streamerartigen Teilentladungen besteht aus mehreren Einzelimpulsen.

In dreilagigen Sandwich-Prüfkörpern wird die örtliche Verteilung der Teilentladungsaktivität untersucht. Hierzu wird während der Belastung mit Gleichspannung neben dem konventionellen Teilentladungsmesssystem simultan mittels einer UV-sensitiven Kamera eine eindimensionale Verteilung der Teilentladungsaktivität aufgezeichnet. Diese Kamera kann auch für konventionelle Teilentladungsmesstechnik nur schwer detektierbare townsendartige Teilentladungen aufzeichnen. Nach Abschalten der Spannung wird der Dreilagigen-Sandwich-Prüfkörper geöffnet und mittels elektrostatischem Voltmeter wird das Oberflächenpotential der beiden Grenzflächen Gas-Feststoff bestimmt. Es zeigt sich, dass bei schnellen Spannungsanstiegen sowie langen Belastungsdauern die akkumulierte Ladung näherungsweise homogen im gesamten Bereich der Fehlstelle verteilt ist. Bei kurzer Belastungsdauer und vergleichsweise langsamen Spannungsanstiegen beim Einschalten lassen sich die einzelnen Teilentladungsereignisse anhand der Oberflächenpotentialverteilung nachweisen. Wird diese Oberflächenpotentialmessung nach Abschalten der Klemmenspannung mehrfach wiederholt, dann lässt sich der zeitliche und räumliche Abbau der akkumulierten Ladung aufzeichnen. Aufgrund des Verlaufs kann geschlossen werden, dass der Abbau durch das Volumen der dominierende Prozess ist und die Volumenleitfähigkeit somit neben der Permittivität die den Prozess bestimmende physikalische Größe ist. Mit zunehmender Alterung treten vermehrt townsendartige Teilentladungen auf und die Potentialverteilung wird lokal zunehmend inhomogener.

Bei der Simulation der Teilentladungsaktivität kann aufgrund der Beschränkung der Rechenleistung die im vorangegangenen Abschnitt erwähnte örtliche Verteilung der Teilentladung nicht nachgebildet werden. Daher ist für den Vergleich der Messergebnisse mit den simulativ ermittelten Werten die Umrechnung mittels des Quotienten der jeweiligen Flächen notwendig. Die Simulation dient primär dazu, den Einfluss verschiedener Parameter wie der Bereitstellungsrate lawinenwirksamer Anfangselektronen, der spezifischen Oberflächen- sowie der Volumenleitfähigkeit der dielektrischen Barrieren auf das Teilentladungsverhalten zu untersuchen. Ebenso wird der Einfluss geometrischer Parameter wie der Schichtdicke der Isolierstoffbarriere auf das Teilentladungsverhalten untersucht. Mittels der Erhöhung der spezifischen Oberflächenleitfähigkeit kann das Teilentladungsverhalten gealterter Fehlstellen nachgebildet werden. Aufgrund der erhöhten Oberflächenleitfähigkeit verteilt sich die akkumulierte Ladung schneller, sodass die resultierende elektrische Feldstärke schneller wieder die Zündfeldstärke überschreitet und die nachfolgende Teilentladung bei Auftritt eines lawinenwirksamen Anfangselektrons stattfinden kann.

10 Literatur

- [ARM-36] ARMAN, A. N.; STARR, A. T.: *The measurement of discharges in dielectrics*, In: Journal of the Institution of Electrical Engineers, 79. Jg., Nr. 475, S. 67-81, 1936
- [BAI-66] BAILEY, C. A.: *A study of interal discharges in cable insulation*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Ausgabe 3, S. 155-159, 1966
- [BAU-77a] BAUM, E. A.; LEWIS, T. J.; TOOMER, R.: *Decay of electrical charge on polyethylene films*, In: Journal of Physics D: Applied Physics, 10. Jg., Nr. 4, S. 487-497, 1977
- [BAU-77b] BAUM, E. A.; LEWIS, T. J.; TOOMER, R.: *Further observations on the decay of surface potential of corona charged polyethylene films*, In: Journal of Physics D: Applied Physics, 10. Jg., Nr. 18, S. 2525-2530, 1977
- [BER-12] BERG, Th. et al.: *Ausgewählte technologische Entwicklungen in der Hochspannungstechnik*, In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 129. Jg., Nr. 4, S. 242-248, 2012
- [BEY-86] BEYER, M. et al.: *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*, Springer Verlag, 1986
- [BOG-82] BOGGS, S. A.; STONE, G. C.: *Fundamental limitations in the measurements of corona and partial discharge*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Ausgabe 17, Nr. 2, S. 143-150, 1982
- [BOG-87] BOGGS, S. A. et al.: *Limits to Partial Discharge Detection: Effects of Sample and Defect Geometry*, In: Gaseous Dielectrics V, Elsevier, S. 629-636, 1987
- [BOW-38] BOWLS, W. W.: *The Effect of Cathode Material on the Second Townsend Coefficient for Ionization by Collision in Pure and Contaminated N₂ Gas*, In: Physical Review, Ausgabe 53, S. 293-301, 1938
- [BRU-54] BRUINING, H.: *Physics and Application of the Secondary Emission Process*, Pergamon, London, 1954
- [BRU-94] VAN BRUNT, R. J.: *Physics and Chemistry of Partial Discharges and Corona*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Ausgabe 1, Nr. 5, S. 761-784, 1994

