

Optische und elektrische Untersuchungen zu Teilentladungen in transparenten Silikonelastomeren

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Susanne Behrend
geb. in Berlin

von der Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender : Prof. Dr.-Ing. J. Kowal (TU-Berlin)
Gutachter : Prof. Dr.-Ing. R. Plath (TU-Berlin)
Gutachter : Prof. Dr.-Ing. E. Gockenbach (Leibniz Universität Hannover)
Gutachter : Dr.-Ing. Wolfgang Habel (BAM Berlin)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19.12.2014

Berlin 2015

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen von Forschungsaktivitäten der TU Berlin, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM), des IPH Instituts „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik“ GmbH Berlin, CESI Group und der Beuth Hochschule für Technik zur nichtelektrischen Teilentladungsmessung im Zeitraum von 2008 bis 2014.

Sehr herzlich möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Kalkner und seinem Nachfolger Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Plath danken, dass sie mir die Möglichkeit zur Ausarbeitung meiner Dissertation am Institut für Energie- und Automatisierungstechnik, Fachgebiet Hochspannungstechnik der TU Berlin gaben. Ihre stete Unterstützung, wertvolle Ratschläge und die Schaffung der Arbeitsbedingungen trugen wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei. Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Plath danke ich ebenfalls für die Übernahme des Erstgutachtens.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Gockenbach (Leibniz Universität Hannover) und Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Habel (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin) bedanke ich mich für die bereitwillige Übernahme der Korreferate und das damit verbundene Interesse an der Arbeit. Herrn Dr.-Ing. W. Habel danke ich außerdem für die Bereitstellung von optischer Messtechnik und die Unterstützung während der Durchführung der Arbeit.

Herrn R. Schiller, Direktor Technik und Prüfbetrieb, IPH Institut Berlin danke ich für die gebotene Möglichkeit, experimentelle Untersuchungen im Institut durchzuführen und die dabei erfahrene Unterstützung. In gleicher Weise bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Pepper, Beuth Hochschule für Technik Berlin für die Bereitstellung von Hochspannungsprüf- und -messtechnik zur Durchführung der umfangreichen experimentellen Untersuchungen.

Weiterhin richtet sich ein besonderer Dank an Herrn Dr. rer. nat. G. Heidmann, IPH Institut Berlin. Die stete Unterstützung, Koordinierung von experimentellen Untersuchungen und die wertvollen Ratschläge trugen wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei.

Mein spezieller Dank geht an die Studentinnen und Studenten der Beuth Hochschule für Technik Berlin und der TU Berlin, die mit ihren Master- und Bachelorarbeiten sowie im Rahmen ihrer Praktika vor allem die experimentellen Arbeiten vorangetrieben haben.

Zossen

im September 2014

Kurzfassung

Fehlstellen in Feldsteuerteilen von Kabelgarnituren können bei deren Herstellung ebenso nicht ausgeschlossen werden wie Fehlstellen in Grenzflächenbereichen bei der Montage vor Ort. Sie bewirken lokale Störungen des elektrischen Feldes und können durch ihre feldüberhöhende Wirkung zur Ausbildung kanalförmiger Strukturen (Trees) mit einer örtlichen Zerstörung des Isoliergefüges führen. Diese Zerstörungen verursachen letztlich das Versagen des gesamten Bauelementes.

Die Entladungen in den Kanälen können durch die Erfassung damit verbundener Stromimpulse mittels Teilentladungsmesstechnik nachgewiesen werden, deren Einsatz bei vor Ort Messungen durch elektromagnetische Störungen unter Umständen stark behindert wird.

Durch den zunehmenden Einsatz von transparenten/transluzenten Silikonelastomeren in den Garnituren und den mit Entladungen verbundenen optischen Wirkungen ergeben sich alternative Möglichkeiten, innere Teilentladungen in Feststoffisolierungen auch optisch zu erfassen.

Die Arbeit befasst sich mit Untersuchungen zur optischen Detektion von inneren Teilentladungen in Hochspannungsisolieranordnungen aus transparenten/transluzenten Silikonelastomeren, zur Signalverarbeitung und zur Darstellung der Ergebnisse. Schwerpunkte waren:

- die Auswahl und Erprobung technischer Lösungen zur optischen Signalerfassung als zusätzliche Messkanäle des digitale Mehrstellen-TE-Messsystems MPD 540/600,
- Untersuchungen zu optischen Eigenschaften transparenter Silikonelastomere einschließlich der Spektren sich darin ausbildender Teilentladungen und
- Untersuchungen zum Kanaleinsatz und –aufbau und zum Wachstumsverhalten der kanalförmigen Strukturen im Silikonmaterial sowie im Grenzflächenbereich Silikon↔VPE.

Die Messungen erfolgten an Prüfkörpern mit Nachbildungen unterschiedlicher, praxisnaher Fehlstellen zeitsynchron zur elektrischen Teilentladungsmessung.

Es wurde gezeigt, dass mit der optischen Entladungserfassung vergleichbare Ergebnisse zu den elektrischen Messungen erhalten werden, ohne dass die optischen Kanäle den Einschränkungen der elektrischen Messtechnik in einer praktischen Anwendung unterliegen.

An einem Modell eines 20 kV-Aufschiebeendverschlusses in einem VPE-Kabelaufbau wurde durch die optische und elektrische Erfassung der von künstlich eingebrachten Fehlstellen im Endverschlussbereich ausgehenden Teilentladungen die Praxistauglichkeit der optischen Entladungserfassung demonstriert.

Die Ergebnisse sind ein Beitrag zur Charakterisierung von Silikonelastomeren sowie deren Weiterentwicklung für Anwendungen in Garnituren, und zeigen Möglichkeiten für eine optische Entladungserfassung in Feststoffisolierungen auf.

Abschließend werden die Optimierungspotentiale der verwendeten optischen Messtechnik aufgeführt und eine grafische Möglichkeit der vergleichenden Auswertung von elektrisch und optisch erfassten Größen erläutert.

Abstract

Defects in stress cones of cable accessories cannot be excluded during manufacturing as well as defects in the interface regions during on-site installation of the accessories. These defects are the cause for disturbances of the electrical field and lead to excessive local field strengths. Those field strengths provoke the local destruction of the isolating structure through the formation of channel-like structures (trees) which ultimately lead to the failure of the whole component.

Discharges in the channels can be detected by the observation of associated current impulses which can be recorded using partial discharge measurement technology. However, on-site electrical partial discharge measurements often suffer from severe electromagnetic interference.

The increasing application of transparent or translucent silicone elastomers in cable accessories opens up alternative opportunities for the optical recording of partial discharges, due to the optical effects associated with discharges.

This work addresses investigations for optical recording of discharges within high-voltage insulations made from transparent silicone materials, for signal processing and for presentation of the results. Emphases were:

- the selection and testing of technical solutions for optical recording of signals as optical data channels included in the digital multi-channel partial discharge measurement system MPD 540/600,
- investigations of optical properties of transparent silicone elastomers including the spectra of propagating discharges and
- investigations into initiation and propagation of tree growth as well as growth behaviour of these channel-like structures in the bulk silicone material and in the interface region between silicone and XPE.

The measurements were carried out on specimen with simulated defects of practical relevance synchronised with the electrical partial discharge measurements.

It was shown, that the optical channels provide comparable results to the electrical measurements, without suffering from the limitations of electrical detection in real-life applications. The suitability of optical discharge measurement for real-life applications was demonstrated on a 20 kV slip-on termination installed on an XLPE cable by optical and electrical recording of PDs provoke by artificial defects in the termination region.

The obtained results contribute to the characterisation of silicone elastomers as well as to the future development for applications in accessories and they show new opportunities for optical discharge recording in solid insulators.

Finally, the optimisation potential of the utilized optical measurement equipment is discussed and a graphical method for the comparative evaluation of electrical and optical data is presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
1.1	Motivation	4
1.2	Ziel und Aufgabenstellung der Arbeit	7
2	Erkenntnisstand zu Auswirkungen elektrischer Felder auf polymere Isolierungen	9
2.1	Grundlagen	9
2.1.1	Energiebändermodell polymerer Isolierstoffe	10
2.1.2	Ladungsträgerbereitstellung und Ladungsträgertransport in polymeren Isolierstoffen	11
2.1.3	Phänomenologisches Alterungsmodell und Tree-/Kanalwachstum in polymeren Isolierungen	16
2.2	Schädigungsprozesse in polymeren Isolierstoffen	18
2.2.1	Schädigungsprozesse vor Auftreten von Teilentladungen	19
2.2.2	Kanal-/Treewachstum in polymeren Isolieranordnungen	22
2.2.3	Wachstumsmodelle für Treestrukturen mit nichtleitenden Kanalwänden	32
2.3	Schlussfolgerungen für die eigenen Untersuchungen	32
2.4	Berechnung des Kanaleinsatzes in polymeren Isolierstoffen	33
2.5	Abschätzung zur Größenordnung der zu erfassenden Signale	34
2.6	Eigenschaften von Silikonelastomeren für Anlagen der Hochspannungstechnik	34
3	Prüfkörper für die simultane optische und elektrische Erfassung von Entladungsprozessen	37
3.1	Verwendete Silikonmaterialien	37
3.2	Prüfkörperübersicht	40
3.3	Prüfkörper mit Nadel-Platte-Elektrodenanordnung	40
3.3.1	Prüfkörperaufbau	40
3.3.2	Herstellung der Prüfkörper	43
3.3.3	Vorbehandlung	44
3.3.4	Verwendete Prüfkörper	45
3.4	Prüfkörper mit Streifenelektrode-Platte Elektrodenanordnung	45
3.4.1	Prüfkörperaufbau	45
3.4.2	Verwendete Prüfkörper	47
3.5	Prüfkörper mit VPE-Silikongrenzfläche	48
3.5.1	Prüfkörperaufbau	48
3.5.2	Verwendete Prüfkörper	50
4	Aufbau und Gestaltung des Systems zur elektrischen und optischen Signalerfassung und -verarbeitung	52
4.1	Spektren von Teilentladungen in transparenten Silikonelastomeren	53
4.2	Optische Erfassung von inneren Entladungen in transparenten/transluzenten Isolieranordnungen	56
4.2.1	Fluoreszierende Lichtwellenleiter	57
4.2.2	Linsenanordnungen mit fest verbundenem Transportlichtwellenleiter	65
4.2.3	Wandlung der optischen Signale	66

5	Zeitsynchrone optische und elektrische Erfassung von Entladungsprozessen	69
5.1	Stufenförmig steigende Spannungsbeanspruchung	74
5.2	Konstante Spannungsbeanspruchung	74
5.3	Einsatz eines Kamerasystems zur Bewertung von Kanalstrukturen	75
5.4	Spezifische Besonderheiten einer optischen TE-Erfassung	76
5.5	Korrelation zwischen elektrisch und optisch ermittelten Messwerten.....	78
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	79
6.1	Prüfkörper mit Nadel-Platte-Elektrodenanordnung	79
6.1.1	Ergebnisse bei stufenförmiger Spannungssteigerung (Kanaleinsatz)	80
6.1.2	Ergebnisse bei konstanter Spannungsbeanspruchung (Kanalaufbau)	81
6.2	Prüfkörper mit streifenförmiger Spitzenelektrode	100
6.2.1	Ergebnisse bei stufenförmiger Spannungssteigerung (Kanaleinsatz)	100
6.2.2	Ergebnisse bei konstanter Spannungsbeanspruchung (Kanalaufbau)	102
6.3	Prüfkörper mit VPE-Silikon-Grenzfläche mit Nadelelektrode	117
6.3.1	Ergebnisse bei stufenförmiger Spannungssteigerung (Kanaleinsatz)	117
6.3.2	Ergebnisse bei konstanter Spannungsbeanspruchung (Kanalaufbau)	118
6.4	Orientierende Untersuchungen an einem Model eines 20 kV-Aufschiebeendverschlusses.....	128
7	Diskussion und Interpretation der Ergebnisse	135
7.1	Optische Erfassung von inneren Entladungen in Feststoffisolierungen	135
7.2	Isolieranordnungen aus transparenten Silikonelastomeren ohne makroskopische Grenzflächen und ohne Vorbehandlung.....	137
7.2.1	Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)	137
7.2.2	Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)	138
7.3	Isolieranordnungen aus transparenten Silikonelastomeren ohne makroskopische Grenzflächen nach einer Vorbehandlung.....	141
7.3.1	Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)	141
7.3.2	Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)	142
7.4	Isolieranordnungen aus transparenten Silikonelastomeren ohne makroskopische Grenzflächen und Vorbehandlung mit streifenförmigen Hochspannungselektroden	144
7.4.1	Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)	145
7.4.2	Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)	145
7.5	Isolieranordnungen mit VPE-Silikon-Grenzfläche	149
7.5.1	Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)	149
7.5.2	Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)	149
7.6	Modelle von 20 kV-Aufschiebeendverschlüssen aus transparentem Silikonelastomer.....	153
7.7	NARDiagramm.....	153
8	Zusammenfassung	157
8.1	Gestaltung und Eigenschaften der optischen Messanordnungen	157
8.2	Vergleichende optisch und elektrische Erfassung des Einsetzens von inneren Teilentladungen (Kanaleinsatz).....	158

8.3	Vergleichende optisch und elektrische Erfassung des Treewachstum (Kanalaufbau) und Ermittlung von Wachstumsgeschwindigkeiten.....	160
8.4	Signalerfassung an Modellen eines 20 kV-Aufschiebeendverschlusses.....	161
9	Ausblick.....	163
10	Abkürzungs- und Formelverzeichnis	165
10.1	Abkürzungen.....	165
10.2	Verwendete Größen.....	165
11	Literaturverzeichnis	167

1 Einleitung

1.1 Motivation

Moderne Kabelanlagen mit ihren Kunststoffdielektrika sind neben Transformatoren, Schaltanlagen und Freileitungen wesentliche Bestandteile der Elektroenergieübertragungs- und -verteilungsnetze. Durch die wachsende Energieerzeugung aus alternativen Quellen und den dadurch erforderlichen Um- und Ausbau bestehender Netzstrukturen gewinnen Wechsel- und Gleichspannungsanlagen unter Offshore- und Onshore-Verlegebedingungen weiter an Bedeutung. Von allen diesen Betriebsmitteln wird ein störungsfreier Betrieb über Jahrzehnte erwartet, wobei das Isoliersystem im Wesentlichen die Lebensdauer bestimmt. Im Unterschied zu den kompakten Anlagen wie Transformatoren und Schaltanlagen werden die in der Regel ausgedehnten Kabelanlagen aus einzelnen Komponenten wie Kabelteillängen, Verbindungsmuffen und Endverschlüssen vor Ort montiert. Dabei wird in das Isoliersystem dieser Kabelanlagen eingegriffen.

Trotz aufwändiger Qualitätsüberwachung und einer ständigen Verbesserung der Produktionsverfahren sind Fehlstellen im Isoliervolumen dieser energietechnischen Betriebsmittel bei der Herstellung und insbesondere bei der Kabelmontage nicht auszuschließen. Sie können sich aber auch erst während des Betriebs herausbilden. Insbesondere die unter dem Begriff Garnituren zusammengefassten Verbindungsmuffen und Endverschlüsse von Kabelanlagen stellen im Vergleich zur freien Kabelstrecke Bereiche erhöhter Ausfallwahrscheinlichkeit dar. Dies resultiert insbesondere aus der Tatsache, dass Garnituren vor Ort montiert werden und konstruktionsbedingte komplexe Grenzflächen mit zum Teil zusätzlichen gasförmigen oder flüssigen Isolierstoffen enthalten. Während die Kabelteillängen vorgeschriebene Qualitätsprüfungen bestanden haben, werden von den Garnituren nur Teilbaugruppen (Stresskone) stückgeprüft.

Eine bei Neumann [1] vorgenommene Auswertung des Ausfallgeschehens, verursacht durch innere Fehlstellen¹ von Hoch- und Höchstspannungskabelanlagen mit extrudierter Isolierung, ergab, dass dieses eindeutig durch Muffen und Endverschlüsse bestimmt wird. Weiterhin zeigte sich, dass die Fehlerrate in den höheren Spannungsebenen (220 kV und höher) deutlich größer wird. Daher wird empfohlen, Garnituren von Höchstspannungskabelanlagen, die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen unterliegen, mit Teilentladungssensoren auszurüsten. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Auswertungen des Fehlergeschehens in japanischen VPE-Kabelnetzen der dort sehr verbreiteten Verteilungsebene zwischen 66 kV und 77 kV und von jeweils einjährigen Präqualifikationstests an 400 kV-VPE Kabeln und Garnituren führender europäischer Hersteller [2], [3]. Die vorgenommenen Auswertungen von Uchida [2] ergaben, dass annähernd 90 % aller im Betrieb oder anlässlich einer Spannungsprüfung aufgetretenen Durchschläge in den Garnituren und lediglich 10 % in den Kabeln stattgefunden hatten. Von allen im Rahmen der Präqualifikationstests unter definiert alterungsbeschleunigenden Versuchsbedingungen aufgetretenen Fehlern betrafen nach Kunze [3] ca. 17 % die Kabel und 83 % die Garnituren.

Unter dem Begriff Fehlstellen in Dielektrika werden makroskopische Defekte zusammengefasst, die in Form von Verunreinigungen (impurities), Hohlräumen (voids), Rissen, Spalten und Pickel (protrusions) auf feldsteuernden Schichten auftreten können und im Allgemeinen technologisch sowie bei Garnituren auch montage-technisch be-

¹ Der Fehlerursprung befindet sich innerhalb des Isoliersystems und wird nicht durch äußere Entladungen hervorgerufen.

dingt sind. Sie führen zu lokalen Störungen des elektrischen Feldes und können Ausgangspunkt einer beschleunigten Alterung mit nachfolgender Zerstörung des Isoliersystems sein. Alterung ist nach IEC 505 [4] definiert als „nichtumkehrbare schädliche Änderung der Betriebsfähigkeit von Isoliersystemen“ und beinhaltet einen in der Gesamtheit stattfindenden Prozess, der langsam und gleichmäßig voranschreitet. Dem Gegenüber werden unter dem Begriff Schädigung Erscheinungen zusammengefasst, welche eine eher lokal begrenzt auftretende Schwächung im Dielektrikum bewirken [5]. Die Gefährlichkeit der Alterungsmechanismen hängt nach Küchler [6] vor allem davon ab, inwieweit bei Konstruktion und Fertigung die damit zusammenhängenden Einwirkungen auf den Isolierstoff vorhergesehen und präventiv ausgeschlossen werden.

Die Diagnostik zur Ermittlung des Zustandes eines Hochspannungsgerätes hat in den letzten Jahren aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine erhebliche Bedeutung erlangt [7]. Von den in festen Isolierstoffen möglichen Durchschlagprozessen ist der Erosionsdurchschlag², ein Langzeitdurchschlag als Folge von Alterungsvorgängen in elektrisch hoch beanspruchten Bereichen der elektrisch Isolierung, maßgebend, der vorwiegend durch feldüberhöhende Fehlstellen initiiert wird [9]. Dieser Durchschlag wird durch Teilentladungen eingeleitet, seine Entstehung ist mittels Teilentladungsmessungen nachweisbar. Unter dem Begriff Teilentladung werden nach IEC 60270 [10] Teildurchschläge im Isoliervolumen zusammengefasst, die insbesondere in Feststoffisolierungen zu lokalen Isolationsschäden bis hin zum Totalausfall (Durchschlag) führen.

Angaben zu Reinheitsanforderungen für das in Hoch- und Höchstspannungskabeln als Isoliermaterial verwendete Polyethylen sind bei Weißenberg [11] sowie Beispiele für derartige Unregelmäßigkeiten bei Ishibashi [15] enthalten. Für Silikonelastomere, die wegen ihrer ausgezeichneten mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften als Isoliermaterial in Garnituren eingesetzt werden, sind diese Angaben bei Weißenberg [11] und bei Weißenberg und Kuschel [12] aufgeführt. Die Auswirkungen von Grenzflächen von Hochspannungs- Kabelgarnituren werden bei Weißenberg [13] und Kaumanns und Schröder [16] diskutiert.

Durch standardisierte Prüfungen beim Hersteller (Stückprüfungen) und Inbetriebnahmeprüfungen nach der Montage vor Ort soll ausgeschlossen werden, dass fehlerhafte Komponenten verwendet werden und Montagefehler unerkannt bleiben [14], [17]. Zentraler Bestandteil dieser Prüfungen ist eine zuverlässige Teilentladungs-(TE)-Messung bei vorgegebener Spannungsbeanspruchung, die als integraler Bestandteil in internationalen Prüfvorschriften und Kundenvorgaben für die meisten energietechnischen Betriebsmittel gefordert wird, z. B. für Kabelanlagen in den IEC-Vorschriften IEC 60840 [19] und IEC 62067 [20] für Hoch- und Höchstspannungskabel.

Bei TE-Messungen an energetischen Betriebsmitteln außerhalb geschirmter Prüffelder, eine im Rahmen des „online-“ und „offline“-Monitoring³ für Hochspannungskabel und gasisolierte Hochspannungsanlagen unverzichtbare Grundlage für die Diagnose, kann durch das Vorhandensein von externen Störsignalen die Interpretation der Ergebnisse erheblich erschwert oder sogar unmöglich gemacht werden [7], [17]. Technische Lösungen zur Umgehung dieser Probleme bestehen in der Unterdrückung von Puls- und Frequenzstörungen zur Unterscheidung von externen und geräteinternen TE-Quellen oder in der Nutzung des breitbandigen Spektrums von Teilentladungen im VHF- oder UHF-Bereich [21].

² Wegen des Zusammenhangs mit fertigungstechnischen Problemen auch als „technologisch bedingter Durchschlag“ und „Fehlstellendurchschlag“ bezeichnet [9].

³ „online“-Monitoring: Zustandserfassung unter Betriebsbedingungen;
„offline“-Monitoring: Zustandserfassung häufig vor Ort, aber nicht unter Betriebsbedingungen; [7]

Weitere Möglichkeiten sind in Abbildung 1 aufgeführt, wobei die bisher technisch genutzten optischen Verfahren nur eine visuelle Beurteilung des TE-Geschehens ermöglichen. Im Unterschied zu elektrischen Verfahren nach IEC 60270 ist bei optischen Messverfahren keine Bewertung der optischen Wirkung von Teilentladungen durch die scheinbare Ladung möglich. Die Funktion des Ankoppelvierpols wird von einem geeigneten Sensor übernommen, die Übertragungswege und -eigenschaften unterscheiden sich deutlich von denen der elektrischen TE-Messung.

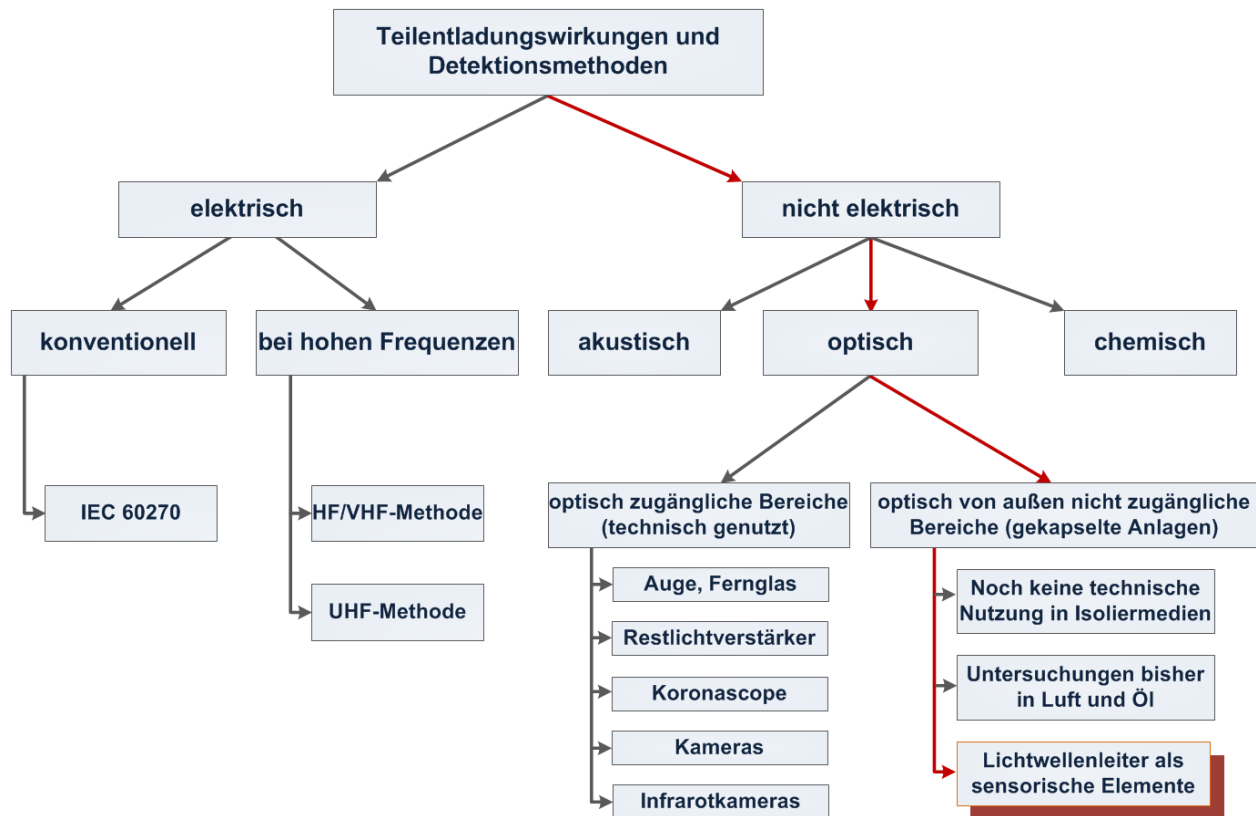


Abbildung 1: Detektionsmethoden für makroskopische, physikalische Wirkungen von Teilentladungen

Die optischen und akustischen Wirkungen resultieren aus Ionisations-, Anregungs- und Rekombinationsprozessen während einer Entladung und durch Erzeugung von akustischen Wellen und werden durch elektromagnetische Störungen aus der Umgebung nicht beeinflusst.

Bisherige Erkenntnisse von Untersuchungen optischer Wirkungen zeigen, dass die Entladungen mit der Emission von Photonen im Wellenlängenbereich von ca. 350 nm (UV) bis ca. 800 nm (NIR) des Strahlungsspektrums, das heißt, mit Licht verbunden sind [22]. Sie können unter Verwendung geeigneter optischer Messtechnik prinzipiell detektiert werden. Forschungsarbeiten auf diesen Gebieten wurden als zukunftsorientierende Schwerpunkte bezeichnet, insbesondere auch für Anwendungen in Garnituren mit im Vergleich zum Kabel erhöhten Fehlerraten [29]. Optische Verfahren können aber auch bei der Erfassung von Auswirkungen impulsförmiger Spannungen mit hoher Steilheit und Frequenz auf polymere Isolierungen von DC-Kabelanlagen, die im Zusammenhang mit HGÜ-Systemen auftreten, Bedeutung erlangen [8]. Im Hinblick auf eine weitere Erhöhung der Qualität der Diagnostik ist neben der Teilentladungsmesstechnik auch die Erfassung weiterer betriebsrelevanter Anlagengrößen zu verbessern und vervollkommen, um die angestrebten Ziele nach Zustandsbestimmung, Fehlerfrüherkennung, Opti-

mierung der Instandhaltungsstrategien sowie Lastoptimierung zu erreichen [1], [7], [18], [24].

Die Motivation für die vorliegende Arbeit war, mit den Untersuchungen zur Erfassung von inneren Teilentladungen mittels optischer Verfahren einschließlich Untersuchungen zu optischen und elektrischen Eigenschaften transparenter Silikone einen Beitrag zur Erweiterung und Verbesserung der Zustandsbewertung von Hochspannungskabelgarnituren zu leisten. Die Notwendigkeit solcher Untersuchungen ist insbesondere dadurch gegeben, dass transparente/transluzente Silikonelastomere für Stresskone und Muffenkörper z. T. bereits eingesetzt werden und verfügbar sind. Über umfassende Untersuchungen zu dieser Problematik wurde bisher, trotz der zuvor geschilderten Notwendigkeit für den wirtschaftlichen Nutzen beim Einsatz in Hochspannungskabelgarnituren, noch nicht berichtet.

1.2 Ziel und Aufgabenstellung der Arbeit

Für die vorliegende Arbeit wurden zwei Schwerpunkte festgelegt, deren Untersuchung weitere Erkenntnisse zur Ausbildung von inneren Teilentladungen in Isolieranordnungen aus transparenten Silikonelastomeren und deren optische Detektion liefert:

1. Konzeption, Gestaltung und Erprobung von technischen Lösungen zur optischen Erfassung und Bewertung von inneren Entladungen in Isolieranordnungen aus transparenten/transluzenten Silikonelastomeren als Bestandteil eines digitalen Mehrstellen-TE-Messsystems.

Die einzelnen Aufgaben beinhalten

- die Entwicklung von Lösungen für Komponenten optischer Systeme zur fehlstellennahen Entladungsdetektion und unter Berücksichtigung einer Anordnung der optischen Messaufnehmer im elektrischen Feld. Die Ansprechschwellen sollten im Bereich der elektrischen TE-Messverfahren liegen (Abschnitt 4.2).
 - die Bestimmung notwendiger optischer Eigenschaften transparenter Silikonelastomere zur Dimensionierung der Systeme, insbesondere die Bestimmung des Spektrums der von leitenden Fehlstellen in Silikonelastomeren ausgehenden Entladungen, sowie von Transmissionseigenschaften dieser Isolierstoffe (Abschnitte 3.1, 4.1).
 - die Erprobung der gefundenen Lösungen an unterschiedlich gestalteten Prüfkörpern mit Nachbildungen praxisrelevanter Fehlstellen. Vergleichende Bewertung der Ergebnisse durch eine zeitsynchrone elektrische TE-Messung und unter Einbeziehung weiterer optischer Verfahren (Abschnitte 6.1 bis 6.3).
 - die zeitsynchrone optische und elektrische Erfassung von inneren Entladungen im Endverschlussbereich eines Mittelspannungs-VPE-Kabels unter Nutzung der gefundenen Lösungen als Demonstration für eine praktische Umsetzbarkeit (Abschnitt 6.4).
2. Entwicklung von Kanalstrukturen und deren Wachstumsverhalten, ausgehend von Nachbildungen praxisrelevanter Fehlstellen in transparenten Silikonelastomeren und im Grenzflächenbereich Silikon↔VPE unter Wechselspannungsbeanspruchung.

Die einzelnen Aufgaben beinhalten

- Ermittlung von TE-Einsetz- und Aussetzspannungen bei stufenförmiger Spannungssteigerung und –absenkung (Kanaleinsatz) (Abschnitte 6.1.1, 6.2.1 und 6.3.1).
- zeitsynchrone Erfassung des unter konstanter Spannungsbeanspruchung sich entwickelnden Treewachstums (Kanalaufbau) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer durch optische und elektrische Messtechnik. Ergänzende Charakterisierung des Wachstumsverhaltens unter Verwendung eines Kamerasystems (Abschnitte 6.1.2, 6.2.2 und 6.3.2).

2 Erkenntnisstand zu Auswirkungen elektrischer Felder auf polymere Isolierungen

Unter elektrischer Beanspruchung laufen in polymeren Isolieranordnungen⁴ Prozesse⁵ ab, die im Allgemeinen durch eine von Fehlstellen ausgehende Ladungsträgeraktivierung und eine Aktivierung im Isoliervolumen selbst verursacht werden. Derartige Fehlstellen können im Isoliervolumen technologisch bedingt sein (Inhomogenitäten) oder ihre Ursache in den Grenzflächenbereichen zwischen Isolierstoff und Hochspannungselektrode oder zwischen unterschiedlichen Isolierstoffen haben. Die Prozesse führen wegen ihres kumulativen Charakters zu irreversiblen Strukturänderungen, die letztlich das globale Versagen des gesamten Isoliersystems einleiten und als Erosionsdurchschlag bezeichnet werden.

Notwendige Voraussetzung für diese Prozesse ist das Vorhandensein frei beweglicher Ladungsträger im Isolierstoff. Deren Bereitstellung, Transport und Speicherung in polymeren Isoliermaterialien unter Einwirkung elektrischer Felder wird durch unterschiedliche Modelle beschrieben. Daraus resultierende, häufig verwendete Berechnungsgleichungen für sich ergebende Stromdichten sind im Abschnitt 2.1 angegeben. Ebenfalls kurz dargestellt wird ein Alterungsmodell, das die Auswirkungen elektrischer Felder auf den polymeren Isolierstoff bis zur Ausbildung erster Entladungskanäle beschreibt. Danach treten bereits vor dem Einsetzen von messbaren Teilentladungen im Bereich $<0,1$ pC bis $0,01$ pC irreversible Schädigungen im Isolierstoff (Initialaufbruch) auf, die nur mit spezieller optischer Messtechnik nachweisbar sind (Elektrolumineszenz). Eine Übersicht über dazu im Labormaßstab durchgeführte Untersuchungen an polymeren Isolierstoffen enthält der Abschnitt 2.2.1. Bei Fortbestehen der Beanspruchung bilden sich erste Kanäle im Submillimeterbereich, die sich zu unterschiedlichen Kanalstrukturen entwickeln (electrical treeing). Diese Kanäle wachsen bis zur Gegenelektrode vor und leiten den Durchschlag ein. Für die dafür verantwortlichen Prozesse existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle. Einen Überblick über diese Modelle einschließlich von experimentellen Ergebnissen wird von Dissado [25] angegeben. Eine Ergebnisübersicht unter Verwendung von Silikonen enthält der Abschnitt 2.2.2 und von weiteren polymeren Werkstoffen der Abschnitt 2.2.2.3. In den Abschnitten 2.4 und 2.5 wurden Abschätzungen zu auftretenden Feldstärken und zu Wellenlängenbereichen optischer Signale zusammengefasst.

2.1 Grundlagen

Die mit einer dielektrischen Alterung und dem Verlust der Isolierfähigkeit polymerer Isolierstoffe verbundenen komplexen, zeitabhängigen Prozesse sind Gegenstand vielfältiger Untersuchungen und werden auch in Zukunft ein wesentlicher Bestandteil der Isolierstoffforschung bleiben [3], [33]. Nur das Verständnis der diese Prozesse steuernden physikalisch-chemischen Mechanismen bietet Möglichkeiten zur Reduzierung der Materialdegradation sowie zur Entwicklung neuer Werkstoffe mit verbesserten Eigenschaften [47].

⁴ Polymere Isolierstoffe bestehen aus Makromolekülen, die durch unterschiedliche Polyreaktionen gebildet werden [9].

⁵ Neben den hier betrachteten Prozessen unter Einfluss hoher elektrischer Felder (elektrische Alterung) wird das Langzeitverhalten von Isolierstoffen auch durch chemische und physikalische Effekte infolge von Umwelteinflüssen und chemischen Reaktionen in der makromolekularen Stoffstruktur (natürliche Alterung) beeinflusst [6], [9].

Für die Erzeugung und Ausbreitung von Ladungen in einem Polymervolumen sind drei Faktoren von Bedeutung: die Ladungsträgerbereitstellung, der Ladungstransport sowie die Ladungsspeicherung.

2.1.1 Energiebändermodell polymerer Isolierstoffe

Für die physikalischen Vorgänge des Ladungstransports in Isolierstoffen wird im Allgemeinen das von Fröhlich [39] für kristalline Festkörper verwendete Bändermodell als Grundlage verwendet und daraus ein Energieschema polymerer Dielektrika entwickelt. Nach dem Bändermodell existieren in einem Idealkristall aufgrund seines regelmäßigen Molekülaufbaus durchgängige Energiebänder mit scharfen Bandgrenzen, die durch eine verbotene Zone voneinander getrennt sind [35], [36]. Die verbotene Zone wird auch als Energie- oder Bandlücke bezeichnet. Für die elektrischen Eigenschaften des Festkörpers sind dabei lediglich das am absoluten Nullpunkt energetisch am Höchsten liegende, mit Elektronen besetzte Valenzband und das nächsthöher gelegene leere oder nur teilweise besetzte Leitungsband von Interesse. Nur Elektronen im Leitungsband sind frei beweglich und können am Ladungstransport teilnehmen, während Valenzelektronen an Atome und Moleküle gebunden sind.

Durch thermische oder photonische Anregung können Elektronen bei höheren Temperaturen $T > 0$ K aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden, so dass das Valenzband nicht mehr voll besetzt ist. Der unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes im Valenzband stattfindende Platzwechselvorgang von Elektronen mit der Konsequenz der Wanderung der Leerstellen zur Kathode wird als Löcherleitung bezeichnet.

Isolatoren zeichnen sich durch einen großen energetischen Bandabstand von 2 eV bis 10 eV zwischen Valenz- und Leitungsband aus, so dass ohne Zufuhr von Energie nur sehr wenige Elektronen im Leitungsband vorhanden sind.

Die Eigenleitfähigkeiten polymerer Isolierstoffe (intrinsische Leitfähigkeit) sind im unbelasteten Zustand und bei Raumtemperatur sehr niedrig (Tabelle 1). Die Dichte frei beweglicher Ladungsträger ist demzufolge gering.

Tabelle 1: Elektronendichte (n_E) im Leitungsband und resultierende intrinsische elektrische Leitfähigkeit (κ) eines rein kristallinen Werkstoffs in Abhängigkeit vom Bandabstand (W_g) für eine Temperatur von $T=293$ K (Vernachlässigung von Ionen- und Löcherleitung); nach Lutz [36].

W_g [eV]	n_E [cm ⁻³]	κ [S·cm ⁻¹]	Bemerkung
0	10^{23}	$1,6 \cdot 10^5$	Leiter
2	$6,30 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^{-12}$	Isolator
8,8	$2,08 \cdot 10^{-53}$	$3,32 \cdot 10^{-71}$	Polyethylen

Aufgrund der unregelmäßigen Struktur amorpher und teilkristalliner Isolierstoffe ist jedoch die Periodizität der Atom- und Molekülanordnungen als Voraussetzung für durchgehende Energiebänder nicht mehr gegeben. Das von Bauser [38] hierfür vorgeschlagene Modell geht von einer Vielzahl lokalisierter Einzelenergieniveaus unterschiedlich energetischer Lage in den Valenz- und Leitungsniveaus aus, die durch Potentialwälle voneinander getrennt sind [35], [36].

Der Bandabstand ist damit nicht mehr konstant, sondern als mittlerer energetischer Abstand zwischen Valenz- und Leitungsniveaus definiert, der für gebräuchliche Isolierstoffe zwischen 4 eV und 10 eV liegt. Darüber hinaus kommt es durch Verarbeitungsrück-

stände und Fremdmoleküle zur Ausbildung von einzelnen, lokalisierten Energieniveaus⁶ innerhalb der verbotenen Zone, so dass der Übergang vom Valenz- zum Leitungsband nicht streng definiert verläuft.

Teilkristalline und amorphe Isolierstoffe werden näherungsweise durch dasselbe Modell beschrieben, wobei amorphe Isolierstoffe eine höhere Haftstellendichte aufweisen [36].

Diese Energieniveaus werden je nach energetischem Abstand vom Leitungsband in den Ladungstransport einbezogen und sind für das Raumladungsverhalten des Isolierstoffs verantwortlich. Aus flachen Haftstellen mit einem energetischen Abstand $\leq 0,5$ eV bis 1 eV vom Leitungsband können gefangene Elektronen durch die Zufuhr von elektrischer und/oder thermischer Energie leicht aktiviert und für den Leitungsprozess bereitgestellt werden. Ihre Anzahl ist nahe dem Leitungsband am größten und sinkt mit wachsendem Abstand. Sie beeinflussen das Leitungs- und Durchschlagverhalten im Kurzzeitbetrieb am stärksten. Aus tiefen Haftstellen mit einem energetischen Abstand von >1 eV bis 1,5 eV sind gefangene Elektronen sehr viel schwieriger zu befreien, da mit steigendem Abstand zum Leitungsband die Wahrscheinlichkeit für eine Befreiung sinkt. Die gefangenen Elektronen sind für das Raumladungsverhalten des Isolierstoffes verantwortlich.

Im vernetzten Polyethylen sind Vinylgruppen flache Haftstellen, Carbonylgruppen tiefe Haftstellen. Die mittlere Verweildauer von Ladungsträgern in flachen Haftstellen bei Raumtemperatur liegt in einem Bereich von 10^{-13} s bis 10^{-11} s, während die Verweildauer in tiefen Haftstellen abhängig von deren energetischer Tiefe im Bereich von einigen Sekunden bis hin zu mehreren Stunden und Tagen liegen kann [36].

2.1.2 Ladungsträgerbereitstellung und Ladungsträgertransport in polymeren Isolierstoffen

Leitfähige Metallpartikel bewirken lokal eine Felderhöhung im Isolierstoff und stellen bevorzugte Startpunkte für die Erosionsprozesse dar. Bei der Diskussion von Modellvorstellungen zur Ladungsträgerbereitstellung und zum Ladungstransport kann angenommen werden, dass die dazu notwendigen elektrischen Feldstärken hoch sind. Ionenleitung, die bei niedrigen Feldstärken fast ausschließlich auftritt, ist daher vernachlässigbar [28].

Bei elektrischer Beanspruchung sind vorwiegend Elektronen am Ladungstransport beteiligt, die sich in Leitungsniveaus befinden, d. h., in einem energetisch ausreichend hohen und ungebundenen (freien) Zustand [28], [35].

Die Bereitstellung von Elektronen und Löchern für den Ladungstransport könnte prinzipiell durch rein thermische Anregung von Elektronen aus dem Valenzband erfolgen. Aufgrund des großen Bandabstands zwischen Valenz- und Leitungsband in hochwertigen Isolierstoffen ist eine thermisch bedingte Eigenleitung auszuschließen. Die sehr geringen Leitfähigkeiten rein kristalliner polymerer Isolierstoffe⁷ $< 10^{-30}$ S/cm für Bandabstände > 4 eV und eine Volumenleitfähigkeit des Silikonmaterialtyps (LR 3002/35) von 10^{-15} S/cm bei Raumtemperatur bestätigen diese Aussage.

⁶ Sind diese Elektronenzustände und –plätze im elektrisch neutralen Zustand unbesetzt, werden sie als Haftstellen (traps) oder Akzeptoren bezeichnet. Sind sie mit Elektronen besetzt, spricht man von donatorähnlichen Zuständen [9]. Letztere liegen im Vergleich zu den Haftstellen auf einem energetisch niedrigen Niveau und sind im Isolierstoff in geringerer Anzahl enthalten.

⁷ Technisch werden Kristallisationsgrade von 10 % bis 80 % realisiert. Polyethylen hoher Dichte hat einen Kristallisationsgrad von 70 % bis 80 % [37].

Die Bereitstellung von Ladungsträgern erfolgt durch Injektion aus den Elektroden (äußere Feldemission) und/oder durch Generierung im Isolierstoff selbst (innere Feldemission). Eine äußere Feldemission kann sowohl an leitfähigen Fehlstellen als auch an Grenzflächen entstehen, wenn durch die lokalen Geometrieverhältnisse in einem Teilvolumen die materialspezifische Injektionsfeldstärke überschritten wird.

2.1.2.1 Äußere Feldemission – Richardson-Schottky- und Fowler-Nordheim-Mechanismus

An einer Grenzfläche zwischen metallischen Elektroden (z. B. metallische Fehlstellen) und Isolierstoff können Ladungsträger von außen in den Isolierstoff eingebracht und extrahiert werden, wodurch sich die elektrische Leitfähigkeit im Isolierstoff verändert. Praktisch anwendbare Berechnungsgleichungen für die Stromdichten sind als Näherungen zu betrachten, die den Spezialfall eines idealen Kontaktes beschreiben [33]. Bei einem unmittelbaren Kontakt der Oberflächen zweier unterschiedlicher Materialien (Metall und Polymer) stellt sich ohne Anlegen eines elektrischen Feldes ein energetischer Gleichgewichtszustand an der Grenzfläche durch den Austausch von Ladungsträgern (Kontaktladung) ein, der von den spezifischen Daten der beteiligten Materialien abhängt (Fermi-Niveau, Austrittsarbeit). Für den Kontakt Metall↔Polymer bedeutet dies den Übergang von Elektronen aus der Metallelektrode in den Isolierstoff. Dabei überwinden die Elektronen die Übergangsarbeit und werden in energetisch tiefer liegende Haftstellen in einer sehr schmalen Schicht im Isolierstoff (Anreicherungsrandschicht, Abmessungen im Nanometerbereich) gespeichert, bis sich die Fermi Niveaus beider Materialien angeglichen haben. Diese Kontaktaufladung bestimmt den Ausgangszustand des Isolierstoffs vor der ersten elektrischen Beanspruchung. Wird ein ausreichend hohes elektrisches Feld an diese Grenzschicht angelegt, so bewegen sich die Elektronen aus dieser Anreicherungsschicht zur Anode. Zusätzlich wird die Potentialbarriere zwischen Metall und Isolierstoff verringert, wodurch der Übergang von Ladungsträgern in den Isolierstoff erleichtert wird.

Richardson-Schottky-Mechanismus

Wirkt ein äußeres elektrisches Feld auf die Grenzfläche Elektrode↔Polymer, so resultiert daraus eine gegenüber dem feldfreien Zustand weitere Absenkung der Energiebarriere in ihrer Höhe und Verringerung ihrer Breite und ein Fluss der Ladungsträger aus der Anreicherungsrandschicht zur Momentananode. Gleichzeitig findet ein momentaner Ladungsübergang statt. Unter der Voraussetzung von Elektronen als Ladungsträger kann die Injektionsstromdichte j_{RS} durch die Gleichung (1) berechnet werden [33], [34].

$$j_{RS} = A_{RS} \cdot T^2 \exp \left[-\frac{W_A - \beta_{RS} \cdot \sqrt{E}}{k \cdot T} \right] \quad (1)$$

mit

- A_{RS} : Richardson-Schottky-Faktor, Richardson-Konstante (materialabhängig)
- W_A : Metall↔Isolierstoff Austrittsarbeit (Aktivierungsenergie)
- T : absolute Temperatur
- k : Boltzmann-Konstante
- E : Effektivwert der Feldstärke (unter Berücksichtigung des Raumladungseinflusses). Gilt auch für nachfolgende Gleichungen.
- β_{RS} : materialabhängige Konstante nach Richardson-Schottky

$$\beta_{RS} = \sqrt{\frac{e^3}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}}$$

- e : Elementarladung
 ϵ_0 : Dielektrizitätszahl des Vakuums
 ϵ_r : relative Dielektrizitätszahl des Isolierstoffs; berücksichtigt das angrenzende Dielektrikum.

Charakteristisch für diesen Injektionsmechanismus ist die starke Temperaturabhängigkeit $\sim T^2$. Die Abhängigkeit von der Austrittsarbeit $\sim \exp(-W_A/k \cdot T)$ ermöglicht Untersuchungen zum Einfluss des Elektrodenmaterials auf die Stromdichte. Die Berechnung der Stromdichte j_{RS} nach Gleichung (1) erfordert neben Angaben zur Größe von A_{RS} (bei Pietsch [33] wird ein Wert von $1,2 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ genannt⁸) die Kenntnis der Größe der Austrittsarbeit und der raumladungsbeeinflussten Feldstärke. Die Angaben zum Feldstärkebereich, in der dieser Injektionsmechanismus messbar und von praktischer Bedeutung ist, streuen sehr stark. Für Polyethylen als Isolierstoff liegen die Größen bei $E \geq 10^2 \text{ kV/mm}$ für eine messbare Injektion und bei $E \geq 10^5 \text{ kV/mm}$ für eine Injektion von praktischer Bedeutung. Quantitative Berechnungen bei von Olshausen [35] für Epoxidharze zeigen, dass bei Feldstärken bis zu 200 kV/mm die Injektion nach Richardson-Schottky dominiert.

Fowler-Nordheim-Mechanismus

Bei sehr hohen Feldstärken sind Elektronen in der Lage, die Energiebarriere direkt zu durchtunneln. Die Elektronen müssen nicht mehr zum Überwinden der Energiebarriere angeregt werden, sondern passieren diese mit einer Wahrscheinlichkeit, die von der Breite und Höhe der zu durchlaufenden Energiebarriere abhängt.

Die angegebenen unterschiedlichen Berechnungsgleichungen für die Stromdichte zeigen analog zum Richardson-Schottky-Mechanismus eine Feldstärkeabhängigkeit

$$\sim \frac{E^2}{W_A} \exp\left(-\frac{\beta_{FN} \cdot W_A^{3/2}}{E}\right)$$

sowie eine Abhängigkeit vom Elektrodenmaterial. W_A bezeichnet wieder die Metall↔Isolierstoff-Austrittsarbeit, β_{FN} ist eine materialabhängige Konstante.

Je nach Höhe der anliegenden elektrischen Feldstärke können bei $T > 0 \text{ K}$ thermische Effekte die Stromdichte verändern. Diese Veränderungen werden durch einen Korrekturfaktor in den Berechnungsgleichungen für die Stromdichte j_{FN} berücksichtigt:

$$j_{FN}(T) = j_{FN}(0K) \cdot A(T) \quad \text{mit} \quad A(T) = \frac{\frac{\pi \cdot k_0 \cdot T}{a}}{\sin\left(\frac{\pi \cdot k_0 \cdot T}{a}\right)} \quad (2)$$

⁸ Stromdichtemessungen haben gezeigt, dass für den Übergang Metall↔Polyethylen der Wert ca. um den Faktor 10^6 kleiner ist [33].

In vielen Fällen ist eine Abschätzung der aus dieser Feldemission resultierenden Stromdichte ausreichend.

Werden als Ladungsträger wieder Elektronen angenommen, so ergibt sich [33], [34]:

$$j_{FN}(T) = A_{FN} \cdot \frac{E^2}{W_A} \cdot \exp \left[-\frac{\beta_{FN} \cdot W_A^{\frac{3}{2}}}{E} \right] \cdot A(T) \quad (3)$$

mit A_{FN} : Fowler-Nordheim-Proportionalitätskonstante (materialabhängig)

Berechnungen der Stromdichte nach Gleichung (1) und (2) für konkrete Anordnungen erfordern Näherungslösungen, in denen auch die genannten Konstanten abgeschätzt werden. In vielen Anwendungsfällen ist der funktionale Zusammenhang mit der Feldstärke und nicht der absolute Wert der Stromdichte von Interesse.

Abschätzungen im Zusammenhang mit experimentellen Untersuchungen an Polyethylen zeigen, dass der Fowler-Nordheim-Injektionsmechanismus erst ab Feldstärken >400 kV/mm von der „kalten“ Feldemission bestimmt wird [33]. Quantitative Betrachtungen zeigen ebenfalls, dass bei Epoxidharzen erst ab Feldstärken >200 kV/mm der Fowler-Nordheim-Mechanismus eine höhere Injektionsstromstärke bewirkt [35]. Aus den angegebenen Berechnungsgleichungen für die Stromdichten gemäß den Injektionsmechanismen nach Richardson-Schottky (Gleichung (1)) und Fowler-Nordheim (Gleichung (3)) geht hervor, dass neben Feldstärke und Temperatur die Austrittsarbeit die Intensität der Ladungsträgerinjektion beeinflusst.

2.1.2.2 Innere Feldemission – Poole-Frenkel-Effekt

Neben der von der elektrischen Feldstärke und Temperatur abhängigen Injektion von Ladungsträgern aus den Elektroden ist auch eine Aktivierung im Isolierstoffvolumen selbst möglich (Poole-Frenkel-Effekt) [35]. Wegen der vernachlässigbaren intrinsischen Ladungsträgergeneration werden die Ladungsträger von ionisierbaren Zuständen mit Energieniveaus innerhalb der verbotenen Zone zur Verfügung gestellt. Der bei hohen elektrischen Feldern auftretende Effekt bewirkt eine starke Veränderung des Potentialverlaufs im Dielektrikum, so dass sich die energetische Haftstellentiefe in Richtung des elektrischen Feldes um den Betrag ΔW_H reduziert:

$$\Delta W_H = 2 \cdot \sqrt{\frac{W_A^3 \cdot E}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}} \quad (4)$$

mit W_A : Metall↔Isolierstoff-Austrittsarbeit
 E : Feldstärke
 ε_0 : absolute Dielektrizitätszahl
 ε_r : relative Dielektrizitätszahl des Isolierstoffs.

Diese Verminderung der energetischen Haftstellentiefe erleichtert die thermische Befreiung der Ladungsträger und führt zu einem Anstieg der Stromdichte.

Ionisierbare Zustände mit Energieniveaus innerhalb der verbotenen Zone sind sowohl Donatoren als auch Akzeptoren (siehe Abschnitt 2.1.1). Donatoren befinden sich nahe dem Leitungsband und geben durch thermisch stimulierte Ionisierung Elektronen an das Leitungsband ab. Akzeptoren mit ihrer Nähe zum Valenzband nehmen bevorzugt Elektronen auf und generieren Löcher. Zur Berechnung der Stromdichte werden unterschiedliche Beziehungen verwendet, wobei allerdings der formale Zusammenhang zwischen Stromdichte, Feldstärke und Temperatur erhalten bleibt.

Wird ein Dielektrikum angenommen, das ausschließlich Donatoren enthält, so errechnet sich die Stromdichte zu

$$j_{PF} = G \cdot E \cdot \exp\left(\frac{\beta_{PF} \cdot \sqrt{E} - W_H}{2 \cdot kT}\right) \quad (5)$$

mit E : Feldstärke
 W_H : Haftstellentiefe
 k : Boltzmann-Konstante
 T : absolute Temperatur
 G : Proportionalitätskonstante; enthält die Elementarladung e , die Beweglichkeit der Elektronen im Leitungsband μ und die Dichte der Donatoren sowie die effektive Zustandsdichte im Leitungsband
 β_{PF} : Poole-Frenkel-Konstante (materialabhängig); häufig angegeben mit:
 $\beta_{PF} = 2 \cdot \beta_{RS}$ (siehe Gleichung (1)).

Eine analoge Beziehung für die Stromdichte gilt für den Lochtransport unter Berücksichtigung von Akzeptoren im Dielektrikum.

Entsprechend dem Poole-Frenkel-Mechanismus werden mit zunehmender Feldstärke vermehrt Ladungsträger aus Donatorenzuständen in das Leitungsband gehoben, wobei der Vorgang durch Zufuhr von thermischer Energie forciert wird (Gleichung (5)). Das bedeutet, dass bei konstanter elektrischer Beanspruchung die Leitfähigkeit des Materials mit steigender Temperatur zunimmt. Bei sehr hoher Feldstärke im Isolierstoff findet möglicherweise die Elektronenfreisetzung auch durch einen Tunneleffekt ähnlich dem Fowler-Nordheim-Mechanismus statt. Diese Möglichkeit ist aber bisher kaum berücksichtigt worden.

2.1.2.3 Ladungstransport

Die angegebene Energiebänderstruktur polymerer Isolierstoffe ermöglicht keinen Ladungstransport mit konstanter Driftgeschwindigkeit, sondern nur in Form von Gleit- und Hüpfprozessen. Als wahrscheinlichster Mechanismus für den Ladungstransport gilt eine Kombination aus thermischer Anregung der Ladungsträger auf ein bestimmtes Energieniveau mit anschließendem Tunneln durch die Potentialbarrieren zu benachbarten Haftstellen (thermisch stimulierter Tunnelprozess–Hopping-Leitung) [36].

Für die Beschreibung dieses Prozesses wird eine effektive Ladungsträgerbeweglichkeit μ_{eff} eingeführt, die sowohl den freien als auch den gebundenen Zustand der Ladungsträger berücksichtigt. Im Allgemeinen ist die Verweildauer in einer Haftstelle größer als die Laufzeit zwischen den Haftstellen.

Für die Abhängigkeit der effektiven Ladungsträgerbeweglichkeit von der Feldstärke und Temperatur werden verschiedene Beziehungen angegeben. Ein häufig verwendeter, vereinfachter Ansatz berücksichtigt nur eine Haftstellenart:

$$\mu_{eff} = \mu_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_{th} - \beta_{PF} \cdot \sqrt{E}}{k \cdot T}\right) \quad (6)$$

mit μ_{eff} : effektive Ladungsträgerbeweglichkeit
 μ_0 : Ladungsträgerbeweglichkeit im Energieband
 W_{th} : thermische Austrittsarbeit
 β_{PF} : materialabhängige Konstante nach Poole-Frenkel
 E : Effektivwert der Feldstärke (unter Berücksichtigung des Raumladungseinflusses); gilt auch für nachfolgende Gleichungen
 k : Boltzmann-Konstante
 T : absolute Temperatur.

Der mit dem Ladungstransport auch verbundene Aufbau von Raumladungen, etwa durch die Besetzung tiefer Haftstellen, führt zu einer Verzerrung des Feldstärkeverlaufes im Elektrodenbereich, dessen Auswirkung schwierig zu berechnen ist.

2.1.3 Phänomenologisches Alterungsmodell und Tree-/Kanalwachstum in polymeren Isolierungen

Die dielektrische Alterung eines polymeren Isolierstoffs ist durch chemische und physikalische Veränderungen charakterisiert. Allgemein anerkannt ist, dass Inhomogenitäten innerhalb des Materials oder an der Grenzfläche Elektrode ↔ Polymerisolierstoff Ausgangspunkte für die Materialzerstörung darstellen.

Die Ursache hierfür ist die bereits genannte feldverzerrende, in der Regel feldüberhöhende Wirkung dieser Fehlstellen, die zu lokalen Überbeanspruchungen im Polymergefüge führen und durch Schadensakkumulation die elektrische Festigkeit des Isolierstoffs mit der Beanspruchungsdauer verringert.

Für die dabei im Werkstoff ablaufenden physikalisch/chemischen Prozesse wurden verschiedene Modellvorstellungen entwickelt, von denen das bei Pietsch [33] und Neubert [34] beschriebene Alterungsmodell polymerer Isolierungen näher betrachtet wird. Es beschreibt die im Werkstoff ablaufenden Prozesse beginnend mit der Injektion von Überschussladungen bis zum Einsatz von Teilentladungen in ersten ausgebildeten Kanälen im Submillimeterbereich. Danach laufen diese Prozesse vom Beginn der Spannungsbeanspruchung bis zum Zünden erster Teilentladungen in drei zeitlich aufeinanderfolgenden, feldstärkeabhängigen Stufen ab, wobei die Übergänge zum Teil fließend sind (Abbildung 2).

Unterhalb einer materialspezifischen Injektionsfeldstärke (E_{inj}) kommt es zu keiner dielektrischen Alterung des Isoliermaterials⁹. Diese Grenzfeldstärke lässt sich mit Hilfe von Ladungsträgerinjektionsmessungen (Schallimpulsmethode, Photonenstrahlmethode) messtechnisch erfassen. Keinesfalls sind diese Messungen aber im Rahmen der bei Anlagenherstellungen erforderlichen Routineprüfungen durchführbar.

Die Größe der kritischen Feldstärken wurden bei Pietsch [33] für Polyethylen mit (140 ± 10) kV/mm und (180 ± 40) kV/mm (Scheitelwerte, gemessen in Spitze-Platte-Elektrodenanordnung mit Nadelspitzenradius 3 µm) angegeben. Dabei ist zu beachten, dass die Größe der lokalen Feldstärke vom Raumladungszustand abhängig ist.

⁹ Alterung unter Einwirkung des elektrischen Feldes wird auch als Feldalterung bezeichnet [13].

In der ersten Stufe beginnt bei der materialspezifischen Injektionsfeldstärke E_{inj} im kritisch beanspruchten Bereich an Fehlstellen mit der feldunterstützten Injektion von Überschussladungsträgern und /oder mit der inneren Feldemission der Aufbau einer Raumladungszone in tiefen und/oder flachen Haftstellen. Das Gefährdungspotential dieser Raumladung (Feldschwächung oder Felderhöhung) hängt von den elektrischen Beanspruchungsparametern sowie den Zeitkonstanten der Ladungsträgerbereitstellungs- und Speichermechanismen ab.

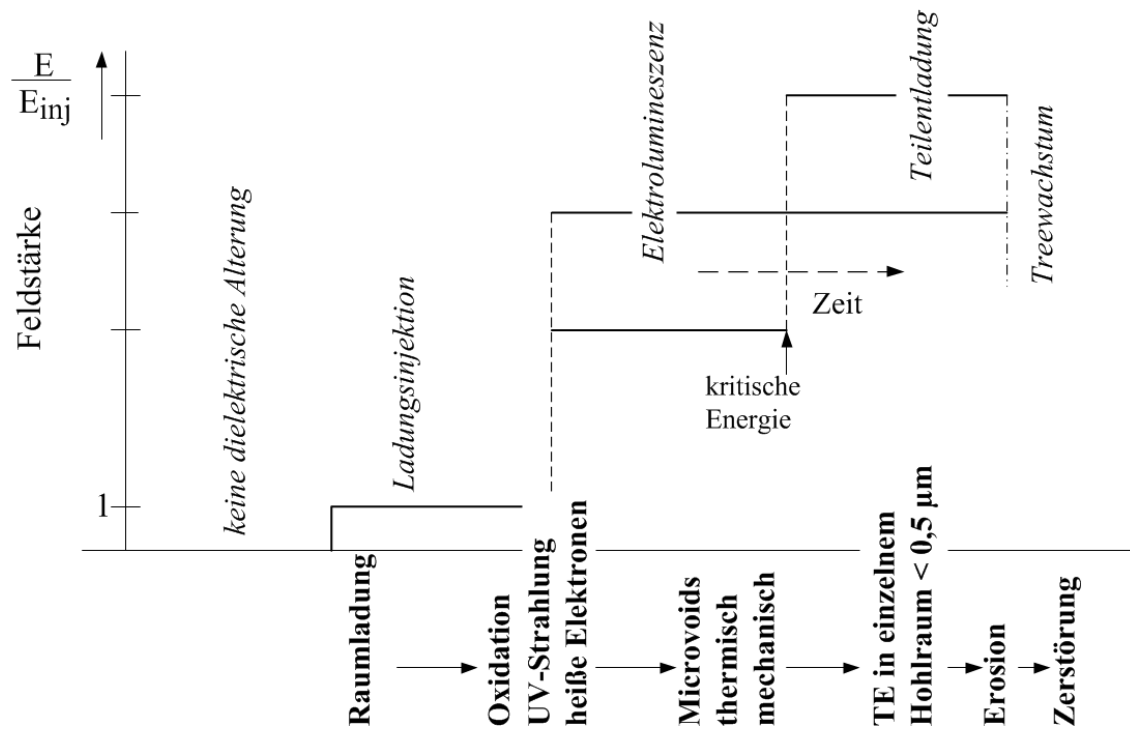


Abbildung 2: Phänomenologisches Alterungsmodell polymerer Isolierungen [33], [34];
 E_{inj} : Feldstärke, bei der die Ladungsträgerinjektion beginnt

Bei einer weiteren Felderhöhung erfolgt in der zweiten Stufe mit dem Überschreiten einer kritischen Energie unter Wechsel-, Gleich- und Impulsspannungsbelastung (threshold field) ein Energietransfer über bewegliche Ladungsträger auf das Isolierstoffgefüge. Bei diesen irreversiblen Prozessen wird Elektrolumineszenzlicht¹⁰ emittiert. Es existieren aber auch strahlungslose Relaxationsprozesse in Form von Gitterschwingungen und Phononen [33]. Die Auswirkungen des Energieübertrags auf die Polymermoleküle sind Gegenstand unterschiedlicher Modellvorstellungen, wovon einige im Abschnitt 2.2.1 erläutert werden.

Dieser Energieübertrag bewirkt chemische Veränderungen, wie Molekülanlagerungen, Abspaltungen von Atomen oder Molekülen und Kettenbrüche (bond scissions), die die Voraussetzungen der dielektrischen Alterung bilden. Wesentlich ist hierbei der durch Raumladungsrückwirkungen stark beeinflusste lokale Feldstärkeverlauf. Für diesen Energieübertrag werden verschiedene raumladungsindizierte Mechanismen angenommen.

¹⁰ Elektrolumineszenz ist eine Form der Lumineszenz, bei der ein Festkörper durch Anlegen eines elektrischen Feldes und einer elektrischen Spannung dazu angeregt wird, elektromagnetische Strahlung, z. B. in Form von Licht, zu emittieren (siehe Abschnitt 2.2.1).

men, wie elektrochemische Reaktionen, elektromechanische Kraftwirkungen (Maxwell-Kräfte), UV-Licht und beschleunigte („heiße“) Elektronen. Letztere sind Elektronen mit einer weit höheren als der mittleren thermischen Energie.

Dieses Licht, dass ab einer „threshold“ Feldstärke und vor ersten Teilentladungen von felderhöhenden Fehlstellen im Isolierstoffvolumen emittiert wird, ermöglicht eine direkte Analyse angeregter Zustände und von Alterungsvorgängen. Die dafür erforderliche empfindliche Messtechnik ist derzeit aber nur für Laboranwendungen verfügbar.

In der dritten Stufe der dielektrischen Alterung bilden sich im Ergebnis des Wirkens raumladungsbedingter und zeitabhängiger Zerstörungsprozesse aus einem ersten Kanal im Submillimeterbereich Kanäle aus, in denen erste Teilentladungen messbar werden. Diese komplexen Strukturen wachsen bis zur Gegenelektrode vor und leiten den Erosionsdurchschlag ein. Bezogen auf die Lebensdauer einer Kabelanlage ist die dafür benötigte Zeit sehr kurz. Die damit zusammenhängenden Prozesse in Abhängigkeit vom Isoliermaterial und den Beanspruchungsparametern sind Gegenstand unterschiedlicher Wachstumsmodelle, von denen ein Modell im nachfolgenden Abschnitt 2.2 erläutert wird.

Auch bei diesen Vorgängen, die im Wesentlichen Gasentladungen sind, entsteht Strahlung insbesondere im sichtbaren Bereich (Licht). Die Intensität dieser Strahlung ist im Vergleich zur Elektrolumineszenz um ein bis zwei Größenordnungen größer und weist ein stochastisches, oszillierendes Verhalten mit Perioden niedriger und hoher Amplitude auf. Die Erfassung dieser Vorgänge mittels elektrischer Teilentladungsmesstechnik ist Stand der Technik.

2.2 Schädigungsprozesse in polymeren Isolierstoffen

Prüfanordnungen mit polymeren Isolierstoffen, die inhomogener elektrischer Beanspruchung ausgesetzt werden, ermöglichen die Unterscheidung zweier zeitlich (mehr oder minder) ausgedehnter und unterscheidbarer Zerstörungsphasen:

- die Phase bis zum Aufbrechen erster Teilentladungskanäle (Kanaleinsetzzeit)
- die Wachstumsphase (Kanalaufbauzeit).

Die Kanaleinsetzzeit umfasst entsprechend Abbildung 2 sowohl die Ladungsträgerinjektion als auch Elektrolumineszenzvorgänge. Der Beginn der Kanalaufbauzeit ist in Abbildung 2 mit Teilentladung gekennzeichnet und mittels Teilentladungsmesstechnik auch in technischen Isolieranordnungen erfassbar. Die Kanalaufbauzeit kann als ein Maß für die Resistenz des betrachteten Isolierstoffs gegenüber inneren Teilentladungen angesehen werden [68]. Durch eine gezielte Veränderung der Parameter Feldstärke, Spannungsart, Frequenz, Temperatur und Elektrodenanordnung lassen sich diese Phasen getrennt beeinflussen [9], [35]).

Zur Beschreibung dieser Schädigungsprozesse werden auch davon abweichende Bezeichnungen wie Anlauf- und Zerstörungsphase verwendet [30]. Danach umfasst die Anlaufphase die mit Beginn der elektrischen Beanspruchung im Dielektrikum ablaufenden reversiblen Vorgänge bis zum Initialaufbruch¹¹ und die Zerstörungsphase die mit dem Initialaufbruch beginnenden irreversiblen Prozesse einschließlich Treewachstum. Messtechnisch ist der Initialaufbruch bis zum Einsetzen erster Teilentladungen nur mit einer entsprechenden optischen Messtechnik detektierbar.

¹¹ Initialaufbruch: materialspezifische Festigkeit des Isolierstoffes wird durch eine Feldüberhöhung an einer Fehlstelle lokal überschritten. Als Folge davon wird der Isolierstoff mechanisch in Form eines Initialaufbruchs zerstört.

In Übereinstimmung mit der Aufgabenstellung liegt der Schwerpunkt der nachfolgenden Ergebnisanalyse auf Schädigungsprozessen bis zum Nachweis erster Teilentladungen (Kanaleinsatz) und dem nachfolgenden „electrical treeing“ (Kanalaufbau), soweit sie für technische Isolieranordnungen Bedeutung haben.

2.2.1 Schädigungsprozesse vor Auftreten von Teilentladungen

Bisherige Untersuchungen zu dieser Problematik bis zum Auftreten erster Teilentladungen betrafen die Aufklärung der Zusammenhänge zwischen der Emission von Elektrolumineszenzlicht und der Materialdegradation unter Berücksichtigung der Raumladungsbildung im betrachteten Isolierstoff. Zur Erfassung dieser Vorgänge ist eine sehr empfindliche optische Messtechnik in Kombination mit einer gleichfalls empfindlichen Teilentladungsmesstechnik erforderlich. Untersuchungen an technischen Isolieranordnungen wurden daher noch nicht durchgeführt.

Derartige Untersuchungen wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen um Bamji in Kanada [41] bis [46]; Laurent und Teyssedre in Frankreich [48] bis [55]; Champion und Dodd in UK [56], [57] und Pietsch [33] und Neubert [34] in Deutschland sowie weiteren Autoren wie Shimizu [52], [53]; Mohd Ariffin [60]; Kabir [62] durchgeführt. Sie erfolgten an PE/VPE [41], [44], [51], [62] Epoxidharzen [56], [57] sowie weiteren polymeren Materialien wie PEN [60], [63] unter Wechselladungsbeanspruchung [44], [48], [51], [56], [57], Impulsspannungen zur Simulation von Blitz- und Schaltspannungen [45], [46] und Gleichspannungsbeanspruchung [48], [49].

Silikonelastomere wurden bisher nicht untersucht. In allen Isolierstoffen wurde in homogenen Feldern oberhalb einer kritischen Feldstärke Elektrolumineszenz und damit eine Schädigung des Isolierstoffes vor dem Auftreten von Teilentladungen nachgewiesen.

Die aus Praxissicht wesentlichen Untersuchungen wurden in der Regel in stark inhomogenen Wechselfeldern mit einer in den Isolierstoff eingebetteten Spitzenelektrode aus Metall (Nadel) oder halbleitendem Polymer (Streifenelektrode) auf HS-Potential und kontaktierter Plattenelektrode auf Erdpotential durchgeführt.

Abschätzungen zur Intensität des Elektrolumineszenzlichts zeigen, dass ein Lichtstrom im Bereich von ca. 10^{-9} Lumen bis 10^{-13} Lumen¹² erwartet werden kann [33]. Das erfordert sehr empfindliche optische Messverfahren und für die begleitende Bestimmung des Teilentladungseinsatzes Messsysteme, deren Grundstörpegel mit $<0,1$ pC (Bereich von $<0,01$ pC bis $0,05$ pC) und damit unterhalb des Pegels der in der derzeitigen Praxis verwendeten Systeme liegt. Diese Messungen erfordern elektromagnetisch geschirmte und komplett abgedunkelte Bereiche mit Einrichtungen zur optischen Justierung und der Durchführung der Messungen im Hochvakuum und unter Gasatmosphäre. Die optischen Messsysteme bestehen in Abhängigkeit von der konkreten Aufgabenstellung aus Linsen-/Spiegelanordnungen zur Erfassung und Übertragung der optischen Signale auf Empfangs- und Verarbeitungseinheiten (Photomultiplier, Spektrometer, CCD-Kameras).

Für die Erfassung der Lichtimpulse wurden bislang vorwiegend Photomultiplier als Detektoren in Verbindung mit Auswertegeräten eingesetzt, die zur Reduzierung der Dunkelzählrate auf -40 °C gekühlt wurden. Durch die Entwicklungsfortschritte auf diesem Gebiet kamen vereinzelt auch bereits ungekühlte Geräte zum Einsatz und die als Halbleiteräquivalent zum Photomultiplier bezeichneten Systeme auf Basis von Avalanche-Photodioden werden an Bedeutung gewinnen. Das erwartete Wellenlängenspektrum liegt im Bereich von 350 nm bis 800 nm. Die Empfindlichkeit eines derartigen De-

¹² Ein Lumen (lm) entspricht ca. $4 \cdot 10^{15}$ Photonen/s mit einer Wellenlänge von 550 nm, so dass bei Elektrolumineszenzprozessen nur ca. 10^2 Photonen bis 10^6 Photonen emittiert werden.

tektors wird in der Regel durch die Stromempfindlichkeit (Ampere pro Watt optischer Leistung) und die Quantenausbeute (Wahrscheinlichkeit für die Registrierung eines auftreffenden Photons, Angabe in %) beschrieben. Bei der Einzelphotonenzählung spielt das Rauschen des Detektors eine wichtige Rolle, das durch die Angabe der Dunkelzählrate beschrieben wird. Typische Größen liegen in Bereichen um:

Stromempfindlichkeit	: 50 $\mu\text{A/lm}$ (70 $\mu\text{W/lm}$) und kleiner
Quantenausbeute	: 20 % bis 80 % (Wellenlängenabhängig)
Dunkelzählrate	: $<10 \text{ s}^{-1}$ bis 100 s^{-1}

Ab einer materialabhängigen Feldstärke (threshold field) wird Licht emittiert, das in einem sehr kleinen Volumen unmittelbar vor der Spitzenelektrode entsteht. Die Anzahl der registrierten Impulse steigt mit wachsender Feldstärke nichtlinear an, die Intensität des Elektrolumineszenzlichts ist bei Wechselspannungsbeanspruchung eine sehr gut reproduzierbare Funktion der Spannung und der lokalen Feldstärke an der Nadelspitze ist. Das Elektrolumineszenzlicht ergibt ein zeitlich stabiles Signal, das unabhängig von der Anzahl der Spannungsunterbrechungen bei gleicher Spannungshöhe in der positiven und negativen Phase der treibenden Spannung auftritt. Die Maxima liegen kurz vor den Spannungsmaxima der Halbwellen [33]. Impulse unmittelbar im Bereich des Feldnulldurchgangs treten nicht auf. Dieses Emissionsverhalten unterscheidet sich vom Verhalten der durch Teilentladungen verursachten optischen Signale. Diese sind mit großen statistischen Schwankungen behaftet. Deren Intensität ist um ca. zwei Größenordnungen höher und steigt mit der Dauer der Spannungsbeanspruchung. Die TE-Einsetzspannung sinkt bei Beanspruchungswiederholung. Die Maxima liegen in der Nähe der Spannungsnulldurchgänge.

Ein deutlicher Anstieg der emittierten EL-Signale ergibt sich bei Verwendung von gealtertem VPE-Material im Vergleich zum ungealterten Material. Diese Abhängigkeit zeigt, dass die im Isolierstoff während der Alterung gespeicherten Ladungen wesentliche Auswirkungen auf das Elektrolumineszenzverhalten haben und damit das Isoliervermögen von VPE-Isolierungen beeinflussen können. Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die Elektrolumineszenzsignale sehr stark vom Sauerstoffgehalt im Polymervolumen abhängen.

Durch die Reduktion des im Polymer gelösten Sauerstoffs um 4 bis 5 Größenordnungen sinkt die für das Auftreten von Elektrolumineszenzlicht erforderliche Spannung signifikant ab, während die TE-Einsetzspannung deutlich ansteigt [51], [33]. Die Beeinflussung der Elektrolumineszenzprozesse wird deutlich reduziert.

Die Untersuchungen von Elektrolumineszenzvorgängen bei Impulsspannungsbeanspruchung beinhalten die Auswirkungen von halbleitenden Protrusionen (Spitzen) auf die elektrische Festigkeit des VPE-Dielektrikums von Hochspannungskabeln. Durch die hohen Prüfpegel können von derartigen feldüberhöhenden Fehlstellen Schädigungsprozesse unterhalb der TE-Einsetzspannung initiiert werden. Die Untersuchungen erfolgten ebenfalls mit Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen wobei die aus Deflektormaterial hergestellten plattenförmigen HS-Elektroden mit angeschnittener Spitze im Isoliermaterial eingebettet waren. Die verwendete Messtechnik entsprach der bei Wechselspannungsmessungen [45], [46].

Die Elektrolumineszenzeinsetzspannung ist abhängig von der Impulsart: positiv, negativ oder alternierend. Die niedrigste Einsetzspannung ergibt sich für Impulsspannungen mit wechselnder Polarität. Die Wahrscheinlichkeit¹³ des Auftretens von Elektrolumineszenz

¹³ Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Elektrolumineszenz wird bestimmt aus dem Verhältnis der Anzahl der Impulse mit wenigstens einer EL-Erscheinung zur Gesamtzahl der Impulse.

wächst unabhängig von der Impulsart mit der Höhe der Impulsspannung. Ebenfalls unabhängig von der Impulsart und -form tritt Elektrolumineszenz in zwei abgegrenzten Zeiträumen innerhalb eines Einzelimpulses auf. Diese Zeiträume liegen im Bereich des Impulsanstieges sowie des -abfalls und sind durch einen Zeitraum ohne Elektrolumineszenz getrennt. Die Impulsfolgefrequenz (Repetitionrate) hat keinen Einfluss auf die Elektrolumineszenz.

Für die Erzeugung von Elektrolumineszenzlicht ist eine Ladungsträgerinjektion an der Elektroden-Polymer-Grenzfläche erforderlich, die auf äußere Feldemission basiert (siehe Abschnitt 2.1.2). Als Wechselwirkungsmechanismen mit dem Isolierstoff wurden Modellvorstellungen entwickelt, die von der Feldstärke und dem Isolierstoff abhängen. Im Rekombinationsmodell ist neben der Injektion von Elektronen und Löchern ein Feldnulldurchgang (Polaritätswechsel) eine notwendige Bedingung. Erforderliche flache (shallow) und tiefe (deep) Haftstellen (traps) unterhalb des Leitungsbands für Elektronen und oberhalb des Valenzbands für Löcher innerhalb der verbotenen Zone sind durch die im Material vorhandenen Störungen im Aufbau, durch Additive und durch Spaltprodukte vorhanden [41]. Die Rekombination zwischen frei beweglichen und den getrappten Ladungen in den jeweiligen Halbwellen erklärt die experimentell ermittelten Maxima der optischen Impulse vor den Spannungsmaxima. Dieses Modell wurde insbesondere bei relativ niedrigen Feldstärken und für VPE als Isolierstoff diskutiert. Auch das Exziton-Modell basiert auf der periodischen Ladungsträgerinjektion von Elektronen und Löchern in den Werkstoff in der jeweiligen Halbwelle der angelegten Wechselspannung [33]. Diese können sich im Isolierstoff frei bewegen und an Haftstellen, den Lumineszenzzentren, zu verhältnismäßig stabilen Exzitonen¹⁴ verbinden, die gerade einem angeregten Zustand entsprechen. Nur Singulett-Zustände sind in der Lage, durch Rekombination ihre Energie über Photonen abzugeben. Eine Werkstoffdegradation wird durch die hochenergetischen UV-Komponenten verursacht [52].

Eine weitere Modellvorstellung geht von einer Beschleunigung der Elektronen in Mikrohohlräumen (Sub-Mikrometerbereich) und/oder in Leerstellenbereichen des Werkstoffs durch das elektrische Feld aus („heiße“ Elektronen) [52]. Sie kollidieren mit den Chromophoren¹⁵. Strahlung, in diesem Zusammenhang Licht, wird emittiert, wenn einige der angeregten Chromophore in den Grundzustand zurückkehren oder Ladungen unter Einschluss von Lumineszenzzentren rekombinieren. Abschätzungen zu erreichbaren Energien zeigen, dass freie Elektronen im Leitungsband je nach Höhe der herrschenden Feldstärke im Bereich von einigen 100 kV/mm bei freien Weglängen von 2,5 Å bis 250 Å Energien von $2,5 \cdot 10^{-3}$ eV bis 0,28 eV aufnehmen können [40]. Wegen ihrer geringen Masse können sie bei elastischen Stößen nur 1 % ihrer kinetischen Energie abgeben, das heißt, sie nehmen zwischen den Stößen immer mehr Energie aus dem elektrischen Feld auf und werden dadurch aufgeheizt. Energien im Bereich bis ca. 10 eV sind dadurch erreichbar, die für Kettenspaltungen durch Stossionisation ausreichen. Das bedeutet für polymere Isolierstoffe eine Umwandlung von Makromolekülen in flüchtige Bestandteile durch die Energie des elektrischen Feldes, und damit die Ausbildung von Regionen geringer Dichte und Mikrovoids.

Für diesen Mechanismus sind relativ hohe Feldstärken erforderlich, die im Bereich >60 % der Durchschlagfeldstärke liegen. Für PE/VPE als Isolierstoff wurde eine Anregung durch „heiße“ Elektronen ausgeschlossen [33].

¹⁴ Exzitonen: Elektronen-Loch-Paare, die über Coulomb-Wechselwirkungen gebunden sind, sich entlang der Molekülkette bewegen und dabei Anregungsenergie transportieren [34].

¹⁵ Chromophore in PE sind z. B. Carbonylgruppen und Vernetzungsrückstände die in den unterschiedlichen Herstellungsstufen entstehen und durch UV-Licht angeregt werden können.

Messungen der Spektren von Elektrolumineszenzlicht in unterschiedlichen Isolierstoffen ermöglichen weitere Aussagen zu den Entstehungsprozessen der Lichtemission. Messungen in polymeren Isolierstoffen zeigen ein breites Spektrum im sichtbaren Bereich >400 nm [53]. Spannungsabhängige Intensitätsmaxima wurden nicht gefunden. Nach Pietsch [33] ergibt sich in Polyethylen ein kontinuierliches EL-Spektrum im Bereich von 350 nm bis 800 nm mit einem Emissionsmaximum um 550 nm. Bei Langzeitbeanspruchung zeigt sich ein Anstieg im roten Spektralbereich, der auf strukturelle Veränderungen zurückgeführt wird.

Untersuchungen in homogenen Wechsel- sowie Gleichspannungsfeldern wurden vorwiegend an Filmproben aus polymeren Isoliermaterialien im Dickenbereich um 100 μm bis 200 μm mit gesputterten Metallelektroden (Gold) durchgeführt [48], [49], [55], [60], [63]. Sie dienen der Aufklärung fundamentaler Zusammenhänge, wobei sich das gesamte Probenvolumen im elektrischen Feld befindet. Aus den Ergebnissen der Gleichspannungsuntersuchungen ergibt sich, dass im Vergleich zur Wechselspannung, bei der abhängig vom Isolationsmaterial (LDPE und XLPE) Feldstärken ab ca. 12 kV/mm ausreichen, wesentlich höhere Feldstärken im Bereich um 100 kV/mm für Lumineszenzanregung erforderlich sind [48], [49].

2.2.2 Kanal-/Treewachstum in polymeren Isolieranordnungen

Schwerpunkte der nachfolgenden Analyse sind experimentelle Ergebnisse zur elektrischen Festigkeit und zur Ausbildung von Treestrukturen nach einem TE-Einsatz unter Wechselspannungsbeanspruchung. Vorrangig wurden Ergebnisse betrachtet, die an unterschiedlich gestalteten Prüfkörpern aus Silikonelastomeren, z. T. unter Einbeziehung von Grenzflächen und weiteren ausgewählten polymeren Isolierstoffen ermittelt wurden.

Der Durchschlag richtig konstruierter und dimensionierter Isolierungen ist durch Fehlstellen bedingt, die bei der Fertigung eingebracht werden [68]. Leitfähige Fehlstellen, etwa Metallpartikel, die lokal eine Feldstärkerhöhung bewirken, sind dabei bevorzugte Startpunkte für letztlich zum Durchschlag führende Entladungen. Das Entladungsge-schehen kann sich unter Betriebsbedingungen in längeren Zeiträumen deutlich verändern. Experimentelle Untersuchungen eines derartigen Vorgangs vom Beginn der Beanspruchung an bis zum Durchschlag erfolgten bisher nur in Einzelfällen [72].

Die Ergebnisse zum Kanalaufbau wurden mit Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen als Nachbildung feldüberhöhender Fehlstellen erhalten, wobei die Spitze im Isolierstoff und im Grenzflächenbereich hohlraumfrei eingebettet war. Die fortdauernden Teilentladungen wurden elektrisch gemessen, das Treewachstum optisch unter Verwendung von CCD-Kameras aufgezeichnet. Durch Bildverarbeitungsverfahren wurden aus den Ergebnissen Aussagen zum Treewachstum abgeleitet.

In Abhängigkeit von der Spannungsbeanspruchung, Frequenz und dem Isolierstoff können sich sehr unterschiedliche Treestrukturen ausbilden. Ergebnisse von Dodd [61] und Champion [58] weisen auf Trees mit elektrisch leitenden (conducting) und nicht-leitenden (non-conducting) Wänden hin, die sich in charakteristischer Weise unterscheiden. Die Größe des elektrischen Widerstandes (Widerstandsbelag) der Kanalwandungen wird von den durch Teilentladungen verursachten Umwandlungsprodukten des Materials bestimmt.

Das Wachstumsverhalten beider Strukturen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer ist schematisch in Abbildung 3 gezeigt. Die Phasen: Entstehung, schnelles Wachstum, Stagnation und teilweise wieder beschleunigtes Wachstum vor dem Durchschlag können sich dabei sehr unterschiedlich ausbilden, wie nachfolgende Ergebnisse

zeigen. Ein sehr unterschiedliches Treewachstumsverhalten in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung und Beanspruchungsdauer für eine in Epoxidharz (LCT 1200) eingebettete Spitze-Platte-Elektrodenanordnung ist in Abbildung 4 gezeigt.

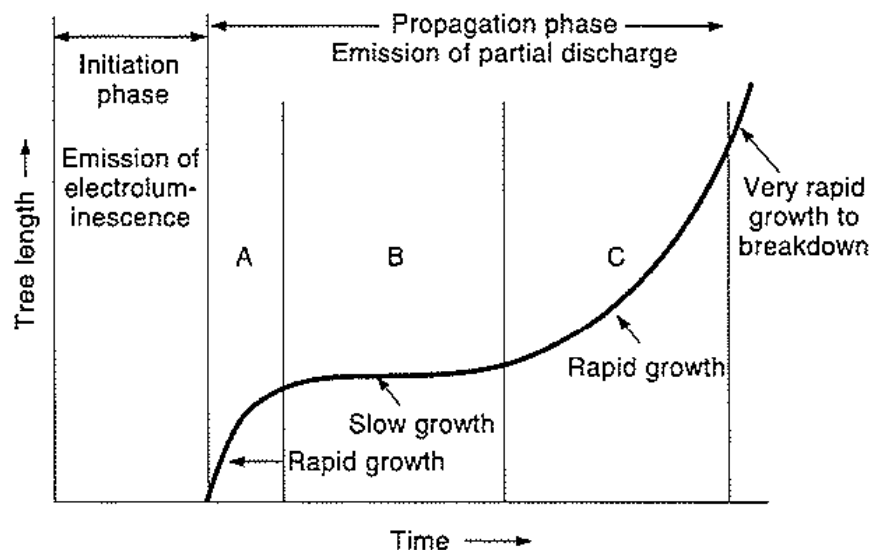


Abbildung 3: Phase der Treeausbildung und des Treewachstums [25]

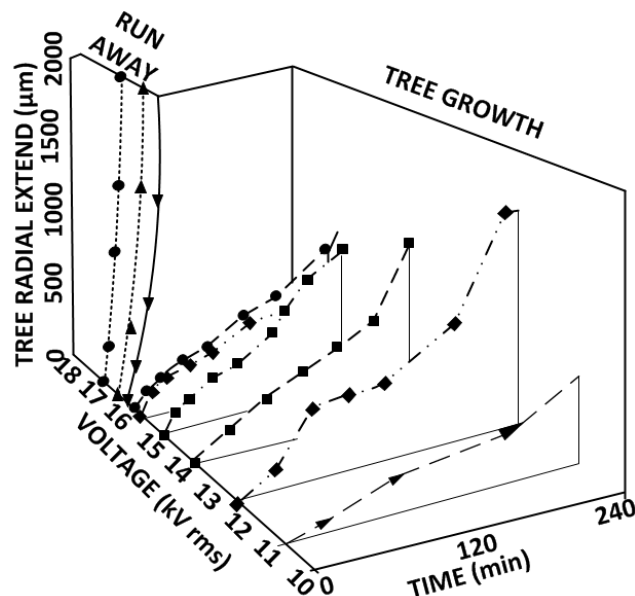


Abbildung 4: Abhängigkeit des Treewachstums von der Spannungsbeanspruchung gemessen mit einer Spitze/Platte-Elektrodenanordnung im Epoxidharz [26]

Die erkennbare, sehr abrupte Änderung des Wachstumsverhaltens im Spannungsbereich um 15 kV ist eine Konsequenz der Änderung von Ladungstransportprozessen bei hohen Feldstärken in diesem Material.

Treestrukturen mit nichtleitenden Wänden, die sich in Silikonelastomeren ausbilden, zeigen eine mit der Spannung stark ansteigende Wachstumsgeschwindigkeit, gefolgt von einem Spannungsbereich mit sinkender Wachstumsgeschwindigkeit bevor diese wieder mit weiter wachsender Spannung ansteigt. Die Lichtemission resultiert aus Teil-

entladungsprozessen, die in den Hauptkanälen mit direkter Verbindung zur Spitzenelektrode ablaufen. In Treestrukturen mit leitenden Kanalwänden entstehen Teilentladungen im Spitzenbereich der sich ausbildenden Kanäle [61].

