Einflussfaktoren auf Ladungstransportmechanismen an gleichspannungsbelasteten Isolierstoffgrenzflächen

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Isabella Lucia Nett, M.Sc.
aus Köln

Berichter: Univ.-Prof. Dr. Ir. Willem Leterme
Univ.-Prof. Dr. sc. Myriam Koch

Tag der mündlichen Prüfung: 02. April 2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft der RWTH Aachen. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-ir. Willem Leterme für die Betreuung der Arbeit. Seine Unterstützung, Förderung und wertvollen Ratschläge trugen wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei. Frau Univ.-Prof. Dr. sc. Myriam Koch danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für ihr Interesse an der Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser möchte ich für die vorübergehende Leitung des Lehrstuhls für elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik und für die Übernahme der Promotionsbetreuung während dieser Zeit danken.

Ich danke meinen ehemaligen IAEW-Kolleginnen und -Kollegen für die wertvollen Diskussionen und Impulse. Insbesondere gilt mein Dank der Forschungsgruppe Isoliersysteme für die gemeinsame Zeit. Weiterhin danke ich allen Studierenden, die im Rahmen von Abschlussarbeiten und Hiwi-Tätigkeiten zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben. Den Mitarbeitern der Werkstätten am Institut danke ich für ihre Unterstützung bei der Konzeptionierung, Errichtung und Inbetriebnahme der Prüfaufbauten, die für diese Arbeit unabdingbar waren.

Ferner möchte ich allen Kabel-Kolleginnen und -Kollegen außerhalb des Instituts danken, die ich insbesondere im Rahmen der gemeinsamen Arbeit für die CIGRE kennenlernen durfte. Meinem neuen Team bei der Tennet TSO GmbH und vor allem meinem Teamleiter Dr. Roland Dongping Zhang danke ich für ihr Vertrauen und für ihr herzliches Willkommen.

Schließlich gilt mein größter Dank meiner Familie für ihre Unterstützung und für ihr Verständnis. Ich danke meinen Eltern für die Ermöglichung meiner Ausbildung und für ihre anhaltende Ermutigung. Meinem Partner Thomas danke ich für seine Geduld, für den fortwährenden Rückhalt und für die Aufmunterung, die mich während der Erstellung dieser Arbeit motiviert und bestärkt hat.

Nürnberg, März 2025
Isabella Nett

Kurzfassung

Die im Rahmen der Energiewende in Deutschland geplanten HGÜ-Kabelprojekte gelten hinsichtlich ihrer Spannungsebene, Nennleistung und Übertragungslänge als die größten weltweit und sind für Betriebsdauern von mindestens 40 Jahren ausgelegt.
Die geringe Betriebserfahrung mit polymerisolierten Gleichspannungskabeln bedingt die wissenschaftliche Untersuchung des Alterungsverhaltens der eingesetzten Isoliersysteme. Insbesondere Wechselwirkungen an makroskopischen Materialgrenzflächen, die bei der Verbindung einzelner Kabellängen in Kabelmuffen und Endverschlüssen unvermeidbar sind, wurden bisher kaum erforscht und müssen experimentell untersucht werden.
Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Untersuchungsmethode basierend auf standardisierten Messverfahren entwickelt, um diese Materialwechselwirkungen zu analysieren. Im Fokus steht dabei die Wahl des Schmierfetts, welches zur Montage der Kabelgarnituren verwendet wird und anschließend an der Materialgrenzfläche verbleibt. Somit findet im Betrieb die Diffusion von Schmierfettbestandteilen in die angrenzende Kabel- und Garniturenisolierung statt, wodurch sich unter anderem die mechanischen und elektrischen Materialeigenschaften der Feststoffe verändern können.
Die Untersuchungsmethode wird anschließend in Versuchsreihen angewendet. Dabei werden unter anderem unterschiedliche Schmierfette untersucht, sodass der Einfluss der Zusammensetzung dieser Schmierfette ermittelt werden kann. Die Ergebnisse werden unter Verwendung etablierter Modelle zur Beschreibung des Ladungstransportverhaltens in Polymeren ausgewertet. Somit können anhand der durchgeführten Messungen der makroskopischen elektrischen Materialeigenschaften Veränderungen in den mikroskopischen Materialeigenschaften abgeleitet werden, welche wesentlich für den Aufbau und Transport von Ladungsträgern an Materialgrenzflächen sind.
Die Methode erweist sich somit als geeignet zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf Ladungstransportmechanismen an gleichspannungsbelasteten Isolierstoffgrenzflächen. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Schmierfetten, die auf die verwendeten Füllstoffe zurückgeführt werden können.

Abstract

The HVDC cable projects planned in the context of the energy transition in Germany are considered to be the largest in the world in terms of their voltage level, nominal power and transmission length and are designed for an operating life of at least 40 years.
The limited operating experience with polymer-insulated HVDC cables at the intended voltage level requires scientific investigation of the ageing behaviour of the insulation systems used. In particular, interactions at macroscopic material interfaces, which are unavoidable when individual cable lengths are joined in cable joints and terminations, have not been studied sufficiently to date and need to be investigated experimentally.
Within this thesis, an experimental test method based on standardised measurement techniques is developed in order to analyse these material interactions. The focus is on the choice of lubricant used to assemble the cable accessories, which will then remain at the material interface. During operation, lubricant components diffuse into the adjacent cable and accessory insulation, which can alter the mechanical and electrical properties of the solids over time.
The test method is then applied in series of experiments. Among other things, different lubricants are examined to determine the influence of the composition of these lubricants. The results are evaluated using established models to describe the charge transport behaviour in polymers. In this way, measurements of the macroscopic electrical material properties can be used to infer changes in the microscopic material properties that are essential for the accumulation and transport of charge carriers at material interfaces.
The method has therefore proved suitable for investigating factors influencing charge transport mechanisms at dc-stressed insulation interfaces. There are clear differences between the investigated lubricants, which can be attributed to the used filling agents.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Einführung in die Thematik 1
1.2 Stand des Wissens 9
1.2.1 Elektrische Feldverteilung und Grenzflächenladung in HGÜ-Kabelsystemen 10
1.2.2 Ladungstransportmodelle 15
1.2.3 Polymere Isoliermaterialien für HGÜ-Kabelsysteme . 18
1.2.4 Wechselwirkungen zwischen Polymeren und Schmierfetten 22
1.2.5 Standardisierung und Empfehlungen für Entwicklungsprüfungen zur Kompatibilität von Isoliermaterialien 24
1.3 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag 27

2 Grundlagen **29**
2.1 Polarisationsmechanismen in Polymeren 29
2.2 Injektion und Transport von Ladungsträgern 32
2.2.1 Ladungstransport bei niedrigen Feldstärken 35
2.2.2 Ladungstransport bei hohen Feldstärken 36
2.3 Oberflächenphysik 42
2.3.1 Kontaktwinkel und Rauheit 42
2.3.2 Kontaktmechanik und Permeation 45

3 Experimentelles Vorgehen **53**
3.1 Anforderungen 53
3.2 Versuchsablauf 54
3.3 Untersuchte Materialien und nicht-elektrische Messungen . 57
3.3.1 Charakterisierung der Prüflingsoberfläche 59
3.4 Künstliche Alterung 63
3.5 Elektrische Messungen 71
3.5.1 Bewertung der Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Streuung 71

3.5.2 Messung der relativen Permittivität 72
3.5.3 Messung des Polarisationsstroms 73
3.5.4 Messung der Raumladungsverteilung 81

4 Ergebnisse und Modellbildung 87
4.1 Einfluss der Oberflächenbearbeitung 89
4.1.1 Veränderung von Masse und relativer Permittivität . 89
4.1.2 Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit 93
4.1.3 Veränderung der Haftstelleneigenschaften 98
4.2 Einfluss der Alterungsbedingungen 103
4.2.1 Veränderung von Masse und relativer Permittivität . 104
4.2.2 Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit 107
4.2.3 Veränderung der Haftstelleneigenschaften 110
4.3 Einfluss des Schmierfettes 114
4.3.1 Veränderung von Masse und relativer Permittivität . 114
4.3.2 Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit 118
4.3.3 Veränderung der Haftstelleneigenschaften 121

5 Diskussion und Empfehlungen 129

6 Zusammenfassung und Ausblick 133

Quellenverzeichnis 139

Abbildungsverzeichnis 159

Tabellenverzeichnis 165

Abkürzungsverzeichnis 167

Symbolverzeichnis 169

Publikationsliste 171

Abschlussarbeiten 173

Lebenslauf 175

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende sind in Deutschland umfangreiche Netzausbaumaßnahmen vorgesehen, um elektrische Energie aus regenerativen Quellen zu den Verbrauchern zu transportieren. Für große Distanzen soll dabei Hochspannungsgleichspannungsübertragung genutzt werden, wobei der gesetzlich vorgeschriebene Kabelvorrang bei der Planung der Trassen berücksichtigt wird. Die vorgesehenen Kabelprojekte gelten hinsichtlich ihrer Spannungsebene, Nennleistung und Übertragungslänge als die größten weltweit und sind für Betriebsdauern von mindestens 40 Jahren ausgelegt. Die geringe Betriebserfahrung mit Gleichspannungskabeln bedingt jedoch die wissenschaftliche Untersuchung des Alterungsverhaltens der eingesetzten Isoliersysteme. Insbesondere Wechselwirkungen an makroskopischen Materialgrenzflächen, die bei der Verbindung einzelner Kabellängen in Kabelmuffen unvermeidbar sind, wurden bisher kaum erforscht und müssen experimentell untersucht werden.