- [BÜR-12] BÜRKE, TH.; WENGENMAYR, R. (HRSG): *Erneuerbare Energie: Konzepte für die Energiewende*, John Wiley & Sons, Ausgabe 3, 2012.
- [CHE-14] CHEN, X. et al.: *Effects of Internal Discharges on Life of Oil Impregnated Bushings*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Ausgabe 1, Nr. 5, S. 45-52, 2014
- [CON-69] CONSTANDINO, Th. E.: *Effects of Internal Discharges on Life of Oil Impregnated Bushings*, In: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Band 21, Nr. 1, S. 834-846, 2014
- [CRI-89] CRICHTON, G. C.; KARLSSON, P. W.; PEDERSEN, A.: *Partial Discharges in Ellipsoidal and Spheroidal Voids*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 2, S. 335-342, 1989
- [DAK-60] DAKIN, T. W.; MALINARIC, P. J.: *A capacitive bridge method for measuring integrated corona-charge transfer and power loss per cycle*, In: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III: Power Apparatus and Systems, 79. Jg., Nr. 3, S. 648-652, 1960
- [DAK-74] DAKIN, T. W. et al.: *Breakdown in Gases in Uniform Fields - Paschen Curve for Nitrogen, Air and Sulfur Hexafluoride*, In: Electra, Nr. 32, S. 61-82, 1974
- [DEV-84a] DEVINS, J. C.: *The Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics*, In: CEIDP Conference Transactions, S. 15-31, 1984
- [DEV-84b] DEVINS, J. C.: *The Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Ausgabe EI-19, Nr. 5, S. 475-495, 1984
- [ENG-98] ENGEL, K.: *Bewertung von Teilentladungen in spaltförmigen Isolierstoffen*, Dissertation, Technische Universität Dortmund, Dortmund, 1998
- [FLO-18] FLORKOWSKI, M. et al.: *Mapping of discharge channels in void creating effective partial discharge area*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Ausgabe 25, Nr. 6, S. 2220-2228, 2018
- [FOR-08] FORSSÉN, C.: *Modelling of cavity partial discharges at variable applied frequency*, Dissertation, Königliche Technische Hochschule, Stockholm, 2008
- [FRO-94] FROMM, U.; KREUGER, F. H.: *Statistical Behaviour of Internal Partial Discharges at DC Voltage*, In: Japanese journal of applied physics, 33. Jg., 1. Teil, Nr. 12A, S. 6708-6715, 1994
- [FRO-95] FROMM, U.: *Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage*, Dissertation, Technische Universität Delft, Delft, 1995