2.2.2.1 Isolieranordnungen aus Silikonelastomeren ohne makroskopische Grenzflächen

Diese Untersuchungen wurden an Isolieranordnungen aus Silikonelastomeren ohne fertigungsbedingte Grenzflächen durchgeführt, wobei die Ergebnisse von Untersuchungen in schwach inhomogenen Feldern¹⁶ bei 50Hz-Wechselspannungsbeanspruchung von besonderer Bedeutung sind. Elektrische Isolierungen aus Silikonmaterialien in der Kabeltechnik sind meist Anordnungen mit schwach inhomogener Feldgeometrie und die Dauerbeanspruchung stellt die netzfrequente Spannung dar.

Durchschlagfestigkeiten

Die in Datenblättern der Materialhersteller angegebenen Werte für Durchschlagfestigkeiten von ≈ 20 kV/mm sind relativ niedrig und weisen nur geringe Unterschiede zwischen verschiedenen Materialtypen auf. Die verwendete standardisierte Prüfanordnung mit aufgesetzten Kugel- oder Plattenelektroden in einer Isolierflüssigkeit ist meist nicht teilentladungsfrei, so dass dadurch eher eine Charakterisierung der Teilentladungsresistenz des jeweiligen Materials erfolgt [3].

Eine bessere Nachbildung der Beanspruchungsverhältnisse in Garnituren und wirksamere Unterdrückung von Teilentladungen wird durch hohlraumfrei in das Material eingebettete Stabelektroden mit einem Stabrundungsradius von 10 mm erreicht [68]. Die im Kurzzeittest ermittelten Festigkeitswerte (Elektrodenabstand 0,2 mm bis 1,5 mm) im Bereich von ca. 100 kV/mm zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Silikonmaterialtypen. Ein signifikanter Einfluss unterschiedlicher Elektrodenmaterialien (Al, Cu, Deflektormaterial) sowie der Temperatur (bis 120 °C) ist nicht nachweisbar.

Dagegen zeigt sich ein deutlicher Abfall der Durchschlagfestigkeit mit wachsendem Elektrodenabstand (5 mm bis 20 mm) [80]. Daher sind die in den Standardprüfungen mit Plattendicken von 1 mm ermittelten elektrischen Festigkeiten auch aus diesem Grund für Dimensionierungen nur unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse anwendbar.

Schädigungsprozesse schwach inhomogenen Feldern

Neben der materialeigenen elektrischen Festigkeit des betreffenden Silikonmaterials sind für die Garniturendimensionierung Kenntnisse zur elektrischen Langzeitfestigkeit von Bedeutung. Die vorwiegend in Spannungssteigerungsversuchen mit unterschiedlicher Spannungssteigerungsgeschwindigkeit ermittelten Ergebnisse zeigen keine Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Beanspruchungsdauer. Das Silikonmaterial zeigt keine Alterung durch alleinige Einwirkung des elektrischen Feldes (elektrische Alterung). Dieses Verhalten unterscheidet sich deutlich vom Verhalten von Isolierstoffen wie Polyethylen und Epoxidharz. Die abgeschätzten Lebensdauerexponenten von Silikonmaterialien in Gleichung (7) weisen Werte von $N > 70$ auf im Vergleich zu Polyethylen mit Werten um 12 bis 15. Das bedeutet, dass für Silikonmaterialien beliebige

¹⁶ Für die Kennzeichnung eines Elektrodensystems wird der Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger η (Homogenitätsgrad) verwendet. Er gibt definitionsgemäß das Verhältnis der homogenen Feldstärke E_0 , die in einem Plattenkondensator mit gleichem Elektrodenabstand herrschen würde, zur Maximalfeldstärke $E_{\max}$ des betreffenden Elektrodensystems an: $\eta = E_0 / E_{\max}$ [6]. Als schwach inhomogen werden solche Anordnungen verstanden, deren Homogenitätsgrad kleiner als der Wert des homogenen Feldes $\eta = 1$ ist, für stark inhomogene Anordnungen gilt $\eta \ll 1$.

Vorbeanspruchungen, die nicht zum Durchschlag führen, keinen Einfluss auf die elektrische Festigkeit haben.

$$\log E = \text{const} - \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \log t \quad (7)$$

mit E : Beanspruchungsfeldstärke
 t : erwartete Lebensdauer
 N : Lebensdauerexponent.

Der Durchschlag wird von der momentanen elektrischen Beanspruchung des Silikonmaterials bestimmt.

Schädigungsprozesse stark inhomogenen Feldern

Untersuchungen zum Kanaleinsatz sowie Kanalwachstum bei Langzeitbeanspruchung wurden in stark inhomogenen Feldern¹⁷ bei 50 Hz-Wechselspannungsbeanspruchung durch eingebettete Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen durchgeführt.

In Spannungssteigerungsversuchen wurden Teilentladungs-(TE-) Einsetzspannungen sowie Durchschlagspannungen einschließlich ihrer Verteilfunktionen in Abhängigkeit vom Spitzendurchmesser der verwendeten metallischen Nadeln, der Materialvorbehandlung (ungetempert, getempert) und der Temperatur bestimmt [68]. Mit dem verwendeten TE-Messsystem waren Teilentladungen oberhalb 5 pC nachweisbar.

Die TE-Einsetzspannung steigt mit wachsendem Spitzendurchmesser (1 µm bis 50 µm) von ca. 14 kV auf 34 kV (Elektrodenabstand 5 mm, Steigerungsgeschwindigkeit 2 kV/s, Raumtemperatur 20 °C). Sie ist stark von der Vorbehandlung abhängig und bei getemperten Proben im Vergleich zu ungetemperten Proben deutlich geringer und kann Werte von 2 kV bis 3 kV annehmen, was auf eine Hohlraumbildung vor der Nadelspitze bei der Temperung zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu sind die bei konstanter Spannungssteigerungsgeschwindigkeit ermittelten Durchschlagspannungen beider Stichproben (getempert und ungetempert) statistisch als einer Grundgesamtheit angehörend zu betrachten. Letzteres bedeutet, dass trotz des frühen Teilentladungseinsatzes in den getemperten Prüfkörpern identische Durchschlagwerte festgestellt werden.

Der Einfluss einer Evakuierung auf den TE-Einsatz in Silikonelastomeren mit eingebetteter Spitze-Platte-Elektrodenanordnung wurde ebenfalls untersucht [95]. Die TE-Einsetzspannung steigt signifikant im evakuierten Prüfkörper an (Dauer der Evakuierung 14 Tage, Restdruck ≤133 mbar, Prüfkörpergröße 15 mm x 10 mm x 5 mm). Nach dem Eindringen von Luft sinken die Werte deutlich ab.

Ergebnisse von Messungen zu TE-Einsetzspannungen in Silikonmaterial sind weiterhin bei Köhalmi [69] enthalten. Diese erfolgten an Prüfkörpern mit eingebetteten Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung (Elektrode 1: Spitzenradius im Bereich 1 µm bis 40 µm; Elektrode 2: Spitzenradius im Bereich 2 µm bis 100 µm; Elektrodenabstand 5 mm) unter trockenen und feuchten Bedingungen. Die TE-Einsetzspannung bei Wechselspannung ist für feuchte Proben, die bei 70 °C 3 bis 4 Tage im Wasser gelagert wurden, unabhängig vom Spitzenradius und deutlich kleiner als für trockene Proben.

Die Differenz zwischen TE-Einsatz- und Durchschlagspannung ist bei Silikonmaterialien unabhängig von der Vorbehandlung im Vergleich zu anderen polymeren Isolierstoffen

¹⁷ Nach Kahle [28] ist eine Quantisierung von stark und schwach inhomogenen Feldern nur durch das Entladungsverhalten sinnvoll. Als stark inhomogen betrachtet man ein Feld, wenn eine Teilentladung stabil im Dielektrikum bestehen kann.

wie Polyethylen relativ groß, insbesondere bei ungetemperten Proben. Daraus ergibt sich als eine wesentliche Schlussfolgerung, dass der TE-Einsatz allein keine hinreichende Bedingung für ein Kanalwachstum in Silikonelastomeren ist. Vielmehr ist das Wachstum an eine gegenüber der TE-Einsatzfeldstärke deutlich höhere Feldstärke gebunden.

Temperaturerhöhungen im untersuchten Bereich bis 120 °C verursachen keine Veränderung der Kanalwachstumsbedingungen; die Durchschlagsspannung ist bei der höheren Temperatur sogar geringfügig höher.

Ähnlich wie in schwach inhomogenen Feldern tritt auch in stark inhomogenen Feldern statistisch keine nachweisbare Alterung durch alleinige Einwirkung elektrischer Felder auf, sofern die TE-Einsatzspannung nicht erreicht wird. Deutliche Alterungseffekte werden aber durch Teilentladungen verursacht, wie Langzeittests nachweisen [68]. Der geschätzte Lebensdauerexponent sinkt auf Werte um $N \approx 16$ ab, wobei dieses Absinken hauptsächlich durch die Ausbreitung der Entladungskanäle (Kanalwachstum) bestimmt wird.

Das Kanal-/Treewachstum im Silikonmaterial bei einer konstanten 50Hz-Wechselspannungsbeanspruchung von 8 kV bis 9 kV in Abhängigkeit von unterschiedlichen Beanspruchungsparametern wurde auch optisch untersucht [73], [74]. Als Elektrodenanordnung wurde eine Spitze-Platte-Anordnung mit eingebetteter Spitze verwendet und das Treewachstum mittels CCD-Kamera dokumentiert. Die Messungen ergaben, dass sich Treekanäle mit nichtleitenden Wänden ausbilden, während in Polyethylen karbonisierte (leitende) Kanalwandungen entstehen können. Die Ursache wird im wesentlich geringeren Kohlenstoffanteil im Silikonmolekül gesehen, woraus sich ergibt, dass eine resistive Verschleppung des Elektrodenpotentials entlang der Wandungen bis in die Treespitzen nicht möglich ist [61], [68]. Die Feldverhältnisse an den Kanalenden werden somit überwiegend von Raumladungen bestimmt, die sich durch Gasentladungsprozesse im Kanal ansammeln. Damit im Zusammenhang steht auch die bei Oesterheld [68] gegebene Erklärung für die relativ große Differenz zwischen TE-Einsatz- und Durchschlagsspannung. Das Silikonelastomer wird durch die Elektronenstoßenergie in niedermolekulare, kurzkettige Siloxane aufgespalten, die die Kanäle der Treestrukturen ausfüllen und die weitere Zerstörung durch eine teilweise Absorption der Elektronenstoßenergie behindern („Selbstschmierungseffekt“).

Die in Abbildung 5 gezeigten Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen die in Abbildung 3 angegebenen Wachstumsphasen.

Es ergibt sich zunächst ein starkes Treewachstum nach Beanspruchungsbeginn (Prüfkörperabmessungen 15 mm x 30 mm x 1 mm; Abstand Spitze-Platte 2 mm). Die höchste Wachstumsgeschwindigkeit zeigen zweigförmige Trees (branch trees) bei 30 °C (Spannung 8 kV, 50 Hz). Bilden sich bei dieser Temperatur buschförmige Trees (bush trees) aus, so stagniert das Wachstum mit zunehmender Beanspruchungsdauer (max. 100 min). Für die in der Praxis ebenfalls interessanten Temperaturen im Bereich um 60 °C und 90 °C existiert eine Stagnationsphase für zweigförmige und buschförmige Trees bei 60 °C sowie zweigförmige Trees bei 90 °C, während buschförmige Trees bei 90 °C nach einer Stagnationsphase wieder ein Wachstum zeigen. Die sehr geringe Leitfähigkeit der Kanalwände hat Auswirkungen auf die Stagnationsphase.

Ebenfalls ergibt sich in ähnlichen Prüfkörpern ein starkes Wachstum speziell nach Beanspruchungsbeginn und nach längerer Beanspruchungsdauer unmittelbar bevor ein Kanal die Gegenelektrode erreicht (Prüfkörperabmessungen 10 mm x 10 mm x 6 mm; Abstand Spitze-Gegenelektrode 2 mm, eingegossen in transparentes Silikonmaterial Sylgard 184) [92]. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Trees steigt mit der Spannung,

obwohl die Komplexität der Treestrukturen zunimmt (untersuchte Bereiche mit Effektivwerten der Spannung von 8 kV bis 12 kV und 14 kV bis 18 kV).

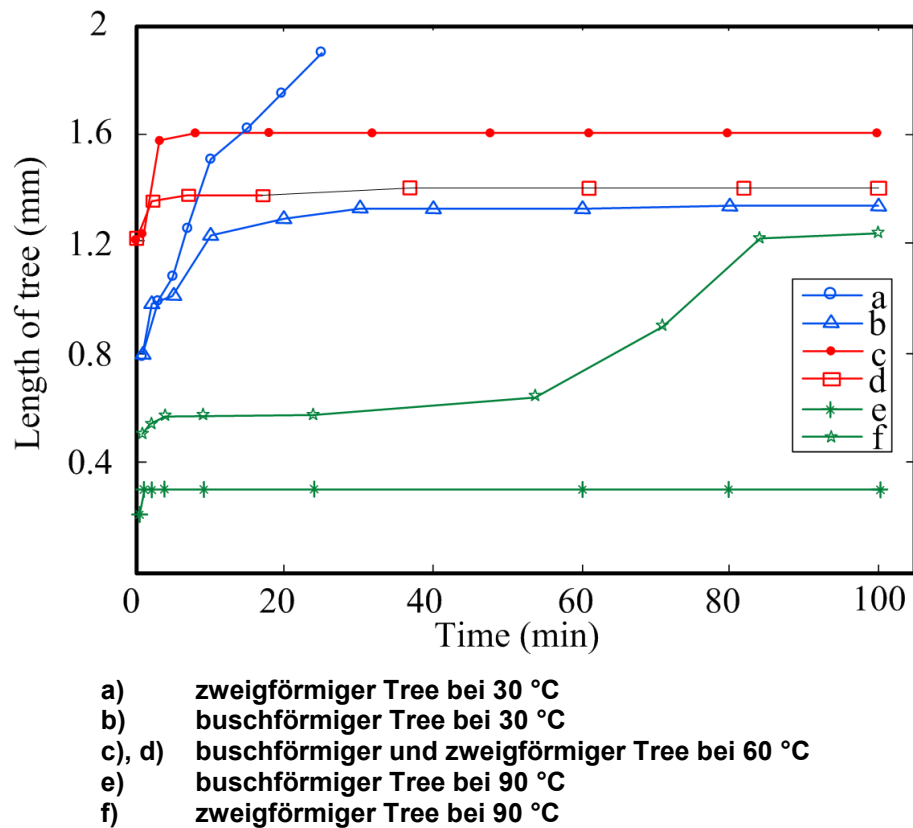


Abbildung 5: Wachstumsverhalten von unterschiedlichen Treestrukturen in raumtemperaturvernetztem Silikon; Spannung: 8 kV; [74]

2.2.2.2 Isolieranordnungen aus Silikonelastomeren mit makroskopischen Grenzflächen

Bei der Dimensionierung von Garnituren für Hochspannungs-VPE-Kabel ist neben der elektrischen Festigkeit des eingesetzten Silikonmaterials selbst der Einfluss makroskopischer Grenzflächen¹⁸ auf das Verhalten der Betriebsmittel zu beachten. Die makroskopischen Grenzflächen können technologisch oder funktionell bedingt auftreten und einen maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer der Betriebsmittel haben.

Technologisch bedingt können Silikon/Silikon-Grenzflächen als Konsequenz von zwei oder mehr Gießvorgängen mit zwischenzeitlicher Vernetzung der Teilisolierung vorhanden sein. Funktionell bedingt schließen die geschälte Kabelisolierung und ein vorgefertigter Garniturenkörper aus Silikonmaterial (elastomeres Feldsteuerelement, Stresskonus) stets eine Grenzfläche mit überwiegend zylindrischer Kontur ein, die in der Praxis einer Feldstärke mit ausgeprägter Tangentialkomponente ausgesetzt ist. Schließlich verursacht eine mögliche Einbettung faseroptischer Sensoren in den Garniturenkörper sehr unterschiedliche Isolierstoffgrenzflächen hinsichtlich Material, Gestaltung und Lage im elektrischen Feld.

Die Gestaltung von Isolierstoffgrenzflächen sollte so erfolgen, dass die Festigkeit der verwendeten Isolierstoffe nicht verringert wird [3]. Für die Garniturenbeanspruchung

¹⁸ Neben makroskopischen Grenzflächen existieren auch mikroskopische Grenzflächen, die durch Füllstoffpartikel im matrixbildenden Werkstoff vorhanden sein können.

sind die an der Grenzfläche zwischen der VPE-Kabelisolierung und dem Stresskonus auftretenden Feldstärken maßgeblich. Sie steigen mit wachsender Nennspannung der Kabel an und erreichen in der 400 kV-Spannungsebene für die Normalkomponente (senkrecht zur Grenzfläche) Werte von ≤ 6 kV/mm und für die Tangentialkomponente (in Richtung der Grenzfläche) Werte von ≤ 2 kV/mm.

In der nachfolgenden Übersicht wurden daher vorrangig experimentelle Ergebnisse zu den Auswirkungen dieser Isolierstoffgrenzflächen auf die Kurzzeit-Durchschlagfestigkeit im homogenen und schwach inhomogenen und in stark inhomogenen elektrischen Feldern betrachtet, die in Spannungssteigerungsversuchen (Ramp-Test) bestimmt wurden.

Silikon/Silikon-Grenzfläche

Isolierstoffgrenzflächen quer zur Richtung des elektrischen Feldes (Quergrenzflächen) wirken sich in schwach inhomogenen Feldern nicht auf die Höhe der Durchschlagspannung aus [68]. Die im Feld beschleunigten Ladungsträger treffen auf die Quergrenzfläche auf und führen aufgrund ihrer hohen Bewegungsenergie sofort zu Zerstörungen und zum weiteren Wachstum des Entladungskanals im zweiten Isolierstoffteil.

Die ebenfalls in schwach inhomogenen Feldern untersuchten Grenzflächen in Feldrichtung (Längsgrenzschichten) sind wegen möglicherweise vorhandener mikroskopischer und makroskopischer Fehlstellen mit verringerter Festigkeit als kritisch einzuschätzen. Sie ermöglichen eine Ausbildung von Entladungskanälen zwischen diesen Fehlstellen [68].

Messungen mit Stab/Stab-Elektrodenanordnung ergaben im Vergleich zu Messwerten homogener Prüfkörper nur annähernd gleiche Ergebnisse, wenn die Grenzfläche durch Kaltvernetzung der Gießhälften gefertigt wurde. Herstellungsschritte wie Tempern, Verwendung von Haftvermittlern (Längs- und Quergrenzflächen) und lange Lagerungszeiten führten zu signifikant niedrigen Festigkeiten.

Auch in stark inhomogenen Feldern haben Quergrenzflächen keinen Einfluss auf die Ausbreitung von Entladungskanälen [68]. Die für eine Verzögerung des Wachstums notwendige Homogenisierung des Feldes durch Raumladungen in der verbleibenden Teilisolierung tritt nicht auf.

VPE/Silikon- Grenzfläche

Die funktionsbedingt in Garnituren immer auftretende Berührungsfläche von Kabelisolierung und Silikonkörper stellt für die elektrische Feldlinien eine Schräggrenzfläche dar, an der Gleitentladungen entstehen können. Die Feldsteuerung durch den Stresskonus verhindert deren Auftreten, so dass derartige Isolieranordnungen durch separate Betrachtungen der längs und quer zur Grenzfläche wirkenden Feldkomponenten untersucht werden können [68].

Für die dominierende radiale Feldkomponente ist die Grenzfläche aus VPE und Silikon eine Quergrenzfläche. Wegen der unterschiedlichen elektrischen Festigkeiten und Dielektrizitätszahlen der beiden Materialien könnte daraus eine Barrierewirkung resultieren, wenn der elektrisch festere Stoff das Kanalwachstum behindert.

Messungen im schwach inhomogenen Feld mit eingebetteter Stab-Stab-Elektrodenkonfiguration (Stabrundungsradius 10 mm, VPE-Schichtdicke 0,22 mm) ergaben für dieses Zweistoffsystem keine systematischen Unterschiede der Verteilfunktionen der Durchschlagspannungen im Vergleich zum Silikonmaterial [68].

Auftretende Grenzflächen in Feldrichtung (Längsgrenzflächen) führen im homogenen und schwach inhomogenen Feld je nach Herstellungsverfahren zu einer Verringerung

der Durchschlagsfestigkeit gegenüber dem Isolierstoff selbst [68]. Die erreichbaren Festigkeitswerte steigen mit dem vom Silikonmaterial auf die VPE-Fläche ausgeübten Anpressdruck (typische Größenordnungen bis ca. 0,25 MPa) und nehmen mit wachsender Oberflächenrauigkeit der VPE-Fläche ab [3]. Die höchsten Festigkeitswerte werden erreicht, wenn das Silikonmaterial an das VPE-Material angegossen und anschließend vernetzt wird. Für die Einleitung von Entladungsvorgängen sind wie im Isolierstoff selbst frei bewegliche Ladungsträger verantwortlich. Diese werden offensichtlich in kritischen Bereichen dieser Grenzflächen erzeugt, in denen günstige Bedingungen für eine Energieakkumulation statistisch vorhandener Anfangselektronen im Feld herrschen. Eine Voraussetzung für die Existenz derartiger Fehlstellen ist die durch eine mechanische Bearbeitung aufgeraute Oberfläche der VPE-Kabelader (Schälen, Schleifen) im Kontakt mit dem umhüllenden Silikonstresskonus [3].

Beim Auftreten von Quergrenzflächen in stark inhomogenen Feldern wird das Wachstum von im Silikonmaterial gestarteten Kanälen behindert und damit verzögert [68]. Die auf die Grenzfläche treffenden Ladungsträger breiten sich entlang der VPE/Silikon-Quergrenzfläche aus und homogenisieren das elektrische Feld im VPE. Der Durchschlag wird allerdings nicht auf Dauer verhindert (elektrisch erosiver und thermischer Abbau des VPE).

2.2.2.3 Isolieranordnungen aus ausgewählten polymeren Isolierstoffen

Das Wachstumsverhalten wurde experimentell in unterschiedlichen Anordnungen aus verschiedenen Isolierstoffen untersucht und daraus Modellvorstellungen entwickelt [26], [58], [71], [72], [83], [85]. Die simultane Berücksichtigung von Treewachstum und Teilentladungsaktivitäten ist eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis von Treeentwicklungen in polymeren Isolierstoffen [96]. Erfasst werden die bereits in Abschnitt 2.2.2 angeführten Größen in Abhängigkeit von Beanspruchungsparametern sowie Ergebnisse synchroner optischer Messungen. Auf die Darstellung von Ergebnissen zu Durchschlagsfestigkeiten wird verzichtet.

Eine Übersicht über Modelle zur Entwicklung von elektrischen Trees in festen Isolierstoffen ist bei Dissado [25] enthalten. Dabei wurden eine Vielzahl von unterschiedlichen experimentellen Bedingungen für die Entstehung und das Wachstum von Trees berücksichtigt. Bei konstanter Spannungsbeanspruchung entwickelt sich zunächst ein relativ starkes Wachstum, das mit zunehmender Beanspruchungsdauer wieder absinkt und vor dem Durchschlag erneut stark ansteigen kann (siehe Abbildung 3). Das Wachstum kann aber auch ein asymptotisches Verhalten aufweisen.

Beispiele für die ermittelten Wachstumsgeschwindigkeiten von elektrischen Trees mit Spitze-Platte-Elektrodenanordnung in Epoxidharz in Abhängigkeit von der Spannung zeigt die Abbildung 4 [26]. Die gemessenen scheinbaren Ladungen steigen von sehr kleinen Werten nach Beginn des Treewachstums (Bereich pC) auf sehr hohe Werte (Bereich nC), insbesondere vor dem Durchschlag.

Messungen ebenfalls an Prüfkörpern aus Epoxidharz ergaben, dass die sich ausbildenden zweigförmigen Trees nach dem Erreichen der Gegenelektrode nicht sofort den Durchschlag einleiten [72]. Erst nach einer ausreichenden Zeitdauer, insbesondere zur Ausbildung röhrenförmiger Kanäle, erfolgt der Durchschlag (Abbildung 6).

Untersuchungen an Isolieranordnungen aus unterschiedlichen polymeren Isolierstoffen PE (Polyethylen), EVA (Ethylen-Vinylacetat) und EEA (Ethylen-Ethylacrylat) bei konstanter Wechsel- und Dreiecksspannung (8 kV, 60 Hz) mit einer Spitze/Platte-Elektrodenkonfiguration (Nadelspitzenradius 3 mm) ergaben charakteristische Veränderungen der PRPD-Diagramme (ϕ -q-n-pattern) mit der Beanspruchungsdauer (bis

180 min) [70], [71]. Abbildung 7 enthält die Ergebnisse für LDPE für eine maximale Beanspruchungsdauer von 180 min.

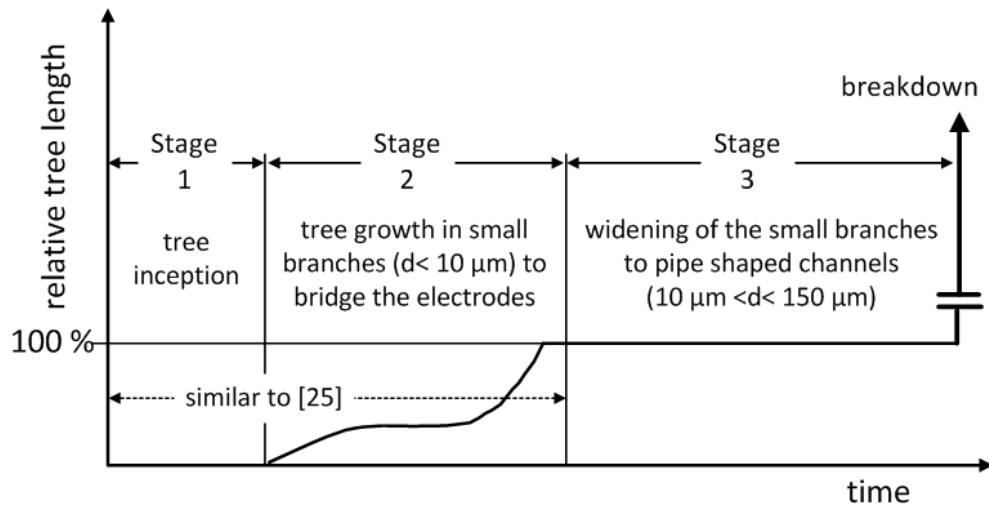


Abbildung 6: Stadien des Wachstums der elektrischen Trees in Epoxidharz bis zum Durchschlag (Vogelsang [72])

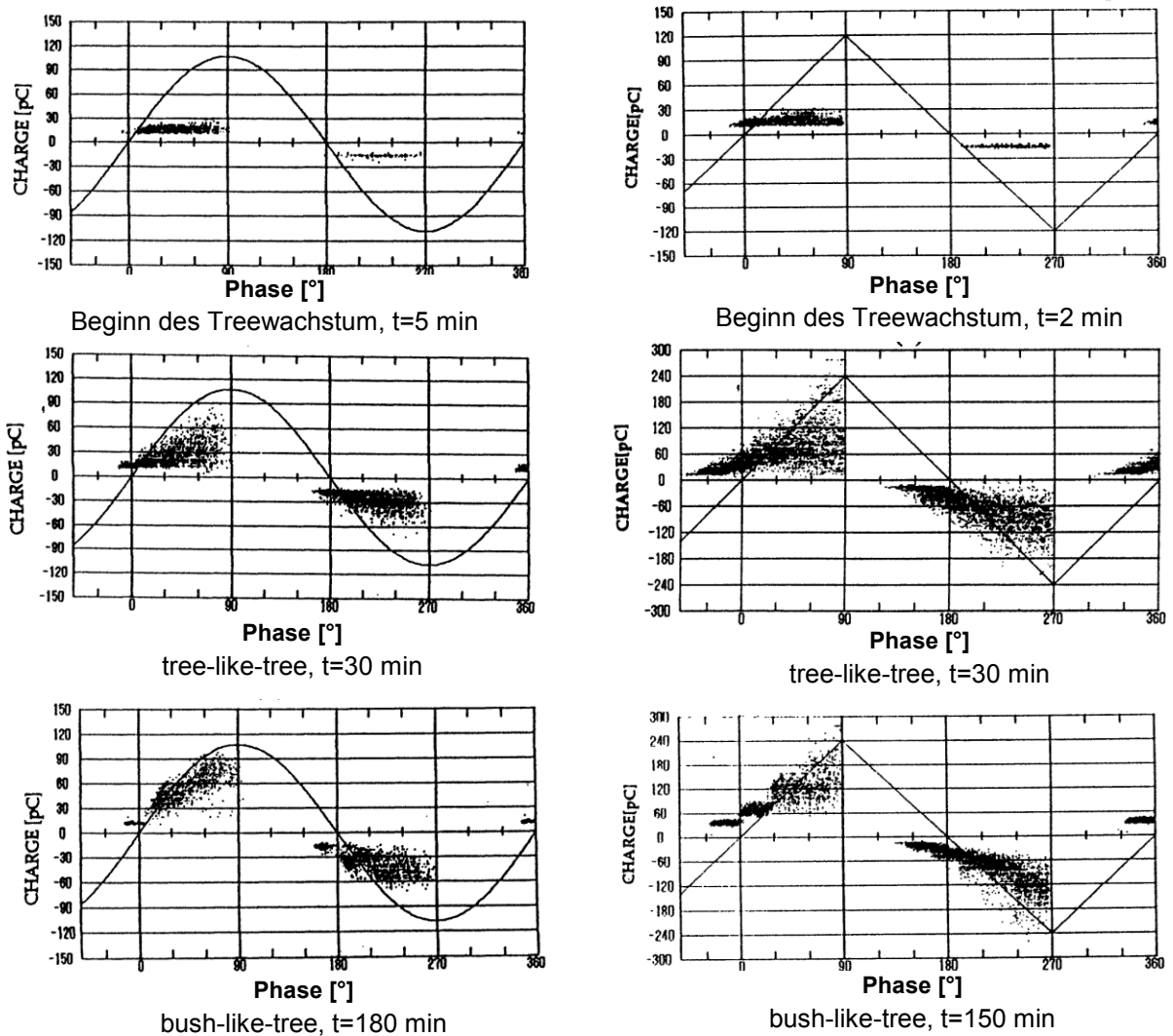


Abbildung 7: PRPD-Diagramme (ϕ -q-n-pattern) des Treewachstums Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Prüfkörper aus LDPE; verschiedene Spannungsformen [70], [71]

Ein Einfluss des Isoliermaterials auf die PRPD-Diagramme war nicht feststellbar. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Trees reduzierte sich in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer, so dass sich die Treelänge nach 120 min kaum noch veränderte (asymptotischer Verlauf). Eine komplette Bestimmung des Treewachstums bis zum Durchschlag erfolgte nicht.

Unabhängig vom verwendeten polymeren Isolierstoff (PE, EEA, Epoxidharz) ergaben Teilentladungsmessungen für diese Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen hauptsächlich Entladungen im ersten positiven und im ersten negativen Quadranten der anliegenden Wechselspannung. Aus den optischen Messungen ergaben sich unterschiedliche Treestrukturen, die in Abhängigkeit vom verwendeten Material als elektrisch leitende oder nichtleitende Trees bezeichnet wurden. Im Falle nichtleitender Trees entstehen die Teilentladungen und damit die Lichtemissionen innerhalb des zentralen Kanals und der Kanäle der Treestruktur mit Verbindung zur Hochspannungselektrode. Bilden sich leitende Treestrukturen aus, entstehen die Teilentladungen hauptsächlich im Endbereich der vorwachsenden Treekanäle.

Die Dokumentation des Treewachstums durch eine TE-Messung in Verbindung mit einer optischen Aufzeichnung mittels CCD-Kamera und Videokamera an Modellkörpern aus Epoxidharz CY1311 ergab, dass bei Spannungsbeanspruchung und Raumtemperatur (Messung oberhalb der Glasstemperatur von $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ im flexiblen Zustand) sich nichtleitende Treekanäle ausbilden [58], [61]. Nichtleitende elektrische Treestrukturen entstehen zu Beanspruchungsbeginn auch in PE und EEA, die sich nach einer kritischen Zeitdauer in elektrisch leitende Strukturen verändern [61].

Neben metallischen Elektroden auf Hochspannungspotential wurden vereinzelt auch halbleitende Elektroden verwendet. Spitze/Platte-Elektrodenanordnungen mit halbleitender HS-Elektrode wurden im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Elektrolumineszenz bei Impulsspannungsbeanspruchung verwendet [45], [46].

Der Einfluss von im Polyethylen vorhandenen Sauerstoff auf das Treewachstum bei Raumtemperatur wurde von Shimizu [54] untersucht, wobei als HS-Elektroden Stahlnadeln (Spitzenradius $3\text{ }\mu\text{m}$) und Streifen aus halbleitendem PE (Spitzenradius $<10\text{ }\mu\text{m}$) verwendet wurden. Im Vergleich zur Metallspitze wurden bei der halbleitenden Elektrode keine mechanischen Spannungen im Bereich um die Spitze und damit keine Bildung von Mikrovoids in diesem Bereich festgestellt, die das Treewachstum beeinflussen.

Weitere Ergebnisse liegen von Prüfkörpern aus Epoxidharz vor. Untersuchungen zum Treewachstum (Nadel-Platte-Elektrodenanordnung, Spannung 28 kV) zeigten nach Ausbildung eines ersten Kanals ($\approx 100\text{ }\mu\text{m}$ Länge) eine hohe Wachstumsgeschwindigkeit zu Beanspruchungsbeginn, gefolgt von einer Phase langsameren Wachstums bevor sich unmittelbar vor dem Erreichen der Gegenelektrode das Wachstum wieder beschleunigt (Beanspruchungsdauer $\leq 28\text{ min}$) [26]. Die Wachstumskurve wird als „liegendes S“ beschrieben. Nach Erreichen der Gegenelektrode tritt nicht sofort der Durchschlag ein, sondern es kommt zu der im Zusammenhang mit Abbildung 6 beschriebenen Kanalaufweitung.

Die Abhängigkeit der gebildeten Treestrukturen und des Treewachstums von der Spannungshöhe zeigte, dass höhere Spannungen nicht notwendigerweise längere Trees erzeugen. Zweigförmige Strukturen mit höherer Wachstumsgeschwindigkeit entstehen eher bei niedrigen Spannungen. Wenn die Spannung über eine bestimmte Größe anwächst, ergab sich eine plötzliche Änderung zu buschförmigen Trees. Eine weitere Spannungssteigerung erzeugte wieder ein nicht eindeutig zu beschreibendes Anwachsen der Treelänge. Den Einfluss des in den Entladungskanälen herrschenden Gasdrucks auf die Wachstumsform der Kanäle wird von Pepper [64] und Löffelmacher [65]

behandelt. Die gefundenen Ergebnisse zeigen, dass bei einer niedrigen Spannung (10 kV) ein Gasdruck in den Kanälen vorhanden ist, der mit einem zweigförmigen Kanalwachstum korrespondiert [65]. Bei einer höheren Spannung (15 kV) ist der Gasdruck deutlich höher und es kommt zu einem buschförmigen Kanalwachstum. Die im Vergleich zu zweigförmigen Trees reduzierte Länge der buschförmigen Trees wird durch die wachsende Dichte des zerstörten Volumens (damage density) kompensiert, so dass die Gesamtmateriale zerstörung mit der Spannungshöhe anwächst.

2.2.3 Wachstumsmodelle für Treestrukturen mit nichtleitenden Kanalwänden

Zur Beschreibung des Treewachstums in polymeren Isolierstoffen in Abhängigkeit von Belastungsparametern existieren sehr unterschiedliche Modelle. Sie können grob in stochastische, physikalisch- stochastische [95] und deterministische Modelle [61] eingeteilt werden. Diese Modelle kennzeichnen den Wachstumsprozess als ein schrittweises Wachstum, unterscheiden sich aber in der Festlegung der Richtung des neuen Kanals aus dem vorangegangenen Wachstumsschritt.

Im deterministischen Modell basiert das Wachstum auf örtlich ausgelöste Elektronenlawinen zur Nachbildung von Teilentladungen und einem Mechanismus, der auf einer entsprechenden Energiedissipation beruht. Das bedeutet, dass die durch die Entladungen entstehenden Schädigungen einen Einfluss auf die Größe und Richtung der folgenden Entladungen haben. Unter Verwendung numerischer Berechnungsverfahren wurde das Wachstum von Strukturen mit nichtleitenden Wänden in unterschiedlichen polymeren Materialien (Polyethylen, Epoxidharz) simuliert und experimentell durch die ermittelten zweigförmigen Trees in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer und –spannung bestätigt. Ebenso bestätigte sich die synchrone Erzeugung von Teilentladungen und von Lichtimpulsen in Bezug auf die Phase der treibenden Spannung für derartige Trees in Epoxidharz und Polyethylen.

Für einen direkten Vergleich zwischen Simulation und Experiment muss dieses Modell weiterentwickelt werden, damit auch ein dreidimensionales Treewachstum erfasst werden kann. Der Vorteil eines derartigen Modells wäre ein Minimum von Annahmen zu chemischen und mechanischen Materialeigenschaften für die Simulation.

2.3 Schlussfolgerungen für die eigenen Untersuchungen

Aus den Ergebnissen zum Erkenntnisstand zu Schädigungsprozessen in polymeren Isoliersystemen ergeben sich für die eigenen experimentellen Untersuchungen wesentliche Erkenntnisse und Hinweise:

- Ausgehend von feldüberhöhenden, leitenden Fehlstellen können sich im unmittelbaren Bereich um die Fehlstelle oberhalb bestimmter Feldstärken (threshold field strength) Schädigungen im polymeren Isolierstoffen ausbilden, die durch eine empfindliche TE-Messung nicht nachweisbar sind. Sie sind mit der Aussendung von Elektrolumineszenzlicht verbunden und in transparenten/transluzenten Isolierstoffen optisch erfassbar. Die dafür bei Wechsel- und Impulsspannung erforderlichen Spannungswerte werden unter Umständen in Prüfungen von Hochspannungskabelanlagen erreicht. Bei weiter andauernder Spannungsbeanspruchung entwickeln sich infolge von Teilentladungen Treestrukturen mit anwachsendem Schädigungsvolumen. Sie leiten in der Regel den Durchschlag ein und sind optisch ebenfalls detektierbar.

- Eine optische Signalerfassung erfordert hochempfindliche Messeinrichtungen im Wellenlängenbereich von 350 nm bis 800 nm, da die emittierte Energie nur Werte von $3 \cdot 10^{-15}$ Ws bis $3 \cdot 10^{-10}$ Ws erreicht. Die durch Teilentladungen emittierte Energie ist in einem ähnlichen Wellenlängenbereich um ca. zwei Größenordnungen höher. In den optischen Messeinrichtungen wurden zur Signalerfassung vorwiegend gekühlte Photovervielfacher (Photomultiplier) als Detektoren eingesetzt. Diese Geräte sind für die eigenen Messungen nicht verfügbar. Auch in Hinblick auf eine praktische Anwendbarkeit optischer Messeinrichtungen müssen für die eigenen Untersuchungen optisch-elektrische Wandler auf Festkörperbasis in Verbindung mit einem digitalen Mehrstellen-TE-Messsystem gefertigt werden.
- Die in Prüfkörpern aus transparenten Silikonelastomeren nachzubildenden praxisrelevanten Fehlstellen sind durch Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen modellierbar. Sie können aus einer im Isolierstoff eingegossenen Nadelelektrode sowie plattenförmiger Elektrode mit angeschnittener Spitze aus Deflektormaterial jeweils auf Hochspannungspotential gestaltet werden. Weiterhin stellt die funktionsbedingt in Garnituren auftretende VPE-Silikon-Grenzfläche einen kritischen Bereich dar, die gleichfalls nachgebildet werden kann. Die Abhängigkeit der zu detektierenden Signale von Materialparametern wie z. B. vom Sauerstoffgehalt im polymeren Isolierstoff in den Untersuchungen ist zu berücksichtigen.

2.4 Berechnung des Kanaleinsatzes in polymeren Isolierstoffen

Nach den Darstellungen in den vorangegangenen Abschnitten bilden sich im Bereich feldstärkeerhöhender Fehlstellen erste irreversible Schädigungen im Material (Initialaufbruch). Diese sind zunächst nur optisch und mit dem Zünden von Teilentladungen in diesen Strukturen auch elektrisch nachweisbar (Kanaleinsatz).

Die Bereitstellung der für diese Prozesse erforderlichen freien Ladungsträger (Elektronen) erfolgt durch Injektionsmechanismen (Richardson-Schottky und Fowler-Nordheim), ggf. auch durch eine Aktivierung im Isolierstoffvolumen selbst (Poole-Frenkel-Effekt). Charakteristisch für die unterschiedlichen Berechnungsgleichungen ist eine gleiche prinzipielle Abhängigkeit der Injektionsstromdichte von der Feldstärke, der Temperatur und der Metall-Isolierstoff-Austrittsarbeit. Allerdings sind diese Gleichungen nur als Näherungen zu betrachten, da die speziellen Randbedingungen an der Metall-Polymer-Grenzfläche in der Praxis nicht exakt erfüllt werden können. So können durch die Oberflächenrauheit der HS-Elektroden Hohlräume im Submikrometerbereich in der Grenzfläche entstehen, in denen äußerst intensitätsschwache Teilentladungen zünden, die mit TE-Messsystemen nicht nachweisbar sind aber den Initialaufbruch sowie den Kanaleinsatz erheblich beeinflussen [30], [31].

Unter der Annahme, dass die Elektrodenanordnung durch ein Rotationshyperboloid über einer Ebene mit unendlicher Ausdehnung angenähert werden kann, ist eine vollständige Beschreibung der Elektrodenanordnung durch den Spitzenradius r_{sp} und den Abstand Spitze-Gegenelektrode (Schlagweite) a möglich [33]. Die vor der Nadelspitze herrschende Höchstfeldstärke $\hat{E}_{max}$ kann dann für $d \gg r_{sp}$ mit der Gleichung (8)¹⁹ berechnet werden.

¹⁹ Eine Berechnung kann auch unter Verwendung des Schwaigerschen Ausnutzungsfaktors (siehe Fußnote 16) erfolgen.

$$\hat{E}_{max} = \frac{2 \cdot \hat{U}}{r_{Sp} \cdot \ln(1 + 4 \cdot \frac{a}{r_{Sp}})} \left[\frac{\text{kV}}{\text{mm}} \right] \quad (8)$$

mit: $\hat{U}$: Scheitelwert der Spannung bei TE-Beginn [kV]
 r_{Sp} : Spitzenradius [mm]
 a : Entfernung Nadelspitze-Gegenelektrode [mm] (Schlagweite).

Der lineare Zusammenhang zwischen der Feldstärke und der Spannung sowie die Abhängigkeit von der Elektrodengeometrie gelten nur, wenn keine Ladungsträgerinjektion erfolgt. Bei Überschreitung der dafür ausschlaggebenden Feldstärke (threshold value) wird die Feldverteilung um die Nadelspitze durch ausbildende Raumladungen modifiziert und es ist eine numerische Feldberechnung erforderlich.

Obwohl Ergebnisse von Berechnungen, insbesondere für die sehr kleinen Spitzenradien um 1 μm , zu Feldstärken im Bereich der Durchschlagfeldstärke polymerer Isolierstoffe führen können, wird diese Gleichung für Abschätzungen häufig verwendet [6].

2.5 Abschätzung zur Größenordnung der zu erfassenden Signale

Die nachfolgende Abschätzung soll die Größenordnungen der zu erfassenden optischen Signale aus Entladungen verdeutlichen. Liegt das optische Strahlungsspektrum bei Elektrolumineszenzerscheinungen im Wellenlängenbereich des Lichts von ca. 300 nm bis 800 nm, wie Messungen unter Verwendung des Isolierstoffes Polyethylen zeigen, so wird ein Lichtstrom in der Größenordnung von 10^{-9} bis 10^{-13} Lumen beobachtet [33]. Setzt man an, dass ein Lumen ca. $4 \cdot 10^{15}$ Photonen/s mit einer Wellenlänge von 550 nm entspricht, so werden bei Elektrolumineszenzprozessen nur etwa 10^2 bis 10^7 Photonen/s emittiert. Die Energie eines Photons, die wegen $W=h \cdot \nu$ nur von der Frequenz abhängig ist, beträgt bei der genannten Wellenlänge ca. $3,6 \cdot 10^{-17}$ J, das heißt die emittierte Energie liegt im Bereich von $3,6 \cdot 10^{-15}$ Ws bis $3,6 \cdot 10^{-10}$ Ws. Die durch Teilentladungen emittierten Energien sind zwar deutlich größer, trotzdem erfordert ein zuverlässiger Nachweis möglichst empfindliche sensorische Elemente in Verbindung mit dem optischen Messsystem.

2.6 Eigenschaften von Silikonelastomeren für Anlagen der Hochspannungstechnik

Silikonelastomere bieten eine vorteilhafte Kombination von elektrischen, mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften, die sie zu einem bevorzugten Werkstoff für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik machen. Sie weisen gummielastische Eigenschaften auf, die für einen Einsatz in Hochspannungsbau-elementen wegen der im Betrieb auftretenden Dehnungen durch Temperaturänderungen und Lastwechsel unbedingt erforderlich sind. Dies betrifft Garnituren, Umhüllungen für Verbundisolatoren und Überspannungsableiter. Silikonelastomere werden beispielsweise in Garnituren für Kabelanlagen bis zu den derzeit höchsten Betriebsspannungen von 500 kV eingesetzt. Der Vorteil der aus Silikonelastomeren hergestellten Feldsteuerelemente besteht darin, dass sie nicht am Montageort aus mehreren Teilen und in mehreren Arbeitsgängen angefertigt werden müssen, sondern industriell mit gleichbleibend hohem Qualitätsstandard produziert und geprüft werden können.

Silikonelastomere nehmen eine Mittelstellung zwischen rein anorganischen Verbindungen (Glas, Keramik) und organischen Polymeren (Polyethylen, PVC) ein und besitzen im Vergleich zum Polyethylen eine amorphe Struktur. Sie weisen als charakteristisches

Merkmal eine Polymerkette aus Silizium- und Sauerstoffatomen (Siloxan-Kette) auf, wobei die nicht durch Sauerstoff gebundenen Valenzen der Si-Atome durch organische Reste abgesättigt sind [68].

Die hohe Bindungsenergie der Si-O-Bindung von 444 kJ/mol gegenüber der organischen Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung (C-C-Bindung) von 348 kJ/mol ist verantwortlich für eine Reihe von vorteilhaften Eigenschaften, unter anderem für die hohe Temperatur- und Strahlenbeständigkeit [86].

Die mechanische Festigkeit, die maßgeblich von den Kräften zwischen den Makromolekülen bestimmt wird, ist innerhalb der Siloxan-Ketten infolge der hohen Bindungsenergie relativ groß. Die Polymerketten sind regellos ineinander verknäult. Die für ein dreidimensionales Netzwerk erforderlichen Querverbindungen zwischen den Kettenmolekülen werden beim Vernetzungsprozess erzeugt. Die hohe Dehnbarkeit dieser Stoffe (gummielastisches Verhalten) ist an die innere Beweglichkeit der Ketten gebunden²⁰, wobei die Gesamtstruktur bei der Dehnung erhalten bleibt. Die auch bei höheren Temperaturen (zulässige Dauerbetriebstemperatur 90°C) erforderliche langzeitstabile Elastizität des Materials wird durch aktive Feststoffe wie disperse Kieselsäuren und geringe Anteile von anorganisch inaktiven Füllstoffen wie Quarzmehl erreicht [68]. Die dadurch hervorgerufene Erhöhung der Zugfestigkeit verringert die Neigung zur Rissbildung bei mechanischer Beanspruchung. Die Härte nimmt kaum zu, so dass die Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche der vorbereiteten VPE-Kabelader im Garniturenbereich weiterhin gut ausgefüllt werden.

Die aus den zwei Komponenten Harz und Vernetzer (A- und B-Komponente) bestehenden Silikonelastomere werden in getrennten Abpackungen geliefert. Vor der Verarbeitung werden die beiden Komponenten nach Herstellervorgaben vermischt und anschließend vernetzt. Insbesondere die Zugabe von Farbpigmenten hat zur Konsequenz, dass diese Materialtypen lichtundurchlässig sind (Beispiel: Powersil 600A/B). Neuere Materialtypen weisen bereits eine transluzente Struktur auf (Beispiel: LR 3002/35 A/B in Tabelle 2). Eine Auswahl von kommerziell verfügbaren Silikonelastomeren mit ihren Eigenschaften, die in Garnituren von Hochspannungskabelanlagen eingesetzt werden, enthält Tabelle 2. Garniturenhersteller verwenden auch Materialien nach eigenen Rezepturen.

Powersil 600 ist ein raumtemperaturvernetzendes, gießfähiges RTV-2-Material, dessen beide Komponenten A und B unmittelbar vor dem Gießvorgang entsprechend Anwendungsvorschrift vermischt werden und dadurch vernetzten. Es wird in Kabelgarnituren und Isolatoren eingesetzt.

Das Material LR 3002/35 ist ein Flüssigsilikontyp, das gleichfalls vor der Verarbeitung vermischt wird und bei höheren Temperaturen (110 °C bis 200 °C) vernetzt. Es wird vorwiegend im Spritzgussverfahren verarbeitet, ist relativ zähflüssig und wird ebenfalls in Garnituren und Isolatoren eingesetzt. Die in der Tabelle 2 angegebene Durchschlagfestigkeit von 23 kV/mm ist relativ niedrig und im Wesentlichen eine Konsequenz des Prüfverfahrens. Bestimmend sind die Nebendurchschläge infolge auftretender Teilentladungen in der sich im Silikonöl befindlichen Platte-Platte-Elektrodenkonfiguration, so dass diese Werte nur als Orientierung zu betrachten sind [87]. Neuere Messungen an Silikonplatten von 3 mm Dicke und mit eingebetteten Elektroden entsprechend IEC 60423:1 ergeben Werte zwischen 23 kV/mm bis 100 kV/mm [93].

²⁰ Das System darf also nicht in einer Form vorliegen, die die innere Beweglichkeit verhindert, wie z.B. im kristallinen Zustand.

Tabelle 2 Eigenschaften vernetzter Silikonelastomere für Kabelgarnituren aus Datenblättern der Firma Wacker GmbH [75], [76]

Eigenschaft	Prüfmethode	Einheit	Powersil 600A/B	LR 3002/35 A/B
Farbe			hellgrau	farblos
Dichte	ISO 2781 DIN 53479A	g/cm ³	1,13	1,09
Härte (Shore A) ²¹	ISO 868 DIN 53505	/	25	33
Reißfestigkeit	ISO 37 DIN 53504	N/mm ²	5,5	7,0
Reißdehnung	ISO 37 DIN 53504	% ²²	450	450
Dielektrizitätszahl ϵ_r	IEC 250 DIN VDE0303	/	2,9	3,0 (IEC 60250)
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$	IEC 250 DIN VDE0303	/	0,004	0,005 (IEC 60250)
Spez. Durchgangswiderstand	IEC 93 DIN VDE 0303	$\Omega \cdot \text{cm}$	10^{15}	10^{15} (IEC 60093)
Durchschlagfestigkeit 1mm Platte	DIN VDE 0303	kV/mm	23	23 (IEC 60243)

²¹ Unter Shorehärte nach DIN 53505 wird der Widerstand gegen das Eindringen eines Körpers bestimmter Form unter definierter Federkraft verstanden. Die Härteskala hat 0 bis 100 Härteeinheiten. Mit einem Härteprüfgerät nach Shore A kann die Härte im Bereich von 10 - 90 Shore A bestimmt werden.

²² Die Reißdehnung, auch Bruchdehnung genannt, ist das Verhältnis der Längenänderung zur Ausgangslänge nach dem Bruch des Prüfkörpers. Sie drückt die Fähigkeit eines Werkstoffes aus, Formänderungen ohne Rissbildung zu widerstehen. Die Reißdehnung wird nach der DIN 53504 im Zugversuch ermittelt.

3 Prüfkörper für die simultane optische und elektrische Erfassung von Entladungsprozessen

Für die in dieser Arbeit durchzuführenden vergleichenden Untersuchungen wurden Modellprüfkörper verwendet. Bei der Übertragung der Ergebnisse auf große Volumina ist zu beachten, dass ein größeres Volumen mehr Fehlstellen enthält und die Verarbeitungstechnologie unterschiedliche Eigenschaften hervorrufen kann. Folgende Vorgaben für die geometrische Gestaltung und Abmessungen der Prüfkörper waren vorgegeben:

- Abmessungen und Signalübertragungswege zu den verwendeten Messaufnehmern orientieren sich an realen Garniturenabmessungen.
- Die Elektrodenkonfigurationen ermöglichen Nachbildungen von in der Praxis auftretenden Fehlstellen mit einer ausreichend langen Zerstörungsphase für die optische Signalerfassung und sind so bemessen, dass Zufallsergebnisse vermieden werden.
- Die ausgewählten Abmessungen gewährleisten eine ausreichende mechanische Festigkeit und Handhabbarkeit der Prüfkörper. Es dürfen keine Materialablösungen von den Elektroden infolge der Handhabung auftreten.

Durch Beschränkung auf wichtige praxisrelevante Fehlstellen sowie repräsentative transparente Silikonelastomertypen (siehe Abschnitt 2.6) und die Festlegung auf bestimmte Beanspruchungsparameter wird der Umfang eingegrenzt, ohne die erforderlichen optischen Messungen und die Vorgaben aus der Praxis unzulässig einzuschränken.

Die im Abschnitt 2.2 aufgeführten Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Anordnungen aus hochpolymeren Isolierstoffen bei Spannungsbeanspruchung zeigen, dass insbesondere Strukturunregelmäßigkeiten im Isolierstoff die Ergebnisse deutlich beeinflussen. Daher wirken sich Veränderungen in der Materialstruktur, wie sie durch unterschiedliche Verfahren bei der Prüfkörperherstellung und durch mechanische Beanspruchungen verursacht werden können, empfindlich auf diese Prozesse aus. Deshalb sind das Einhalten konstanter Bedingungen bei der Prüfkörperherstellung und eine sorgfältige Handhabung bei den Messungen unbedingt erforderlich.

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über charakteristische Eigenschaften der verwendeten Silikonelastomere sowie Angaben zum Prüfkörperaufbau und zur Prüfkörperherstellung.

3.1 Verwendete Silikonmaterialien

Für die Herstellung der in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper wurden hauptsächlich zwei handelsübliche transparente Silikonmaterialtypen verwendet, die bisher nicht in Anlagen der Hochspannungstechnik eingesetzt und hochspannungstechnisch untersucht wurden. Feldsteuerelemente aus transparenten Silikonelastomeren werden derzeit in Hochspannungsgarnituren nicht eingesetzt. Die von den Garniturenherstellern eingesetzten transparenten/transluzenten Silikontypen sind nicht verfügbar. Eine Übersicht der Eigenschaften der verwendeten Silikonmaterialtypen enthält Tabelle 3; der Typ RT604 wurde vorwiegend für optische und spezielle Untersuchungen verwendet.

Während sich die Durchschlagfestigkeiten nicht von den Werten für die in Garnituren eingesetzten Materialtypen unterscheiden (Tabelle 3), erreicht die Reißdehnung der transparenten Typen nur ca. 50 % dieser Materialien.

Tabelle 3: Ausgewählte Eigenschaften von transparenten Silikonwerkstoffen zur Prüfkörperherstellung [75], [76]

Eigenschaft	Prüfmethode	Einheit	RT 604	LR 7665	ESA 7250
Farbe			farblos, transparent	farblos, transparent	farblos
Dichte bei 23°C	ISO 2781	g/cm ³	0,96	1,02	1,02
Härte Shore A	ISO 868	/	25	45	50
Durchschlagfestigkeit, 1 mm Platte	VDE 0303, T22, IEC 243	kV/mm	23	23	20
Spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 93	Ω cm	10 ¹⁶	5 x 10 ¹⁶	1 x 10 ¹⁵
Dielektrizitätszahl ϵ_r	VDE 0303, T4, 50Hz	/	2,7	3,1	2,7 (1 kHz)
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$	VDE 0303, T4, 50Hz	/	20 x 10 ⁻⁴	30 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻³ (1 kHz)
Reißfestigkeit	DIN 50451	N/mm ²	/	5,8	
Reißdehnung	DIN 50451	%	/	230	

Die für eine sensitive optische Strahlungserfassung ausgewählten Silikonmaterialien sollten keine Absorptionsbanden im optischen Spektrum der Teilentladungen und einen möglichst hohen Transmissionsgrad aufweisen. Unter Absorption wird die Umwandlung von Strahlungsenergie in eine andere Energieform (Wärme) verstanden.

Messungen zur Ermittlung der Intensitätsabnahme optischer Strahlung beim Durchgang durch Materialien erfolgten in der Regel an Proben mit geringer Schichtdicke. Es ergibt sich eine exponentielle Intensitätsabnahme mit der Schichtdicke. Der Absorptionskoeffizient ist eine von der Wellenlänge abhängige Materialkonstante (Lambert-Beer'sches Gesetz). Für die in den nachfolgenden Untersuchungen verwendeten Silikone wurde der wellenlängenabhängige Transmissionsgrad²³ gemessen, da keine ausreichenden Angaben verfügbar waren.

Die zusammengefassten Ergebnisse enthält Abbildung 8. Die Silikontypen RT 604, LR 7665 und auch RT 601 zeigen einen hohen spektralen Transmissionsgrad im Wellenlängenbereich 300 nm bis ca. 1000 nm. Die Transmission steigt ab 300 nm steil an und erreicht ab 460 nm hohe Transmissionswerte in vergleichbarer Größenordnung (>ca. 85 %). Absorptionsbanden wurden im untersuchten Wellenlängenbereich nicht festgestellt. angegeben.

Die erhaltenen Ergebnisse sind mit Ergebnissen des Materialherstellers Wacker AG [75] für den Typ RT 604 vergleichbar.

Analoge Ergebnisse ergaben Messungen des Spektrums von ELASTOSIL LR 7665 bei einer Materialschichtdicke von 25 mm, die in Abbildung 9 gezeigt sind [84]. Die Werte liegen damit nur um maximal 15 % niedriger als die Werte von Luft und in Gasen, die

²³ Die Messungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordhausen, FB Ingenieurwissenschaften.

eine nahezu 100 %ige Transparenz aufweisen. Das ermöglicht ggf. auch eine Erfassung der Signale aus größerer Entfernung.

Im Vergleich dazu weist PE im optischen Bereich (380 nm bis 780 nm) infolge seines amorph-kristallinen Aufbaus eine sehr starke Lichtstreuung auf [33]. Der Transmissionsgrad für eine Schicht von 3 mm beträgt nur ca. 1,5 %.

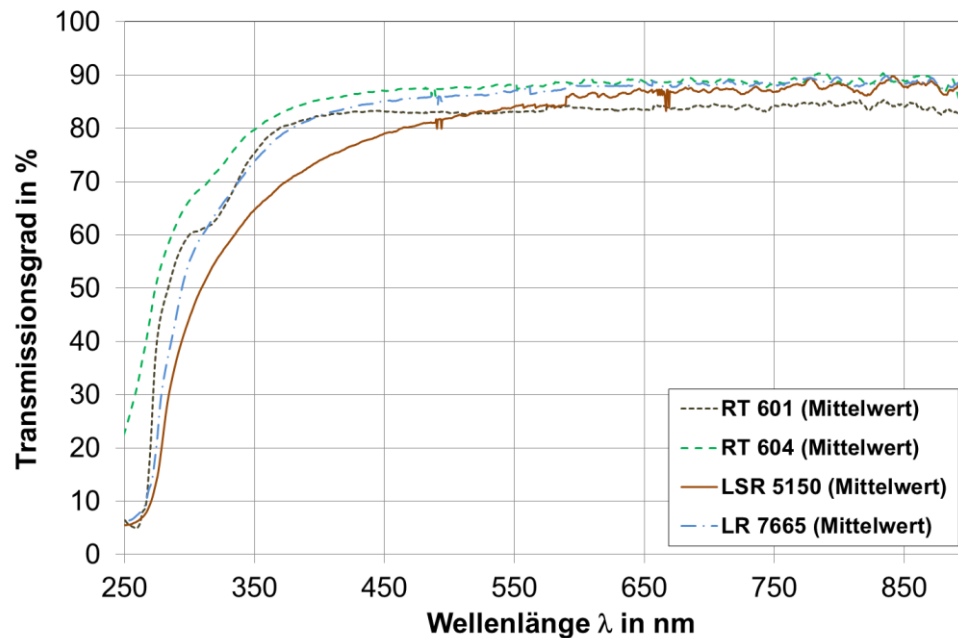


Abbildung 8: Transmissionsspektren (Mittelwerte) – Silikone Elastosil RT 604, Elastosil RT 601, Elastosil LR 7665 und Silopren LSR 5150

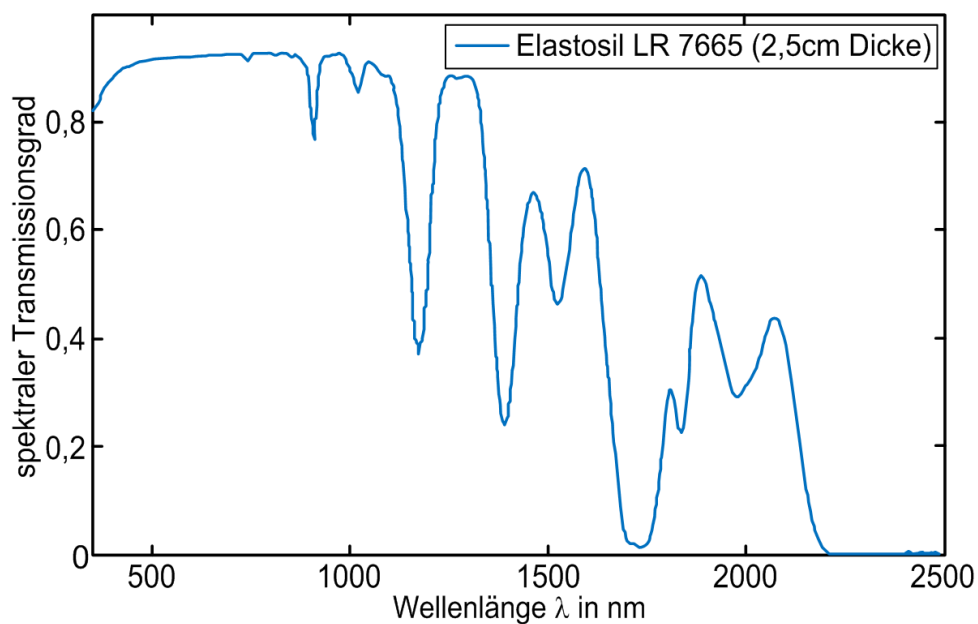


Abbildung 9: Spektraler Transmissionsgrad Elastosil LR 7665 (Hannig [84])

3.2 Prüfkörperübersicht

Die unterschiedlich gestalteten Prüfkörper enthielten jeweils Elektrodenanordnungen, die eine stark inhomogene Feldverteilung im Isolierstoffvolumen erzeugen. Dadurch waren Untersuchungen im homogenen bzw. schwach inhomogenen Feld ausgeschlossen.

Die festgelegten Prüfkörpergrundformen jeder Gruppe besaßen nachfolgend genannte geometrische Abmessungen:

1. kubische Form mit Spitze-Platte-Elektrodenanordnung
Grundfläche: 62 mm x 62 mm
Gesamthöhe: 65 mm (ohne HS-Elektrode)
2. zylindrische Form mit Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung
Zylinderdurchmesser: 50 mm
Gesamthöhe: 65 mm (ohne HS-Elektrode)

Die Abmessungen der kubischen und zylindrischen Prüfkörper berücksichtigten mit 25 mm bis 30 mm für den Abstand möglicher innerer Entladungsquellen zu den sich im Feldbereich befindlichen optischen Messaufnehmern reale Abstände in Feldsteuerelementen von Garnituren einschließlich Ausbreitungswege für die emittierten Lichtimpulse.

Die Prüfkörperhöhe von 65 mm gewährleistete eine stabile und handhabbare Einbettung der jeweiligen Hochspannungselektrode in das Silikonmaterial und verhindert gleichzeitig Gleitentladungen und Außenüberschläge.

In Voruntersuchungen wurden auch zylindrische Prüfkörper mit Durchmessern von 8 cm und 12 cm hergestellt und die optische Signalerfassung mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern im Abstand von 40 mm und 60 mm von den an der Spitzenelektrode erzeugten Entladungen untersucht [81]. Bei beiden Abständen war eine Detektion prinzipiell möglich.

Mit den Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen wurden die eingangs genannten unterscheidbaren Zerstörungsphasen polymerer Isolieranordnungen erreicht. Weiterhin wurde das Entladungsgeschehen auf ein sehr kleines Isoliervolumen um die Spitze der HS-Elektrode, insbesondere bei Beanspruchungsbeginn, konzentriert.

Innerhalb eines ansonsten intakten Dielektrikums von Stresskonen können gasgefüllte Hohlräume (voids) vorhanden sein, die infolge des anliegenden elektrischen Feldes durchschlagen. Prinzipiell wären diese Schädigungen ebenfalls zu untersuchen [6]. Durch eine TE-Messung als Bestandteil von Stückprüfungen werden fehlerhafte Produkte aber vor dem Einsatz in Kabelanlagen ausgesondert, so dass diese Fehlerart hier nicht weiter betrachtet wurde [13]. Auf die Nachbildung nichtleitfähiger Fehlstellen wurde ebenfalls verzichtet. Sie haben in der Regel ein deutlich geringeres Schädigungspotential.

3.3 Prüfkörper mit Nadel-Platte-Elektrodenanordnung

Leitende Fehlstellen in Stresskonen sowie Muffenkörpern von Hochspannungsgarnituren sind wegen der davon ausgehenden Schädigungsstrukturen (electrical treeing) kritische Fehlstellen. Die Nachbildung entsprechender Fehlstellen erfolgte mit einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung, wobei als Spitze Nadeln verwendet wurden.

3.3.1 Prüfkörperaufbau

Die Elektrodenanordnung wurde mit jeweils einer im Silikonmaterial hohlraumfrei eingegossenen Nadel auf Hochspannungspotential und einer auf der Prüfkörperober-

seite aufgelegten und kontaktierten Erdelektrode realisiert. Zur Herstellung der Erdelektrode wurde Aluminium-Band von 50 mm Breite verwendet und die für zylindrische Prüfkörper erforderliche Kontur nachgeschnitten. Die Kontaktierung erfolgte mit Silikonfett, die Abdeckung mit einem gewichtsbelasteten Rogowski-Profil aus Aluminium (siehe Abbildung 35).

Die Hochspannungselektrode bestand aus einem zylinderförmigen Messingstab (Durchmesser 14 mm und 15,5 mm; Länge 385 mm), der an einer Seite eine Aufnahme zum Einlöten oder Einschrauben der Nadel besaß (Abbildung 10). Die andere Seite des Messingstabs verfügte über ein Gewinde M10, das ein senkrechtes Einsetzen des Prüfkörpers in eine spezielle Aufnahme des jeweiligen Messkreises ermöglichte (siehe Abbildung 35).

Vorteilhaft wären industriell mit hoher Präzision gefertigte Treeing-Nadeln²⁴, die Radius-toleranzen im Bereich $\pm 0,5 \mu\text{m}$ und einen Spitzenwinkel von 30° aufweisen. Diese waren nicht verfügbar. Eine Eigenherstellung von Nadeln war nach vorliegenden Erfahrungen zu aufwendig. Verwendet wurden daher industriell hergestellte Akupunktur-nadeln aus Edelstahl deren Spitzenbereich nicht angeschliffen war und zu denen nur der Schaftdurchmesser der Nadeln angegeben war. Das erforderte ein Ausmessen der Nadelspitzen vor der weiteren Verwendung.



Abbildung 10: Messingstab mit Aufnahme zum Einlöten und Einschrauben der Nadeln

Das Ausmessen der Nadeln wurde in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung durchgeführt. Dazu wurde ein Mikroskop mit 200 facher Vergrößerung verwendet. Mit einer am Mikroskop angebrachten Digitalkamera wurden die Bilder der Nadelspitze aufgenommen, auf einen Computerbildschirm projiziert und mittels der implementierten Software maßstabsgetreu ausgemessen. Ein Beispiel einer vermessenen Nadel zeigt Abbildung 11.

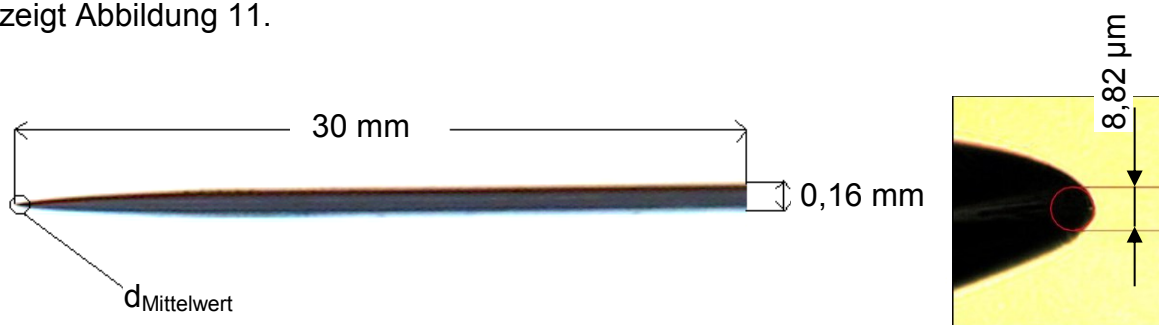


Abbildung 11: Abmessungen einer Akupunktur-nadel

Die Nadelabmessungen wurden auch für die Bezeichnung der Prüfkörper verwendet. Die in den Prüfkörpern vorwiegend eingesetzten Akupunktur-nadeln mit der Bezeichnung B besitzen einen Schaftdurchmesser von 0,160 mm und eine Schaftlänge von 30 mm. Die Zahl hinter den Buchstaben (B) kennzeichnet die Nummer der verwendeten Nadel.

²⁴ Hersteller: OGURA Jewel Industry, Japan

Die geometrische Charakterisierung der Nadelspitze erfolgte im Allgemeinen durch zweimaliges Ausmessen der Radien der Nadelspitze. Nach dem ersten Vermessen wurde die Nadel um 90° gedreht und der Radius erneut gemessen.

Es zeigte sich eine durch den Herstellungsprozess bedingte Abflachung im Spitzenbereich auf einer Seite, die zu deutlichen Abweichungen von der Rotationshyperboloidkontur in diesem Bereich führte. Diese können für die größeren Radien Größenordnungen $2\text{ }\mu\text{m}$ bis $3\text{ }\mu\text{m}$ erreichen. Die Verwendung des errechneten mittleren Wertes für die Spitzenradien für die Berechnung der Feldstärke vor der Nadelspitze in Gleichung (8) ergab daher nur Näherungswerte.

Berechnungen zur Höchstfeldstärke an der Nadelspitze und der Feldstärkeverteilung im Isolierstoff für Nadel-Platte-Anordnungen mit vorgegeben Parametern (Spitzenradius, Spitzenwinkel, Abstand zur Elektrode) zeigen, dass Abweichungen vom Spitzenradius die größten Auswirkungen auf die maximale Feldstärke und deren Feldstärkeverlauf haben. Abweichungen des Elektrodenabstands sind von untergeordneter Bedeutung [32]. Der Spitzenwinkel hat ebenfalls einen Einfluss. Analoge Abschätzungen mittels numerischer Rechenverfahren (Ersatzladungsverfahren) sind sehr aufwendig und nur bedingt aussagefähig, da die Ausbildung von Raumladungen ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Daher wurden die gemessenen TE-Einsetzspannungen von Prüfkörpern aus den Gruppen mit unterschiedlichen Nadelspitzenradien mittels Weibull-Statistik ausgewertet und als Kriterium für die Güte der Verteilung ein Korrelationskoeffizient entsprechend der Prüfkörperanzahl größer als der kritische Korrelationskoeffizient nach IEC 62539: 2007; Fig. A.8 festgelegt.

Berechnungen unter Verwendung numerischer Verfahren für industriell gefertigte Nadeln ergaben für identische geometrische Parameter (Spitzenradius $5\text{ }\mu\text{m}$, Spitzenwinkel 10° , 20° und 30° , Elektrodenabstand 5 mm) Abweichungen in der Höchstfeldstärke an der Nadelspitze von $\leq 10\%$ im Vergleich zu Ergebnissen, die mit Gleichung (8) errechnet wurden [32].

Die Prüfkörpergrundformen sind schematisch in der Abbildung 12 gezeigt.

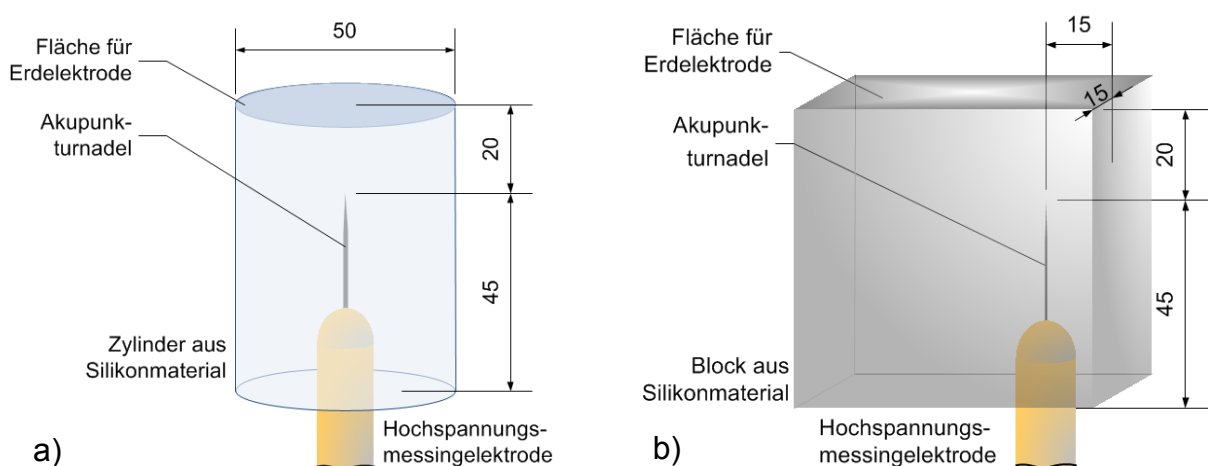


Abbildung 12: Prüfkörpergrundformen unter Verwendung von Akupunkturadeln (schematisch);
 a: zylindrisch und
 b: kubisch

3.3.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung von blasenfreien Prüfkörpern war das Ergebnis umfangreicher Voruntersuchungen und erfolgte unter Berücksichtigung der Herstellerangaben zur Verarbeitung der eingesetzten Siliconmaterialien.

Vor dem eigentlichen Herstellungsvorgang wurde zunächst:

- die Nadel in die Bohrung des Messingstabes (Abbildung 10) eingelötet oder eingeschraubt. Danach wurde die Elektrode mit Isopropanol gereinigt.
- die jeweilige Gießform vorbereitet, wobei für kubische Prüfkörper verschiedene zusammensetzbare Formen mit den Innenmaßen 62 mm x 62 mm x 80 mm verwendet wurden (siehe zum Beispiel Abbildung 13). Die zylindrischen Prüfkörper wurden mit zylindrischen Formen (Abbildung 14) mit einem Innendurchmesser von 50 mm und einer Höhe von 65 mm angefertigt. Durch das Auskleiden der Innenflächen mit Hostafan®-Folien wurde eine verbesserte optische Güte der Mantelflächen erreicht.

Nach Festlegung der benötigten Gesamtmenge für den Gießvorgang erfolgte das Wiegen der A- und B-Komponenten im vorgegebenen Mischungsverhältnis mittels Präzisionswaage (Mischungsverhältnisse 1:1, 9:1 und 10:1, abhängig vom Materialtyp).

Danach wurden die beiden Komponenten möglichst homogen verrührt und mittels Evakuieren der größte Teil der eingemischten Luft entfernt. Die Dauer für das Evakuieren wurde nach Vorversuchen bestimmt und beträgt bis zu 60 min bei 300 mbar. Nach Abschluss des Evakuierens war das Silikongemisch größtenteils blasenfrei.

Anschließend wurde die vorbereitete Hochspannungselektrode von oben in die Gießform eingeführt und durch verstellbare Haltevorrichtungen positioniert (Abbildung 14). Der Abstand der Spitze der Hochspannungselektrode zum Boden der Form wurde exakt auf 20 mm eingestellt und die Spitze der Hochspannungselektrode in der Formmitte oder nach Vorgabe exzentrisch in der Form positioniert (kubische Prüfkörperform).



Abbildung 13: Gussform zur Herstellung eines kubischen Prüfkörper

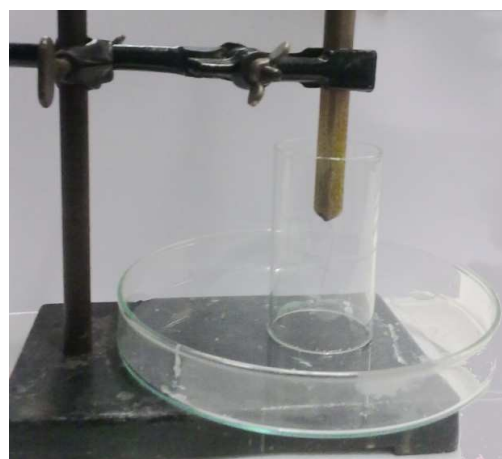


Abbildung 14: Elektrodenhalter mit zylindrischer Gussform aus Glas

Danach wurde das evakuierte Silikongemisch vorsichtig in die Gießform bis zur vorgegebenen Höhe von ca. 65 mm eingefüllt, so dass der Messingstab als Teil der Hochspannungselektrode ca. 45 mm im Silikon eingebettet war. In Abhängigkeit vom einge-

setzten Silikontyp erfolgte dann die Vernetzung. Die vorwiegend eingesetzten raumtemperaturvernetzenden Typen ESA 7250 A/B und RT 604 A/B benötigen unter Raumtemperaturbedingungen eine Vernetzungszeit von ca. 3 Stunden und sind dann blasenfrei vernetzt, so dass der Prüfkörper entformt werden konnte. Erhöhte Temperaturen (von ca. 60 °C) reduzieren die Zeitdauer auf 2 Stunden, ohne Ablöseerscheinungen des Silikonmaterials an der metallischen Hochspannungselektrode beim langsamen Abkühlvorgang zu verursachen. Nach Abschluss der Vernetzung und Entformung wurden die Prüfkörper nicht getempert. Orientierende Vergleichsmessungen ließen keine Unterschiede bzgl. der elektrischen Festigkeit zwischen getemperten und nicht getemperten Prüfkörpern erkennen, sofern durch den Tempervorgang keine Materialablösung von der Hochspannungselektrode verursacht wurde [68].

3.3.3 Vorbehandlung

Aus der Literaturübersicht (siehe Abschnitt 2.2) ergaben sich drei Gesichtspunkte für die Vorbehandlung der Prüfkörper:

- Durch die Evakuierung, speziell des Bereiches um die Nadelspitze, kann es zu einer Veränderung der Molekülstruktur (Reduzierung von „Leerräumen“) kommen, wodurch sich die TE-Einsetzspannung erhöht.
- Ein steigender Nadelspitzenradius der eingebetteten HS-Elektrode führt zu einem Anstieg der TE-Einsetzspannung und beeinflusst unter Umständen gleichfalls den optischen Signaleinsatz [68], [82].
- Durch Diffusion von Reinstickstoff in das Polymervolumen eines evakuierten Prüfkörper kann der Einfluss des Sauerstoffs auf den Treeeinsatz untersucht werden.

Die Prüfkörper wurden wie folgt vorbehandelt:

Prüfkörpergruppe 1 Laborbedingungen:

Die Prüfkörper wurden nach Herstellung mindestens 14 Tage unter Laborbedingungen gelagert.

Prüfkörpergruppe 2 evakuiert:

Die Prüfkörper wurden nach Herstellung mindestens 14 Tage bei einem Restdruck <50 mbar ($=5 \cdot 10^3$ Pa) evakuiert (Grobvakuum).

Prüfkörpergruppe 3 evakuiert und mit Stickstoffgas beaufschlagt:

Die Prüfkörper wurden nach der Evakuierung mindestens 7 Tage bei Überdruck in Stickstoffgas 5.0 (Reinheit 99,999 %) gelagert.

Zur Abschätzung der erforderlichen Zeitdauer der Vakuumbehandlung wurde als Diffusionskonstante von Luft in Silikonmaterial²⁵ ein Wert von $D=4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ verwendet. Unter Berücksichtigung der kubischen Geometrie des Prüfkörpers folgt aus dem 2. Fickschen Gesetz $x^2/t=2 \cdot D$ für eine Wegstrecke von $x \approx 1 \text{ cm}$ eine Diffusionszeit von $t=3,5$ Stunden, die sich bei der Silikonwandstärke zwischen Nadelspitze und Seitenfläche von $x=1,5 \text{ cm}$ auf ca. 8 Stunden vergrößert. Für zylindrische Prüfkörper mit einer Wegstrecke von 2,5 cm ergibt sich eine Diffusionszeit von 21 Stunden.

Um eine sichere Evakuierung der Körper zu erreichen, wurde eine Zeitdauer von 14 Tagen festgelegt

²⁵ Diffusionskonstante für Stickstoff (N_2) $27 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ und für PE (100% amorph) $41,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ [51].

3.3.4 Verwendete Prüfkörper

Eine Übersicht über die für die Messungen verwendeten kubischen und zylindrischen Prüfkörper, letztere für den Einsatz fluoreszierender Lichtwellenleiter, enthält Tabelle 4. Die Akupunkturnadeln wurden auf Grundlage ihrer ausgemessenen Nadelspitzenradien in drei Gruppen mit mittleren Radien von 1 μm -, 2,5 μm - und 5 μm eingeteilt. Die Prüfkörper wurden aus RHODORSIL ESA 7250 A/B gefertigt, die Akupunkturnadeln konzentrisch in die zylindrischen Prüfkörper eingegossen. Zur Verringerung der optischen Signaldämpfung im Silikonmaterial wurde bei den kubischen Prüfkörpern die Nadel exzentrisch eingegossen. Der Abstand zwischen der Nadelspitze und dem optischen Messaufnehmer betrug dann 15 mm (siehe Abbildung 12).

Tabelle 4: Übersicht der Prüfkörper mit nadelförmiger Spitzenelektrode

Prüfkörpergruppe	Spitzenradiusbereich	Prüfkörperform	Prüfkörperbezeichnung
1	1 μm	kubisch	B 175, B 195, B 157, B 220, B 170 B 308, B 354, B 44
	1 μm	zylindrisch	B 324, B 375
2	1 μm	kubisch	B 259, B 304, B 253, B 307 B 358, B 428, B 394
	1 μm	zylindrisch	B 413, B 361
3	1 μm	kubisch	B 278, B 325, B 263, B 277, B 314
1	2,5 μm	kubisch	B 378, B 366, B 386
	2,5 μm	zylindrisch	B 402, B 395
2	2,5 μm	kubisch	B 383, B 319
	2,5 μm	zylindrisch	B 385, B 425
1	5 μm	kubisch	B 429, B 390
	5 μm	zylindrisch	B 419, B 417
2	5 μm	kubisch	B 318, B 373, B 397
	5 μm	zylindrisch	B 427, B 388

3.4 Prüfkörper mit Streifenelektrode-Platte Elektrodenanordnung

Fehlstellen auf Oberflächen von Feldsteuerelementen aus leitend eingestelltem Silikonmaterial (Deflektormaterial) haben für die Betriebszuverlässigkeit von Hochspannungsgarnituren eine große Bedeutung. Solche Fehlstellen können in Form von „Pickeln“ (Protrusions) und Gießgraten auftreten. Sie wurden durch streifenförmige Hochspannungselektroden aus Deflektormaterial mit angeschnittener Spitze nachgebildet

3.4.1 Prüfkörperaufbau

Die streifenförmigen Spitzenelektroden aus Deflektormaterial (Streifen mit angeschnittener Spitze) wurden jeweils in Messingstäbe (Abbildung 10) eingesetzt und hohlraumfrei eingegossen. Die Gegenelektrode entsprach der Elektrode nach Abschnitt 3.3.

Das dafür verwendete Silikonmaterial mit definierter Leitfähigkeit war Powersil 440 der Fa. Wacker AG, das in der Praxis als Deflektormaterial zur geometrisch-kapazitiven Feldsteuerung in Stresskonen eingesetzt wird. Dieses Material besitzt nach Hersteller-

angaben einen Volumenwiderstand von $40 \Omega \cdot \text{cm}$ (gemessen nach VDE 303 [88])²⁶. Die geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 15 angegeben.

Mit einem Mikrotom wurde ein Schichtpräparat von $400 \mu\text{m}$ Dicke hergestellt und anschließend mit einer Rasierklinge in 2 mm breite Streifen geschnitten. Die Maße wurden mit einer Messschraube überprüft. Der Winkel der Nadelspitze sollte 30° betragen und wurde mit einem Skalpell zugeschnitten. Zur Kontrolle des Spitzenwinkels wurde ein Mikroskop benutzt. Eine spezielle Computersoftware ermöglichte das Darstellen und Ausmessen der Streifenelektrode am Rechner. Die Streifenelektrode wurde in analoger Weise in den Messingstab (Abbildung 10) eingesetzt und verschraubt.

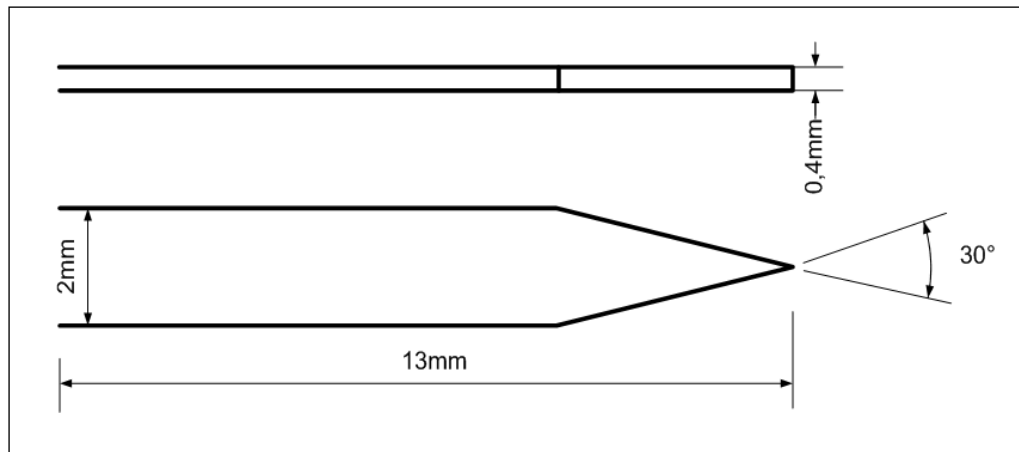


Abbildung 15: Abmessungen der streifenförmigen Elektrodenspitzen (Deflektormaterial)

Diese Streifenelektroden wurden auch in einer modifizierten Form verwendet. Dabei wurde nach Anfertigung deren Spitzenbereich mit einer Leitsilberlösung überzogen. Nach dem Trocknen weist der Spitzenbereich eine feste metallische Oberfläche auf. Die vollständige und gleichmäßige Benetzung der Silikonoberfläche wurde vor der Verwendung mit einem Mikroskop überprüft. Die mit diesen Streifenelektroden hergestellten Prüfkörper mit gleichen geometrischen Abmessungen wurden für Vergleichszwecke verwendet, obwohl die komplexe Herstellung die Ergebnisstreuung unter Umständen deutlich beeinflussen kann. Durch den Leitsilberüberzug vergrößern sich die Abmessungen des Spitzenbereiches um die doppelte Schichtdicke des metallischen Überzugs um ca. $2 \mu\text{m}$.

Die Prüfkörpergrundformen sind schematisch in den Abbildung 16 gezeigt.

Weitere Einzelheiten zur Prüfkörperherstellung sind im Abschnitt 3.3.2 enthalten.

²⁶ Von Herstellern wird ein Bereich des Volumenwiderstandes von 1Ω bis $100 \Omega \cdot \text{cm}$ genannt.