1.1 Einführung in die Thematik

Hochspannungsgleichstromübertragung Infolge der Zunahme von Erzeugung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen im Rahmen der Energiewende ist in Deutschland eine räumliche Entfernung von Erzeugern (Windkraft- und Solarenergieanlagen im Norden) und Verbrauchern (Industriestandorte im Süden) zu verzeichnen. Die Hochspannungsgleichstromüber tragung (HGÜ) stellt für große Übertragungsdistanzen eine Alternative zur bisher vornehmlich eingesetzten Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ) dar [50H23].
Gegenüber der Übertragung elektrischer Energie mittels HDÜ weist die HGÜ mehrere Vorteile auf. Wirtschaftlich vorteilhaft bei Verwendung der HGÜ ist der fehlende Bedarf an Anlagen zur Blindleistungskompensation; Leitungsverluste aufgrund des Skin- und des Proximity-Effekts treten im Fall einer Übertragung mittels Gleichspannung nicht auf, sodass eine höhere Ausnutzung des Leiterquerschnitts möglich ist. Ferner kann bei der Ausführung als Punkt-zu-Punkt-Verbindung die Übertragungsspannung

frei gewählt und für die jeweilige Übertragungsleistung optimiert werden. Schließlich ermöglicht die Einbindung von HGÜ die Kopplung asynchroner Netzgebiete. Demgegenüber stehen hohe Investitionskosten für die Konverterstationen an den Netzanschlusspunkten [50H23; Oed11]. Letztlich ergibt sich in Abhängigkeit der technischen Ausführung der Übertragungsstrecke eine *break-even*-Länge, oberhalb derer die HGÜ die wirtschaftlichere Option ist [Maz13].
Je nach verwendeter Halbleitertechnologie wird zwischen thyristorbasierten netzgeführten (*line commutated converter* (LCC)) und selbstgeführten (*voltage source converter* (VSC)) Stromrichtern basierend auf *insulated gate bipolar transistor* (IGBT) unterschieden. Die Leistungsflussumkehr erfolgt dabei im ersten Fall durch Spannungsumpolung, im zweiten Fall durch Umkehrung der Stromrichtung. LCC werden in der Regel als 12-Puls-Brücke verschaltet und weisen zur ordnungsgemäßen Kommutierung einen Eigenbedarf an Blindleistung auf. Ferner ist ein starkes angeschlossenes Drehstromnetz mit einem Kurzschlussverhältnis von wenigstens 2 vonnöten. Der Einsatz von VSC wird durch die Entwicklung von IGBT hin zu höheren Nennspannungen und Bemessungsleistungen vornehmlich seit Ende der 1990er Jahre ermöglicht. VSC erlauben die individuelle Regelung von Blind- und Wirkleistung sowie Schwarzstartfähigkeit und Stützung des angebundenen Drehstromnetzes [Cra18; Oed11].

Erdkabeltechnologie Bestehende Hoch- und Höchstspannungsnetze sind vornehmlich als Freileitungsnetze ausgeführt. Der Anteil von Freileitungen im deutschen Transportnetz beträgt mehr als 95% [Deu14]. Vornehmlich gesellschaftspolitische Gründe (Akzeptanz in der Bevölkerung) sowie räumliche Begrenzungen in urbanen Gebieten stehen jedoch einem Neubau von Freileitungen entgegen, sodass in den kommenden Jahrzehnten weltweit eine Infrastruktur an HGÜ-Strecken in Kabeltechnologie aufgebaut wird [Mon18]. Der Einsatz von Kabeln für die HGÜ ermöglicht zusätzliche Einsparpotentiale, da über die Leiterverluste hinaus auch die in AC-Kabeln anfallenden dielektrische Verluste in der Kabelisolierung sowie Schirmverluste entfallen. Die *break-even*-Länge beträgt infolgedessen für Kabel lediglich 40-50 km, verglichen mit etwa 700 km im Fall einer Übertragung über Freileitun-

gen [Maz13; Oed11]. Bei gleichen geometrischen Abmessungen von 26 mm Isolierdicke und 2500 mm^2 Leiterquerschnitt kann ein HGÜ-Kabelsystem in bipolarer Konfiguration mit ±525 kV Nennspannung die Leistung von 2 GW übertragen. In Drehstromtechnologie sind für die gleiche Leistung zwei 380 kV-Systeme notwendig, insgesamt also 6 Kabel verglichen mit 2 Kabeln bei Einsatz der HGÜ. Somit ergibt sich ein geringerer Platz- und Materialbedarf.
Auf nationaler Ebene unterliegt der im Rahmen des Netzentwicklungsplans identifizierte Bedarf an Maßnahmen zum Netzausbau dem gesetzlich festgeschriebenen Kabelvorrang [Bun15]. Infolgedessen werden in Deutschland innerhalb der kommenden Jahre große HGÜ-Korridore in Erdkabeltechnologie geplant und umgesetzt, die eine Gesamtstrecke von mehreren Tausend Kilometern überbrücken und in Summe bis zu 30 GW Leistung transportieren sollen. Dabei werden VSC eingesetzt, die Kabel werden mit ±525 kV betrieben [50H23]. Die Trassen sind in Abbildung 1-1 eingezeichnet.

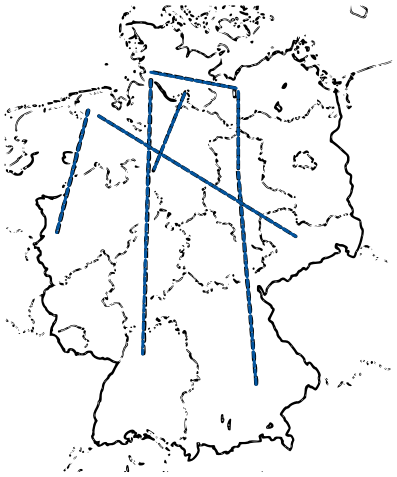


Abbildung 1-1: Geplante HGÜ-Korridore gemäß [50H23]

Polymere Isoliersysteme Eine Herausforderung stellt die Entwicklung des Isoliersystems für HGÜ-Kabel dar. Bis Ende der 1990er Jahre war die

Isolierung für HGÜ-Kabel ausschließlich papierbasiert, d.h. in Wickeltechnik mit einer Imprägnierung aus Isolieröl oder Masse ausgeführt. Der Einsatz von HGÜ erfolgte vornehmlich in Form von Seekabeln. Die Entwicklung der VSC gilt aufgrund der Möglichkeit der Polaritätsumkehr durch Umkehr der Stromflussrichtung als Voraussetzung für die Verwendung polymerisolierter Kabel. Der Einsatz einer solchen extrudierten Polymerisolierung ermöglicht im Vergleich mit öl- und masseisolierten Kabeln eine einfachere Produktion, geringeres Gewicht sowie Umweltfreundlichkeit und Wartungsfreiheit bei erhöhter thermischer Beständigkeit. Ferner ist der Aufwand zur Verbindung einzelner Kabellängen für extrudierte Isoliersysteme deutlich geringer, da anstelle von manueller Wickeltechnik vorgefertigte Kabelmuffen in Aufschiebetechnik verwendet werden können [Han03; Maz13].
Im Gegensatz zur Öl- und Masseisolierung wird aufgrund der Materialstruktur der für Energiekabel genutzten Polymere unter Gleichspannungsbelastung die Ansammlung von Raumladung beobachtet. Infolgedessen findet eine Verdrängung des elektrischen Feldes statt, und insbesondere im Fall einer transienten elektrischen Belastung, also beispielsweise einer Polaritätsumkehr, sind lokale Feldüberhöhungen zu erwarten. Die elektrische Feldstärke kann dabei lokal so groß werden, dass die elektrische Festigkeit des Materials überschritten und ein elektrisches Versagen des Isoliersystems eingeleitet wird [Kre95]. Transiente Überspannungen treten auch ohne forcierte Polaritätsumkehr im Fehlerfall auf. Insbesondere Zwischensystemfehler an parallel geführten teilverkabelten Strecken bedingen hochfrequente oszillierende Fehlerspannungen [Dül20]. Die Feldverteilung in der Kabelisolierung ist in diesem Fall, im Gegensatz zur resistiven Verteilung im Normalbetrieb, kapazitiver Art, wobei die raumladungsinduzierte Feldstärke dem von außen einwirkenden elektrischen Feld überlagert ist [Kre95].
Die nichtselbstheilende Natur der Kabelisolierung erfordert im Fall eines elektrischen Durchschlags langwierige und kostspielige Reparaturarbeiten. Von insgesamt etwa vier Wochen wird zunächst rund ein Drittel für die Fehlerortung angesetzt, eine weitere Woche ist für die Einholung der notwendigen Genehmigungen sowie die Vorbereitungen der erforderlichen Tiefbaumaßnahmen vonnöten [Zha19].
1999 wurde auf Gotland die erste VSC-HGÜ mit polymerisolierten 80 kV-

Erdkabeln als Pilotprojekt in Betrieb genommen [Byg99]. Seitdem konnten extrudierte HGÜ-Kabelsysteme mit Betriebsspannungen von bis zu 525 kV entwickelt und gemäß IEC 62895 bzw. CIGRE TB 496 qualifiziert werden [Fri19; Gho15; Shi19].

Nennspannung [kV]	Isolierdicke [mm]	mittlere Feldstärke [kV/mm]
150	12	12,5
320	18	17,8
525	26	20,2

Tabelle 1-1: Typische Werte für mittlere Betriebsfeldstärken extrudierter HGÜ-Kabel [Ben10; Poe19]

Der steigende Energiebedarf und damit einhergehend höhere Übertragungsleistungen einzelner Leitungsabschnitte werden durch Erhöhung der Betriebsspannung realisiert [Gho15; Poe19]. Dabei wird aus ökonomischen sowie aus technologischen Gründen (Materialeinsatz, Produktion und Transport der Kabel, Volumeneffekt) keine proportionale Erhöhung der Isolierdicke vorgenommen, sodass die resultierende Betriebsfeldstärke über der Isolierung mit zunehmender Nennspannung ansteigt. Übliche Werte für HGÜ-Kabel mit extrudierter Isolierung sind in Tabelle 1-1 angegeben.
Mit zunehmender Betriebsfeldstärke steigen die Anforderungen an Isoliersysteme. Raumladungsansammlung und Ladungstransportphänomene in Polymeren unterliegen physikalischen Prozessen, die oberhalb von materialabhängigen Schwellwerten der elektrischen Feldstärke einsetzen und darüber hinaus stark nichtlinear mit der Feldstärke ansteigen [Bog04].
Ein polymerisoliertes Erdkabel ist schematisch in Abbildung 1-2 dargestellt. Der stromführende Leiter wird durch ein dreilagiges System, zumeist basierend auf Polyethylen (PE), gegen den geerdeten Kabelschirm isoliert. Das Isoliersystem besteht aus der Hauptisolierung sowie je einer inneren und äußeren Leitschicht, die eine homogene Feldverteilung im Inneren der Isolierung gewährleistet. Dazu wird der spezifische Widerstand der ebenfalls PE-basierten Leitschicht durch Zugabe von Rußpartikeln (ca. 20-25 Gew.-%) auf etwa 10^3 Ω·cm reduziert und die drei Lagen simultan auf den Leiter