-
- [FRO-56] FROMMHOLD, L.: *Das Potential einer Ladung innerhalb paralleler Platten und Randeffekte bei Elektronenlawinen*, In: Zeitschrift für Physik, Band 145, Nr. 3, S. 324-340, 1956
- [FUG-12] FUG ELEKTRONIK GMBH: *High voltage power supplies - Series HCP from 3,5 kV to 300 kV / 14 W to 15000 W*, 2012
- [GAL-79] GALLIMBERTI, I.: *The mechanism of the long spark formation*, In: Le Journal de Physique Colloques, 40. Jg., Nr. C7, S. 193-250, 1979
- [GAM-88] GAMEZ-GARCIA, M.; BARTNIKAS, R.; WERTHEIMER, M. R.: *Correlation of Surface Degradation and Charge Trapping in XLPE Subjected to Partial Discharge*, In: IEEE Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, S. 287-291, 1988
- [GEM-32] GEMANT, A.; VON PHILIPPOFF, W.: *Die Funkenstrecke mit Vorkondensator*, In: Zeitschrift für technische Physik, 13. Jg., Nr. 9, S. 425-430, 1932
- [GÖT-08] GÖTZ, D. et al.: *Localized PRPD Pattern for Defect Recognition on MV and HV Cables*, In: IEEE Conference on Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering, 2008
- [GUL-91] GULSKI, E.: *Computer-Aided Recognition of Partial Discharges using Statistical Tools*, Dissertation, Technische Universität Delft, Delft, 1991
- [GUL-95] GULSKI, E.: *Digital analysis of partial discharges*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2. Jg., Nr. 5, S. 822-837, 1995
- [HEN-82] HENRIKSEN, M.: *Partial Discharges in Spherical Cavities in Epoxy Resin: Their Dependence on Differential Material Parameters*, Dissertation, Technical University of Denmark, Kopenhagen, 1982
- [HIP-54] VON HIPPEL, A. R.: *Dielectrics and Waves*, In: M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1954
- [HOA-14] HOANG, A. T. et al.: *Charge decay on enamel wire surface*, In: International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE, 2014
- [HOL-91] HOLBØLL, J. T. et al.: *Simultaneous Detection of Optical & Electrical Signals from Partial Discharges. Discharge Phenomena in Voids in Epoxy*, In: International Symposium on High Voltage Engineering, 1991
- [HOL-92] HOLBØLL, J. T.; HENRIKSEN, M.: *Partial Discharge Patterns and Surface Deterioration in Voids in Filled and Unfilled Epoxy*, In: Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1992

- [HOO-97] HOOF, M.: *Impulsfolgen-Analyse: Ein neues Verfahren der Teilentladungsdiagnostik*, Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, Siegen, 1997
- [HOO-00] HOOGENRAAD, G.; BEYER, J.: *Digital HVDC Partial Testing*, In: Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, S. 448-451, 2000
- [HUD-90] HUDON, C. et al.: *Surface Conductivity of Epoxy Specimens subjected to Partial Discharges*, In: Conference Record of the 1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, S. 153–155, 1990
- [HUD-91] HUDON, C. et al.: *Analysis of degradation products on epoxy surfaces subjected to pulse and glow type discharges*, In: Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, S. 237–243, 1991
- [HUD-93] HUDON, C. et al.: *Spark-to-glow discharge transition due to increased surface conductivity on epoxy resin specimens*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, Nr. 1, S. 1–8, 1993
- [HUD-95] HUDON, C. et al.: *Effect of physico-chemical degradation of epoxy resin on partial discharge behavior*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, Nr. 6, S. 1083–1094, 1995
- [HUN-12] HUNTSMAN ADVANCED MATERIALS GMBH: *Araldite Casting Resin System - Araldite GY250*, 2012
- [HUN-14] HUNTSMAN ADVANCED MATERIALS GMBH: *Araldite Casting Resin System - Araldite CY228*, 2014
- [IWE-66] IEEE COMMITTEE REPORT: *Tests for Damaging Corona on Oil Insulated Transformers*, In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, Nr. 8, S. 892–893, 1966
- [JOL-64] JOLLEY, H.: *Methods and Techniques for Obtaining Partial Discharge Measurements on High Voltage Bushings*, In: Micanite, UK, 1964
- [KAH-89] KAHLE, M.: *Elektrische Isoliertechnik*, Springer, Berlin u. a., 1989
- [KER-21] KERN GMBH KUNSTSTOFFE: *Technisches Datenblatt PA6*, https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyamid-pa-6?n=1102_1, abgerufen am 27.05.2021
- [KEY-16] KEYSIGHT TECHNOLOGIES INC.: *Infiniium S-Series High-Definition Oscilloscopes - Data Sheet*, 2016
- [KIN-86] KINDERSBERGER, J. S.: *The statistical time-lag to discharge inception in SF₆*, Dissertation, Technische Universität München, München, 1986