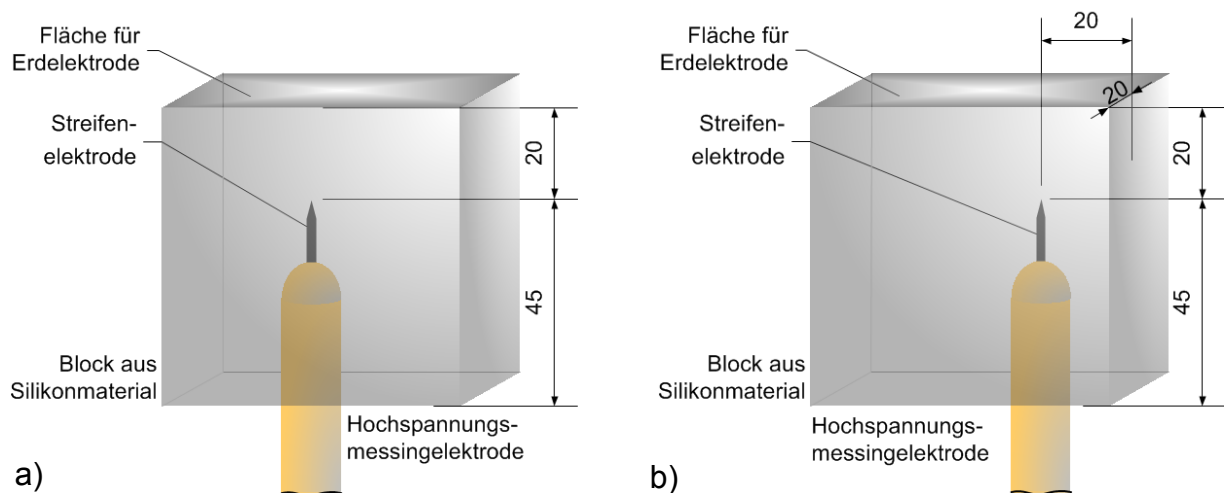


Abbildung 16: Kubische Prüfkörpergrundform unter Verwendung von Streifenelektroden (schematisch) mit;
a: konzentrischer und
b: exzentrischer Anordnung der Hochspannungselektrode

3.4.2 Verwendete Prüfkörper

Die Kennzeichnung wurde nach der eingesetzten Hochspannungselektrode und der Prüfkörpernummer vorgenommen. Die Bezeichnung „DFL“ bedeutet, dass die Elektrode aus einem leitend eingestellten Silikonmaterial (Deflektormaterial) gefertigt wurde, und die Bezeichnung „HYB“ weist auf eine Elektrode mit metallisiertem Spitzenbereich (Hybridelektrode) hin. Eine Übersicht über die verwendeten Prüfkörper enthalten die Tabellen 5 und 6.

Tabelle 5: Übersicht der Prüfkörper mit streifenförmiger Spitzenelektrode; Elektrode aus einem leitend eingestellten Silikonmaterial

Prüfkörpergruppe	Bezeichnung	Merkmale, Abmessungen, Form
	Grundform:	- HS-Elektrode aus Deflektormaterial - Abstand Spitze-Erdelektrode: 20 mm
A	DFL 1 DFL 2 DFL 3 DFL 4 DFL 5	- kubische Form mit Außenabmessungen 62 mmx62 mm; Höhe 64 mm - Streifenelektrode exzentrisch eingebettet (Wandabstand: 20 mm)
B	DFL 10 DFL 11 DFL 12 DFL 13 DFL 14	- kubische Form mit Außenabmessungen 62 mmx62 mm; Höhe 64 mm - Streifenelektrode konzentrisch eingebettet
C	DFL 6 DFL 7	- zylindrische Form mit Außendurchmesser 50 mm - Streifenelektrode konzentrisch eingebettet

Tabelle 6: Übersicht der Prüfkörper mit streifenförmiger Spitzenelektrode; Elektrode aus einem leitend eingestellten Silikonmaterial mit metallisiertem Spitzenbereich

Prüfkörper- gruppe	Bezeichnung	Merkmale, Abmessungen, Form
	Grundform:	- HS-Elektrode aus Deflektormaterial mit metallisierter Spitze - kubische Form mit Außenabmessungen 62 mm x 62 mm; Höhe 64 mm - Abstand Spitze-Erdelektrode: 20 mm
A	HYB 1 HYB 2 HYB 3 HYB 4 HYB 5	- Streifenelektrode exzentrisch eingebettet (Wandabstand: 20 mm)
B	HYB 11 HYB 12 HYB 13 HYB 14 HYB 15	- Streifenelektrode konzentrisch eingebettet

Zur Reduzierung des Abstandes zum optischen Messaufnehmer wurden die Elektroden von jeweils fünf kubischen DFL-Prüfkörper und HYB-Prüfkörpern exzentrisch in die Prüfkörper eingegossen (Materialdicke 20 mm). Jeweils fünf weitere kubische Prüfkörper wurden mit konzentrischer Hochspannungselektrode hergestellt (siehe Abbildung 16). Für die Bestimmung der Eigenschaften der FOF-Optik wurden ergänzend zwei analog aufgebaute zylindrische Prüfkörper mit konzentrisch eingegossener Deflektorelektrode angefertigt.

Als Silikonmaterial wurde RHODORSIL 7250 ESA A/B verwendet. Die Prüfkörper wurden nicht vorbehandelt und mindestens 20 Tage vor Messbeginn unter Laborbedingungen gelagert.

3.5 Prüfkörper mit VPE-Silikongrenzfläche

Die Prüfkörper besitzen eine zylinderförmige Längsgrenzfläche zwischen einem VPE-Kern und einem Silikonformteil und ähneln damit Anordnungen von aufgeschobenen Stresskonen und Muffenkörpern auf vorbereiteten VPE-Kabelabschnitten in Kabelgarnituren.

3.5.1 Prüfkörperaufbau

Die Nachbildung der in Garnituren in Feldrichtung angeordneten zylindrischen Grenzflächen erfolgte in den Prüfkörpern durch einen zylindrischen VPE-Kern und ein aufgeschobenes, vorgefertigtes Silikonteil. Zur Erzeugung von Entladungen in diesem Grenzflächenbereich wurde eine HS-Spitzenelektrode entsprechend Abschnitt 3.3 verwendet, wobei die Nadel in der Grenzfläche zwischen dem VPE-Kern und dem aufgeschobenen Silikon-Formteil angeordnet war. Zusammen mit der auf der Prüfkörperoberseite kontaktierten Gegenelektrode wurde wieder eine Spitze-Platte-Elektrodenanordnung realisiert (siehe Abbildung 17), im Unterschied zu realen Anordnungen aber eine stark inhomogene Feldverteilung erzeugt. Dabei ist zu beachten, dass nur bei hinreichend großen Grenzflächen eine statistisch gleichmäßige Oberflächenrauigkeit im Feldbereich

sichergestellt ist [3]. Bei sehr kurzen Proben kann durch zufälliges Vorhandensein einzelner Unregelmäßigkeiten das Messergebnis verfälscht werden.

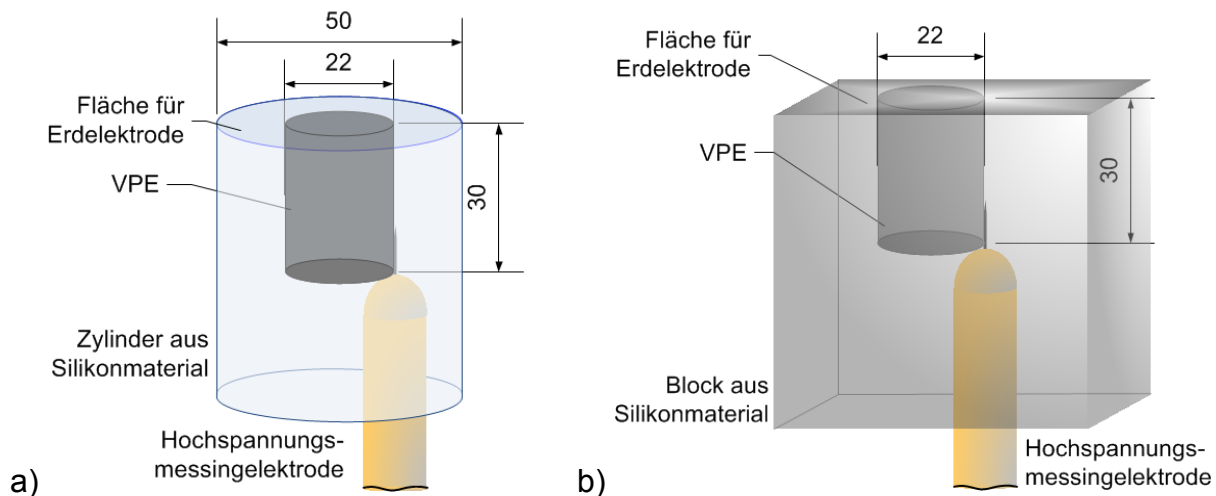


Abbildung 17: Prüfkörper mit innerer VPE↔Silikon-Grenzschicht (schematisch);
a: zylindrisch und
b: kubisch

Bei der Herstellung der Prüfkörper wurden ebenfalls Abmessungen von Feldsteuerelementen in realen Garnituren sowie Vorgaben zum Anpressdruck auf die VPE-Mantelfläche und zur Oberflächenrauigkeit dieser Oberfläche berücksichtigt. Es ist bekannt, dass eine Erhöhung des Anpressdrucks auch eine Erhöhung der elektrischen Festigkeit der Grenzschicht bewirkt. Ab einem gewissen Druck kommt es jedoch zu einer Sättigung der Druckabhängigkeit. Typische Größen liegen abhängig von der Shore A-Härte der Silikonelastomere zwischen 0,1 MPa für sehr weiche und 0,15 MPa für härtere Werkstoffe [3]. Der Anpressdruck muss aber deutlich größer werden, wenn messbare Rauigkeiten die VPE-Oberfläche uneben gestalten.

In bestimmten Typen von Garnituren in Komponentenbauweise, zum Beispiel in Freiluftendverschlüssen, wird dieser Anpressdruck allein aus der Vorspannung der mechanischen Dehnung des elastischen Materials des Feldsteuerelementes aufgebracht. Das wird dadurch realisiert, dass der Außenradius des VPE-Kerns (VPE-Kabelisolierung) um einen vorgegebenen Prozentsatz größer sein muss als der Innenradius des entspannten Silikonformteils (Aufschieber). Durch die Aufweitung des Silikonformteils in radialer Richtung entstehen tangential und radiale Spannungen im Silikon, die ihrerseits einen Anpressdruck auf den VPE-Kern ausüben.

Da eine Abhängigkeit von Kanaleinsatz und Kanalwachstum vom Anpressdruck kein Untersuchungsgegenstand ist, wurde für die Aufweitung ein mittlerer Wert von ca. 10% gewählt, der auch in der Praxis verwendet wird. Messergebnisse zur Abhängigkeit der Durchschlagfestigkeit vom Anpressdruck von ähnlichen Modellkörpern im schwach inhomogenen Wechselfeld sind unter anderem bei Kunze [3] enthalten.

Die elektrischen Eigenschaften der VPE↔Silikon-Grenzfläche werden maßgeblich auch durch die Homogenität der beteiligten Oberflächen, insbesondere der des härteren VPE, bestimmt. In der Praxis wird die Oberfläche der Kabelader üblicherweise durch Schälen und Schmirgeln hergestellt, die innere Oberfläche des Feldsteuerelements durch Gießen.

Die für Prüfkörperherstellung verwendeten zylindrischen VPE-Kerne wurden aus der Isolierung eines 500 kV-VPE-Kabels gedreht. Für die Charakterisierung der Oberfläche

der VPE-Kerne wurde die gemittelte Rautiefe R_Z in Anlehnung an die DIN 4768 verwendet. Nach Festlegung einer Taststreckenlänge von 15 mm aus der Gesamtlänge des Kernes von 30 mm wurden durch das Messgerät fünf gleiche Streckenabschnitte festgelegt und der max. Wert der Rautiefe Z_i in jedem Streckenabschnitt bestimmt. Die gemittelte Rautiefe ist dann

$$R_Z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (9)$$

Diese Messung wurde für insgesamt vier Taststreckenproben durchgeführt, indem der Kern jeweils um 90° gedreht wird. Der mittlere Wert für die Rauigkeit des Kernes ist dann der Mittelwert aus den vier Werten für die einzelnen Taststrecken. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 8 und im Abschnitt 7.5 angegeben.

Zur Herstellung der Prüfkörper wurden auf jeweils einem VPE-Kern mit einem Durchmesser von 22 mm sowie einer Höhe von 30 mm und gemessener Rautiefe vorgefertigte Silikonhohlzylinder mit einer Höhe von ebenfalls 30 mm aufgeschoben, deren Außenabmessungen durch die kubische und zylindrische Gussform vorgegeben waren. Der Innendurchmesser des entspannten Hohlzylinders beträgt 20 mm. Die Oberfläche des VPE-Kerns wird vor dem Aufschieben mit Silikonfett vorbehandelt oder bleibt unbehandelt.

Danach wurde diese Baugruppe in die jeweilige Gussform (kubisch, zylindrisch) eingesetzt und die Nadel der HS-Elektrode senkrecht in den VPE↔Silikon-Grenzflächenbereich mit einem Abstand von 20 mm zum Formboden eingeführt und zentriert. Sie wurde ebenfalls vorher mit Isopropanol gereinigt. Anschließend wurde der Prüfkörper bis zu einer Gesamthöhe von ca. 65 mm mit vorbereitetem Silikonmaterial aufgefüllt und vernetzt. Die Ausführung entspricht den im Abschnitt 3.3.2 aufgeführten Arbeitsschritten.

Bei diesen Prüfkörpern war der Herstellungseinfluss auf die elektrischen Eigenschaften besonders zu beachten, denn die Grenzfläche stellt grundsätzlich eine potentielle elektrische Schwachstelle dar. Daher mussten die angeführten geometrischen Abmessungen der Prüfkörper und des Spitzendurchmesser der jeweiligen Nadel exakt eingehalten werden. Weiterhin mussten für die VPE-Oberflächen möglichst vergleichbare Rauigkeiten ausgewählt werden. Durch die Sicherstellung einer vergleichbaren Behandlung des VPE-Kerns und gleichmäßigen Bedingungen für die Herstellung der Prüfkörper waren Voraussetzungen für vergleichbare Prüfkörperkollektive gegeben. Als Prüfkörperbezeichnung wurde wieder die Nadelkennzeichnung verwendet.

Da VPE eine sehr geringe Transmission im Vergleich zum verwendeten Silikon besitzt, wurde die von den optischen Signalen erreichbare Oberfläche des fluoreszierenden Lichtwellenleiters im Vergleich zu den vorgenannten Prüfkörpern stark eingeschränkt. Dies ermöglichte eine Erprobung des optischen Messzweiges unter den in Stresskonen von Endverschlüssen gegebenen Bedingungen.

3.5.2 Verwendete Prüfkörper

Die für die Untersuchungen verwendeten mit kubischen und zylindrischen Prüfkörper bestanden wieder aus RHODORSIL ESA 7250 A/B, die zylindrischen VPE-Kerne aus VPE-Isoliermaterial. Als Hochspannungselektrode wurden Akupunkturnadeln mit vergleichbaren Spitzenradien im 1 µm-Bereich verwendet.

Angefertigt wurden zwei unterschiedliche Prüfkörpergruppen. In der Prüfkörpergruppe I waren die Mantelflächen der VPE-Kerne nicht, in der Prüfkörpergruppe II mit Silikonfett vorbehandelt.

Abbildung 18 zeigt den Aufbau dieser Prüfkörper mit Elektrodensystem und VPE-Kern in einer Draufsicht und in der Tabelle 7 ist die Übersicht der verwendeten Prüfkörper enthalten. Die Lagerungsdauer zwischen Herstellung und Messung betrug ca. 100 Stunden.

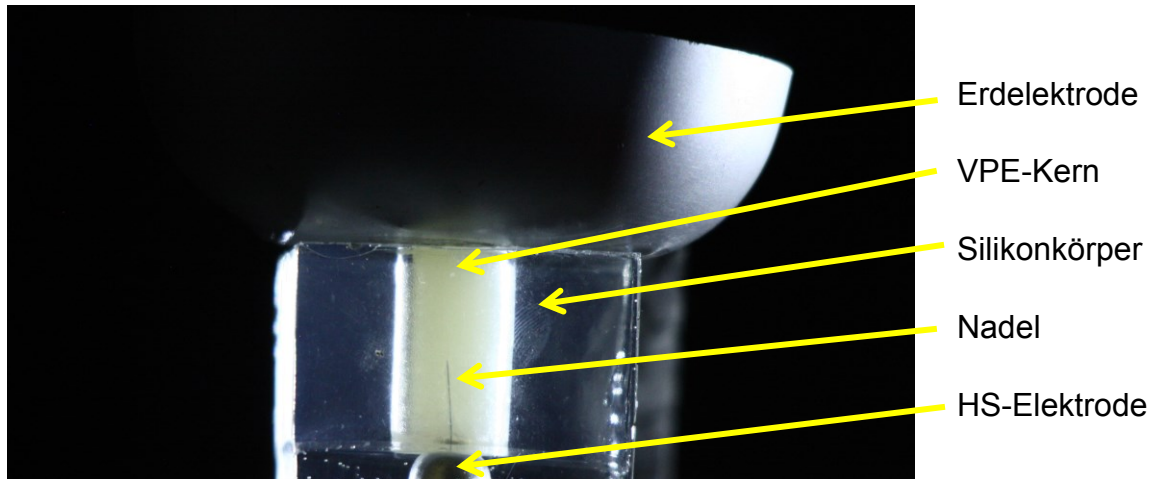


Abbildung 18: Aufbau eines Prüfkörpers mit VPE↔Silikon Grenzfläche und HS-Nadelelektrode

Tabelle 7: Übersicht der Prüfkörper VPE↔Silikon Grenzfläche

Prüfkörpergruppe	Prüfkörperform	Prüfkörperbezeichnung
I	kubisch	B 132, B 188, B 193
II	kubisch	B 56, B 108, B 122, B 167, B 177, B 199
II	zylindrisch	B 54, B 100

Tabelle 8: Rautiefen für Prüfkörper mit VPE↔Silikon Grenzfläche

Prüfkörper	R _z in µm
Prüfkörper mit unbehandelter Mantelfläche des VPE-Kerns	
B 132	50,67
B 193	34,03
B 188	47,42
Prüfkörper mit vorbehandelter Mantelfläche des VPE-Kerns	
B 177	58,46
B 122	34,49
B 199	38,84
B 167	41,1

4 Aufbau und Gestaltung des Systems zur elektrischen und optischen Signalerfassung und -verarbeitung

Zielstellung dieser Untersuchungen war die zeitsynchrone elektrische und optische Erfassung von inneren Teilentladungen in Isolieranordnungen aus transparenten Isolierstoffen einschließlich Signalverarbeitung und -anzeige.

Wie im nachfolgenden Kapitel 5 ausgeführt, wurde als messtechnische Basis das hochauflösende synchrone Mehrstellen-TE-Messsystem MPD 540/600 der Fa. OMICRON Energy Solutions GmbH ausgewählt. Die Erfassung der Teilentladungsimpulse erfolgt mittels einer Koppereinheit (Ankoppelvierpol, Induktivität), die Übertragung zum Erfassungsgerät des Systems ist leitungsgebunden. Das Messsystem realisiert eine nahezu vollständige digitale Verarbeitung von TE-Signalen und ermöglicht durch die geringen internen Verarbeitungszeiten eine zeitsynchrone Signalerfassung von bis zu 72 Messkanälen. Für eine optische Signalerfassung und -aufbereitung mit nachfolgender Signalverarbeitung durch das TE-Messsystem waren Lösungen zu ermitteln und zu erproben.

Technisch einsetzbare optische Sensoren²⁷ sind derzeit nur zur Feststellung und Ortung äußerer Entladungen in Hochspannungsanlagen verfügbar (siehe auch Abbildung 1). Dies sind UV-Koronaskope, Restlichtverstärker und Infrarotkameras, mit denen eine Lokalisierung der auslösenden Fehlstelle bei Freileitungen und Schaltanlagen möglich ist [23]. Optische Messungen von Teilentladungen im Inneren von gasisolierten Schaltanlagen (komplett lichtdichte Umgebung) werden zwar als sehr aussichtsreich eingeschätzt, finden in der Praxis jedoch kaum Anwendung [94]. In wissenschaftlichen Untersuchungen zur Elektrolumineszenz (siehe Abschnitt 2.2.2) und zum „Electrical Treeing“ (siehe Abschnitt 2.2.2.3) in Isolieranordnung aus unterschiedlichen transparenten (transluzenten) festen Isolierstoffen wurden sowohl Linsensysteme mit angespleißtem Transportlichtwellenleiter für den optischen Signaltransport zu den Anzeige- und Auswerteeinheiten als auch Kameras eingesetzt. Fluoreszierende Lichtwellenleiter in Kombination mit einem optisch-elektrischen Wandler, Verstärker und Auswerteeinheiten wurden bisher nur vereinzelt für die Erfassung von Entladungen in gasförmigen und flüssigen Isoliermedien verwendet [22].

Für eine optische Signalerfassung von Entladungen im Innern von transparenten Isolieranordnungen waren Lösungen zu erproben, die eine fehlstellennahe Signaleinkopplung auch im elektrischen Feld und eine Wandlung der optischen in elektrische Signale ermöglichen. Die gewählten Lösungen bestanden aus optischen Messaufnehmern und einer leitungsgebundenen Übertragung der optischen Signale zu einer Verarbeitungseinheit. Diese wandelt die intensitätsabhängigen optischen in proportionale elektrische Signale und ermöglicht somit eine vergleichbare Signalverarbeitung durch die Software des TE-Messsystems (optisch-elektrischer Wandler).

²⁷ Eine Komponente eines Messsystems wird als Sensor bezeichnet, die eine physikalische Größe erfasst und in ein zu verarbeitendes Signal wandelt. Optische Sensoren bestehen in der Regel aus dem sensorischen Element und einem Wandler. Zur Verbindung dieser beiden Komponenten wird meist ein sogenannter „Übertrager“ benötigt.

4.1 Spektren von Teilentladungen in transparenten Silikonelastomeren

Die Dimensionierung der optischen Messtechnik erfordert neben der Kenntnis des Transmissionsgrads von Silikonmaterialien (siehe Abbildung 8) Angaben zum Wellenlängenspektrum von Entladungen, die sich ausgehend von Nachbildungen innerer Fehlstellen in Prüfkörpern aus transparenten Silikonelastomeren entwickeln.

Zur Bestimmung des Wellenlängenspektrums wurde ein Hochspannungsmesskreis für Teilentladungsmessungen nach IEC 60270 verwendet, der in Abbildung 19 gezeigt ist. Das TE-Messsystem wurde hier zur Messung der Spannung sowie der scheinbaren Ladung verwendet. Die Spannungskalibrierung erfolgte entsprechend Vorgabe [98]. Eine Beschreibung ist in Kapitel 5 enthalten.

Die Wechselspannungsquelle ermöglicht die Bereitstellung von Spannungen bis 50 kV mit kontinuierlicher und stufenförmiger Spannungssteigerung. Die Teilentladungen wurden in kubischen Prüfkörpern mit eingegossener Nadelelektrode auf Hochspannungspotential und kontaktierter Plattenelektrode erzeugt. Abmessungen und Herstellung sind im Abschnitt 3.3 erläutert. Für ergänzende Messungen wurden auch plattenförmige Prüfkörper mit eingegossener Spitze-Spitze-Elektrodenanordnung verwendet.

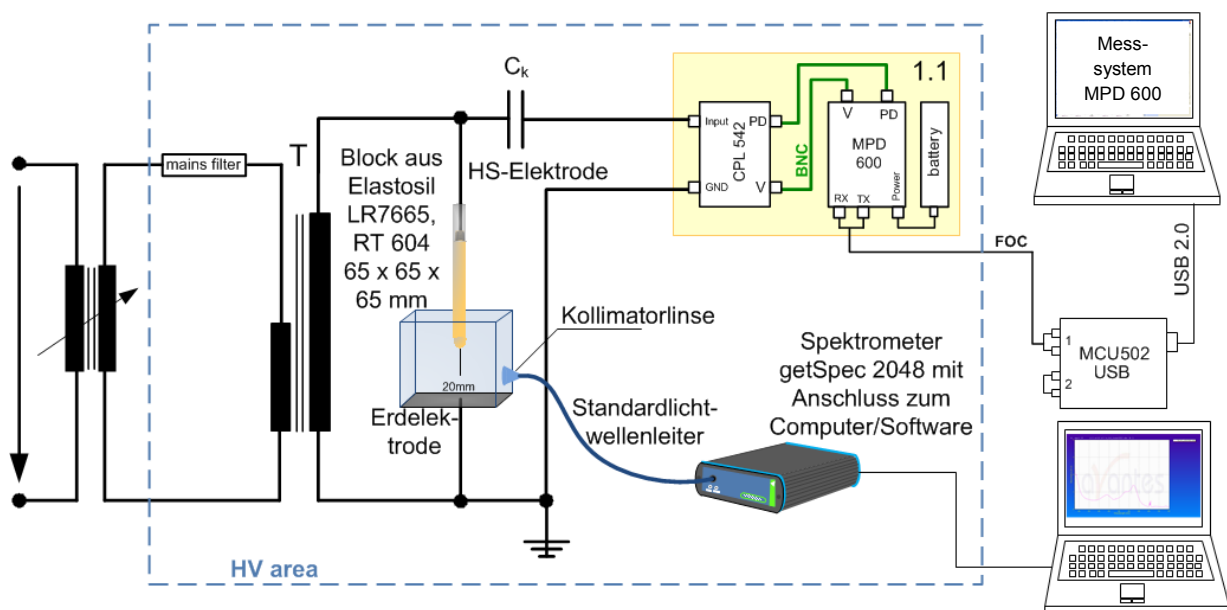


Abbildung 19: Messschaltung zur Ermittlung des TE-Spektrums

Zur Aufzeichnung des TE-Spektrums wurden eine spezielle optische Messanordnung mit quellennaher Signaleinkopplung und ein Spektrometer verwendet. Die optische Messanordnung bestand aus einem kommerziell verfügbaren „COLL-FIBRE-CUST“-System²⁸ mit einer in Kunststoff gefassten Quarzglaslinse²⁹ und einer fest verbundenen Quarzglasfaser für den VIS/NIR-Bereich mit einem Kern von 400 μm ³⁰. Die Faserlänge betrug 300 cm, der Übertragungsbereich reichte von ca. 350 nm bis 2000 nm. Damit begrenzte die Faser spektral zu kleineren Wellenlängen. Angaben zur optischen Däm-

²⁸ Hersteller: Fa. OPTOcon GmbH, Dresden

²⁹ ultrakompakte Kollimationsoptik; Durchmesser 6 mm, Brennweite 8,5 mm

³⁰ Ocean Optics, P 400-5-VIS-NIR

pfung der Faser enthält Abbildung 20. Die Kunststoffausführung der Linse im „COLL-FIBRE-CUST“-System ermöglichte eine Kontaktierung auf der Seitenfläche des Prüfkörpers.

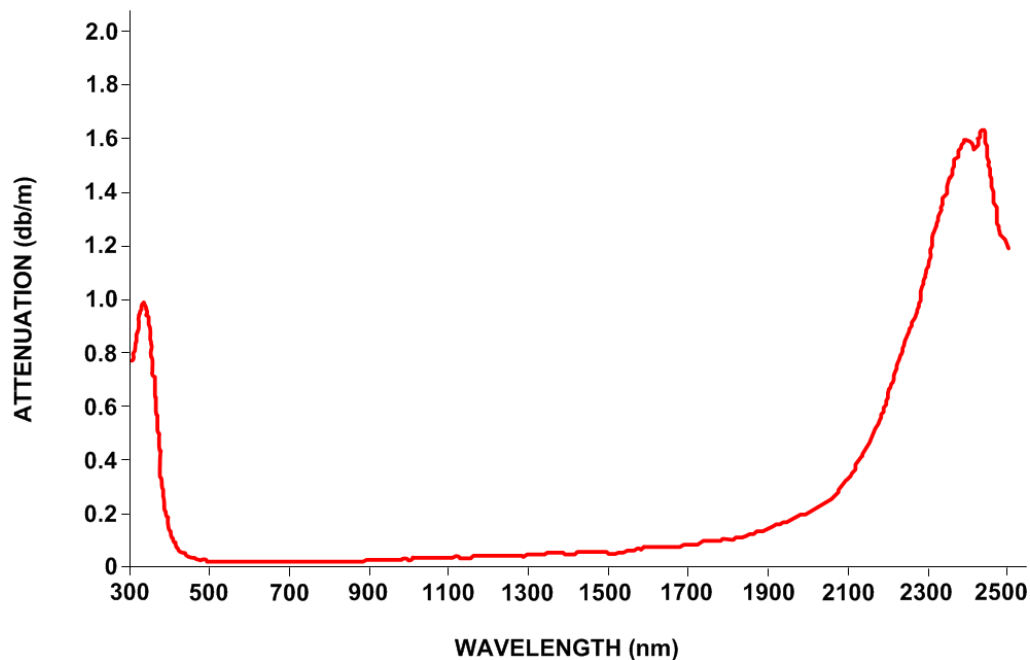


Abbildung 20: Optische Dämpfung der Quarzglasfaser des COLL-FIBRE-CUST System; Diagramm³¹ Ocean Optics

Die Linse wurde in Höhe der Nadelspitze angebracht und auf die vertikale Ebene durch die Nadelspitze fokussiert. Als Spektrometer wurde das Miniaturspektrometer getSpec 2048 eingesetzt.

Vor Beginn der Messungen war die TE-Freiheit des Messkreises unter Einschluss der am Prüfkörper kontaktierten Linse bis zum vorgegebenen Spannungswert von ca. 35 kV zu überprüfen. Dies gilt auch für alle weiteren experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 5).

Dazu wurden spezielle Prüfkörper mit gleichen Abmessungen und einer eingegossenen Kugel-Platte-Elektrodenanordnung gefertigt, die nachfolgend Kalibrierkörper genannt werden. Diese waren bis ca. 40 kV teilentladungsfrei und somit für die Überprüfung der TE-Freiheit in den geschirmten Prüffeldern mit Grundstörsiegeln im Bereich von 300 fC bis ca. 1 pC ausreichend.

Nach Feststellung der TE-Freiheit des Messaufbaus wurde der Prüfkörper inklusive Linsensystem in den Messkreis eingesetzt und eine Ladungskalibrierung durchgeführt. Danach wurde die Spannung gesteigert, bis sich intensive Teilentladungen ausbilden, die das Spektrometer im Bereich seiner Integrationszeiten erfassen konnte. Das aufgenommene Spektrum ist in Abbildung 21 dargestellt.

Es ergab sich ein relativ breiter Emissionsbereich von ca. 400 nm bis max. 800 nm (Kontinuumsstrahlung) mit einer prägnanten Bande bei 656 nm (Wasserstoffemissionslinie $H\alpha$ -Linie). Der Intensitätseinbruch bei ca. 370 nm ist wesentlich durch die Messtechnik begründet. Wegen der relativ schwachen Lichtintensität der TE-Signale sind

³¹ Quelle: <http://www.oceanoptics.com/Products/fiberattenuation.asp#visnir>

trotz maximaler Integrationszeiten die Signale teilweise verrauscht. Unterhalb von ca. 400 nm begrenzt der verwendete konventionelle Lichtwellenleiter das Spektrum.

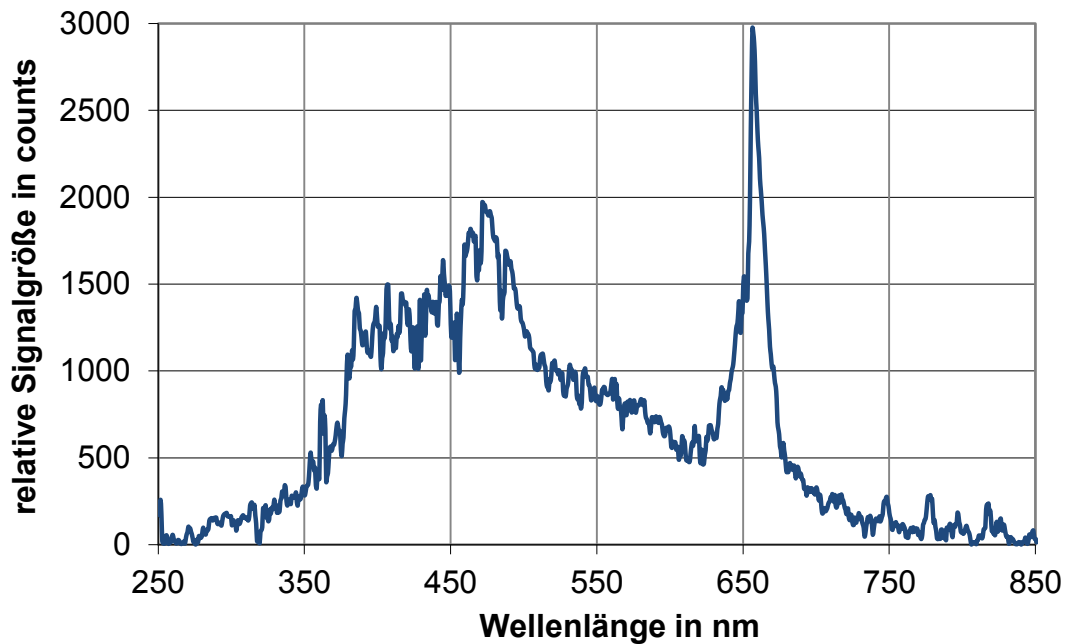


Abbildung 21: Spektrum einer Teilentladung im Silikonelastomer Elastosil LR 7665; Spannung 31 kV; scheinbare Ladung 5,6 nC

Bei den Messungen wurde weiterhin festgestellt, dass mit zunehmender Spannung ein Anstieg der Lichtintensität der Entladungen erfolgte. Für den im Spektrum von Elastosil LR 7665 auftretenden Peak bei 435 nm wurde die Veränderung der Lichtintensität mit steigender Spannung ausgewertet und mit der ebenfalls gemessenen scheinbaren Ladung verglichen (Abbildung 22).

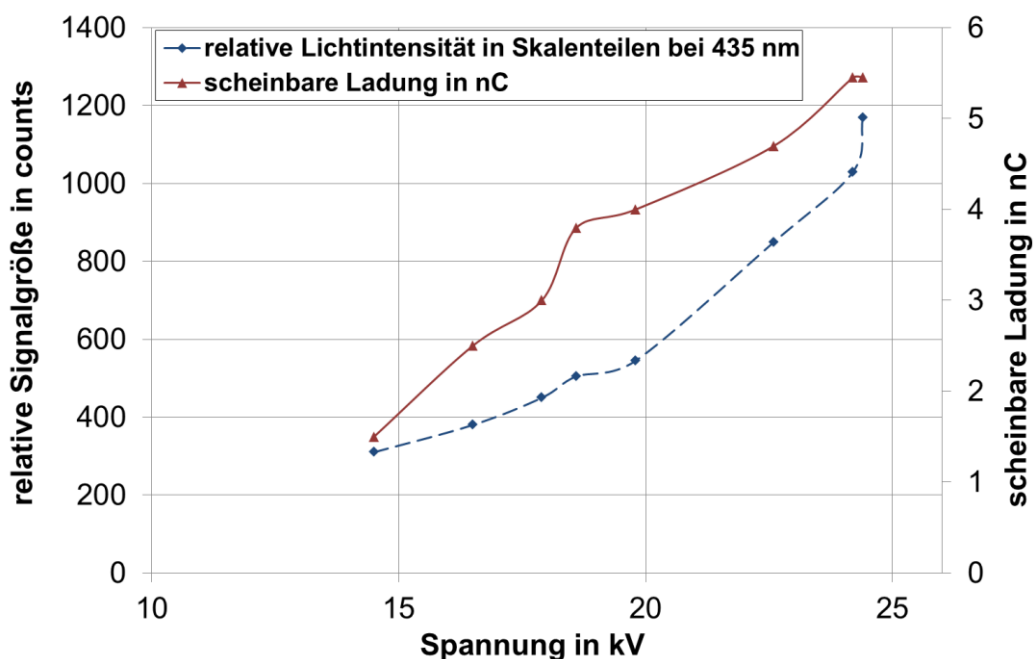


Abbildung 22: Scheinbare Ladung und relative Lichtintensität bei einer Wellenlänge von 435 nm in Abhängigkeit von Beanspruchungsspannung

Aus der Abbildung 22 ist zu entnehmen, dass die relative Lichtintensität sowie die scheinbare Ladung mit der Spannung ansteigen. In der Literatur wird ausgeführt, dass das von Teilentladungen emittierte Licht in einer groben Näherung proportional zur scheinbaren Ladung ist. Das optische Spektrum der Teilentladungen verändert sich nicht für Beanspruchungszeiten bis zu 17 Minuten (entspricht der maximalen Integrationszeit des Spektrometers). Die Empfindlichkeit des verfügbaren Spektrometers und dessen max. Integrationszeit erfordert Lichtsignale ausreichender Intensität. Daher waren Spektren von äußerst lichtschwachen Signalen, die gegebenenfalls bei Elektrolumineszenzphänomenen entstehen, mit dieser Messanordnung nicht zu erfassen.

Vergleichbare Ergebnisse ergaben sich aus Messungen an plattenförmigen Prüfkörpern aus Elastosil LR 7665 mit einem Linsensystem mit angespleißtem Transportlichtwellenleiter in Kombination mit Spektrometern von Ocean Optics. Es zeigte sich ein ebenfalls breiter Emissionsbereich von ca. 400 nm bis 800 nm, wobei die Bandenstruktur leicht differiert. Ein signifikanter Unterschied zwischen Spektren unter Verwendung von Kupfer- und Aluminium-Hochspannungs-Elektroden wurde nicht festgestellt. Ebenso ist das im Prüfkörper aus Elastosil LR 604 gemessene Spektrum mit dem Spektrum in Elastosil LR 7665 vergleichbar.

Die geringe spektrale Auflösung der Spektren gestattet keine gesicherten Aussagen über die Herkunft von Emissionslinien. Die Vielzahl möglicher und sehr schmalbandiger Emissionslinien erfordert hochauflösende Spektroskopie.

Aus den gemessenen Wellenlängenspektren lässt sich die Energie der bei Teilentladungen emittierten Photonen abschätzen. Für die Energie eines Photons, die nur von der Frequenz abhängig ist, gilt:

$$W = \hbar \cdot \nu \quad \text{mit} \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad (10)$$

mit: λ : Wellenlänge
 c : Lichtgeschwindigkeit [m/s]
 $\hbar$: Planck'sches Wirkungsquantum
 $\hbar \approx 6,626069 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Für eine Wellenlänge von 400 nm ergibt sich eine Energie $W=3,1 \text{ eV}$ und bei 1000 nm eine Energie $W=1,24 \text{ eV}$.

4.2 Optische Erfassung von inneren Entladungen in transparenten/transluzenten Isolieranordnungen

Zur Erfassung von inneren Entladungen in Prüfkörpern wurden zwei unterschiedliche optische Messaufnehmer ausgewählt:

- fluoreszierende Lichtwellenleiter in Verbindung mit einem Transportlichtwellenleiter und
- Linsenanordnungen mit fest verbundenem Lichtwellenleiter zur breitbandigen Signalerfassung

und jeweils in Kombination mit einem optisch-elektrischen Wandler (Verarbeitungseinheit) als optische Kanäle in das digitale Mehrstellen-TE-Messsystem eingefügt.

Weitere Möglichkeiten wie Lichtwellenleiter mit Signaleinkopplung über die Stirnfläche wurden wegen der erforderlichen sehr präzisen Ausrichtung auf die Entladungsstelle und des geringen Erfassungsbereiches nicht weiter betrachtet [79].

Die Messaufnehmer unterscheiden sich im Wellenlängenbereich für die optische Signalerfassung, in den Eigenschaften der Signalübertragung zum Wandler und in ihrer konstruktiven Ausführung. Zum Erreichen einer niedrigen Ansprechschwelle ist es erforderlich, die Messaufnehmer an das zu erwartende Strahlungsspektrum anzupassen und sie quellennah anzubringen. Für einen Einsatz in Hochspannungsgarnituren sind fluoreszierende Lichtwellenleiter derzeit die vorteilhaftere Lösung, da sie in elektrischen Feldern anwendbar sind, in Silikonelastomere eingebettet und durch Aufwickeln auf Mantelflächen von Feldsteuerteilen angebracht werden können. Die derzeit kommerziell verfügbaren Typen aus PMMA bzw. Polystyrol erfordern aber Einsatztemperaturen unter 80 °C und sind nicht dehnbar.

Die Linsenanordnungen verfügen über einen breiten Wellenlängenbereich für eine optische Signalerfassung und sind auf die Entladungsquelle fokussierbar. Ihr Einsatz beschränkt sich auf Messungen unter Laborbedingungen [33], [34]. Angaben zur optischen Erfassung von Teilentladungen in Luft unter Verwendung eines Linsensystems mit angeschlossenem Glaslichtwellenleiter und einem optisch-elektrischen Wandler auf Basis einer PIN-Diode ergaben Ansprechschwellen von ca. 30 pC und mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern ab ca. 300 pC [22].

Die Eigenschaften von beiden optischen Messaufnehmern wurden untersucht und fehlende Kenngrößen ermittelt.

4.2.1 Fluoreszierende Lichtwellenleiter

Fluoreszierende Lichtwellenleiter bestehen aus einem mit einem Fluoreszenzfarbstoff dotierten Kern und einer Claddingschicht. Diese besteht aus einem Material, dass für bestimmte spektrale Wellenlängenbereiche, den Absorptionsbereichen, transparent und für andere Bereiche reflektierend ist. Im Vergleich zu konventionellen Lichtwellenleitern liegt hier ein anderer Einkoppelmechanismus vor. Die auf die Faseroberfläche auftreffende optische Strahlung wird richtungsunabhängig im Raumwinkel $4 \cdot \pi$ im entsprechenden Wellenlängenbereich absorbiert. Die optische Strahlung regt den im Faserkern vorhandenen Fluoreszenzfarbstoff spontan zur Emission von langwelliger Strahlung an. Diese erfüllt zu großen Teilen die Bedingungen der Totalreflexion und wird zu den Enden des fluoreszierenden Lichtwellenleiters geführt. Die Wahl des Fluoreszenzfarbstoffes ermöglicht in gewissen Grenzen eine Anpassung an den Emissionswellenlängenbereich der Strahlungsquelle und den Bereich der spektralen Empfindlichkeit des optisch-elektrischen Wandlers.

Für die Untersuchungen standen unterschiedliche fluoreszierende Lichtwellenleiter aus PMMA mit einer Claddingschicht ebenfalls aus fluoriertem PMMA zur Verfügung (FPOF). Der Kerndurchmesser betrug 0,9 mm, die Dicke der Claddingschicht 35 µm. Sie waren mit unterschiedlichen Fluoreszenzfarbstoffen durchgängig dotiert³².

Der Akzeptanzwinkel θ_g , bei dem ein eingekoppelter Lichtstrahl an der Grenzfläche von Claddingschicht und Kern gerade noch total reflektiert wird, berechnet sich aus:

$$\sin\theta = \frac{n_{Cl}}{n_K} \quad (11)$$

mit n_{Cl}, n_K : Brechungsindexe des Kern- bzw. Claddingmaterials.

³² Hersteller: Fa. Luceat S.p.A., Italien

Mit den Werten $n_{Cl}=1,49$ und $n_K=1,41$ ergibt sich ein Grenzwinkel von $\theta=71^\circ$.

Einige für die Gestaltung des optischen Kanals erforderlichen Kennwerte der ausgewählten fluoreszierender Lichtwellenleiter waren nicht verfügbar und mussten experimentell bestimmt werden. Für eine Abschätzung der an den Faserenden ankommenden Strahlungsleistung sind neben Angaben zu Absorptions- und Emissionsbereichen und zu Übertragungsverlusten der Faser auch Abschätzungen zu der von der Quelle abgestrahlten und die Oberfläche des fluoreszierenden Lichtwellenleiters erreichenden Strahlungsleistung erforderlich. In der Regel wird die zum jeweils zweiten Ende des Lichtwellenleiters transportierte Strahlungsleistung in derartigen Untersuchungen vernachlässigt [77], [78].

4.2.1.1 Diskussion der Strahlungsübertragung in Prüfkörpern

Die von einer Strahlungsquelle ausgesandte Leistung (Strahlungsfluss) wird allgemein bezogen auf den Raumwinkel Ω in W/sr angegeben. Sie ist wellenlängenabhängig, das heißt eine spektrale Größe. Die den Empfänger erreichende Leistung ist abhängig vom Abstand r zwischen Quelle und Empfänger, von geometrischen Größen, die sich aus der Anordnung bzw. der Gestaltung von Quelle und Empfänger ergeben (radiometrisches Grundgesetz³³) und der Signaldämpfung durch den zwischen Quelle und Empfänger vorhandenen Isolierstoff. Für punktförmige Strahlungsquellen unmittelbar vor der Nadelspitze bei TE-Einsatz ergibt sich eine $1/r^2$ -Abhängigkeit der Strahlungsleistung. Mit wachsender Treestruktur bildet sich eine flächenartige Quelle aus, deren Längenausdehnung die Größe des Abstandes Quelle Detektor erreichen kann. Die Abhängigkeit der am Empfänger ankommenden Strahlungsleistung vom Abstand r wird mehr und mehr reduziert.

Die optische Dämpfung resultiert aus der bereits genannten Strahlungsabsorption und der Streuung der Strahlung an Inhomogenitäten im Material wie Verunreinigungen und Dichteschwankungen. Das bedeutet, die ausgesandte Leistung im Raumwinkelement wird kleiner. Experimentell ermittelt wurde der Transmissionsgrad für die verwendeten Silikonelastomere im Wellenlängenbereich der von Teilentladungen ausgehenden optischen Strahlung (siehe Abschnitt 3.1).

4.2.1.2 Bestimmung des Absorptions- und Emissionsspektrums fluoreszierenden Lichtwellenleiter

Fluoreszierende Lichtwellenleiter besitzen in Abhängigkeit vom verwendeten Fluoreszenzfarbstoff Absorptionsbanden in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen und sind in der Regel relativ schmalbandig. Bei Verwendung dieser Lichtwellenleiter müssen die Absorptionsbanden in Wellenlängenbereichen liegen, in denen bei TE-Signalen deutliche (Licht) Emissionen gemessen wurden. Zur Auswahl geeigneter fluoreszierender Lichtwellenleiter aus den vorhandenen Typen wurden daher die Absorptions- und Emissionsspektren bestimmt. Diese Analysen wurden wieder in Kooperation mit der FH Nordhausen, Fachbereich Ingenieurwissenschaften, unter Verwendung einer Simulationslichtquelle durchgeführt.

Es wurden acht Typen von fluoreszierenden Lichtwellenleitern vermessen. Dazu wurden diese jeweils einseitig mit dem Miniaturspektrometer getSpec2048 (Messmodi: Transmission und Absorption) verbunden und deren Oberflächen mit der Strahlungs-

³³ Die gesamte transportierte Energie, die von einer Quelle in alle Richtungen abgestrahlt wird, bleibt konstant, während die Gesamtfläche, auf die die Strahlung auftritt, sich mit dem Quadrat des Radius erhöht.

quelle getLight-DHS angestrahlt. Die Auswertung der aufgezeichneten Spektren zeigt, dass die Lage der Absorptionsbereiche relativ gut bestimmbar ist, während die Emissionsbereiche nicht exakt ermittelt werden konnten.

Die Ergebnisse für den fluoreszierenden Lichtwellenleitertyp, Typ FOF L, zeigt Abbildung 23. Die Lichtdurchlässigkeit der Faser FOF L (Abbildung 23) steigt etwa ab 275 nm bis 280 nm steil an. Dem Spektrum kann man entnehmen, dass zwei deutliche Absorptionsbereiche vorhanden waren. Der erste Absorptionsbereich liegt etwa zwischen 400 nm und 475 nm (mit einem Maximum bei 440 nm) und der zweite Absorptionsbereich etwa zwischen 540 nm und 600 nm (mit einem Maximum bei 574 nm). Der Emissionsbereich dieser Faser konnte in diesen Untersuchungen nicht ermittelt werden, da im roten Bereich (erwarteter Emissionsbereich) die gemessenen Spektren durch die intensive Deuterium-Linie der getLight-DHS gestört waren.

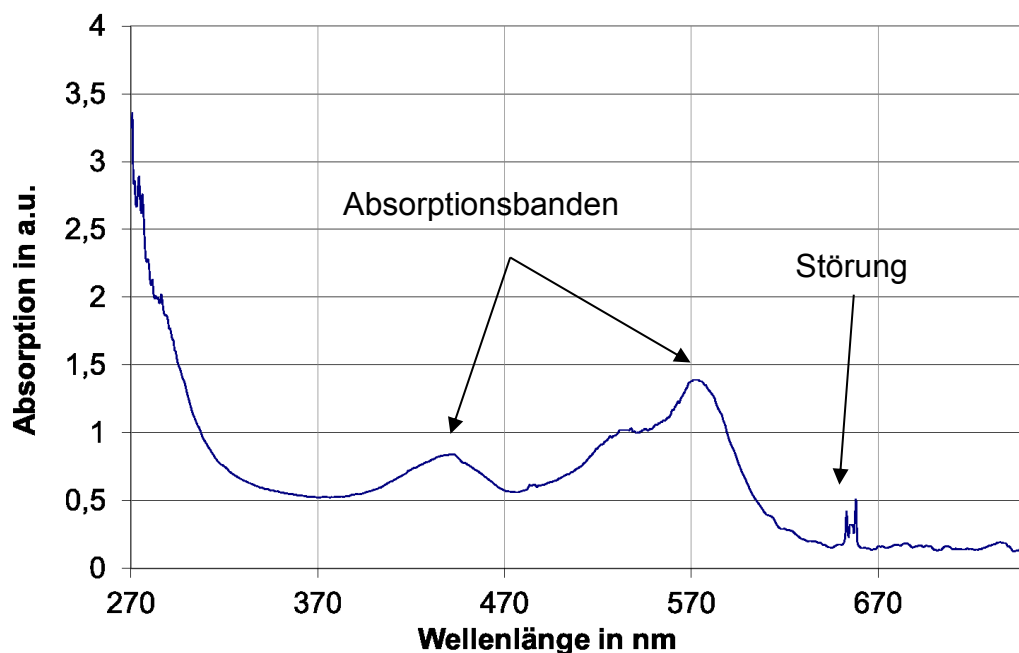


Abbildung 23: Absorptionsspektrum des fluoreszierenden Lichtwellenleiter Typ FOF L

Ergänzende Messungen mit einer Faser vom Typ FOF L und einem modifizierten Messaufbau erbrachten analoge Ergebnisse (Abbildung 24, [84]). Die Ergebnisse zum Absorptionsspektrum sind ähnlich denen in Abbildung 23. Das Emissionsspektrum liegt im roten Bereich und wurde für die Vorauswahl der Avalanche-Diode im optisch-elektrischen Wandler APD 500 der Fa. OMICRON Energy Solutions GmbH verwendet.

Generell ergeben sich bei fluoreszierenden Lichtwellenleitern in Abhängigkeit von der Dotierung unterschiedliche Absorptions- und Emissionswellenlängen, die stets relativ schmalbandig sind (Abbildung 25) und ggf. für eine bessere Anpassung genutzt werden können.

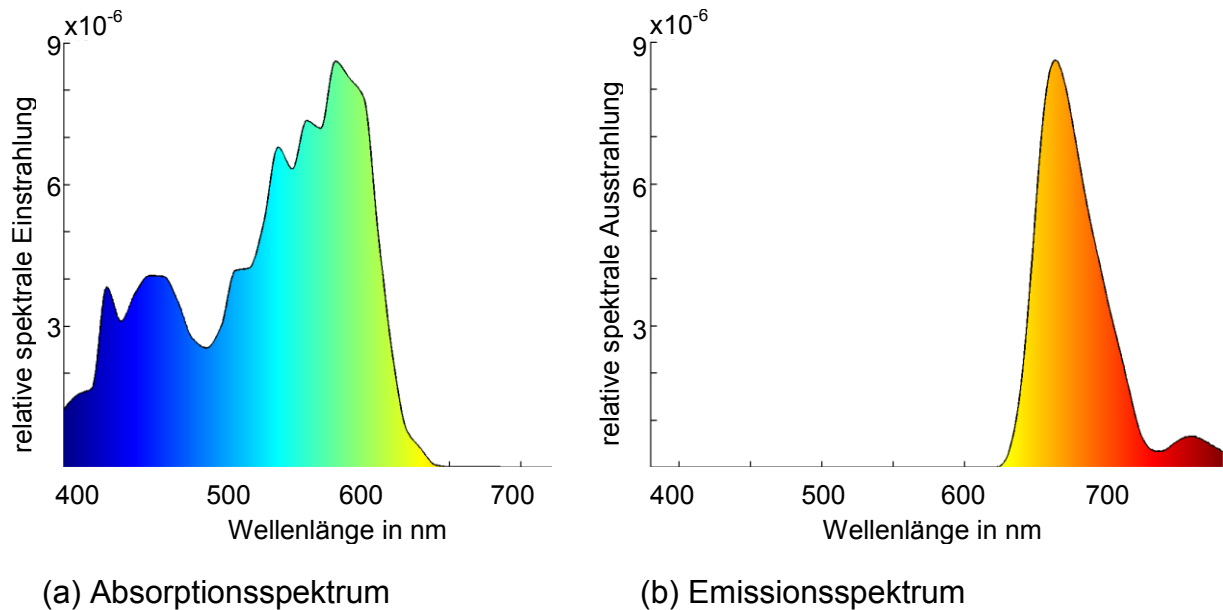


Abbildung 24: Absorptions- und Emissionsspektren fluoreszierender Lichtwellenleiter [84]

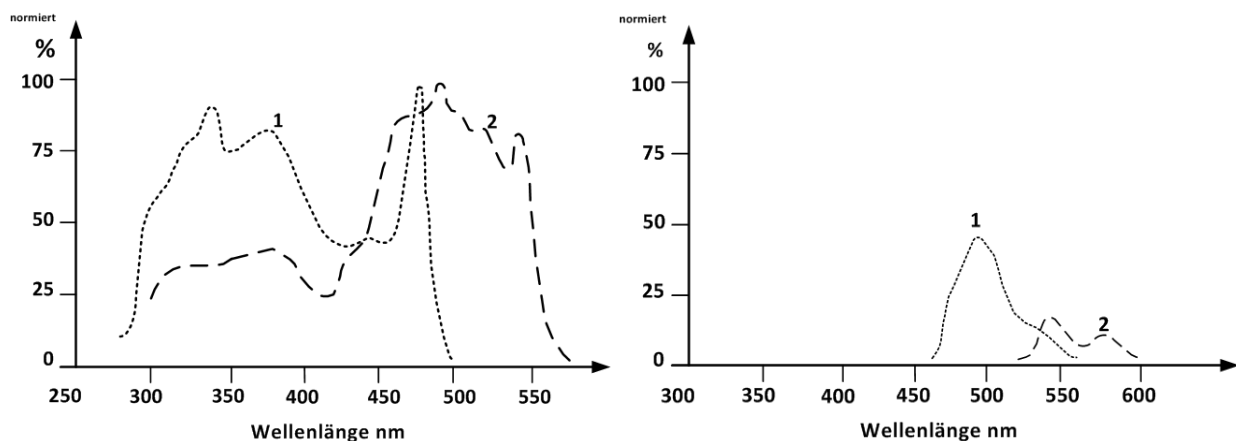


Abbildung 25: Absorptions- (links) und Emissionsspektren (rechts) von fluoreszierenden Lichtwellenleiter Schwarz [22]; (1) Faser F201; (2) Faser F204

4.2.1.3 Optische Dämpfung von fluoreszierenden Lichtwellenleitern

Eine der wesentlichen Eigenschaften von Lichtwellenleitern ist deren optische Dämpfung und ihr spektraler Verlauf, das heißt, die Verringerung der Signalstärke der optischen Strahlung (Licht) mit der Ausbreitungsentfernung [77].

Dämpfungsverluste resultieren aus den bereits genannten Effekten Absorption und Streuung. Die Absorption tritt nur bei bestimmten Wellenlängen auf und es wird zwischen Eigenabsorption (intrinsische Absorption) und der durch chemische Verunreinigungen (extrinsische Absorption) unterschieden. Insbesondere in PMMA-Lichtwellenleitern ist die CH-Absorption ausgeprägt [77]. Streuung wird einerseits durch Inhomogenitäten bei Dichte und Konzentration im Fasermaterial (intrinsische Streuverluste) und andererseits durch Mikrorauigkeiten (Einschlüsse und Schmutz) hervorgerufen. Speziell in Lichtwellenleitern sind zusätzlich Strahlungsverluste durch Krümmungen und variierende Abmessungen des Faserdurchmessers zu berücksichtigen. Da fluoreszierende Lichtwellenleiter kovalent gebundene Fluoreszenzfarbstoffe enthalten

wird die erzeugte Strahlung durch die Farbstoffdämpfung (Selbstabsorption, Quantenausbeute) beeinflusst [78].

Fehlende Angaben zur längenabhängigen Dämpfung für die einzusetzenden Lichtwellenleiter erforderten eigene Messungen. Die Messung erfolgte mittels einer einfachen Anordnung, die aus einer punktförmigen LED-Quelle, dem zu untersuchenden Lichtwellenleiter mit angeschlossenem optisch-elektrischen Wandler APD 500 (siehe Abschnitt 4.2.3) und einem Oszilloskop zur Bestimmung der Höhe der Spannungsimpulse bestand. Ein durch die konstante Vorspannung der LED erzeugter Lichtimpuls wird am Messort 1, der 15 mm vom Faserende entfernt ist, in den Lichtwellenleiter eingespeist und die am Wandlerausgang anliegende elektrische Impulshöhe mittels Oszilloskop bestimmt. Durch Verschieben der weiteren Messorte um eine jeweils konstante Entfernung entlang des Lichtwellenleiters und Messung der zugehörigen Impulshöhen entlang des Lichtwellenleiters ergaben sich längenabhängige Signalgrößen. Aus diesen Werten wurde mittels Gleichung (12) die Dämpfung in dB/m berechnet.

$$D(\lambda) = -1/L \cdot 20 \cdot \log\left(U_1/U_2\right) \quad (12)$$

mit $D(\lambda)$ = Dämpfung in dB
 L = Faserlänge in m
 U_1 = Signalstärke am Messort 1 in V (ca. 15 mm vom Faserende entfernt)
 U_2 = Signalstärke am variablen Messort 2 in V.

Für den verwendeten PMMA Lichtwellenleiter vom Typ L mit einer Faserlänge von 2 m und einer grünen LED (Spektrum $560 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) als Lichtquelle ergab sich aus den gemessenen Signalgrößen ein mittlerer Dämpfungswert von 6 dB/m. Diese Ergebnisse und Ergebnisse aus ergänzenden Messungen zeigten, dass die Dämpfung linear mit der Entfernung zunimmt und bei entsprechenden Entfernungen zum optisch-elektrischen Wandler der Signaltransport über undotierte Kunststofflichtwellenleiter vorteilhafter ist. In Abhängigkeit von der Faserqualität und den Messbedingungen werden für derartige Kunststofflichtwellenleiter Werte von 0,073 dB/m bei einer Wellenlänge von 520 nm; 0,13 dB/m bei einer Wellenlänge von 650 nm und 0,5 dB/m bei einer Wellenlänge von 700 nm erreichen [77]. Allerdings sind die durch die Kopplung des fluoreszierenden Lichtwellenleiter mit dem Kunststofflichtwellenleiter entstehenden Verluste zu berücksichtigen. Für fluoreszierende Lichtwellenleiter werden von Herstellern bereits Werte kleiner 0,3 dB/m (Nanooptics, Gainesville, FI) angegeben, das heißt, Lichtwellenleiter mit deutlich geringeren Dämpfungswerten sind möglich.

4.2.1.4 Detektierbarkeit des Spektrums von inneren Teilentladungen unter Verwendung von fluoreszierenden Lichtwellenleitern (FOF-Optik)

Ergänzend zu der im Abschnitt 4.1 beschriebenen Bestimmung des Teilentladungsspektrums wurden analoge Messungen mit zwei ausgewählten fluoreszierenden Lichtwellenleitern durchgeführt. Ziel dieser Messungen war die Überprüfung der Detektierbarkeit von Teilentladungen unter Verwendung fluoreszierender Lichtwellenleiter. Neben dem in Abschnitt 4.2.1.2 verwendeten Lichtwellenleiter Typ L wurde als weiterer der Typ F5³⁴ verwendet. Der Emissionsbereich dieses Lichtwellenleiters liegt bei wesentlich kürzeren Wellenlängen um 500 nm.

³⁴ Hersteller: Fa. Luceat S.p.A., Italien

Für die Messungen wurden zylindrische Prüfkörper aus dem Material Elastosil LR 7665 mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Nadel-Platte-Elektrodenanordnung verwendet, die nicht getempert waren. Die Nadelelektrode war hohlraumfrei eingegossen, die Gegenelektrode auf der gegenüberliegenden Prüfkörperseite kontaktiert (siehe Abschnitt 3.3).

Der verwendete Hochspannungsmesskreis entspricht dem in Abschnitt 4.1 erläuterten Messkreis und ist in Abbildung 26 gezeigt. Zur Aufzeichnung der scheinbaren Ladungen der erzeugten Teilentladungen sowie Höhe der Wechselspannung wurde wieder das TE-Messsystem mit elektrischem Messkanal eingesetzt.

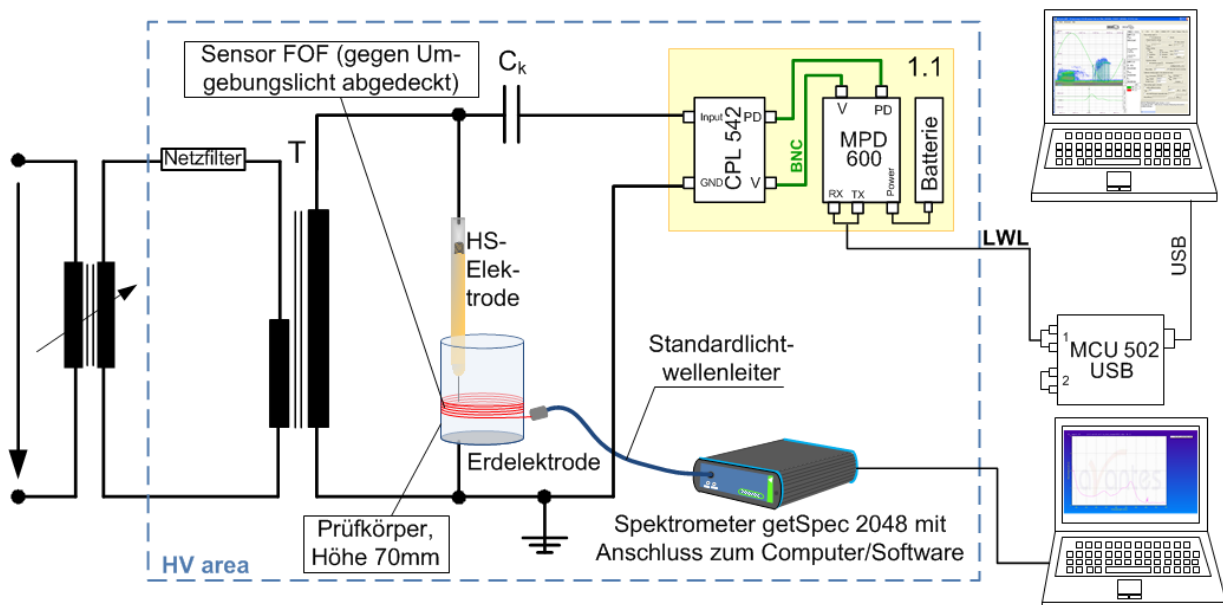


Abbildung 26: Messschaltung zur Ermittlung des TE-Spektrums unter Verwendung fluoreszierender Lichtwellenleiter

Nach Einsetzen der Prüfkörper wurde vor Messbeginn der Messkreis kalibriert und auf TE-Freiheit überprüft. Im vorliegenden Fall wurde eine TE-Freiheit bis ca. 30 kV nachgewiesen.

Der fluoreszierende Lichtwellenleiter wurde im zu erwartenden Entladungsbereich 5-mal³⁵ um die zylindrische Mantelfläche gewickelt, befestigt und mit einem weißen Papier abgedeckt. Das eine Ende der Lichtwellenleiter wurde in unmittelbarer Nähe zum Prüfkörper über ein Koppelstück mit einem Transportlichtwellenleiter verbunden, der direkt zum Spektrometer (getSpec 2048) führte (siehe Abbildung 26).

Charakteristische Ergebnisse zeigen die Abbildungen 27 und 28.

Die Erfassung des TE-Spektrums mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern erfolgte in den Emissionswellenlängenbereichen der Lichtwellenleiter (Typ L: 635 nm bis 705 nm und Typ F5: 400 nm bis 500 nm). Im Vergleich zu den im Abschnitt 4.1 dargestellten Ergebnissen ist die relative Signalgröße bei vergleichbarer scheinbarer Ladung deutlich geringer.

³⁵ Die Anzahl der Windungen war ausschließlich durch die verfügbare Länge der Fasern vorgegeben und ist nicht als optimale Länge zu betrachten.

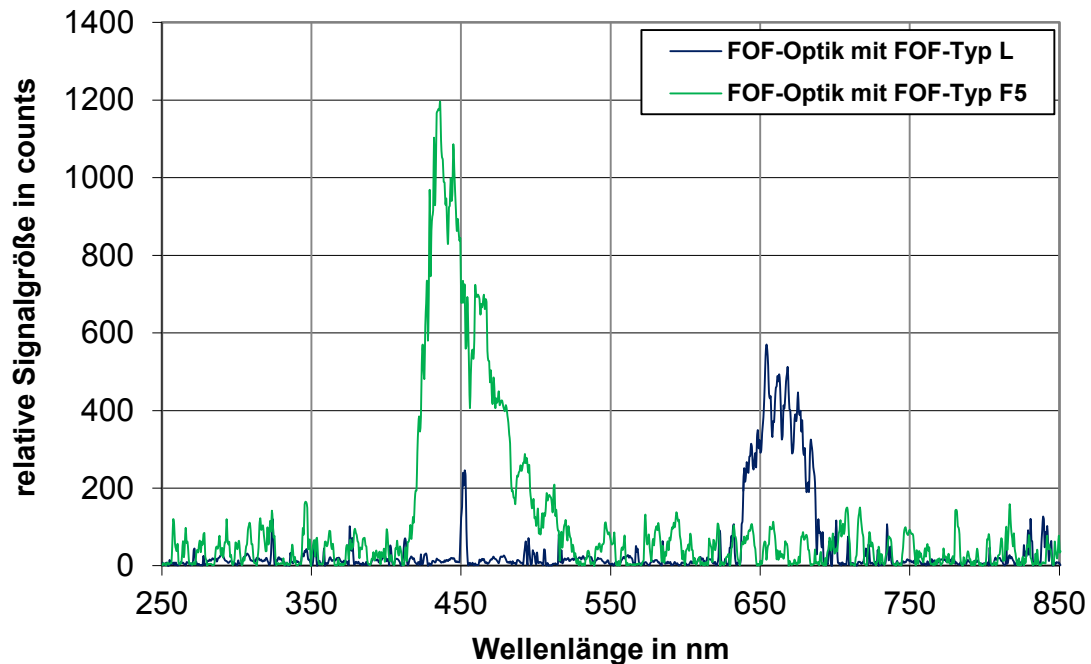


Abbildung 27: Erfassung des Spektrums von Teilentladungen im Silikonelastomer Elastosil LR 7665; FOF-Optik;
 blaue Kurve: FOF Typ L; Spannung 31 kV; scheinbare Ladung 4 nC
 grüne Kurve: FOF Typ F5; Spannung 24 kV; scheinbare Ladung 5 nC

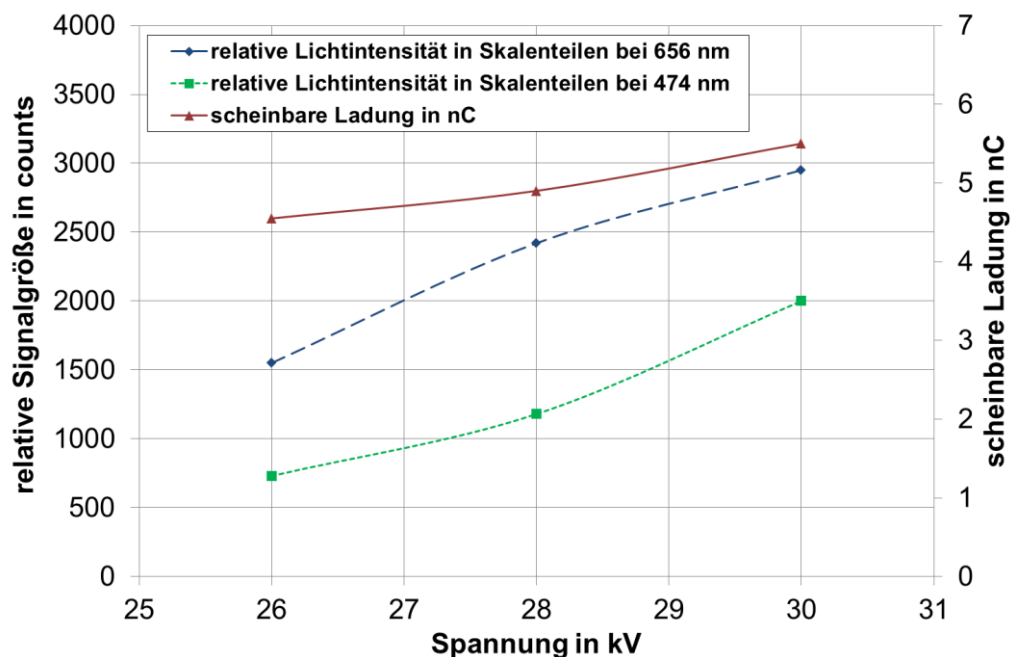


Abbildung 28: Vergleich des Anstieges von scheinbarer Ladung und der vom Spektrometer erfassten Signalgröße für zwei Wellenlängen im Emissionswellenlängenbereich des fluoreszierenden Lichtwellenleiter mit steigender Beanspruchungsspannung; FOF Typ F5;

Aus der Darstellung in Abbildung 28 ist erkennbar, dass die optische Signalgröße und die scheinbare Ladung mit wachsender Spannung im angegebenen Bereich ansteigen (vgl. auch Abbildung 22).

Beide Typen von fluoreszierenden Lichtwellenleitern sind für die Detektion von Teilentladungen prinzipiell geeignet. Für die weiteren Messungen wurde der Typ L verwendet, der an die Eingangsstufe des optisch-elektrischen Wandler besser angepasst war.

4.2.1.5 Voruntersuchungen zur Positionierung fluoreszierender Lichtwellenleiter an zylindrischen Prüfkörper

Vor Beginn der Messungen war die Positionierung der fluoreszierenden Lichtwellenleiter auf der Mantelfläche der zylindrischen Prüfkörper sowie die erforderliche Länge (Anzahl der Windungen) zu bestimmen und für alle folgenden Untersuchungen festzulegen. Alle zylindrischen Prüfkörper hatten vergleichbare Abmessungen. Der Abstand von der Spitzenelektrode zur zylindrischen Mantelfläche betrug in Prüfkörpern aus reinem Silikonelastomer mit konzentrisch eingegossener Nadelspitze 25 mm. Dieser Prüfkörperradius resultiert aus dem minimalen Biegedurchmesser des fluoreszierenden Lichtwellenleiters. Bei Messungen zum TE-Einsatz kann die Nadelspitze als punktförmige Quelle betrachtet werden. Die Abstrahlung im Silikonmaterial mit dem Brechungsindex $n_{Si}=1,41$ erfolgt in alle Raumrichtungen. Die Strahlung trifft auf die zylindrische Grenzfläche zur Umgebungsluft mit dem Brechungsindex $n_L=1,0003$. Für die weiteren Abschätzungen wurde angenommen, dass der aufgewickelte fluoreszierende Lichtwellenleiter auf der Mantelfläche linienförmig aufliegt und als Umgebungsmedium Luft wirkt. Beim Übergang von einem optisch dichteren zu einem optisch dünneren Medium kann ab einem bestimmten Winkel, dem Grenzwinkel α_G , Totalreflexion auftreten.

In Bezug auf die horizontale Ebene durch die Nadelspitze (Abbildung 29) ergibt sich nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz:

$$\alpha_G > \arcsin\left(\frac{n_L}{n_{Si}}\right)$$

ein Grenzwinkel α_G von 45° . Mit dem Radius von 25 mm ergibt sich mit:

$$\tan \alpha_G > \left(\frac{\text{Wickelhöhe}}{r_{Zyl.i}}\right)$$

eine Wickelhöhe von 25 mm ober- und unterhalb der horizontalen Ebene durch die Nadelspitze. In diesem Bereich sollte der fluoreszierende Lichtwellenleiter auf die Mantelfläche aufgewickelt werden.

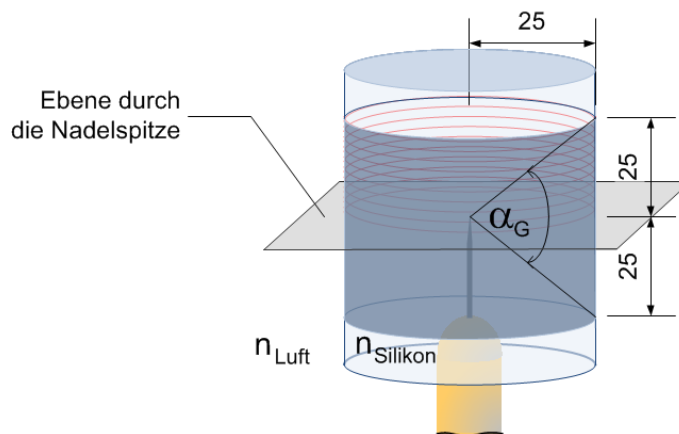


Abbildung 29: Ausschnitt der für die fluoreszierenden Lichtwellenleiter nutzbaren Mantelfläche der zylindrischen Prüfkörper; resultierend aus dem Grenzwinkel der Totalreflexion

Da ein fluoreszierender Lichtwellenleiter die auftreffende Strahlung über seine Oberfläche einkoppelt, wächst der Betrag der absorbierten Strahlung mit der Faserlänge. Wegen der relativ stark mit der Faserlänge ansteigenden Dämpfung reduziert sich die an den Faserenden ankommende Strahlung mit zunehmender Länge. Die nutzbare Länge des auf der Mantelfläche eines zylindrischen Prüfkörpers von 50 mm Durchmesser auf-

gewickelten fluoreszierenden Lichtwellenleiters wurde mittels einer speziellen Messanordnung abgeschätzt. Es wurde der Lichtwellenleiter Typ L für diese Messung verwendet. Anstelle einer HS-Spitzelektrode wurde eine LED mit einer Emissionswellenlänge von 590 nm in das Zentrum eines zylindrischen Prüfkörpers eingegossen. Die LED wurde mit einem Strom konstanter Größe gepulst und liefert damit eine annähernd konstante Strahlungsintensität. Mittels eines Oszilloskops kann die Höhe der Spannungspulse in Abhängigkeit von der Windungsanzahl des fluoreszierenden Lichtwellenleiters auf der Zylinderoberfläche des Prüfkörpers bestimmt werden. Der Beginn der Wicklung lag auf der Abstrahlebene der LED.

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse. Ab einer Windungszahl von ca. 11 Windungen ist kein Intensitätsgewinn mehr nachweisbar, die Dämpfung in der Faser dominiert. Das bedeutet eine Wickelhöhe von ca. 10 mm (Faserdurchmesser 0,90 mm). Daraus folgt, dass die durch den Winkel der Totalreflexion mögliche Fläche nicht ausgenutzt wird.

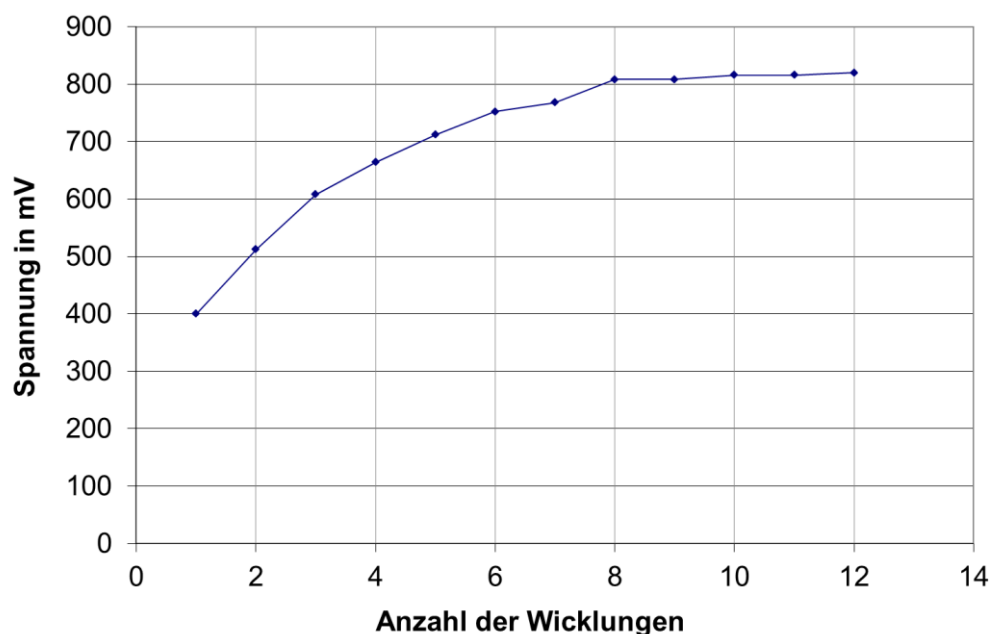


Abbildung 30: Spannungspulse in Abhängigkeit von der Windungsanzahl; FOF Typ L [81]; zylindrischer Prüfkörper mit $d=50$ mm; Diodenstrom=2,5 mA)

Da die Quelle nur bei TE-Einsatz als Punktquelle anzusehen und das Tree-/Kanalwachstum ebenfalls durch den fluoreszierenden Lichtwellenleiter zu erfassen ist, wurde die Position des fluoreszierenden Lichtwellenleiters auf der Mantelfläche empirisch ermittelt. Vorteilhaft war das Aufwickeln der ersten Lage unmittelbar unterhalb der horizontalen Ebene durch die Nadelspitze (vgl. Abbildung 29). Die weiteren Lagen wurden als geschlossene Wicklung in Richtung der Erdelektrode aufgebracht. Danach erfolgte eine Abdeckung mit weißem Papier und eine Fixierung durch eine Bandwicklung.

4.2.2 Linsenanordnungen mit fest verbundenem Transportlichtwellenleiter

Mit dieser Anordnung ist unter Umständen eine empfindlichere und breitbandigere Erfassung der Entladungen im Wellenlängenbereich von ca. 350 nm bis 2000 nm im Vergleich zur Anordnung mit fluoreszierendem Lichtwellenleiter möglich. Dazu muss der genaue Fehlerort im Prüfkörper bekannt sein. Das System wurde unter maßgeblicher

Mitwirkung des Fachbereiches Fasersensorik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung entwickelt. Es besteht aus einer Kombination von Quarzlinse mit einem Durchmesser von 250 mm (Abbildung 31). Die erste Linse wurde so angeordnet, dass der Brennpunkt in der vertikalen Fehlstellenebene des Prüfkörpers (Nadelspitze) liegt, die zweite Linse fokussiert das Licht exakt auf die Stirnfläche des fest verbundenen Transportlichtwellenleiters. Der Anschluss des Lichtwellenleiters an die Verarbeitungseinheit (Wandler) erfolgte mit einem SMA-Stecker. Das Ausrichten relativ zum Prüfkörper wurde durch Vorversuche mit Hilfe eines Laserpointers ermittelt. Als Transportlichtwellenleiter wurde ein ähnlicher Typ wie im „COLL-FIBRE-CUST“-System verwendet. Angaben zur Dämpfung sind in Abbildung 20 enthalten.

Diese Anordnung wurde im Wesentlichen wegen der zu erwartenden größeren Messempfindlichkeit zur optischen Charakterisierung der Anordnung mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern und für Untersuchungen zum Kanaleinsatz sowie –aufbau verwendet.

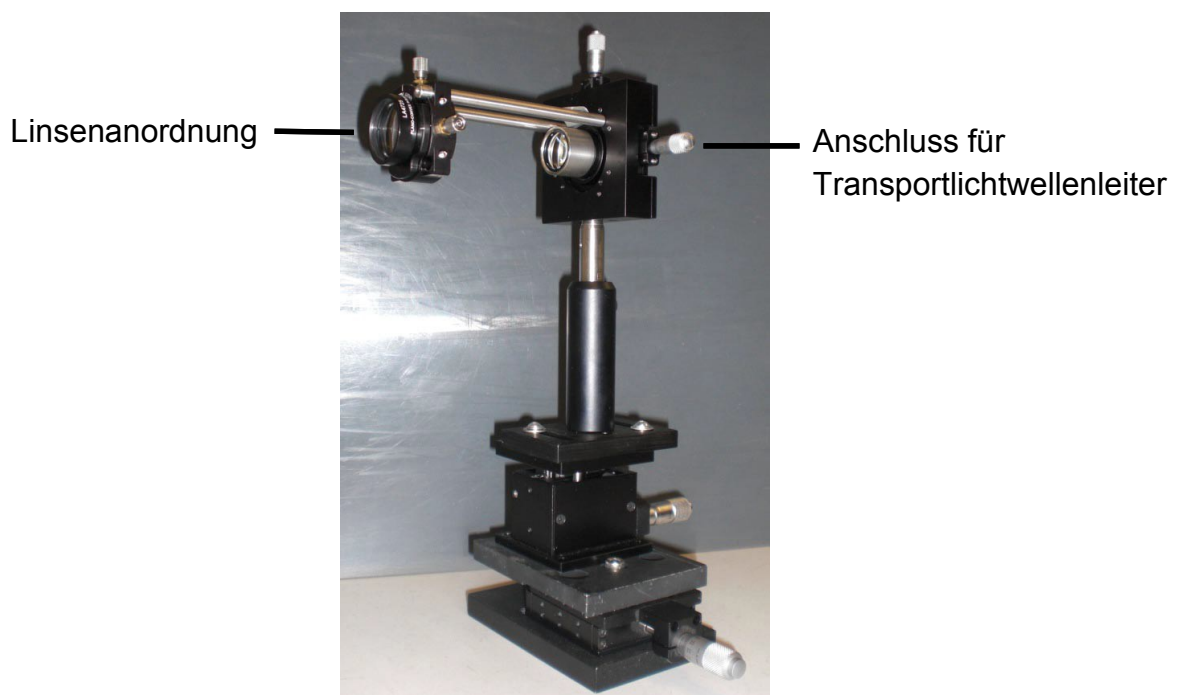


Abbildung 31: Linsensystem zur Erfassung von Lichtimpulsen (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM))

4.2.3 Wandlung der optischen Signale

Wesentliche Anforderungen an einen optisch-elektrischen Wandler bestehen eingangsseitig in der Erfassung von unter Umständen sehr geringen Lichtintensitäten in einem vorgegebenen Wellenlängenbereich und ausgangsseitig in der Wandlung der intensitätsabhängigen optischen Signale in proportionale elektrische Impulse, die von der Messsoftware des TE-Messsystems verarbeitet werden können. Auf Basis der durch die Messaufnehmer vorgegebenen Emissionsspektren wurde ein Prototyp eines Wandlers mit der Bezeichnung APD 500 von der Firma Omicron Energy Solutions GmbH hergestellt.

Der Wandler besteht aus einer Eingangsstufe (Signal-Eingangsblock), einem Stromversorgungsblock und einem Signal-Ausgangsblock. Zentraler Bestandteil der Eingangsstufe ist eine Fotodiode. Die Kriterien für die Auswahl sind:

- das Signal-Rausch-Verhältnis,
- die spektrale Empfindlichkeit,
- der Dunkelstrom und
- die Anstiegszeit.

Insbesondere das Rauschen und der Dunkelstrom beeinflussen die Empfindlichkeit, das heißt, den kleinsten detektierbaren Signalpegel. Die Intensitätskurve der ausgewählten Fotodiode war möglichst optimal an das Emissionsspektrum des verwendeten optischen Messaufnehmer Elementes anzupassen.

Der Signal-Ausgangsblock enthält die Verstärkereinheit und eine Beschaltung für einen BNC-Ausgang. Die Ausgangsspannung ist proportional zu den auf die Fotodiode auftreffenden Photonen (Lichtintensität). Besonderes Augenmerk wurde wegen der zu erwartenden kleinen Signale und der relativ hohen Störpegel der Umgebung bei Messungen außerhalb geschirmter Prüffelder auf eine effiziente Schirmung gelegt. Als Fotodiode wurde die Avalanche-Fotodiode APD S2383 auf Siliziumbasis (Firma Hamamatsu) ausgewählt, deren spektrale Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich unterhalb 800 nm liegt (siehe Abbildung 32) und das Emissionsspektrum insbesondere des verwendeten fluoreszierenden Lichtwellenleiters umfasste. Weitere Daten sind [97]:

Quanteneffizienz	: 75 % (800 nm)
Dunkelstrom	: 0,2 nA bis 2 nA
Fotoempfindlichkeit	: 0,5 A/W

Die Verwendung der Si-Avalanche-Fotodiode ermöglicht eine hohe Eingangsempfindlichkeit, Dynamik und Verarbeitungsgeschwindigkeit.

Die gewählte Bandbreite von 500 kHz stellt einen Kompromiss zwischen Impulsaufösezeit (Puls resolution time) und Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-noise ratio (SNR)) dar. Jede pulsförmige Lichtemission eines einzelnen TE-Ereignisses wird in einen elektrischen Impuls von entsprechender Breite und variabler Impulshöhe, proportional zur Lichtintensität umgewandelt und ist damit durch die Empfangsstation des MPD-Systems auswertbar. Die sehr kurze Zeitdifferenz zwischen optischem Eingangs- und elektrischem Ausgangssignal (typisch 400 ns) ermöglichte die Korrelation zwischen optischen und elektrischen Signalen durch das Messsystem. Durch die synchrone Mehrkanalmessung wurde eine „Puls-Puls-Korrelation“ ermöglicht, so dass die optische Lichtintensität in Bezug auf die scheinbare Ladung ausgedrückt werden kann.

Eingangsseitig wurden die Transportlichtwellenleiter über einen Stecker (SMA 905) mit dem Gerät verbunden werden. Die erzeugten elektrischen Impulse wurden ausgangseitig über ein BNC-Kabel an das Empfangsgerät des TE-Messsystems weitergeleitet und in gleicher Weise zu den vom elektrischen Messkanal erfassten Impulsen mit eingestellten Filtern zur USB-Station übertragen. Die Bereitstellung der Versorgungsspannung durch Akkus ermöglicht einen netzunabhängigen Betrieb.

Lichtintensive Signale können zur Übersteuerung des Wandlers, ggf. auch zur Zerstörung der Fotodiode führen, da keine Schutzbeschaltung vorgesehen war. Durch Einfügen von Neutraldichtefiltern (Graufilter) in den optischen Strahlengang des Linsensystems kann diese Übersteuerung vermieden werden, ohne die Wellenlängen zu verändern. Allerdings wird durch diese Maßnahme die vom Sensor angezeigte Anzahl der Impulse beeinflusst.

Bei Verwendung der fluoreszierenden Faser Typ L als Messaufnehmer (Emissionsmaximum bei 625 nm, siehe Abbildung 24 b) und einer Verstärkung von $M=100$ werden etwa 56 % der maximalen Empfindlichkeit erreicht (Abbildung 32).

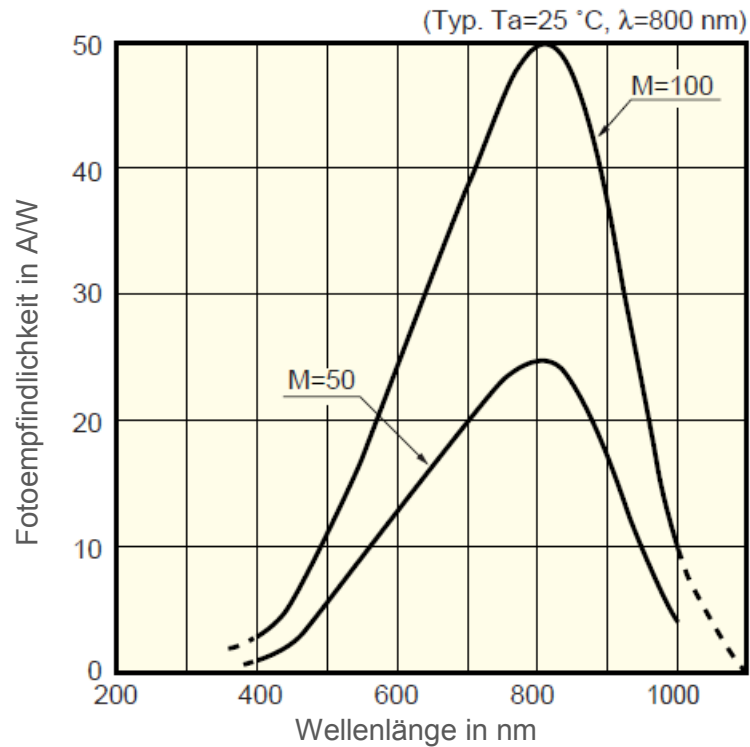


Abbildung 32: Spektrale Empfindlichkeit über der Wellenlänge für die Avalanche-Fotodiode APD S2383 (M=100)

Neben dem optisch-elektrischen Wandler APD 500 wurde auch ein kommerziell verfügbarer Photonen-zähler des Typs id100 der Fa. id Quantique, Schweiz erprobt. Hinsichtlich spektraler Empfindlichkeit, Dunkelimpulsrate und Ansprechschwelle ergaben sich ähnliche Ergebnisse. Ausgangsseitig wurden Spannungsimpulse von 2 V und 10 ns Breite erzeugt die mittels eines Impulszählers angezeigt werden können.