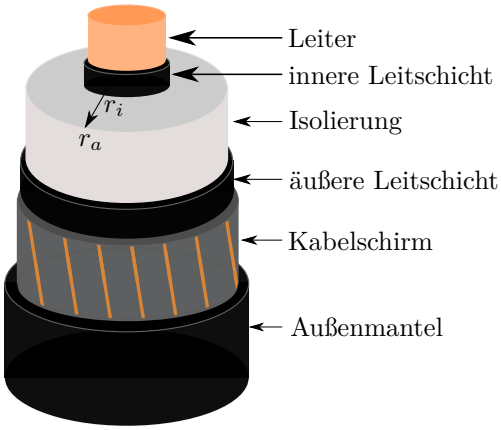
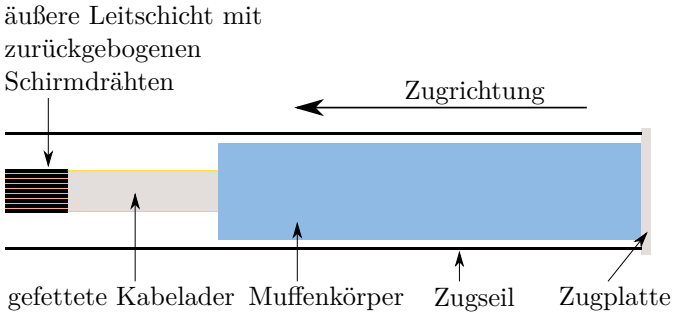


Abbildung 1-2: Allgemeiner Aufbau von herkömmlichen Hoch- und Höchstspannungskabeln (nach [Pes98])

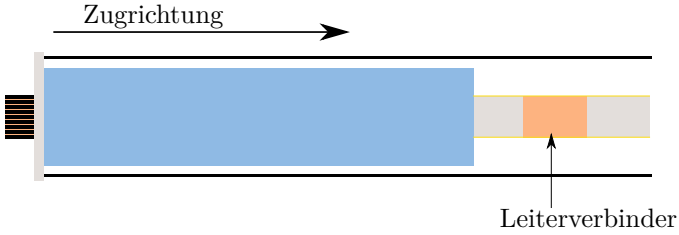
extrudiert. Die anschließende Vernetzung des Isoliersystems ist hinreichend für eine chemische, hohlraumfreie Verbindung der drei Schichten. Der metallische Kabelschirm schirmt das elektrische Feld nach außen hin ab und gewährleistet die Strombelastbarkeit im Kurzschlussfall. Je nach Anwendung werden zwischen Schirm und Außenmantel quellfähige Materialien verwendet, die im Fall einer Beschädigung am Außenmantel das Eindringen und die Ausbreitung von Wasser verhindern. Der Außenmantel schützt das Kabel gegen Umwelteinflüsse [Hei99; Maz13; Pes98].

Kabelgarnituren Aufgrund von logistischen Beschränkungen werden Erdkabel in Längen von 1-2 km zum Einsatzort transportiert und dort manuell mittels Kabelmuffen miteinander verbunden. Die Montage einer vorgefertigten Aufschiebemuffe zur Verbindung zweier Kabellängen erfolgt in Handarbeit. Zunächst werden die beiden Leiterenden freigelegt und durch Verschweißen, Verpressen oder Verschrauben miteinander verbunden. Der Außendurchmesser des metallischen Leiterverbinders entspricht dem Außendurchmesser der Kabelisolierung, sodass eine glatte Oberfläche resultiert. Die äußere Leitschicht wird ausgehend vom Leiterverbinder für eine Länge von jeweils mehreren zehn Zentimetern von der Kabelisolierung entfernt,

sodass eine Verlängerung der Kriechstrecke zwischen dem Leiterverbinder auf Hochspannungspotential und der Absetzkante der Leitschicht auf Erdpotential resultiert. Die Behandlung der Isolieroberfläche ist kritisch für die elektrische Festigkeit der Kabelmuffe. Die Entfernung der Leitschicht erfolgt mittels spezieller Schälwerkzeuge. Anschließend wird die Oberfläche durch Schleifen, Polieren oder Erhitzen nachbehandelt. Ziel ist eine möglichst geringe Rauigkeit, sodass Hohlräume zwischen Kabelisolierung und Muffenkörper vermieden werden. Die so gefertigte glatte Oberfläche wird sorgfältig gereinigt und daraufhin mit einem Schmiermittel für die Montage der Aufschiebemuffe vorbereitet [CIG02; CIG11; CIG20]. Der Muffenkörper wird dann, wie in Abbildung 1-3 dargestellt, zunächst auf einer Kabelseite bis zur sogenannten Parkposition aufgezogen und nach Montage des Leiterverbinders mittig über dem Verbinder positioniert.



(a) Aufziehen des Muffenkörpers



(b) Positionieren des Muffenkörpers

Abbildung 1-3: Montage des Muffenkörpers

In der Regel werden Kettenzüge verwendet, um die trotz des eingesetzten Schmierfettes große Reibungskraft, die zum Bewegen des Muffenkörpers auf der Kabelader notwendig ist, aufzuwenden.
Der Muffenkörper besteht aus einem isolierenden Hauptteil mit integrierten feldsteuernden Elementen. Als Basismaterial wird ein Elastomer, in der Regel Silikongummi (engl. *silicone rubber* (SiR)) oder Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM), verwendet. Der Innendurchmesser des Muffenkörpers ist kleiner ausgelegt als der Außendurchmesser der Kabelisolierung, sodass die Montage unter Vorspannung erfolgt und im Betrieb ein Anpressdruck von einigen Bar zwischen Kabel und Muffe herrscht, um die elektrische Festigkeit der Grenzfläche in tangentialer Richtung zu erhöhen. Zur Beherrschung der elektrischen Feldstärken an der Leitschichtkante sowie an der Grenze zwischen Leiterverbinder und Isolierung müssen zusätzliche feldsteuernde Maßnahmen ergriffen werden. Die maximale tangentiale elektrische Feldstärke in der Kabelmuffe beträgt dann etwa 5-10 kV/mm [Fro18; Gho14]. Für HGÜ-Kabelmuffen wird zur Feldsteuerung einerseits auf die aus HDÜ-Anwendungen bekannte geometrische Feldsteuerung zurückgegriffen. Deflektorelektroden aus leitfähigem Elastomer werden in diesem Fall in den Muffenkörper integriert, sodass sie nach Montage die kritischen Tripelpunkte abdecken und das elektrische Feld aufgrund ihrer Formgebung homogenisieren. Insbesondere für Gleichspannungsanwendungen kann zusätzlich der Einsatz nichtlinear leitfähiger Materialien entlang der gesamten Grenzfläche eine kompaktere Bauweise der gesamtem Muffe ermöglichen [CIG20; Gho15; Maz19a]. Eine derartige Muffe mit kombinierter geometrischer und nichtlinear resistiver Feldsteuerung ist schematisch in Abbildung 1-4 dargestellt.
Trotz sorgfältiger Auslegung, Fertigung und Montage stellen Kabelgarnituren die Schwachstelle des Isoliersystems dar. Das Aufeinandertreffen von Materialien unterschiedlicher elektrischer, thermischer und mechanischer Eigenschaften bedingt eine geringere elektrische Festigkeit der vorliegenden Grenzflächen verglichen mit dem Vollmaterial [CIG02]. Die elektrische Feldverteilung sowie Alterungs- und Schädigungsmechanismen in HGÜ-Isoliersystemen unterscheiden sich von AC-Anwendungen, sodass nicht auf bestehende Betriebserfahrung zurückgegriffen werden kann.

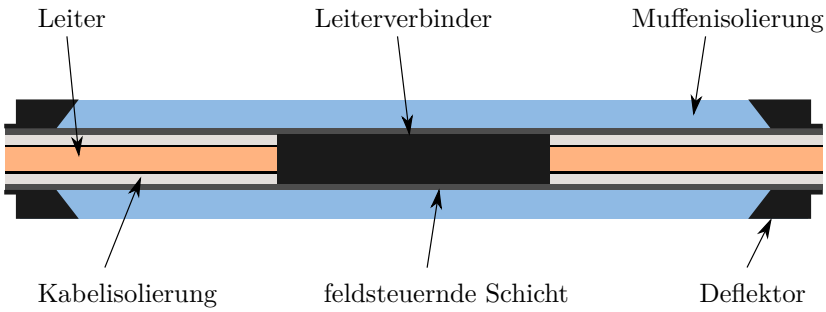


Abbildung 1-4: Allgemeiner Aufbau von Aufschiebemuffen für HGÜ-Kabel (nach [Gho15])

Neben der Kompatibilität der Materialien im Neuzustand muss insbesondere deren Alterungsverhalten bekannt sein. Im Rahmen von Präqualifikationsprüfungen (PQ-Test) werden HGÜ-Kabelsysteme einer thermo-elektrischen Belastung für eine Zeitdauer von 360 Tagen unterzogen [CIG12a; DIN19b]. Dabei sind Prüfungen am gesamten Kabelsystem vorgesehen, die zeit- und kostenintensiv sind, dabei aber keine Aussage über mögliche alterungsbedingte Veränderungen der einzelnen Materialien ermöglichen, welche sich mit fortschreitender Betriebsdauer auf die elektrische Feldverteilung im gesamten Isoliersystem auswirken können. Das Alterungsverhalten insbesondere von vernetztem Polyethylen (VPE, engl.*cross-linked polyethylene* (XLPE)) unter Gleichspannungsbelastung ist Gegenstand umfangreicher Forschungsaktivitäten [Cri07; Dak48; Dis92; Lew02; Maz17; Mon19].
Es ist jedoch bisher wissenschaftlich nur unzureichend untersucht, inwiefern sich mögliche Wechselwirkungen zwischen den in der Muffe aufeinander treffenden Materialien auf deren elektrische Eigenschaften und die im Isoliersystem resultierende Feldverteilung auswirken.

1.2 Stand des Wissens

Die Entwicklung polymerer Isoliersysteme für HGÜ-Kabel basiert auf HDÜ-Kabelsystemen, für die mehr als ein halbes Jahrhundert Betriebserfahrung vorliegt. Die elektrische Feldverteilung in Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung wird jedoch vom Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeiten

der verwendeten Dielektrika bestimmt, die im Gegensatz zur für Wechselspannung ausschlaggebenden relativen Permittivität stark von der lokalen elektrischen Feldstärke und von der Temperatur abhängig ist. Dementsprechend gestaltet sich die Modellierung der Feldverteilung ungleich komplexer, zumal für eine mikroskopische Betrachtung zusätzlich lokalisierte Ladungsträger zu beachten sind. Physikochemikalische Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Materialien, die eine lokale Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit von Isoliermaterialien bedingen und somit für Gleichspannungsanwendungen kritisch sein können, sind bisher nur in Ansätzen erforscht. Ferner existiert kein standardisiertes Vorgehen für die experimentelle Untersuchung dieser Wechselwirkungen, sodass bisher veröffentlichte Ergebnisse nicht vergleichbar und kaum hinsichtlich ihrer Relevanz für den Betrieb von Kabelsystemen einzuordnen sind. Somit ergeben sich als Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Versuchsmethode zur experimentellen Untersuchung und Bewertung der Kompatibilität von polymeren Isoliermaterialien zum Einsatz in HGÜ-Kabelsystemen einerseits sowie andererseits die Ableitung eines Modells zur Abbildung der beschriebenen Materialwechselwirkungen.