-
- [KIN-08] KINDERSBERGER, J. S.; LEDERLE, CH.: *Surface Charge Decay on Insulators in Air and Sulfurhexafluorid - Part I: Simulation*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15. Jg., Nr. 4, S. 941-948, 2008
- [KNO-11] KNOPF, B. et al.: *Der Einstieg in den Ausstieg: Energiepolitische Szenarien für einen Atomausstieg in Deutschland*, In: Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement der Universität Leipzig im Auftrag der Friedrich-Ebert-Stiftung, Potsdam, 2011
- [KOD-88] KODOLL, W. R. et al.: *Internal partial discharge resistivity testing*, In: International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1988
- [KRE-95] KREUGER, F. H.: *Industrial High DC Voltage*, Delft University Press, Delft, 1995
- [KUE-17] KÜCHLER, A.: *Hochspannungstechnik Grundlagen - Technologie - Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin, 2017
- [LEG-61] LEGLER, W.: *Die Statistik der Elektronenlawine in Elektronegativen Gasen bei Hohen Feldstärken und bei Grosser Gasverstärkung*, In: Zeitschrift für Naturforschung, Band 16a, S. 253-261, 1961
- [LEM-91] LEMKE, E. et al.: *PD phenomena on dielectric surfaces under DC stress influenced by air humidity*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, 26. Jg., Nr. 3, S. 453-457, 1991
- [LEM-12] LEMKE, E.: *A critical Review of Partial Discharge Models*, In: IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 28, No. 6, S. 11-16, 2012
- [LIC-77] LICHTENBERG, G. C.: *Novi Commentarii Societatis*, In: Regiae Sci. Gottingae, 8. Jg., S. 168-180, 1777
- [LLO-27] LLOYD, W. L., STARR, E. C.: *Methods Used in Investigating Corona Loss By Means of the Cathode Ray Oscillograph*, In: Journal of the A.I.E.E., 46. Jg., Ausgabe 12, S. 997-1008, 1927
- [LUT-10] LUTZ, B.; Kindersberger, J. S.: *Influence of Absorbed Water on Volume Resistivity of Epoxy Resin Insulators*, In: International Conf. on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 2010
- [LUT-11] LUTZ, B.: *Einflussfaktoren auf die elektrische Feldverteilung in Isoliersystemen mit polymeren Isolierstoffen bei Gleichspannungsbelastung*, Dissertation, Technische Universität München, München, 2011
- [MAK-08] MAKALOUS, S. M.; Tenbohlen, S.; Feser, K.: *Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals*,

- In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Ausgabe 15, Nr. 6, S. 1069–1583, 2008
- [MAY-73] MAYOUX, C. et al.: *Influence of low energy ions in the degradation of polyethylene by partial discharges*, In: European Polymer Journal, Ausgabe 9, Nr. 10, S. 1069–1075, 1973
- [MAY-76] MAYOUX, C.: *Partial-discharge phenomena and the effect of their constituents on polyethylene*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Band EI-11, Ausgabe 4, S. 139–149, 1976
- [MAY-95] MAYOUX, C.; LAURENT, C.: *Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 2, Ausgabe 4, S. 641–652, 1995
- [MAS-78] MASON, J. H.: *Discharges*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Band EI-13, Ausgabe 4, S. 211–238, 1978
- [MCM-68] MCMAHON, E.: *The chemistry of corona degradation of organic insulating materials in high-voltage fields and under mechanical strain*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-3, Nr. 1, S. 3–10, 1968
- [MEI-01] MEIJER, S.: *Partial Discharge Diagnosis of High-Voltage Gas-Insulated Systems*, Dissertation, Technische Universität Delft, Delft, 2001
- [MIT-19] MITSUBISHI POLYESETER FILM GMBH: *Hostaphan® RN 50-350*, 2019
- [MOL-53] MOLE, G.: *Improved Methods of Test for the Insulation of electrical equipment*, In: Journal of the Institution of Electrical Engineers, Ausgabe 12, S. 276-283, 1953
- [MOL-70] MOLE, G.: *Basic characteristics of corona detector calibrators*, In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Nr. 2, S. 198-204, 1970
- [MON-00] MONROE ELECTRONICS INC.: *Operators' Manual for Monroe Electronics, Inc. Model 257D Portable Electrostatic Fieldmeter*, 2000
- [MON-95] MONTANARI, G. C.: *Aging and Life Models for Insulation Systems Based on PD Detection*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 2, Nr. 4, 1995
- [MOR-90] MORSHUIS, P. H. F.; KREUGER, F. H.: *Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids*, In: Journal of Physics D: Applied Physics, 23. Jg., Nr. 12, S. 1562-1568, 1990