5 Zeitsynchrone optische und elektrische Erfassung von Entladungsprozessen

Für die in der Aufgabenstellung formulierten experimentellen Untersuchungen sowie insbesondere die Erprobung der optischen Messeinrichtung mit fluoreszierendem Lichtwellenleiter wurde ein Standardmesskreis für TE-Messungen nach IEC 60270 [10] mit Parallelauskopplung der Stromimpulse verwendet. Als Messsystem wurde das Mehrstellen-TE-Messsystem verwendet, das um die in Kapitel 4 beschriebenen optischen Kanäle erweitert wurde. Das Mehrstellen-TE-Messsystem MPD 540/600 ist in der Hochspannungsmess- und -prüftechnik zur Messung von Teilentladungen nach IEC 60270 eingeführt. Die Funktionsweise des Messsystems für TE-Messungen kann als bekannt vorausgesetzt werden (siehe Bedienungsanleitung Omicron [98])

Die grafische Oberfläche im Expertenmodus ist in Abbildung 33 dargestellt.

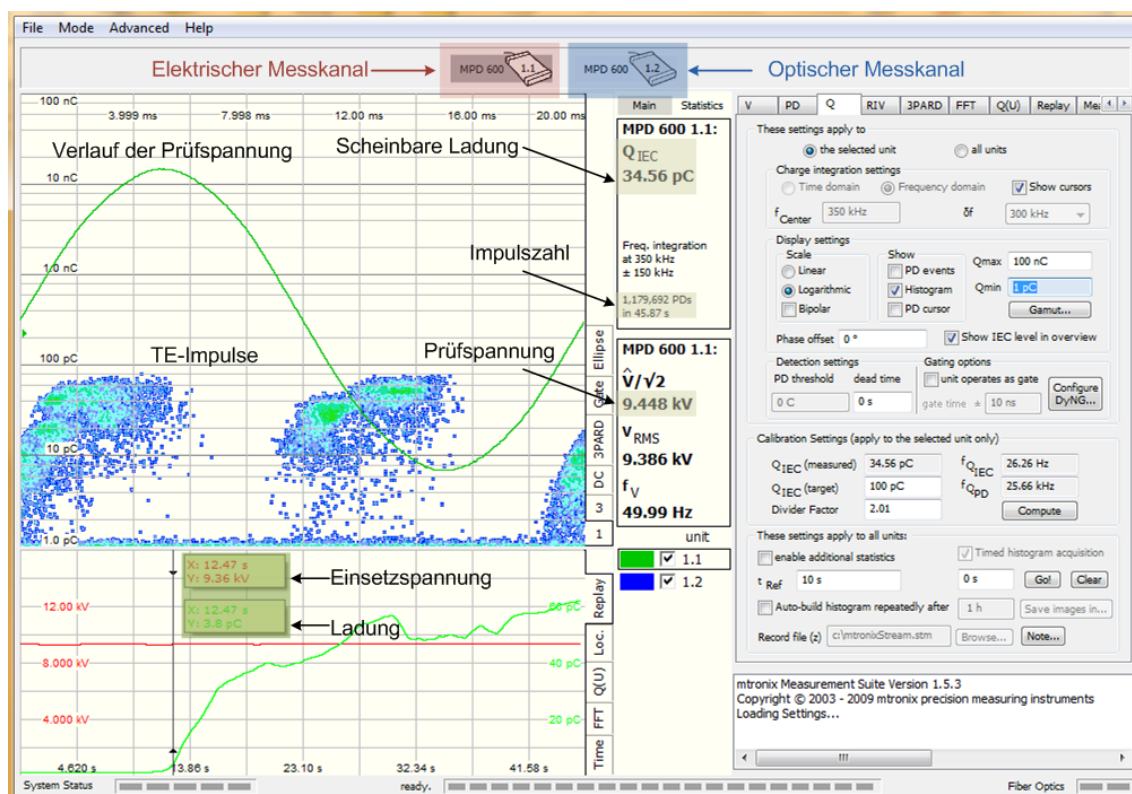


Abbildung 33: Graphische Oberfläche verwendeten Messsoftware des TE-Messsystem MPD 540/600 der Fa. OMICRON Energy Solutions GmbH

In klassischer Weise werden bei einer TE-Messung die Intensität (scheinbare Ladung) in Abhängigkeit der Phasenlage der treibenden Spannung (Ladungshöhe und Häufigkeit), die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit und die TE-Ein- und Aussetzspannungen erfasst. Weiterhin werden die Beanspruchungsspannung und die Frequenz registriert.

Die Visualisierung der Daten erfolgt in phasenaufgelösten Histogrammen, den PRPD³⁶-Diagrammen. Während einer vorher festgelegten Messzeit werden alle TE-Impulse aufgezeichnet und nach dem Phasenwinkel ihres Auftretens, ihres Amplitudenwertes und der Häufigkeit ihres Auftretens sortiert. Das Resultat wird dann in Form eines

³⁶ PRPD = Phase resolved partial discharge. Das PRPD-Diagramm wird als phasenaufgelöstes Histogramm bezeichnet.

farbkodierten Musters dargestellt, in dem auch die physikalische Struktur des stochastischen Entladungsprozesses sichtbar wird.

Ein Signaleinsatz ist durch das Erfassen von Impulsen oberhalb des Grundstörpegels in diesen Histogrammen erkennbar.

Ergänzend kann die kleine Scope-Ansicht für die Erfassung des Signaleinsatzes verwendet werden, die im linken unteren Bildteil von Abbildung 33 dargestellt ist. Eine entsprechende Konfigurierung erlaubt die Darstellung von Spannung und Ladung während einer voreingestellten Aufnahmedauer (Stream).

Neben diesen Darstellungen sind auch Darstellungen anderer geeigneter TE-Parameter möglich, wie beispielsweise der Impulsabstand in Abhängigkeit von der Impulsintensität [64].

Das Messsystem ermöglicht die zeitsynchrone Erfassung, Verarbeitung und Darstellung der optisch ermittelten und gewandelten sowie von elektrisch gemessenen TE-Impulsen. Dies ist für die Interpretation der optischen Daten von wesentlicher Bedeutung.

Für die Messungen wurden die elektromagnetisch abgeschirmten und vollständig abdunkelbaren Prüffeldern an der Beuth HS und ergänzend im IPH genutzt. Die technischen Daten der verwendeten Hochspannungseinrichtungen (Sperrimpedanz, Transformator T, Koppelkondensator C_k) können aus den Tabellen 9 und 10 entnommen werden.

Tabelle 9: Technische Daten der Anlagen für Prüffeld 1

Bauteil/Eigenschaft	Bezeichnung und Größe
Sperrimpedanz	2,4 k Ω
Koppelkondensator	1200 pF
TE-Einsetzspannung des Aufbaus	> 35 kV (begrenzt durch die HS-Geräte)
Grundstörpegel	<1 pC
Spannungssteigerung	manuell (ca. 0,5 kV/s)
max. Prüfwechselspannung	50 kV

Tabelle 10: Technische Daten der Anlagen für Prüffeld 2

Bauteil/Eigenschaft	Bezeichnung und Größe
Sperrimpedanz	5 k Ω
Koppelkondensator	100 pF
TE-Einsetzspannung des Aufbaus	abhängig von Komponenten, jedoch immer >40 kV
Grundstörpegel	<1 pC
Spannungssteigerung	manuell, Stellmotor, ≥ 2 kV/s
Max. Prüfwechselspannung	200 kV
Durchschlagschnellabschaltung	vorhanden

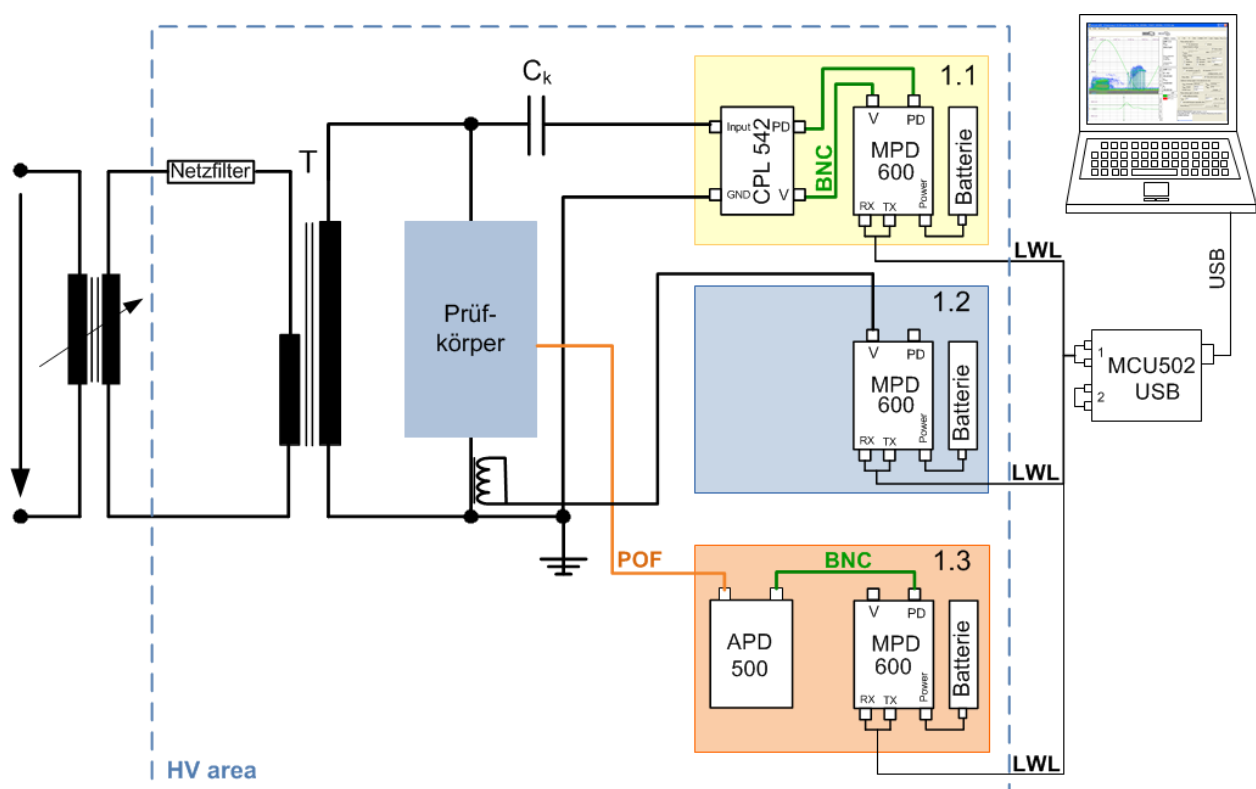
Die Messschaltung mit einer optischen Messeinrichtung (optischer Messkanal) und zwei elektrischen Messkanälen zeigt Abbildung 34, die Messschaltung mit Kamerasystem ist in Abbildung 37 skizziert.

Neben dem elektrischen Messkanal mit Auskopplung der Stromimpulse über einen Ankoppelvierpol (AKV) wurde ergänzend ein zweiter elektrischer Messkanal mit induktiver Auskopplung der Stromimpulse auf Erdpotential (Ferrit) eingesetzt. Dieser Messkanal wird insbesondere bei Vor-Ort-Messungen von Teilentladungen an verlegten Kabelanlagen verwendet. Die mit diesem Messkanal ermittelten Ergebnisse wurden gleichfalls mit den Ergebnissen der optischen Messkanäle verglichen.

Mittels der Software wurden die Mittenfrequenz (f_{center}) und die Bandbreite (Δf) des MPD-Systems voreingestellt:

			$f_{\text{center}}/\text{kHz}$	$\Delta f/\text{kHz}$	
elektrischer Kanal	MP 1.1 (AKV)	:	350	300	(nach IEC 60270)
elektrischer Kanal	MP 1.2 (Ferrit)	:	3500	1000	(empirisch festgelegt)
optischer Kanal	MP 1.3	:	205	100	(empirisch festgelegt)

Die Bezeichnungen MP 1.1 und MP 1.2 für die elektrischen Messkanäle (Auskopplung über Ankoppelvierpol und Ferrit) und MP 1.3 für den optischen Messkanal mit FOF-Optik oder Kollimator-Optik (Abbildung 34) waren von der jeweiligen Anzahl der Messkanäle abhängig und wurden vom TE-Messsystem vorgegeben.



- MP 1.1 : elektrische Messung, Auskopplung über Ankoppelvierpol (AKV)
- MP 1.2 : elektrische Messung, Auskopplung über Ferrit
- MP 1.3 : optische Erfassung (FOF-Optik oder Kollimator-Optik)

Abbildung 34 Messschaltung zur optischen und elektrischen Signalerfassung

Die vom Messsystem aufgezeichneten und ausgewerteten Daten der optischen und elektrischen Kanäle sind

- PRPD-Diagramme,
- scheinbare Ladung (Q_{IEC}),
- Impulse pro Zeiteinheit (Impulsrate) sowie
- die Beanspruchungsspannung mit Frequenz.

Die vom optisch-elektrischen Wandler ausgegebenen elektrischen Impulse der optischen Eingangssignale wurden von der Software des TE-Systems als Ladungsimpulse interpretiert und sind als optisches Ladungsäquivalent zu betrachten. Dieses wird im Folgenden als optische Intensität (I_{opt}) bezeichnet und stellt keine kalibrierte Größe dar, da keine definierten Lichtimpulse für die Einspeisung am Ort der Teilentladungen in den Prüfkörpern erzeugt werden konnten. Daher wurden alle mit den optischen Kanälen ermittelten Werte (I_{opt}) in „*arbitrary units*“ (a.u.) angegeben. Für einen Ablesewert von 1 pC wurde das Äquivalent von 1 a.u. verwendet und der Maßstabsfaktors $k_A = 1$ im Messsystem eingestellt.

Die Spannungs- und Ladungskalibrierung der elektrischen Messkreise erfolgte entsprechend Herstellervorgaben und ist nachfolgend zusammengefasst [98].

Spannungskalibrierung

Durchgeführt wurde ein Spannungsabgleich zwischen der Messsoftware des TE-Messsystem und einem kalibrierten Digitalvoltmeter. Dazu genügen zwei bis drei eingestellte Spannungswerte und das Einfügen der angezeigten Effektivwerte des Voltmeters in die Software. Dies ist ausreichend für die Bestimmung aller weiteren Spannungswerte.

Ladungskalibrierung

Nach dem Einsetzen des jeweiligen Prüfkörpers in die Aufnahme der Messschaltung wurde für die komplette Messschaltung eine Ladungskalibrierung im spannungslosen Zustand durchgeführt, d. h. es wurde der Maßstabsfaktor zur Messung der scheinbaren Ladung ermittelt. Das bedeutet, dass durch Einspeisen einer bekannten Ladung q_E mittels eines Kalibrators (typisch 10 pC) die scheinbare Ladung auf die am Ankoppelvierpol messbare Ladung q_m kalibriert wird. Der Kalibrierfaktor k_A (Divider Factor) der Messschaltung ergibt sich aus dem Verhältnis der eingespeisten Ladung q_E und der am Ankoppelvierpol messbaren Ladung q_m :

$$k_A = \frac{q_E}{q_m} \quad (13)$$

Um eine hohe Messempfindlichkeit und einen großen Störabstand zu erreichen sollte der Kalibrierfaktor möglichst nahe eins sein.

Der Grundstörpegel³⁷ in den geschirmten Prüffeldern lag prüffeldabhängig im Bereich von 300 fC bis 1 pC.

Die TE-Freiheit wurde unter Verwendung der Kalibrierkörper inklusive Messaufnehmern überprüft. Die Anordnung der Prüfkörper im Messaufbau ist aus Abbildung 35 zu entnehmen.

Die in Abbildung 36 dargestellten Ergebnisse der Messungen in Abhängigkeit von der Spannung in einem bis 35 kV teilentladungsfreien Prüfaufbau ergaben, dass die Positionierung der Kollimator-Optik mit Fokussierung auf die vertikale Ebene durch die Kugelmitte der Hochspannungselektrode des kubischen Kalibrierkörpers (Abstand zum Prüfkörper ca. 15 mm) keine zusätzlichen Teilentladungen verursacht. Analoge Ergeb-

³⁷ Als Grundstörpegel wird die Summe aller Störquellen bezeichnet.

nisse wurden mit der FOF-Optik ermittelt. Dazu wurde der fluoreszierende Lichtwellenleiter auf die Mantelfläche eines zylindrischen Kalibrierkörpers aufgewickelt und befestigt.

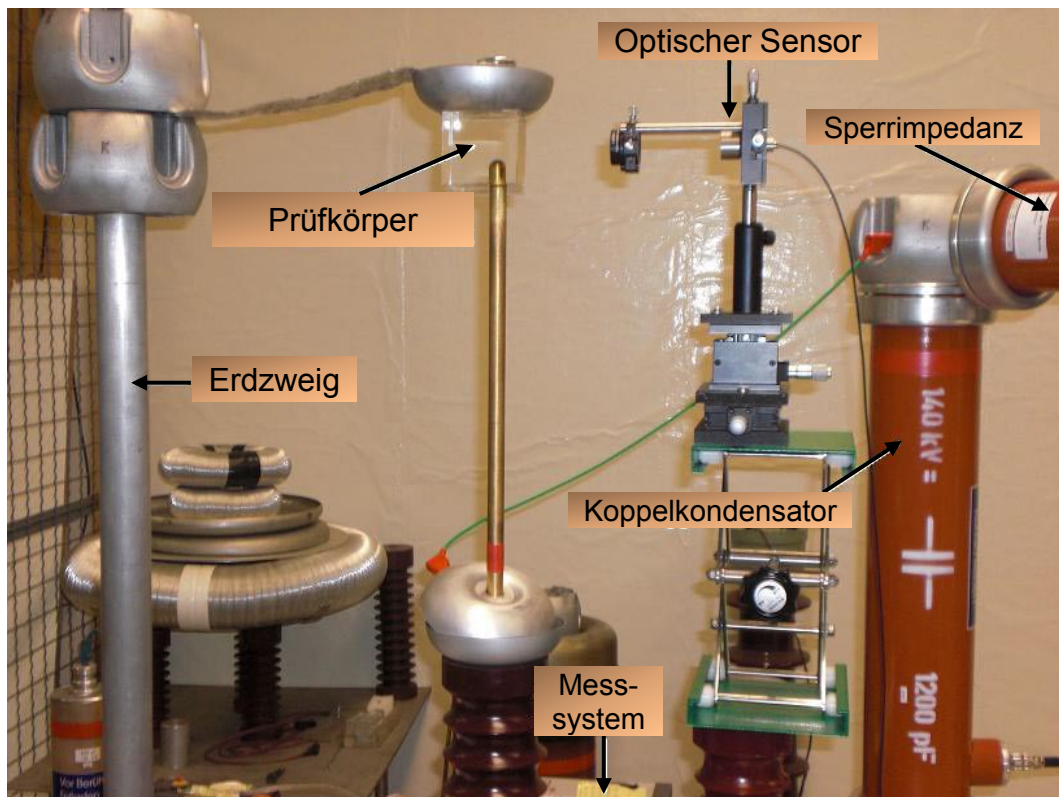


Abbildung 35: Anordnung der Prüfkörper in der Messschaltung

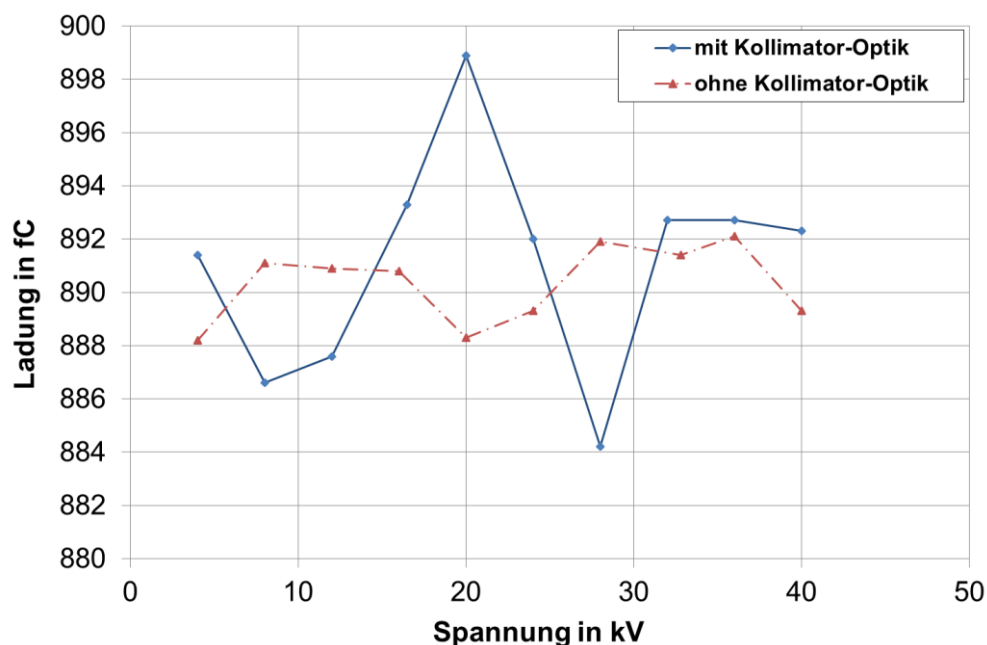


Abbildung 36: Vergleich der scheinbaren Ladungen mit und ohne Kollimator-Optik

Durch die optischen Messkanäle wurden auch solche Lichtsignale registriert, die durch Restlichtquellen im abgedunkelten Prüffeld (unter anderem Tastatur- und Bildschirmbe-

leuchtung) entstehen. Diese Lichtsignale tragen zum äquivalenten Grundstörpegel dieser Messkanäle bei. Vor jeder Messung wurde der Grundstörpegel in einer Messschaltung nach Abbildung 34 experimentell bestimmt. Aus den Ergebnissen folgt, dass bei einer Vermeidung von Restlichtquellen mit der Kollimator-Optik ein äquivalenter Wert von 2,0 a.u. bis 2,4 a.u. und mit der FOF-Optik ein Wert von 2,5 a.u. bis 2,9 a.u. erreichbar ist.

Die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung des Kanaleinsatzes und des Kanalaufbaus wurden mit stufenförmig steigender und konstanter Spannungsbeanspruchung durchgeführt.

5.1 Stufenförmig steigende Spannungsbeanspruchung

Das Ziel dieser Messungen war das möglichst sensitive Erfassen des Einsetzens von optischen und elektrischen Signalen in Abhängigkeit von der Höhe der Wechselspannung. Daraus ergeben sich Aussagen zur erreichbaren Messempfindlichkeit einer optischen Erfassung in Bezug auf die simultane elektrische Messung und zu TE-Einsatz- und Aussetzspannungen im Silikonmaterial bei unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen. Der PD-Eingang wurde durch die Einstellung „Auto Gain“ gesteuert.

Verwendet wurden zylindrische und kubische Prüfkörper mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern und Linsensysteme als sensorische Elemente im optischen Messkanal (FOF-Optik und Kollimator-Optik). Die Messschaltung ist in Abbildung 34 gezeigt.

Gemäß VDE0303 [88] und DIN EN 60270 [10] ist der „Ramp Test“ eine genormte Prüfmethode unter anderem zur Bestimmung der TE-Einsatzspannung von Isolierstoffen. Bei diesem Verfahren wird die Prüfspannung ausgehend von 0 kV bis zum Einsetzen von Teilentladungen mit einem Ladungsinhalt oberhalb des Grundstörpegels gesteigert.

Die Spannungssteigerung wurde in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Prüfkörpern empirisch in Vorversuchen bestimmt. Bis zu einem festgelegten Spannungswert betrug die Stufenspannung 1 kV/45 s; danach bis zum Einsetzen von Signalen in den elektrischen und optischen Kanälen 0,5 kV/45 s. Dabei wurde jeweils ein Stream³⁸ von 45 s Dauer aufgezeichnet. Die Rauschgrenzen wurden auf einen minimalen Wert herabgesetzt ($PD_{\text{threshold}}$).

Tritt der Signaleinsatz während der Stream-Aufzeichnung auf, ist die Einsatzspannung gegeben. Liegt der Signaleinsatz zwischen zwei Spannungsstufen (0,5 kV), so wurde als Einsatzspannung der letzte Stufenwert plus 0,25 kV festgelegt.

Nach der Ermittlung der TE-Einsatzspannung durch den elektrischen und die optischen Kanäle wurde die Spannung in Stufen von 0,5 kV bis zum Aussetzen der Signale abgesenkt und die Teilentladungsaussetzspannung ermittelt. Es wurde wieder jeweils ein Stream von 45 s Dauer aufgezeichnet und analog ausgewertet.

5.2 Konstante Spannungsbeanspruchung

Durch eine zeitsynchrone optische und elektrische Signalerfassung wurde die Entwicklung der Teilentladungsaktivität bei konstanter, empirisch festgelegter Spannungsbeanspruchung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer und weiteren Beanspruchungsparametern aufgezeichnet. Die Festlegung der Spannungshöhe erfolgte aus der Überlegung, ausgedehnte Treestrukturen nach einer vertretbaren Beanspruchungs-

³⁸ Stream bezeichnet hier die Aufzeichnung der Messwerte für eine vorgegebene Messdauer (45 s).

dauer zu erzeugen. Diese Herangehensweise unterschied sich von Untersuchungen zu Schädigungsmechanismen bei Langzeitbeanspruchung, bei denen in der Regel eine relativ niedrige elektrische Beanspruchung im Bereich der Einsetzspannung gewählt wird.

Die Messungen schlossen sich unmittelbar an die Messungen mit stufenförmig steigender Spannungsbeanspruchung an, wobei der gleiche Messkreis (siehe Abbildung 34) verwendet wurde. Sie erforderten aber eine veränderte Voreinstellung des MPD-Systems. Die Aussteuerung des PD Eingangs erfolgte manuell mit konstanter $Q_{\min}$ und $Q_{\max}$ Vorgabe.

Die Einstellung des Messsystems erfasste als untere Nachweisgrenze Entladungen nach Erreichen des jeweils festgelegten Spannungswerts und als obere Grenze Entladungen im Bereich von 10 nC bis 50 nC. Dazu wurde die Spannung bis zu dem festgestellten Spannungswert mit einer Geschwindigkeit von 0,5 kV/s gesteigert, anschließend konstant gehalten und ein erster Stream von 45 s Dauer aufgezeichnet. Nach festgelegten Zeiten wurden weitere Streams/Screenshots der elektrischen und optischen Kanäle bis zu einer Gesamtdauer von 300 min abgespeichert. Der jeweilige Prüfkörper wurde in der Regel nicht bis zum Durchschlag belastet.

Für Prüfkörper ohne makroskopische Grenzflächen (Abschnitt 6.1) wurde ergänzend die TE-Aussetzspannung nach der Spannungsbeanspruchung bestimmt. Während der kontinuierlichen Spannungssenkung wurden ebenfalls Streams aufgezeichnet und die TE-Aussetzspannung unter Verwendung der kleinen Scope-Ansicht ermittelt (siehe Abbildung 40).

5.3 Einsatz eines Kamerasystems zur Bewertung von Kanalstrukturen

Speziell für Untersuchungen zum Kanalaufbau wurde zur bildlichen Darstellung des Tree-/Kanalwachstums ein Kamerasystem verwendet. Die zeitsynchrone Steuerung von Kamera³⁹- und TE-Messsystem, z. T. auch mit optischen Kanälen, ermöglichte die Aufzeichnung der Ausbildung der Kanalstrukturen synchron zur zeitlichen Entwicklung der elektrisch und ggf. optisch messbaren Signale. In Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer wurden PRPD-Diagramme und Bildfolgen zur Ausbildung der Kanalstrukturen aufgezeichnet (Abbildung 37). Aus den Bildfolgen wurde anschließend die Wachstumsgeschwindigkeit der Trees ermittelt.

Verwendet wurde die Kamera Canon EOS 40 D. Als Objektiv wurde der Typ Sigma-Telezoom 150 mm bis 500 mm, F 5-6,3 bei einer Vorzugseinstellung 500 mm verwendet. Die Kamera wurde mittels PC (Software EOS Utilities) gesteuert.

Die Einstellungswerte waren:

- Objektiv: Blende offen (F 6,3)
- Belichtungszeit: 8 s (Erfahrungswert)
- ISO-Einstellung: 1600

Vor Beginn der Messungen zum Kanalwachstum wurden die TE-Einsetz- und Aussetzspannungen mit dem elektrischen Messkanal bestimmt.

Da die Kameraaufzeichnung und die elektrische Messung durch jeweils einen Laptop gesteuert wurden, waren beide Rechner vor Beginn der Messungen zu synchronisieren und die Messbereichseinstellungen von Hand vorzunehmen. Damit wurde erreicht, dass während der Messzeit keine Messbereichsumschaltungen geräteintern durchgeführt wurden, die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwerten. Die Messbereichsein-

³⁹ Kamerasystem bezeichnet hier ein Gerät zur Visualisierung der Lichtemissionen, mit dem die Entladungsaktivitäten detektiert und dargestellt werden. Eine Messung erfolgt mit diesem System nicht.

stellung am MPD-Messsystem erfolgte wieder manuell mit konstanter $Q_{\min}/Q_{\max}$ -Vorgabe.

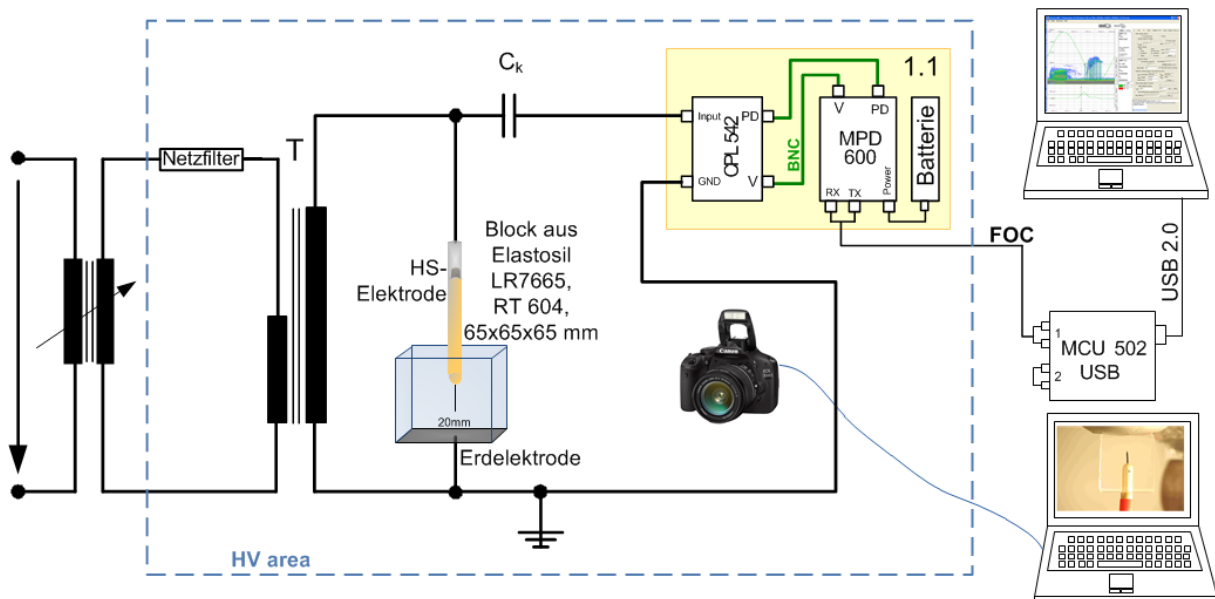


Abbildung 37: Messschaltung zur Aufzeichnung des Tree-/Kanalwachstums mittels Kamerasystem und der dazu zeitsynchronen elektrischen TE-Messung

Die Einstellung der Bildfolge und die Erfassung der PRPD-Diagramme wurde so vorgenommen, dass alle 15 s synchron ein Einzelbild und ein PRPD-Diagramm mit den für die Auswertung erforderlichen Messwerten vom jeweiligen System abgespeichert wurden. In bestimmten Zeitabständen wurde der Prüfkörper kurz beleuchtet und ein Einzelbild von der Kamera aufgenommen. Nach Erreichen der vorher empirisch festgelegten Zielspannung erfolgte die Abspeicherung der optischen Bilder und der PRPD-Diagramme, gleichzeitig wurden damit auch die scheinbare Ladung Q_{IEC} und die Anzahl der Impulse/s erfasst.

5.4 Spezifische Besonderheiten einer optischen TE-Erfassung

Für die zeitsynchrone optische und elektrische Signalerfassung wurde das digitale Mehrstellen-TE-Messsystem MPD 540/600 mit elektrischen und optischen Messkanälen verwendet. Der elektrische Kanal bestand im Wesentlichen aus einem Ankoppelvierpol CPL 542, dem Messgerät MPD 540/600 sowie dem zugehörigen Übertragungssystem (Verbindungsleitungen). Das TE-Messgerät ist entsprechend DIN EN 60270:2001 [10] typgeprüft und erfüllt hinsichtlich Maßstabsfaktor, Linearität, Impulsauslösezeit und weiteren Messgrößen die Standardanforderungen. Die daraus resultierende erweiterte Messunsicherheit beträgt $\pm 10\%$ oder ± 1 pC, je nachdem, welcher Wert größer ist. Weitere Angaben sind in der Bedienungsanleitung [98] enthalten.

Vor jeder TE-Messung erfolgte im vollständigen Messkreis die Bestimmung des Maßstabsfaktors (Kalibrierfaktor, Divider Factor) k_A mittels eines Kalibrators (CAL 542).

Die optischen Kanäle bestanden aus einem fluoreszierenden Lichtwellenleiter und einer Linsenordnung jeweils in Verbindung mit einem Kunststoff-Lichtwellenleiter und einem optisch-elektrischen Wandler und angeschlossenem Messgerät MPD 600. Im Vergleich zum elektrischen Messkreis war keine direkte Kalibrierung bezüglich scheinbarer

Ladung möglich. Weiterhin müssen die sich von der Spitzenelektrode ausbreitenden optischen Signale (Photonen) unterschiedliche Materialien durchlaufen und Grenzflächen durchdringen (speziell bei Linsenarrangements), bevor sie vom optisch-elektrischen Wandler erfasst und in elektrische Signale umgeformt werden.

Die maximale Materialdicke von der Spitzenelektrode bis zur äußeren Wand der Prüfkörper betrug 25 mm. Die ermittelten, wellenlängenabhängigen Transmissionsgrade im Bereich um 85 % für die verwendeten transparenten Silikonelastomere bedeuten relativ geringe Streu- und Absorptionsverluste (siehe Abbildungen 8 und 9), insbesondere im Vergleich mit Polyethylen [33].

Angaben zu den spezifischen Lichtwellenleitergrößen wie Transmissionskoeffizient an der Faseroberfläche, Umwandlungswirkungsgrad sowie Übertragungsverlust der verwendeten Faser sind auch herstellerseitig nicht verfügbar. In der optischen Messanordnung war ein Transportlichtwellenleiter mit dem fluoreszierenden Lichtwellenleiter verbunden, so dass Übertragungsverluste im Transportlichtwellenleiter von ca. 0,25 dB/m (PMMA-Faser) und für den Koppler von 1 dB bis 1,5 dB zu beachten sind. Eine Abschätzung tolerierbarer Werte für die längenabhängige optische Dämpfung von fluoreszierenden Lichtwellenleitern in Abhängigkeit von der Lichtleistung an einem Ende wurden von Muto [78] angegeben, allerdings für einen speziellen fluoreszierenden Lichtwellenleiter. Danach ist für eine Sensorlänge von 1 m ein Wert von 10 dB/m und für eine Länge von 50 m ein Wert von nur 0,1 dB/m tolerierbar. Die in Abschnitt 4.2.1.3 angegebenen Werte eigener Messungen ergaben für den fluoreszierenden Lichtwellenleiter vom Typ L einen Wert von ca. 6 dB/m für die längenabhängige Dämpfung, wobei für die Prüfkörper mit 50 mm Durchmesser Wickellängen von <2 m ermittelt wurden. In Abhängigkeit von der Dotierung sind bereits fluoreszierende Lichtwellenleiter mit Werten von ≤ 2 dB/m kommerziell verfügbar.

Bei Verwendung einer Linsenarrangement als sensorisches Element entstehen Verluste durch Reflexion an der Grenzfläche Glas-Luft, durch Absorption im Glas der Linse sowie durch ggfs. vorhandene Luftstrecken. Bei Verwendung eines Transportlichtwellenleiters addiert sich dazu die längenabhängige Dämpfung im Lichtwellenleiter von ca. 0,25 dB/m sowie der Verlust durch die Koppelstelle von 1 dB bis 1,5 dB. Zu beachten ist weiterhin, dass die erste Linse nur einen bestimmten Raumwinkel erfassen kann. Nach Abschätzungen liegt der Transmissionsgrad für Quarzglas im Bereich um 95 % und für den Reflexionsverlust an den Grenzflächen Glas-Luft kann eine Größe von 3 % des einfallenden Lichts angenommen werden [33]. Von dem in einen Isolierstoffkörper aus transparenten/transluzenten Material mit beispielsweise einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung erzeugten und in den Raumwinkel $4 \cdot \pi$ emittierten Photonen erreicht stets nur ein geringer Anteil den optischen Detektor. Nach Abschätzungen von Pietsch [33] unter Verwendung kubischer Prüfkörper und einer Linsenarrangement ohne Transportlichtwellenleiter erreichen ca. 0,13 % bis 0,4 % den jeweiligen Detektor (Photonenzähler und Gitterspektrograph).

Die Detektionseigenschaften der beschriebenen Lösungen für die optische Signalerfassung wurden experimentell durch zeitsynchron durchgeführte elektrische Teilentladungsmessungen bestimmt. Aussagen zur Ansprechschwelle (TE-Einsatzspannung) sowie auch zur TE-Aussetzspannungen der optischen Kanäle wurden mit stufenförmiger Spannungssteigerung und -absenkung an Prüfkörpern mit unterschiedlichen Fehlstellen ermittelt. Die Bestimmung weiterer Eigenschaften wie Phasenlage zwischen Hochspannung und dem optisch detektierten Signal, mögliche Korrelationen zwischen scheinbarer Ladung und optischer Intensität sowie der Impulsrate erfolgte zeitabhängig bei konstanter Beanspruchungsspannung.

Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Abschnitten 6.1 bis 6.3 aufgeführt.

Eine ähnliche Vorgehensweise wird zum Nachweis der Messempfindlichkeit des UHF-Messverfahrens beschrieben, da eine Kalibrierung dieses Verfahrens nicht möglich ist [103]. Für eine Vergleichsmessung wurde parallel zur UHF Messung eine konventionelle Messung nach IEC 60270 durchgeführt und ein Zusammenhang zwischen den Messwerten nach der UHF-Messtechnik und der scheinbare Ladung mittels eines „regelbaren“ künstlichen Defekts bei gleich bleibenden Messparametern ermittelt.

5.5 Korrelation zwischen elektrisch und optisch ermittelten Messwerten

Die synchron bei konstanter Spannungsbeanspruchung durch elektrische und optische Kanäle ermittelten scheinbaren Ladungen/optische Intensitäten und Impulsraten in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer wurden auf Korrelationen untersucht.

Ein häufig verwendetes Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zeitgleichen Messwerten zweier verschiedener Merkmale (scheinbare Ladung und optische Intensität und elektrische und optische Impulsraten) ist der dimensionslose Korrelationskoeffizient nach Pearson [100], [101]. Er kann Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen. Bei einem Wert von $|r| = 1$ besteht ein vollständiger Zusammenhang zwischen den betrachteten Merkmalen. Wenn der Wert des Korrelationskoeffizienten gegen Null geht, existiert keine lineare Abhängigkeit der Messwerte. Für Zwischenwerte gelten die in der Literatur angegebenen Festlegungen zur Einschätzung der Korrelation [100]:

- $|r| < 0,5$ schwacher linearer Zusammenhang
- $0,5 \leq |r| < 0,8$ mittlerer linearer Zusammenhang
- $|r| \geq 0,8$ großer linearer Zusammenhang

6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen beinhalteten eine umfassende Erprobung der unter praxisnahen Gesichtspunkten konzipierten optischen Messeinrichtungen mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern an drei unterschiedlich gestalteten und vorbehandelten Prüfkörpergruppen sowie an Modellen eines 20 kV Aufschiebendverschlusses. An denselben Prüfkörpergruppen erfolgten die Untersuchungen zum Kanaleinsatz sowie Kanalaufbau. Die Ergebnisse werden getrennt für die einzelnen Gruppen in den Abschnitten 6.1 bis 6.3 dargestellt, die an Modellen eines 20 kV Aufschiebendverschlusses in Abschnitt 6.4.

Ergänzende Erkenntnisse zum Entladungsgeschehen bietet eine zeitaufgelöste Analyse der mit den elektrischen und optischen Kanäle erfassten Impulse in Abhängigkeit von der Phasenlage der treibenden Spannung („Pulssequenzanalyse“). Diese wird nachfolgend als POT (Peak over Time)-Analyse bezeichnet, um eine Abgrenzung zu der von Patsch und Hoof ([66], [67]) etablierten PSA-Analyse zu gewährleisten. Ergebnisse derartiger Analysen für Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen, eingebettet in Polyethylen und Epoxidharz, ergaben ein Anwachsen der Impulshöhen mit der Phase der anliegenden Spannung, während die Impulsanzahl nicht mit der steigenden Zahl von Treeseitenkanälen anwächst [59], [70], [71]. Die Abbildung 38 zeigt ein Beispiel. Ein sich davon unterscheidendes Verhalten zeigen Hohlräume vor der Nadelspitze (Abbildung 39).

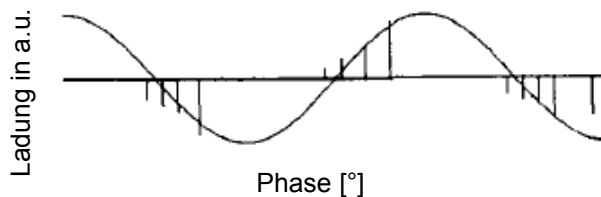


Abbildung 38: POT-Analyse eines elektrischen Tree vor der Nadel einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung [70]

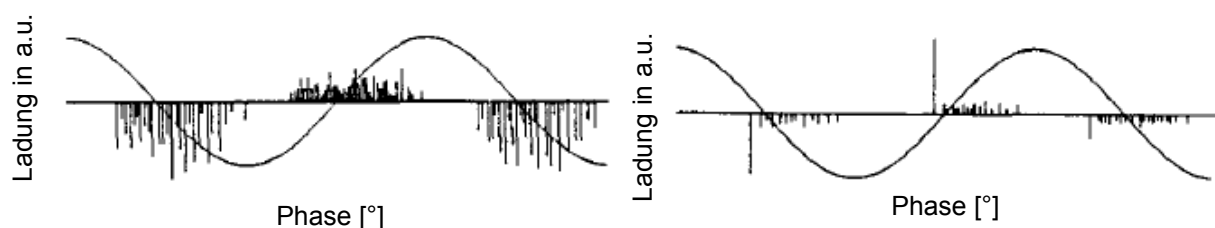


Abbildung 39: POT-Analyse eines Hohlraumes vor der Nadel einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung; Beginn der Beanspruchung (links) und längere Beanspruchungsdauer (rechts) [70]

6.1 Prüfkörper mit Nadel-Platte-Elektrodenanordnung

Die Nachbildung von leitenden Fehlstellen in Stresskonen sowie Muffenkörpern von Hochspannungsgarnituren erfolgte in einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung mit im Isolierstoff (Silikonelastomer) eingegossener Nadelelektrode auf Hochspannungspotential (siehe Abschnitt 3.3). Die Untersuchungsziele beinhalteten eine umfassende Erprobung der optischen Entladungserfassung und das Erhalten von Erkenntnissen zum Kanaleinsatz und –aufbau in transparenten Silikonelastomeren.

6.1.1 Ergebnisse bei stufenförmiger Spannungssteigerung (Kanaleinsatz)

Die vorbehandelten Prüfkörper der Prüfkörpergruppe 2 (evakuiert) und 3 (evakuiert und mit Stickstoffgas beaufschlagt) wurden erst unmittelbar vor Messbeginn dem Vakuumschrank und der Stickstoffatmosphäre entnommen und in die Messschaltung eingesetzt.

Ein Beispiel für die Bestimmung des TE-Einsatzes im elektrischen und optischen Messkanal unter Verwendung der kleinen Scope-Ansicht des Messsystems (siehe auch Abbildung 33) zeigt Abbildung 40.

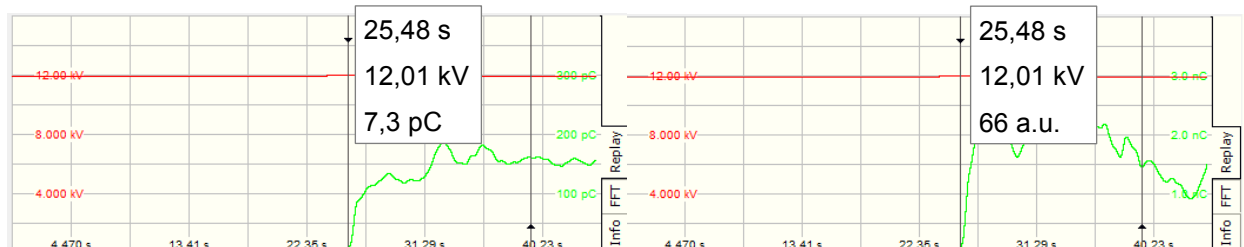


Abbildung 40: TE-Einsatz (zeitgleich) im elektrischen (links) und optischen (rechts) Messkanal
grüne Kurve: jeweils Messung der scheinbaren Ladung bzw. der optischen Intensität
rote Kurve: jeweils die anliegende Spannung

Während der Streamaufzeichnung (Dauer 45 s) setzten sowohl im elektrischen als auch im optischen Messkanal zeitgleich Entladungen ein. Lag der TE-Einsatz zwischen zwei Spannungsstufen, wurde die TE-Einsatzspannung entsprechend Abschnitt 5.1 gebildet. Die im optischen Signalweg auftretenden Verlustquellen (siehe Abschnitt 5.4) erhöhen die Ansprechschwelle für eine zuverlässige Signalerfassung.

Aus den Ergebnissen der zeitsynchronen optischen und elektrischen Signalerfassung ist erkennbar, dass,

- die Kollimator-Optik unabhängig von der Vorbehandlung der Prüfkörper und dem Nadelspitzenradius bei gleichen Spannungswerten wie im elektrischen Messkanal Signale detektierte, das heißt, die Signale werden durch Teilentladungen verursacht,
- die FOF-Optik sowohl bei nicht vorbehandelten als auch bei evakuierten Prüfkörpern mit Nadelspitzenradien im Bereich $>2,5 \mu\text{m}$ ebenfalls den TE-Einsatz bei gleichen Spannungswerten wie der elektrische Messkanal anzeigte. Für den Nadelspitzenradius im Bereich von $1 \mu\text{m}$ verschwanden beim elektrisch detektierten TE-Einsatz die intensitätsschwachen Signale z. T. im Grundrauschen der FOF-Optik. In diesen Fällen wurde der TE-Einsatz bei 1 kV bis 2 kV höheren Spannungswerten vom optischen Messkanal angezeigt,
- bei der Bestimmung der TE-Aussetzspannungen beide optische Kanäle vereinzelt eine höhere Aussetzspannung im Vergleich zu den Spannungswerten des elektrischen Messkanals anzeigten.

Ein signifikanter Einfluss der Evakuierung und des Nadelspitzenradius auf die Höhe der TE-Einsatzspannung war nachweisbar. Nach Überprüfung der gemessenen TE-Einsatzspannungen auf Ausreißer nach Nalimov [102] wurden aus den Spannungen mittels Weibullstatistik die 63 %-Quantil der TE-Einsatzspannung für die einzelnen Prüfkörpergruppen mit unterschiedlichen Spitzenradien bestimmt. Dafür wurden die elektrisch ermittelten Werte verwendet. Die errechneten 63 %-Quantil der TE-Einsatzspannung einschließlich der Konfidenzbereiche sind in Abbildung 41 zusammengefasst.

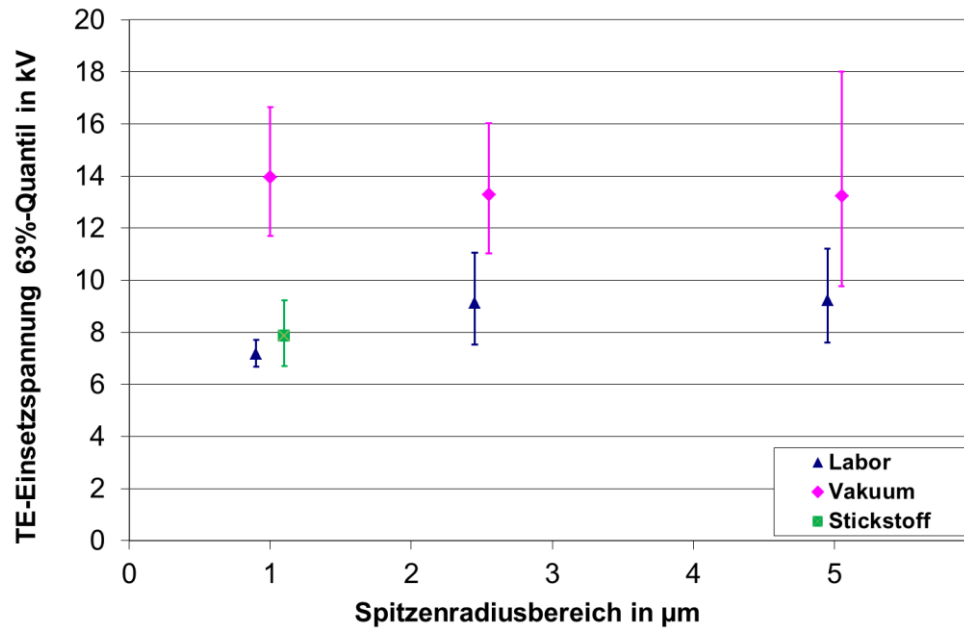


Abbildung 41: 63%-Quantil der TE-Einsetzspannungen einschließlich der Konfidenzbereiche für Prüfkörpergruppen 1, 2 und 3 mit verschiedenen Spitzenradien

In den unter Laborbedingungen gelagerten Prüfkörpern stieg die TE-Einsetzspannung mit wachsendem Spitzenradius. Bei der Erhöhung des Spitzenradius von 2,5 μm - auf den 5 μm -Bereich war der Anstieg der TE-Einsetzspannung nicht mehr nachweisbar. Die Prüfkörper mit Spitzenradien im 5 μm -Bereich wiesen die größte Streuung auf.

Die vakuumbehandelten Prüfkörper zeigten eine signifikant höhere TE-Einsetzspannung, der Einfluss der Spitzenradien spielte dagegen eine untergeordnete Rolle.

Die TE-Einsetzspannungen der mit Stickstoff beaufschlagten Prüfkörper waren denen von laborgelagerten Prüfkörpern ähnlich. Das bedeutet, dass ein Einfluss des Sauerstoffs auf die TE-Einsetzspannung für diese Anordnung nicht nachweisbar war.

6.1.2 Ergebnisse bei konstanter Spannungsbeanspruchung (Kanalaufbau)

Diese Messungen erfolgten anschließend an die Messungen nach Abschnitt 6.1.1. Das bedeutet, dass sich die vorbehandelten Prüfkörper vor Messbeginn bereits mindestens 40 min in der Messschaltung befanden.

Der Spannungswert von 22,5 kV wurde in Vorversuchen ermittelt und ermöglicht eine Beanspruchungsdauer von 120 min ohne Durchschlag. Die Spannung wird mit 0,5 kV/s bis zum festgelegten Wert gesteigert und dann konstant gehalten.

6.1.2.1 Prüfkörpergruppe 1 (Laborbedingungen)

Ausgewählt wurden die mit den kubischen Prüfkörpern B 354 und B 429 und mit den zylindrischen Prüfkörpern B 402 und B 324 ermittelten Ergebnisse. Durch den eingestellten Messbereich für die scheinbaren Ladungen/optischen Intensitäten (siehe Abschnitt 5.2) kann zu Übersteuerungen im optischen Messkanal kommen (Abbildung 42). Daher musste bei Verwendung der Kollimator-Optik zum Teil ein Graufilter in den Strahlengang eingesetzt (siehe 4.2.2).

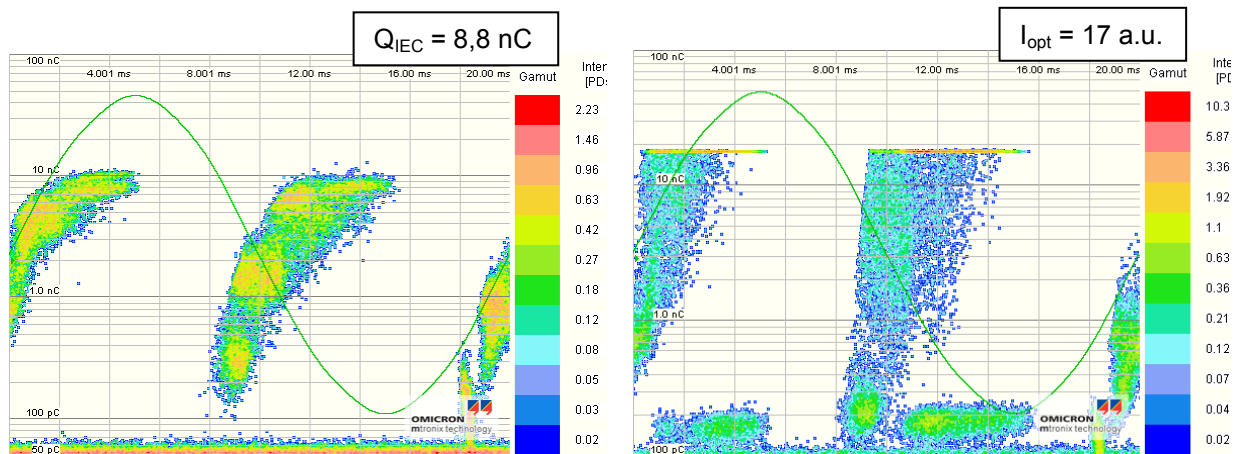


Abbildung 42: Beispiel für ein elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisiertes Histogramm mit einer Übersteuerung des optisch-elektrischen Wandlers, Spannung 22,5 kV

PRPD-Diagramme

Die visualisierten TE-Muster in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer (t_B) enthalten die Abbildungen 43 bis 46 (Kollimator-Optik) und die Abbildungen 47 bis 50 (FOF-Optik). In den PRPD-Diagrammen des optischen Messkanals mit Kollimator-Optik ist die durch den Einsatz des Graufilters hervorgerufene Signalabschwächung der Impulse erkennbar. Das Fehlen des Graufilters zeigt aber auch deutlich die Übersteuerung im optischen Messkanal an (Abbildungen 45 bis 46).

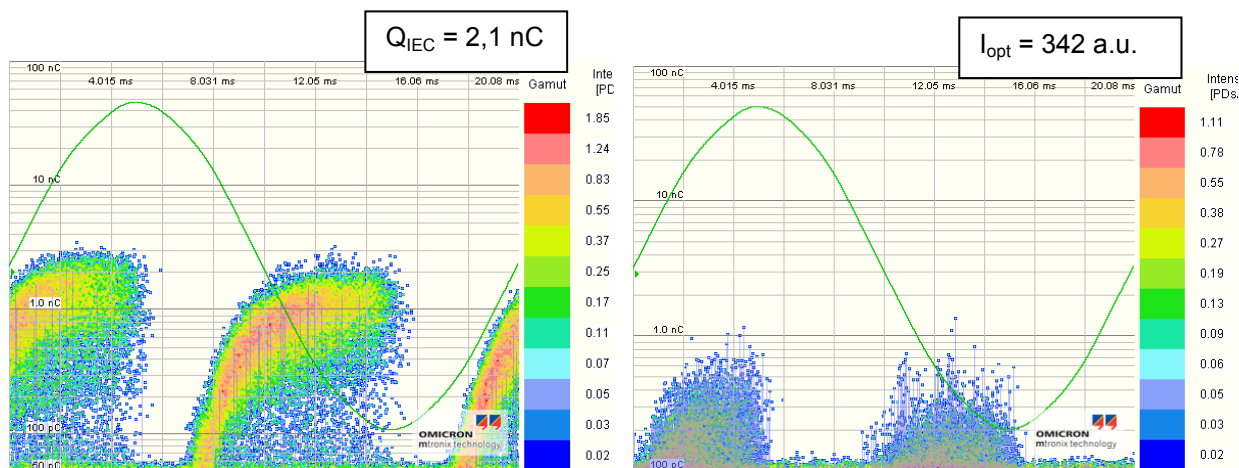


Abbildung 43: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,6 kV; Prüfkörper B 354; Nadelspitzenradius: 1 μm , Prüfkörpergruppe 1; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

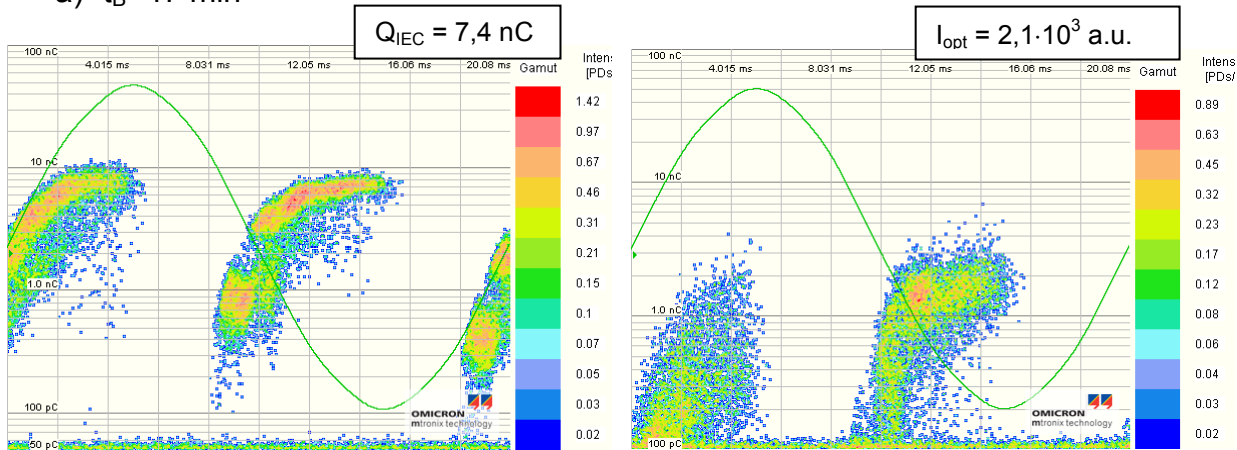
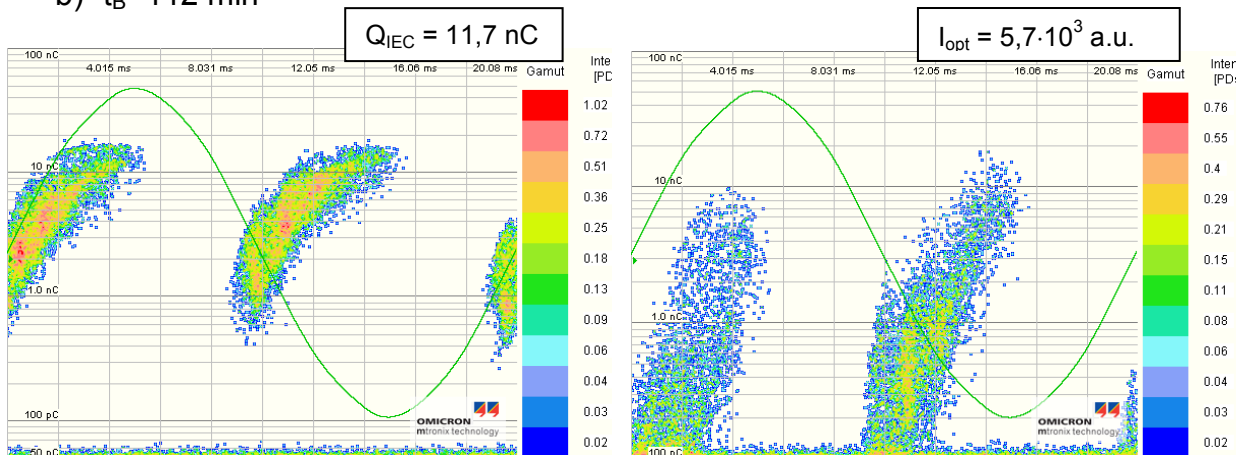
a) $t_B = 47$ minb) $t_B = 112$ min

Abbildung 44: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 354; Nadelspitzenradius: 1 μm , Prüfkörpergruppe 1; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

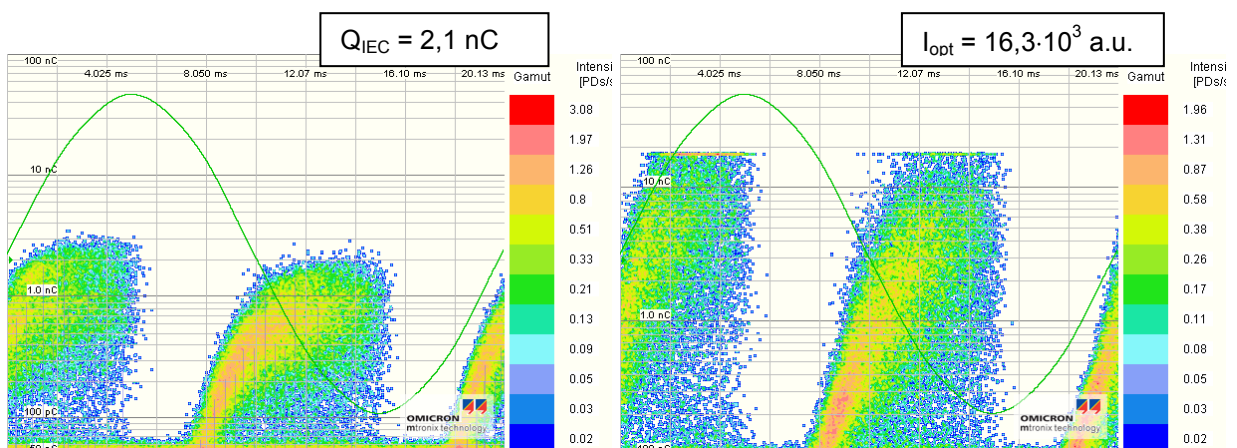


Abbildung 45 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,6 kV; Prüfkörper B 429; Nadelspitzenradius: 5 μm ; Prüfkörpergruppe 1;

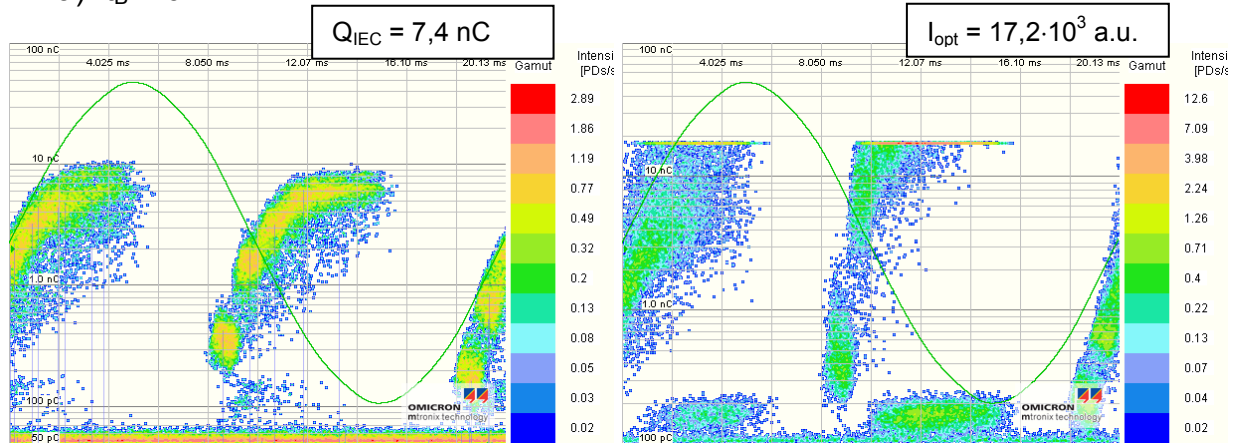
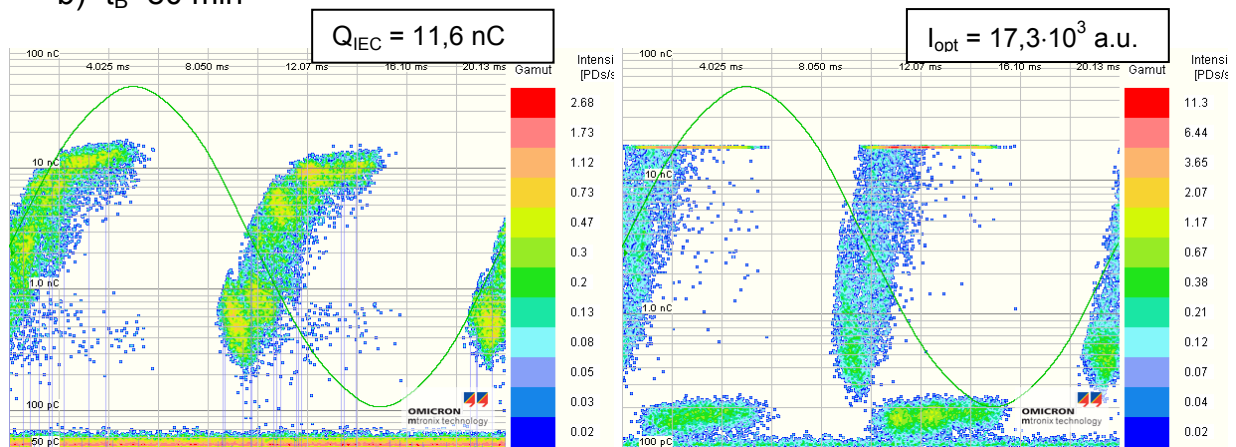
a) $t_B = 40$ minb) $t_B = 80$ min

Abbildung 46 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 429; Nadelspitzenradius: 5 μm ; Prüfkörpergruppe 1;

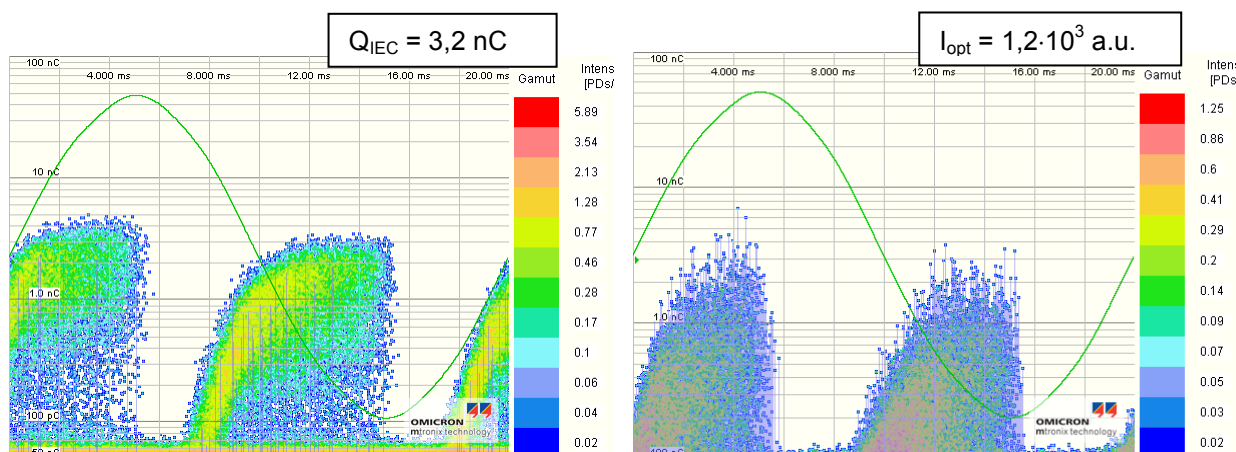


Abbildung 47: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,7 kV; Prüfkörper B 324; Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

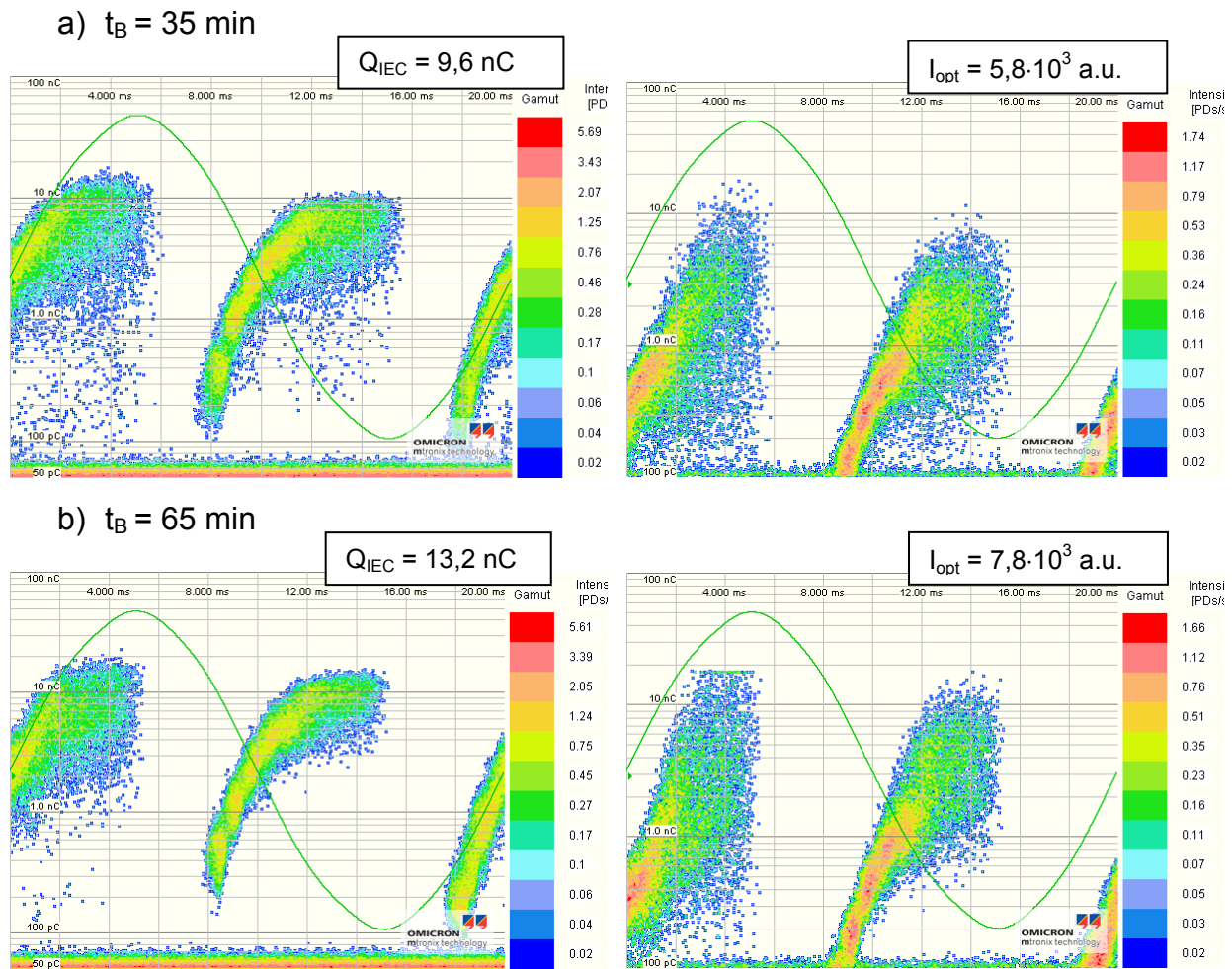


Abbildung 48: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,7 kV; Prüfkörper B 324; Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

Auch bei Verwendung der FOF-Optik kann es bei entsprechender Intensität zu einer teilweisen Übersteuerung im optischen Messkanal kommen, wie in Abbildung 48 (1. Quadrant bei $t_B = 65 \text{ min}$) und Abbildung 50 nach eine Beanspruchungsdauer $>40 \text{ min}$ gezeigt.

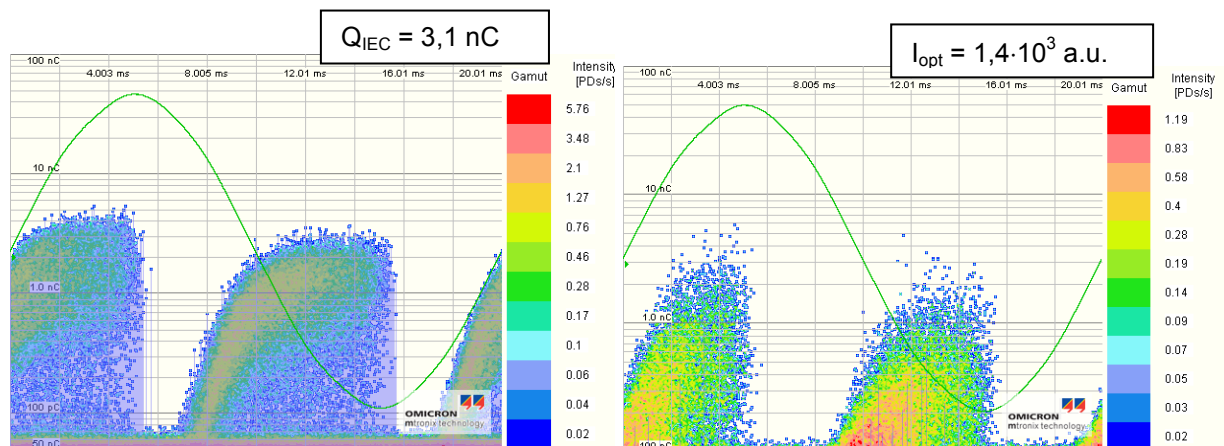


Abbildung 49 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,6 kV; Prüfkörper B 402; Nadelspitzenradius: 2,5 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

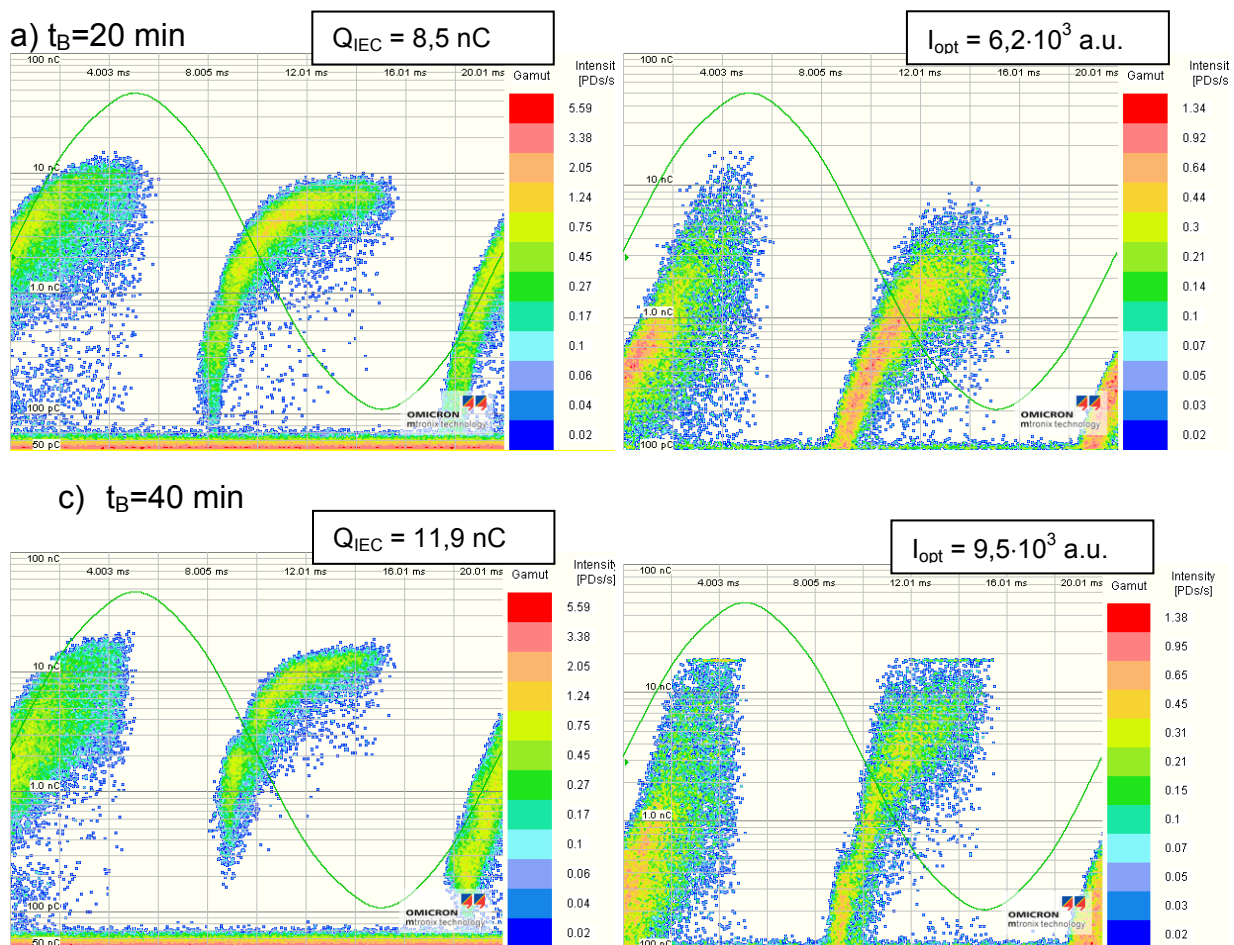


Abbildung 50 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 402; Nadelspitzenradius: 2,5 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

Die vom elektrischen Messkanal aufgezeichneten Muster sind mit denen der optischen Messkanäle vergleichbar. Die TE-Aktivitäten treten im ersten und dritten Quadranten auf, in beiden Fällen nur bis zu einer Phasenlage der Spannung von 90° und 270° . Die erreichten Werte sind im elektrischen Messkanal in beiden Halbwellen gleich, im optischen Messkanal mit FOF-Optik in der positiven Halbwelle größer. Die TE-Impulse mit niedriger Intensität verschwinden im elektrischen Messkanal mit steigender Beanspruchungsdauer. Eine Veränderung der aufgezeichneten Muster in den Histogrammen mit der Beanspruchungsdauer ist nicht erkennbar.

In den Abbildungen 51 und 52 ist die scheinbare Ladung (MP 1.1) und die mit dem optischen Messkanal mit Kollimator-Optik (MP 1.2) gemessene Intensität (I_{opt}) für zwei Prüfkörper in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer dargestellt.

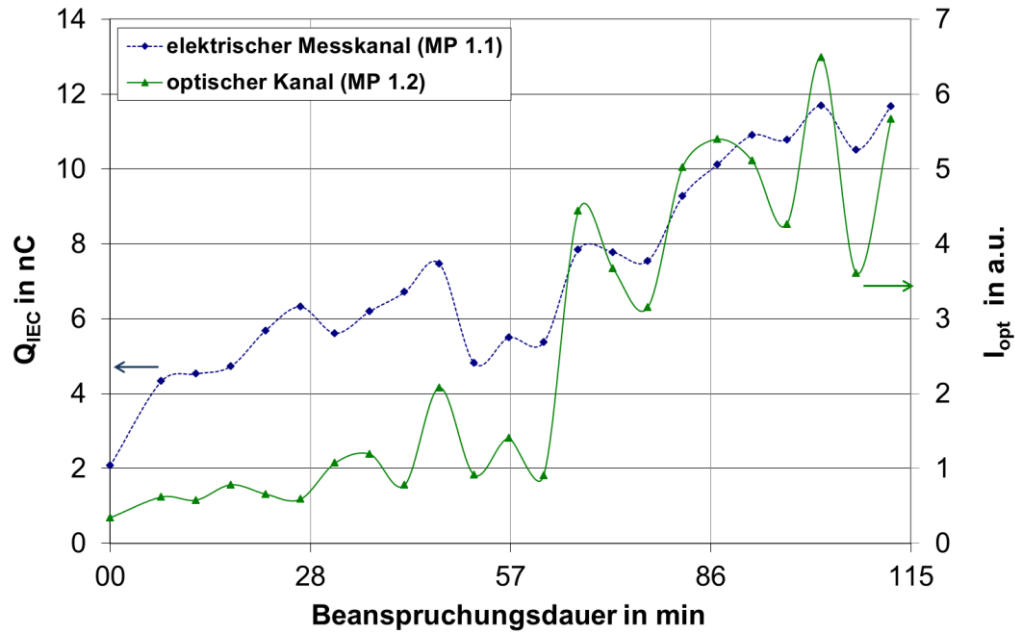


Abbildung 51: Scheinbare Ladung Q_{IEC} (elektrischer Messkanal MP 1.1) und optische Intensität I_{opt} (optischer Messkanal MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 354; Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 1; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

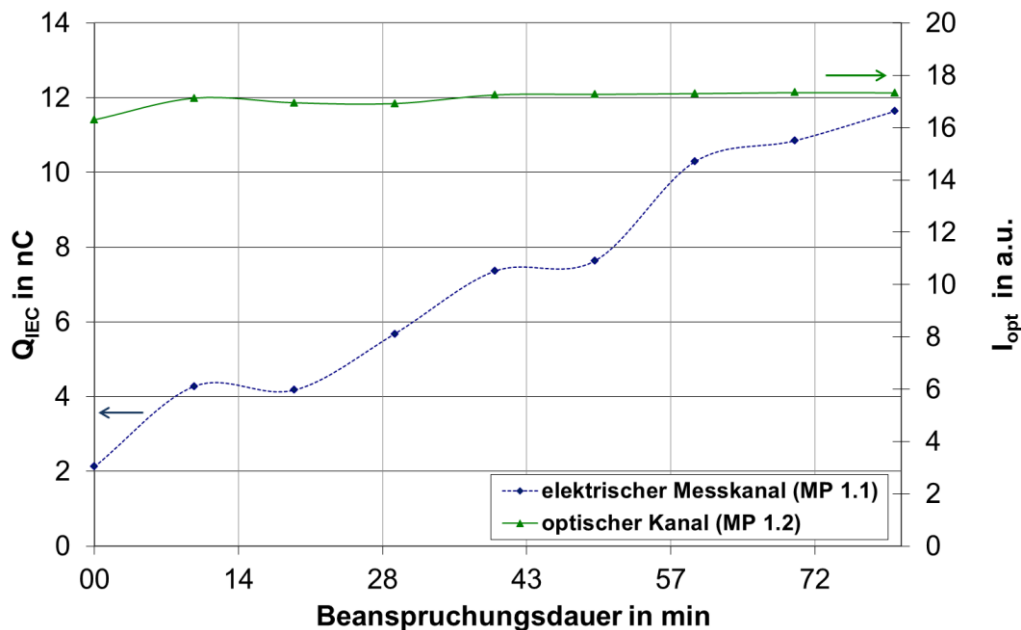


Abbildung 52: Scheinbare Ladung Q_{IEC} (elektrischer Messkanal MP 1.1) und optische Intensität I_{opt} (optischer Messkanal MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 429; Nadelspitzenradius: 5 μm ; Prüfkörpergruppe 1; Kollimator-Optik

Die Abbildungen 53 und 54 enthalten die Ergebnisse für zwei weitere Prüfkörper unter Verwendung der FOF-Optik.

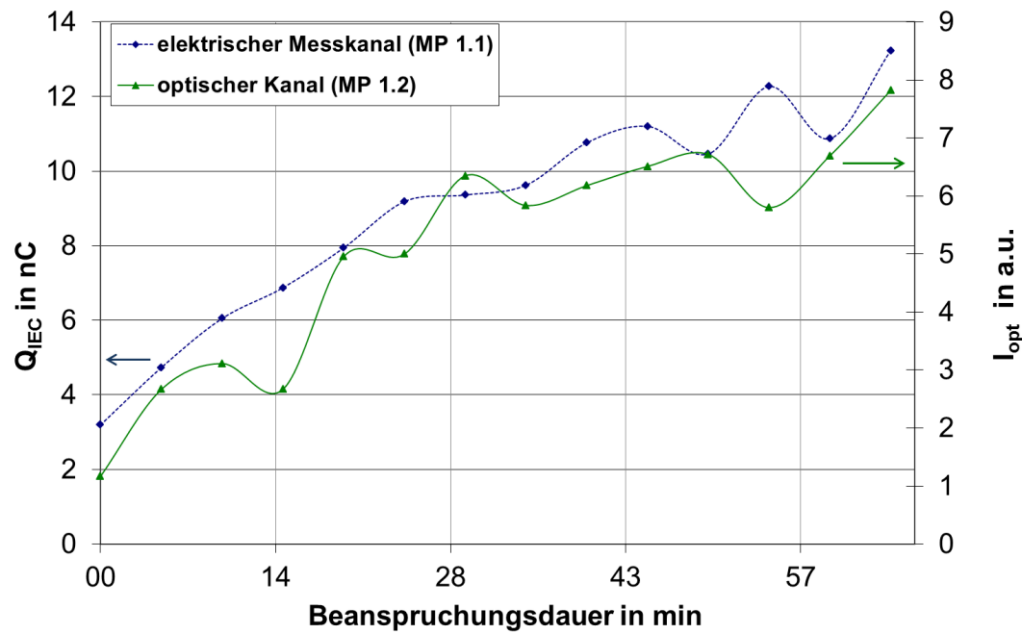


Abbildung 53: Scheinbare Ladung Q_{IEC} (elektrischer Messkanal MP 1.1) und optische Intensität I_{opt} (optischer Messkanal MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 324, Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

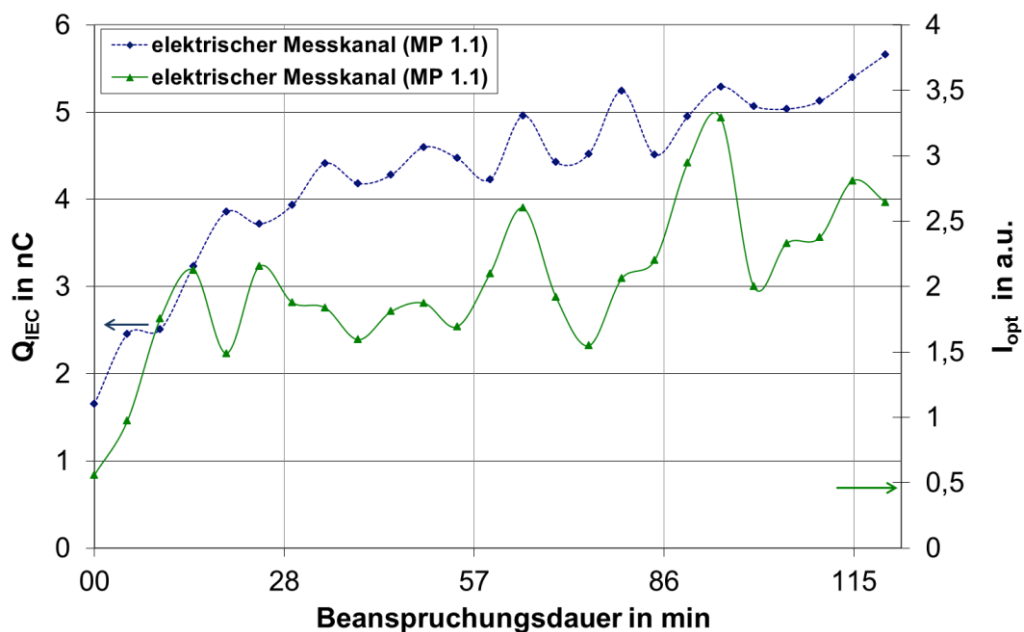


Abbildung 54: Scheinbare Ladung Q_{IEC} (elektrischer Messkanal MP 1.1) und optische Intensität I_{opt} (optischer Messkanal MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 402, Nadelspitzenradius: 2,5 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

Die scheinbare Ladung (Q_{IEC}) und die optischen Intensitäten (I_{opt}) steigen mit der Beanspruchungsdauer nahezu kontinuierlich an. Die vom optischen Messkanal detektierte Intensität ist durch die Signalabschwächung infolge des eingesetzten Graufilters reduziert und steigt erst nach längerer Beanspruchungsdauer an (Abbildung 51). Deutlich erkennbar ist die Übersteuerung des optischen Messkanals die sich einer konstanten optischen Intensität dokumentiert (Abbildung 50) Die bei längere Beanspruchungsdauer

aufgetretenen geringeren Übersteuerungen mit FOF-Optik sind nicht eindeutig erkennbar (Abbildung 54, Beanspruchungsdauer <40 min).

Impulsrate

Die in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer aufgezeichneten Impulsraten (Impulse pro Zeiteinheit) sind in den Abbildungen 55 und 56 für die Kollimator-Optik und in den Abbildungen 57 und 58 für die FOF-Optik gezeigt.