1.2.1 Elektrische Feldverteilung und Grenzflächenladung in HGÜ-Kabelsystemen

Gemäß der Materialgleichung für elektrische Strömungsfelder resultiert aus dem Anlegen einer Gleichspannung an ein Dielektrikum ein Stromfluss mit der Stromdichte J proportional zur elektrischen Feldstärke E. Die effektive Gleichstromleitfähigkeit σ ist als Proportionalitätskonstante definiert:

$$J = \sigma E \tag{1-1}$$

In der zylindrischen Kabelgeometrie wirkt der zentrierte stromdurchflossene Leiter als Wärmequelle, sodass sich entlang des Isoliersystems ein Temperaturgefälle nach

$$\Delta T(r) = T(r) - T(r_a) = \frac{W_C}{2\pi\lambda_T} ln(\frac{r_a}{r}) \tag{1-2}$$

mit der dielektrischen Verlustleistung W_C, der Wärmeleitfähigkeit des Dielektrikums λ_T und dem Außenradius der Isolierung r_a einstellt [Eol75]. Unter Annahme einer exponentiellen Feld- und Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit gemäß

$$\sigma(T,E) = \sigma_0 e^{\alpha T + \beta E} \tag{1-3}$$

mit der Referenzleitfähigkeit σ_0 und den Koeffizienten für Temperatur und Feldstärke α und β wird die elektrische Feldverteilung entlang der Kabelisolierung unter Gleichspannungsbelastung im stationären Zustand analytisch näherungsweise zu

$$E(r) = \frac{\delta U_0 (\frac{r}{r_a})^{(\delta-1)}}{r_0 (1 - (\frac{r_i}{r_a})^{\delta})} \tag{1-4}$$

mit dem Innenradius der Isolierung r_i und

$$\delta = \frac{\frac{\alpha \Delta T}{ln(r_a/r_i)} + \frac{\beta U_0}{(r_a - r_i)}}{1 + \frac{\beta U_0}{(r_a - r_i)}} \tag{1-5}$$

mit der Spannung U_0 über der Isolierung berechnet [Eol75].
Die Feldverteilung im HGÜ-Kabel hängt somit über ΔT vom fließenden Laststrom sowie der Temperatur außerhalb des Kabels ab. Mit zunehmendem Stromfluss durch den Kabelleiter wird das elektrische Feld infolge der lokal erhöhten elektrischen Leitfähigkeit nach außen hin verdrängt, bis die sogenannte Feldinversion auftritt: der Ort der höchsten Feldstärke befindet sich in diesem Fall anders als im Falle kapazitiver Feldverteilung nicht am Innen-, sondern am Außenradius r_a, wie in Abbildung 1-5 dargestellt.
Für Isoliersysteme bestehend aus Kabel und Garnitur liegt in radialer Richtung an der Materialgrenzfläche eine Unstetigkeit der elektrischen Leitfähigkeit sowie der relativen Permittivität ε_r vor. Aus dem Gaußschen Gesetz sowie der Kontinuitätsgleichung folgt mit

$$\rho = J \cdot \nabla(\frac{\varepsilon}{\sigma}) \tag{1-6}$$

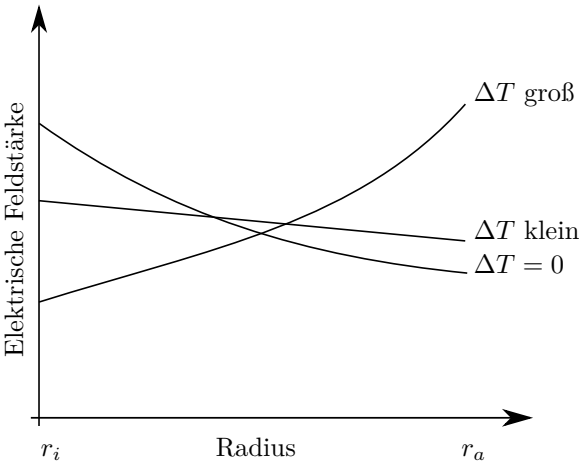


Abbildung 1-5: Feldverteilung entlang der Kabelisolierung (nach [Moo97])

der Aufbau einer Grenzflächenladung ρ im Zuge von Polarisationsprozessen an derartigen Materialgrenzflächen. Der zeitliche Verlauf dieses Ladungsaufbaus infolge von Grenzflächenpolarisation berechnet sich gemäß

$$\rho(t) = \frac{\varepsilon_2\sigma_1 - \varepsilon_1\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \cdot \frac{U}{d}\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \tag{1-7}$$

mit

$$\tau = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \tag{1-8}$$

für zwei Dielektrika 1, 2 mit der jeweiligen Permittivität ε_i und effektiven Leitfähigkeit σ_i, die entlang ihrer Gesamtdicke d mit der Spannung U beaufschlagt werden [Sil37; Wag14].
Der Aufbau von Raum- und Grenzflächenladung in polymeren Isoliermaterialien bedingt gemäß der Poisson-Gleichung

$$\nabla E(r) = \frac{\rho(r)}{\varepsilon} \tag{1-9}$$

eine räumliche Veränderung der elektrischen Feldstärke und gilt daher als kritisch für die elektrische Belastung von Isoliersystemen, in denen der

Ladungsaufbau nicht kontrollierbar oder nicht bekannt ist. Ein Maß zur Quantifizierung der raumladungsbedingten Feldverzerrung ist der sogenannte *field enhancement factor* (FEF), der das Verhältnis der lokalen zur elektrischen Grundfeldstärke angibt. Er beträgt 1 im gesamten Material, sofern das betrachtete Dielektrikum keine Raumladung beinhaltet [Vis11].
Grenzflächenpolarisation kann beim Design von Isoliersystemen berücksichtigt und kontrolliert werden, sofern die elektrischen Eigenschaften der Materialien für alle im Betrieb erwartbaren Bedingungen und für alle Zustände bekannt und aufeinander abgestimmt sind. Dabei ist zu beachten, dass alterungsbedingte Veränderungen der Materialparameter aufgrund der radial veränderlichen (elektrischen und thermischen) Belastung des Isoliersystems entlang der Isolierung unterschiedlich stark ausgeprägt sind und somit wiederum zusätzliche Leitfähigkeits- oder Permittivitätsgradienten hervorrufen können.
Im Widerspruch zur Maxwell-Wagner-Sillars-Polarisation wird selbst an Grenzflächen zwischen zwei Materialproben aus dem selben Isoliermaterial, die somit identische elektrische Eigenschaften aufweisen, Grenzflächenladung experimentell nachgewiesen, sofern die angelegte Spannung hoch genug ist [Che04; Das14; Hu16].
Als Schwellwert gilt die sogenannte Injektionsfeldstärke, oberhalb derer der Ladungstransport durch das untersuchte Dielektrikum nicht länger ohmscher Natur ist, sondern durch an den Elektroden injizierte Ladungsträger dominiert wird. Oberhalb der Injektionsfeldstärke führt eine Berechnung der elektrischen Feldverteilung an geschichtenen Dielektrika mithilfe des Maxwell-Wagner-Sillars-Modells zur Unterschätzung des Raumladungsaufbaus und infolgedessen der maximalen elektrischen Feldstärke [An20; Das14; Del08; Mor07; Tak19; Vu13; Vu15; Vu17]. Die Injektionsfeldstärke ist abhängig von Elektrodenmaterial und Dielektrikum sowie von der physikalischen Beschaffenheit der Elektroden- und der Isolierstoffoberfläche, insbesondere von deren Rauheit. Ferner beeinflusst die Umgebungstemperatur den Übergang vom ohmschen zum injektionsdominierten Ladungstransport [Del08; Del07]. Neben injizierten Elektronen tragen auch Ionen, die aus der Dissoziation von Vernetzungsrückständen resultieren, zur Raumladungsbildung in Grenzflächennähe bei [Chr15; Li18b].

Ladungstransport in Polymeren lässt sich oberhalb der Injektionsfeldstärke durch Hopping-Prozesse zwischen sogenannten Haftstellen modellieren. Grundlage ist das aus der Quantenmechanik bekannte Bändermodell für ideale Einkristalle, welches zur Beschreibung teilkristalliner Dielektrika um die Haftstellen als erlaubte Zustände innerhalb der verbotenen Zone erweitert wird, s. dazu Kapitel 2.2. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit für den Übergang von Haftstelle zu Haftstelle umso höher, je mehr Haftstellen im Material vorhanden sind, sofern diese energetisch flach sind bzw. sofern die angelegte Spannung ausreichend hoch ist, um dem jeweiligen Ladungsträger die Bewegung entlang benachbarter Haftstellen zu ermöglichen. Demgegenüber zeichnen sich energetisch tiefe Haftststellen dadurch aus, dass Ladungsträger über lange Zeiträume in ihnen verbleiben und somit als Raumladung im Isoliermaterial vorliegen [Dis92].
An Materialoberflächen ist die Anzahl der Haftstellen verglichen mit dem Vollmaterial signifikant erhöht. Auf atomarer Ebene weicht die Bandstruktur an Feststoffoberflächen vom idealen abrupten Übergang ab und bildet sogenannte *surface states* aus, die ähnlich den Haftstellen ein lokalisiertes Energieniveau darstellen, in denen sich Ladungsträger aufhalten können. Ferner entstehen durch die mechanische Bearbeitung von Feststoffoberflächen Bindungsdefekte, die als Radikale wirken und an denen sich vermehrt Sauerstoffatome aus der Umgebung anlagern. Somit entstehen oberflächennahe Haftstellen, an denen Elektronen gebunden werden können. Weiterhin kann an Oberflächen infolge von Relaxationsvorgängen eine Neuordnung der Materialstruktur stattfinden, sodass die Morphologie von der des Vollmaterials abweicht [Bog04; Bri10; Che04; Das14; Doe18; Mor07].
Als Maßnahme zur Verringerung von Grenzflächenladung infolge injizierter Ladungsträger wird eine Fluorierung der Materialoberfläche von Kabelisolierung oder Garnitur untersucht. Infolgedessen kann die Bandlücke des behandelten Materials reduziert und somit die elektrische Leitfähigkeit erhöht werden, sodass die Ladungsträger abfließen, anstatt sich an der Grenzfläche anzusammeln. Dieses Verfahren wird jedoch bisher ausschließlich im Labormaßstab an Materialproben angewendet [Han17; Jin18; Lan13; Li17; Moh15].