-
- [MOR-93] MORSHUIS, P. H. F.: *Partial discharge mechanisms - Mechanisms leading to breakdown, analyzed by fast electrical and optical measurements*, Dissertation, Technische Universität Delft, Delft, 1993
- [NAT-93] NATTRASS, D. A.: *Partial Discharge XVII: The Early History of Partial Discharge Research*, In: IEEE Electrical Insulation Magazine, Band 9, Ausgabe 4, S. 27-31, 1993
- [NIE-91] NIEMEYER, L. et al.: *Simulation of Partial Discharges in Insulation Systems*, In: International Symposium on High Voltage Engineering, ISH, 71.05, S. 1-4, 1991
- [NIE-95] NIEMEYER, L.: *A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling*, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 2, Nr. 4, S. 510-528, 1995
- [NIK-89] NIPPON KOGAKU K.K: *Datenblatt UV-Nikkor 105mm f/4,5*, 1989
- [OLS-79] VON OLSHAUSEN, R.: *Durchschlagprozess in Hochpolymeren und ihr Zusammenhang mit den Leitungsmechanismen bei hohen Feldstärken*, Habilitationsschrift, Universität Hannover, Hannover, 1979
- [OMI-07] OMICRON ELECTRONICS GMBH: *Manual MPD 600 Partial Discharge Measurement System*, 2007
- [PCO-08] PCO AG: *sensicam uv; uv sensitive digital 12 bit CCD camera system*, 2008
- [PED-86] PEDERSEN, A.: *Current Pulses Generated by Discharges in Voids in Solid Dielectrics*, In: Conference Record of the 1986 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE, S. 112-114, 1986
- [PED-87] PEDERSEN, A.: *Partial discharges in voids in solid dielectrics. An alternative approach*, In: Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena-Annual Report, IEEE, S. 58-64, 1987
- [PED-89] PEDERSEN, A.: *On the Electrodynamics of Partial Discharge in Voids in Solid Dielectrics*, In: Proceedings of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, IEEE, S. 107-116, 1989
- [PED-91] PEDERSEN, A.; CRICHTON, G. C.; MCALLISTER, I. W.: *The Theory and Measurement of Partial Discharge Transients*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 3, S. 487-497, 1991
- [PHI-76] PHILIPPOW, E.: *Taschenbuch Elektrotechnik*, Band 6, Carl Hanser Verlag, München, 1976
- [PLE-13] EVONIK INDUSTRIES AG: *Technische Information Plexiglas®*, 2013

- [POP-13] POPHOF, B.; GSCHWENTNER, D.: *Umweltauswirkungen der Kabelanbindung von Offshore-Windenergieparks an das Verbundstromnetz: Effekte betriebsbedingter elektrischer und magnetischer Felder sowie thermischer Energieeinträge in den Meeresgrund*, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2013
- [RAE-64] RAETHER, H.: *Electron avalanches and breakdown in gases*, 1964
- [REP-83] REPP, H. et al.: *Partial Discharges in Voids: Inception Conditions and Detection Limits*, In: Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, Band 12, S. 101-106, 1983
- [SCH-19] SCHERING, H.: *Brücke für Verlustfaktormessungen*, Tätigkeitsbericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, 1919
- [SCH-25] SCHWAIGER, A.: *Die Hochspannungsisolatoren*, In: Elektrische Festigkeitslehre, Springer Verlag, 1925
- [SCH-75] SCHON, K.: *Reversible Erhöhung der Leitfähigkeit von Kunststoff-Folien durch Aufnahme von Salpetersäure während der Einwirkung von Teilentladungen*, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1975
- [SHO-38] SHOCKLEY, W.: *Currents to conductors induced by a moving point charge*, In: Journal of Applied Physics, Band 9, S. 635, 1938
- [STA-63] STARR, W. T.; AGRIOS, J. P.: *Relationship of Corona, Life and Reliability in PVC Cables*, In: IEEE Transactions on Communication and Electronics, 83. Jg., Nr. 70, S. 88-98, 1963
- [TAN-78a] TANAKA, T.; OKAMOTO, T.: *A microcomputer-based partial discharge measurement system*, In: IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Conference Record 78-CH1287-EI, S. 86-89, 1978
- [TAN-78b] TANAKA, J. et al.: *Degradation of Polymerics Exposed to Partial Discharges*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Band EI-13, Ausgabe 5, S. 327-336, 1978
- [TAN-86] TANAKA, T.: *Internal Partial Discharge and Material Degradation*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Band EI-21, Ausgabe 6, S. 899-905, 1986
- [THE-13] THEIL, G.: *Einfluss von Hochspannungs-Gleichstromsystemen auf die Zuverlässigkeit von Übertragungsnetzen*, In: Forschung Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien, Wien, 2013