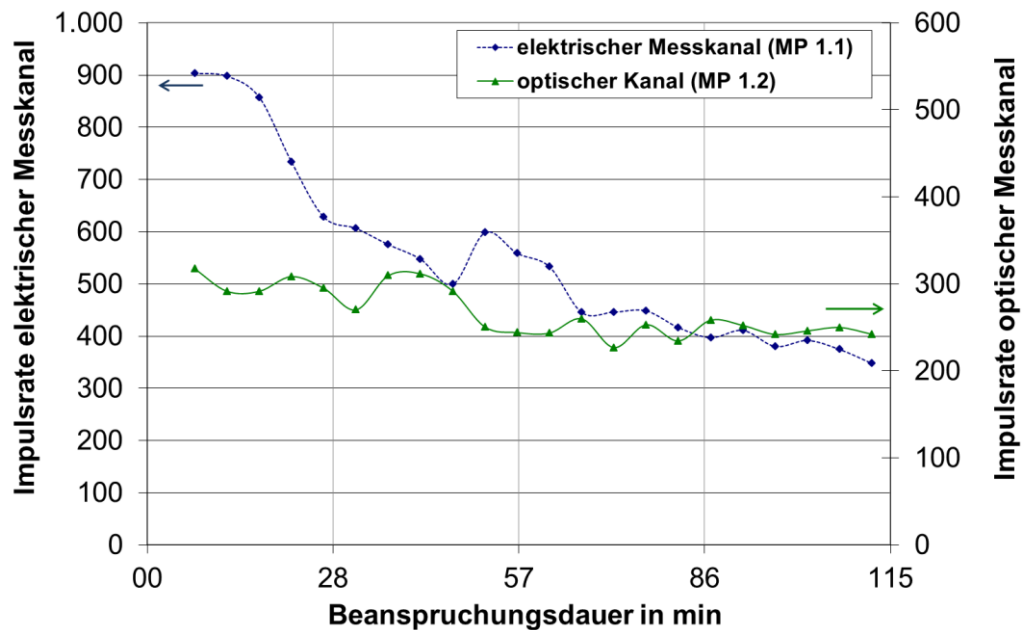


Abbildung 55: Impulsrate im elektrischen (MP 1.1) und optischen Messkanal (MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 354; Nadelspitzenradius: 1 µm; Prüfkörpergruppe 1; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

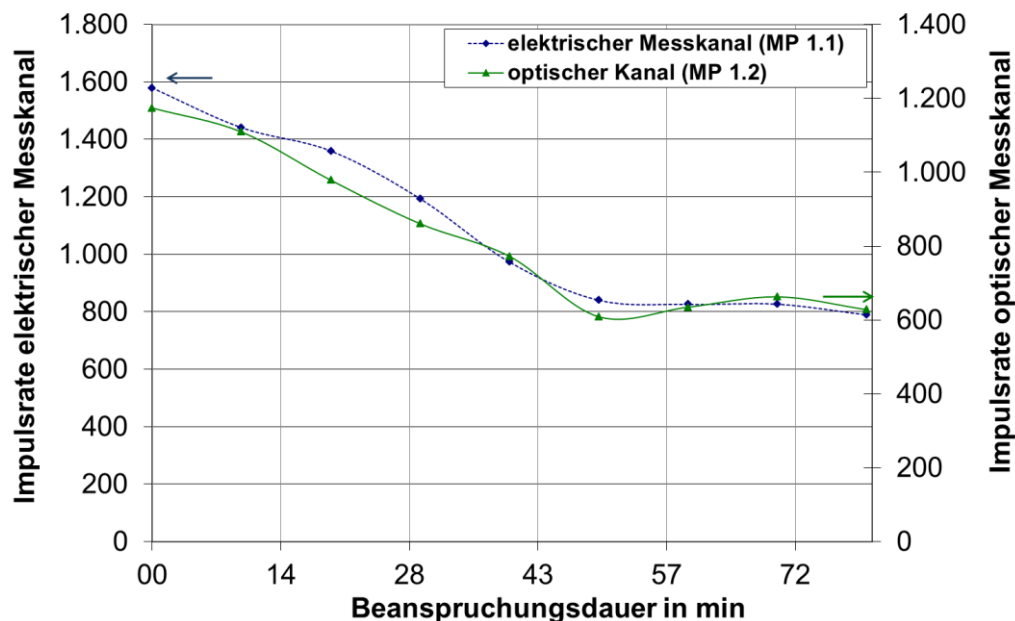


Abbildung 56: Impulsrate im elektrischen (MP 1.1) und optischen Messkanal (MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 429; Nadelspitzenradius: 5 µm; Prüfkörpergruppe 1; Kollimator-Optik

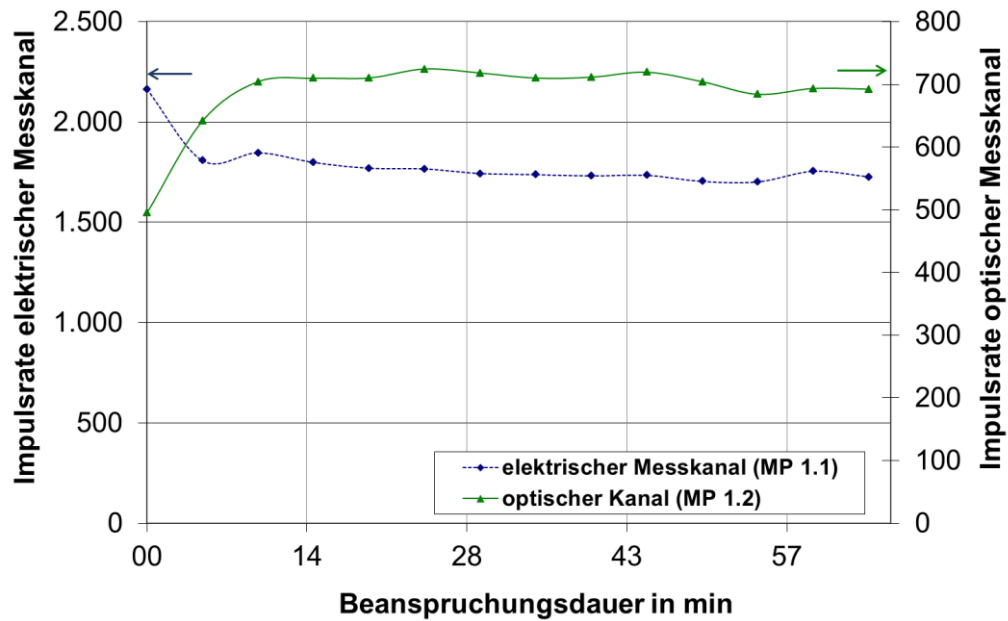


Abbildung 57: Impulsrate im elektrischen (MP 1.1) und optischen Messkanal (MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 324; Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

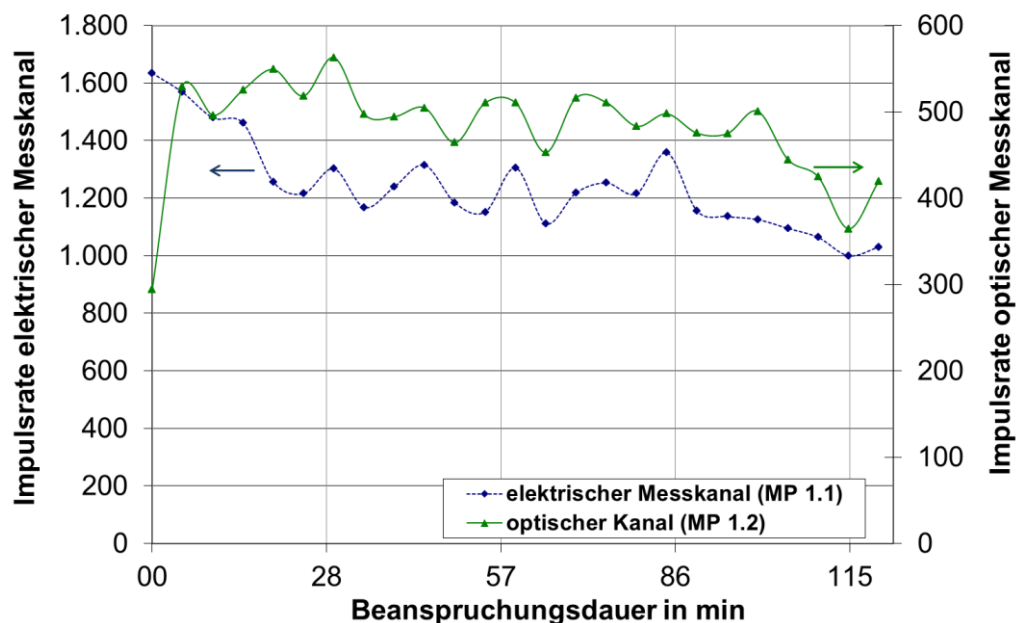


Abbildung 58: Impulsrate im elektrischen (MP 1.1) und optischen Messkanal (MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 402; Nadelspitzenradius: 2,5 μm ; Prüfkörpergruppe 1; FOF-Optik

Die Impulsraten sind in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer nahezu konstant, wobei durch die optischen Messkanäle kleinere Impulsraten detektiert werden. Der in Abbildung 55 dargestellte Vergleich zeigt deutlich den Einfluss des Graufilters. Während die Impulsrate im elektrischen Messkanal anfänglich absinkt, wird vom optischen Messkanal mit ca. 245 Impulsen pro Sekunde ein sehr niedriger und von der Beanspruchungsdauer nahezu unabhängiger Wert registriert.

Die Übersteuerung des optischen Messkanals zeigt sich auch in der Impulsrate, die eine ähnliche Größenordnung wie im elektrischen Messkanal erreicht (Abbildung 56). Die

vom optischen Messkanal mit FOF-Optik angezeigten Impulsraten (siehe Abbildungen 57 und 58) sind mit den Werten des optischen Messkanal mit Kollimator-Optik ohne Graufilter vergleichbar.

POT-Analyse

Für ein ausgewähltes Zeitintervall ist eine POT-Analyse für den Prüfkörper B 354 in Abbildung 59 sowohl für den elektrischen als auch für den optischen Messkanal dargestellt. Erkennbar ist der Anstieg der Impulshöhen mit der Phase der Wechselspannung, insbesondere im elektrischen Messkanal, während eine Aussage zur Anzahl der Impulse einen deutlich längeren Auswertezeitraum erfordert.

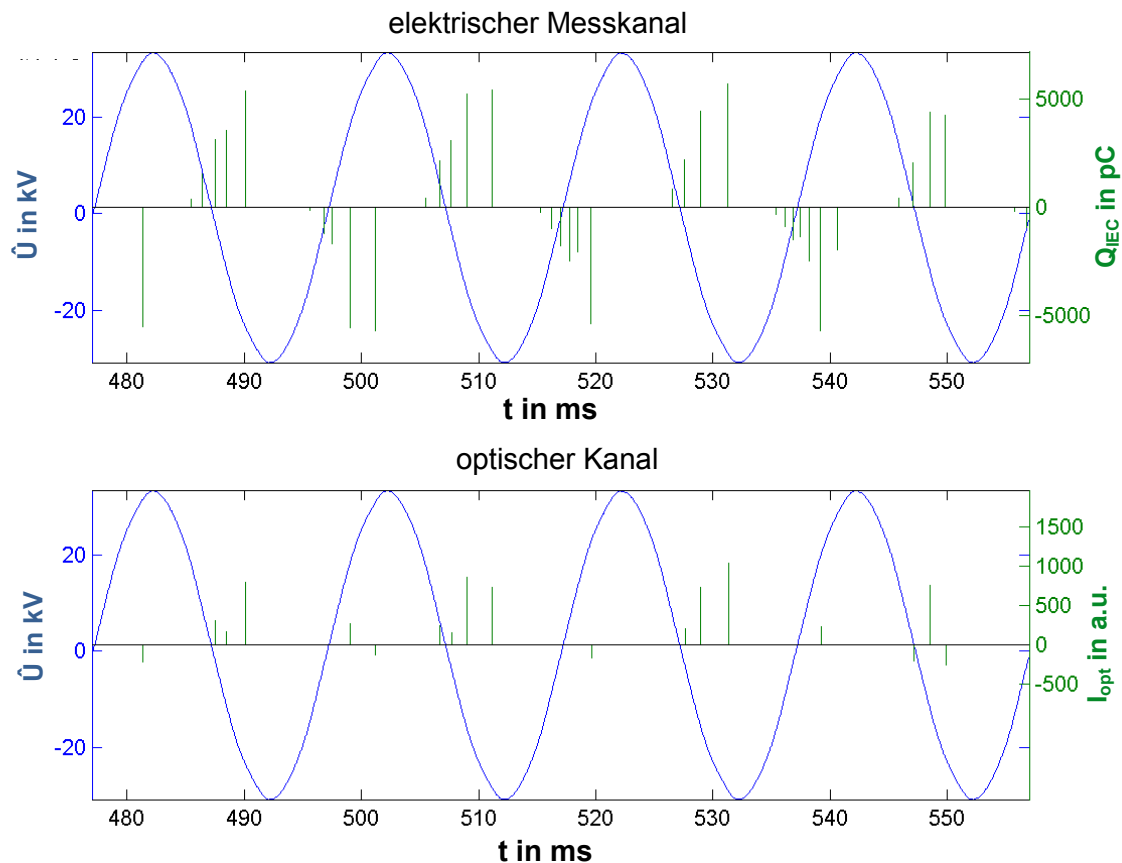


Abbildung 59: POT-Analyse des elektrischen (oben) und optischen (unten) Messkanals; Prüfkörper B 354; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

6.1.2.2 Prüfkörpergruppe 2 (evakuierte Prüfkörper)

Angegeben sind die mit den Prüfkörpern B 428 und B 318 (Kollimator-Optik) und B 413 und B 385 (FOF-Optik) ermittelten Ergebnisse.

PRPD-Diagramme

Die visualisierten TE-Muster für eine wachsende Beanspruchungsdauer zeigen die Abbildungen 60 bis 67. Die vom elektrischen Messkanal jeweils aufgezeichneten Muster sind mit denen der nicht evakuierten Prüfkörper vergleichbar, zeigen aber eine größere Streuung. Sie ändern sich gleichfalls nicht mit der Beanspruchungsdauer. Die optischen Kanäle registrieren die Teilentladungen in den gleichen Quadranten, wobei eine Änderung der Muster mit der Beanspruchungsdauer ebenfalls nicht erkennbar ist. Die Inten-

sitäten sind im ersten Quadranten z. T. deutlich größer, auch unter Berücksichtigung des eingesetzten Graufilters (siehe Abbildung 61).

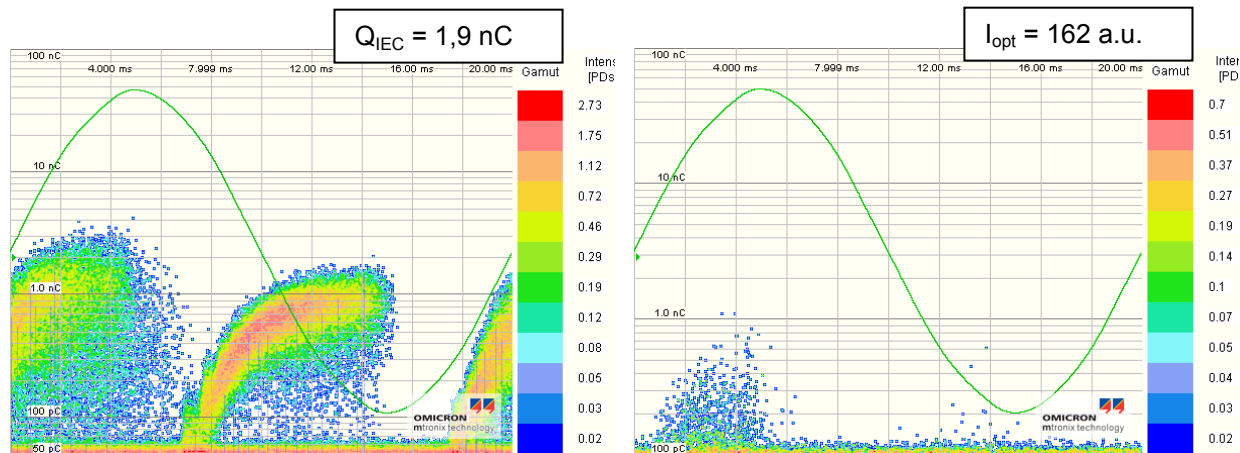


Abbildung 60: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,4 kV; Prüfkörper B 428; Nadelspitzenradius: 1 μm , Prüfkörpergruppe 2; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

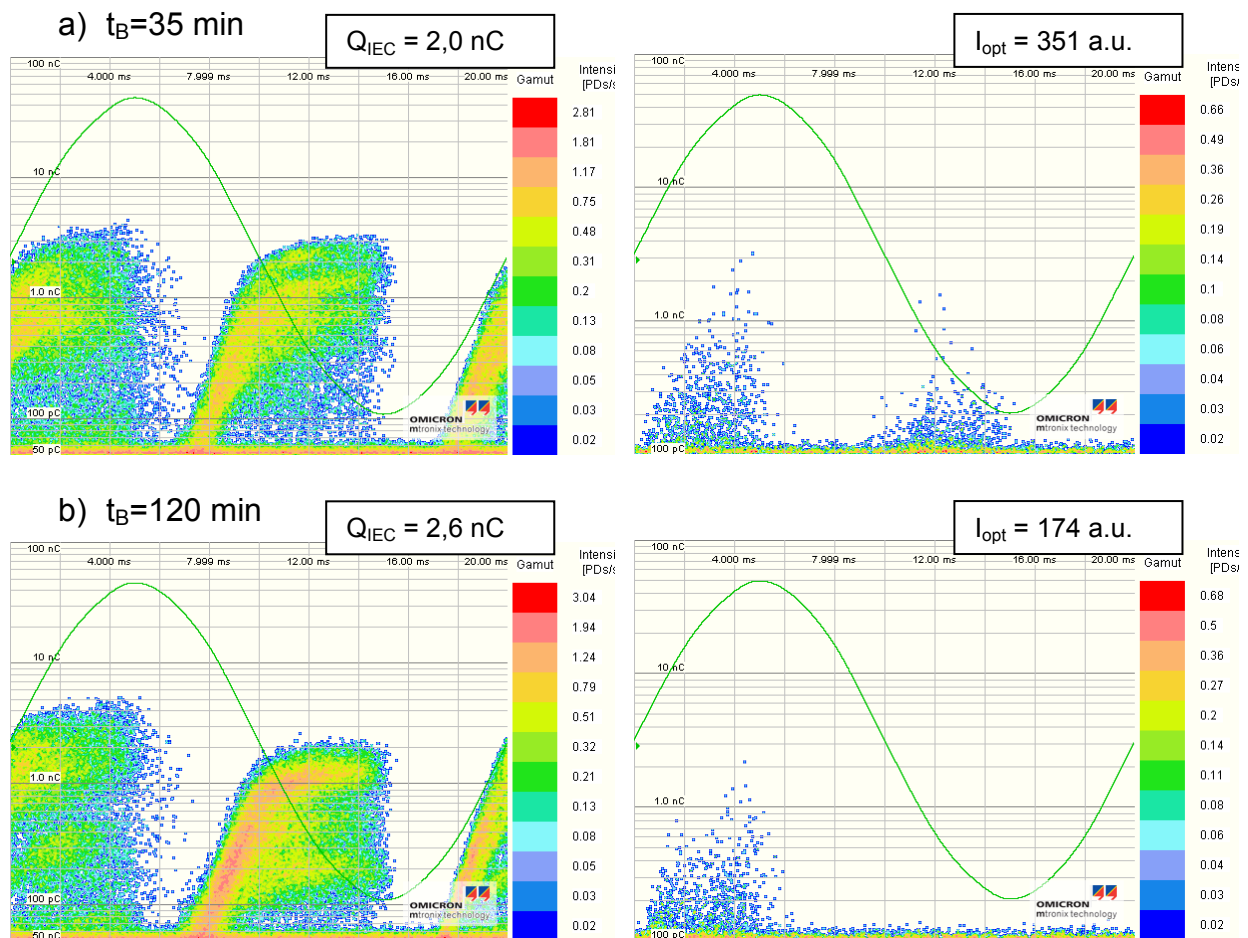


Abbildung 61: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,4 kV; Prüfkörper B 428; Nadelspitzenradius: 1 μm , Prüfkörpergruppe 2; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

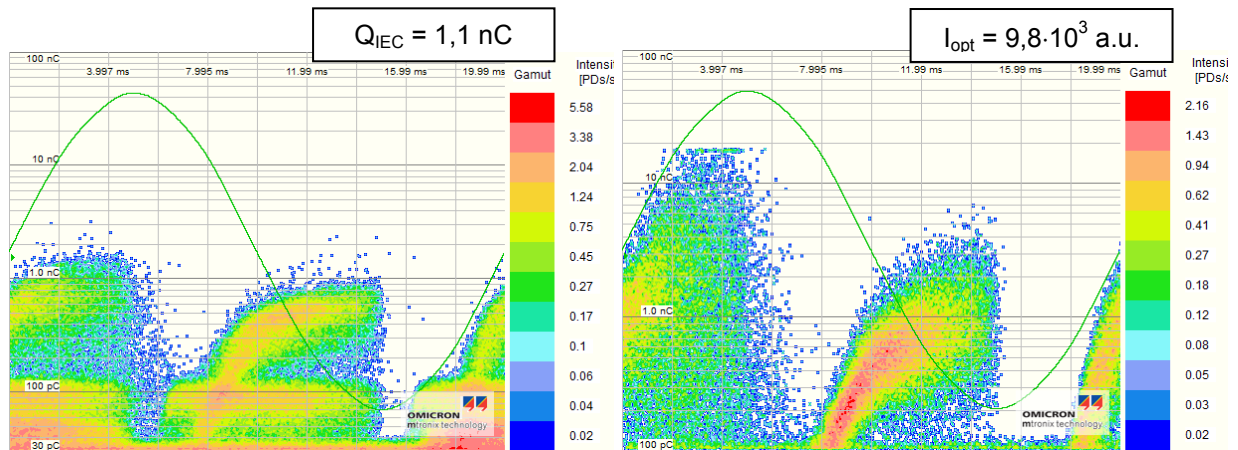


Abbildung 62 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,6 kV; Prüfkörper B 318; Nadelspitzenradius: 5 µm; Prüfkörpergruppe 2; Kollimator-Optik

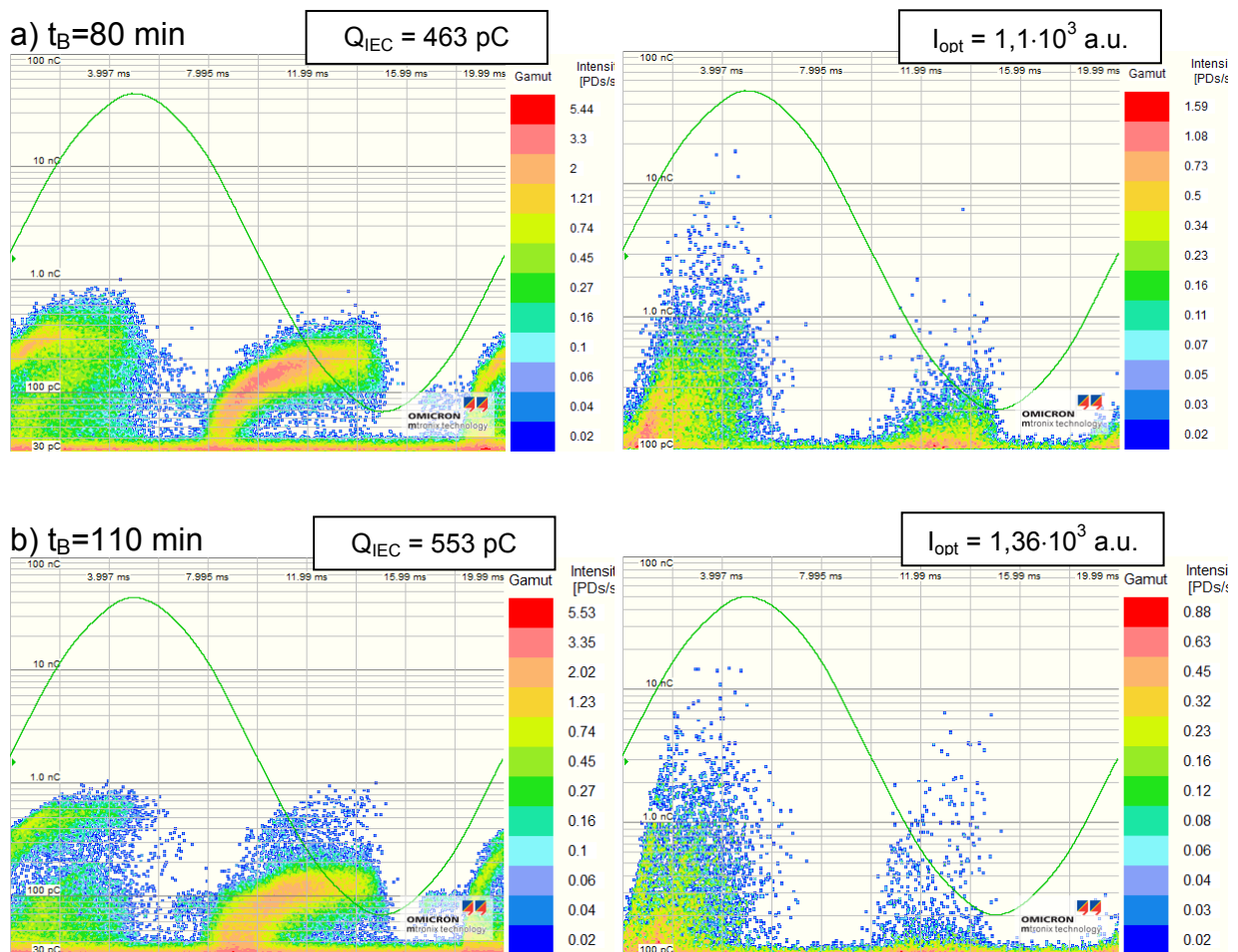


Abbildung 63 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,6 kV; Prüfkörper B 318; Nadelspitzenradius: 5 µm; Prüfkörpergruppe 2; Kollimator-Optik

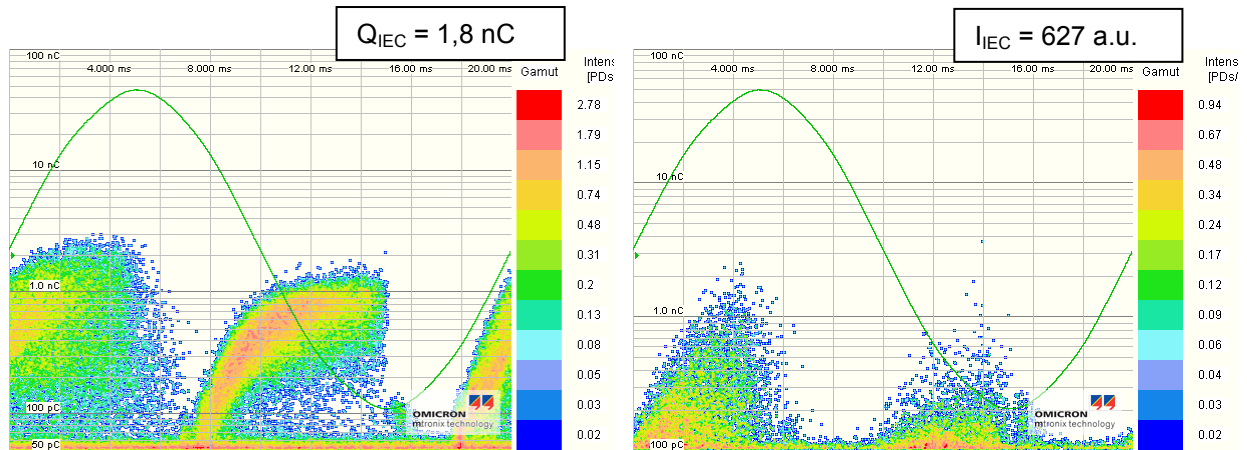


Abbildung 64: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,7 kV; Prüfkörper B 413; Nadelspitzenradius: 1 µm, Prüfkörpergruppe 2; FOF-Optik

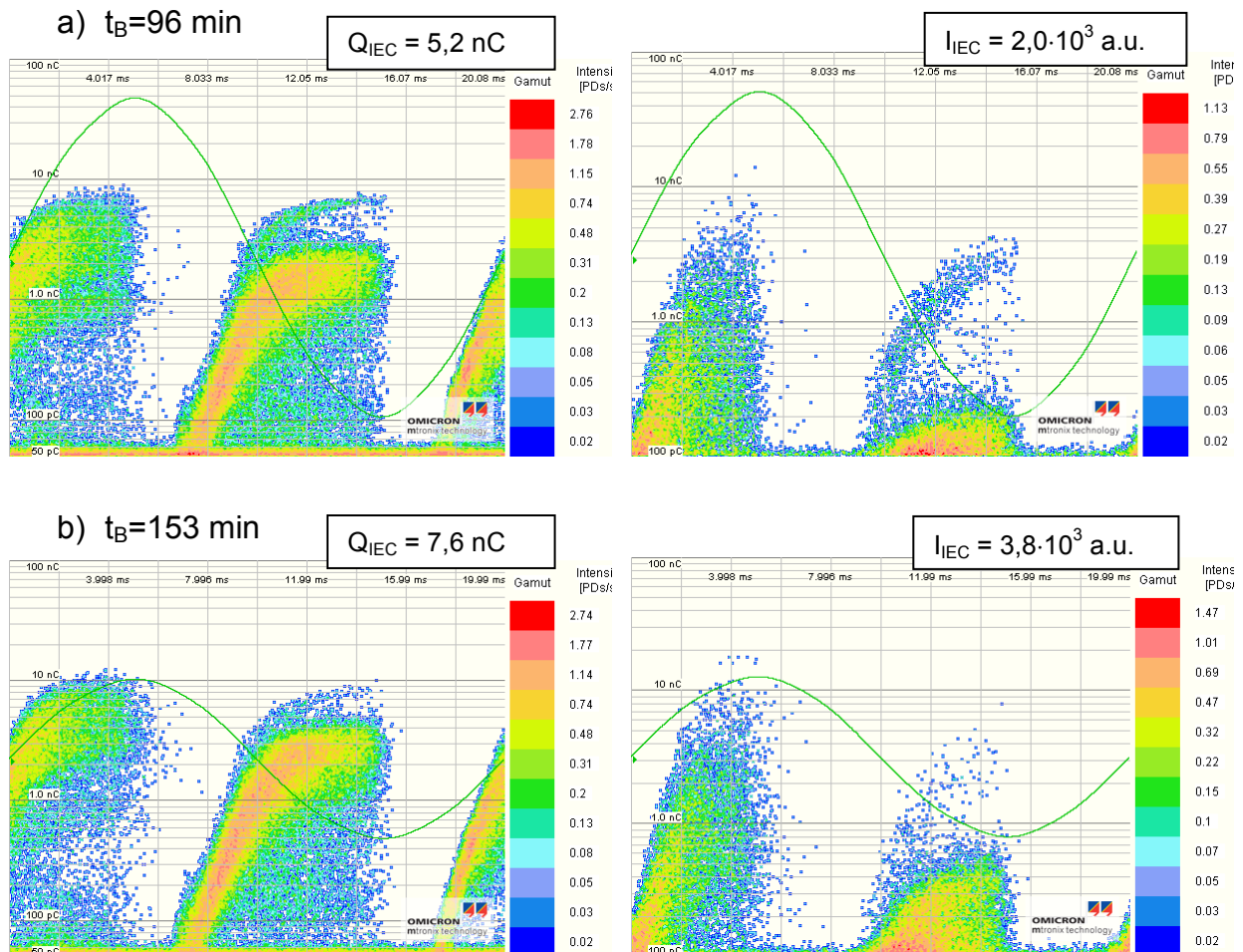


Abbildung 65: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,7 kV; Prüfkörper B 413; Nadelspitzenradius: 1 µm, Prüfkörpergruppe 2; FOF-Optik

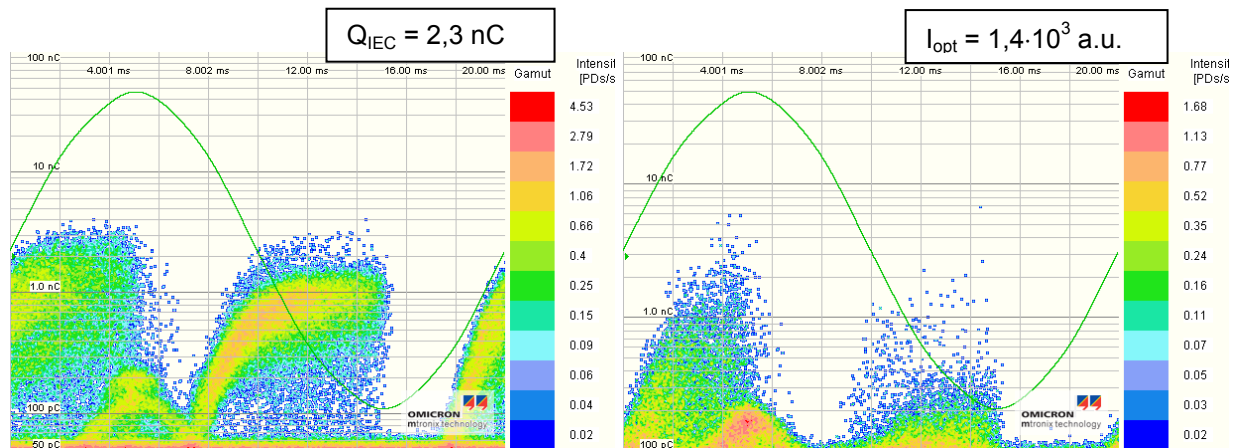
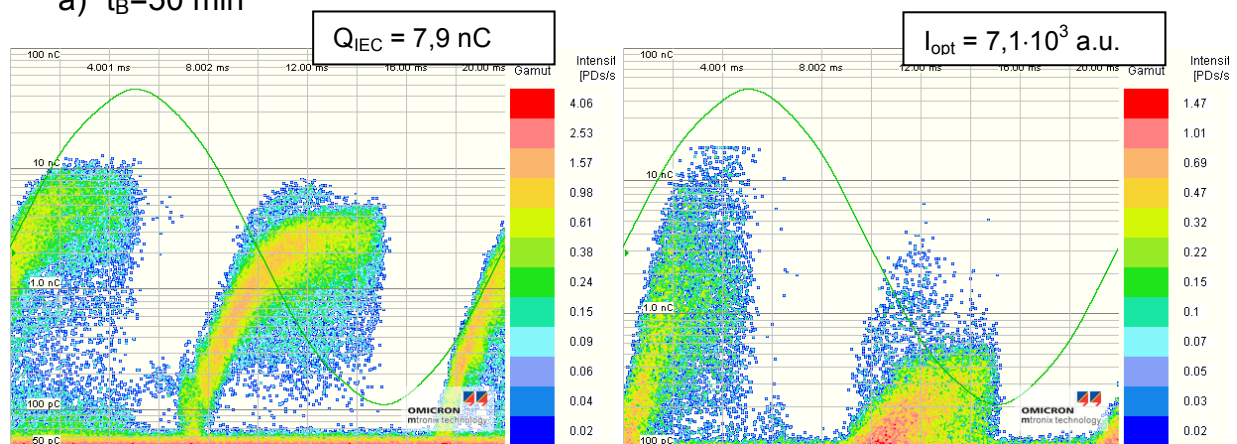


Abbildung 66 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 22,4 kV; Prüfkörper B 385; Nadelspitzenradius: 2,5 µm; Prüfkörpergruppe 2; FOF-Optik

a) $t_B = 50$ min



b) $t_B = 105$ min

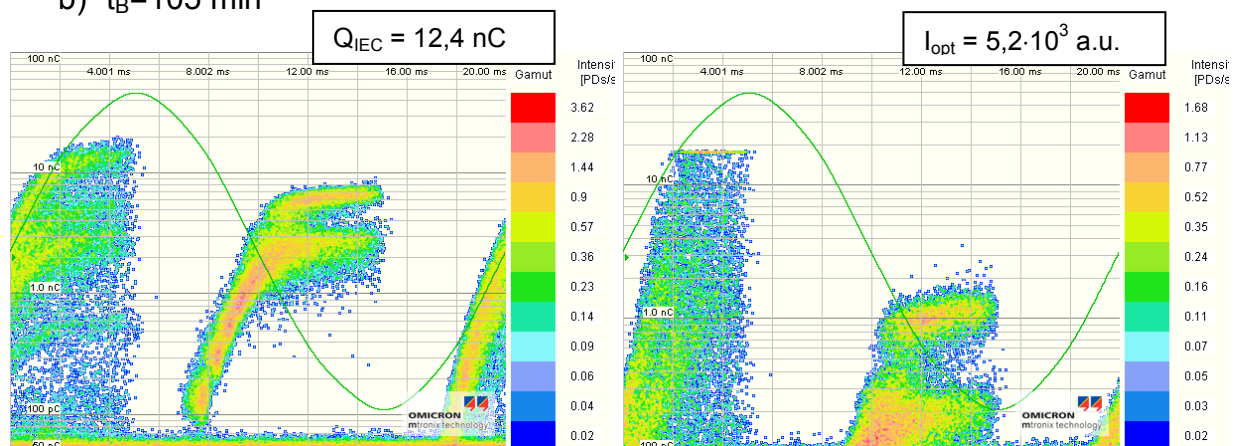


Abbildung 67 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Spannung: 22,4 kV; Prüfkörper B 385; Nadelspitzenradius: 2,5 µm; Prüfkörpergruppe 2; FOF-Optik

Ladungsverlauf und Verlauf der optischen Intensität

Die sich mit wachsender Beanspruchungsdauer ergebenden Größen der scheinbaren Ladung und optischen Intensität sind für diese Prüfkörper in den Abbildungen 68 und 69 dargestellt.

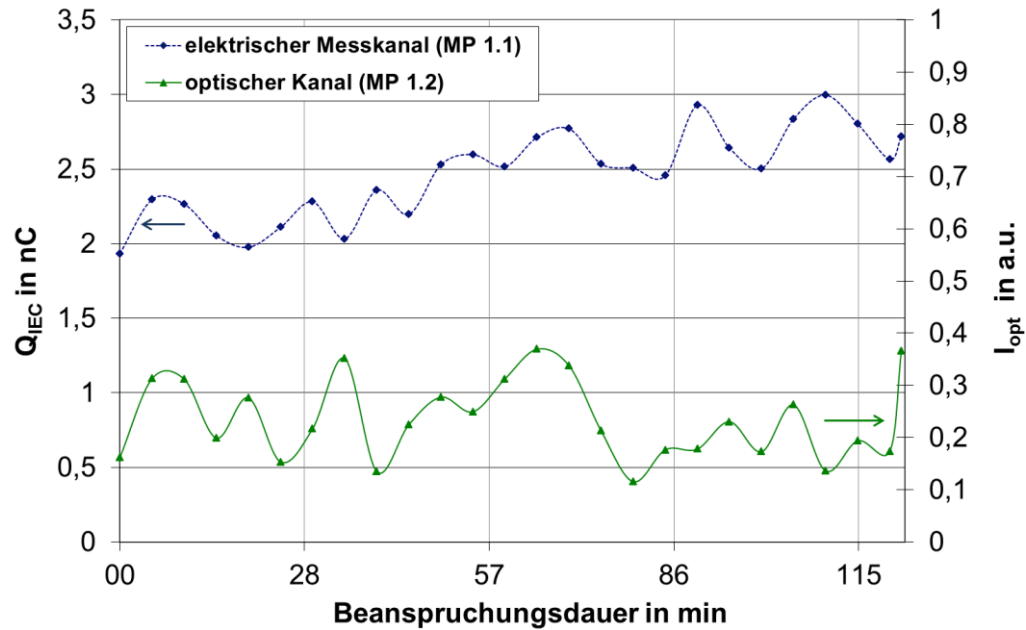


Abbildung 68: Scheinbare Ladung Q_{IEC} (elektrischer Messkanal MP 1.1) und optische Intensität I_{opt} (optischer Messkanal MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,4 kV; Prüfkörper B 428; Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 2; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

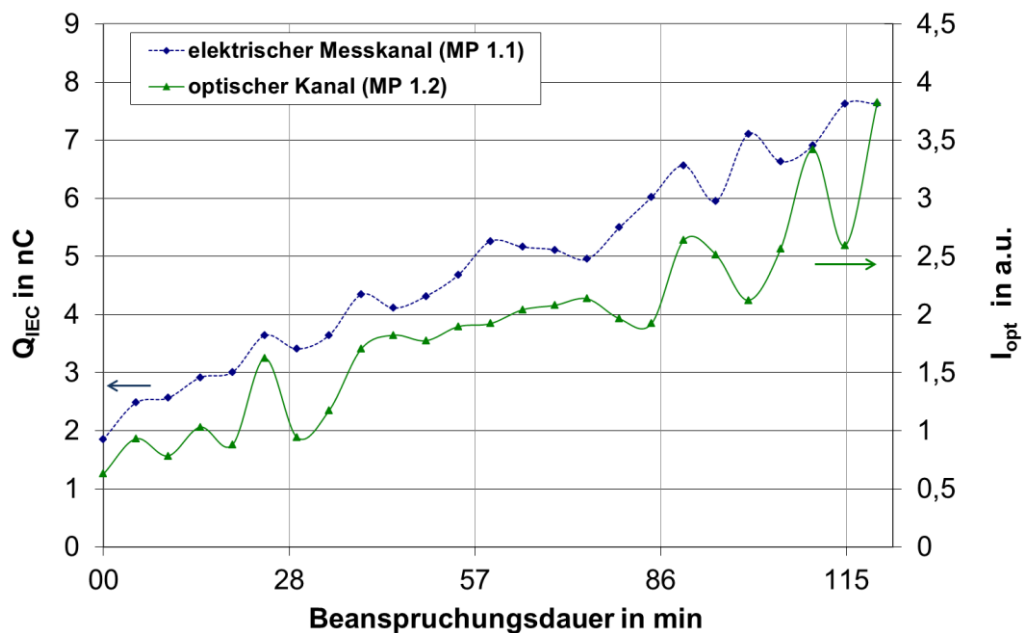


Abbildung 69: Scheinbare Ladung Q_{IEC} (elektrischer Messkanal MP 1.1) und optische Intensität I_{opt} (optischer Messkanal MP 1.2) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Prüfkörper B 413; Prüfkörpergruppe 2; Nadelspitzenradius: 1 μm ; FOF-Optik; Spannung: 22,7 kV

Die scheinbare Ladung steigt mit der Beanspruchungsdauer an. Im Vergleich dazu ist die optische Intensität durch den Einsatz des Graufilters (Abbildung 68) abgeschwächt, während in Abbildung 69 ein ähnlicher Anstieg mit der Beanspruchungsdauer wie im elektrischen Messkanal erkennbar ist.

Eine Überprüfung zur Korrelation zwischen den optisch und elektrisch ermittelten Ladungsimpulsen enthält der Abschnitt 7.3.2. Die Korrelation scheint durch die starke Dämpfung bei Prüfkörper B 428 unter Umständen nicht mehr gegeben, wogegen sie für den Prüfkörper B 413 bestehen sollte.

Impulsrate

Die Ergebnisse enthalten die Abbildungen 70 und 71.

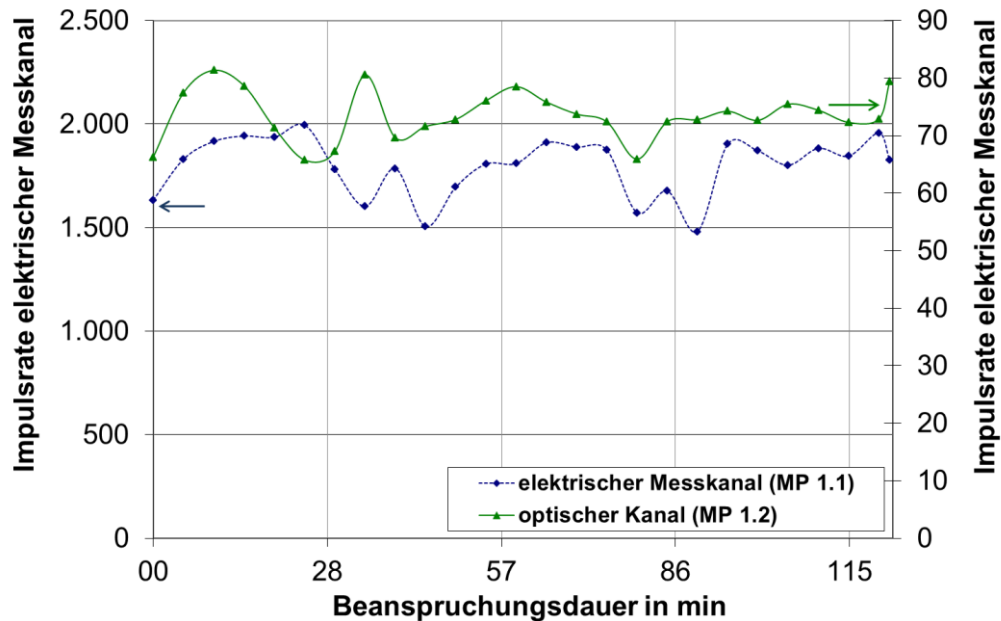


Abbildung 70: Impulsrate in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,4 kV; Prüfkörper B 428; Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 2; Kollimator-Optik mit Graufilter ND 2.0 (Durchlässigkeit 1 %)

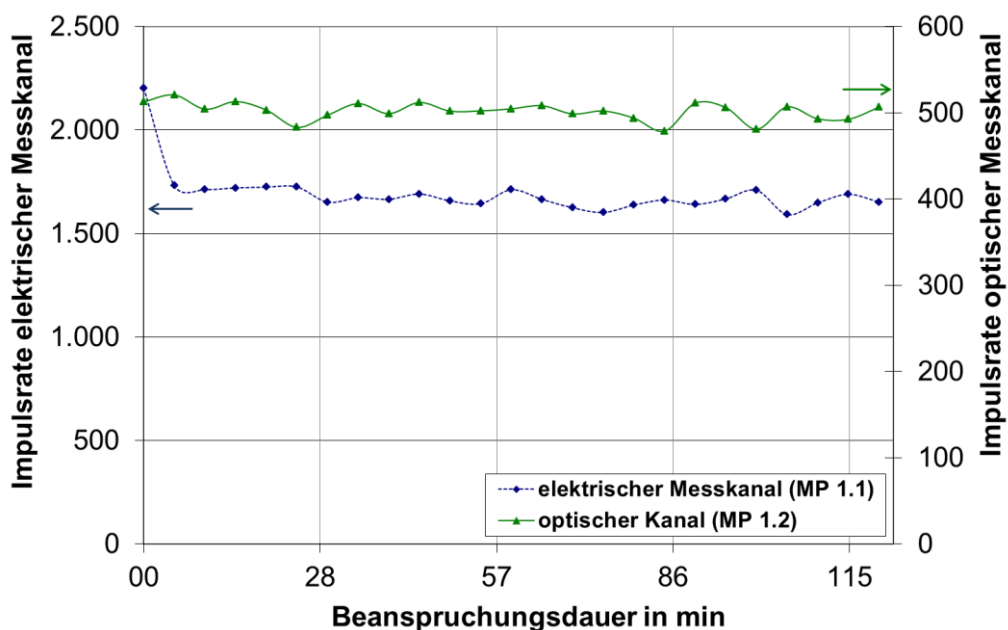


Abbildung 71: Impulsrate in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 22,7 kV; Prüfkörper B 413; Nadelspitzenradius: 1 μm ; Prüfkörpergruppe 2; FOF-Optik

Die elektrischen und optischen Kanäle registrieren eine mit der Beanspruchungsdauer konstante Impulsrate, analog zu den Ergebnissen von nicht evakuierten Prüfkörpern. Die durch Einsatz des Graufilters hervorgerufene starke optische Signalabschwächung wird auch für die Impulsrate beobachtet (Abbildung 70). Die ermittelten Werte des optischen Messkanals liegen im Bereich um 100 Impulsen pro Sekunde, unabhängig von der Beanspruchungsdauer. Der ebenfalls nahezu konstante Wert im elektrischen Messkanal hat eine Größenordnung von ca. 2100 Impulsen pro Sekunde. Generell ist die vom optischen Messkanal angezeigte Impulsrate deutlich kleiner als die des elektrischen Messkanals.

6.1.2.3 Kanalstruktur (Tree)

Treestruktur

Ausgewählte typische Treestrukturen nach Abschluss der experimentellen Untersuchungen für laborgelagerte sowie evakuierte Prüfkörper zeigen die nachfolgenden Abbildungen 72 bis 74.

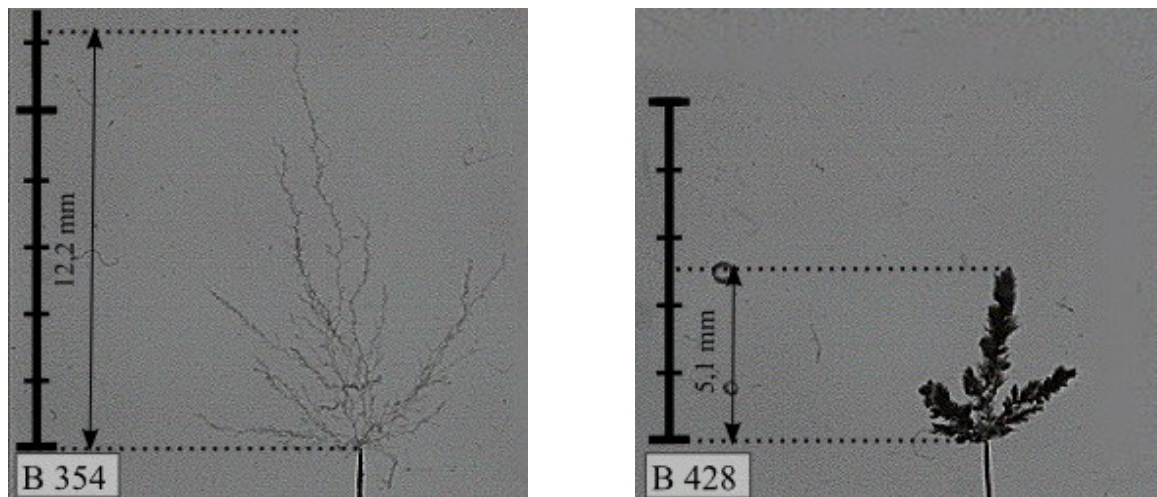


Abbildung 72 Elektrischer Tree für Prüfkörpergruppe 1 (links) und Prüfkörpergruppe 2 (rechts) nach einer Beanspruchungsdauer von 120 min, Spitzenradius 1 μm ; Spannung 22,2 kV

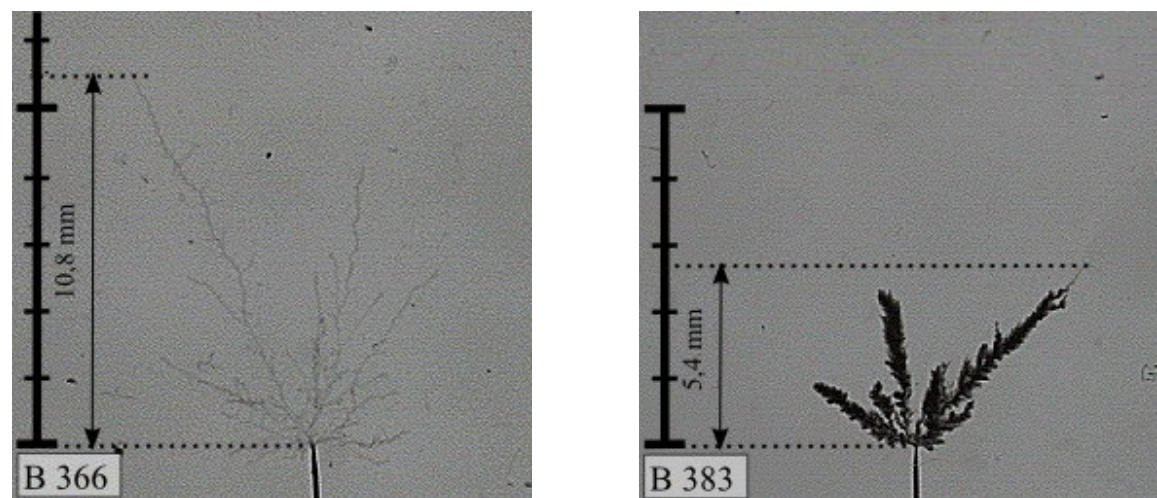


Abbildung 73 Elektrischer Tree für Prüfkörpergruppe 1 (links, Beanspruchungsdauer 90 min) und Prüfkörpergruppe 2 (rechts, Beanspruchungsdauer 120 min), Spitzenradius 2,5 μm ; Spannung 22,2 kV

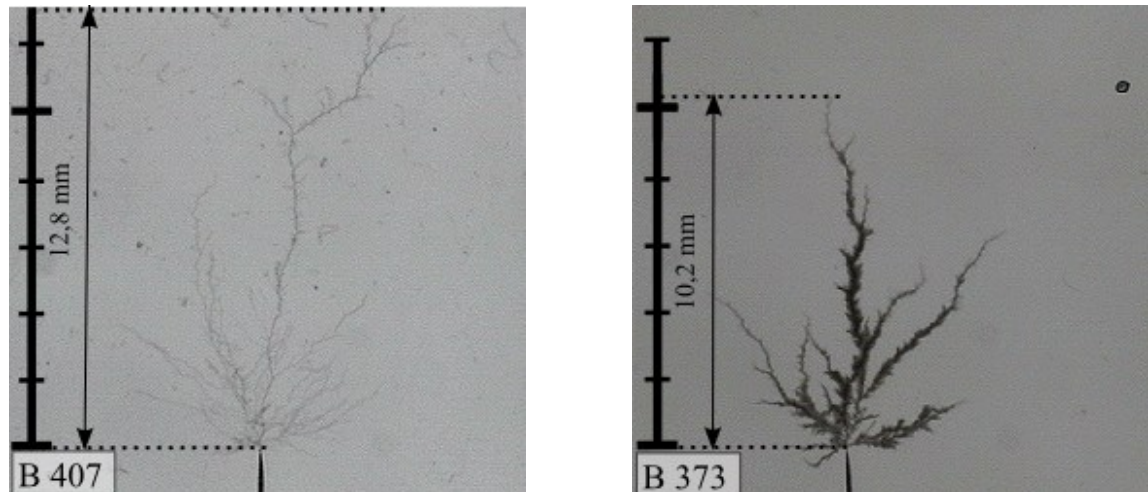


Abbildung 74 Elektrischer Tree für Prüfkörpergruppe 1 (links, Beanspruchungsdauer 40 min) und Prüfkörpergruppe 2 (rechts, Beanspruchungsdauer 120 min), Spitzenradius 5 μm ; Spannung 22,5 kV

Die Fotos auf den linken Seiten in den Abbildungen 72 bis 74 zeigen Treestrukturen in laborgelagerten Prüfkörpern (Prüfkörpergruppe 1), auf den rechten Seiten Strukturen in evakuierten Prüfkörpern (Prüfkörpergruppe 2). In allen laborgelagerten Prüfkörpern bildeten sich zweigförmige Trees mit ähnlicher Struktur aus. Die in evakuierten Prüfkörpern festgestellten Strukturen unterscheiden sich deutlich. Unabhängig vom Nadelspitzenradius bestehen die Trees aus sehr dichten Anordnungen kurzer, nadelförmiger Seitenkanäle mit unterschiedlicher Länge.

Die sich in Prüfkörpern mit Reinstickstoffgas im Polymervolumen ausgebildeten Strukturen sind ebenfalls zweigförmig, wobei die Kanalabmessungen im Vergleich zu den Abmessungen in laborgelagerten Prüfkörpern größer sind (Abbildung 75).

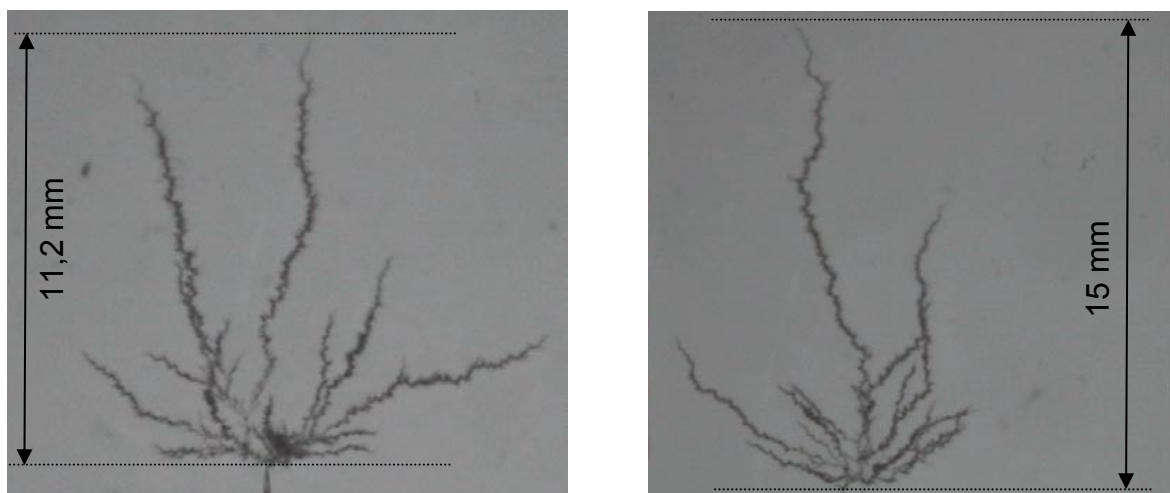


Abbildung 75: Elektrischer Tree nach einer Beanspruchungsdauer von 60 min (linkes Bild: Prüfkörper B 314) und 70 min (rechtes Bild: Prüfkörper B 277); Spitzenradius 1 μm ; Prüfkörpergruppe 3; Spannung 22,4 kV

Kanalwachstum

Die Abbildungen 76 und 77 enthalten Beispiele für sich ausbildende zweigförmige Trees sowie das Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer.

Nach anfänglich relativ hoher Wachstumsgeschwindigkeit ergab sich ein weiterhin kontinuierliches Wachstum.

a) nach 90 min



b) nach 150 min



c) nach 270 min



Abbildung 76: Treestrukturen im transparenten Silikonmaterial; Prüfkörper B 44; Prüfkörpergruppe 1; Spitzenradius 1 μm ; Spannung: 25 kV;

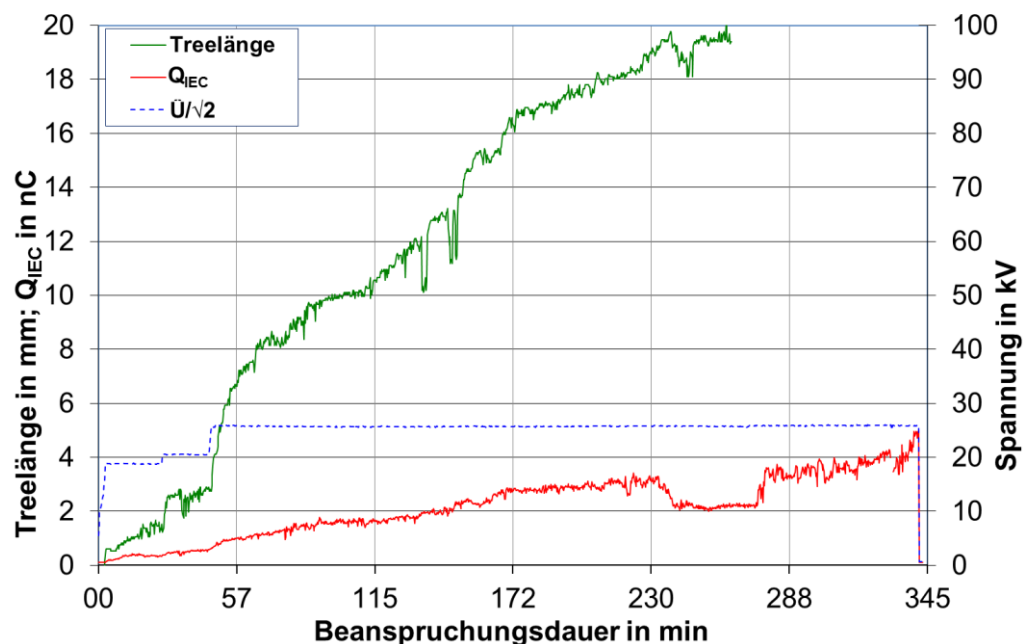


Abbildung 77: Treewachstum und scheinbare Ladung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer und -spannung; Prüfkörper B 44; Prüfkörpergruppe 1; Spitzenradius 1 μm

6.2 Prüfkörper mit streifenförmiger Spitzenelektrode

Die Ziele der Untersuchungen waren neben der Erprobung der optischen Entladungserfassung vergleichende Untersuchungen zum Kanaleinsatz und -aufbau sowie zum Wachstumsverhalten sich entwickelnder Kanalstrukturen ausgehend von derartigen Fehlstellen.

6.2.1 Ergebnisse bei stufenförmiger Spannungssteigerung (Kanaleinsatz)

Die vom optischen Messkanal detektierten Spannungswerte für den TE-Einsatz stimmten mit den vom elektrischen Messkanal festgestellten Spannungswerten überein. Die

Intensität der optischen Impulse bei TE-Einsatz war für eine Erfassung ausreichend hoch. Elektrisch gemessene Werte von scheinbaren Ladungen beim TE-Einsatz umfassten für DFL- und HYB-Prüfkörper einen Bereich von 2 pC bis 8 pC. Für das Aussetzen der Teilentladungen wurden ebenfalls vergleichbare Spannungswerte vom optischen und elektrischen Messkanal gemessen. Die Abweichungen betrugen maximal 1,5 kV (eine Messung). In diesen Fällen wurden durch den optischen Messkanal höhere Aussetzspannungen angezeigt.

Vor der Weibull-Auswertung (elektrische Messwerte) wurde der Ausreißertest nach Nalimov [102] durchgeführt. Die Messwerte der HYB-Gruppe enthielten zwei Ausreißer, die der DFL-Gruppe einen Ausreißer (Wahrscheinlichkeit $\geq 99\%$). In beiden Gruppen wurden die Ausreißer vor der Auswertung entfernt.

Die Ergebnisse sind für beide Prüfkörpergruppen in den Abbildungen 78 und 79 als 63 %-Quantil einschließlich Konfidenzintervalle angegeben. Danach war die Höhe der TE-Einsatzspannung unabhängig von der Metallisierung des Spitzenbereichs der streifenförmigen Elektrode.

Für die DFL-Prüfkörpergruppe ergaben sich für die Ausfallsteilheit (Weibull-Slope β) und den Determinationskoeffizienten r^2 höhere Werte im Vergleich zu den Werten der HYB-Prüfkörpergruppe. Die Ergebnisstreuung in der HYB-Prüfkörpergruppe ist deutlich größer.

Die mit der FOF-Optik erhaltenen Ergebnisse enthält der Abschnitt 6.2.2.2.

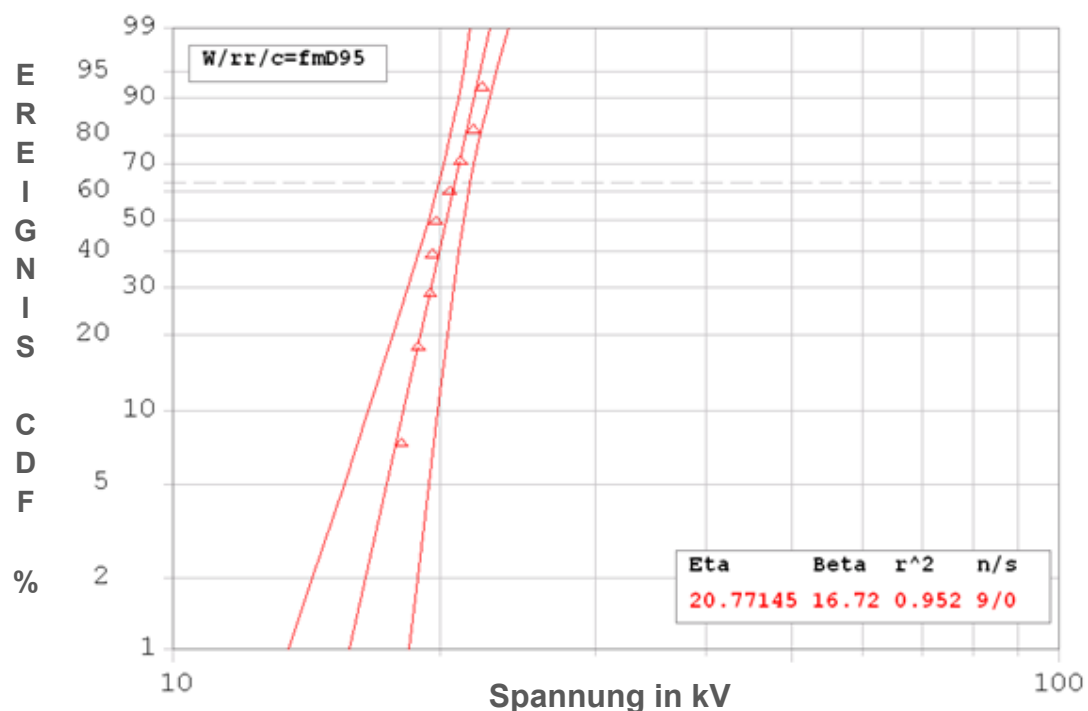


Abbildung 78: Teilentladungseinsetzspannung (Weibull-Nennwert) der DFL-Prüfkörper, Prüfkörpergruppe A und B; Korrelation (r)=0,975

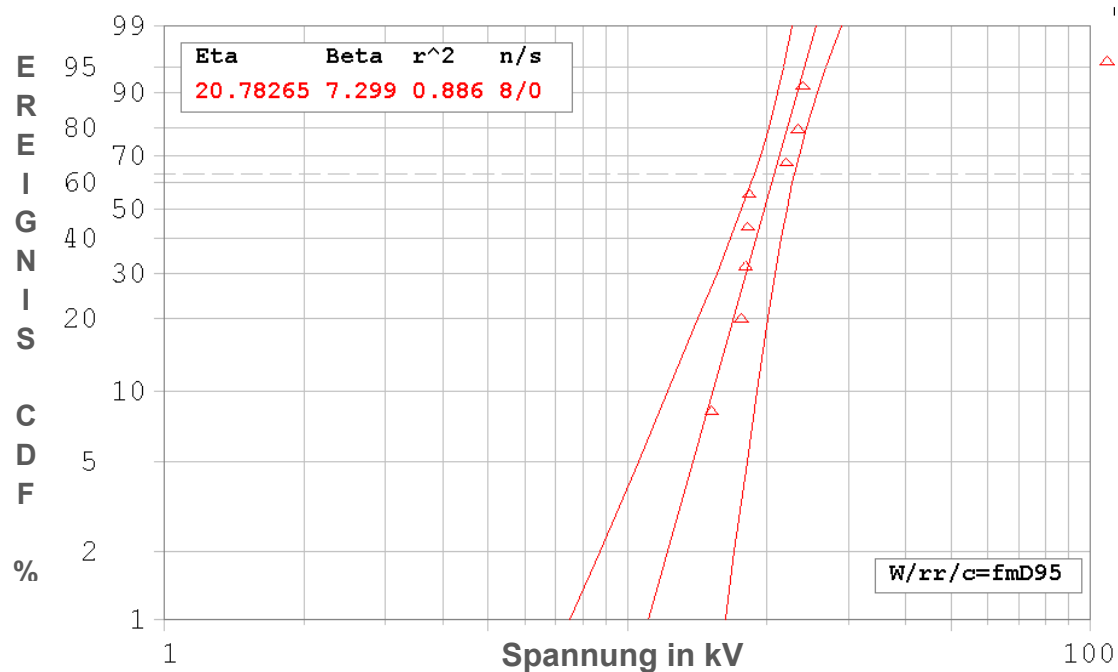


Abbildung 79: Teilentladungseinsetzspannung (Weibull-Nennwert) der HYB- Prüfkörper, Prüfkörpergruppe A und B; Korrelation (r)=0,941

6.2.2 Ergebnisse bei konstanter Spannungsbeanspruchung (Kanalaufbau)

Die Messungen bei einer empirisch festgelegten, konstanten Spannung von 30 kV schließen sich unmittelbar an die Messungen nach 6.2.1 an. Die Spannung wird mit 0,5 kV/min bis zum eingestellten Wert gesteigert und dann konstant gehalten. Die zeit-synchrone Aufzeichnung der vom elektrischen und optischen Messkanal erfassten Signale erfolgte als Streams (Dauer 45 s) und als Screenshots (Prüfkörpergruppe A und C) sowie als Bildfolge durch das Kamerasystem (Prüfkörpergruppe B). Der Zeitpunkt der Aufzeichnung ist in den nachfolgenden Grafiken angegeben.

6.2.2.1 Ergebnisse der vergleichenden elektrischen und optischen Messung mit Kollimator-Optik

6.2.2.1.1 Prüfkörper mit DFL-Elektroden

PRPD-Diagramme

In den Abbildungen 80 und 81 sind ausgewählte Histogramme in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer für einen Prüfkörper der DFL-Gruppe, Prüfkörpergruppe A, angegeben. Diese sind typisch für diese Prüfkörpergruppe. Die phasen aufgelösten Muster zeigen eine ähnliche Charakteristik wie die Muster der Elektrodenanordnung mit nadelförmiger Hochspannungselektrode (vgl. Abschnitt 6.1.2). Erkennbar ist die Konzentration von Teilentladungsimpulsen im Bereich des Nulldurchganges und der ansteigenden Flanke jeder Halbwelle. Bei Erreichen des Spannungsmaximums setzen die Impulse schlagartig aus. Eine Änderung der Struktur der Muster für unterschiedliche Beanspruchungszeiträume war nicht feststellbar. Die Beanspruchungszeiträume bis zum Durchschlag lagen in einem Bereich von 300 min und größer. War nach 300 min kein weiterer Anstieg der scheinbaren Ladung erkennbar, wurde die Messung beendet.

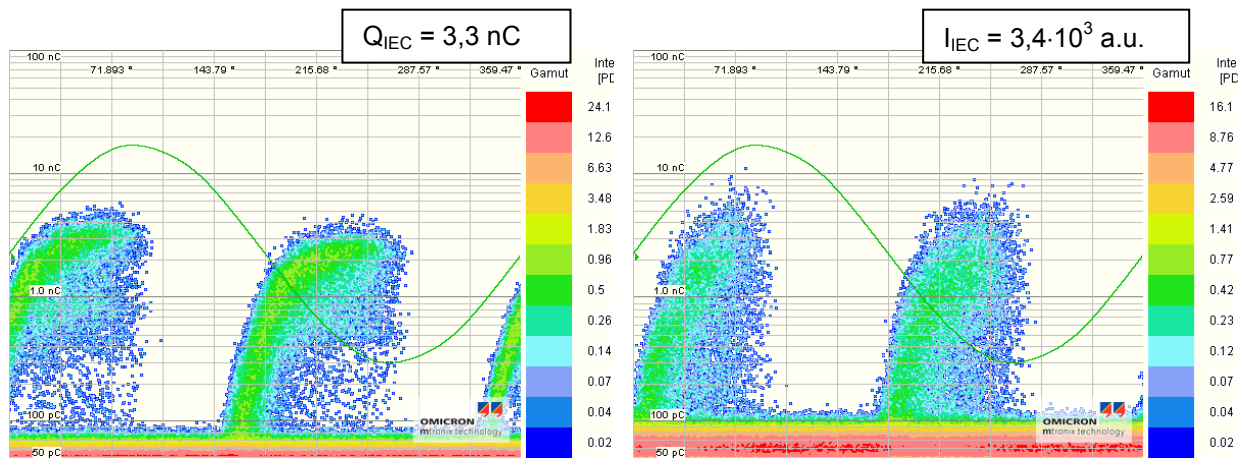


Abbildung 80: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 30 kV; Prüfkörper DFL 2; Prüfkörpergruppe A

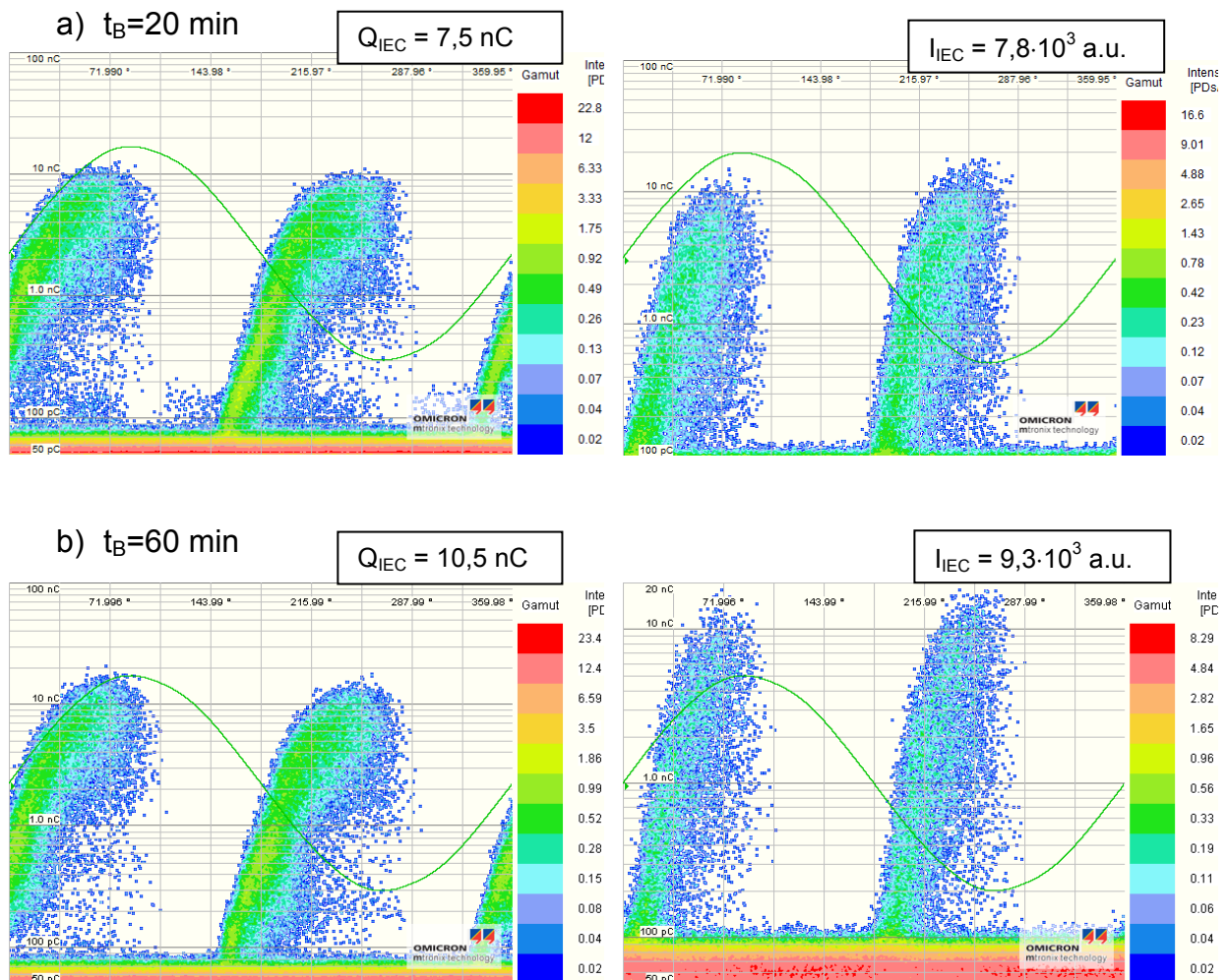


Abbildung 81: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Prüfkörper DFL 2; Prüfkörpergruppe A; Spannung: 30 kV

Ein Prüfkörper (DFL 13) zeigte einen steilen Ladungsanstieg, so dass die Messung kurz nach Erreichen der konstanten Spannung abgebrochen werden musste. Ein Herstellungsfehler kann bei diesem Prüfkörper nicht ausgeschlossen werden.

Ladungsverlauf und Verlauf der optischen Intensität

Die Abhängigkeit der scheinbaren Ladung und der optischen Intensität von der Beanspruchungsdauer für ausgewählte Prüfkörper zeigen die Abbildungen 82 bis 84.

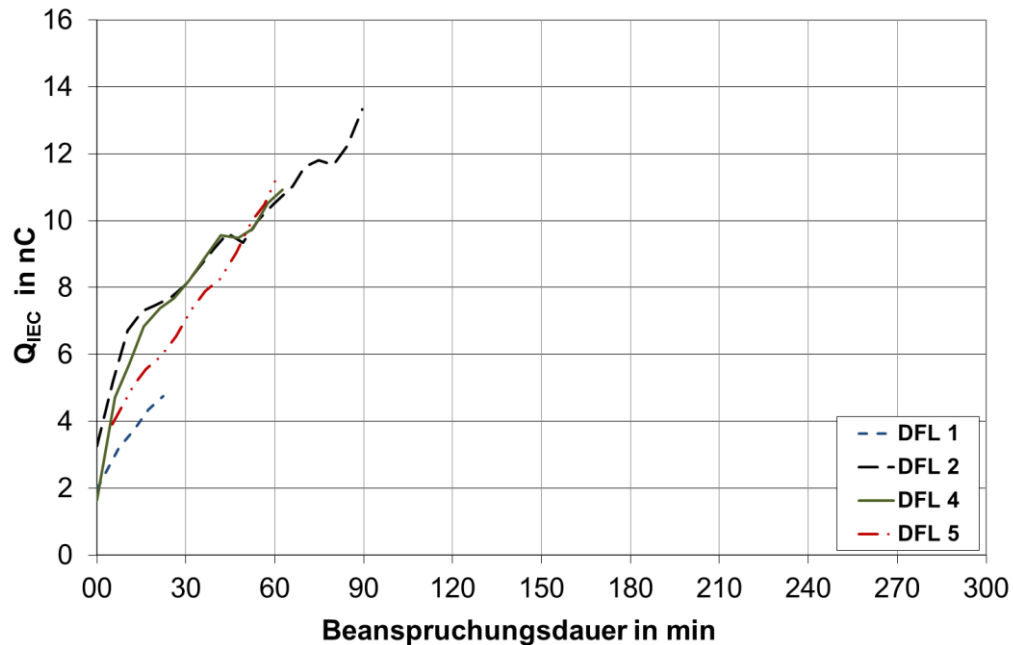


Abbildung 82: Scheinbare Ladung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; DFL- Prüfkörper, Prüfkörpergruppe A

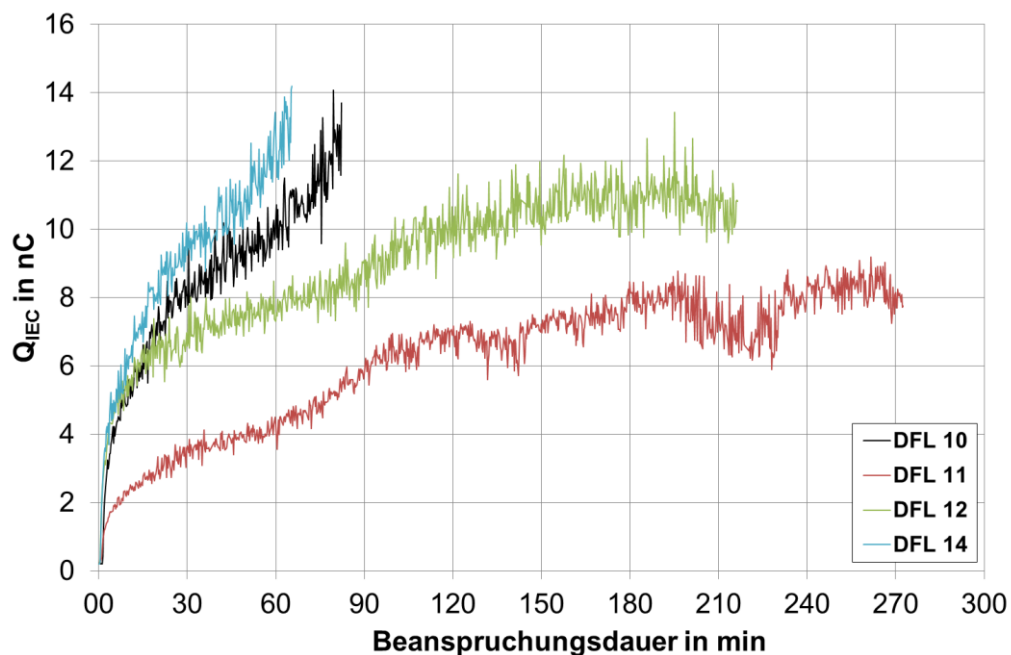


Abbildung 83: Scheinbare Ladung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; DFL- Prüfkörper, Prüfkörpergruppe B

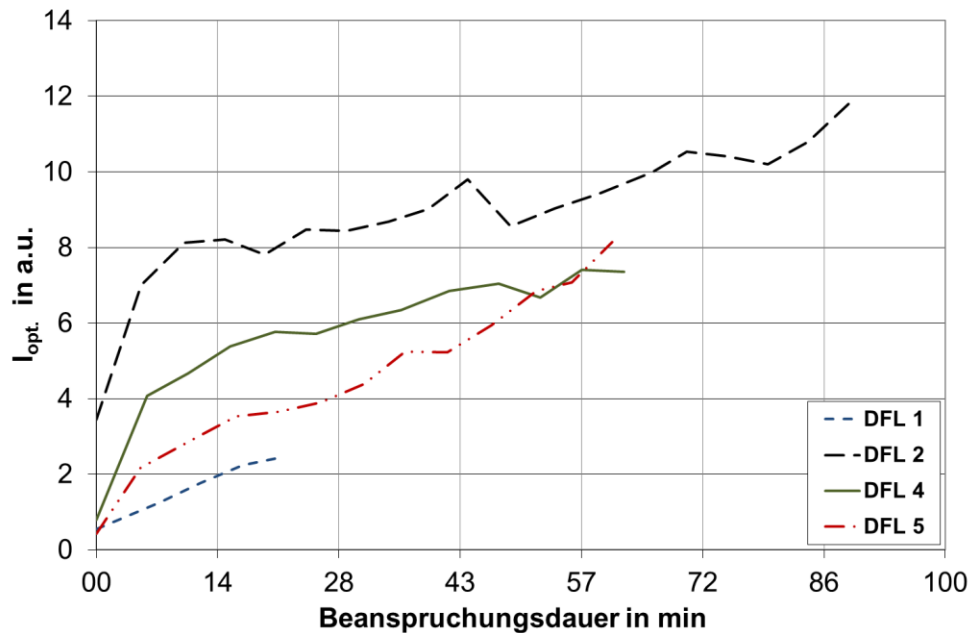


Abbildung 84: Optische Intensität in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; DFL- Prüfkörper, Prüfkörpergruppe A; Kollimator-Optik

Die scheinbaren Ladungen steigen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer kontinuierlich aber unterschiedlich stark an. Für die Prüfkörper DFL 11 und DFL 12 bleibt die scheinbare Ladung mit zunehmender Beanspruchungsdauer annähernd konstant (lange Beanspruchungsdauer). Der ebenfalls kontinuierliche aber unterschiedliche Anstieg der optischen Intensität mit der Beanspruchungsdauer in Abbildung 84 zeigt sich auch in den Anstiegen der scheinbaren Ladung für die genannten Prüfkörper in Abbildung 82.

Impulsrate

Die Impulsrate in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer ist für die in den Abbildungen 82 bis 84 genannten Prüfkörpern in den Abbildungen 85 bis 87 dargestellt.

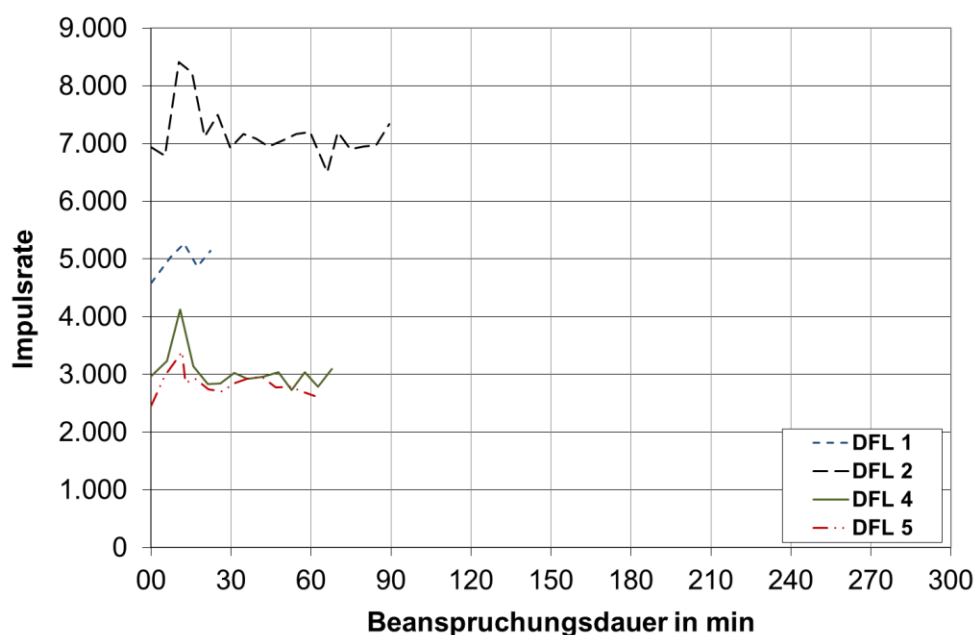


Abbildung 85: Impulsrate des elektrischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; DFL- Prüfkörper, Prüfkörpergruppe A

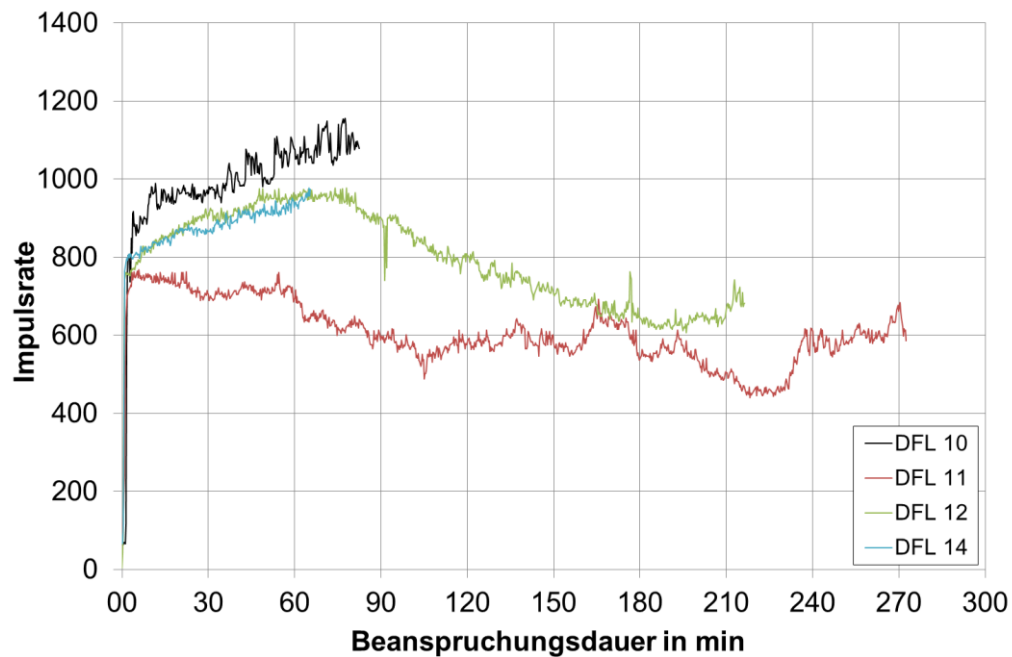


Abbildung 86: Impulsrate des elektrischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; DFL- Prüfkörper, Prüfkörpergruppe B

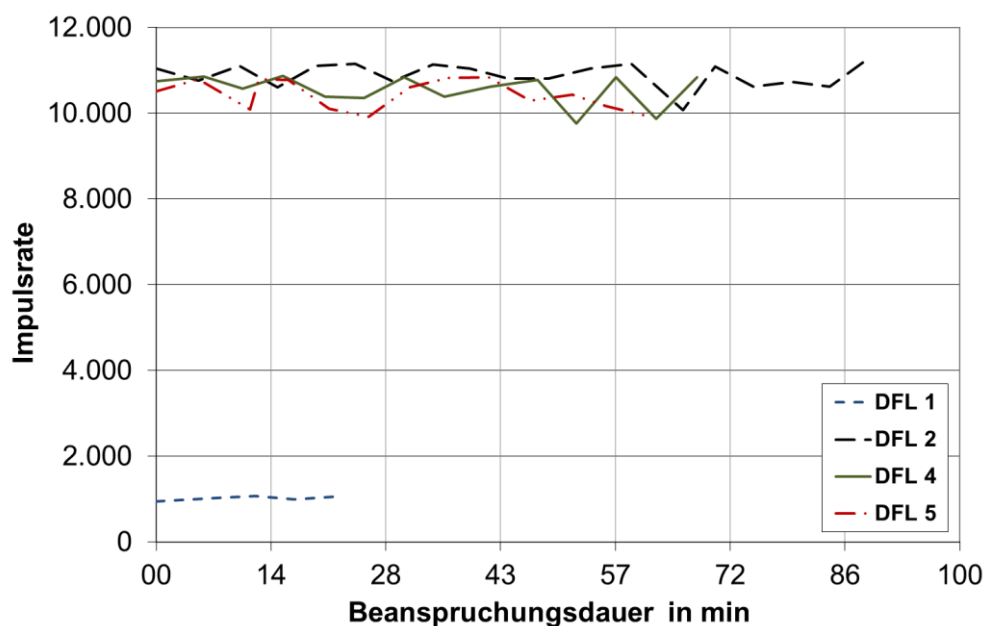


Abbildung 87: Impulsrate des optischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; DFL- Prüfkörper, Prüfkörpergruppe A; Kollimator-Optik

Die mit dem elektrischen und optischen Messkanal ermittelten Impulsraten in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer verhalten sich analog zur scheinbaren Ladung und optischen Intensität. Ein unterschiedlicher Anstieg der scheinbaren Ladung mit der Beanspruchungsdauer (Abbildung 82) führt zu Anstiegen der elektrisch gemessenen Impulsrate in der Anfangsphase der Beanspruchung (DFL Prüfkörper, Prüfkörpergruppe A) und zu unterschiedlich leichten Anstiegen während der Beanspruchungsdauer bis ca. 90 min (DFL 10 und 14, Prüfkörpergruppe B, siehe Abbildung 86). Zeigt die scheinbare Ladung ein nahezu asymptotisches Verhalten bei längerer Beanspruchungsdauer

sind die Impulsraten konstant und sinken mit der Beanspruchungsdauer ab (DFL 11 und 12; Prüfkörpergruppe B, Abbildungen 86 und 147).