1.2.2 Ladungstransportmodelle

Die zuvor genannte potentiell kritische Wirkung von Grenzflächenladung zwischen HGÜ-Kabel und Kabelmuffe macht eine genaue Kenntnis der vorhandenen Raum- und Grenzflächenladung zur Voraussetzung für den fehlerfreien Betrieb des Kabelsystems. Für die Ladungsberechnung kommen verschiedene Ladungstransportmodelle zum Einsatz, die im Folgenden diskutiert werden.

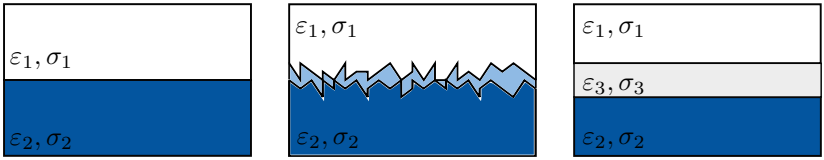
Unterhalb der zuvor eingeführten Injektionsfeldstärke kann die Raumladungsverteilung entlang makroskopischer Materialgrenzflächen in guter Näherung gemäß Formel (1-7) auf Grundlage konstanter effektiver Materialkennwerte modelliert werden. Eine höhere Genauigkeit kann durch numerische Berechnung der Raumladungs- und Feldverteilung unter Berücksichtigung von Feld- und Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit erzielt werden. Neben dem empirischen Zusammenhang nach Formel (1-3) ergibt sich die elektrische Leitfähigkeit gemäß der Modellvorstellung von Ionen- und Hopping-Leitung (s. Kapitel 2.2.1 und Kapitel 2.2.2)

$$\sigma(T,E) = \sigma_0 exp(-\frac{E_t}{k_B T}) \frac{\sinh(\beta|E|)}{|E|} \tag{1-10}$$

mit der Grundleitfähigkeit σ_0, der Feldkonstante β, der thermischen Aktivierungsenergie E_t und der Boltzmann-Konstante k_B. Das resultierende numerische Problem wird in der Regel mittels der Methode der finiten Elemente zur Berechnung der Feldverteilung in kompletten Komponenten gelöst [Baf20; Che19; Fro18; Hou15; Qin15; Sal11; Sta17; Vu17]. Dabei werden mikroskopische Prozesse in der Regel nicht mit abgebildet, sodass unter Umständen eine zu geringe Raum- und Grenzflächenladung berechnet wird.

Um ferner Abweichungen der makroskopischen Struktur der Grenzfläche vom Vollmaterial abzubilden, wird das für Zweischichtdielektrika entwickelte Maxwell-Wagner-Sillars-Modell um eine dritte Schicht ergänzt, wie in Abbildung 1-6 skizziert. Dafür wird die Dicke d dieser virtuellen Schicht definiert als die Summe der Oberflächenrauheiten der beiden angrenzenden Vollmaterialien. Die relative Permittivität sowie die effektive Leitfähigkeit der Ersatzschicht wird nach unten begrenzt durch die relative Permittivität

des Mediums, das die rauheitsbedingten Hohlräume zwischen den beiden Feststoffen ausfüllt (in der Regel Schmierfett oder Luft) bzw. durch die effektive Leitfähigkeit der beiden Feststoffe. Nach oben hin können die relative Permittivität und die effektive Leitfähigkeit durch die Permittivitäten der beiden Feststoffe relativ zur jeweiligen Rauheit oder durch die effektive Leitfähigkeit des Schmierfetts abgeschätzt werden [Bod06]. Auch hier findet eine rein makroskopische Betrachtung der Grenzfläche statt.



(a) ideale Grenfläche (b) reale Grenzfläche (c) Dreischichtmodell

Abbildung 1-6: Dreischichtmodell zur Abbildung realer Grenzflächen (nach [Bod06])

Eine quantitative Berechnung der elektrischen Feldverteilung unter Berücksichtigung injizierter Ladungsträger ermöglicht das 1994 vorgestellte *bipolar charge transport model* (BCTM). Dieses Modell basiert auf dem für teilkristalline Polymere adaptierten Bändermodell und zeichnet die Bewegung von Elektronen und Löchern in einer Dimension nach. Als Eingangsparameter gehen im Unterschied zur Modellierung nach Maxwell-Wagner-Sillars keine effektiven Materialkennwerte, sondern materialspezifische mikroskopische Größen ein, die auf Grundlage des Bändermodells die Materialstruktur beschreiben [Ali94]. Das Modell ist schematisch in Abbildung 1-7 dargestellt. Ursprünglich für ein einzelnes Material entwickelt, wird das Modell auch für die Berechnung von Ladungstransport über makroskopische Materialgrenzflächen hinweg angewendet [Baa18; Che20a; Le 05; Li18a; Lia20; Zhu19c]. Herausforderungen bei der Anwendung stellen jedoch die große Anzahl benötigter Parameter als Eingangsgrößen sowie die hohe Rechenzeit dar.

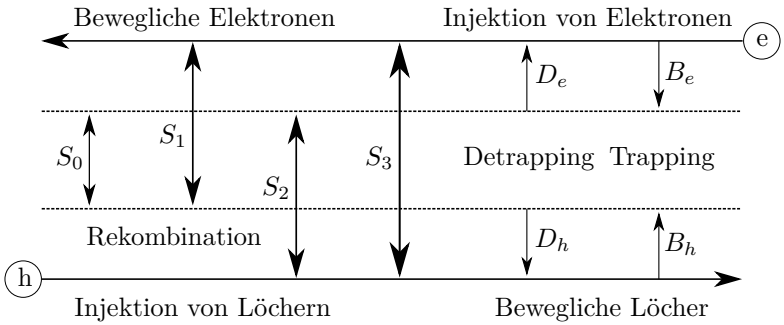


Abbildung 1-7: Schematischer Aufbau des *bipolar charge transport model* (nach [Ali94])

Basierend auf Messungen zum Abbau von Raumladung in Polymeren wird in [Maz03] ein Zusammenhang zwischen der zeitabhängigen Raumladungsdichte $\rho(t)$ und der Ladungsträgerbeweglichkeit $\mu(t)$ entsprechend

$$\mu(t) \propto \frac{\varepsilon}{\rho(t)^2} \frac{d\rho(t)}{dt} \tag{1-11}$$

hergestellt. Dabei wird angenommen, dass sowohl die Raumladungsdichte als auch die elektrische Feldverteilung innerhalb des betrachteten Probekörpers gleichmäßig verteilt und insbesondere unipolar sind. Für die Ladung in einem dünnen Bereich in der Umgebung einer Materialgrenzfläche trifft diese Annahme im Allgemeinen zu. Somit könnte das Modell geeignet sein, um den Ladungstransport an Grenzflächen zu beschreiben.
Das in [Dis06] entwickelte Modell basiert ebenfalls auf dem zeitabhängigen Raumladungsabbau. Dabei wird angenommen, dass die zum Zeitpunkt $t = 0$ im Material vorhandenen Ladungsträger sich in Haftstellen unterschiedlicher Energienivieaus im Bereich $\Delta_E = E_{t,max} - E_{t,min}$ aufhalten. N ist dann die Anzahl der besetzten Haftstellen je Energieniveau:

$$Q(t) \approx a - \frac{Q(0) k_B T}{\Delta_E} \ln(t) = a - N k_B T \ln(t) \tag{1-12}$$

In [Tzi10] wird gezeigt, dass nach langer Polarisationsdauer von VPE-Proben während der Entladung mehrere voneinander abgegrenzte Bereiche mit

$Q(t) \propto ln(t)$ vorliegen. Dabei werden mit zunehmender Entladedauer tiefere Haftstellen entladen. Auch diese Modellvorstellung lässt sich grundsätzlich auf Grenzflächen anwenden, sodass anhand der Raumladungsmessung Rückschlüsse auf das Ladungstransportverhalten gebildet werden können.

1.2.3 Polymere Isoliermaterialien für HGÜ-Kabelsysteme

Isoliersysteme in HGÜ-Kabeln umfassen die Kabelisolierung, die in der Regel aus VPE besteht, sowie der elastomeren Isolierung der Kabelgarnituren. Im Rahmen dieser Arbeit wird Silikonkautschuk betrachtet, alternativ wird insbesondere für HGÜ-Anwendungen auch EPDM genutzt. Zur Montage der Garnituren werden Schmierfette verwendet. Die für diese Arbeit relevanten Materialeigenschaften werden im Folgenden erläutert.

vernetztes Polyethylen (VPE) Polyethylen ist ein makromolekularer Stoff, dessen Monomer Ethylen aus Kohlen- und Wasserstoff besteht. Durch radikalische Polymerisation entsteht aus 3.000 bis 60.000 Monomereinheiten das Makromolekül. Die Monomere sind dann durch Hauptvalenzbindungen kovalent miteinander verbunden [Dom12; Ehr11; Hop15]. Die Strukturformel des so entstandenen PE zeigt Abbildung 1-8.

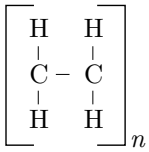


Abbildung 1-8: Strukturformel Polyethylen

Der Polymerisationsgrad n bezeichnet die Anzahl der Monomereinheiten, aus denen das Polymer gebildet wird. Polyethylen ist ein Thermoplast, das bedeutet, die Makromoleküle werden durch zwischenmolekulare Kräfte (Nebenvalenzbindungen) zusammengehalten, die mit zunehmender Temperatur schwächer werden, sodass das PE dann plastisch verformbar ist. Die Nebenvalenzbindungen im unpolaren PE basieren auf Dispersionskräften.