-
- [THO-50] THOMAS, M. A.: *"Heat developed" and "powder" Lichtenberg figures and the ionization of dielectric surfaces produced by electrical impulses*, In: British Journal of Applied Physics, S. 98-108, 1950
- [TRE-07] TREK INC: *Model 341B; High-Speed, High-Voltage Electrostatic Voltmeter*, 2007
- [TRI-38] TRICHEL, G. W.: *The mechanism of the negative point to plane corona near onset*, In: Physical Review, 54. Jg., Nr. 12, S. 1078, 1938
- [TRI-39] TRICHEL, G. W.: *The mechanism of the positive point to plane corona in air at atmospheric pressure*, In: Physical Review, 55. Jg., Nr. 4, S. 382, 1939
- [WAG-24] WAGNER, K. W.: *Theoretische Grundlagen*, In: *Die Isolierstoffe der Elektrotechnik*, Springer Verlag, Berlin, 1924
- [WAG-66] WAGNER, K. H.: *Die Entwicklung der Elektronenlawine in den Plasmakanal, untersucht mit Bildverstärker und Wischverschluß*, In: Zeitschrift für Physik, Nr. 189, S. 465-515, 1966
- [WAN-18] WAN, X. et al.: *Pattern Recognition of Partial Discharge Image Based on One-dimensional Convolutional Neural Network*, In: 2018 Condition Monitoring and Diagnosis Conference, Perth, Australien, 2018
- [WOL-82] WOLTER, K. D.; TANAKA, J.; JOHNSON, J. F.: *A Study of the Gaseous Degradation Products of Corona-exposed Polyethylene*, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Ausgabe EI-17, S. 248-252, 1982

11 Normen

- DIN EN 60060-1 *DIN EN 60060-1, Hochspannungs-Prüftechnik - Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen, Oktober 2011*
- DIN EN 60270 *DIN EN 60270, Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungen, November 2016*
- DIN EN 62631-1 *DIN EN 62631-1, Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Elektroisierstoffe - Teil 1: Grundlagen, März 2012*

12 Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

a	Bezeichnung für einen Bereich
b	Bezeichnung für einen Bereich
B	Gaskonstante
C	Kapazität
C_{rad}	Strahlungsabsorptionskoeffizient
d	Schlagweite
d_1	Fehlstellenhöhe
d_2	Höhe des Isolierstoffs in Serie zur Fehlstelle
D	Durchmesser der Fehlstelle
D	elektrische Flussdichte
e	eulersche Zahl, Exponentialfunktion
E	elektrisches Feld
E_{DC}	elektrisches Feld bei Gleichspannungsbelastung
E_{ext}	von außen eingprägtes elektrisches Feld
E_{g}	Streamerstabilitätsfeld
E_{ges}	resultierendes elektrisches Gesamtfeld
E_{RL}	durch elektrische Raumladung induziertes elektrisches Feld
E_{Str}	Streamereinsatzfeld
E_{krit}	kritische elektrische Feldstärke
E_{Z}	Zündfeldstärke, d.h. Feldstärke ab der Teilentladungen auftreten können
E_{R}	Restfeldstärke, d.h. Feldstärke direkt nach dem Teilentladungsereignis
$(E/p)_{\text{crit}}$	druckbezogene kritische elektrische Feldstärke
E_{ϵ}	elektrisches Verschiebungsfeld
E_{ρ}	elektrisches Raumladungsfeld

f_{TE}	Frequenz des Teilentladungsauftritts
F	Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit eines lawinenwirksamen Anfangselektrons
i	zeitabhängiger Strom
i_c	zeitabhängiger kapazitiver Verschiebestrom
i_d	Verschiebestrom
i_e	durch Elektronenbewegung verursachter elektrischer Strom
i_L	im stationären Zustand fließender elektrischer Strom
i_p	durch Bewegung positiver Ionen verursachter elektrischer Strom
i_P	zeitabhängiger Polarisationsstrom
I	an der Hochspannungselektrode messbarer Klemmenstrom
I_d	durch Teilentladungen verursachter Strom
$I_{\rho i}$	Klemmenstrom während des Teilentladungsereignisses
I_t	durch Ladungsübertritt von der Elektrode zum Isolierstoff verursachter Strom
J	Leitungsstromdichte
k_{DC}	Quotient aus stationärer Spannung ohne Teilentladungsaktivität und Klemmenspannung
l_{min}	Mindestlänge für die Stoßionisation
n	Gaskonstante
\vec{n}	Normalvektor
N	Anzahl der Fehlstellen
N_e	Anzahl der lawinenwirksamen Anfangselektronen
p	Gasdruck
P	Polarisation
P_a	durch anliegende Spannung verursachte Polarisation
P_s	durch akkumulierte Ladung verursachte Polarisation
q	an den Klemmen durch Teilentladungsaktivität messbare scheinbare Ladung
q_i	Ladung an der i-ten Elektrode