Die Anstiege der optischen Intensität mit der Beanspruchungsdauer (siehe Abbildung 84) führen zu konstanten Impulsraten im optischen Messkanal (siehe Abbildung 87).

6.2.2.1.2 Prüfkörper mit HYB-Elektroden

PRPD-Diagramme

Kennzeichnend für die HYB-Prüfkörper war ein im Vergleich zu den DFL-Prüfkörpern unterschiedlicher, relativ steiler Anstieg der scheinbare Ladung nach Erreichen der konstanten Spannung, der zu einer großen Streuung der erreichbaren Beanspruchungszeiten bis zum Durchschlag führte.

Die erhaltenen PRPD-Diagramme von beiden Messkanälen sind für unterschiedliche Beanspruchungszeiten am Beispiel des Prüfkörper HYB 5 in den Abbildungen 88 bis 90 gezeigt. Die Intensitäten in der positiven und negativen Halbwelle sind gleich. Die Muster ändern sich nicht mit der Beanspruchungsdauer. Die maximale Beanspruchungsdauer bis zum Durchschlag lag bei 38 min. Für die Mehrzahl der Prüfkörper trat der Durchschlag bereits nach einer Beanspruchungsdauer von 3 min ein.

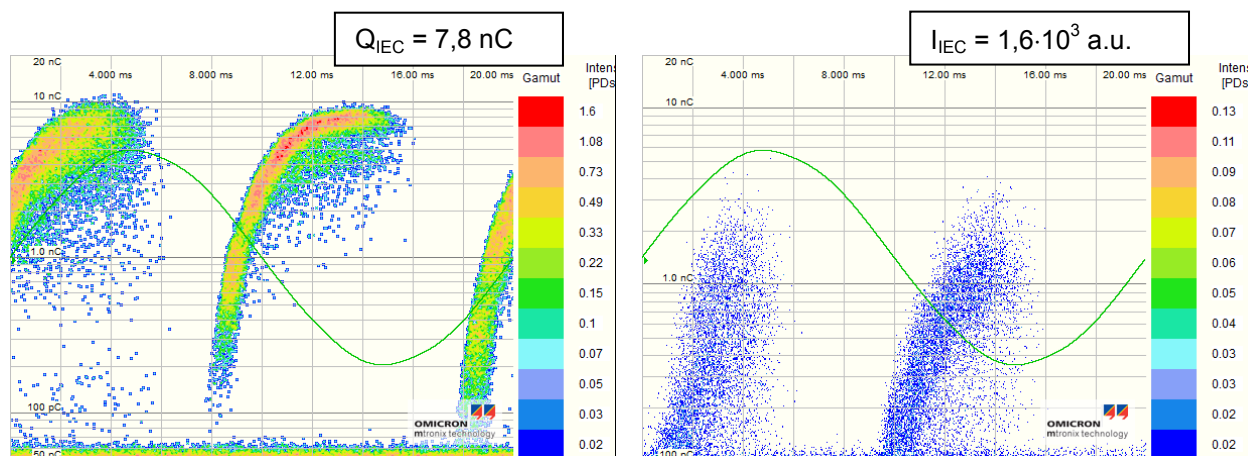


Abbildung 88: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 30 kV; Prüfkörper HYB 5; Prüfkörpergruppe A, Kollimator-Optik mit Graufilter

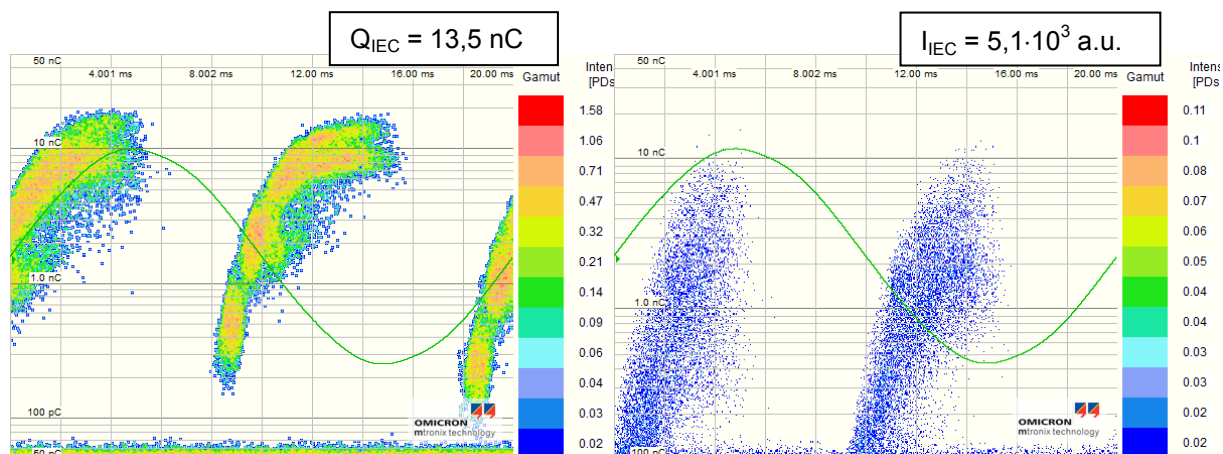


Abbildung 89: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=37$ min; Spannung: 30 kV; Prüfkörper HYB 5; Prüfkörpergruppe A; Kollimator-Optik mit Graufilter

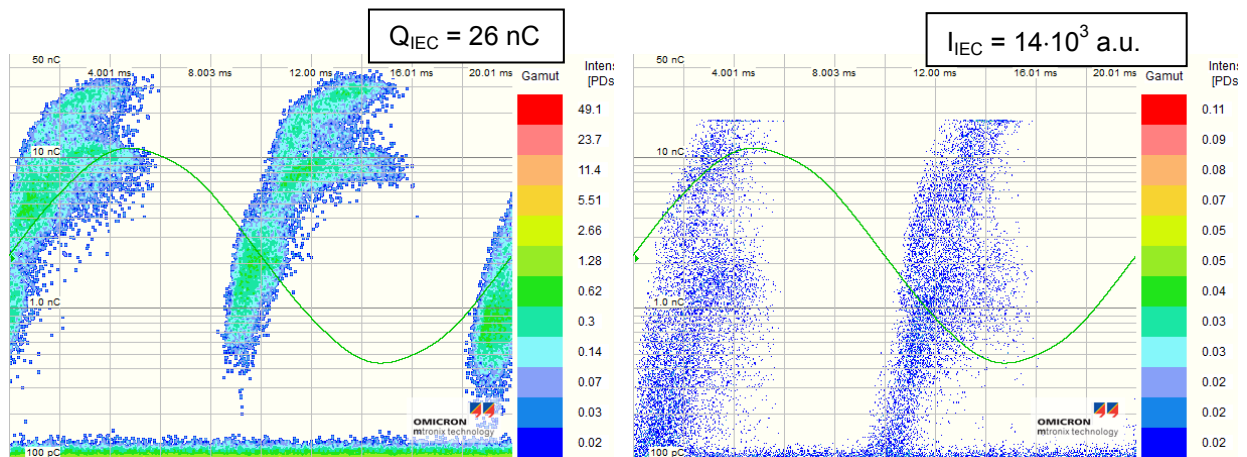


Abbildung 90: Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=53$ min; Spannung: 30 kV; Prüfkörper HYB 5; Prüfkörpergruppe A, Kollimator-Optik mit Graufilter

Die analoge Darstellung für einen Prüfkörper mit kürzerer Beanspruchungszeit enthalten die Abbildungen 91 bis 93.

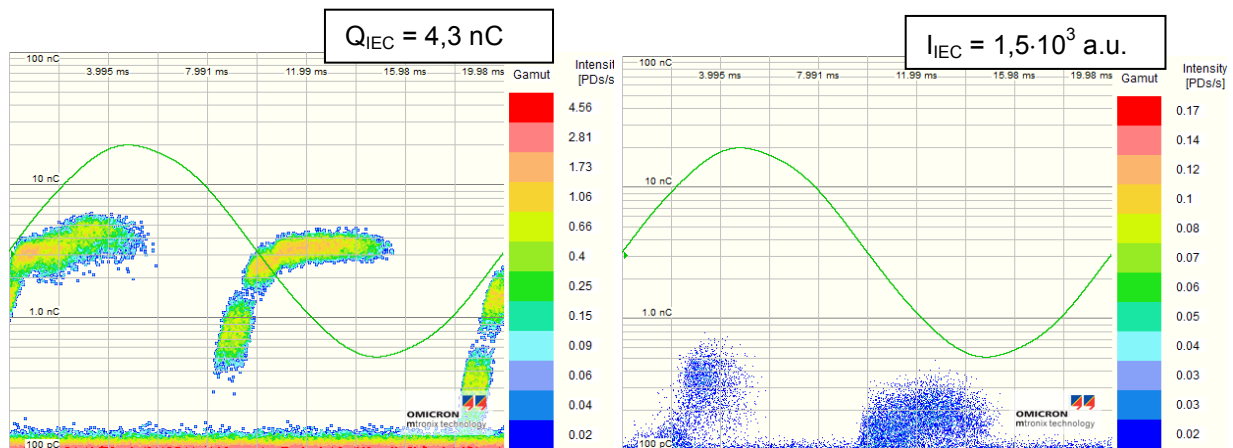


Abbildung 91 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach Erreichen des Spannungswertes von 30 kV; Prüfkörper HYB 3; Prüfkörpergruppe A, Kollimator-Optik

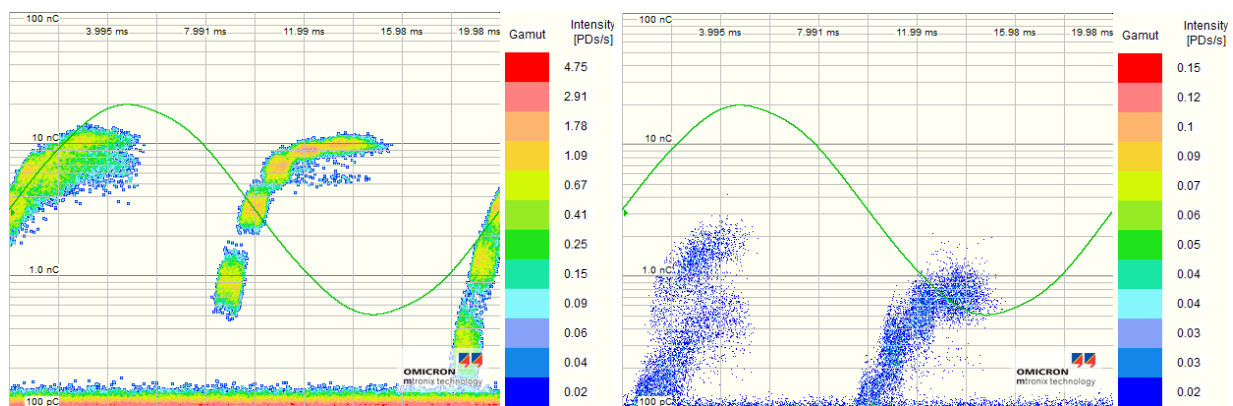


Abbildung 92 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=10$ min; Spannung: 30 kV; Prüfkörper HYB 3, Prüfkörpergruppe A; Kollimator-Optik

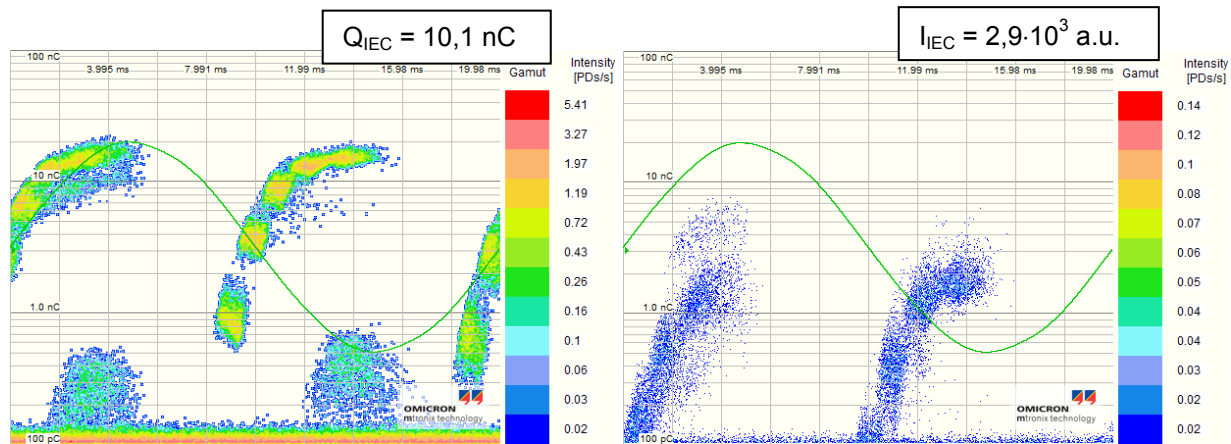


Abbildung 93 Vergleich der elektrisch (links) und optisch (rechts) visualisierten Histogramme nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=20$ min; Spannung: 30 kV
Prüfkörper HYB 3, Prüfkörpergruppe A; Kollimator-Optik

Ladungsverlauf und Verlauf der optischen Intensität

Analog zu den Darstellungen der DFL-Gruppe enthalten die Abbildungen 94 bis 96 die scheinbaren Ladungen und optischen Intensitäten in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer.

Die scheinbare Ladung und die vom optischen Messkanal detektierte Intensität stiegen mit der Beanspruchungsdauer relativ stark an. Im Vergleich zum Anstieg der DFL-Gruppe wurde nach kurzer Zeit ein Vielfaches der Anfangswerte bei konstanter Spannung von 30 kV erreicht, insbesondere bei Prüfkörpern mit einer Beanspruchungsdauer von unter 3 min bis zum Durchschlag.

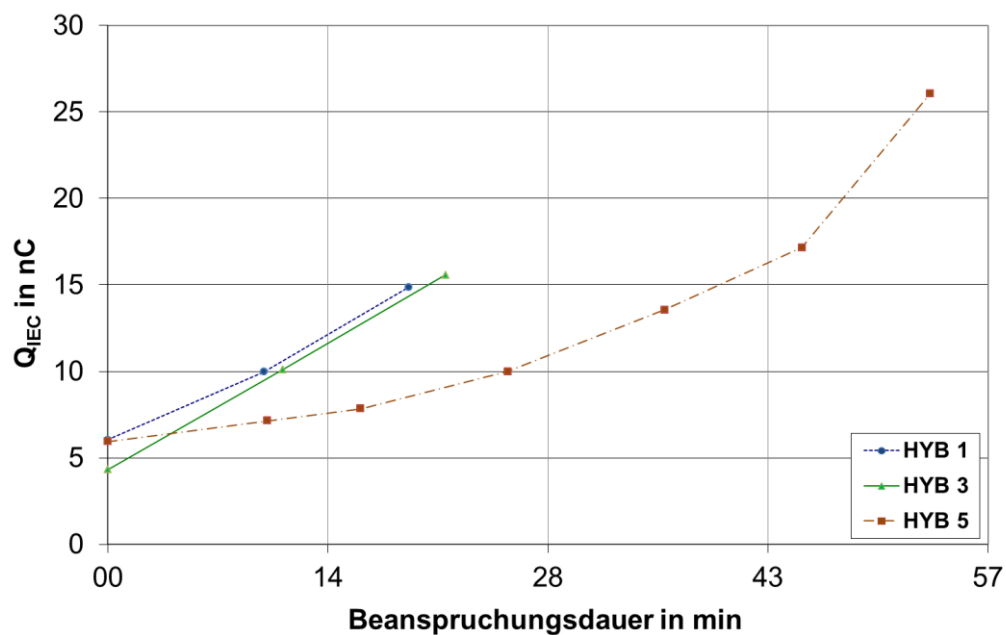


Abbildung 94: Scheinbare Ladung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe A

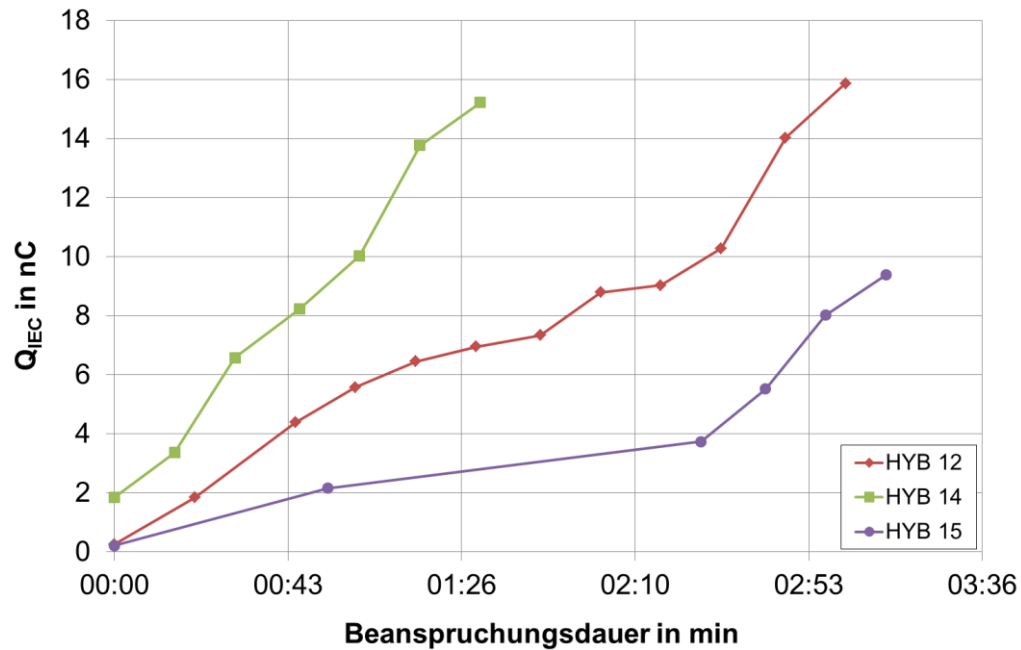


Abbildung 95: Scheinbare Ladung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe B

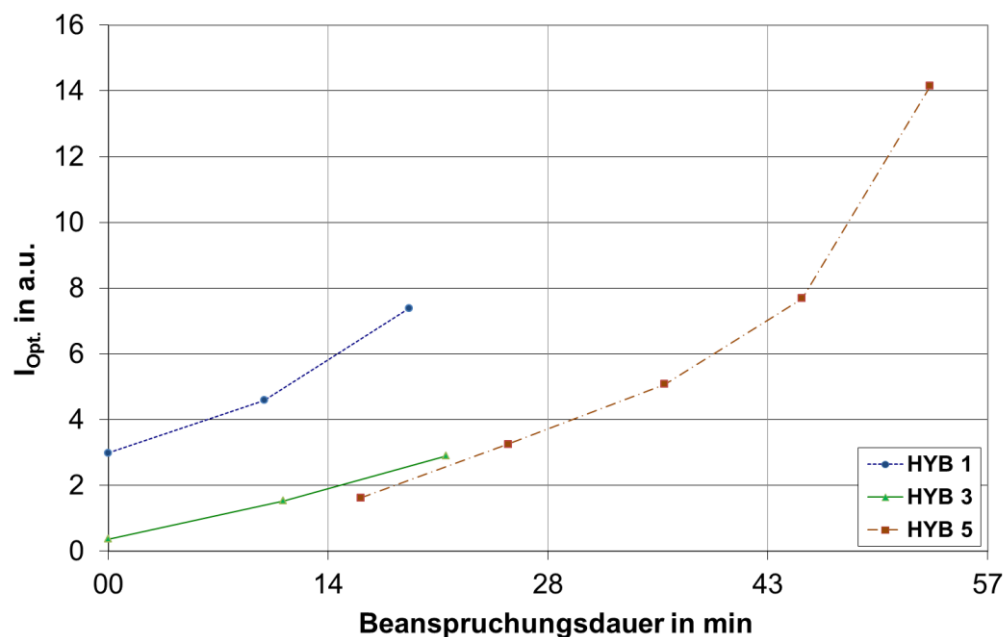


Abbildung 96: Optische Intensität in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe A; Kollimator-Optik

Abbildung 95 zeigt die Abhängigkeit der scheinbaren Ladung für Prüfkörper, deren Beanspruchungsdauer bis zum Durchschlag kleiner 3 min war.

Impulsrate

Die Veränderungen der Impulsraten mit der Beanspruchungsdauer sind in den nachfolgenden Abbildungen gezeigt. Die Abbildungen 97 und 99 enthalten die vom elektrischen Messkanal gemessenen Werte und die Abbildung 98 mit dem optischen Messkanal detektierten Werte.

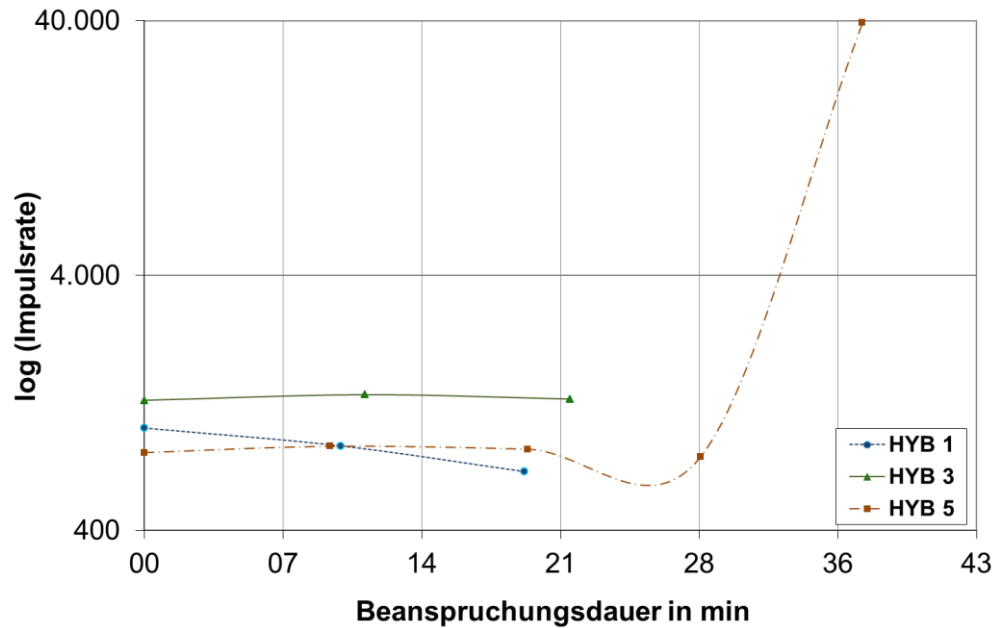


Abbildung 97: Impulsrate des elektrischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe A

Die von beiden Messkanälen aufgezeichnete Impulsrate blieb mit wachsender Beanspruchungsdauer konstant (Abbildungen 97 und 98), wobei die Beanspruchungsdauer bis zum Durchschlag ≥ 20 min betrug. Als Besonderheit ergab sich für den Prüfkörper HYB 5 ein deutlicher Anstieg der Impulsrate im elektrischen Messkanal nach 30 min Beanspruchungsdauer, der vom optischen Messkanal nicht registriert wurde.

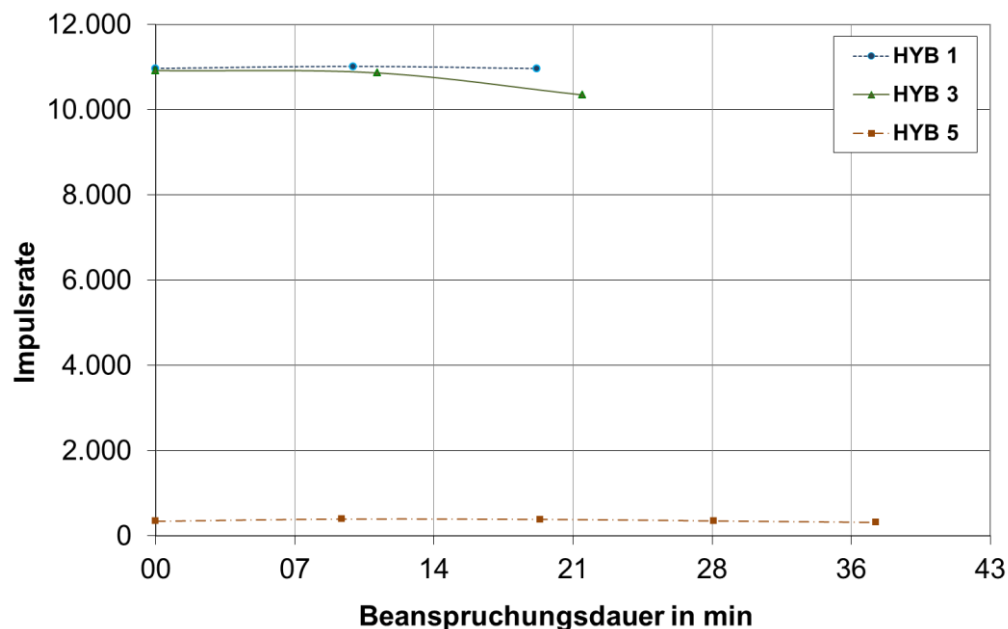


Abbildung 98: Impulsrate des optischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe A; Kollimator-Optik

Für Prüfkörper mit sehr kurzen Beanspruchungszeiten, gekennzeichnet durch einen steilen Anstieg der scheinbare Ladung (Abbildung 95), stiegen die Impulsraten nach

Erreichen der konstanten Spannung vergleichbar an, bevor wieder konstante Werte gemessen wurden (Abbildung 99).

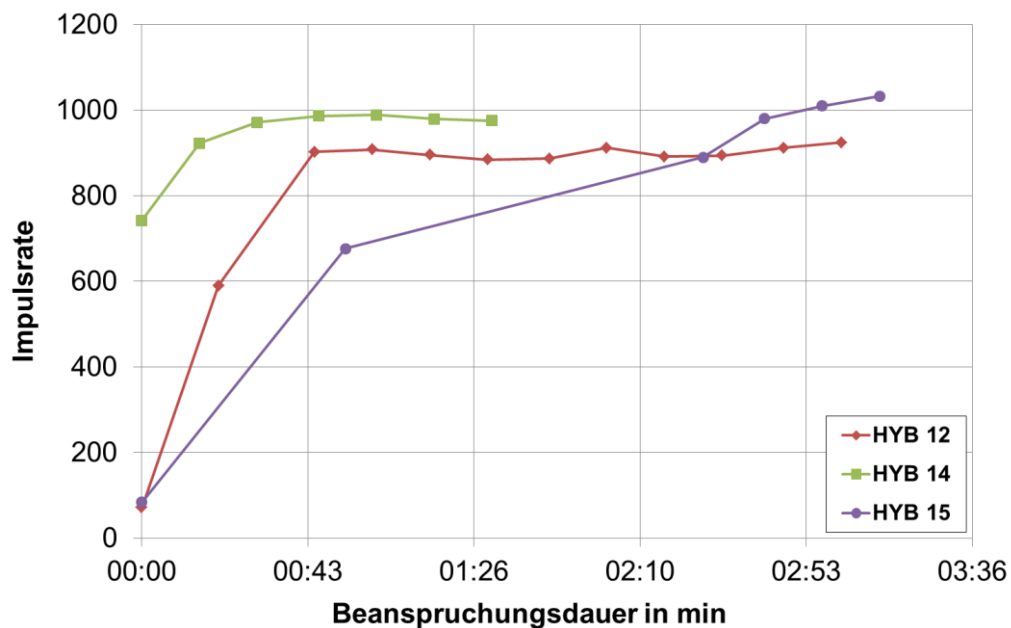


Abbildung 99: Impulsrate des elektrischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung: 30 kV; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe B

6.2.2.2 Ergebnisse zur optischen Signalerfassung mit der FOF-Optik

Ein Vergleich der bei stufenförmiger Spannungssteigerung zeitsynchron aufgezeichneten Ergebnisse zum TE-Einsatz mit der FOF-Optik (Prüfkörper DFL 6 und 7) und der Kollimator-Optik (Prüfkörper DFL 4 und 5) mit den jeweiligen Ergebnissen des elektrischen Messkanals ergab übereinstimmende Spannungswerte. Damit bestätigte sich, dass die optische Intensität bei TE-Einsatz für eine Signalerfassung ausreichend hoch war. Weiterhin zeigte sich ein relativ schneller Ladungsanstieg unmittelbar nach TE-Einsatz auf Werte um 100 pC. Auch die Spannungswerte für das Aussetzen der Teilentladungen wurden von allen Messkanälen bei nahezu gleichen Spannungswerten angezeigt (max. Spannungsdifferenz zu elektrisch angezeigten Werten 0,5 kV bei einem Prüfkörper).

Der Vergleich der bei konstanter Spannung vom elektrischen Messkanal angezeigten scheinbaren Ladung und optischen Intensität mit den Ergebnissen des Messkanals mit FOF-Optik für die Prüfkörper DFL 6 und 7 bestätigte die im Abschnitt 6.2.2.1 dargestellten Ergebnisse (siehe Abbildungen 82 und 84).

Die scheinbare Ladung und optischen Intensitäten stiegen mit der Beanspruchungsdauer an, während die Impulsraten in beiden Messkanälen nahezu konstant war (vgl. Abbildungen 85 und 87).

Es ist aber anzumerken, dass es wegen der relativ hohen optischen Intensität während der Beanspruchungsdauer zu Übersteuerungen des optischen Wandlers kam, die die Messwerte beeinflussten.

6.2.2.3 Kanal-/ Treewachstum

Diese Messungen wurden wie im Abschnitt 5.3 beschrieben durchgeführt. Die Ergebnisse werden für beide Prüfkörpergruppen getrennt dargestellt.

Prüfkörper der DFL-Gruppe

Die Abbildungen 100 bis 102 zeigen als Beispiele die visualisierten Histogramme und die zeitsynchron dazu aufgenommenen Bilder der sich ausbildenden Kanalstrukturen nach unterschiedlich langer Beanspruchungsdauer. Diese Ergebnisse sind typisch für die DFL-Prüfkörper. Die charakteristische Form der Histogramme ändert sich nicht mit der Beanspruchungsdauer in Übereinstimmung mit den Ergebnissen in den Abbildungen 80 und 81.

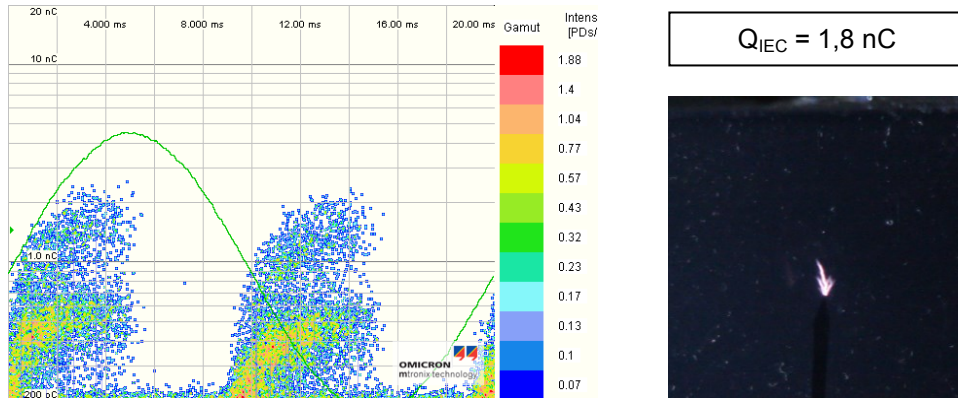
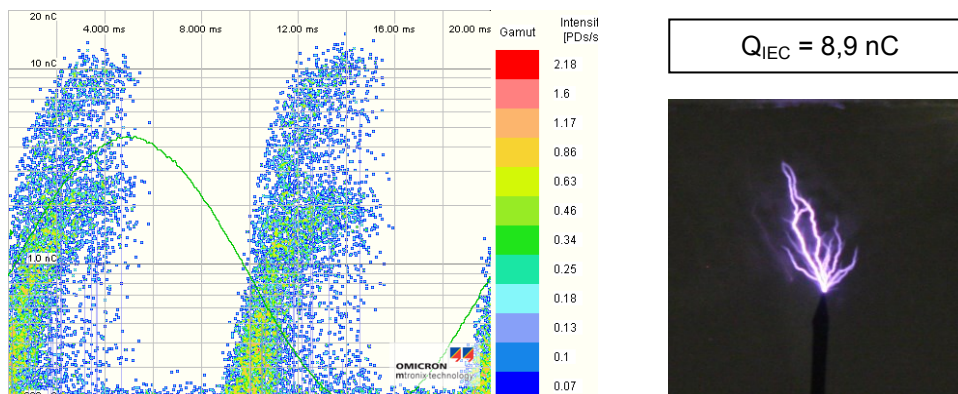


Abbildung 100: PRPD-Diagramm und Treebild nach Erreichen des Spannungswertes von 30 kV; Prüfkörper: DFL 14, Prüfkörpergruppe B

a) $t_B = 27 \text{ min}$



b) $t_B = 50 \text{ min}$

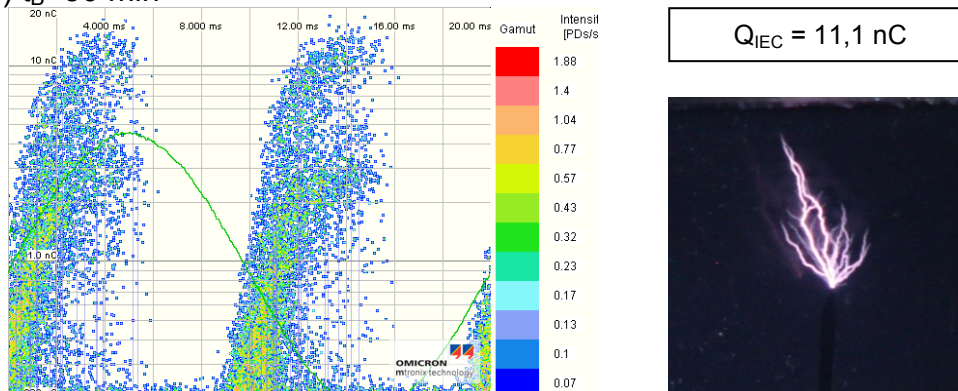


Abbildung 101 PRPD-Diagramme und Treebilder nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Prüfkörper: DFL 14, Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

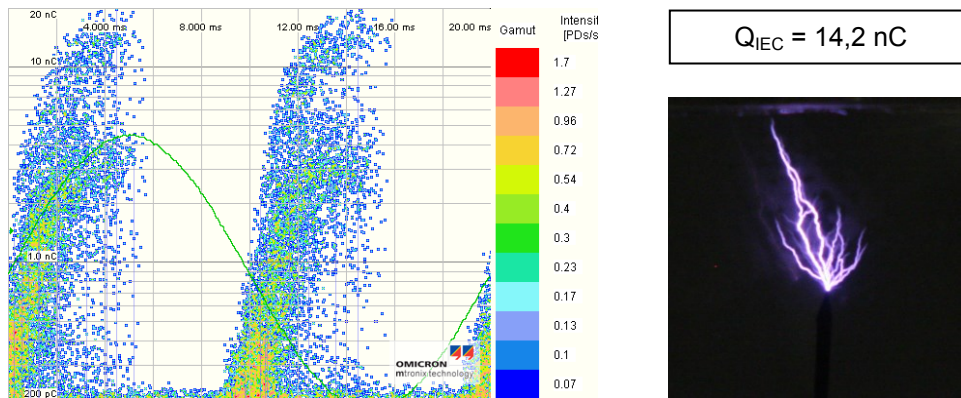


Abbildung 102: PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_b=64 \text{ min}$; Prüfkörper: DFL 14, Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

Ergänzend zu den gezeigten Treestrukturen sind in Abbildung 103 weitere Strukturen abgebildet, die nach Abschluss der Messungen aufgezeichnet wurden.

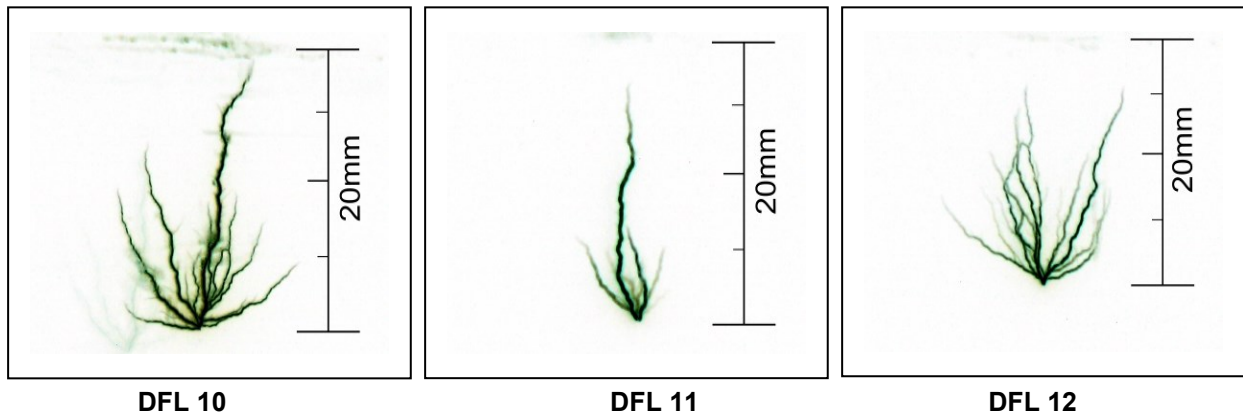


Abbildung 103: Treestrukturen nach Abschluss der Messung; Beanspruchungsdauer: DFL 10: $\leq 90 \text{ min}$, DFL 11: 270 min und DFL 12: 215 min; Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

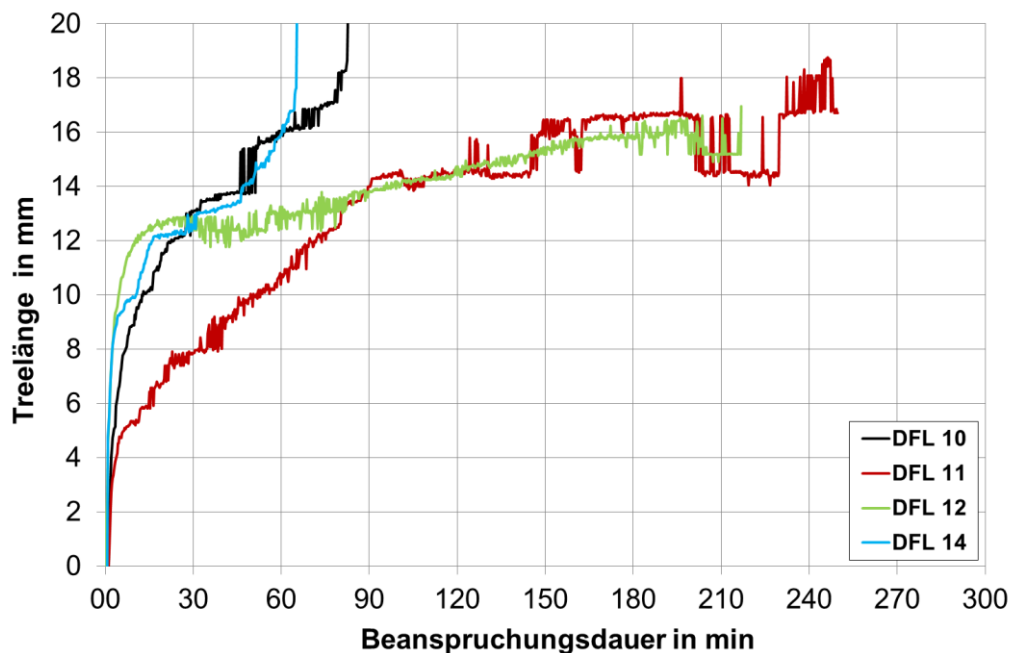


Abbildung 104: Tree-/Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Spannung 30 kV; DFL-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe B

Analog zu den Strukturen in laborgelagerten Prüfkörpern (Abschnitt 6.1.2.1) bildeten sich ebenfalls zweigförmige Treestrukturen aus, die sich für die unterschiedlichen Beanspruchungsdauern nicht grundsätzlich unterschieden. Im Prüfkörper DFL 12 (Beanspruchungsdauer 215 min) bildete der Tree eine Vielzahl von Kanälen, beginnend an der Elektrodenspitze, aus, von denen sich zwei Kanäle in Richtung Gegenelektrode ausbreiteten. Im zweiten Prüfkörper (DFL 11) mit ähnlich langer Beanspruchungsdauer dominierte von Beginn an ein Hauptkanal, in dem die Entladungen aber wieder verlöschten. Der Prüfkörper DFL 10 mit kürzerer Beanspruchungsdauer (<90 min) bildete ebenso wie auch ein zweiter Prüfkörper (DFL 14) neben weiteren Kanälen aus dem jeweils dominierende Hauptkanäle in Richtung Gegenelektrode aus.

Das berechnete Wachstum für die Prüfkörper dieser Gruppe in Abhängigkeit von der Belastungsdauer ist in Abbildung 104 dargestellt (siehe Abschnitt 5.3).

Jeweils zwei Prüfkörper zeigen eine vergleichbare Geschwindigkeit. Für die Prüfkörper DFL 11 und DFL 12 kommt das Wachstum fast völlig zum Erliegen.

Prüfkörper der HYB-Gruppe

Ein Beispiel für die vom elektrischen Messkanal aufgezeichneten Histogramme mit den zugehörigen Treebildern ist in den Abbildungen 105 bis 108 gezeigt. Analog zu den Ergebnissen mit DFL-Elektroden (Abbildungen 100 bis 102) sind die Entladungsaktivitäten in beiden Halbwellen gleich und ändern sich nicht mit der Beanspruchungsdauer. Die ausgebildeten Treestrukturen sind ebenfalls zweigförmig. Die Kanalabmessungen sind bei offensichtlich reduzierter Anzahl der Zweige deutlich vergrößert.

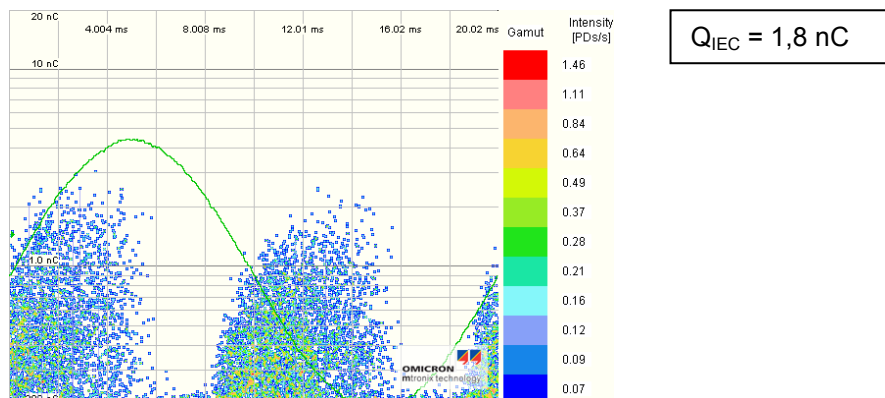


Abbildung 105: PRPD-Diagramm nach Erreichen des Spannungswertes von 30 kV; Prüfkörper: HYB 12. Prüfkörpergruppe B

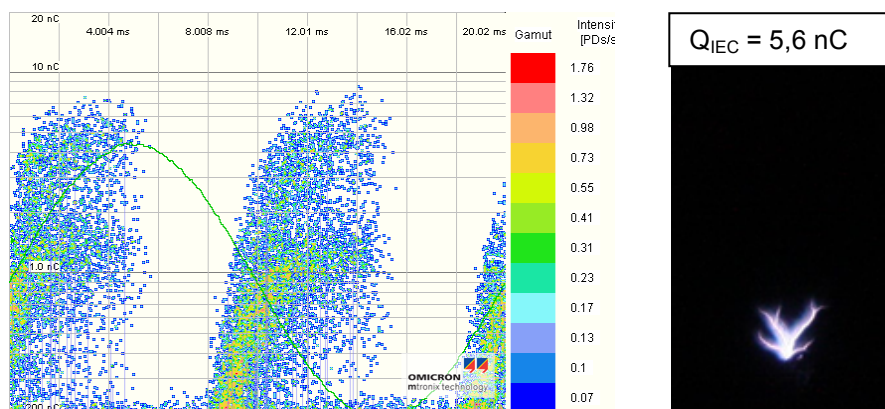


Abbildung 106 PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=1$ min; Prüfkörper: HYB 12. Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

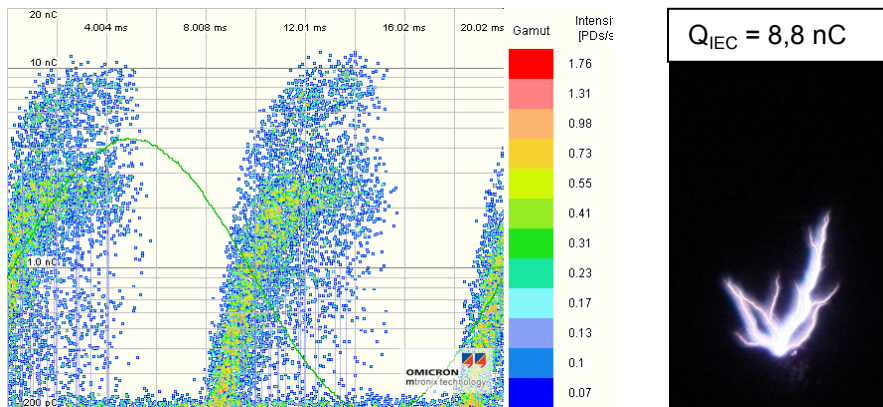


Abbildung 107: PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=2 \text{ min}$; Prüfkörper: HYB 12. Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

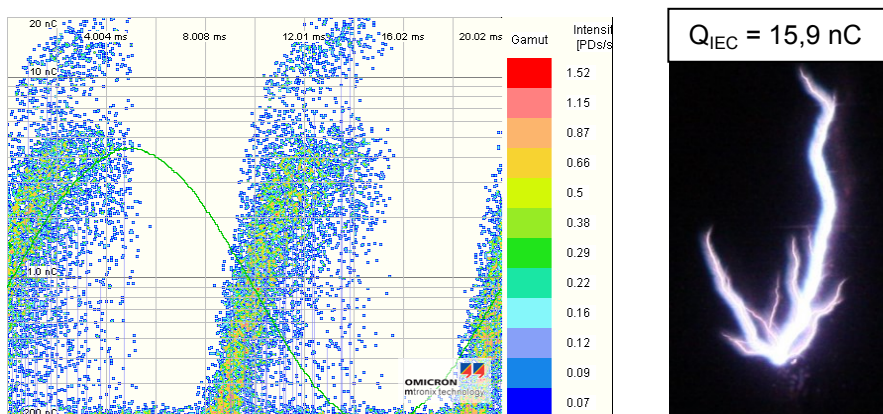


Abbildung 108: PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=3 \text{ min}$; Prüfkörper: HYB 12. Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

Beispiele für die sich ausgebildeten Treestrukturen unmittelbar vor dem Durchschlag zeigt Abbildung 109.

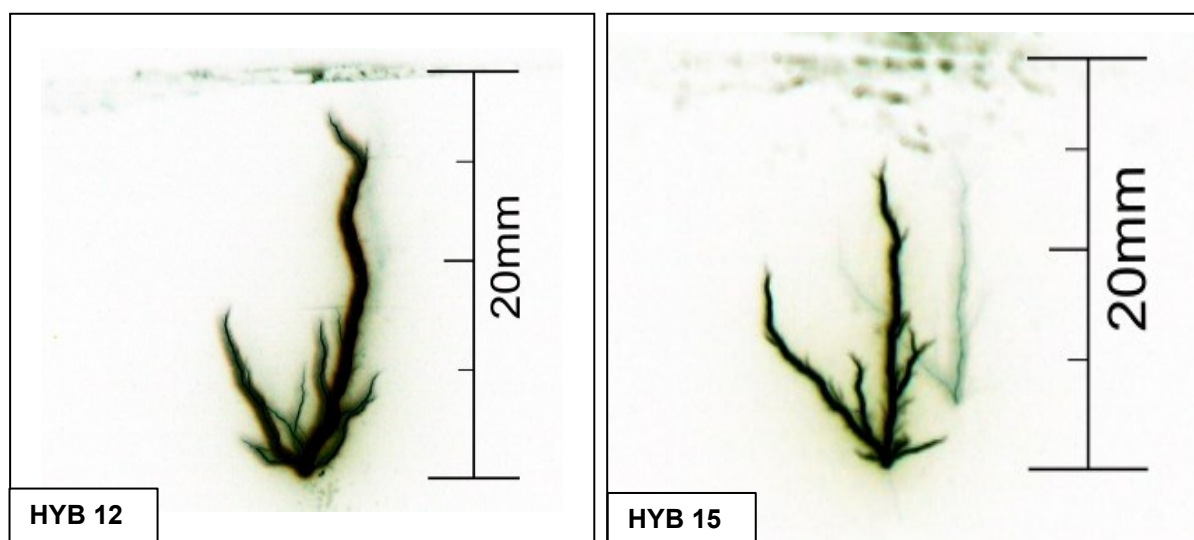


Abbildung 109: Treestrukturen unmittelbar vor dem Durchschlag; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

Das für diese Prüfkörper mit relativ kurzen Beanspruchungszeiten bis zum Durchschlag ermittelte Wachstumsverhalten der Trees ist in der Abbildungen 110 zusammengefasst. Die Prüfkörper wiesen eine vergleichbar hohe Wachstumsgeschwindigkeit auf.

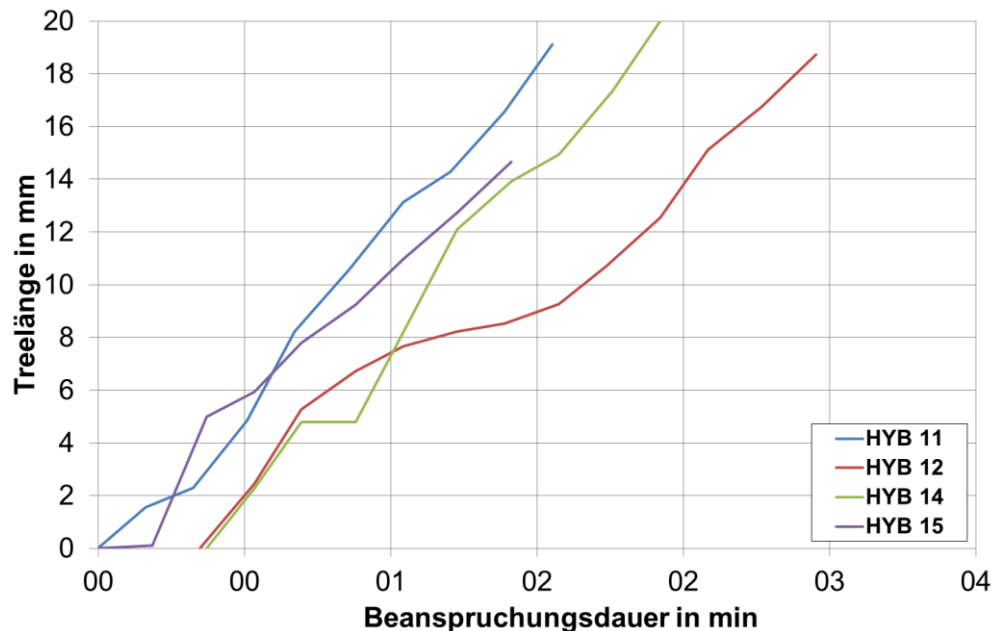


Abbildung 110: Tree-/Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; HYB-Prüfkörper; Prüfkörpergruppe B; Spannung: 30 kV

6.3 Prüfkörper mit VPE-Silikon-Grenzfläche mit Nadelelektrode

Die Ziele der zeitsynchron ausgeführten optischen und elektrischen Signalerfassung beinhalteten Untersuchungen zur Auswirkung des optisch dichten VPE-Kerns auf die optische Signaldetektion, insbesondere bei Verwendung der FOF-Optik und zum Kanaleinsatz- und -aufbau einschließlich Aufzeichnung des Tree-/Kanalwachstum.

6.3.1 Ergebnisse bei stufenförmiger Spannungssteigerung (Kanaleinsatz)

Eingesetzt wurden Prüfkörper aus beiden Prüfkörpergruppen. Die elektrischen und optischen Messkanäle registrieren das Einsetzen der Teilentladungen jeweils bei gleichen Spannungswerten. Das Aussetzen der Teilentladungen wurde von den optischen Messkanälen bei höheren Spannungen als im elektrischen Messkanal festgestellt (größte Differenz 11,3 kV durch den optischen und 6,8 kV durch den elektrischen Kanal). Die Messwerte des elektrischen Messkanals für das Aussetzen der Teilentladungen liegen in einem Bereich von 6,8 kV bis 8,7 kV.

Der Einfluss der Vorbehandlung der Mantelfläche des VPE-Kerns auf den Teilentladungseinsatz wurde ausschließlich mit baugleichen kubischen Prüfkörpern der Prüfkörpergruppe I und II durch eine elektrische Messung (Messkanal MP 1.1) vor der Aufzeichnung des Tree-/Kanalwachstum bestimmt. Die statistische Auswertung der Ergebnisse für Prüfkörper mit unbehandelter und mit vorbehandelter Mantelfläche des VPE-Kerns enthält Abbildung 111, wobei zuvor wieder der Ausreißertest durchgeführt wurde.

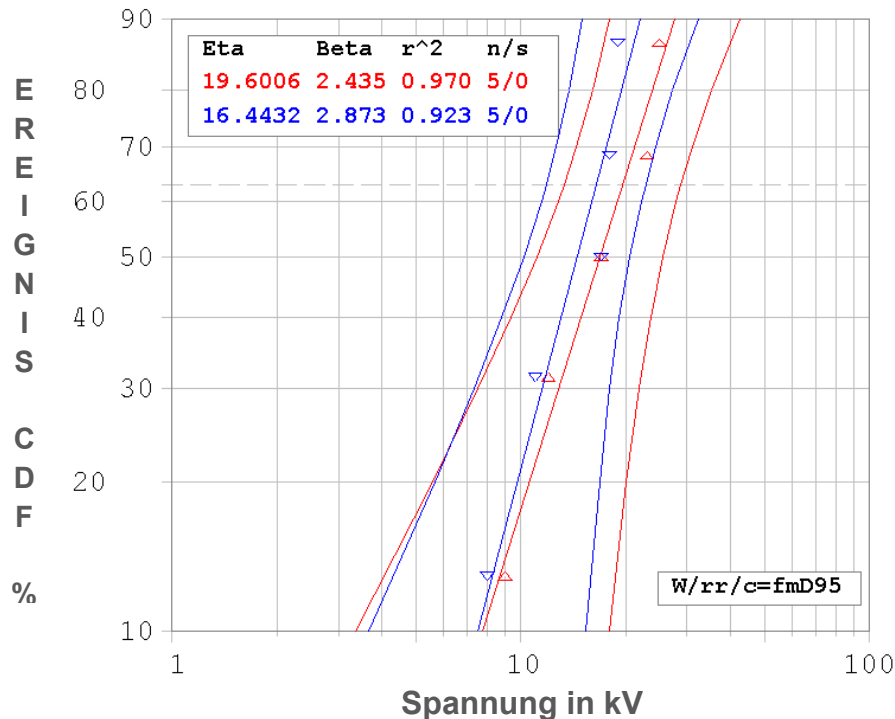


Abbildung 111: Weibullverteilungen der TE-Einsetzspannungen (elektrischer Messkanal MP 1.1) von Prüfkörpern mit unterschiedlicher Vorbehandlung der Mantelfläche des VPE-Kerns;
 Korrelation (r): Prüfkörpergruppe I (ohne Vorbehandlung, blaue Kurve) 0,985
 Prüfkörpergruppe II (mit Vorbehandlung, rote Kurve) 0,961

Das 63%-Quantil der TE-Einsetzspannung ist mit 19,6 kV für Prüfkörper mit vorbehandelter Mantelfläche (Prüfkörpergruppe II) signifikant höher als der entsprechende Wert von 16,4 kV für Prüfkörper mit unbehandelter Mantelfläche (Prüfkörpergruppe I). Die Streuung der Messwerte sowie der Anstieg der Ausgleichsgeraden sind vergleichbar.

6.3.2 Ergebnisse bei konstanter Spannungsbeanspruchung (Kanalaufbau)

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit nicht vorbehandelten (Prüfkörpergruppe I) und vorbehandelten Prüfkörpern (Prüfkörpergruppe II) unterschieden sich signifikant. Bei konstanter Spannungsbeanspruchung ergaben sich wegen der Durchschlagzeiten im Bereich von wenigen Minuten keine auswertbaren Ergebnisse für die Prüfkörpergruppe I, so dass nur die Ergebnisse der Prüfkörpergruppe II nachfolgend dargestellt werden

6.3.2.1 Signalerfassung durch optische und elektrische Messkanäle

Diese Messungen schlossen sich wieder unmittelbar an die Messungen mit stufenförmiger Spannungssteigerung an. Sie wurden nach Erreichen des vorgegebenen konstanten Wertes von 25 kV in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer durchgeführt. In der Regel konnte das Treewachstum für Beanspruchungszeiten ≥ 60 min aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnung der Werte der optischen und elektrischen Kanäle erfolgte in Form von Streams und durch Screenshots.

PRPD-Diagramme

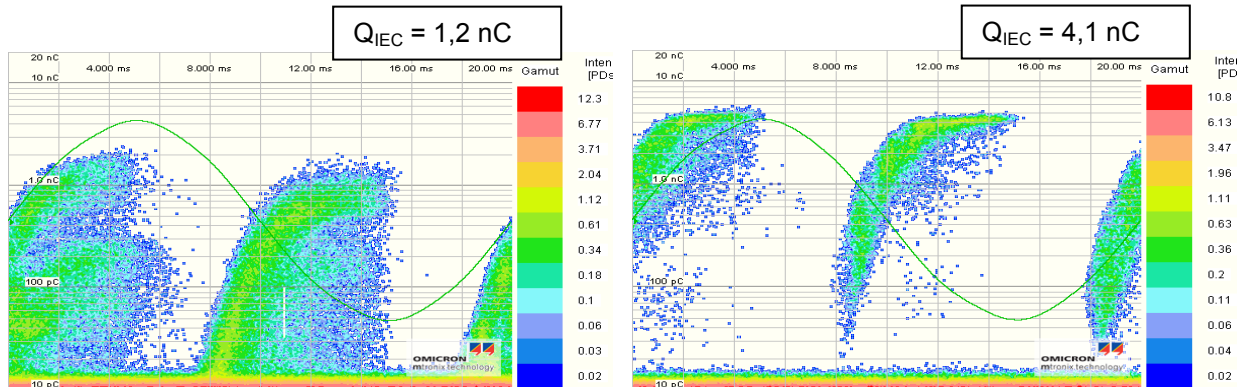
In der nachfolgenden Abbildung 112 ist ein Beispiel für die ermittelten Ergebnisse angegeben. Die Abbildung zeigt einen Vergleich der PRPD-Diagramme der optischen und elektrischen Messkanäle für die angegebene Beanspruchungsdauer, wobei im opti-

schen Messkanal sowohl die Kollimator-Optik (Prüfkörper B 108) als auch die FOF-Optik (Prüfkörper B 100) jeweils ohne Graufilter eingesetzt wurden.

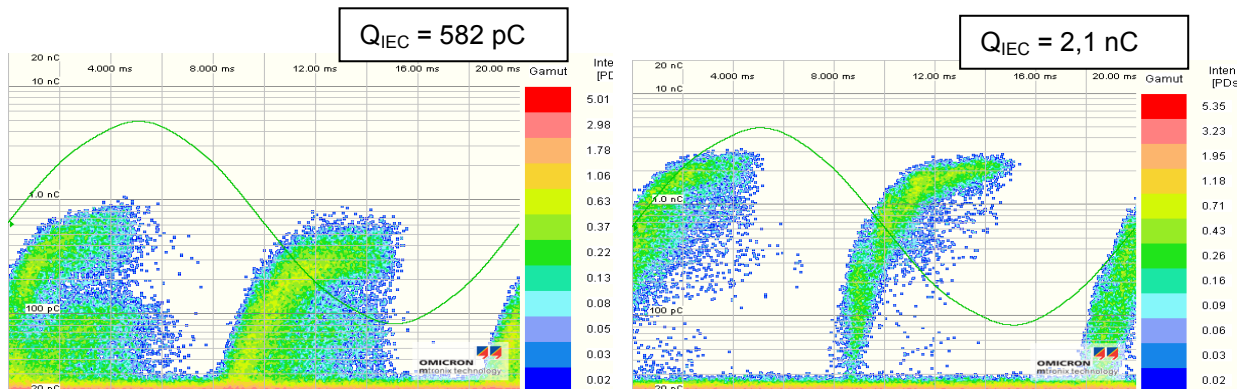
B100 (zylindrischer Prüfkörper)

B108 (kubischer Prüfkörper)

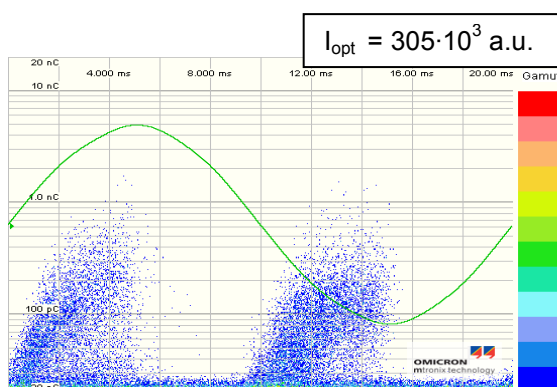
elektrischer Messkanal (MP 1.1; mit AKV)



elektrischer Messkanal (MP 1.2; mit Ferrit)



optischer Kanal (MP 1.3; mit FOF)



optischer Kanal (MP 1.3; mit Kollimator)

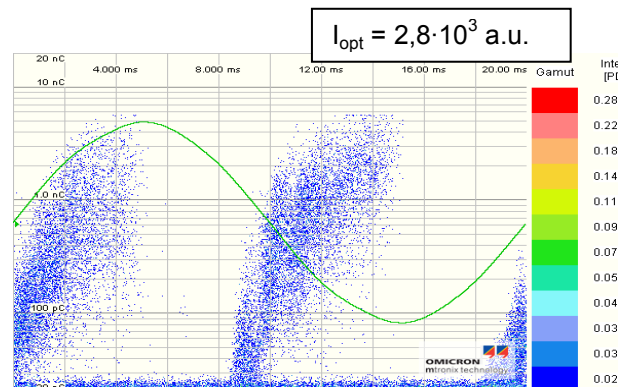


Abbildung 112: PRPD-Diagramme für die Prüfkörpergruppe II für die unterschiedlichen Kanäle nach einer Beanspruchungsdauer $t_B=30 \text{ min}$; Spannung: 25 kV; Prüfkörper B 108: kubischer Prüfkörper mit Kollimator-Optik; Prüfkörper B 100: zylindrischer Prüfkörper mit FOF-Optik

Charakteristisch war wieder die nahezu identische Entladungserfassung durch die unterschiedlichen Messkanäle. Dies gilt gleichermaßen für alle PRPD-Diagramme unabhängig von der Messzeit. Die Entladungsintensitäten waren in der positiven und negativen Halbwelle jeweils vergleichbar.

Ladungsverlauf und Verlauf der optischen Intensität

Beispiele für die mit dem elektrischen Messkanal (MP 1.1) ermittelte scheinbare Ladung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer enthält die Abbildung 113. Ein Vergleich der mit den elektrischen Messkanälen (MP 1.1) mit Ankoppelvierpol und (MP1.2) mit Ferritauskopplung ermittelten scheinbaren Ladungen mit der vom jeweils eingesetzten optischen Messkanal aufgezeichneten optischen Intensitäten zeigt Abbildung 114.

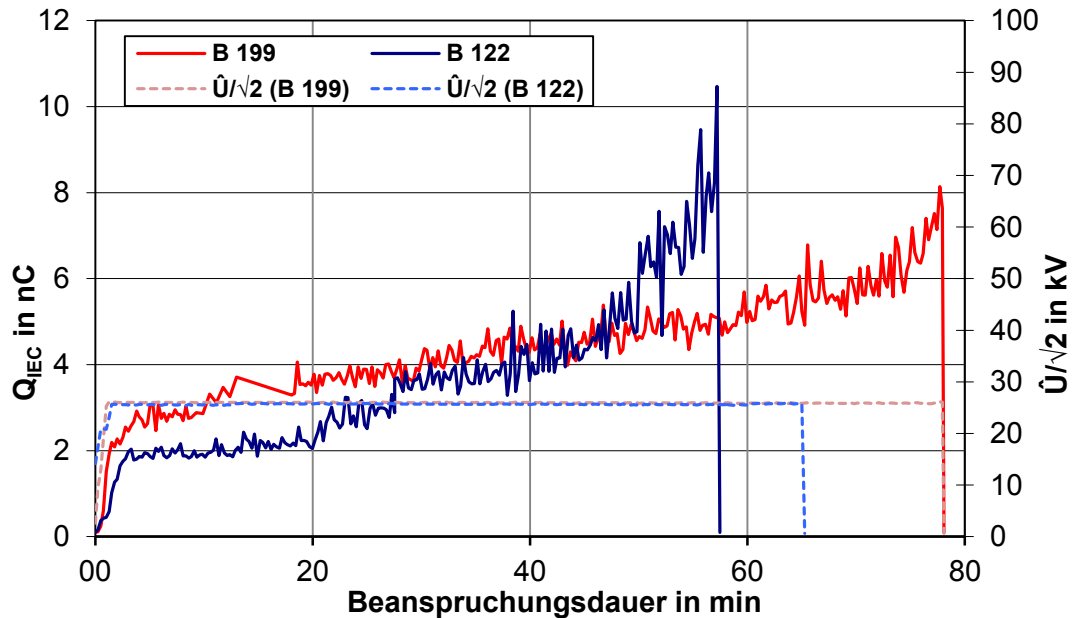


Abbildung 113: Scheinbare Ladung in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Prüfkörper B122 und B 199, Prüfkörpergruppe II; Spannung 25 kV

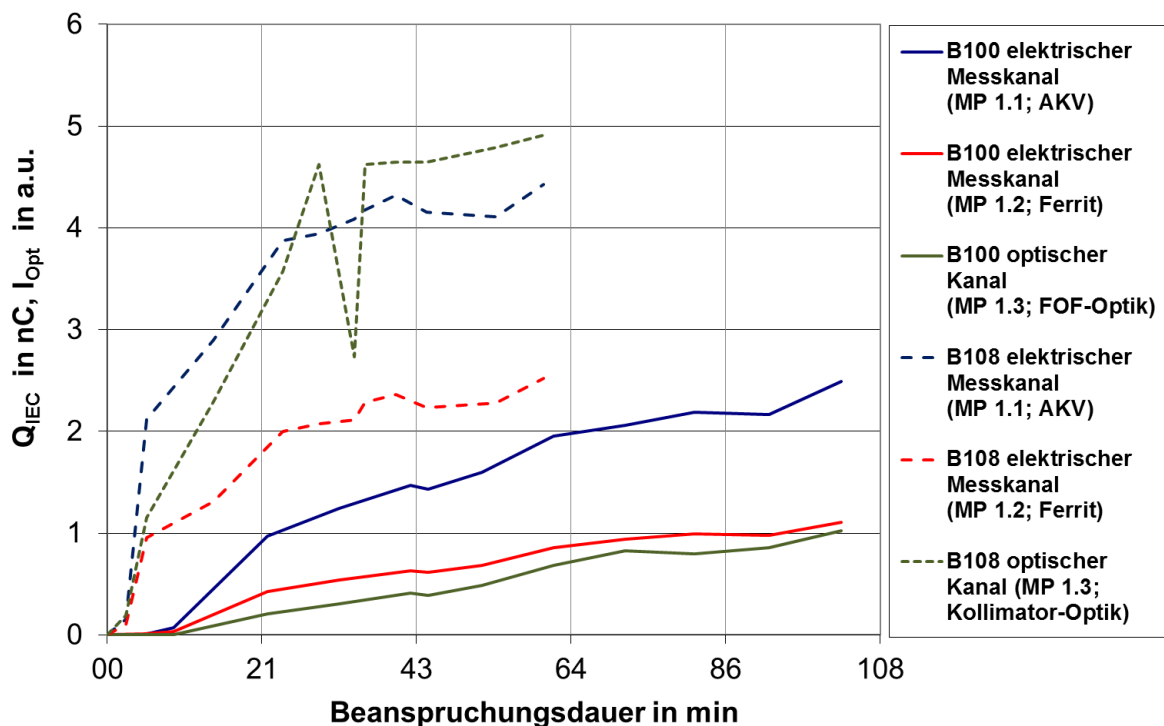


Abbildung 114: Scheinbare Ladung und optische Intensität in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer für die Prüfkörpergruppe II; Spannung: 25 kV; Prüfkörper B 108: kubischer Prüfkörper mit Kollimator-Optik; Prüfkörper B 100: zylindrischer Prüfkörper mit FOF-Optik

Bereits bei der kontinuierlichen Spannungssteigerung auf den Wert von 25 kV erfolgte ein im Verhältnis zum weiteren Kurvenverlauf sehr schneller Anstieg der scheinbaren Ladungen (Abbildung 113), im weiteren Verlauf ein kontinuierlicher Anstieg der Ladungsgrößen und der optischen Intensität mit der Beanspruchungsdauer

Ein Vergleich zeigt weiterhin, dass die Kollimator-Optik (B 108) eine größere optische Intensität registrierte.

Impulsrate

Die analog dazu aufgezeichneten Impulsraten enthalten die Abbildungen 115 und 116. Nach einem im Verhältnis zum weiteren Kurvenverlauf steilen Anstieg unmittelbar nach Beanspruchungsbeginn ändern sich die Impulsraten mit steigender Beanspruchungsdauer nicht mehr.

Der optische Messkanal (MP1.3) registrierte jeweils die niedrigste Impulsrate, wobei der Messkanal mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern (B 100) trotz des eingeschränkten Absorptionsbereiches durch den VPE-Kern nahezu die gleiche Anzahl erfasste. Der elektrische Messkanal (MP 1.1 – Ankoppelvierpol) zeigte die höchsten Werte an. Analog zu bisherigen Ergebnissen war die Impulsrate über der Beanspruchungsdauer konstant.

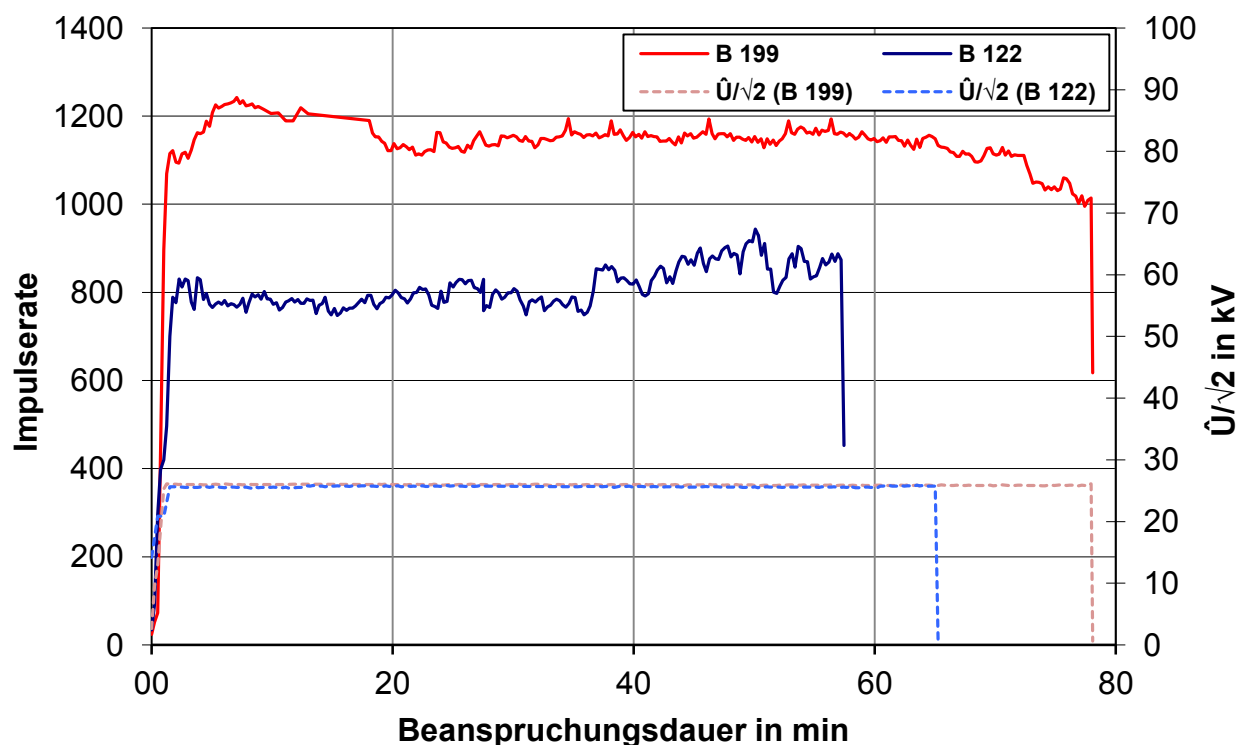


Abbildung 115: Impulsrate des elektrischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Prüfkörper B122 und B 199, Prüfkörpergruppe II; Spannung 25 kV

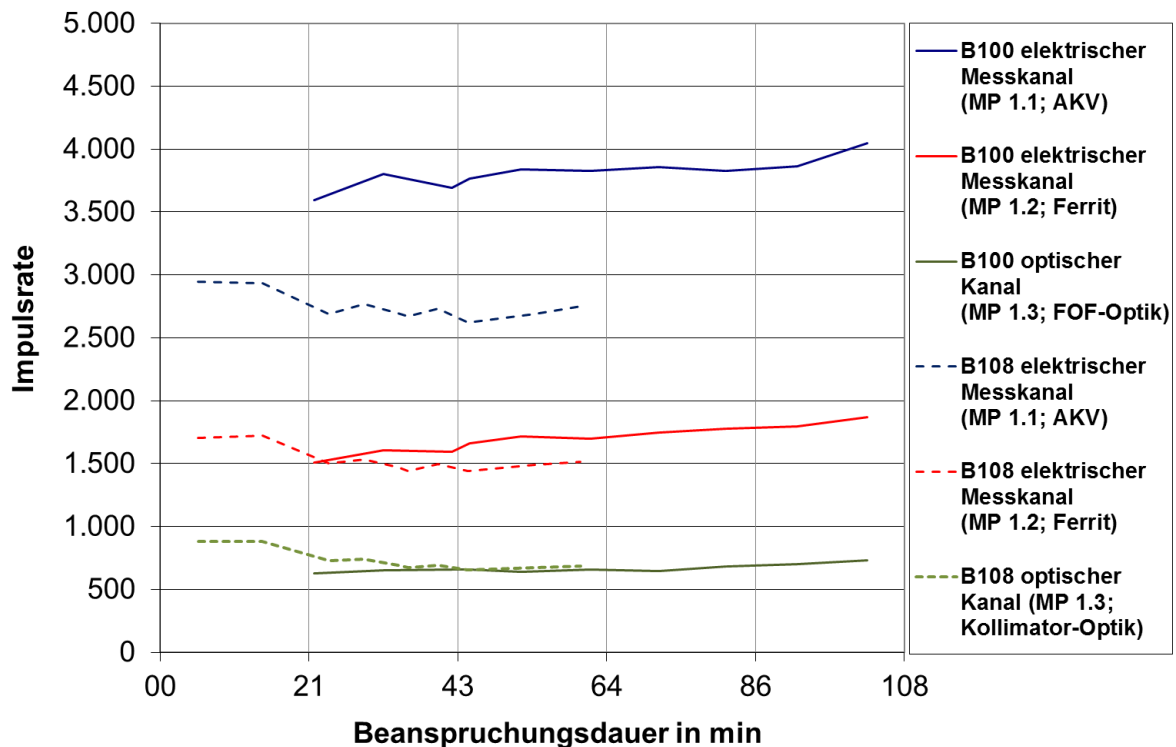


Abbildung 116: Impulsrate in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer für die Prüfkörpergruppe II; Spannung: 25 kV; Prüfkörper B 108: kubischer Prüfkörper mit Kollimator-Optik; Prüfkörper B 100: zylindrischer Prüfkörper mit FOF-Optik

6.3.2.2 Signalerfassung durch Kamerasystem und elektrischen Messkanal

Diese Messungen erfolgten ebenfalls mit konstanter Spannungsbeanspruchung unmittelbar nach den Messungen mit stufenförmiger Spannungssteigerung. Im Unterschied zu den Ergebnissen des Abschnittes 6.3.2.1 konnten die Daten beider Prüfkörpergruppen aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Prüfkörpergruppe I (nicht vorbehandelter Mantelfläche des VPE-Kerns)

Bei diesen Prüfkörpern trat bei Spannungen zwischen 17 kV und 26 kV innerhalb von maximal 110 s nach Beanspruchungsbeginn der Durchschlag ein, so dass nur wenige Einzelbilder verfügbar sind.

Die Abbildung 117 zeigt als typisches Beispiel PRPD-Diagramme und die zeitsynchron dazu aufgenommenen Kanal-/Treestrukturen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer bis maximal 105 s für den Prüfkörper B 132. Die PRPD-Diagramme zeigen eine ähnliche Struktur wie die inneren Fehlstellen; die Entladungshöhen sind in beiden Halbwellen gleich.

Die Ausbildung der Treestrukturen ist von den konkreten Bedingungen im Grenzflächenbereich abhängig und differiert in der Ausbildung von z. T. parallelen Seitenkanälen. Erkennbar ist deren deutliche Ausbildung in Umfangsrichtung (Abbildung 118).

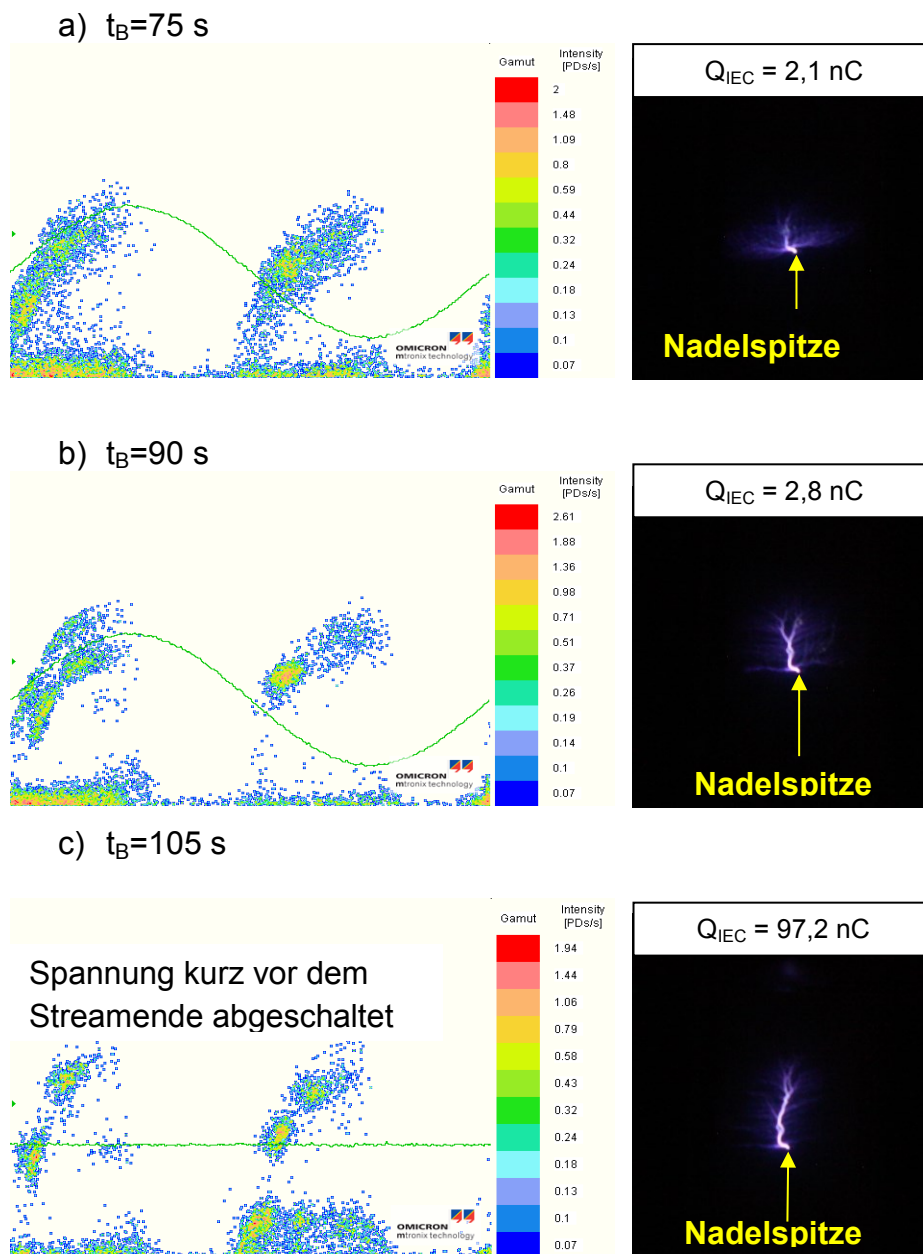


Abbildung 117: PRPD-Diagramme und Treebilder nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer; Prüfkörper B 132, Prüfkörpergruppe I; Spannung: 17 kV

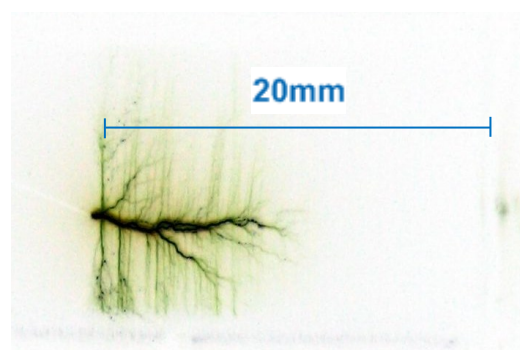


Abbildung 118: Treestruktur nach Abschluss der Beanspruchung; Prüfkörper B 188, Prüfkörpergruppe I

Prüfkörpergruppe II (vorbehandelter Mantelfläche des VPE-Kerns)

Mit diesen Prüfkörpern wurde das Tree-/Kanalwachstum bei der Spannung von 25 kV für Beanspruchungszeiten bis zu 180 min aufgezeichnet.

Beispiele für phasenaufgelöste Histogramme mit zugehörigen Bildern von Treestrukturen nach unterschiedlichen Beanspruchungsdauern enthalten die nachfolgenden Abbildungen 119 bis 122.

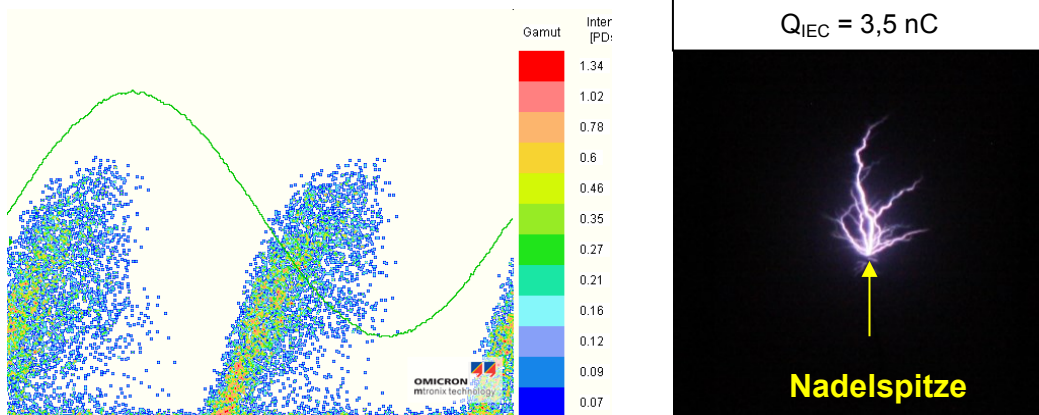


Abbildung 119: PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B = 30$ min; Prüfkörper B122, Prüfkörpergruppe II; Spannung: 25kV

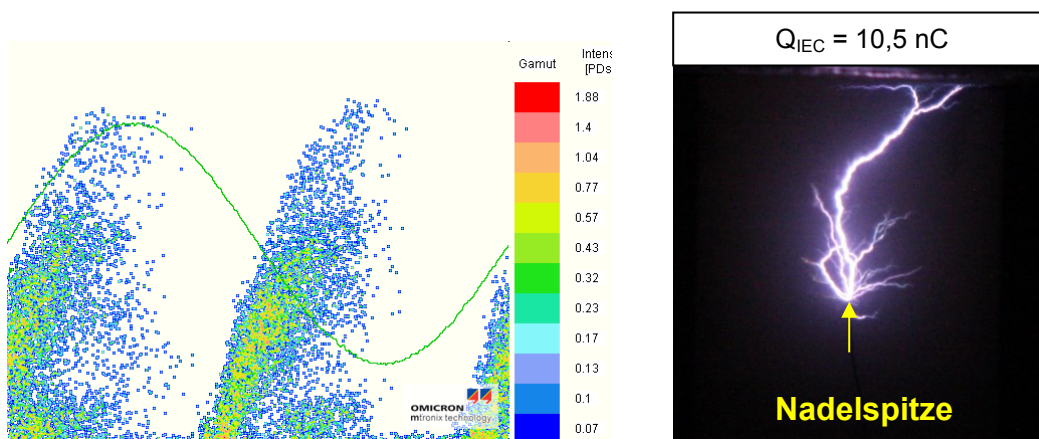


Abbildung 120: PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B = 60$ min (unmittelbar vor dem Durchschlag); Prüfkörper B122, Prüfkörpergruppe II; Spannung: 25kV

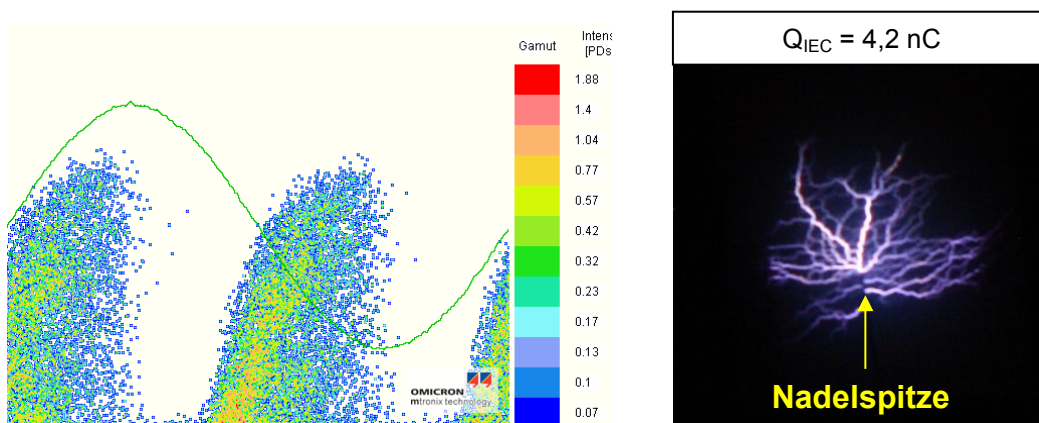


Abbildung 121: PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B = 30$ min; Prüfkörper B199, Prüfkörpergruppe II; Spannung: 25kV

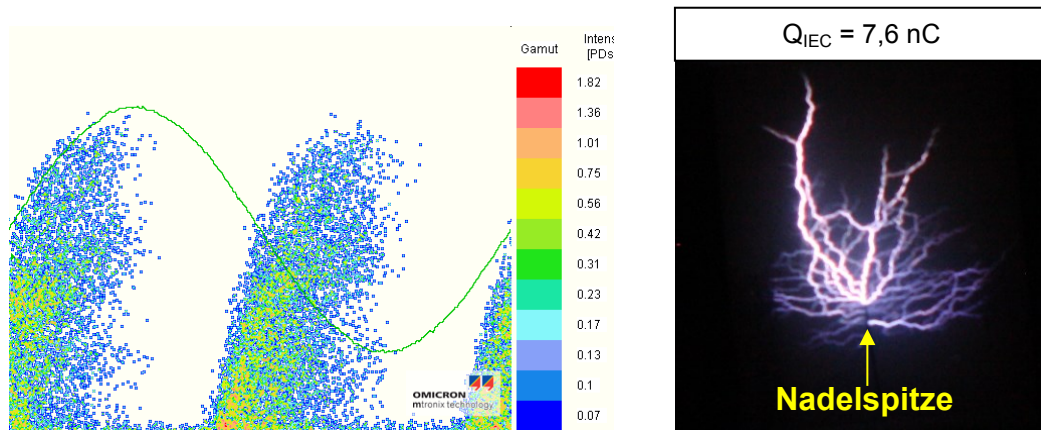


Abbildung 122: PRPD-Diagramm und Treebild nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=78$ min (unmittelbar vor dem Durchschlag); Prüfkörper B199, Prüfkörpergruppe II; Spannung: 25kV

Die Trees wuchsen nach Beanspruchungsbeginn bei konstanter Spannung zunächst relativ schnell und zeigten dann ein kontinuierliches Wachstum mit der Beanspruchungsdauer. Unmittelbar vor dem Durchschlag steigt das Wachstum deutlich an (Abbildung 123).