Dabei entstehen aus der Bewegung von Elektronen im Molekül zeitlich veränderliche Dipole, die in den Nachbarmolekülen Dipole gleicher Frequenzen induzieren [Ehr11; Hop15].
PE ist teilkristallin, besteht also aus kristallinen Bereichen mit geringer Verzweigung der Molekülketten, in denen diese geordnet und dicht beieinanderliegen, und aus amorphen Bereichen mit langen, ungeordneten Molekülketten. Der Kristallisationsgrad des für die Isolierung von Energiekabeln verwendeten *low density polyethylene* (LDPE) beträgt üblicherweise 45-55 %, entsprechend einer Dichte von 0,92 g/cm^3. Einzelne kristalline Bereiche, sogenannte Kristalliten, ordnen sich innerhalb der Struktur radialsymmetrisch zu sogenannten Sphärolithen mit Durchmessern von 0,1-1,0 mm an. Ihre Anzahl und Größe hängt von Prozessparametern sowie von der Zugabe von Nukleierungsmitteln ab [Dis92; Dom12; Ehr11; Han03; Här18; Hop15]. Aufgrund der hohen Packungsdichte der Makromoleküle in kristallinen Gebieten sind mechanische und dielektrische Relaxationsvorgänge dort stark reduziert. Ferner findet Ladungstransport bei Einwirkung eines elektrischen Feldes vornehmlich in amorphen Gebieten statt [Bog04; Dis92; Kre95].
Zur Erhöhung der thermischen Beständigkeit wird das Polyethylen für den Einsatz in Energiekabeln in der Regel vernetzt. Dabei verbinden sich die einzelnen Makromoleküle untereinander zu einem dreidimensionalen Netzwerk. Die Dauertemperaturbeständigkeit wird infolgedessen von etwa 70 °C auf 90 °C erhöht, wobei kurzzeitig, beispielsweise im Kurzschlussfall, bis zu 250 °C zulässig sind. Die Glasübergangstemperatur T_g erhöht sich infolge der Vernetzung von -70 °C auf -5 °C. Bei höheren Temperaturen weist vernetztes Polyethylen dann elastomere Eigenschaften auf: VPE ist formtreu, das heißt, das Material kriecht nicht und es findet unterhalb der thermischen Zersetzungstemperatur ausschließlich elastische Verformung statt. Infolge von Erwärmung kann jedoch eine Veränderung der Morphologie beobachtet werden, wenn einzelne Kristallite schmelzen und sich bei Abkühlung neu anordnen. Dieser Vorgang setzt bereits bei Temperaturen von etwa 70 °C ein [Han03; Hei99; Lin20; Pes98; Thu12; Yan21].
Die Vernetzung erfolgt in der Regel chemisch durch Zusatz von Peroxiden, die bei einer Temperatur von 200 °C zu Radikalen zerfallen, welche die

Vernetzungsreaktion auslösen. Vernetzungsrückstände wie Wasser, Acetophenon, Cumylalkohol und α-Methylstyrol beeinflussen den Ladungstransport sowie die Bildung von Raumladung im VPE in kaum kontrollierbarer Weise und sollten somit nach Möglichkeit durch thermische Konditionierung der Kabelader weitgehend entfernt werden [Han03; Kre95; Maz13; Pes98; Thu12].
Weitere chemische Inhomogenitäten stellen Antioxidantien dar, die zur Verbesserung der thermischen Beständigkeit bzw. zur Verhinderung oxidativer Zersetzung in das VPE eingebracht werden [Dis92; Dom12; Han03].
Zur Anwendung in HGÜ-Kabeln wird DC-VPE verglichen zum bereits in AC-Kabeln verwendeten VPE hinsichtlich seiner elektrischen Eigenschaften modifiziert. Die Injektionsfeldstärke von DC-VPE liegt bei Raumtemperatur in der Größenordnung 7-10 kV/mm, die effektive Gleichstromleitfähigkeit unterhalb der Injektionsfeldstärke beträgt etwa 10^{-15} S/m bis 10^{-13} S/m [Del08; Här18].

Silikonkautschuk (SiR) Silikonkautschuk wird den Elastomeren zugeordnet und weist somit eine amorphe Struktur auf. Die Herstellung erfolgt mittels Polykondensation. Im Unterschied zu organischen Polymeren ist die Hauptkette aus Silizium- und Sauerstoffatomen aufgebaut, die durch organische CH_3-Randgruppen abgesättigt ist, s. Abbildung 1-9.

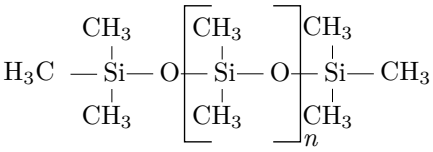


Abbildung 1-9: Strukturformel Polydimethylsiloxan (PDMS)

Diese Randgruppen sind maßgeblich für die geringe Oberflächenenergie, die der inhärenten Hydrophobie von Silikonen zugrunde liegen. Die hohe Bindungsenergie der Hauptkette gewährleistet eine hohe thermische Beständigkeit sowie Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen. Je nach Molmasse wird zwischen heißvernetztem Fest- und Flüssigkautschuk, engl. *high temperature vulcanizing silicone rubber* (HTV) bzw. *liquid silicone rubber* (LSR) unter-

schieden. Aufgrund seiner höheren Elastizität wird für Kabelgarnituren LSR verwendet, welches infolge seines geringen Vernetzungsgrads und entsprechend hohem Anteil an freiem Volumen die Permeation von Gasen und umgekehrt die Ausscheidung niedermolekularer Bestandteile über Diffusion erlaubt. Die Vernetzung erfolgt analog zum VPE chemisch durch Einsatz von Silanen oder Peroxiden. Silikonkautschuk wird für energietechnische Anwendungen als *compound* eingesetzt, also mit einer Reihe an Füllstoffen zur Einstellung der Materialeigenschaften versetzt [Dom12; Ehr11; Eye08]. Aufgrund seiner geringfügig höheren Leitfähigkeit verglichen mit SiR werden Garnituren für HGÜ-Kabel hauptsächlich aus EPDM gefertigt, welches jedoch nachteilige mechanische Eigenschaften aufweist, sodass Forschungsaktivitäten vermehrt auf die Entwicklung von Silikoncompounds für HGÜ-Anwendungen abzielen [Hus20; Maz19b; Ye18]. Aufgrund seiner amorphen Struktur weist SiR im Vergleich zu VPE bei gleicher Temperatur eine um etwa ein bis zwei Größenordnungen erhöhte Gleichstromleitfähigkeit auf, wobei die Injektionsfeldstärke je nach Temperatur und Materialzusammensetzung bei 3-10 kV/mm liegt [Che19; Vu13].

Schmiermittel Wie in Kapitel 1.1 erwähnt, wird die Kabelisolierung vor Montage der Aufschiebegarnitur mit Schmiermittel versehen, um das Aufgleiten der Garnitur zu erleichtern. Es kommen in der Regel Fette auf Silikonbasis zum Einsatz, die eine hohe thermische Beständigkeit und geringe Quellung im Kontakt mit Polyethylen aufweisen [Dan97; Per87]. PDMS wird zur Einstellung der Viskosität mit einem inorganischen Füllstoff versehen, sodass ein pastöses Schmiermittel mit thixotropen Materialeigenschaften entsteht. Kommerziell erhältliche Fette weisen in der Regel Füllstoffanteile von 40-60 Gew.-% auf [Bac18; Gro91; Per87]. Mit steigendem Füllstoffanteil nimmt die elektrische Leitfähigkeit der Fette gegenüber ungefülltem Silikonöl ab [Spe18]. Ferner steigt mit der Viskosität des Fettes das Risiko für Lufteinschlüsse, sofern die Paste nicht sorgfältig an der Kabelisolierung eingearbeitet ("einmassiert") wird [Bac18]. Polare Phenylgruppen können als funktionelle Gruppen eingesetzt werden, um das Aufquellen der angrenzenden Feststoffe zu reduzieren. Fluorhaltige Bestandteile sind ebenfalls geeignet, die Quellung zu reduzieren, jedoch wird an Grenzflächen mit

Schmierfett, welches mit Perfluorpolyether versetzt ist, aufgrund dessen erhöhter Polarität ein verstärkter Aufbau von Grenzflächenladung gemessen [Wan22].
Das verwendete Schmierfett wirkt unmittelbar nach Montage der Kabelmuffe positiv auf die elektrische Festigkeit der Isolierstoffgrenzfläche, da verbleibende Hohlräume zwischen den aufeinander treffenden Feststoffisolierungen durch Fett gefüllt werden [Dan97; Nad99]. Die flüssige Phase des Fettes diffundiert jedoch mit zunehmender Betriebsdauer insbesondere in die elastomere Muffenisolierung. Die Diffusion ist umso ausgeprägter, je geringer das Molekulargewicht des PDMS ist. Die Füllstoffpartikel verbleiben während der gesamten Lebensdauer an der Grenzfläche, da sie aufgrund ihrer Partikelgröße nicht in die angrenzenden Feststoffe eindringen können [Gro91; Hua18; Per87; Suh00; Yan20].
Alternativ wird die Verwendung von Silikongel anstelle von Schmierfett untersucht, welches aufgrund seiner niedrigen Vernetzungsdichte eine geringe Ölabscheidung bei guter Verarbeitbarkeit aufweist [Che20b].

1.2.4 Wechselwirkungen zwischen Polymeren und Schmierfetten

Im Rahmen dieser Arbeit werden Wechselwirkungen zwischen den polymeren festen Isoliermaterialien an der Grenzfläche zwischen Kabel und Garnitur und dem verwendeten Schmiermittel untersucht. Diese werden gemäß DIN 50035 den äußeren Alterungsursachen zugerechnet [DIN12]. Die resultierenden Alterungsvorgänge sind physikalisch-chemischer Art, das bedeutet, eine Streckung und Spaltung von Molekülketten in den Polymeren ist als Folge der Entmischung des Schmierfettes und anschließender Diffusion der flüssigen Phase in die Feststoffe möglich. Wechselwirkungen zwischen Schmierfett und Feststoff wurden bisher experimentell sowohl anhand von SiR als auch VPE untersucht.
In Experimenten mit Materialproben aus SiR, die in Silikonfett gelagert werden, kann ein Aufquellen des Elastomers und infolgedessen die Abnahme der elektrischen Festigkeit beobachtet werden. Dies ist schematisch in Abbildung 1-10 dargestellt. Durch das Eindiffundieren niedermolekularer Bestandteile aus dem Schmierfett in das SiR wird zunächst freies Volu-

men besetzt, sodass die molekulare Kettenbeweglichkeit eingeschränkt wird und die relative Permittivität des Materials abnimmt [Hu22; Li23]. Mit zunehmender Diffusion erfolgt eine Anlagerung von Fremdmolekülen sowie das Aufbrechen physikalischer Vernetzungsstrukturen, sodass sich das freie Volumen zwischen den Molekülketten und somit die Beweglichkeit sowie die relative Permittivität wiederum vergrößern [Yan20].