q_i	Ladung eines Einzelimpulses in einem Teilentladungsereignis
q_t	Gesamtladung eines Teilentladungsereignisses
r	Radius der entladenen Fläche
R	Zufallszahl
s	Schlagweite der Funkenstrecke
S	Oberfläche
t	Zeit
t_L	Zeit zwischen Überschreiten der minimalen Teilentladungseinsetzspannung und des tatsächlichen Teilentladungseinsatzes
t_{pre}	Zeit seit dem vorangegangenen Teilentladungsereignis
t_R	Zeit zwischen Teilentladungsaussatz und dem Überschreiten der minimalen Teilentladungseinsetzspannung
t_{suc}	Zeit bis zum nachfolgenden Teilentladungsereignis
T_1	Stirnzeit
T_2	Rückenhalfwertszeit
u	zeitabhängige Spannung
\hat{u}	höchster Wert der Prüfspannung
U	Gleichspannung
U	Potentialdifferenz
U_0	Ladespannung
U_{FS}	Spannung über der Fehlstellenmitte
U_{min}	minimale Teilentladungseinsetzspannung
U_i	Teilentladungseinsetzspannung
U_i	Spannung an der i-ten Elektrode
U_R	Restspannung über der Fehlstelle nach Ende einer Teilentladung
U_Z	Zündspannung über der Fehlstelle
U_∞	stationäre Spannung über der Fehlstelle ohne Teilentladungsaktivität
U_{Klemme}	Klemmenspannung
v	Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger

v_e	Driftgeschwindigkeit der Elektronen
V	Potential (im Prüfkörper)
V_{Vi}	skalares Potential der raumladungsfreien Anordnung im Vakuum
V_{eff}	effektives Volumen
x_e	von den Elektronen zurückgelegter Weg
x_p	von den positiven Ionen zurückgelegter Weg
α	Ionisationskoeffizient
$\bar{\alpha}$	effektiver Ionisationskoeffizient
ε	Permittivität
ε_0	Permittivität des Vakuums
ε_r	relative Permittivität
γ	Gaskonstante für Streameraussatz
φ	positive, skalare Antwortfunktion im Vakuum
ϕ_{rad}	Strahlungsabsorptionskoeffizient
κ	elektrische Leitfähigkeit
λ	positive, skalare Antwortfunktion in Materie
μ	Dipolmoment
η	Anlagerungskoeffizient
$\eta_{Sto\beta}$	Stoßausnutzungsgrad
η_i	Ionisationswirkungsgrad
ρ	Ladungsträgerdichte
ρ	Gasdichte
σ	Flächenladungsdichte
τ	Zeitkonstante
Ω	Gesamtvolumen

Abkürzungen

BNC	Standard für koaxiale Steckverbinder (Bayonet Neill Concelman)
C _B	Belastungskapazität
C _S	Stoßkapazität
DT	Detrapping
EP	Epoxidharz
FD	Feldablösung (field detachment)
FS	Fehlstelle (Fehlstellenseite)
FE	Feldemission (field emission)
I	Isolierstoff (Isolierstoffseite)
II	Einschlagionisation (impact ionisation), zweite townsendische Ionisation
PA	Polyamid
PE	Photoemission
PE-LD	Polyethylen Low Density
PE-HD	Polyethylen High Density
PET	Polyethylenterephthalat
PI	Photoionisation
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
R _D	Dämpfungswiderstand
R _E	Entladewiderstand
R _L	Ladewiderstand
RTV-Silikon	raumtemperaturvernetzendes Silikon (Room Temperature Vulcanization)
SF	Schaltfunkenstrecke
UV	Ultraviolett
XLPE	vernetztes Polyethylen