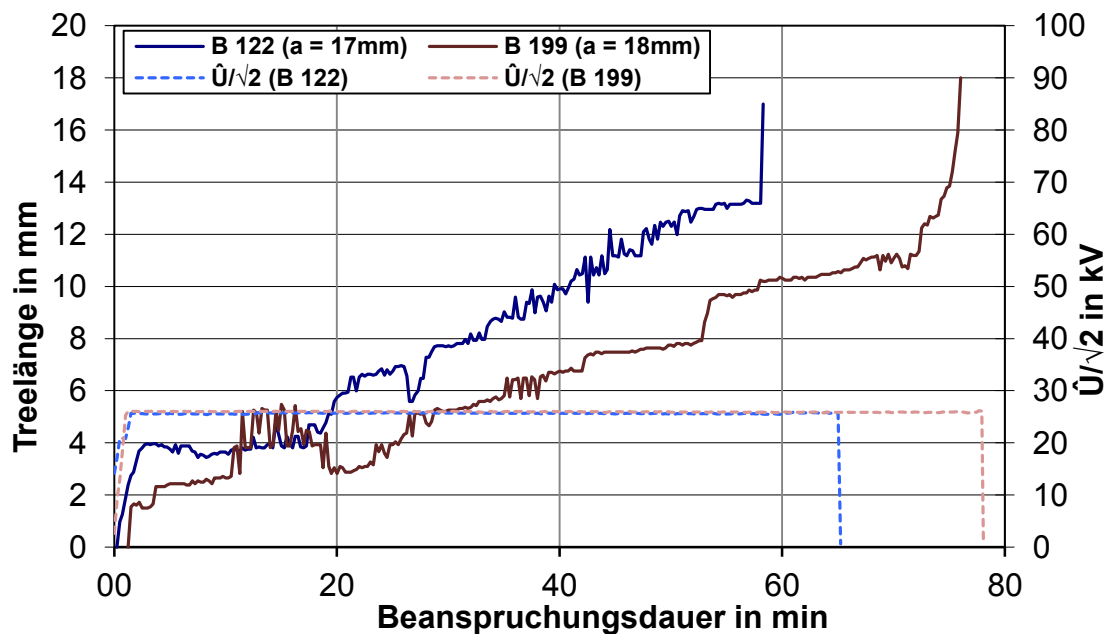


Abbildung 123: Treewachstums in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer, Prüfkörper B 122 und B 199, Prüfkörpergruppe II

In Abbildung 124 ist als Beispiel ein sich im Grenzflächenbereich entwickelter Tree mit seiner zweigförmigen Struktur gezeigt.

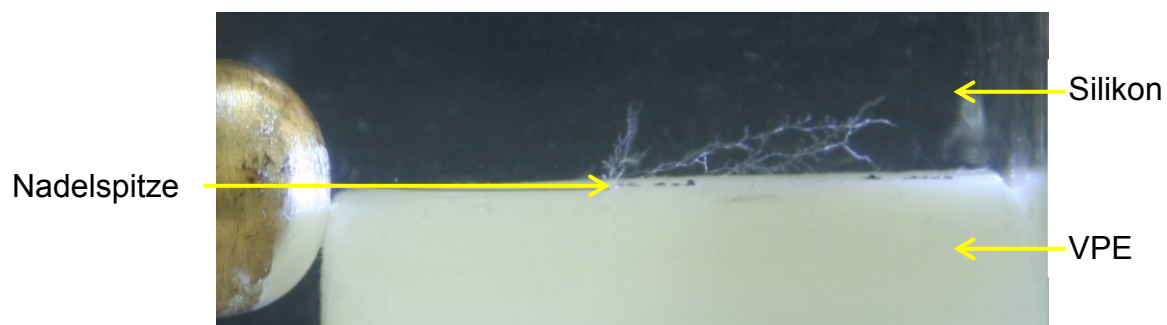


Abbildung 124: Typische Treestruktur im Grenzflächenbereich VPE ↔ Silikonmaterial

Ein davon deutlich unterschiedliches Verhalten der Treeausbildung wurde in zwei anderen baugleichen Prüfkörpern festgestellt. Die sich in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer gebildeten Strukturen sind in den Abbildungen 125 bis 127 zusammen mit dem zeitsynchron aufgenommenen PRPD-Diagrammen für den Prüfkörper B 167 gezeigt, das sich daraus ergebende Wachstum in Abbildung 128 angegeben.

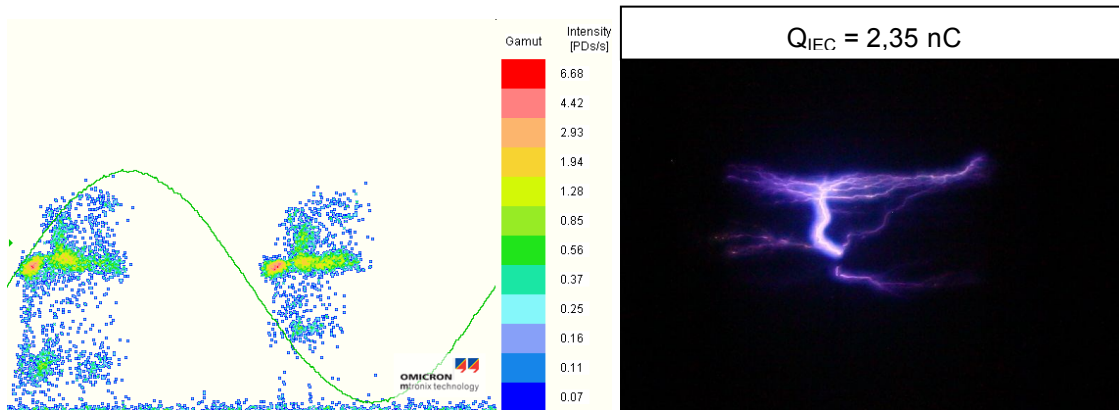
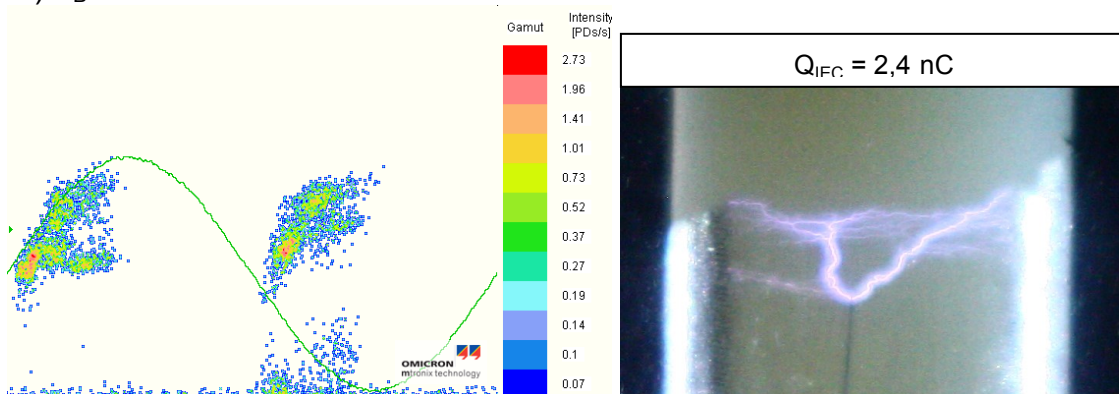


Abbildung 125: PRPD-Diagramm und Treebild nach Erreichen des Spannungswertes von 25 kV; Prüfkörper B 167; Prüfkörpergruppe II

a) $t_B = 3 \text{ min}$



b) $t_B = 96 \text{ min}$

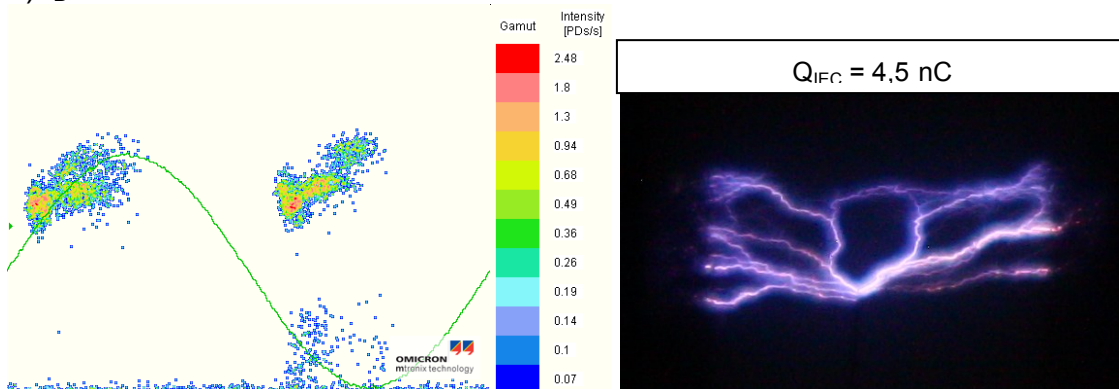


Abbildung 126 PRPD-Diagramme und Treebilder nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Prüfkörper B 167; Prüfkörpergruppe II; Spannung 25 kV

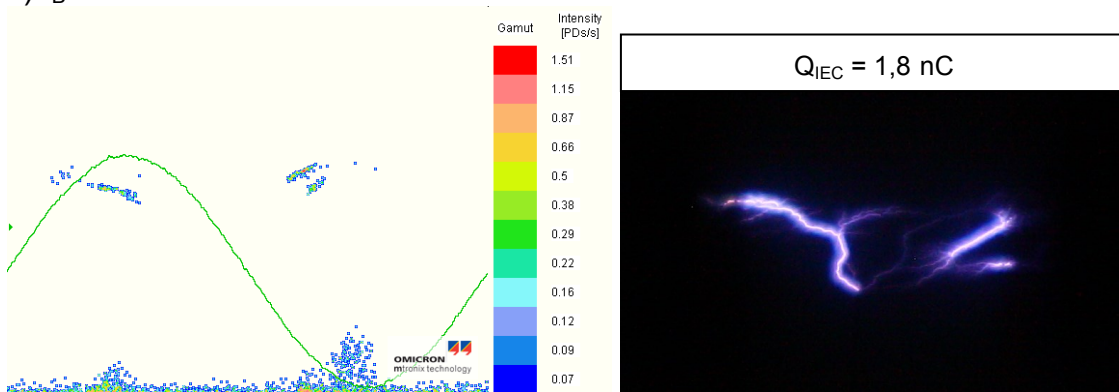
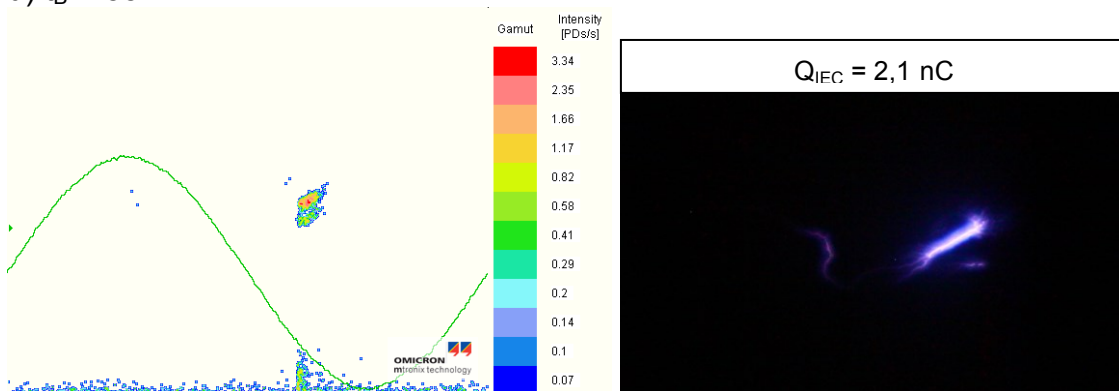
c) $t_B = 154$ mind) $t_B = 155$ min

Abbildung 127: PRPD-Diagramme und Treebilder nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer (t_B); Prüfkörper B 167; Prüfkörpergruppe II; Spannung 25 kV

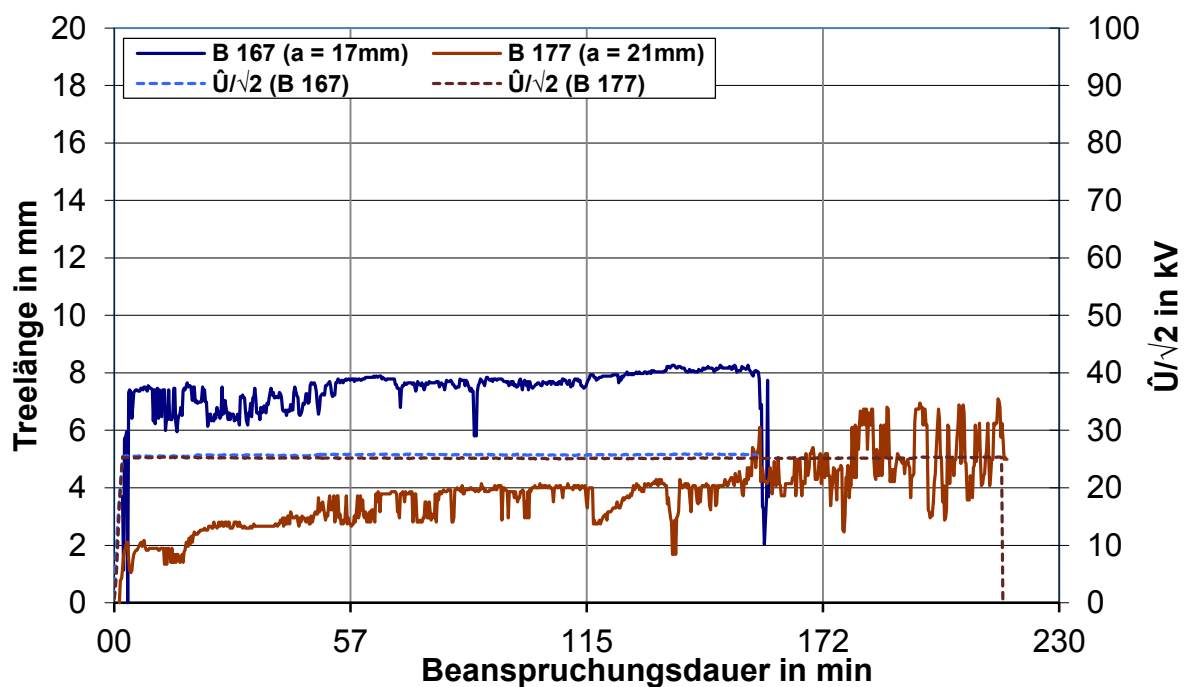


Abbildung 128: Treewachstums in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer, Prüfkörper B 167 und B 177; Prüfkörpergruppe II

Es ergab sich eine Ausbildung von Treekanälen vorwiegend in Umfangsrichtung mit wechselnden Entladungsintensitäten in den einzelnen Kanälen. Die Ausbildung eines

dominierenden Kanals und mehrerer Kanäle in Richtung Gegenelektrode fand nicht statt.

Unmittelbar nach Beginn der Spannungsbeanspruchung war die Wachstumsgeschwindigkeit relativ hoch, danach stagnierte das Wachstum (Beanspruchungsdauer 120 min und 20 min, Abbildung 128).

6.4 Orientierende Untersuchungen an einem Model eines 20 kV-Auf-schiebeendverschlusses

In orientierenden Untersuchungen wurde eine fehlerstellennahe optische Erfassung der von eingebrachten Fehlstellen im Endverschlussbereich ausgehenden Teilentladungen an einem 20 kV-Mittelspannungs-VPE-Kabelaufbau geprüft.

In einem ersten Aufbau wurde ein speziell angefertigter Endverschluss verwendet, auf dessen transparenter Mantelfläche der fluoreszierende Lichtwellenleiter aufgewickelt und festgelegt wurde (Abbildung 129). Das andere Kabelende wurde mit einem Öl-Endverschluss abgeschlossen. Die verwendete Messschaltung entsprach der Schaltung nach Abbildung 35 und ist in Abbildung 130 angegeben. Der optische Messkanal bestand aus der beschriebenen FOF-Optik, der elektrische Messkanal aus dem Messkanal MP 1.1 mit Ankoppelvierpol. Der fluoreszierende Lichtwellenleiter war mit einer weißen Papierlage abgedeckt und fixiert. Die Messungen wurden in einem nicht geschirmten Prüffeld durchgeführt.



Abbildung 129: Aufgewickelter fluoreszierender Lichtwellenleiter auf der Mantelfläche des Endverschlusses, direkt über der in die Isolierung eingebrachten singulären Fehlstelle (Abdeckung entfernt)

Die Fehlstelle bestand aus einer kreisförmigen Scheibe (Durchmesser 2 mm) aus Deflektormaterial (DC-Volumenwiderstand $40 \Omega \cdot \text{cm}$ bei 23°C), die in die Isolierung eingebracht und mittels Kupferdraht mit dem Leiter kontaktiert wurde. Sie wurde im Bereich der höchsten Feldbeanspruchung unmittelbar oberhalb der Feldsteuerung angebracht.

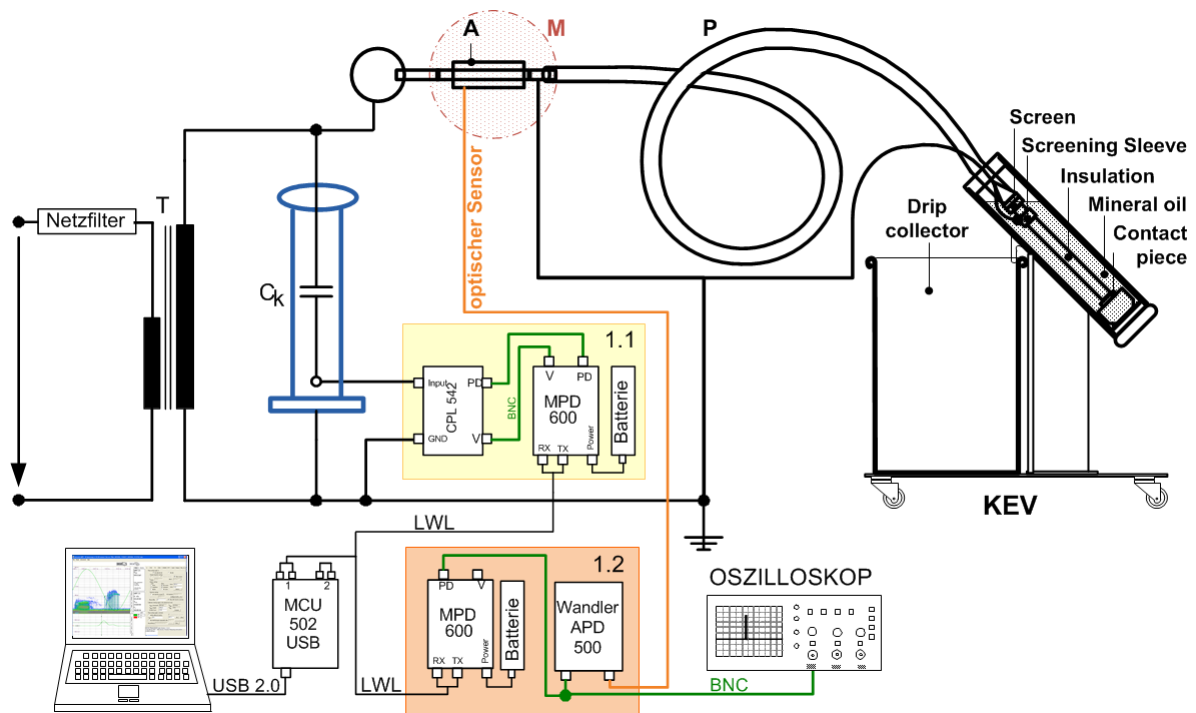


Abbildung 130: Testaufbau mit 20 kV-Mittelspanungs-VPE-Kabeln (P) und angefertigtem Aufschiebendverschluss (A), Messbereich (M) und Prüfkabel-Endverschluss (KEV)

Die PRPD-Diagramme des elektrischen (MP 1.1) und des optischen Messkanals (MP 1.2) zeigen die Abbildungen 131 und 132. Beide Kanäle erfassten den TE-Einsatz beim gleichen Spannungswert von 7,4 kV (Abbildung 131). Auch bei einer höheren Spannung von 14,6 kV ergaben sich vergleichbare Muster in den Histogrammen (Abbildung 132) und die scheinbare Ladung und die optische Intensität stiegen deutlich an.

Weiterhin wurde der Einfluss auf die Ansprechschwelle des optischen Messkanals mit FOF-Optik bei verschiedenen Varianten der Positionierung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters in Bezug auf die Fehlstelle untersucht. Neben einer Positionierung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters in einer dichten Wicklung direkt über der Fehlstelle (Abbildung 129) wurde der Lichtwellenleiter in einem willkürlich gewählten Abstand von ca. 3 cm von der Fehlstelle entfernt (Abbildung 133, links) und spiralförmig (Abbildung 133, rechts) auf die Mantelfläche des Endverschlusses gewickelt mit weißem Papier abgedeckt und fixiert.

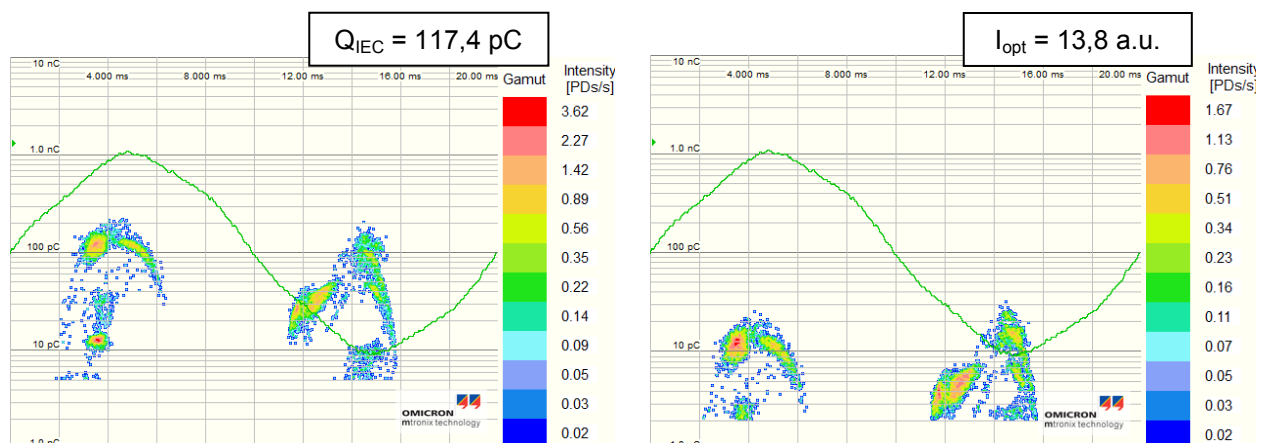


Abbildung 131: PRPD-Diagramme des elektrischen (linke Bildhälfte) und des optischen Messkanal (rechte Bildhälfte) der beschriebenen Fehlstelle in der Grenzfläche bei TE-Einsatz, fluoreszierender Lichtwellenleiter direkt über der Fehlstelle; Spannung 7,4 kV

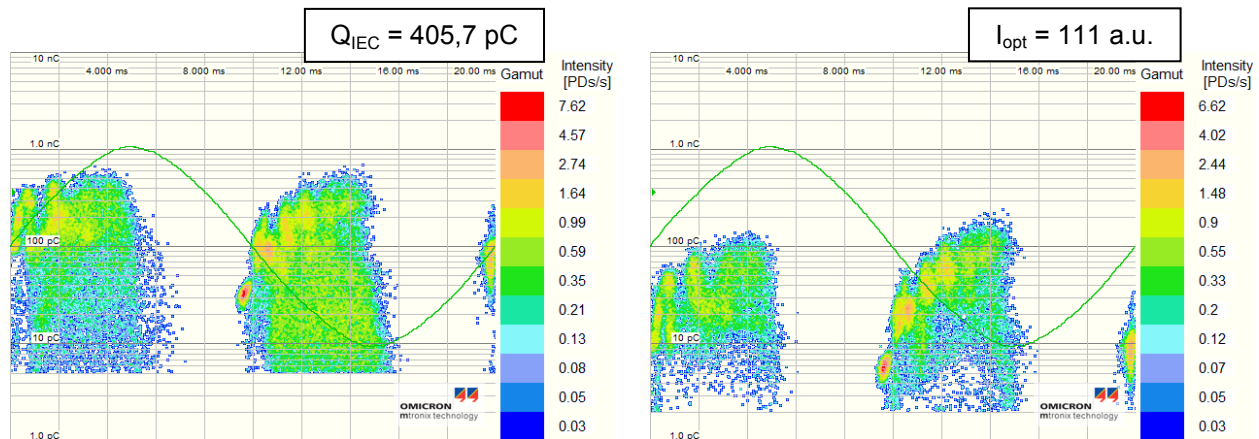


Abbildung 132: PRPD-Diagramme des elektrischen (linke Bildhälfte) und des optischen Messkanal (rechte Bildhälfte) der beschriebenen Fehlstelle in der Grenzfläche bei TE-Einsatz; fluoreszierender Lichtwellenleiter direkt über der Fehlstelle; Spannung 14,6 kV

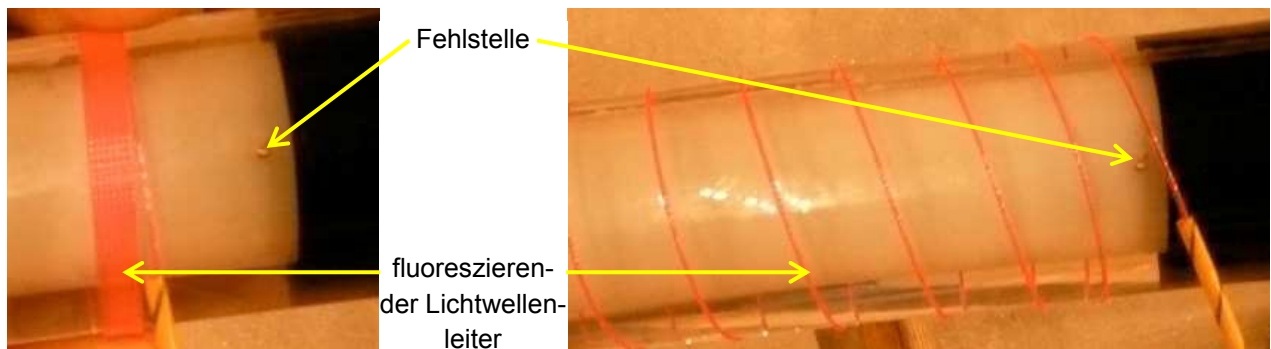


Abbildung 133: Varianten der Positionierung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters auf der Mantelfläche des Endverschlusses mit 3 cm Abstand (links) und in spiralförmig (rechts) über der Fehlstelle gewickelt (Papierabdeckung entfernt)

Die Ergebnisse für eine Spannung von 12 kV sind in den Abbildungen 134 und 135 gezeigt. Auch in diesen Varianten detektierte der fluoreszierende Lichtwellenleiter die optischen Impulse bei gleichen Spannungswerten wie der elektrische Messkanal, wenn auch mit reduzierter Intensität. Die mit der spiralförmigen Wicklung erreichten Ergebnisse sind den von Habel [89] angegebenen Ergebnissen ähnlich.

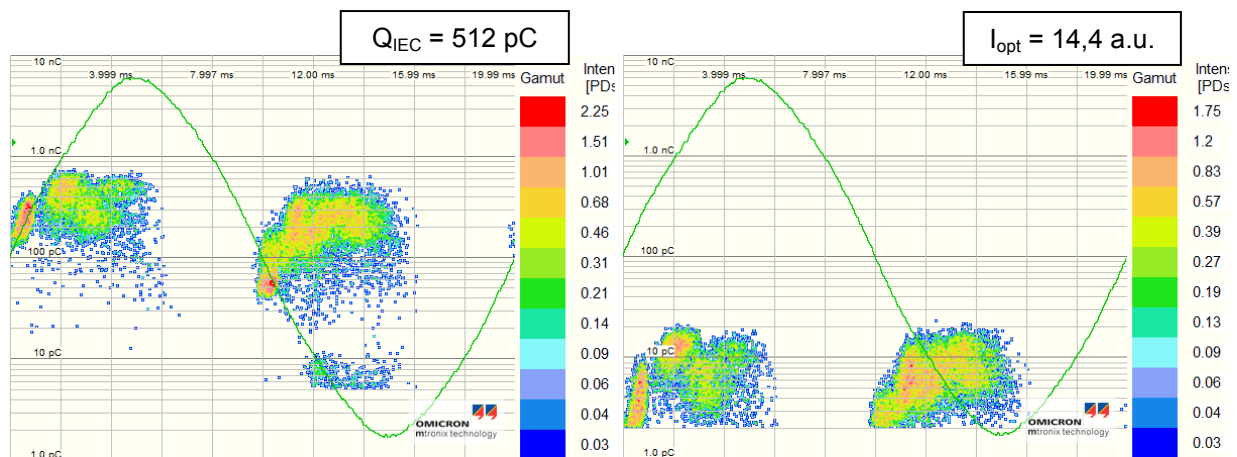


Abbildung 134: PRPD-Diagramme des elektrischen (linke Bildhälfte) und des optischen Messkanal (rechte Bildhälfte); fluoreszierender Lichtwellenleiter 3 cm neben der Fehlstelle; Spannung 12,6 kV

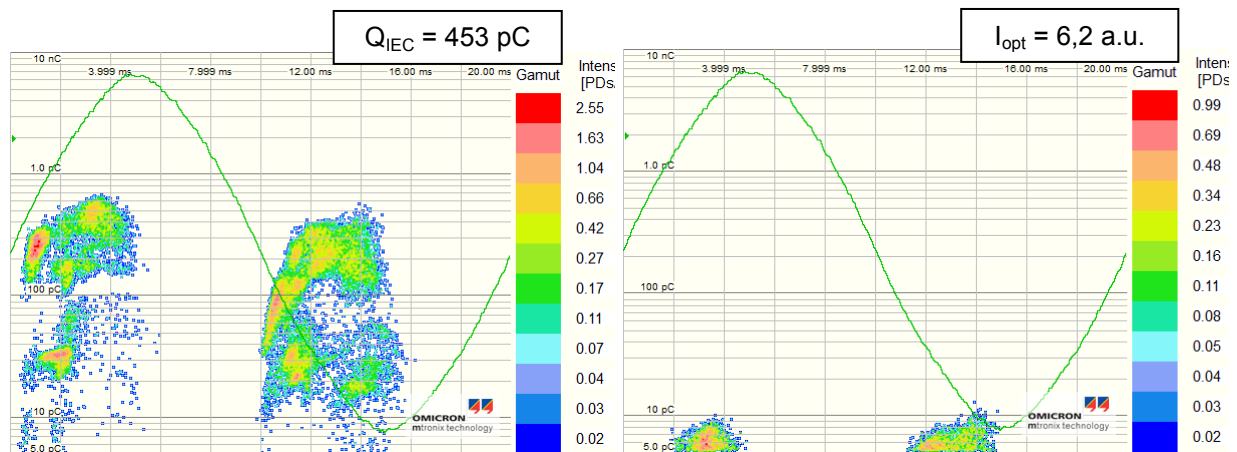


Abbildung 135: PRPD-Diagramme des elektrischen (linke Bildhälfte) und des optischen Messkanals (rechte Bildhälfte), fluoreszierender Lichtwellenleiter in spiralförmiger Wicklung; Spannung 12,6 kV

In einer weiteren Endverschlussvariante aus transparentem Silikonmaterial wurde der gewickelte fluoreszierende Lichtwellenleiter eingegossen (Abbildung 136).

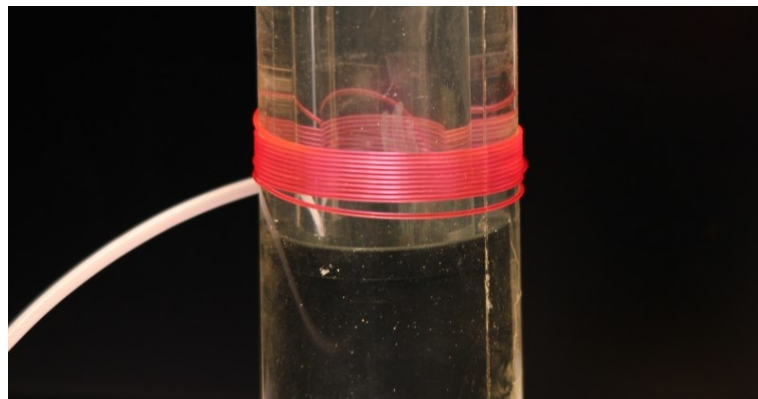


Abbildung 136: Modell eines Aufschiebeendverschlusses mit eingegossenem fluoreszierenden Lichtwellenleiter (Teile der äußeren Hülle wurden entfernt) [89], [91]

Als Fehlstelle wurde eine halbleitende Spitze auf Erdpotential in die Grenzfläche Kabelader-Silikonendverschluss eingebracht.

Die vom elektrischen und optischen Messkanal aufgezeichneten Histogramme sind in Abbildung 137 gezeigt. Die von beiden Kanälen aufgezeichneten Muster sind wieder nahezu identisch. Die elektrisch und optisch detektierten Entladungen waren bereits bei einer Spannungshöhe von 7,6 kV sehr intensiv. Wird in diesem Versuchsaufbau zusätzlich eine Spitze in Luft auf Hochspannungspotential eingefügt, so wurde diese Fehlstelle nur im PRPD-Diagramm des elektrischen Messkanals registriert (Abbildung 138).

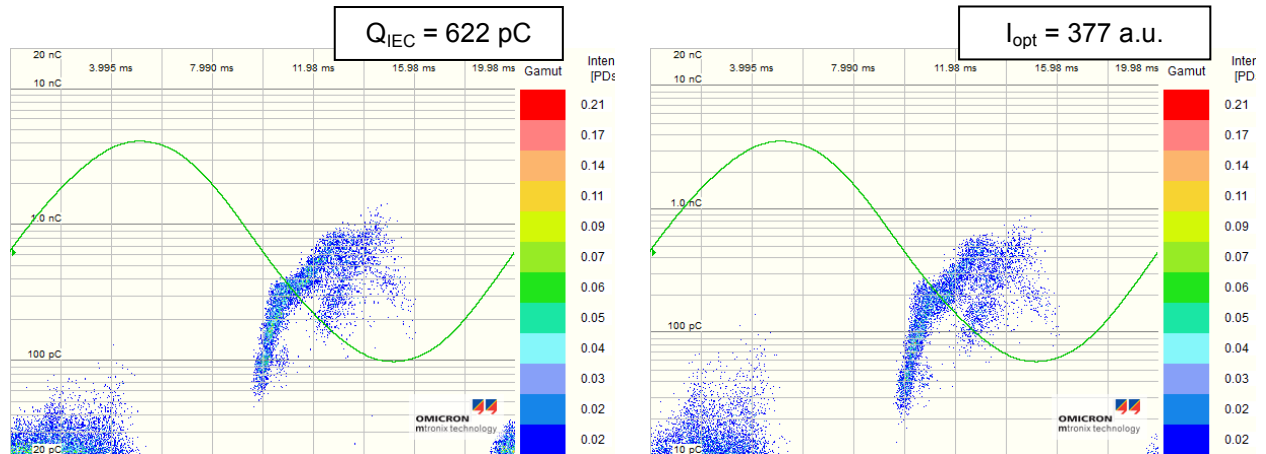


Abbildung 137: PRPD-Diagramme des elektrischen (links) und des optischen Messkanal (rechts) eines Fehlers in der Grenzfläche eines 20 kV-Aufschiebeendverschlusses; Spannung: 7,7 kV; [89]

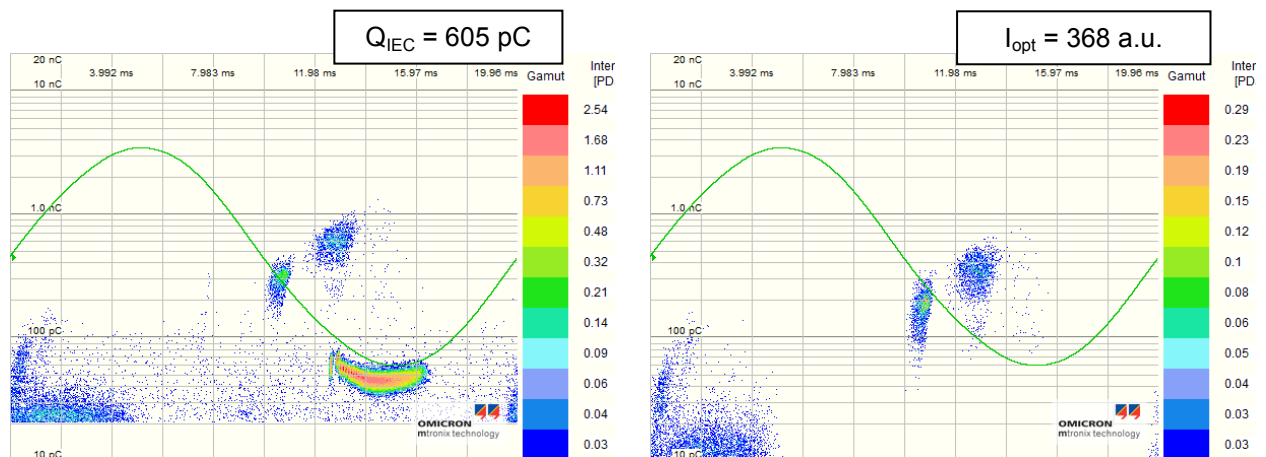


Abbildung 138: PRPD-Diagramme des elektrischen (linke Bildhälfte) und des optischen Messkanal (rechte Bildhälfte) eines Fehlers in der Grenzfläche eines 20 kV-Aufschiebeendverschlusses einschließlich Spitze in Luft auf Hochspannungspotential; Spannung: 7,7 kV; [91]

POT-Analyse

Die Entladungsimpulse treten in den gleichen Phasenbereichen der Wechselspannung auf. Die Spitze in Luft auf Hochspannungspotential dokumentiert sich deutlich im POT-Diagramm als Impulsfolge im Spannungsmaximum des elektrischen Messkanals (Abbildung 141).

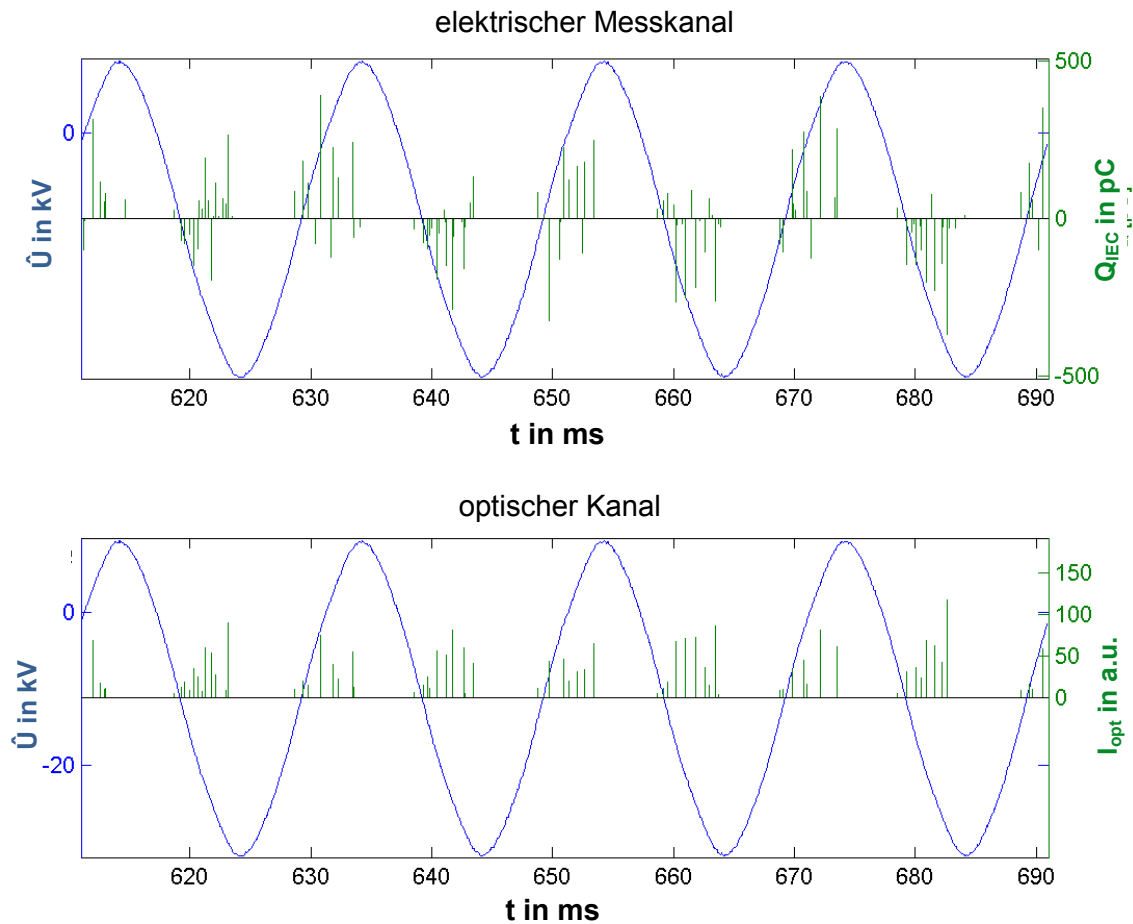


Abbildung 139: POT-Analyse des elektrischen (obere Bildhälfte) und des optischen Messkanal (untere Bildhälfte) der beschriebenen Fehlstelle in der Grenzfläche bei TE-Einsatz, fluoreszierender Lichtwellenleiter direkt über der Fehlstelle; Spannung 14,6kV

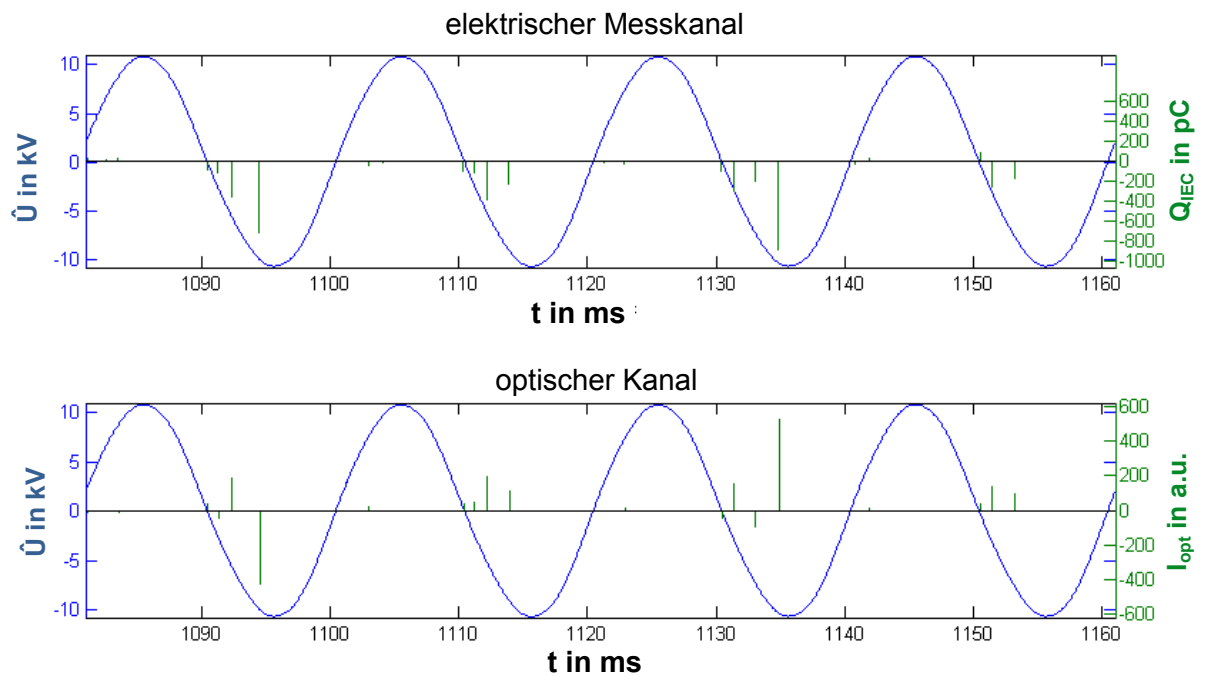


Abbildung 140: POT-Analyse des elektrischen (obere Bildhälfte) und des optischen Messkanal (untere Bildhälfte) eines Fehlers in der Grenzfläche eines 20 kV-Aufschiebendverschlusses; Spannung: 7,7 kV; [91];

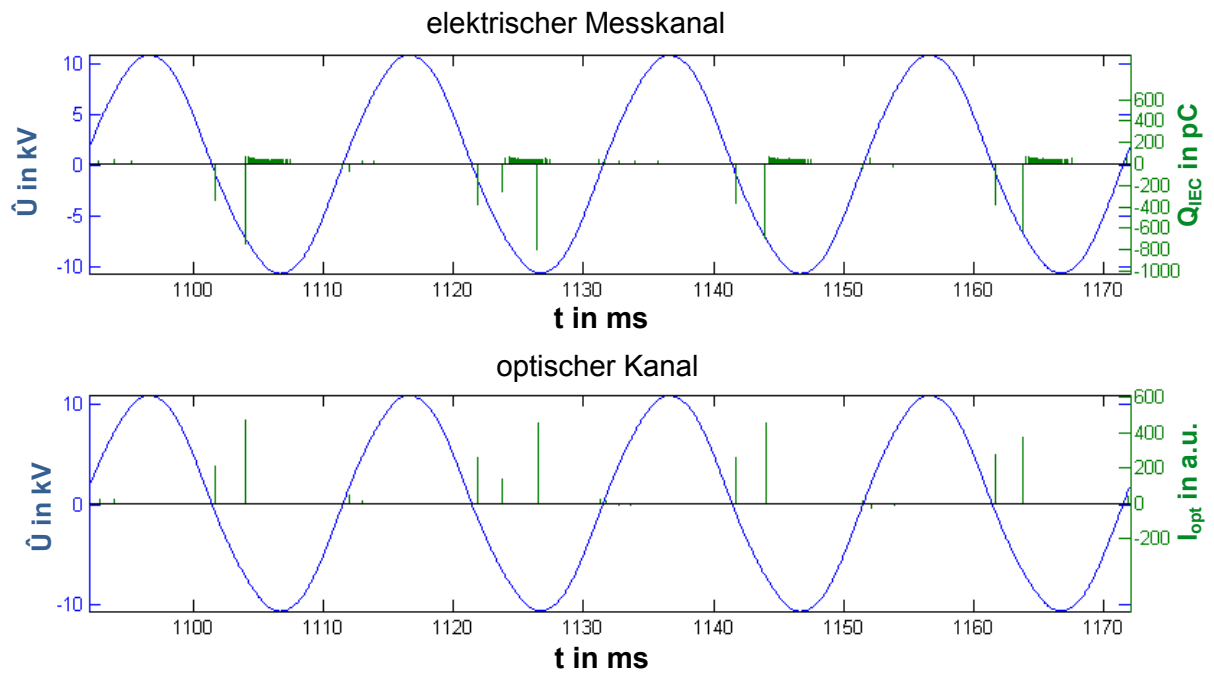


Abbildung 141: POT-Analyse des elektrischen (obere Bildhälfte) und des optischen Messkanal (untere Bildhälfte) eines Fehlers in der Grenzfläche eines 20 kV-Aufschiebeendverschlusses einschließlich Spitze in Luft auf Hochspannungspotential; Spannung: 7,7 kV; [91];

7 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

7.1 Optische Erfassung von inneren Entladungen in Feststoffisolierungen

Die unter dem Aspekt einer praktischen Anwendbarkeit gefundene und erprobte Lösung zur optischen Erfassung innerer Entladungen in transparenten Isolieranordnungen besteht aus fluoreszierenden Lichtwellenleitern in Kombination mit einem Transportlichtwellenleiter und einem speziellen optisch-elektrischen Wandler. Dieser Sensor (FOF-Optik) wurde als optischer Messkanal in das digitale TE-Messsystem MPD 540/600 eingefügt. Für eine vergleichende optische Entladungserfassung wurde auch eine Anordnung aus Linsen und Transportlichtwellenleiter als sensorisches Element verwendet (Kollimator-Optik).

Die Auswahl der eingesetzten Typen fluoreszierender Lichtwellenleiter erfolgte auf Basis der Spektren innerer Teilentladungen in transparenten Silikonelastomeren (vgl. Abschnitt 4.1). Durch die vorgenommene Auswahl liegt der Absorptionsbereich der fluoreszierenden Lichtwellenleiter innerhalb dieses Wellenlängenspektrums, deren Emissionsbereich im Bereich der spektralen Empfindlichkeit von Si-Fotodioden. Die Eingangsstufe des optisch-elektrischen Wandlers wurde durch Auswahl einer geeigneten Avalanche-Diode möglichst optimal an das Emissionsspektrum angepasst. Die erreichten Ergebnisse sind in Abbildung 142 zusammengefasst (siehe auch Abschnitt 4.2).

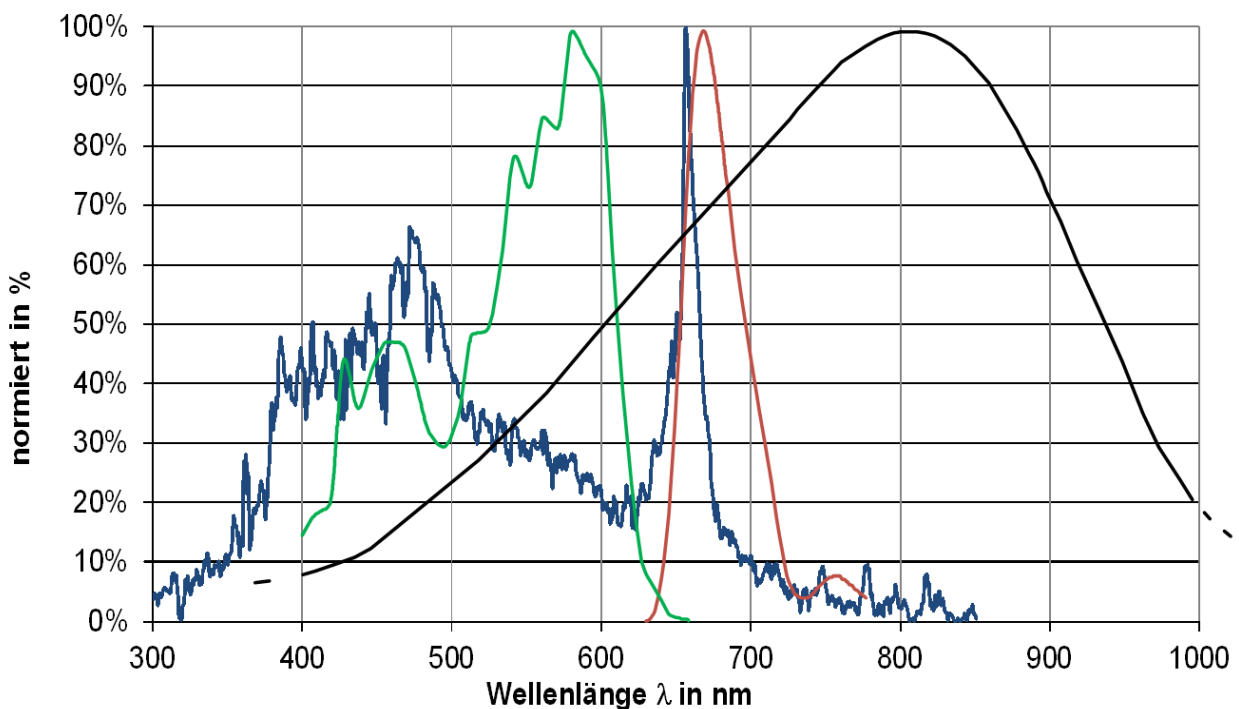


Abbildung 142: Frequenzspektrum von Teilentladungen (blau), Absorptions- (grün) und Emissionsspektrum (rot) des fluoreszierenden Lichtwellenleiters Typ L und spektralen Empfindlichkeit der Avalanche-Diode (schwarz)

Es ist erkennbar, dass keine optimale Anpassung mit den verfügbaren Bauelementen möglich war. Das begrenzte Absorptionsspektrum des ausgewählten fluoreszierenden

Lichtwellenleiters erfasste nur einen Teilbereich des TE-Spektrums und deren Emissionsspektrum (rote Kurve) fiel nicht mit dem Maximum der spektralen Empfindlichkeit der Avalanche-Photodiode zusammen.

Generell ergeben sich bei fluoreszierenden Lichtwellenleitern in Abhängigkeit von der Dotierung unterschiedliche Absorptions- und Emissionswellenlängen, die stets relativ schmalbandig sind (Abbildung 25).

Im Vergleich zu undotierten Lichtwellenleitern besitzen fluoreszierende Lichtwellenleiter eine relativ hohe Dämpfung (siehe Abschnitt 4.2.1.3), so dass für den Signaltransport zum Wandler zweckmäßig ein Transportlichtwellenleiter verwendet wurde.

Die in elektrische Impulse gewandelten optischen Signale wurden zur MPD Station weitergeleitet und von der Software als Ladung interpretiert und angezeigt (Kapitel 5). Die sehr kurzen internen Verarbeitungszeiten im Bereich von Nanosekunden ermöglichten zeitsynchron zur optischen Erfassung eine elektrische Messung sowie eine vergleichbare Auswertung der Ergebnisse. Die erreichten TE-Grundstöörpegel in den geschirmten Laborräumen lagen für den kalibrierten elektrisch Messkanal (MP 1.1 mit Ankoppelvierpol) im Bereich von 300 fC bis 1 pC. Für den nicht kalibrierbaren optischen Messkanal ergaben sich für den durch die Software eingestellten Maßstabsfaktor ($k_A=1$) detektierbare optische Intensitäten im Bereich von 2,0 a.u. bis 2,9 a.u., abhängig von der verwendeten Optik. Von Schwarz [22] konnten in flüssigen und gasförmigen Medien mit einer ähnlichen Kollimator-Optik und optisch-elektrischem Wandler Teilentladungen ab einer Intensität von 35 pC optisch detektiert werden. Bei Verwendung von fluoreszierenden Lichtwellenleitern war eine Detektion ab 300 pC möglich. In flüssigen Medien (Öl) wurde optisch kein Signal erfasst. Höhere Messempfindlichkeiten wurden in wissenschaftlichen Untersuchungen zur Elektrolumineszenz unter Verwendung von speziellen Linsensystemen mit Einzelphotonenzählern sowie spezieller TE-Messtechnik (Grundstöörpegel <100 fC) erreicht [33].

In den Abschnitten 6.1 bis 6.3 sind Angaben und Erfahrungen zur Positionierung der fluoreszierenden Lichtwellenleiter auf Mantelflächen unterschiedlicher Prüfkörper durch Aufwickeln enthalten. Insgesamt führten diese Varianten zu keinen Oberflächenentladungen, die die Messungen beeinträchtigen. Ergänzend zum Aufwickeln wurde das für eine praktische Anwendung besser handhabbare Eingießen der fluoreszierenden Lichtwellenleiter in angepasste Silikonformteile und deren Anbringen an die unterschiedlichen Prüfkörper erprobt. Als Beispiel zeigt Abbildung 143 einen fluoreszierenden Lichtwellenleiter, der in einem zylindrischen Silikonkörper eingegossen wurde und das Aufschieben auf zylindrische Prüfkörper, ggf. auch Stresskone, ermöglicht. Dabei kommt es nicht zu einer grenzflächenfreien Verbindung zwischen dem Silikonmaterial und der fluorierten PMMA-Claddingschicht der ausgewählten fluoreszierenden Lichtwellenleiter. Treffen entstehende Treekanäle auf einen fluoreszierenden Lichtwellenleiter aus PMMA-Material, so kommt es zu einer partiellen Beschädigung der Claddingschicht. Die in Abbildung 144 angedeuteten roten Bereiche zeigen den Lichtaustritt aus den zerstörten Gebieten der Claddingschicht.



Abbildung 143: In einen zylindrischen Silikonkörper ($h=60$ mm) eingegossener fluoreszierender Lichtwellenleiter (rot) mit angeschleißtem Kunststoff-Lichtwellenleiter (schwarz)

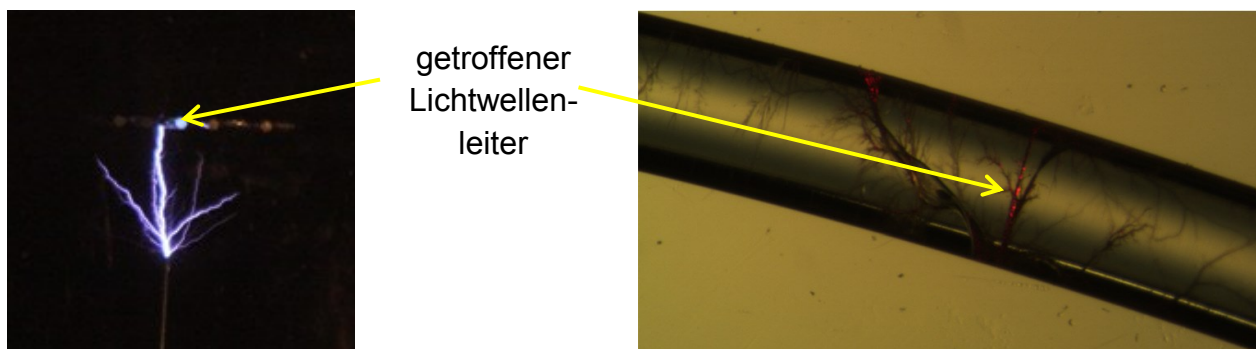


Abbildung 144: Beschädigung des Sensormodells mit seitlichem Austritt von Laserlicht

7.2 Isolieranordnungen aus transparenten Silikonelastomeren ohne makroskopische Grenzflächen und ohne Vorbehandlung

Nachfolgend werden die Ergebnisse diskutiert, die an Prüfkörpern mit eingegossenen Akkupunkturadeln als Hochspannungselektrode erhalten wurden. Schwerpunkte waren die Untersuchung des Einfluss unterschiedlicher Nadelspitzenradien auf den Kanaleinsatz und -aufbau und eine Analyse der Ausbildung der Kanalstrukturen (Trees). Die daraus resultierenden Erkenntnisse ermöglichen eine Charakterisierung bisher nicht untersuchter transparenter Silikonelastomere und eine Einschätzung ihres Verhaltens in Hochspannungsisolieranordnungen. Die Ergebnisse können weiterhin als Ausgangsdaten für notwendige Materialmodifizierungen genutzt werden.

7.2.1 Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)

Maßgeblich für die Bereitstellung von Anfangselektronen und den Ladungstransport im Silikonmaterial sind die im Kapitel 2 beschriebenen Prozesse der inneren und äußeren Feldemission. Da die Prüfkörper vor der ersten Spannungsbeanspruchung keine anderen elektrischen Beanspruchungen erfahren haben, sind keine zusätzlichen Ladungsträger als Raumladung vorhanden. Bei der Ladungsträgerinjektion durch äußere Feldemission ist zu beachten, dass die Nadelspitze keine homogene injizierende Oberfläche darstellt. Die Injektionen der Ladungsträger gehen von sehr kleinen Bereichen der Oberflä-

che aus, deren Positionen relativ zum unmittelbaren Spitzenbereich von wesentlicher Bedeutung sind [27]. Eine experimentelle Überprüfung der Nadeloberfläche im Nanometerbereich ist mit der verfügbaren Messtechnik nicht möglich.

Für eine Abschätzung der sich aus einzelnen Spannungswerten und aus den Weibullnennwerten bei TE-Einsatz ergebenden Feldstärken vor der Nadelspitze wurde Gleichung (8) verwendet. Setzt man die entsprechenden Werte für die Spannung und geometrischen Abmessungen ein, so ergeben sich folgende Höchstfeldstärken.

$$\begin{aligned} 1 \mu\text{m-Bereich} &: \hat{E}_{\max} = 1794 \text{ kV/mm} \\ 2,5 \mu\text{m-Bereich} &: \hat{E}_{\max} = 996 \text{ kV/mm} \\ 5 \mu\text{m-Bereich} &: \hat{E}_{\max} = 539 \text{ kV/mm} \end{aligned}$$

Durch die fehlende Symmetrie im Spitzenbereich der verwendeten Akupunkturnadeln ist die Nachbildung durch einen Rotationshyperboloid nicht korrekt. Die Ergebnisse sind nur als Näherung zu betrachten wobei eine Abschätzung der Abweichung eine numerische Feldberechnung erfordert (siehe 2.4).

Nach den im Abschnitt 6.1.1 dargestellten Ergebnissen wurde bei Verwendung von Akupunkturnadeln mit vergleichbaren mittleren Spitzenradien der Teilentladungseinsatz bei deutlich geringeren Feldstärken im Silikonmaterial festgestellt. Die Ergebnisse zur Abhängigkeit der Einsatzfeldstärke vom Spitzenradius ergaben ein Absinken der Feldstärke mit wachsendem Radius, insbesondere bei einer Vergrößerung von 1 μm auf 2,5 μm (siehe Abbildung 41). Das bedeutet ein Absinken der elektrischen Festigkeit im Nahbereich um die Nadelspitze, so dass es zum Aufbruch erster Entladungskanäle im Submillimeterbereich kommt. Diese Ergebnisse entsprechen Angaben im Abschnitt 2.2.2.1, wonach eine Radiusvergrößerung zu einer Erweiterung des hochbelasteten Polymervolumens um die Nadelspitze führt und die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein mikroskopischer Strukturinhomogenitäten ansteigt.

7.2.2 Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)

Die das Kanalwachstum in Polymeren beeinflussenden Parameter wie Spannungsspiegel, Frequenz der Spannung und Temperatur wurden nicht verändert. Daher sind in erster Linie die Auswirkungen der unterschiedlichen Nadelspitzenradien zu betrachten.

PRPD-Diagramme

Unabhängig vom Nadelspitzenradius ändern sich die mit dem elektrischen Messkanal und den optischen Kanälen aufgezeichneten Fingerprints nicht mit der Beanspruchungsdauer (vgl. Abbildungen 43 bis 50). Es ist erkennbar, dass fast keine TE-Impulse in den Phasenlagen von 90° bis 180° und von 270° bis 360° zünden. Die zeitsynchron dazu aufgezeichneten Fingerprints in den optischen Kanälen verhalten sich dazu in Struktur und Auftreten der TE-Impulse analog.

Mit wachsender Beanspruchungsdauer sind im elektrischen Messkanal zunehmend hohe TE-Aktivitäten (Bereich >200 pC) zu beobachten. Im Abschnitt 2.2.2.1 aufgeführte Ergebnisse von Messungen innerer Teilentladungen mit Spitze-Platte-Elektrodenanordnungen in Prüfkörpern aus einem Silikonelastomer in Abhängigkeit von der Spannung und Beanspruchungsdauer bestätigen prinzipiell diese Ergebnisse, wobei der Aufzeichnungszeitbereich mit 30 s im Vergleich zu den eigenen Messwerten sehr kurz war [92]. Die Ladung der TE-Impulse steigt mit dem Phasenwinkel der treibenden Spannung pro Halbwelle (siehe Abbildung 59).

Nicht festgestellt wurden die von Suwarno [70] mit einer Spitze-Platte-Elektrodenanordnung in Polyethylen erhaltenen Ergebnisse einer Veränderung der Fingerprints mit der Beanspruchungsdauer. Ausgehend von einer „tree-like-tree“ Struktur nach 30 min Beanspruchungsdauer (Wechselspannung 8 kV, 60 Hz) bildete sich eine „bush-like-tree“ Struktur nach 180 min heraus (siehe Abbildung 7 im Abschnitt 2.2.2.3).

Scheinbare Ladung und optische Intensität

Die scheinbare Ladung und die optische Intensität stiegen unabhängig vom Nadelspitzenradius nahezu kontinuierlich aber unterschiedlich stark mit der Beanspruchungsdauer an (vgl. Abbildungen 51 bis 54). Beim Vergleich der Ergebnisse ist der notwendige Einsatz eines Graufilters im optischen Messkanal zur Verhinderung einer Übersteuerung zu beachten.

Dieses Verhalten, das heißt der Anstieg des optisch detektierten Signals mit der Intensität der Entladungen, wurde unter anderem auch von Schwarz [22] bestätigt.

Impulsraten

Die Impulsraten im elektrischen Messkanal und in den optischen Kanälen waren für die unterschiedlichen Nadelspitzenradien in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer konstant, nachdem sie anfänglich z. T. noch absanken (Abbildungen 55 und 58). Ein Vergleich zwischen den elektrisch und optisch ermittelten Werten wurde wieder durch den Einsatz des Graufilters und durch das Überdecken der schwachen optischen Signale durch das Grundrauschen beeinträchtigt.

Die Impulsrate des optischen Messkanals liegt z. T. deutlich unter den Werten des elektrischen Messkanals (zum Beispiel 1750 PD's/s im elektrischen Messkanal und 700 PD's/s im optischen Messkanal). Ein Anwachsen der Impulsrate mit dem Entstehen neuer oder dem Vorwachsen bestehender Kanäle als größere Anzahl von potentiellen Teilentladungsquellen wurde nicht beobachtet.

Kanalstruktur

Ausgehend von der Nadelspitze und unabhängig vom Spitzenradius bildeten sich bei den angegebenen Größen von Spannungshöhe und Beanspruchungsdauer stets zweigförmig-fadenartige Strukturen aus. Die Trees bestehen aus einer unterschiedlichen Zahl von Hauptkanälen⁴⁰, die sich z. T. nicht direkt in Richtung Gegenelektrode entwickelten, sowie einer Vielzahl davon abgehender Seitenkanäle, die feinstrukturiert sind. Die Anzahl der ausgebildeten Hauptkanäle bleibt während der Kanalaufbauzeit konstant.

Die Ausbildung zweigförmiger Treestrukturen in Silikonelastomeren wurde von Hosier [92] bei unterschiedlichen Beanspruchungsspannungen und Du [73] bei niedrigen Temperaturen (30 °C) festgestellt.

Die bei geringerer Spannungsbeanspruchung auftretenden zweigförmigen Kanalstrukturen sind eine Konsequenz des damit zusammenhängenden geringeren Gasdrucks in den Kanälen (siehe Abschnitt 2.2.2.3 und [65]). Das Wachstum erfolgt hauptsächlich von den Kanalenden aus, die bei durchgezündeten Kanälen die höchsten Feldstärken aufweisen. Bei höheren Spannungen ist die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen der

⁴⁰ Hauptkanäle sind direkt mit der Nadelspitze verbunden, Zweig- oder Seitenkanäle entstehen aus den Hauptkanälen. Die Abmessungen liegen im Bereich um 5 µm bis 10 µm.

Aufbruchfeldstärke bereits in Elektrodennähe größer, was letztlich zu eher buschförmigen Strukturen führt, in denen ein größerer Gasdruck herrscht. Das in Abschnitt 2.2.3 angeführte Wachstumsmodell erklärt das Auftreten derartiger Strukturen sowie den Übergang von einer zweig- zur buschförmigen Struktur bei steigender Spannung durch die Annahme der Instabilität von individuellen Entladungen innerhalb der Struktur und damit unabhängig vom Isolierstoff.

Buschförmige Strukturen, wie bei Pepper [64] und Suwarno [70] beschrieben, wurden nicht festgestellt.

Korrelation von elektrischen und optischen Größen (Abschnitt 5.5)

Die Ergebnisse für die unter Laborbedingungen gelagerten Prüfkörper (Prüfkörpergruppe 1) enthalten die nachfolgenden Tabellen 11 und 12. Ergänzend zu den im Kapitel 6 genannten Prüfkörpern wurden weitere Messungen ausgewertet.

In der Mehrzahl ergibt sich für alle Spitzenradiusbereiche ein großer linearer Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) von scheinbarer Ladung und optischer Intensität. Bei einer Übersteuerung des optischen Messkanals können die Korrelationen zwischen scheinbarer Ladung und optischer Intensität nicht ausgewertet werden. Für den Spitzenradiusbereich von $5 \mu\text{m}$ ergibt sich bei Verwendung der FOF-Optik nur ein mittlerer linearer Zusammenhang ($0,5 \leq |r| \leq 0,8$) von scheinbarer Ladung und optischer Intensität.

Die Impulsraten gemessen an Prüfkörpern im Spitzenradiusbereich von $1 \mu\text{m}$ ergeben ebenfalls einen großen linearen Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) bei Verwendung der Kollimator-Optik. Die Ergebnisse im Spitzenradiusbereich von $2,5 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ ergeben einen mittleren ($0,5 \leq |r| \leq 0,8$) oder nur schwachen ($0,5 \leq |r|$) linearen Zusammenhang. Bei einer starken Übersteuerung des optischen Messkanals ergibt sich ein großer linearer Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) für die Impulsraten.

Tabelle 11: Korrelationskoeffizient $|r|$ für kubische Prüfkörper ohne makroskopische Grenzflächen und Vorbehandlung; Prüfkörpergruppe I, Kollimator-Optik

Prüfkörperbezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ scheinbare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffizient $ r $ Impulsrate	Verwendung Graufilter
Spitzenradiusbereich $1 \mu\text{m}$			
B 354	0,92	0,70	x
B 308	0,84	0,98	
B 175	0,78	0,96	
B 195	0,93	1,00	
B 157	0,80	0,99	
B 220	0,84	0,98	
B 170	0,87	0,99	
Spitzenradiusbereich $2,5 \mu\text{m}$			
B 366	0,56	0,07	x
B 386	0,90	0,73	x
B 378	0,88	0,81	
Spitzenradiusbereich $5 \mu\text{m}$			
B 390	0,81	0,69	x
B 407	0,20	0,42	x
B 429	0,82	0,99	

Tabelle 12: Korrelationskoeffizient $|r|$ für zylindrische Prüfkörper ohne makroskopische Grenzflächen und Vorbehandlung; Prüfkörpergruppe I, FOF-Optik

Prüfkörper- bezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ schein- bare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffi- zient $ r $ Impulsrate
Spitzenradiusbereich 1 μm		
B 324	0,94	0,90
B 375	0,83	0,58
Spitzenradiusbereich 2,5 μm		
B 402	0,77	0,10
B 395	0,92	0,78
Spitzenradiusbereich 5 μm		
B 419	0,73	0,12
B 417	0,77	0,10

7.3 Isolieranordnungen aus transparenten Silikonelastomeren ohne makroskopische Grenzflächen nach einer Vorbehandlung

An vergleichbaren Prüfkörpern wie im Abschnitt 7.2 wurden äquivalente Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der Entfernung des Luftsauerstoffs aus dem Polymervolumen zu bestimmen. Weiterhin wurde durch die anschließende Lagerung von einigen Prüfkörpern in einer Atmosphäre aus Reinststickstoff die Auswirkung der Diffusion in das Polymervolumen nach einer Evakuierung erfasst.

7.3.1 Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)

Die Evakuierung des Polymervolumens führte unabhängig vom Nadelspitzenradius zu einer vergleichsweise signifikanten Erhöhung der TE-Einsatzspannung, z. B. für den Spitzenradiusbereich von 1 μm von ca. 7 kV auf 14 kV. Sie vergrößert sich aber nicht weiter für die Spitzenradiusbereiche 2,5 μm und 5 μm (siehe Abbildung 41).

Die sich ergebende große Streuung der Ergebnisse für größere Spitzenradien war nicht eindeutig zu identifizieren. Ursache könnten neben der Asymmetrie des Spitzenbereiches auch Verunreinigungen sein, die vor dem Eingießen nicht festgestellt wurden. Ein Beispiel ist in Abbildung 145 gezeigt.

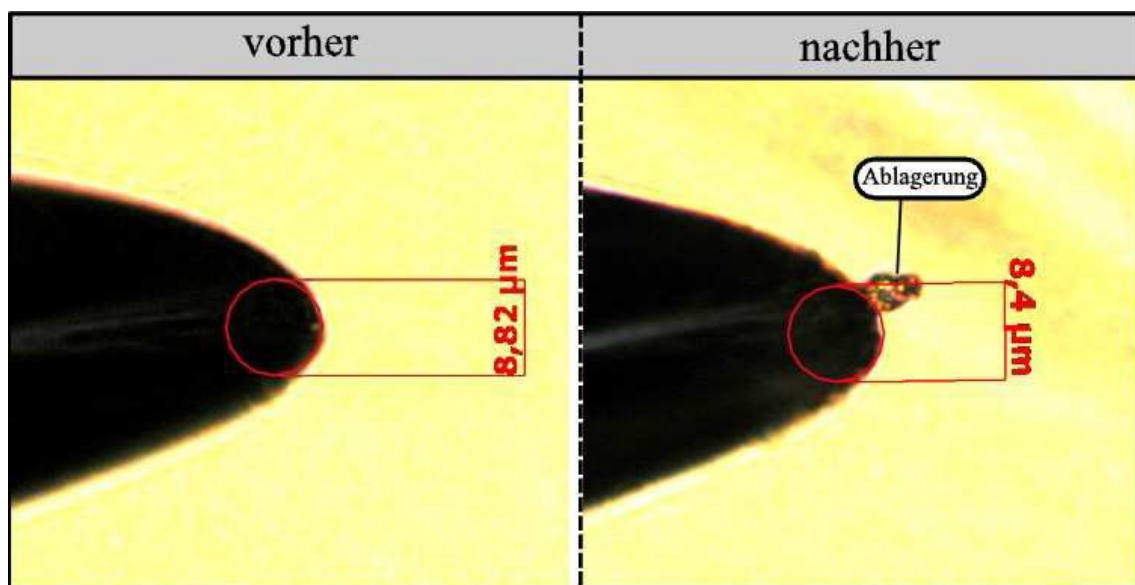


Abbildung 145: Mikroskopaufnahmen eines Spitzendurchmessers vor und nach der Herstellung

Die Ergebnisse wurden durch Untersuchungen, die Kamiya [95] an Silikonmaterial mit einer Spitze-Platte Elektrodenanordnung durchführte (Abschnitt 2.2.2.1), bestätigt. Zum gleichzeitigen Einfluss von Evakuierung und Spitzenradius auf die TE-Einsetzspannung liegen dagegen keine Ergebnisse vor.

Erklärt wird die Erhöhung der TE-Einsetzspannung mit der Vorstellung von energiereichen („hot“) Elektronen, die im elektrischen Feld genügend Energie (einige eV) zur Aufspaltung von Molekularverbindungen aufnehmen können [95], [99]. Im nicht vorbehandelten Material sind entsprechende Leerstellenbereiche für eine derartige Energieaufnahme vorhanden. Für vernetztes PE wird zum Beispiel ein Volumenanteil an Leerstellenbereichen (free volume) von ca. 8 % angegeben, für Silikonelastomere sind dazu keine Angaben verfügbar [99].

Durch das Evakuieren werden diese Bereiche deutlich reduziert, die Energieaufnahme damit behindert. Werden diese Bereiche durch Zufuhr von Luft nach dem Evakuieren wieder auf die ursprüngliche Größe geweitet, so sind die TE-Einsetzspannungen mit denen vor der Evakuierung vergleichbar.

Ähnlich dem o. g. Vorgehen wurden Prüfkörper nach der Evakuierung in Reinstickstoffatmosphäre gelagert. (siehe Abschnitt 3.3.3), so dass sich die Leerstellenbereiche wieder ausbilden konnten. Die danach gemessenen TE-Einsetzspannungen sinken wieder auf Größenordnungen nicht vorbehandelter Prüfkörper ab (siehe Abbildung 41).

Die von Pietsch [33] genannte Auswirkung, eine im Vergleich zum Ausgasen ähnlich hohe TE-Festigkeit durch Ausgasen und anschließender Imprägnierung mit inerten Gasen wie Stickstoff zu erreichen, war nicht nachweisbar.

7.3.2 Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)

PRPD-Diagramme

Vergleichbar mit den Histogrammen laborgelagerter Prüfkörper (siehe Abbildungen 43 bis 50) war auch bei evakuierten Prüfkörpern keine Veränderung mit der Beanspruchungsdauer nachweisbar (siehe Abbildungen 60 bis 67).

Scheinbare Ladung, optische Intensität

Die vom elektrischen Messkanal aufgezeichneten scheinbaren Ladungen zeigen insgesamt eine leicht ansteigende Tendenz. In der ersten Phase der Beanspruchung unter 40 min liegen die Werte deutlich unterhalb der Werte vergleichbarer nicht vorbehandelter Prüfkörper. Ein Einfluss der Nadelspitzenradien auf die Ladungshöhe war nicht feststellbar.

Die Ergebnisse der optischen Kanäle wurden insbesondere bei Verwendung der Kollimator-Optik durch Übersteuerungen und den Einsatz des Graufilters stark beeinflusst und es ergab sich ein sowohl konstanter, als auch ein z. T. stark schwankender Verlauf mit der Beanspruchungsdauer (Abbildung 68). Durch die FOF-Optik, bei der kein Graufilter eingesetzt wurde, wurden ansteigende Verläufe analog zu den Ergebnissen des elektrischen Messkanals festgestellt (Abbildung 69).

Ein Vergleich der mit dem elektrischen Messkanal und den optischen Kanälen aufgezeichneten Verläufe zeigt eine Korrelation des Verhaltens der scheinbaren Ladung und der optischen Intensität mit der Beanspruchungsdauer.

Impulsrate

Die Impulsraten ergaben unabhängig vom Messkanal nahezu konstante Werte mit der Beanspruchungsdauer (vgl. Abbildungen 70 und 71). Im Vergleich mit den Ergebnissen der nicht vorbehandelten Prüfkörper ist die elektrisch erfasste Impulsrate deutlich erhöht, was auf eine Reduzierung der Zündspannung hindeutet. Die optisch erfassten Werte sind ähnlich niedrig, z. T. unter 100 Impulse/sec. Erkennbar ist, dass sehr kleine Impulsraten auch sehr geringe optische Intensitäten bedeuten.

Kanalstruktur

Unabhängig vom Nadelspitzenradius bildeten sich Strukturen mit wenigen Hauptkanälen und einer hohen Dichte von eher nadelförmigen Seitenkanälen aus, die sich von den Treestrukturen in nicht evakuierten Prüfkörpern unterscheiden (vgl. Abbildung 74). Weiterhin ergaben sich unterschiedliche Treelängen bei vergleichbaren Beanspruchungsparametern (siehe Anlage 11.2.1.2).

Diese Strukturen ähneln eher zweig-buschförmigen Trees und den von Du [74] als „pine branch“ Trees (Abbildung 146) beschriebenen Strukturen, die im Silikonmaterial bei 60 °C und einer Beanspruchungsdauer von 123 min ermittelt wurden. Die dichtgepackten kurzen Seitenkanäle dokumentieren das Materialvolumen, das durch die Teilentladungen zerstört wurde.

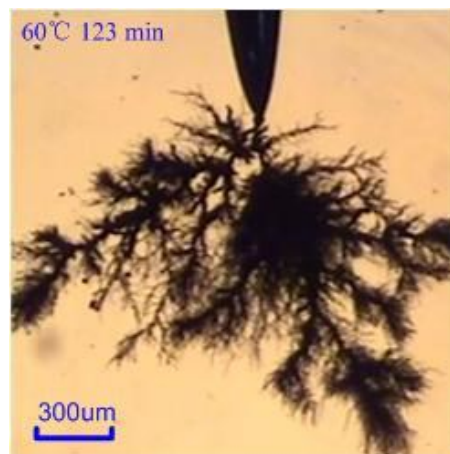


Abbildung 146: „Pine branch“ Treestruktur im Silikonmaterial bei 60 °C; Beanspruchungsdauer: 123 min; Spannung: 8 kV; Nadelspitzenradius 3 μm; Schlagweite 2 mm [74]

Korrelation zwischen elektrischen und optischen Größen (vgl. Abschnitt 5.5)

Bei Einsatz der Kollimator-Optik ergab sich für den Spitzenradiusbereich von 2,5 μm nur ein schwacher linearer Zusammenhang ($0,5 \leq |r|$), während für die anderen Spitzenradiusbereiche ein großer linearer Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) von scheinbarer Ladung des elektrischen Messkanals mit der optischen Intensität nachweisbar war. Bei Einsatz der FOF-Optik wurde für den Spitzenradiusbereich von 1 μm und 2,5 μm ein großer linearer Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) festgestellt, während beim Spitzenradiusbereich von 5 μm nur ein schwacher linearer Zusammenhang ($0,5 \leq |r|$) nachweisbar war. Die Korrelation der Impulsraten ergeben ähnlich wie bei den laborgelagerten Prüfkörpern nur vereinzelt große ($|r| \geq 0,8$) oder mittlere lineare Zusammenhänge ($0,5 \leq |r| < 0,8$).

Bei einem Vergleich mit den Messergebnissen der Prüfkörpergruppe 1 ergeben sich bei den Prüfkörpern der Prüfkörpergruppe 2 deutlich geringere Größen der Korrelationsko-

effizienten von scheinbarer Ladung/optischer Intensität bzw. der Impulsraten, insbesondere bei Verwendung des Graufilters im optischen Messkanal. Die Einstellung der Rauschgrenzen im Messsystem wirkt sich auf die ermittelten Korrelationskoeffizienten aus.

Tabelle 13: Korrelationskoeffizient $|r|$ für kubische Prüfkörper ohne makroskopische Grenzflächen; Prüfkörpergruppe 2; Kollimator-Optik

Prüfkörper- bezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ scheinbare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffi- zient $ r $ Impulsrate	Verwendung Graufilter ND 2.0
Spitzenradiusbereich 1 μm			
B 428	0,01	0,79	x
B 259	0,68	0,47	x
B 304	0,81	0,56	x
B 253	0,83	0,85	x
B 307	0,84	0,95	x
B 358	0,56	0,91	
Spitzenradiusbereich 2,5 μm			
B 383	0,44	0,27	x
B 319	0,48	0,33	x
Spitzenradiusbereich 5 μm			
B 373	0,83	0,37	x
B 397	0,70	0,39	x
B 318	0,73	0,29	

Tabelle 14: Korrelationskoeffizient $|r|$ für zylindrische Prüfkörper ohne makroskopische Grenzflächen; Prüfkörpergruppe 2; Spitzenradiusbereich 1 μm ; FOF-Optik

Prüfkörper- bezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ schein- bare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffi- zient $ r $ Impulsrate
Spitzenradiusbereich 1 μm		
B 413	0,92	0,26
B 361	0,70	0,38
Spitzenradiusbereich 2,5 μm		
B 385	0,89	0,62
B 425	0,87	0,34
Spitzenradiusbereich 5 μm		
B 427	0,43	0,27
B 388	0,39	0,47

7.4 Isolieranordnungen aus transparenten Silikonelastomeren ohne makroskopische Grenzflächen und Vorbehandlung mit streifenförmigen Hochspannungselektroden

Die Untersuchungsschwerpunkte beinhalteten das von Fehlstellen aus Deflektormaterial ausgehende Schädigungsverhalten in der Kanaleinsatz- sowie –aufbauphase. Daraus ergaben sich Hinweise für die Auswirkung von Fehlstellen im Zusammenhang mit Feldsteuerelementen von Hochspannungskabelgarnituren.

7.4.1 Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)

Für HS-Elektroden aus halbleitenden Polymermaterialien ergeben sich hinsichtlich der Injektionsprozesse von Ladungsträgern qualitativ ähnliche Verhältnisse wie für Metallelektroden. Entscheidend sind Gestaltung und geometrische Abmessung des Spitzenbereichs. Die in den Abbildungen 78 und 79 gezeigten Ergebnisse der Weibull-Auswertungen von elektrisch gemessenen TE-Einsatzspannungen ergaben vergleichbare Nennwerte für beide Elektrodentypen (HYB und DFL). Die deutlich höhere Ergebnisstreuung der Spannungswerte in der Hybridgruppe ist auf größere Herstellungstoleranzen bei der Anfertigung der metallisierten Spitzenelektroden zurückzuführen. Der TE-Einsatz wurde von den elektrischen sowie beiden optischen Kanälen bei gleichen Spannungswerten registriert. Die vom elektrischen Messkanal dabei angezeigte scheinbare Ladung in einem Bereich ≤ 10 pC entsprach optischen Intensitäten, die für eine Detektion ausreichend hoch waren. Insbesondere bei den Prüfkörpern der HYB-Gruppe stieg die scheinbare Ladung unmittelbar nach TE-Einsatz relativ stark an.

Vereinzelt wurden auch TE-Ein- und -Aussetzspannungen bei höheren Spannungswerten durch den optischen Messkanal detektiert, wobei die maximale Abweichung $\leq 1,5$ kV bei einer scheinbaren Ladung ≤ 10 pC betrug.

7.4.2 Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)

PRPD-Diagramme

Die Muster der vom elektrischen Messkanal sowie vom optischen Messkanal aufgezeichneten Histogramme in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer, beispielhaft für je einen Prüfkörper aus beiden Prüfkörpergruppen in den Abbildungen 80 und 81 (DFL-Gruppe) sowie 88 bis 90 (HYB-Gruppe) angegeben, sind vergleichbar. Eine Musterveränderung mit der Zeitdauer der Beanspruchung, wie für Messungen an Prüfkörpern aus Polyethylen bei Suwarno [70] angegeben, war auch für eine Beanspruchungsdauer bis zu 300 min nicht nachweisbar.

In Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer ergaben sich die für innere Fehlstellen typischen Fingerprints mit Entladungen in den ansteigenden Flanken der Wechselspannung bis zum jeweiligen Spannungsmaximum. Im Vergleich zu den Prüfkörpern der DFL-Gruppe war die bei gleicher Spannungsbeanspruchung ermittelte Beanspruchungsdauer bis zum Durchschlag von Prüfkörpern der HYB-Gruppe mit maximal 20 min signifikant kürzer, obwohl die TE-Einsatzspannungen für beide Gruppen vergleichbar waren (vgl. Abschnitt 6.2.1).

Scheinbare Ladung, optische Intensität

Die scheinbare Ladung und optische Intensität stiegen mit der Beanspruchungsdauer in beiden Prüfkörpergruppen kontinuierlich, aber unterschiedlich stark an. Für zwei Prüfkörper der DFL-Gruppe wurde nach längerer Beanspruchungszeit (> 90 min) ein asymptotisches Verhalten festgestellt (Abbildung 82).

Charakteristisch war der relativ starke Anstieg der scheinbaren Ladung, insbesondere wenn die Beanspruchungszeit bis zum Durchschlag unterhalb von 3 min lag.

Impulsraten

Die Impulsraten zeigten für Beanspruchungsdauern bis zum Durchschlag ein differenziertes Verhalten. Bei Beanspruchungszeiten bis 90 min war die aufgezeichnete Impuls-

rate im elektrischen und im optischen Messkanal jeweils konstant (Abbildungen 85 bis 87). Für Beanspruchungsdauern über 90 min ist ein Abfall der Impulsrate erkennbar, wie die Abbildung 147 zeigt. Die scheinbare Ladung zeigte für diese Prüfkörper einen asymptotischen Verlauf (vgl. Abbildung 83).

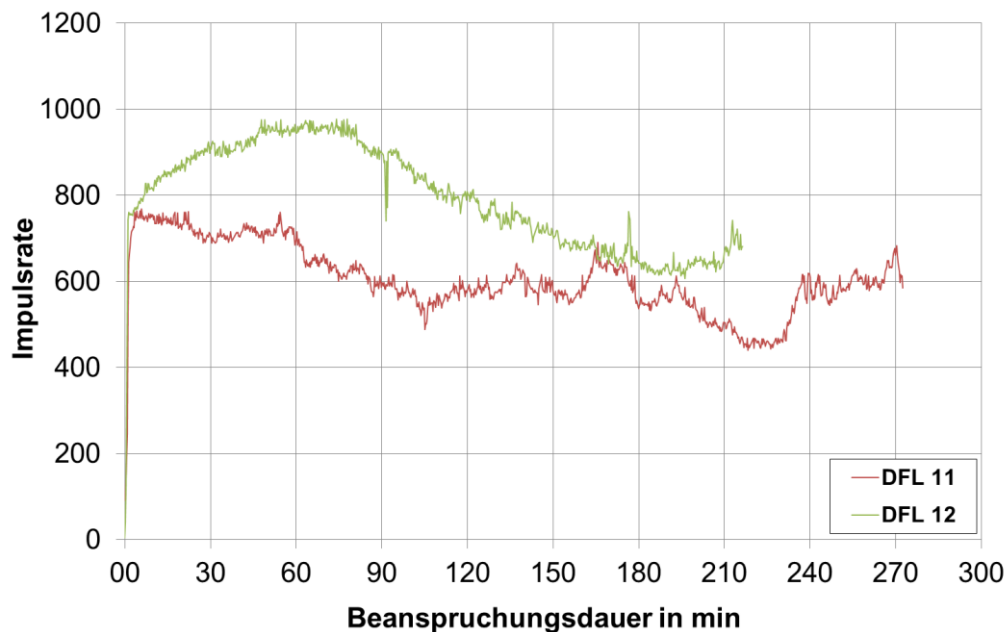


Abbildung 147: Impulsrate des elektrischen Messkanal in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer; Prüfkörper DFL 11 und DFL 12; DFL-Prüfkörper, Prüfkörpergruppe B, Spannung: 30 kV

Kanalstrukturen

Wie in den Abbildungen 100 bis 102 und 105 bis 108 als Beispiele für die DFL- und HYB-Gruppe einschließlich der Histogramme gezeigt, entwickelten sich unter den angegebenen Beanspruchungsparametern ebenfalls zweigförmige Strukturen. Ebenso ergaben sich derartige Strukturen nach Abschluss der Messungen für alle weiteren untersuchten Prüfkörper (Abbildungen 103 und 109). Die sich jeweils ausgebildeten Haupt- und Seitenkanälen waren unterschiedlich.