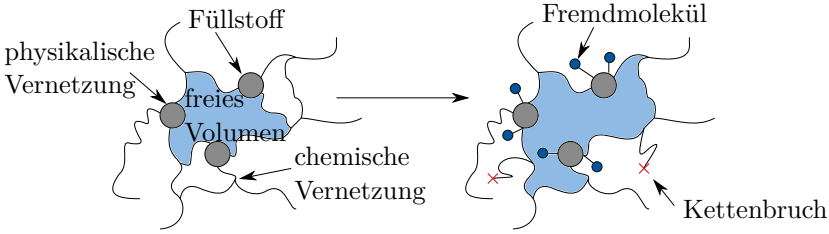


Abbildung 1-10: Veränderung der Materialstruktur von SiR durch Quellung in Silikonfett (nach [Yan20])

Die Diffusion von Silikonfett ist stärker ausgeprägt bei dünnen Materialproben und erhöhten Temperaturen. Außerdem steigt die Gewichtszunahme infolge von Schmierfettdiffusion mit zunehmender Zugbeanspruchung von Silikonproben, da diese mit einem höheren freien Volumen einhergeht [Wan21; Wan22; Zhu18]. Experimentell wird eine geringfügige Abnahme der Vernetzungsdichte des Silikons und eine veränderte Verteilung der Haftstellendichte nachgewiesen: die Anzahl tiefer Haftstellen, in denen sich Ladungsträger über lange Zeiträume aufhalten, nimmt ab, wohingegen die Anzahl flacher Haftstellen, welche zum Ladungstransport beitragen, zunimmt. Effektiv wird eine Zunahme der Ladungsträgermobilität im Silikongummi gemessen. Die elektrische Festigkeit von Silikon nimmt nach der Lagerung in Silikonfett zunächst zu und anschließend mit zunehmender Lagerungsdauer ab, die Einsetzspannung für *electrical treeing* sinkt kontinuierlich ab [Hua18; Nie18; Wan21; Yan20]. Auch in VPE kann in geringem Maße Diffusion niedermolekularer Bestandteile nachgewiesen werden. Die Diffusionsgeschwindigkeit hängt vornehmlich von der Viskosität, entsprechend der Kettenlänge, des Schmiermittels ab. Ferner wird lediglich eine geringe Gewichtszunahme beobachtet, wenn Silikonöle mit funktionellen Gruppen untersucht werden [Nie18; Wan22]. Zudem ist die Gewichtszunahme von SiR in Kontakt mit

Silikonöl mit funktionellen Gruppen nicht monoton, sondern weist einen doppelt exponentiellen Verlauf mit schnellem Anstieg innerhalb der ersten 10 Stunden und anschließender Abnahme auf. Dies wird mit einer Neuausrichtung der Moleküle sowie einem Abbau des Silikons durch die funktionellen Gruppen begründet [Nie18]. Für fluoriertes Schmierfett ist die Quellung weiter verringert, jedoch bedingt auch eine geringe Aufnahme aufgrund der erhöhten Polarität von Fluor eine Zunahme der dielektrischen Verluste [Hu22]. In diesem Fall wird auch eine Zunahme der relativen Permittivität beobachtet, da zwischen SiR und dem mit Schmierfett gefülltem freiem Volumen vermehrt Grenzflächenpolarisation auftritt [Li23; Wan21]. Ferner tritt bei Verwendung von fluoriertem Schmierfett auf Silikonfett vermehrt Grenzflächenladung an makroskopischen Grenzflächen auf, die nur langsam abgebaut wird und sich somit nachteilig auf die elektrische Feldverteilung auswirken kann [Jia22]
Die an der Materialgrenzfläche verbleibenden festen Bestandteile des Schmierfettes wirken dort als tiefe Haftstellen, die zum Aufbau von Grenzflächenladung beitragen [Dan97; Suh00].
Der Umfang an veröffentlichten Untersuchungen zum Einfluss der Diffusion niedermolekularer Bestandteile aus dem Schmiermittel auf die Raumladungsverteilung an dielektrischen Grenzflächen ist gering. Aufgrund unterschiedlicher experimenteller Vorgehensweisen sind die Ergebnisse ferner nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Entwicklungsprüfungen zum Nachweis der Kompatibilität der verwendeten Materialien sind für Energiekabelsysteme nicht standardisiert. Die Frage nach der Kompatibilität von Materialien in Kabelgarnituren wird als so wichtig erachtet, dass die CIGRE im November 2019 die Gründung einer Expertengruppe zu dem Thema initiiert hat. Die Herleitung von geeigneten Methoden für Entwicklungsprüfungen zum Nachweis der Kompatibilität wird dabei explizit als Zielsetzung vorgegeben [CIG19].

1.2.5 Standardisierung und Empfehlungen für Entwicklungsprüfungen zur Kompatibilität von Isoliermaterialien

Entwicklungsprüfungen für Isoliermaterialien zum Einsatz in HGÜ-Kabeln und -Garnituren werden im maßgeblichen Standard DIN IEC 62895 nicht

erwähnt; im Rahmen der nichtelektrischen Typprüfung sollen die mechanischen Eigenschaften der Kabelisolierung nach einer künstlichen Alterung entsprechend DIN EN 60811-401 und DIN EN 60811-501 gemessen werden und damit neben der Alterungsbeständigkeit die Verträglichkeit der im Kabel eingesetzten Materialien sichergestellt werden, sofern Proben aus dem gesamten Kabel entnommen werden [DIN18a; DIN19a; DIN19b]. Die genannten Prüfungen zielen jedoch nicht auf die Kompatibilität zwischen der Kabel- und Garniturenisolierung sowie dem verwendeten Schmierfett ab und haben für die im Rahmen dieser Dissertation zu beantwortende Fragestellung wenig Aussagekraft, da die mechanischen Eigenschaften keine direkten Rückschlüsse auf die elektrische Feldverteilung im Kabelsystem zulassen. Das Vorgehen zur thermischen Alterung bei einer Temperatur oberhalb der maximal zulässigen Leitertemperatur mit regelmäßigen Luftwechseln bildet die Bedingungen an der Grenzfläche zwischen Kabel und Garnitur nicht realitätsgetreu ab und kann eine verstärkte oxidative Alterung der Isoliermaterialien im Vergleich zum Betrieb hervorrufen.
Die Normenreihe DIN EN 60216 definiert den Temperaturindex für einzelne Isoliermaterialien auf Grundlage der Arrhenius-Gleichung, wobei hier ebenfalls die Temperatur als einzige Alterungsursache vorausgesetzt wird und Wechselwirkungen zwischen Materialien nicht betrachtet werden [DIN14]. Als Bewertungsgrößen für die fortschreitende Alterung werden wie in DIN EN 60811 lediglich mechanische Eigenschaften empfohlen [DIN06].
Eine generisches Verfahren zur Festlegung eines Bewertungsverfahrens für Elektroisoliersysteme wird in DIN EN 60505 definiert. Dabei wird als Bemessungsgröße die Lebensdauer des Isoliersystems festgelegt, d.h. es werden keine zeitabhängigen Veränderungen der elektrischen Materialeigenschaften betrachtet; vielmehr wird vorausgesetzt, dass die der Alterung zugrunde liegenden Mechanismen und Wechselwirkungen bereits vollständig bekannt sind und durch das zu wählende Prüfverfahren abgebildet werden [DIN11a].
In CIGRE TB 496 für Kabelsysteme mit Bemessungsspannungen bis 500 kV und TB 852 für Kabelsysteme mit Bemessungsspannungen bis einschließlich 800 kV werden mögliche Entwicklungsprüfungen diskutiert. Die Ausgestaltung der Prüfung liegt demnach in der Verantwortung des Herstellers, jedoch werden unter anderem die Messung elektrischer Eigenschaften wie

der Durchschlagfestigkeit, des Durchgangswiderstandes sowie Raumladungsmessungen empfohlen; ferner können Alterungseffekte aufgrund elektrischer oder thermischer Belastung oder aufgrund von äußeren Einflussfaktoren untersucht werden [CIG12a; CIG21; DIN19b]. Eine beispielhafter Ablauf für derartige Untersuchungen an einzelnen Materialien für HGÜ-Kabelsysteme und an Modellkabeln wird in TB 636 erläutert. Dabei wird in den frühen Entwicklungsstadien die Messung der Raumladungsverteilung sowie der elektrischen Leitfähigkeit empfohlen [CIG15]. Diese werden ebenfalls in TB 520 als maßgebliche Kennwerte für Kabelsysteme unter DC-Belastung aufgezählt. Für Grenzflächen werden darüber hinaus der Grenzflächendruck sowie die Rauheit der beteiligten Oberflächen als Einflussfaktoren für die Injektion von Ladungsträgern betont, welche wiederum die Raumladungsverteilung beeinflusst [CIG12b]. TB 210 empfiehlt allgemein für Entwicklungsprüfungen an Grenzflächenmodellen die Nachbildung der jeweils relevanten Betriebsbedingungen bzw. eine erhöhte Belastung der Probekörper zur beschleunigten Alterung. Hier wird als Ausfallmechanismus jedoch primär der elektrische Durchschlag in tangentialer Richtung als Folge von Teilentladungen in Hohlräumen beschrieben [CIG02].
Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit für Feststoffe ist nach DIN EN 62631-3-1 standardisiert. Dabei wird eine Reproduzierbarkeit von $> 50\%$ und eine Wiederholbarkeit von 20-50% angegeben [DIN17b]. DIN EN 62631-1 enthält weiterhin grundlegende Informationen zur Messung der Leitfähigkeit; insbesondere wird die große Anzahl möglicher Faktoren genannt, welche die Messung beeinflussen können, darunter die Messdauer, Umgebungstemperatur sowie die elektrische Feldstärke. Ferner wird eine Konditionierung der Probekörper empfohlen, um weiterhin Effekte aufgrund von Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt der Proben ausschließen zu können [DIN11b]. IEC TS 62758 liefert Hinweise zur Kalibrierung von Messsystemen zur akustischen Raumladungsmessung sowie zur Messdatenauswertung [IEC12]. In TB 288 wird der physikalische Hintergrund der Methode detaillierter beschrieben und auf dieser Grundlage Vorschriften und Hinweise zur Auslegung eines geeigneten Prüfstandes abgeleitet [CIG06].
Zusammenfassend ist die Bewertung der Kompatibilität von Isoliermaterialien in Garnituren für HGÜ-Kabel nicht standardisiert, sodass die Ent-

wicklung einer Untersuchungsmethode als Teilziel dieser Arbeit in Kapitel 3 hergeleitet wird.

1.3 Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag

Die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Kabelisolierung, Garnitur und Schmierfett sowie deren Einfluss auf die Materialparameter, welche die Ladungstransportprozesse in Polymeren und an polymeren Grenzflächen beschreiben, stehen im Fokus dieser Arbeit. Es werden die folgenden Forschungsfragen behandelt:

- Wie lassen sich Wechselwirkungen an makroskopischen Isolierstoffgrenzflächen und deren Auswirkungen auf die Ladungsverteilung im Betrieb vergleichbar und reproduzierbar experimentell untersuchen?
- Wie wirken sich diese Wechselwirkungen auf den Ladungstransport sowie Polarisation und Raumladungsaufbau an den untersuchten Grenzflächen aus?
- Wie können etablierte Modelle zur Beschreibung von Ladungstransportprozessen auf Materialgrenzflächen angewendet werden?