Der in Abbildung 103 gezeigte Tree (DFL 11) besitzt ein klar erkennbaren Hauptkanal und nur wenige Seitenkanäle, während der Tree im Prüfkörper DFL 12 mehrere Hauptkanäle und eine Vielzahl von Seitenkanälen ausbildete.

Unterschiedlich waren auch die Strukturen zwischen der DFL- und der HYB-Gruppe (vgl. Abbildung 103 mit Abbildung 109). Die Strukturen der HYB-Gruppe bestehen aus weniger Kanälen mit größeren Kanalabmessungen.

Obwohl quantitativ noch nicht auswertbar, ergibt sich aus dem Wachstumsmodell von Dodd [61] eine Abhängigkeit der Materialzerstörung von der Größe des elektrischen Feldes, das die Treestruktur umgibt.

Wachstumsverhalten

Signifikant unterschiedlich war das Treewachstum in beiden Prüfkörpergruppen unter vergleichbaren Beanspruchungsparametern. Die Wachstumsgeschwindigkeit der HYB-Gruppe war im Vergleich zur DFL-Gruppe auch im Bereich unmittelbar nach Beanspru-

chungsbeginn signifikant höher (vgl. Abbildungen 104 und 110). Für die nur mit Prüfkörpern der DFL-Gruppe erreichte längere Beanspruchungsdauer ergaben sich unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten, z. T. auch ein nahezu asymptotisches Verhalten (siehe Abbildung 104, DFL 11 und DFL 12). Diese Stagnation bedeutet eine Streuung der Ladungswerte mit sprunghaften kurzen Anstiegen. Das kann als Erlöschen der Teilentladungen im bis dahin am längsten ausgebildeten Hauptkanal und von Entladungen in den Seitenkanälen gedeutet werden. Ein direkter Zusammenhang zwischen Treestruktur und Wachstumsverhalten war nicht erkennbar. Die in Abbildung 103 gezeigten Treestrukturen von DFL 11 und DFL 12 unterscheiden sich in der Ausbildung von Haupt- und Seitenkanälen deutlich voneinander, besaßen aber vergleichbare Wachstumsgeschwindigkeiten. Erkennbar ist, dass eine steigende Ausbildung von Seitenkanälen und das späte Ausbilden eines zur Gegenelektrode vorwachsenden Hauptkanals die Wachstumsgeschwindigkeit reduzieren. Für einzelne Prüfkörper der DFL-Gruppe deutet der Verlauf von scheinbarer Ladung (Abbildung 83) sowie Impulsrate (Abbildung 86) und das Tree-/Kanalwachstumsverhalten (Abbildung 104) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer auf einen Zusammenhang zwischen diesen Größen hin.

Im Vergleich zu den in Abbildung 109 gezeigten Treestrukturen von Prüfkörpern der HYB-Gruppe nach Abschluss der Messungen ergab sich unter vergleichbaren Beanspruchungsparametern im Prüfkörper HYB 13 eine davon verschiedene Treestruktur (siehe Abbildung 148).

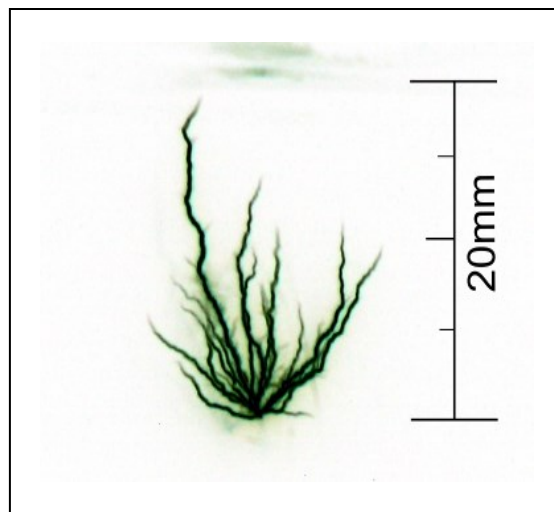


Abbildung 148: Treestruktur nach einer Beanspruchungsdauer von $t_B=44$ min; Spannung: 30 kV; Prüfkörper HYB 13, Prüfkörpergruppe B

Es bildete sich, ausgehend von der Spitzenelektrode, eine Vielzahl von Hauptkanälen mit unterschiedlichen Abmessungen aus.

Während die Zeitdauer bis zu einem Durchschlag für die Prüfkörper aus Abbildung 110 maximal 3 min betrug, war für diesen Prüfkörper eine Beanspruchungsdauer von ca. 36 min bis zu einem Durchschlag erforderlich (Abbildung 149).

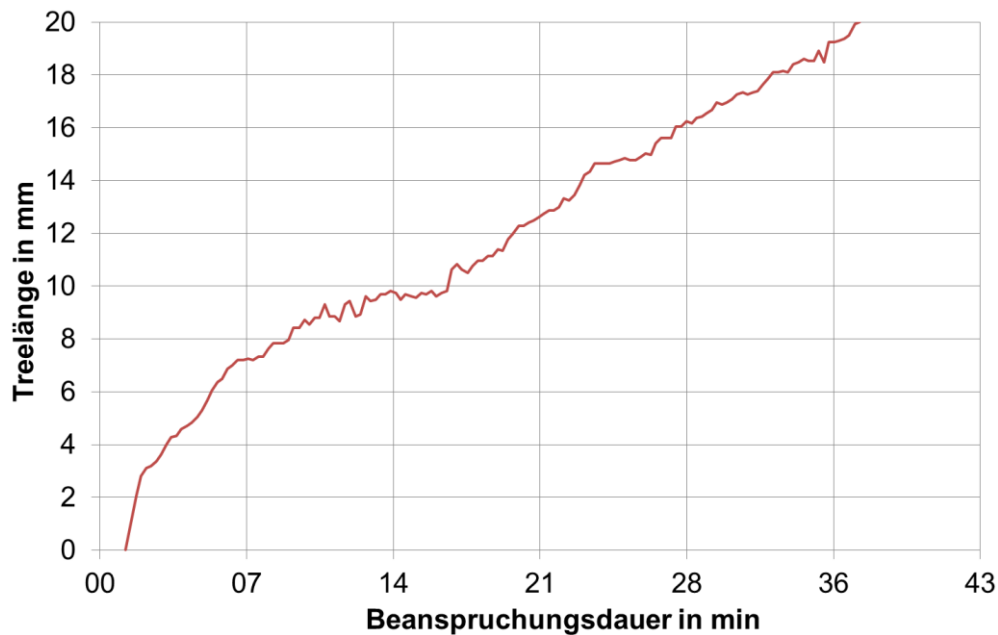


Abbildung 149: Tree-/Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer;
Spannung: 30 kV; Prüfkörper HYB 13, Prüfkörpergruppe B

Korrelation zwischen elektrischen und optischen Größen (vgl. Abschnitt 5.5)

Die Ergebnisse der ermittelten Korrelationskoeffizienten für ausgewählte Prüfkörper enthält Tabelle 15. Es ergab sich ein großer linearer Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) von scheinbarer Ladung und optischer Intensität für beide Prüfkörpertypen. Wie in den Abbildungen 94 bis 96 gezeigt stieg für die HYP-Prüfkörper die scheinbare Ladung und die optische Intensität unterschiedlich stark an. Analoges gilt für die Prüfkörper der DFL-Gruppe (Abbildungen 82 bis 84). Für die Impulsraten ergaben sich sehr unterschiedliche Werte für beide Prüfkörpertypen, teilweise ein schwacher ($|r| < 0,5$) und in Einzelfällen ein großer ($|r| \geq 0,8$) linearer Zusammenhang.

Tabelle 15: Korrelationskoeffizient $|r|$ für kubische Prüfkörper ohne makroskopische Grenzflächen und Vorbehandlung mit streifenförmigen Hochspannungselektroden

Prüfkörper- bezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ schein- bare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffi- zient $ r $ Impulsrate
HYB 1	1,00	0,08
HYB 3	1,00	0,22
HYB 5	1,00	0,86
DFL 1	0,99	0,98
DFL 2	0,95	0,37
DFL 4	0,98	0,38
DFL 5	1,00	0,96

7.5 Isolieranordnungen mit VPE-Silikon-Grenzfläche

Kennzeichnend für diese Prüfkörper war die VPE-Silikon-Längsgrenzfläche mit darin angeordneter Hochspannungsnadelelektrode (siehe Abschnitt 6.3).

Die Ergebnisse von Prüfkörpern mit nicht vorbehandelter VPE-Mantelfläche (Prüfkörpergruppe I) waren nur für die Bestimmung der TE-Einsetz- und Aussetzspannungen auswertbar. Bei einer Beanspruchung mit konstanter Spannung im Bereich der vorgegebenen Größen tritt innerhalb der ersten zwei Minuten der Durchschlag ein (Abbildung 117 im Abschnitt 6.3.2.2). Untersuchungen von Kunze [3] zur Kurzzeitfestigkeit von VPE↔Silikon-Modellgrenzflächen mit Wechselspannung bei tangentialer Beanspruchung zeigen, dass bei einer Vorbehandlung mit Gleitpaste eine rund 2,5-fach höhere Grenzfestigkeit im Vergleich zur nicht vorbehandelten Grenzfläche erreicht wird.

7.5.1 Kanaleinsatzphase (stufenförmige Spannungssteigerung)

Die Erzeugung frei beweglicher Ladungsträgern in Grenzflächenbereichen praktischer Isolieranordnungen ohne metallischen Elektrodenkontakt findet in kritischen Bereichen statt, in denen günstige Bedingungen für eine Energieakkumulation statistisch vorhandener Anfangselektronen im elektrischen Feld herrschen (vgl. Abschnitt 2.2.2.2). Auch im stark inhomogenen Feld einer Nadel-Platte-Elektrodenanordnung mit VPE↔Silikon-Längsgrenzfläche (siehe Abschnitt 6.3.1) laufen bei Spannungssteigerung ähnliche Schädigungsprozesse wie in polymeren Isolierstoffen ab, sofern die Spannung eine entsprechende Höhe erreicht hat.

Ab einer bestimmten örtlichen Feldstärke ist mit stabilen Ionisationsprozessen zunächst unterhalb von extern messbaren Teilentladungsgrenzen zu rechnen, als deren Folge die angrenzende Feststoffoberfläche fortgesetzt mit Elektronen relativ hoher kinetischer Energie bombardiert wird [3]. Bei ausreichender Dauer dieser Vorgänge kommt es zu ersten irreversiblen Materialveränderungen. Diese Alterungsvorgänge gehen zu einem späteren Zeitpunkt in erste Teilentladungen entlang der Oberflächen (Gleitentladungen) über, die aufgrund nunmehr stark beschleunigter Erosion sehr rasch den Durchschlag der Isolieranordnungen auslösen. Diese Prozesse sind stark von der Vorbehandlung der VPE-Grenzfläche abhängig.

Wird bei Prüfkörpern mit vergleichbaren geometrischen Abmessungen, insbesondere auch der Spitzendurchmesserbereich der Nadelelektroden, die VPE-Mantelfläche mit Silikonfett (Gleitpaste) vorbehandelt, so ergibt sich im Vergleich zu Prüfkörpern mit unvorbehandelter Mantelfläche eine um 3 kV höhere TE-Einsetzspannung (Weibull-Nennwert) von ca. 19,6 kV (vgl. Abbildung 111).

7.5.2 Kanalaufbauphase (konstante Spannungsbeanspruchung)

PRPD-Diagramme

Die in Abbildung 112 gezeigten Histogramme nach einer Beanspruchungsdauer von 30 min zeigen eine identische Entladungserfassung durch die unterschiedlichen Kanäle. Die Entladungsintensitäten waren in beiden Halbwellen vergleichbar. Durch die FOF-Optik wurden als Folge der Abschattung die geringsten Intensitäten angezeigt. Diese Ergebnisse sind ebenfalls unabhängig von der Beanspruchungsdauer.

Scheinbare Ladung, optische Intensität

Die von den elektrischen und optischen Kanälen ermittelten Größen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer sind für zwei unterschiedliche Prüfkörperformen (ku-

bisch und zylindrisch) in der Abbildung 114 zusammengefasst dargestellt. Wie auch aus den in Abbildung 113 für zwei weitere Prüfkörper dargestellten Verläufen der scheinbaren Ladung in Abhängigkeit von der Dauer der Spannungsbeanspruchung erkennbar ist, steigen analog zu den Ergebnissen mit nadel- und streifenförmigen HS-Elektroden die scheinbare Ladung und die optische Intensität mit der Beanspruchungsdauer kontinuierlich an. Mit dem elektrischen Messkanal mit AKV (MP 1.1) wurden im Vergleich zum Messkanal mit Auskopplung über Ferrit (MP 1.2) höhere scheinbare Ladungen registriert. Auch aus Abbildung 112 ist erkennbar, dass die mit der FOF-Optik ermittelten optischen Intensitäten (B 100; MP 1.3) deutlich geringer sind als die mit der Kollimator-Optik festgestellten Werte (B 108; MP 1.3).

Impulsrate

Die elektrisch und optisch detektierten Impulsraten blieben nach starkem Anstieg zu Beanspruchungsbeginn mit wachsender Beanspruchungsdauer nahezu konstant (Abbildung 116). Dieses Verhalten ist ähnlich den in Abbildung 115 angegebenen Werten des elektrischen Messkanals und vergleichbar mit Ergebnissen, die mit nadel- und streifenförmigen HS-Elektroden ermittelt wurden. Mit dem elektrischen Messkanal (MP 1.1) wurden jeweils die höchsten und mit dem optischen Messkanal (MP 1.3) die niedrigsten Impulsraten detektiert. Vom Messkanal mit fluoreszierendem Lichtwellenleiter (B 100) wurde trotz des eingeschränkten Absorptionsbereiches durch den VPE-Kern nahezu die gleiche Anzahl von Impulsen wie im optischen Messkanal mit Kollimator-Optik angezeigt.

Kanalstrukturen

Die ausgebildeten zweigförmigen Strukturen wurden offensichtlich von den bei entsprechender Spannungsbeanspruchung auftretenden Gleitentladungen entlang der Oberflächen und der damit verbundenen Erosion bestimmt.

Bei nicht vorbehandelter Mantelfläche des VPE-Kerns bildeten sich während der kurzen Beanspruchungsdauer (≤ 108 s) Strukturen mit dominierendem Hauptkanal (siehe Abbildung 117) und z. T. auch mit vielen Seitenkanälen in Umfangsrichtung aus (siehe Abbildung 118). Dafür ausschlaggebend kann die Vorbehandlung der VPE-Mantelfläche durch das Schälen sein. Bei einem durch die Prüfkörpergestaltung erreichten zu niedrigen Anpressdruck ist die elektrische Festigkeit weiterhin druckabhängig.

Eine mikroskopische Analyse des Bereichs um den Durchschlagkanal nach Demontage der Prüfkörper zeigte, dass für alle Prüfkörper dieser Messreihe Zerstörungsspuren sowohl im VPE als auch im Silikonmaterial nachweisbar sind.

Die baugleichen Prüfkörper mit vorbehandelter Mantelfläche (Silikonfett) zeigten unterschiedliche Kanalstrukturen nach längerer Beanspruchungsdauer (> 60 min, vgl. Abbildungen 120 und 122 mit Abbildung 127).

In zwei Prüfkörpern (B 122 und B 199) bildeten sich dominierende Kanäle in Richtung Gegenelektrode aus (siehe Abbildungen 120 und 122). Wie bereits ausgeführt, ändern sich die TE-Muster nicht mit der Beanspruchungsdauer, die Intensitäten sind in der positiven und negativen Halbwelle nahezu gleich. Bei zwei weiteren baugleichen Prüfkörpern (siehe als Beispiel Abbildung 127) bildeten sich mit wachsender Beanspruchungsdauer im Bereich um 150 min Kanäle vorwiegend in Umfangsrichtung mit wechselnden Entladungsintensitäten in den einzelnen Kanälen aus. Dominierende Hauptkanäle in Richtung Gegenelektrode fehlten.

Wachstumsverhalten

Das zugehörige Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer (siehe Abbildung 123) war für die erstgenannten Prüfkörper B 122 und B 199 gekennzeichnet durch das für zweigförmige Treestrukturen typische Wachstumsverhalten (vergleiche Abbildungen 3 und 5a):

- schnelles Wachstum nach Beanspruchungsbeginn,
- langsames und sich wieder beschleunigenden, kontinuierlichen Wachstums mit wachsender Beanspruchungsdauer und
- ein stark beschleunigtes Wachstum vor dem Durchschlag.

Die in Abbildung 128 aufgeführten weiteren Prüfkörper B 167 und B 177 zeigten dagegen nach einer kurzen Wachstumsphase zu Beanspruchungsbeginn ein sehr langsames Wachstum bis zum Abschluss der Messungen. Die Fluktuationen im Wachstumsverhalten können als Erlöschen der Entladungen im längsten Kanal und Zünden von Entladungen in Seitenkanälen gedeutet werden.

Es bildeten sich keine zur Gegenelektrode vorwachsenden Kanäle aus. Ob sich bei noch längerer Beanspruchungsdauer das Wachstum wieder beschleunigt, kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Das Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer für den Prüfkörper B 177 ist in den Abbildungen 150 und 151 gezeigt.

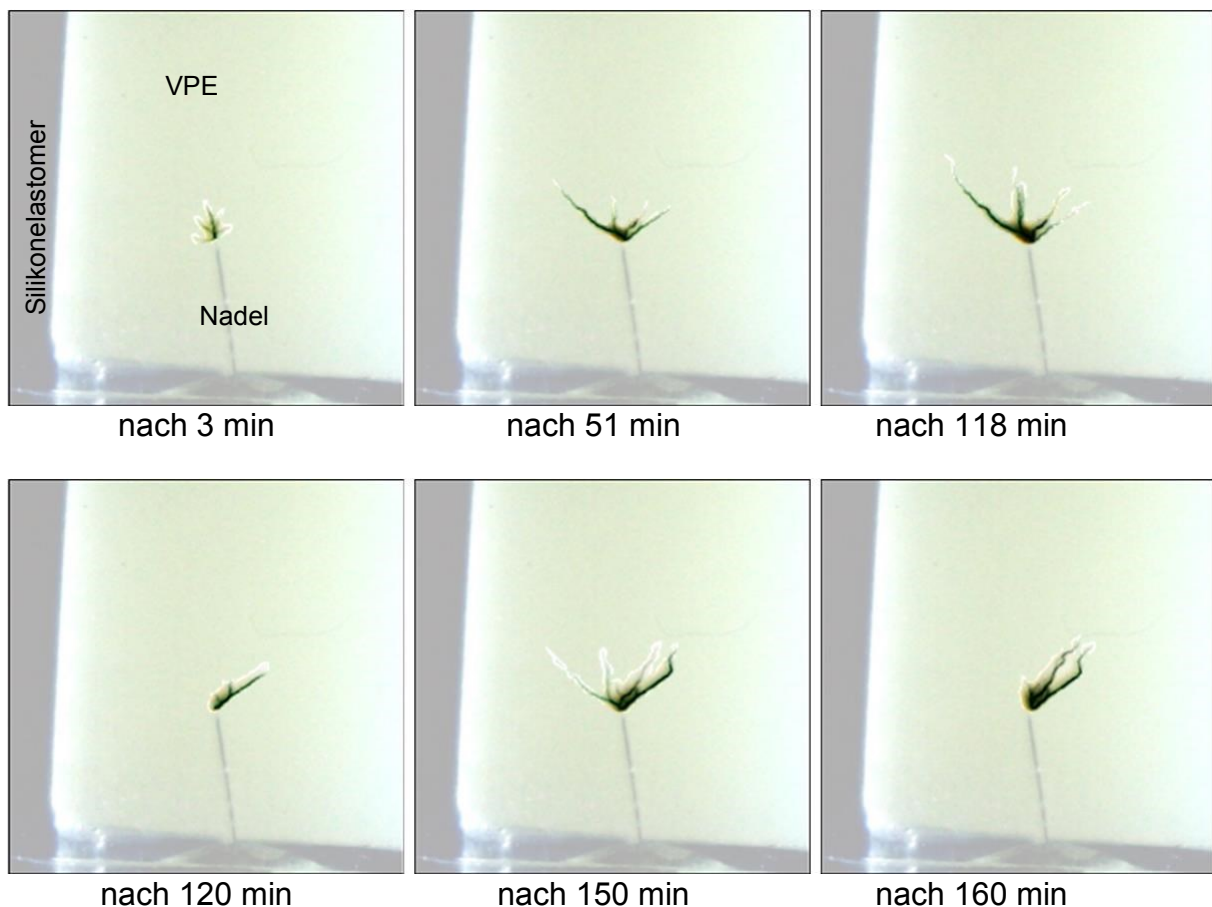


Abbildung 150 Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer (bis 160 min); Prüfkörper B 177, Prüfkörpergruppe II; Spannung 25 kV

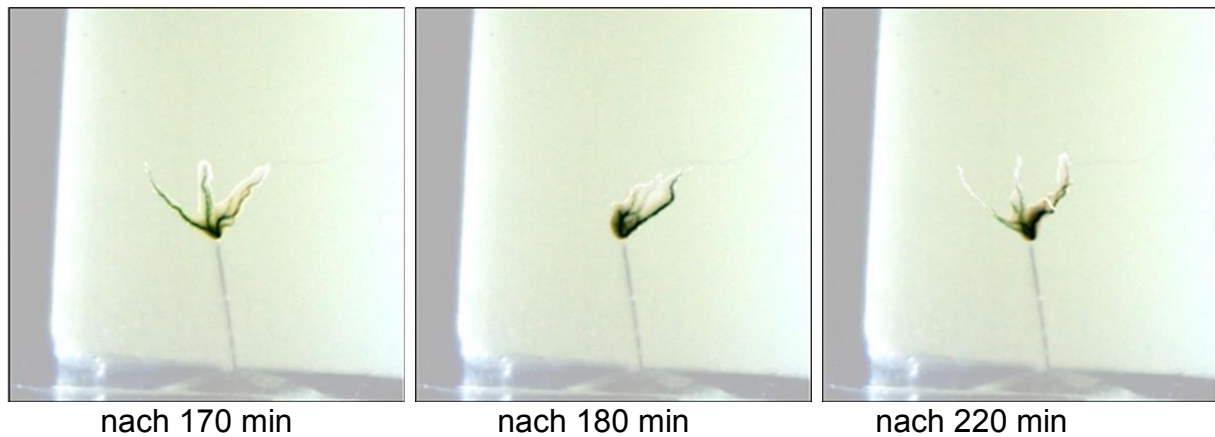


Abbildung 151: Kanalwachstum in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer (170 min bis 220 min); Prüfkörper B 177, Prüfkörpergruppe II; Spannung 25 kV

Unterschiede in den geometrischen Abmessungen zwischen den genannten Prüfkörpern ergaben sich nur bei den gemittelten Rautiefen der VPE-Oberfläche.

In den Prüfkörpern, in denen sich Kanäle in Richtung Gegenelektrode ausbildeten (B 122 und B 199), betrug die Rautiefe des VPE-Kerns $34,5\ \mu\text{m}$ und $38,8\ \mu\text{m}$, die Werte für die Prüfkörper ohne derartige Kanäle waren größer und betrugen $41,1\ \mu\text{m}$ und $58,4\ \mu\text{m}$ (B 167 und B 177).

Korrelation zwischen elektrischen und optischen Größen (vgl. Abschnitt 5.5)

Da kein Graufilter zum Einsatz kam, ist ein großer linearer Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) von scheinbarer Ladung und optischer Intensität bei der Verwendung der Kollimator-Optik nachweisbar (Tabelle 16), ebenso beim Einsatz der FOF-Optik (Tabelle 17). Für die Impulsraten ist insbesondere bei Verwendung der FOF-Optik ein großer linearer Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$) für beide optische Messkanäle erkennbar.

Tabelle 16: Korrelationskoeffizient $|r|$ für kubische Prüfkörper mit VPE-Silikon-Grenzfläche; Kollimator-Optik

Prüfkörper-bezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ scheinbare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffizient $ r $ Impulsrate
B 56	0,98	0,49
B 108	0,89	0,96

Tabelle 17: Korrelationskoeffizient für zylindrische Prüfkörper mit VPE-Silikon-Grenzfläche; FOF-Optik

Prüfkörper-bezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ scheinbare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffizient $ r $ Impulsrate
B 54	0,94	0,88
B 100	0,99	0,79

7.6 Modelle von 20 kV-Aufschiebeendverschlüssen aus transparentem Silikonelastomer

Die Ergebnisse der orientierenden Untersuchungen zur synchronen optischen und elektrischen Erfassung der von eingebrachten Fehlstellen im Endverschlussbereichs eines 20 kV-VPE-MS-Kabelaufbaus ausgehenden Signale bei Spannungsbeanspruchung bestätigten die an Prüfkörpern ermittelten Ergebnisse. Der optische Messkanal (FOF-Optik) und der elektrische Messkanal detektierten den TE-Einsatz bei annähernd gleichen Spannungswerten. Die PRPD-Diagramme des elektrischen und optischen Messkanal sind insbesondere bei höheren Spannungswerten vergleichbar (Abbildungen 131 und 132). Aus der Darstellung in den Abbildungen 134 und 135 ist eine Abhängigkeit der Messempfindlichkeit des optischen Messkanals von der Entfernung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters zur Fehlerstelle erkennbar.

Die nahezu identischen Muster des elektrischen und optischen Messkanals in Abbildung 132 bei Verwendung des Aufschiebeendverschlusses mit eingebettetem fluoreszierendem Lichtwellenleiter bestätigten sich auch in der zugehörigen POT-Analyse, die in Abbildung 139 gezeigt ist.

Korrelation von elektrischen und optischen Größen (vgl. Abschnitt 5.5)

Der Korrelationskoeffizient für die im Abschnitt 6.4 beschriebenen Messungen von Fehlstellen im Bereich der Endverschlussmodelle ergaben für die Korrelation von scheinbarer Ladung und optischer Intensität und der Impulsraten einen großen linearen Zusammenhang ($|r| \geq 0,8$; Tabelle 18). Das Einbringen einer Spitze in Luft in den Messkreis, deren Auswirkungen nur durch den elektrischen Messkanal detektiert wurde, ergab erwartungsgemäß keinen linearen Zusammenhang bei der Impulsrate, da sich die Impulsrate im optischen Messkanal nicht erhöht.

Tabelle 18: Korrelationskoeffizienten $|r|$ für Modelle von Aufschiebeendverschlüssen mit unterschiedlichen halbleitenden Fehlstellen

Prüfkörperbezeichnung	Korrelationskoeffizient $ r $ scheinbare Ladung – optische Intensität	Korrelationskoeffizient $ r $ Impulsrate
fluoreszierender Lichtwellenleiter aufgewickelt		
direkt über der Fehlerstelle	0,96	0,93
3 cm neben der Fehlerstelle	0,99	0,94
spiralförmige Wicklung über der Fehlerstelle	0,99	0,95
fluoreszierender Lichtwellenleiter eingegossenen		
halbleitende Spitze	0,99	0,84
halbleitende Spitze mit zusätzlicher Spitze in Luft	1,00	0,29

7.7 NARDiagramm

Ähnlich den bei einer elektrischen Teilentladungsmessung verwendeten und sich in der Praxis bewährten Verfahren zur Klärung von Teilentladungsursachen aus meist unterschiedlichen TE-Quellen (3PARD und 3PTRD [104]) ist es notwendig, die zeitsynchron

ermittelten Ergebnisse der elektrischen und optischen TE-Erfassung auf ähnliche Ausagemöglichkeiten zu untersuchen. Gewählt wurde dafür ein normiertes Amplituden-Verhältnis-Diagramm (NARDiagramm). Durch die nicht durchführbare Kalibrierung des optischen Messkanals können in einer Auswertung nicht die Absolutwerte der Impulspaare aus scheinbarer Ladung und optischer Intensität miteinander verglichen werden. Stattdessen werden für die Darstellung die Maximalwerte des optischen und des elektrischen Ladungsvektors bestimmt und als Bezugsgröße verwendet. Alle weiteren scheinbaren Ladungen und optischen Intensitäten werden auf diesen Maximalwert normiert, so dass für ein Impulspaar nur noch Werte zwischen 0 und 1 auftreten. Auf der Abszisse werden die Werte des elektrischen Zweiges und auf der Ordinate die entsprechenden Werte des optischen Zweiges abgetragen (Abbildung 152). Treten bei detektierten Teilentladungen hauptsächlich geringe optische Intensitäten auf, werden diese in der Umgebung der Abszisse abgebildet.

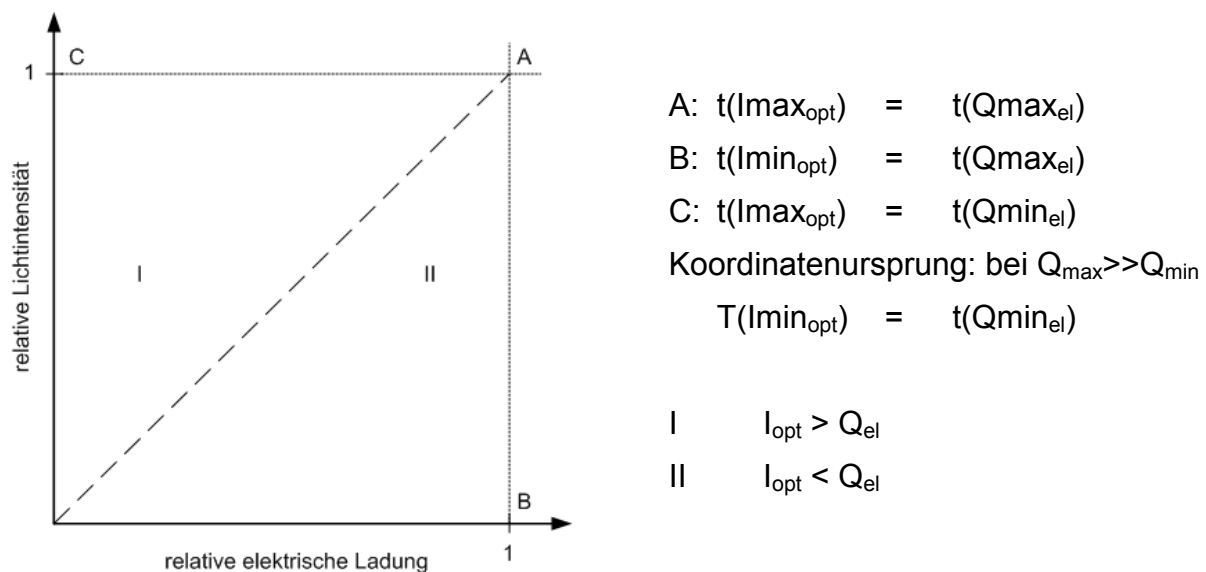


Abbildung 152 Schematische Darstellung des normierten Amplituden-Verhältnis-Diagramms (NARD)

- A: der dargestellte Impuls hat seinen Maximalwert im optischen und elektrischen Zweig zum gleichen Zeitpunkt
- B: der dargestellte Impuls hat seinen Maximalwert im elektrischen Zweig zu einem Zeitpunkt, an dem kein optisches Signal entsteht
- C: der dargestellte Impuls hat seinen Maximalwert im optischen Zweig zu einem Zeitpunkt, an dem kein elektrisches Signal entsteht

Für die im Abschnitt 6.4 beschriebene Anwendung der FOF-Optik am Modell eines Aufschiebeendverschluss sind in den Abbildungen 153 und 154 die entsprechenden NARDiagramme dargestellt. Die verwendete halbleitende Fehlstelle auf Hochspannungspotential ist gleich, die Höhe der Wechsellspannung vergleichbar. Der als Messaufnehmer verwendete fluoreszierende Lichtwellenleiter wurde unterschiedlich zur Messstelle positioniert. Die bei einer direkten Positionierung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters über der Fehlstelle erfassten relativ hohen Entladungen im elektrischen und optischen Messkanal bewirken eine aufgefächerte Punktwolke unterhalb der Diagonale (Abbildung 153). Die Positionierung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters 3 cm neben der Fehlstelle bzw. in spiralförmiger Wicklung mit der Fehlstelle an einem Ende des Messaufnehmers (siehe Abbildung 133) ergaben durch die geringere optische Intensität Punktwolken im Bereich des Koordinatenursprungs bzw. im Bereich II des Diagramms. Dass die Punktwolken in Abbildung 154 (rechts) nicht im Koordinatenursprung beginnen, liegt an der zu geringen Differenz der maximalen und minimalen

Signalstärke. Der Koordinatenursprung ist bei einem auf diese Weise normierten Diagramm nur erreichbar, wenn die maximale Signalhöhe um mehrere Zehnerpotenzen über dem minimalen Signal liegt. Je geringer die Signalstärke ist, desto weiter entfernt beginnt die Punktwolke vom Koordinatenursprung.

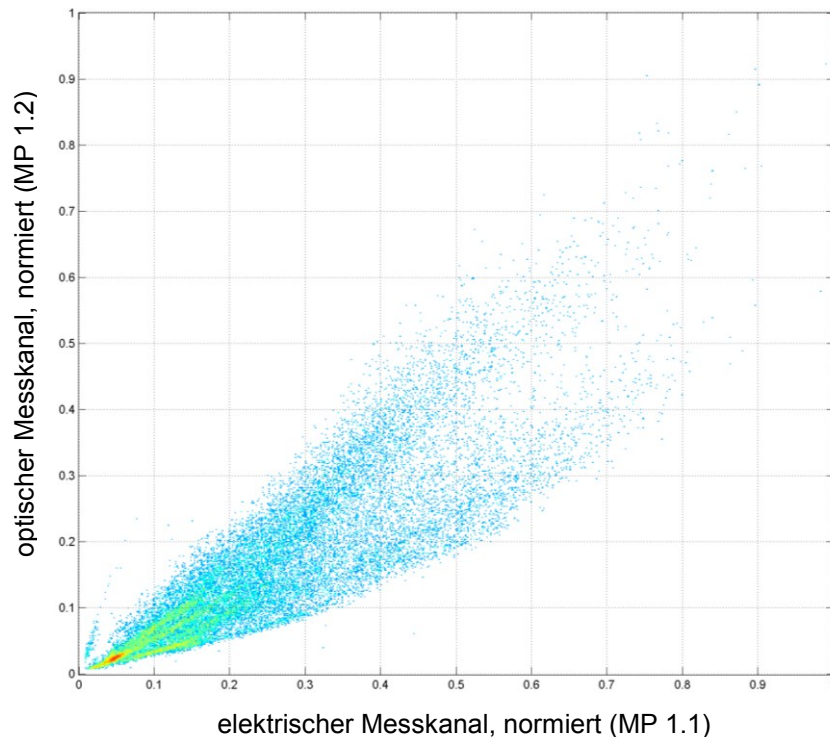


Abbildung 153: NARDiagramm einer Fehlstelle in der Grenzfläche eines Aufschiebeendverschlussmodells (PRPD Diagramme in Abbildung 132); fluoreszierender Lichtwellenleiter direkt über der Fehlstelle; Spannung: 14,6kV

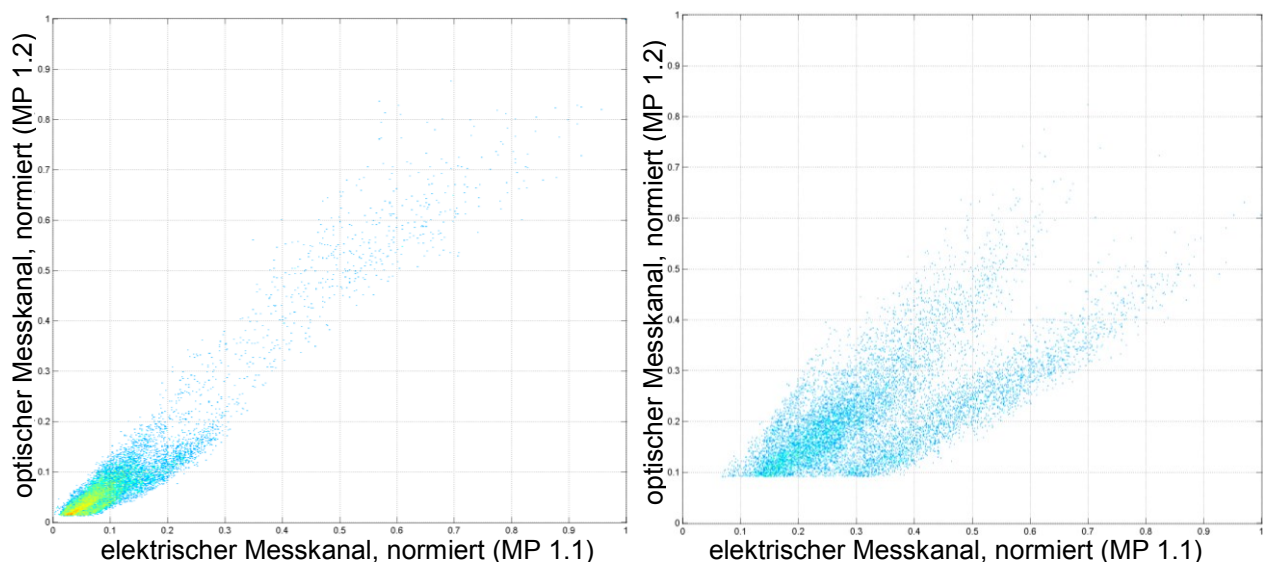


Abbildung 154: korrespondierende NARDiagramm einer Fehlstelle in der Grenzfläche eines Aufschiebeendverschlussmodells mit fluoreszierendem Lichtwellenleiter
links: 3 cm neben der Fehlstelle (PRPD Diagramme in Abbildung 134);
rechts: in spiralförmiger Wicklung angeordnet (PRPD Diagramme in Abbildung 135);

In der Abbildung 155 ist ein weiteres NARDiagramme als Beispiel dargestellt. In einer praxisnahen Anordnung mit einem im Endverschluss eingegossenen fluoreszierenden Lichtwellenleiter erhält man eine Punktwolke, die der Diagonale des Diagramms folgt.

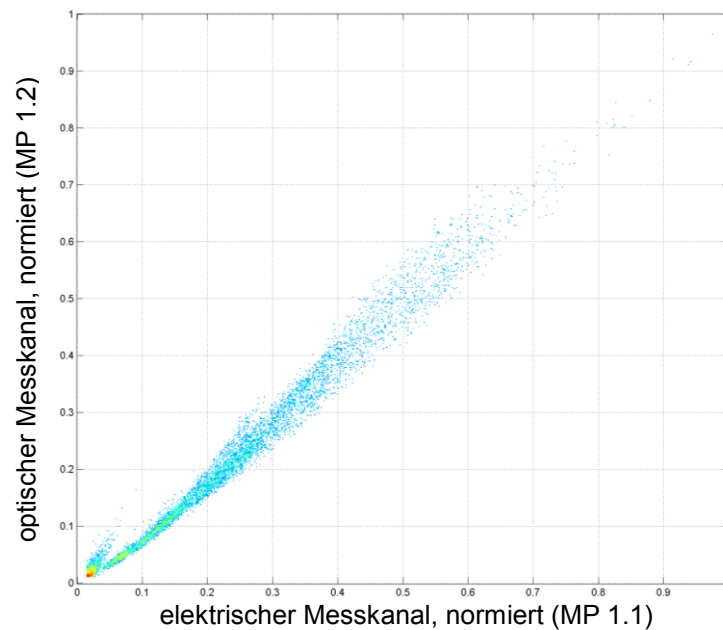


Abbildung 155: Beispiel für ein NARDiagramm eines Aufschiebeendverschluss mit eingegossenem fluoreszierenden Lichtwellenleiter (PRPD-Diagramm Abbildung 137)

8 Zusammenfassung

Gegenstand der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen war die optische Erfassung innerer Teilentladungen in festen Isolierstoffen. Dies schloss die zur elektrischen Teilentladungsmessung analoge Ergebnisdarstellung und -bewertung mit ein. Die Untersuchungen wurden an Modellen von in HS-Kabelgarnituren enthaltenen Feldsteuerteilen mit Wechselspannungsbeanspruchung bei Raumtemperatur durchgeführt. Ergebnisse derartiger Untersuchungen wurden bisher nicht veröffentlicht. Die Modelle bestanden aus transparenten Silikonelastomeren und enthielten praxisnahe Nachbildungen kritischer Fehlstellen zum Teil in Kombination mit VPE↔Silikon-Grenzflächen.

Infolge der elektrischen Spannungsbeanspruchung und insbesondere durch Fehlstellen bedingt treten hohe örtliche Feldstärken im Isoliervolumen auf und führen durch elektronische Ladungsprozesse zu kritischen Beanspruchungen. Diese beginnen mit der Zerstörung von Molekülketten und führen zur Bildung von Teilentladungskanälen (Trees), die beim Fortbestehen der Beanspruchung zur Erdelektrode vorwachsen und den Durchschlag einleiten können.

8.1 Gestaltung und Eigenschaften der optischen Messanordnungen

Als messtechnische Basis wurde das in der Praxis eingeführte digitale Mehrstellen-TE-Messsystem MPD 540/600 verwendet, dass um die optischen Messanordnungen als eigenständige Messkanäle erweitert wurde. Eine Voraussetzung für die Gestaltung dieser Messanordnungen war die Kenntnis von Wellenlängenspektren innerer Teilentladungen in transparenten Silikonmaterialien. Die Bestimmung erfolgte unter Verwendung spezieller Prüfkörper aus ausgewählten transparenten Silikonelastomeren, einer kommerziell verfügbaren Linsenanordnung mit angespleißtem Glaslichtwellenleiter und eines Spektrometers.

Es ergab sich ein relativ breiter Emissionsbereich von ca. 400 nm bis 800 nm mit einer prägnanten Bande bei 656 nm. Der Einbruch bei ca. 370 nm ist im Wesentlichen durch die Messtechnik begründet. Eine Abhängigkeit der Spektren vom Typ des Silikonmaterials wurde nicht festgestellt.

Ebenfalls für die Gestaltung der optischen Kanäle erforderlich waren die Transmissions-eigenschaften der Silikonmaterialien, insbesondere in Wellenlängenbereichen in denen Teilentladungen auftreten. Die Messungen ergaben unabhängig vom Silikonmaterialtyp einen steilen Anstieg des Transmissionsgrades ab 300 nm, der ab ca. 460 nm nahezu konstante Werte von 85 % erreicht. Absorptionsbanden wurden im ermittelten Wellenlängenbereich der Teilentladungen nicht festgestellt.

Die unter Praxisaspekten vorteilhafteste Lösung für einen Messaufnehmer sind fluoreszierende Lichtwellenleiter. Diese faseroptischen, aus Kunststoff bestehenden Bauelemente ermöglichen eine richtungsunabhängige Signaleinkopplung über ihre Oberfläche, eine fehlerstellennahe Anbringung auch in elektrischen Feldern und besitzen eine für die Praxis notwendige einfache Handhabbarkeit. Kommerziell verfügbare Typen verfügen über keine ausreichenden Eigenschaften für einen praktischen Einsatz, da sie keine ausreichende Temperaturbeanspruchung und Dehnbarkeit aufweisen und nicht grenzflächenfrei in Silikonelastomere eingebettet werden können.

Für die Untersuchungen wurde der Lichtwellenleiter Typ L ausgewählt dessen Absorptionswellenlängen im Bereich der Teilentladungen von 400 nm bis 475 nm und 540 nm bis 600 nm liegen und einen Emissionsbereich von 635 nm bis 705 nm aufweist. Die

gemessene wellenlängenabhängige Dämpfung betrug ca. 6 dB/m bei einer Wellenlänge von 560 nm. Daher wurde für den Transport der optischen Signale zum optisch-elektrischen Wandler der Kunststofflichtwellenleiter OKE 1000 mit einer wellenlängenabhängigen Dämpfung $<0,5$ dB/m für Wellenlängen unter 700 nm verwendet. Der Emissionswellenlängenbereich um 700 nm des Lichtwellenleiter Typ L ermöglichte den Einsatz von Dioden auf Siliziumbasis in der Eingangsstufe des Empfängers. Für die Wandlung der intensitätsabhängigen optischen Signale in proportionale elektrische Signale wurde der Wandler-Prototyp APD 500 eingesetzt. Die von der Erfassungseinheit des TE-Messsystem übermittelten elektrischen Signale werden von der Software als Ladungsimpulse interpretiert und analog zu den elektrisch gemessenen Teilentladungsimpulsen verarbeitet und angezeigt. Sehr kurze Signalverarbeitungszeiten im ns-Bereich ermöglichen eine zeitsynchrone Erfassung und Verarbeitung der Entladungssignale durch die elektrischen und optischen Kanäle. Dies war für die Charakterisierung der optischen Kanäle sowie die Interpretation der Ergebnisse von wesentlicher Bedeutung. Diese optische Messanordnung wurde in der Arbeit als FOF-Optik bezeichnet.

Ergänzend dazu wurde insbesondere für vergleichende Messungen ein zweiter Messaufnehmer eingesetzt. Dieser bestand aus einer Linsenanordnung mit angespleißtem Kunststofflichtwellenleiter OKE 1000 für den optischen Signaltransport. Damit war eine breitbandige Signalerfassung im Wellenlängenbereich von 350 nm bis 2000 nm möglich. In Verbindung mit dem optisch-elektrischen Wandler APD 500 wurde diese Messanordnung als Kollimator-Optik bezeichnet.

Da die optischen Kanäle in Bezug auf die scheinbare Ladung nicht kalibrierbar waren, wurden die angezeigten Werte als optisches Ladungsäquivalent betrachtet und in arbitrary units (a.u.) angegeben.

In den für die experimentellen Untersuchungen verwendeten elektromagnetisch geschirmten und abdunkelbaren Prüffeldern wurde mit dem elektrischen Messkanal (Signalauskopplung über AKV) ein Grundstörpegel im Bereich von 300 fC bis 1 pC nachgewiesen. Die angezeigten optischen Intensitäten (optischer Grundstörpegel) des Messkanals mit Kollimator-Optik betrugen 2,0 a.u. bis 2,4 a.u. und des Messkanals mit FOF-Optik 2,3 a.u. bis 2,9 a.u.. Der optische Messkanal mit fluoreszierenden Lichtwellenleitern (FOF-Optik) ermöglichte damit eine Entladungserfassung mit einer für Vor-Ort-Prüfungen geeigneten Ansprechschwelle, obwohl der optisch-elektrische Wandler noch nicht optimal angepasst war. Die optische Erfassung von inneren Teilentladungen aus Isolieranordnungen aus transparenten/transluzenten Silikonelastomeren mittels fluoreszierender Lichtwellenleiter einschließlich optisch-elektrischer Signalwandlung wird für eine Anwendung in Hochspannungskabelgarnituren als sehr aussichtsreich angesehen [90].

8.2 Vergleichende optisch und elektrische Erfassung des Einsetzens von inneren Teilentladungen (Kanaleinsatz)

Die Untersuchungen zum Kanaleinsatz erfolgten an unterschiedlich gestalteten Prüfkörpern mit stufenförmiger Spannungssteigerung. Als optische Messanordnungen wurden die FOF-Optik und die Kollimator-Optik verwendet. Die Positionierung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters auf der Mantelfläche des Prüfkörpers wurde in Voruntersuchungen ermittelt, die Linsenanordnung auf die vertikale Ebene durch die Spitze der Hochspannungselektrode fokussiert. Neben dem elektrischen Messkanal in der Schaltung mit Impulsauskopplung über Ankoppelvierpol (AKV) wurde auch ein Messkanal mit induktiver Auskopplung auf Erdpotential eingesetzt.

Die für praktische Anwendungen vorteilhafte FOF-Optik registrierte:

- bei Prüfkörpern mit Nadelspitzenradien im Bereich um 1 μm und nach unterschiedlichen Vorbehandlungen (Prüfkörper unter Laborbedingungen gelagert, evakuierte Prüfkörper) im Vergleich zum elektrischen Messkanal (AKV) den TE-Einsatz erst bei einer um ca. 2 kV höheren Spannung. Die erzeugten optischen Intensitäten waren beim gemessenen Einsatz durch den elektrischen Messkanal für den optischen Nachweis zu intensitätsschwach;
- bei Prüfkörpern mit Nadelspitzenradien im Bereich um 2,5 μm sowie um 5 μm unabhängig von der Prüfkörpervorbehandlung den TE-Einsatz jeweils bei gleichen Spannungswerten wie der elektrische Messkanal;
- bei Prüfkörpern mit Streifenelektrode und Silikon $\leftrightarrow$ VPE Grenzfläche unabhängig von der Vorbehandlung (Metallisierung des Spitzenbereiches der Streifenelektrode, VPE-Mantelfläche gefettet und nicht gefettet) den TE-Einsatz bei gleichen Spannungswerten wie der elektrische Messkanal. Die Abdeckung eines großen Teils der Oberfläche des fluoreszierenden Lichtwellenleiters durch den optisch dichten VPE-Kern hatte keine messbaren Auswirkungen.

Wurde im optischen Messkanal die Kollimator-Optik eingesetzt, ermittelten der optische und elektrische Messkanal unabhängig von der Gestaltung und Vorbehandlung der Prüfkörper den TE-Einsatz stets bei gleichen Spannungswerten.

Die Teilentladungsaussetzspannungen wurden von den unterschiedlichen Kanälen bei vergleichbaren Spannungswerten festgestellt. Vereinzelt waren die vom optischen Messkanal ermittelten Werte geringfügig größer.

Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse zum Kanaleinsatz in Prüfkörpern ohne makroskopische Grenzflächen (nadel- und streifenförmige Elektroden auf Hochspannungspotential) waren:

- Die TE-Einsetzfeldstärke im Silikonmaterial sank mit steigenden Nadelspitzenradien, insbesondere für Radien bis 2,5 μm . Diese auch in anderen polymeren Werkstoffen beobachtete Tendenz ist unter anderem eine Konsequenz der mit der Durchmesservergrößerung verbundenen Erweiterung des hochbeanspruchten Volumens vor der Nadelspitze und damit für das Vorhandensein durchschlagwirksamer Fehlstellen (statistisches Vergrößerungsgesetz).
- Ein Einfluss des Materials der Hochspannungselektrode (leitend eingestelltes Silikonmaterial ohne und mit metallisiertem Spitzenbereich) auf den Kanaleinsatz war nicht nachweisbar (ermittelt an streifenförmigen Hochspannungselektroden mit angeschnittener 30°-Spitze). Deutlich unterschiedlich war aber das vom Spitzenbereich ausgehende Treewachstum bei konstanter Spannungsbeanspruchung.
- Eine Evakuierung des Silikonmaterials führte zu einer signifikanten Erhöhung der TE-Einsatzspannung, wobei der Einfluss der Spitzenradien offensichtlich überdeckt wurde.
- Wurden die evakuierten Prüfkörper zeitlich ausreichend in Stickstoffatmosphäre gelagert, so waren die TE-Einsatzspannungen mit denen vor der Evakuierung vergleichbar.

Bei Prüfkörpern mit VPE $\leftrightarrow$ Silikon Grenzfläche und nadelförmiger Spitzenelektrode im Grenzflächenbereich war der Teilentladungseinsatz stark von der Vorbehandlung der VPE-Grenzfläche abhängig. Die Verwendung eines hochviskosen Gleitmittels (Auftragen von Silikonpaste auf die VPE-Mantelfläche) führte zu einer signifikant höheren TE-Einsatzspannung. Diese Gleitmittel können verbleibende Hohlräume im Grenzflächenbereich ausfüllen und damit die Energieakkumulation der statistisch auftretenden Elektronen im elektrischen Feld behindern.

8.3 Vergleichende optisch und elektrische Erfassung des Treewachstums (Kanalaufbau) und Ermittlung von Wachstumsgeschwindigkeiten

Die Untersuchungen zum Kanalaufbau an unterschiedlich gestalteten Prüfkörpern erfolgten bei kontanter Spannungsbeanspruchung mit empirisch festgelegter Spannungshöhe. Für die Ermittlung der Wachstumsgeschwindigkeit der sich ausbildenden Treestrukturen aus Folgen von Einzelbildern wurde ergänzend eine CCD Kamera eingesetzt und mit dem TE-Messsystem synchronisiert.

Die wesentlichen Ergebnisse waren:

- Unabhängig von der Prüfkörpergestaltung (Fehlstellenart) und z. T. unabhängig von der Prüfkörpervorbehandlung zeigten die bei konstanter Spannungsbeanspruchung aufgezeichneten PRPD-Diagramme der optischen Kanäle und des elektrischen Messkanals eine Korrelation der Muster.
- In Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer bis zu maximal 300 min wurden keine Musterveränderungen festgestellt.
- Bei vorher evakuierten Prüfkörpern sind die Unterschiede in den vom elektrischen und optischen Messkanal aufgezeichneten PRPD Diagrammen durch das erforderliche Graufilter im Messkanal mit Kollimator-Optik beeinflusst. Erkennbar sind höhere Entladungsintensitäten in der positiven Halbwelle.

Die Abhängigkeiten von scheinbarer Ladung und optischer Intensität von der Beanspruchungsdauer ergaben:

- bei Prüfkörpern ohne Vorbehandlung einen Anstieg mit der Beanspruchungsdauer. Ein Zusammenhang zwischen elektrisch und optisch ermittelten Ergebnissen ist erkennbar und wurde z. T. durch die Korrelationsanalyse bestätigt. Diese Ergebnisse wurden durch den Einsatz von Graufiltern im optischen Messkanal signifikant beeinflusst.
- bei evakuierten Prüfkörpern eine ebenfalls ansteigende Tendenz mit der Beanspruchungsdauer, die durch Einsatz von Graufiltern schwieriger nachweisbar war.

Die zugehörigen Impulsraten sanken mit steigender Beanspruchungsdauer zunächst ab und blieben dann konstant. Eine Korrelation war wegen der sehr niedrigen gemessenen Werte im optischen Messkanal nur zum Teil nachweisbar.

Die Impulsrate steigt offensichtlich nicht mit der sich ausweitenden Treestruktur. Die Entladungen bilden sich in den unterschiedlichen Kanälen unabhängig voneinander aus und ihre Anzahl pro Halbwelle ist begrenzt.

Das Verhalten von scheinbarer Ladung und optischer Intensität von Prüfkörpern mit streifenförmigen Elektroden und Prüfkörpern mit VPE-Silikon-Grenzfläche ist ähnlich den oben genannten Prüfkörpern.

Unter den genannten Bedingungen bildeten sich zweigförmige Strukturen aus. Buschförmige Trees wurden nicht festgestellt. Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit Angaben von anderen Autoren zu Treestrukturen in Silikonelastomeren. Das Wachstum deutete auf Treestrukturen mit nichtleitenden Wänden hin.

Die Treestrukturen bei Verwendung nadelförmiger Hochspannungselektroden zeigten eine Struktur mit fadenförmigen Seitenkanälen. In Prüfkörpern mit streifenförmigen Elektroden ohne und mit metallisiertem Spitzenbereich waren die Strukturen durch wenige Haupt- und Seitenkanäle mit relativ großen Kanalabmessungen charakterisiert.

In Prüfkörpern mit VPE↔Silikon Grenzfläche wurden die sich ausgebildeten Strukturen durch die Vorbehandlung der VPE-Mantelfläche beeinflusst. Nur bei vorbehandelter VPE-Mantelfläche war eine für die Kanalausbildung notwendige Beanspruchungsdauer erreichbar. In einem Teil dieser Treestrukturen war die Ausbildung mit sich zur Gegenelektrode ausbreitenden Hauptkanälen analog zu den vorgenannten Ergebnissen. In einem weiteren Teil fehlte diese Kanalausbildung. Es entwickelten sich Kanäle mit wechselnden Entladungen in Umfangsrichtung (max. Beanspruchungsdauer 300 min).

In evakuierten Prüfkörpern mit nadelförmigen Hochspannungselektroden waren die Strukturen durch wenige Hauptkanäle unterschiedlicher Länge mit einer Vielzahl sehr feiner, kurzer nadelförmiger Seitenkanäle hoher Dichte gekennzeichnet.

Das Wachstumsverhalten der Treestrukturen war unterschiedlich, ein direkter Zusammenhang zwischen Treestruktur und Wachstumsgeschwindigkeit somit nicht ableitbar. Bei sich ausbildenden Strukturen mit Hauptkanälen in Richtung Erdelektrode setzte nach Beanspruchungsbeginn ein starkes Wachstum ein, das sich mit der Dauer der Beanspruchung kontinuierlich aber vermindert fortsetzte und sich unter Umständen unmittelbar vor dem Durchschlag wieder beschleunigte.

In Prüfkörpern mit streifenförmigen Elektroden war die Wachstumsgeschwindigkeit von der Vorbehandlung des Spitzenbereiches der Elektroden abhängig. Im Vergleich zu Elektroden mit nicht vorbehandeltem Spitzenbereich (DFL-Prüfkörper) ergaben sich signifikant höhere Wachstumsgeschwindigkeiten bei metallisiertem Spitzenbereich (HYB-Prüfkörper). In diesem Fall stiegen die scheinbaren Ladungen sehr stark an.

Das Wachstumsverhalten der Treestrukturen im Bereich der VPE↔Silikon Grenzfläche wurde von der Ausbildung der Kanäle bestimmt, die sich in Richtung Gegenelektrode entwickelten. Wurden derartige Kanäle ausgebildet, ergab sich ein Wachstum ähnlich dem zweigförmiger Strukturen in Prüfkörpern ohne makroskopische Grenzflächen. Wurden keine derartigen Kanäle ausgebildet, stagnierte das Wachstum innerhalb der gemessenen Beanspruchungsdauer von max. 300 min.

8.4 Signalerfassung an Modellen eines 20 kV-Aufschiebeendverschlusses

Die Erprobung der aus Anwendersicht als Messanordnung vorteilhafte FOF-Optik wurde ergänzend an einem 20 kV-Kabelaufbau durchgeführt. Dazu wurden unterschiedliche praxisnahe Fehlstellen in die Kabelisolierung unterhalb eines transparenten Modellendverschlusses eingebracht und die Entladungserfassung untersucht. Die Messungen erfolgten unter Feldbedingungen in einem elektromagnetisch nicht abgeschirmten Prüffeld.

Die zusammengefassten Ergebnisse zur synchronen optischen und elektrischen Erfassung der von eingebrachten Fehlstellen im Endverschlussbereich ausgehenden Signale bei konstanter Spannungsbeanspruchung bestätigen die an Prüfkörpern ermittelten Ergebnisse:

- Der optische (FOF-Optik) und elektrische Messkanal detektierten den TE-Einsatz bei annähernd gleichen Spannungswerten.
- Die vom optischen und elektrischen Messkanal angezeigten PRPD-Diagramme sind insbesondere bei höheren Spannungswerten vergleichbar.
- Es ergibt sich eine erkennbare Abhängigkeit der Detektionsempfindlichkeit des optischen Messkanals von der Entfernung des fluoreszierenden Lichtwellenleiters zur Fehlstelle.

- Wurden zusätzliche Entladungen außerhalb des optischen Erfassungsbereiches auf HS-Potential des Kabelleiters erzeugt, so wurden diese erwartungsgemäß nur vom elektrischen Messkanal festgestellt.

9 Ausblick

Der weitere Ausbau der Elektroenergieversorgung auf Basis alternativer Energiequellen erfordert für den Elektroenergietransport zunehmend Kunststoffkabelanlagen, die gegenüber den derzeit eingesetzten Wechsellspannungskabel die Anwendung von Gleichspannung, eine Verlegung im küstennahen Seebereich und Streckenlängen von 100 km und mehr ermöglichen. Um die Versorgungszuverlässigkeit zu garantieren, ist eine permanente Überwachung des Betriebszustandes dieser Anlagen notwendig. In Einzelfällen werden in Monitoringsystemen bereits Parameter wie Teilentladungen, Temperaturverteilungen und Drücke in ölgefüllten Garnituren erfasst. Für eine dauerhafte Überwachung werden technische Lösungen für eine orts aufgelöste Erfassung weiterer Anlagenparameter wie Gleichspannungs-Teilentladungen, Feuchtigkeit, Wassereintrich und akustische Ereignisse benötigt. Für ein derartiges Monitoringsystem wären Lösungen unter Verwendung der Fasersensorik vorteilhaft. Diese können gegebenenfalls in ein umfassendes System zur Überwachung weiterer Anlagenteile wie Schaltanlagen, Transformatoren und Gleichrichterstationen eingebunden werden. Die Detektion innerer Teilentladungen in Kabelgarnituren durch Messanordnungen auf Basis fasersensorischer Lösungen würde diese Konzeption wirkungsvoll unterstützen. Sie bietet auch wesentliche Vorteile gegenüber der elektrischen Messtechnik, wie Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen und den Einbau in kritischen Bereichen der Übertragungsstrecke.

Die in der vorliegenden Arbeit erreichten Ergebnisse bestätigen die prinzipielle Realisierbarkeit faseroptischer Messanordnungen zur Teilentladungserfassung in HS-Kabelgarnituren. Für deren effektiven praktischen Einsatz sind aber ergänzende Aufgabenstellungen zu bearbeiten und erfolgreich zu lösen.

Für die Herstellung von Feldsteuerteilen werden zunehmend transluzente Silikonelastomere eingesetzt, die eine optische Entladungsdetektion ermöglichen. Vorteilhafter wäre der Einsatz transparenter Materialtypen mit Transmissionsgraden $\geq 85\%$ (geringe optische Dämpfung). Transparente Silikonelastomere, die diese Anforderungen im Wesentlichen erfüllen, werden kommerziell angeboten, z. B. Elastosil LR 7600. Die mechanischen, dielektrischen und hochspannungstechnischen Materialeigenschaften sind bis auf die Shore-A Härte mit den Eigenschaften der in Feldsteuerteilen eingesetzten Silikone vergleichbar. LR 7600 hat eine Shore-A Härte von 50, während für den Einsatz in Feldsteuerteilen Werte um 35 gefordert werden.

Eine möglichst fehlstellennahe Positionierung der fluoreszierenden Lichtwellenleiter bedingt das Einbetten innerhalb der Feldsteuerelemente, zum Teil in Bereichen mit hoher Feldstärke. Das erfordert Lichtwellenleiter, die unter Beibehaltung ihrer Funktionsfähigkeit die damit verbundenen Anforderungen an Dehnbarkeit und Temperaturbeständigkeit erfüllen und grenzflächenfrei während der Herstellung eingebettet werden können. Lichtwellenleiter auf Silikonbasis, die diese Anforderungen erfüllen, sind in einer Patentschrift beschrieben. Ausführungen als fluoreszierende Lichtwellenleiter wurden bisher nicht ermittelt.

Die in bestimmten Garnituren wie Schaltanlagenendverschlüssen und Muffen nur mögliche Positionierung der fluoreszierenden Lichtwellenleiter an optisch zugängigen Bereichen auf Erdpotential (Bereiche ohne Feldbegrenzungsschicht) bedingt gegebenenfalls ergänzende Untersuchungen zur optischen Signalführungen. Vorteilhaft wären Lösungen, die eine verlustarme Weiterleitung der optischen Signale innerhalb des Feldsteuerteils zum fluoreszierenden Lichtwellenleiter durch Totalreflexion gewährleisten. Dazu ist der Einsatz von Silikonen mit unterschiedlichen Brechungsindizes erforderlich.

Eine Reduzierung der Ansprechschwelle optischer Messanordnungen ist sowohl durch eine bessere Anpassung der Emissionsspektren der fluoreszierenden Lichtwellenleiter an die spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode im optisch-elektrischen Wandler als auch durch eine Erhöhung der Verstärkung der Eingangsstufe des Wandlers erreichbar. Letzteres kann durch eine schaltungstechnische Ausführung der Eingangsstufe des Wandlers analog zu der in einem Einzelphotonenzähler realisiert werden.

Für einen Einsatz in Hochspannungsgarnituren sehr wesentlich sind ebenfalls Untersuchungen zur Auswirkung der in Garnituren enthaltenen Isolieröle auf die Funktionsfähigkeit fluoreszierender Lichtwellenleiter, sofern ein Kontakt nicht ausgeschlossen werden kann. Weiterhin muss das Langzeitverhalten optischer Messanordnungen unter Bedingungen, die in den Prüfstandards angegeben sind, untersucht werden.

Eine Korrelation von elektrisch und optisch erfassten Ladungsamplituden in einem NARDiagramm ist unter Umständen für eine Analyse von Teilentladungen verschiedenen Ursprungs ähnlich 3PARD verwendbar und sollte hinsichtlich der damit verbundenen Möglichkeiten für die Praxis weiter untersucht werden. Mittels Clusterbildung können auch hier durch Rücktransformationen Fehler voneinander separiert und wieder in ein PARD Diagramm überführt werden, welches nur eine Fehlerart enthält. Die bisherigen dargestellten Ergebnisse sind für eine Aussage nicht ausreichend und müssen zur Einschätzung der Möglichkeiten und Aussagefähigkeit einer solchen Analyse ergänzt werden.

10 Abkürzungs- und Formelverzeichnis

10.1 Abkürzungen

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
AKV	Ankoppelvierpol
CDF	Cumulative Distribution Funktion, Summierte Verteilungsfunktion
DFL	Elektrode aus einem leitend eingestellten Silikonmaterial (Deflektormaterial)
EL	Elektrolumineszenz
FOF	fluoreszierender Lichtwellenleiter
HS	Hochspannung
HYB	Elektrode mit metallisiertem Spitzenbereich
LSR	liquid silicone rubber; flüssiger Silikonkautschuk
LWL	Lichtwellenleiter
MP 1.x	Bezeichnung für die Messstationen des verwendeten TE-Messsystems
MS	Mittelspannung
PE	Polyethylen
PEN	Polyethylennaphthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
POT	(Peak over Time)-Analyse
PRPD	Phase resolved partial discharge
PSA	Pulse Sequence Analysis
sr	Steradian (Einheit des Raumwinkels)
TE	Teilentladung
VPE	vernetztes Polyethylen
UV	Ultraviolett

10.2 Verwendete Größen

A_{RS}	Richardson-Schottky Faktor, Richardson Konstante (materialabhängig)
a	Abstand Spitze-Plattenelektrode (Erdpotential), Schlagweite
α	optische Dämpfung
β_{PF}	Poole-Frenkel-Konstante
β_{RS}	materialabhängige Konstante nach Richardson-Schottky
c	Lichtgeschwindigkeit
d	Dicke
D	Diffusionskonstante
d_s	Schaftdurchmesser Spitzenelektrode
E	elektrische Feldstärke
$\hat{E}$	Scheitelwert der elektrische Feldstärke
$E(\theta, z)$	Umwandlungswirkungsgrad

e	Elementarladung
ε_0	Permittivität des Vakuums
ε_r	relative Permittivität
F	Summe der Lumineszenz
G	Proportionalitätskonstante
γ	Spitzenwinkel des Kegelstumpfes HS-Elektrode
h	Planck'sches Wirkungsquantum
η	Schwaigerscher Ausnutzungsfaktor
$I(\theta, z)$	Strahlungsleistung der Quelle an der Oberfläche der Faser (Radius R)
j_{FN}	Stromdichte
k	Boltzmann Konstante
κ	intrinsische elektrische Leitfähigkeit, Eigenleitfähigkeit
k_A	Kalibrierfaktor
k	Übertragungsverlust der fluoreszierenden Faser
L	Länge der Faser
λ	Wellenlänge
n	Elektronendichte
q	Ladung
q_E	eingespeiste Ladung
q_m	messbare Ladung
θ, z	Zylinderkoordinaten
r_{Sp}	Spitzenradius
R_z	gemittelte Rautiefe
T	absolute Temperatur
$T(\theta, z)$	Transmissionskoeffizient der Oberfläche
t	Diffusionszeit
U	Spannung
$\hat{U}$	Scheitelwert der Spannung
W	Energie
W_A	Metall-Isolierstoff Austrittsarbeit
W_g	Bandabstand
ΔW	Energieunterschied in verschiedenen Energieniveaus
ΔW_H	energetische Haftstellentiefe
x	Wegstrecke
Z_i	Rautiefe pro Streckenabschnitt

11 Literaturverzeichnis

- [1] Neumann, C., *“Monitoring und Diagnostik als Werkzeug zur wirtschaftlichen Nutzung elektrischer Betriebsmittel Lebensdauerverlängerung, Erhöhung der Leistungsfähigkeit, Betriebssicherheit“*, ETG-Kongress, FT 3 + 4, , Düsseldorf, Paper 4.1, 27. – 28. Oktober 2009.
- [2] Uchida, K.; et.al, *“Study on Detection for the Defects of XLPE Cable Lines”*, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 663-668, 1996.
- [3] Kunze, D., *“Untersuchung von Grenzflächen zwischen Polymerwerkstoffen unter elektrischer Hochfeldbelastung in der Garniturentechnik VPE-isolierter Hochspannungskabel“*, Dissertation, Universität Hannover, 2000.
- [4] IEC 505, *“Richtlinie für die Bewertung und Kennzeichnung von Isoliersystemen elektrischer Betriebsmittel“*, 1953.
- [5] Schmidt, G.; Kranz, H.-G., *“Grundsätzliche Abgrenzung und Wechselwirkungen zwischen Alterungs- und Schädigungsdiagnose polymerisolierter Kabel“*, ETG-Fachbericht 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, S. 203-208, März 2004.
- [6] Küchler, A., *“Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologie - Anwendungen“*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2005.
- [7] Gockenbach, E., *“Grundlagen für die Diagnostik in Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“*, ETG-Fachbericht 97: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Köln, S. 11-19, März 2004.
- [8] Gockenbach, E., *“Spannungsformen bei HGÜ-Systemen – statistische und dynamische Beanspruchungen; Voltage shapes in HVDC-Systems – static and dynamic Loads“*, ETG-Fachtagung: Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung, S. 19-24, Köln, 2010.
- [9] Beyer, M, Boeck, W., Möller, K., Zaengl, W., *“Hochspannungstechnik - Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung“*, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1986.
- [10] IEC 60270, *“High voltage test techniques – Partial discharge measurements”*, 3rd Edition, December 2000.
- [11] Weißenberg, W.G.; Müller, H.; Vogelsang, R., *“Anforderungen an Silikonelastomere für HS-Kabel-Garnituren“*, Brugg Cables, Schweiz; 2009.

- [12] Weißenberg, W.G., Kuschel, M., *“Test Methods for SIR Accessories used in High Voltage Cables up to 400 kV”*, Jicable 03, Paper A 5.5, pp 170-175, Versailles 22.-26. June 2003.
- [13] Weißenberg, W.G., et al, *“Langzeiterfahrungen mit Silikonelastomeren in HS Garnituren bis 400 kV”*, RCC-Fachtagung: Werkstoffe für Isolatoren, Überspannungsableiter, Kabelgarnituren, Schaltgeräte in der Hochspannungstechnik, Berlin, 6.-7. April 2006.
- [14] Schmidt, F.; Weißenberg, W., *“Stück- und Inbetriebnahmeprüfungen an Garnituren für VPE-isolierte Hochspannungskabel”*, Elektrizitätswirtschaft 97, H.26, S. 26-29, 1998.
- [15] Ishibashi, A.; et al, *“A Study of Treeing Phenomena in the Development of Insulation for 500 kV XLPE Cables”*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 5 No. 5, pp. 695-706, April 1998.
- [16] Kaumanns, J.; Schröder, G., *“Bedeutung von Grenzflächen beim Design, Entwicklung, Prüfung und Inbetriebnahme von Hochspannungskabelgarnituren”*, ETG Fachtagung: Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau; ETG Fachbericht 99, 8. bis 9. März 2005.
- [17] Plath, R.; et al, *“Inbetriebnahmeprüfungen der 400 kV-Kabelanlage der Bewag Berlin”*, Elektrizitätswirtschaft 98, H.26, S. 30-34, 1999.
- [18] Plath, R., *“System Concept for Partial Discharge Monitoring on HV/EHV Cable Systems”*, International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics, Changwon, Korea, April 2 – 5, 2006.
- [19] IEC 60840, *“Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m=36$ kV) up to 150 kV ($U_m=170$ kV) – test methods and requirements”*, 3rd Edition, April 2004.
- [20] IEC 62067 Ed. 2.0, *“Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m=170$ kV) up to 500 kV ($U_m=550$ kV) – Test methods and requirements”* 11/2011.
- [21] Rethmaier, K.; et al, *“IEC-konforme Bewertung von Teilentladungen im UHF-Bereich durch synchrone Impulserfassung an mehreren TE-Sensoren”*, ETG-Kongress, Düsseldorf, Paper 4.4, FT 3+4, 27.-28.10.2009.
- [22] Schwarz, R., *“Optische Teilentladungsdiagnostik für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik”*, Dissertation, Technische Universität Graz, Juli 2002.

- [23] Schwarz, R., *“Modern Technologies in Optical Partial Discharge Detection”* Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, ETG-Fachbericht 97, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, S. 17-28, 2007.
- [24] Schroth, R., *“Electrical Tests and Measurement in the Life Cycle of Cables and High Voltage Cable Systems”*, Highvolt Kolloquium 07, Paper 3.1, pp. 93-100, 2007.
- [25] Dissado, L.A. and Fothergill, J.C.: *“Electrical Degradation and Breakdown in Polymers”*, Peter Peregrinus Ltd. for the IEE, ISBN 0 86341 196 7, 601pp, 1992.
- [26] Dissado, L.A.; et al, *“Understanding Electrical Tree in Solids: From Experiment to Theory”*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9, No. 4, pp 483-497, 2002.
- [27] Dissado, L.A.; Hill, R.M., *“The statistics of electrical tree inception”*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25 No. 4, pp. 660, 1990.
- [28] Kahle, M., *„Elektrische Isoliertechnik“*, VEB Verlag Technik, Berlin 1988.
- [29] Muhr, M.; et.al., *„Monitoring und Diagnostik in der Hochspannungstechnik“*, E&I Elektrotechnik und Informationstechnik 119, H.5, 158-164, 2002.
- [30] Mosch, W.; u.a., *„Teilentladungserscheinungen vor dem Kanaleinsatz und während des Kanalwachstums in Polymeren“*, Plenarvortrag; 16. Symposium für elektrische Isolierstoffe (EIM-Symposium) Osaka, Japan, 26.09.1983.
- [31] Eberhardt, M; et.al, *„The Significance of Low Frequency Phenomena In The Inception and Development of Treeing”*, Forth Intern. Symp. On High Voltage Engineering, Athens-Greece, 5–9 September, 1983.
- [32] Zieschang, R., *„Zum Kanaleinsatz und Durchschlag in Polyethylen bei Belastung mit Blitzspannung“*, Dissertation, TU Dresden, 1983.
- [33] Pietsch, R., *„Untersuchungen zur Bedeutung der Elektrolumineszenz für die dielektrische Alterung von Polyethylen“*, Dissertation, RWTH Aachen, Mai 1992.
- [34] Neubert, R., *„Raumladungsphänomene und Teilentladungseinsatz in polymeren Isolierstoffen“*, Dissertation, RWTH Aachen, Mai 1993.
- [35] von Olshausen, R., *„Durchschlagprozesse in Hochpolymeren und ihr Zusammenhang mit den Leitungsmechanismen bei hohen Feldstärken“*, Technisch-wissenschaftlicher Bericht, Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen der Universität Hannover, 1979.

- [36] Lutz, B., „*Einflussfaktoren auf die elektrische Feldverteilung in Isoliersystemen mit polymeren Isolierstoffen bei Gleichspannungsbelastung*“, Dissertation, TU München, 2011.
- [37] Ehrenstein, G.W., „*Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung*“, Hanser Fachbuch 1999.
- [38] Bauser, H., „*Ladungsspeicherung in Elektronenhaftstellen in organischen Isolatoren (Polymere und Molekulkristalle)*“, Kunststoffe, Beanspruchungsdauer 62, Heft 3, S. 192-196, 1972.
- [39] Fröhlich, H., „*On the Theory of Dielectric Breakdown in Solids*“, Proceedings of the Royal Society, Vol. A-188; pp. 521-532, 1947.
- [40] Bötger, O., „*Langzeitdurchschlagverhalten von Polyethylen an Kabeln*“, Bull. SEV 64 3, S. 143 - 148, 1973.
- [41] Bamji, S.S.; et al, „*Degradation of Polymeric Insulation due to Photoemission caused by High Electric Fields*“, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 24, No. 1, pp. 91-98, 1989.
- [42] Bamji, S.S.; et al, „*Role of Polymer Interface during Tree Initiation in LDPE*“, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 21, No. 4, pp. 639-644, 1986.
- [43] Bamji, S.S., „*Electroluminescence - A Technique to Detect the Initiation of Degradation in Polymeric Insulation*“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No. 3, pp. 9-14, May/June 1999.
- [44] Bamji, S.S.; et al, „*Threshold Voltage of Luminescence and Electrical Tree Inception in Low-Density Polyethylene*“, J. Appl. Phys. 63, No 12, pp. 5841-5845, 1983.
- [45] Kaufhold, M.; Bamji, S.S. and Bulinski, A.T., „*Electroluminescence in XLPE under Impulse Voltage Stress*“, IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, pp. 846-849, October 20-23, 1996.
- [46] Bamji, S.S.; et al, „*Electroluminescence Technique to Evaluate the Effect of Impulse Tests on High Voltage Cables*“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5 No. 2, pp. 204-210, April 1998.
- [47] Teyssedre, G.; Laurent, C., „*Charge Transport Modeling in Insulating Polymer: From Molecular to Macroscopic Scale*“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12 No. 5, 857-872, October 2005.

- [48] Teyssedre, G.; Tardieu, G.; Mary, D. and Laurent, C., „*AC and DC electroluminescence in insulating polymers and implication for electrical ageing*”, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, pp. 2220–2229, 2001.
- [49] Le Roy, S.; Teyssedre, G. and Laurent, C., „*Charge Transport and Dissipative Processes in Insulating Polymers: Experiments and Model*”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 4, pp. 644-654, August 2005.
- [50] Laurent, C. and Mayoux, C., „*Light detection during the initiation of electrical treeing at room temperature*”, J. Phys. D: Appl. Phys. 14, pp 1903-1910, 1981.
- [51] Laurent, C.; et al, „*Dielectric Breakdown of Polyethylene in Divergent Field: Role of Dissolved Gases and Electroluminescence*”, J. Appl. Phys. 54, No 3, pp. 1532-1539, 1983.
- [52] Shimizu, N.; et al, „*Electroluminescence and degradation in PE caused by electron impact*”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; pp. 361 – 363, 2003.
- [53] Shimizu, N.; Laurent, C., „*Electrical Treeing initiation*”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5 No. 5, pp 651-659, 1998.
- [54] Shimizu, N.; Horii, K., „*The Effect of Absorbed Oxygen on Electrical Treeing in Polymers*”, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 20, No. 3, pp. 561-566, 1985.
- [55] Jonson, J.; et al, „*Electroluminescence from Polyolefin's Subjected to a Homogenous AC Field*”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2, No. 1, pp. 107-113, 1995.
- [56] Champion, J.V.; Dodd, S. J. and Stevens, G. C., „*Quantitative measurement of light emission during the early stages of electrical breakdown in epoxy and unsaturated polyester resins*”, J. Phys. D: Appl. Phys. 26, pp. 819-828, 1993.
- [57] Champion, J.V.; Dodd, S. J. and Stevens, G. C., „*Long-term light emission measurement and imaging during the early stages of electrical breakdown in epoxy resin*”, J. Phys. D: Appl. Phys. 27, pp .604-610, 1994.
- [58] Champion, J.V.; Dodd, S. J., „*Systematic and Reproducible Partial Discharge Pattern during Electrical Tree Growth in an Epoxy Resin*”, J. Phys. D: Appl. Phys. 29, pp. 862-868, 1996.
- [59] Champion, J.V.; Dodd, S. J., „*Simulation of Partial Discharges in Conducting and Non-Conducting Electrical Tree Structures*”, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, pp. 1235-1242, 2001.

- [60] Mohd Ariffin, A.; Lewin, P. L. and Dodd, S.J., "*Comparison of Electroluminescence Phenomena in LDPE, PET and PEN under Application of High Electrical Stress*", 2006 Annual Report Conference Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kansas City, MO, pp. 260-263, 15-18 Oct. 2006.
- [61] Dodd, S. J., "*A deterministic model for the growth of non-conducting electrical tree structures*", J. Phys. D: Appl. Phys. 36, pp. 129-141, 2003.
- [62] Kabir, F.; et al, "*The role of XLPE Type on Electroluminescence and Subjected Electrical Treeing*", Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, pp. 691-694, June 16-19, 1996.
- [63] Mizuno, T.; et al, "*Electroluminescence in Insulating Polymers in AC Electric Fields*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4 No. 4, pp. 433-438, August 1997.
- [64] Pepper, D., "*Grundlagenuntersuchungen zum Teilentladungsverhalten in kunststoffisolierten Mittelspannungskabeln bei Prüfspannungen mit variabler Frequenz und Kurvenform*", Dissertation, TU Berlin 2003.
- [65] Löffelmacher, G., "*Der in Teilentladungskanälen in Polyethylen entstehende Gasdruck und sein Einfluss auf die Kanalentwicklung*", ETZ-A, H. 3, S. 152-154, 1975.
- [66] Hoof, M., "*Impulsfolgen-Analyse: Ein neues Verfahren der Teilentladungsdiagnostik*", Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 1997.
- [67] Hoof, M. und Patsch, R., "*Anwendung von Impuls/Impuls-Korrelationen zur Identifikation von TE-Quellen*", 40. IWK, Ilmenau, Germany, Band 4, , 749-754, 1995.
- [68] Oesterheld, J., "*Dielektrisches Verhalten von Silikonelastomer-Isolierungen bei hohen elektrischen Feldstärken*", Fortschrittsberichte VDI, Reihe 21: Elektrotechnik, Nr. 196, VDI-Verlag, 1996.
- [69] Köhalmy, S; et.al, "*Examination of Tree Formation in Silicone Rubber*", 11th Insucon Conference, Birmingham, pp. 270-272, UK 2009.
- [70] Suwarno, et al, "*Partial Discharge Patterns of Electrical Treeing in Polyethylene*", Proceedings of the 4th Intern. Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, pp.379-382, July 3-8, 1994.

- [71] Suwarno, et al, "*Partial discharges due to electrical treeing in polymers: phase-resolved and time-sequence observation and analysis*", Journal Physics D: Applied Physics 29, pp. 2922-2931, 1996.
- [72] Vogelsang, R., et al, "*Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements*", 15th Intern. Conference on Electrical Machines, ICEM 2002, Brugge- Belgium, August 2002.
- [73] Du, B.X., et al, "*Phenomena and Mechanism of Electrical Tree in Silicone Rubber*", Proc. of the 9th Intern. Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China, July 19 – 23, pp 37-40, 2009.
- [74] Du, B.X.; et al, "*Effect of Temperature on Electrical Tree in Silicone Rubber*", Intern. Conference on Solid Dielectrics, Potsdam Germany, July 4 -9, 2010.
- [75] Datenblätter der Firma Wacker GmbH, "*Datenblätter der Silikonelastomere*"; 2010.
- [76] Datenblätter der Firma Bluestar Silicones France, "*Technical Data Sheet n°SIL 09 031 3*", February 2009.
- [77] Daum, W., Krauser, J., Zamzow, P., Ziemann, O., "*POF-Optische Polymerfasern für die Datenkommunikation*", Berlin, Springer Verlag 2001.
- [78] Katsutoshi, M., "*Electric-Discharge Sensor utilizing Fluorescent Optical Fibre*", Journal of Lightwave Technology, Vol. 7, No. 7, pp 1029 – 1032, 1989.
- [79] Wei Wang; "*Elektrische und optische Messungen von Teilentladungen in festen transparenten Isoliermedien*", Diplomarbeit, TU Berlin, 2008.
- [80] Danikas, M.G., "*On the Breakdown Strength of Silicon Rubber*", IEEE Transact. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 1, No. 2, pp 1196-1200, 1994.
- [81] Shariat, H., "*Untersuchung der Möglichkeiten der optischen Detektion von Teilentladungen in Isoliermaterialien mittels Sensoren auf der Basis von Lichtwellenleitern*", Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Juli 2009.
- [82] Kaminaga, K.; et al, "*Study of deterioration mechanism of XLPE cables*", Jicable 95, Paper A.8.4, Versailles, France 1995.
- [83] Vaughan, A.S.; et al, "*On the Structure and Chemistry of Electrical Trees in Polyethylene*", J. Phys. D: Appl. Phys. 39, 962-978, 2006.

- [84] Hannig, M., „*Separierung von Teilentladungsquellen unter Verwendung multifrequenter elektrischer und optischer Messverfahren*“, Diplomarbeit, TU Berlin 2011.
- [85] Kindersberger, J., „*Silikonelastomere für Kabelgarnituren, Isolatoren und Überspannungsableiter – Profil einer Werkstofffamilie*“, ETG Workshop: Silikonelastomere – Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, ETG-Fachbericht 93, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, S. 7-15, Berlin, 20.03.2003.
- [86] Straßberger, W.; et al, „*Silikonelastomere in der Mittel- und Hochspannungstechnik*“, ETG Fachtagung: Silikonelastomere, ETG-Fachbericht 68, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, S. 7-14, Dresden, 1997.
- [87] Lambrecht, J.; et al, „*Chemische Eigenschaften von Silikonelastomeren*“, ETG Workshop: Silikonelastomere – Werkstoffe für Kabelgarnituren, Isolatoren, Überspannungsableiter, ETG-Fachbericht 93, VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach, S. 17-28, Berlin, 20.03.2003.
- [88] VDE0303 T.21, „*Prüfverfahren zur Bestimmung von festen, isolierenden Werkstoffen*“, Teil1: Prüfungen bei technischen Frequenzen, (IEC 60243-1: 1998, mod. und Corrigendum 1989), Deutsche Fassung HD 559.1 S1, 1991.
- [89] Habel, M.; et al, „*Optical PD Detection in stress cones of HV cable accessories*“, 8th International Conference on Insulated Power Cable, Jicable'11, Versailles-France, Paper B 8.4. , 19-23 June 2011.
- [90] Habel, W.; et al, „*Fiber optical sensors for early damage detection in electrical insulations and mechanical components in high voltage facilities*“, XVII Intern. Symp. On High Voltage Engineering, Hannover, Germany, pp 2070-2075, August 22-26, 2011.
- [91] Behrend, S., et al, „*Synchronous optical and electrical PD measurements*“, XVII Intern. Symp. On High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 1027-1032, August 22-26, 2011.
- [92] Hosier, I.L., et al, „*Electrical Treeing in Silicone Rubber*“, XVII Intern. Symp. On High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 1027-1032, August 22-26, 2011.
- [93] Winter H.-J., et al, „*On the measurement of the Dielectric Strength of Silicone Elastomers*“, UPEC Conference, Cardiff, England, Sep. 2010.
- [94] Forsyth, K.W., „*Optical Partial Discharge Detection*“, IRIS Rotating Machine Technical Conference (IRMC), Dallas, TX, USA, March 10-13, 1998.

- [95] Kamiya, Y., et al, *“Influence of Vacuum Evacuation on Electrical Tree Initiation in Silicone Rubber”*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp 712 ... 715, 2006.
- [96] Noskov, M.D., et al, *“Measurement and simulation of electrical tree growth and partial discharge activity in epoxy resin”*, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, 1389-1398, 2001.
- [97] KK Hamamatsu Photonics, *“SiAPD S2383 Series data sheet”*, 2010.
- [98] OMICRON Energy Solutions GmbH, *„Messsystem für elektrische Teilentladungen (MPD 600)“*, Bedienungsanleitung, 2009.
- [99] Kai, Wu, et al, *“Model for Partial Discharges associated with Treeing breakdown: III PD extinction and regrowth of Tree”*, J. Phys. D: Appl. Phys. 33, pp 1209-1218, 2000.
- [100] Cleff, Th., et al, *“Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse“*, 1. Aufl. Gabler Verlag Wiesbaden 2008.
- [101] Lerch, R., *“Elektrische Messtechnik - Analoge, digitale und computergestützte Verfahren“*, 4. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [102] Kaiser, R.; Gottschalk, G., *„Elementare Tests zur Beurteilung von Messdaten“*, Bibliografisches Institut Mannheim/Wien/Zürich 1971.
- [103] Grund, R., *„Anwendung der UHF TE-Messtechnik an Hochspannungskabelgarnituren“*, Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008.
- [104] Obralic, A., *„Wicklungsdiagnose an rotierenden elektrischen Maschinen mittels digitaler, synchroner Mehrstellen-TE-Analyse“*, Dissertation TU Berlin, 2008.