Als wissenschaftliche Beiträge resultieren somit nach Beantwortung dieser Fragen:

- Eine Untersuchungsmethodik für die experimentelle Bewertung der Kompatibilität von Isoliermaterialien für HGÜ-Kabel und Kabelgarnituren; diese Methode wird auf Basis der in Kapitel 2 erläuterten Grundlagen in Kapitel 3 hergeleitet und exemplarisch angewendet.
- Ein erweitertes Verständnis der Auswirkungen von Materialwechselwirkungen auf den Ladungstransport entlang der Materialgrenzfläche; dies ergibt sich aus den Ergebnissen, die unter Anwendung der zuvor entwickelten Untersuchungsmethode gewonnen und in Kapitel 4 diskutiert werden.
- Aus den Erfahrungen bei der Durchführung von exemplarischen Untersuchungen mit der entwickelten Methodik werden in Kapitel 5 Empfehlungen zur Durchführung von Entwicklungsprüfungen für die

Auswahl von Materialkombinationen zur Anwendung in Isoliersystemen für HGÜ-Kabelsysteme abgeleitet.

2 Grundlagen

Dielektrika im elektrischen Feld unterliegen unterschiedlichen Polarisationsprozessen, die im Falle einer veränderlichen elektrischen Belastung wirksam werden und mit zunehmender Frequenz schrittweise aussetzen. Je nach Höhe der elektrischen Feldstärke werden mit Abklingen des Polarisationsstroms verschiedene Ladungstransportmechanismen wirksam, die auf dem Bändermodell für ideale Einkristalle basieren und für polymere Isoliermaterialien adaptiert werden können. Im Allgemeinen werden dabei bei niedrigen Feldstärken Eigen- und Ionenleitung beobachtet, wohingegen bei hohen Feldstärken Ladungsträger aus den Elektroden ins Dielektrikum injiziert werden und den Ladungstransport dominieren. Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Stromdichte, der angelegten äußeren Spannung sowie der Temperatur lassen sich durch unterschiedliche diskutierte Modellvorstellungen abbilden. Ferner werden im folgenden Kapitel die grundlegenden Zusammenhänge im Bereich der Oberflächenphysik erläutert, welche für die vorliegende Arbeit relevant sind. Der Fokus liegt zunächst auf der Charakterisierung von Oberflächen anhand ihrer Rauheit und Oberflächenenergie. Anschließend werden Permeationsvorgänge beschrieben.

2.1 Polarisationsmechanismen in Polymeren

Ortsfeste Ladungsträger in polymeren Isoliermaterialien erfahren unter Einwirken eines elektrischen Feldes eine relative Verschiebung gegeneinander, das Material wird polarisiert. Es werden fünf Polarisationsmechanismen unterschieden [Bly05]:

- Grenzflächenpolarisation: Ladungsträger sammeln sich an Grenzflächen zwischen Materialien unterschiedlich hoher elektrischer Leitfähigkeit (s. Kapitel 1.2.1)
- Orientierungspolarisation: polare Moleküle und Molekülgruppen werden zu elektrischen Dipolen ausgerichtet
- Gitterpolarisation: unterschiedlich geladene Gitterbausteine eines Kristallgitters werden gegeneinander verschoben

- Atompolarisation: unterschiedlich geladene Atome werden gegeneinander verschoben
- Elektronenpolarisation: die Elektronenwolke innerhalb eines Atoms wird gegen den Atomkern verschoben

Die gesamte elektrische Polarisation eines Materials setzt sich aus den verschiedenen Polarisationsmechanismen zusammen, wobei je nach Materialstruktur nicht in jedem Material alle der genannten Mechanismen wirksam werden. Infolge dessen entsteht ein zusätzliches, dem äußeren elektrischen Feld entgegengerichtetes Dipolfeld, sodass

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 \varepsilon_r E. \tag{2-1}$$

Die elektrische Polarisation P kann somit unter Verwendung der materialspezifischen relativen Permittivität ε_r ausgedrückt werden:

$$P = \varepsilon_0 E(\varepsilon_r - 1). \tag{2-2}$$

Die relative Permittivität im Vakuum beträgt $\varepsilon_r = 1$ und ist bei Anwesenheit von Materie größer als 1. Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Polymere mit symmetrisch angeordneten, unpolaren Molekülen, in denen keine Orientierungspolarisation auftritt, gilt $\varepsilon_r = 2...3$ [Bly05; Hip95; Jon83; Kit05].
Mit zunehmender Temperatur wird zunächst eine Zunahme der relativen Permittivität aufgrund einer erhöhten Beweglichkeit der Dipole beobachtet, bevor aufgrund von erhöhter Stoßwahrscheinlichkeit bei weiterer Temperatursteigerung die relative Permittivität abnimmt. Die relative Permittivität weist ferner eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit (Dispersion) auf, wie in Abbildung 2-1 dargestellt. Diese ist auf die mechanische Trägheit der Polarisation zurückzuführen, wobei die beschriebenen Polarisationsmechanismen abhängig von der Größe der jeweils ausgerichteten Dipole stufenweise aussetzen, sobald die Dipole dem elektrischen Feld nicht mehr folgen können. In den Übergangsbereichen nimmt der dielektrische Verlustfaktor $\tan(\delta)$ als Maß für die dielektrischen Verluste lokale Maximalwerte an [Bly05].

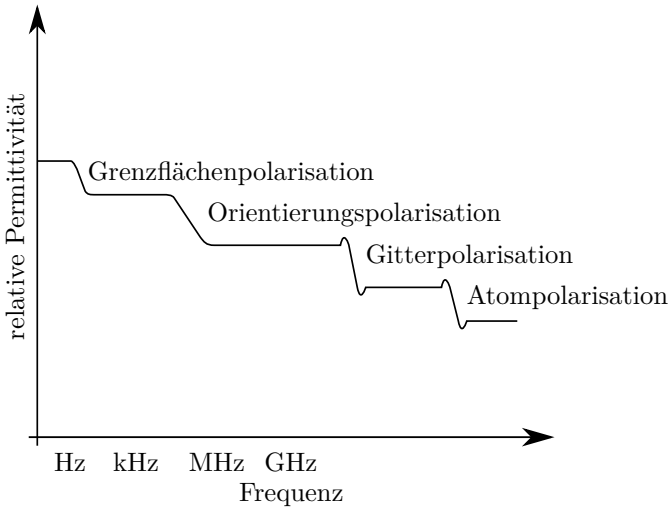


Abbildung 2-1: Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität (nach [Jon83])

Im Zeitbereich fließt in einem Dielektrikum, das elektrisch mit einer zeitlich veränderlichen Feldstärke $E(t)$ beaufschlagt wird, die Stromdichte

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\delta D(t)}{\delta t} = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \frac{\delta E(t)}{\delta t} + \frac{\delta P(t)}{\delta t} \tag{2-3}$$

Dem Leitungsstrom ist der Verschiebungsstrom überlagert, die sich aus dem Vakuum-Verschiebungsstrom und dem Polarisationsstrom zusammensetzt. Der Polarisationsstrom wiederum ergibt sich als Summe aus den verschiedenen im betrachteten Material wirksamen Polarisationsmechanismen. Der Ladestrom sowie die Elektronen- und Atompolarisation sind im Allgemeinen aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit messtechnisch nicht erfassbar und werden als Dirac-Impuls modelliert, sodass Formel 2-3 wie folgt umformuliert werden kann:

$$J(t) = \sigma E(t) + \varepsilon_0 E(t)(\varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)) \tag{2-4}$$

ε_∞ entspricht dabei der relativen Permittivität bei unendlich hoher Frequenz. Die dielektrische Sprungantwort $f(t)$ folgt laut Debye im Allgemeinen einem

abklingenden exponentiellen Verlauf gemäß

$$f(t) \propto exp(-\frac{t}{\tau}) \tag{2-5}$$

Experimentell wird für Polymere jedoch eine Zeitabhängigkeit gemäß der Curie-von Schweidler Funktion

$$f(t) \propto t^{-n} \tag{2-6}$$

beobachtet, wobei $0 < n < 1$ [Deb29; Sch07]. Bei ausreichend hoher elektrischer Feldstärke tritt zusätzlich Injektion von Ladungsträgern auf, sodass der monoton abfallende Verlauf des Stroms durch eine Wurzelfunktion überlagert wird, s. auch Kapitel 2.2.2 [Tey23].

2.2 Injektion und Transport von Ladungsträgern

Wie bereits in Abschnitt 1.2.1 erwähnt, wird zur Beschreibung von Ladungstransportprozessen in Polymeren das Bändermodell, welches ursprünglich zur Beschreibung kristalliner Strukturen entwickelt wurde, modifiziert. Gemäß dem Bändermodell stellen die reellwertigen Lösungen der Schrödinger-Gleichung für die vorhandenen Elektronen erlaubte Zustände dar, die für benachbarte Moleküle quasi-kontinuierliche Energiebänder ausbilden. Die Breite dieser Bänder beträgt für Polymere 0,1-0,5 eV. Für den Transport von Ladungsträgern relevant sind dabei das Valenzband W_V sowie das Leitungsband W_L. Hierbei bezeichnet das Valenzband das für $T = 0$ K höchste mit Elektronen besetzte Energieband, das Leitungsband das niedrigste unbesetzte Energieband. Dazwischen befindet sich das Fermi-Niveau W_f, welches den für $T > 0$ K mit 50% Wahrscheinlichkeit mit Elektronen besetzten Zustand beschreibt. Der Bandabstand W_g zwischen Leitungs- und Valenzband bezeichnet die Energiemenge, die notwendig ist, um ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband zu heben. Er beträgt für Isolierstoffe mehr als 2 eV, sodass die Elektronendichte n_e im Leitungsband entsprechend klein ist. Die beschriebenen Zusammenhänge sind schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt [Dis92; Tey05].
Maßgeblich für die elektrische Leitfähigkeit in Polymeren sind also ex-

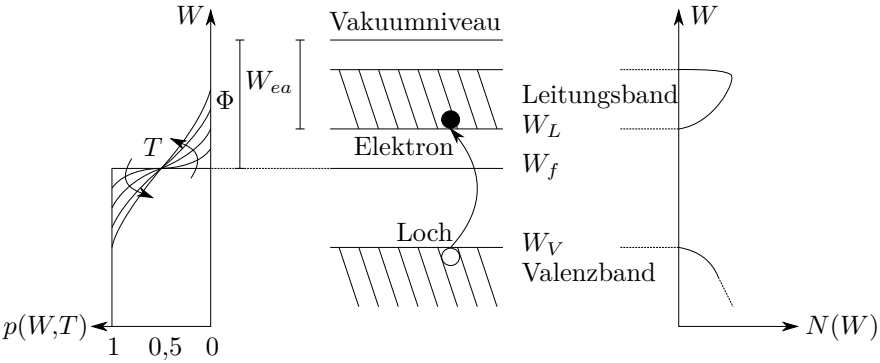


Abbildung 2-2: Bändermodell für ideale Einkristalle (nach [Dis92])

trinsische Ladungsträger. Darunter werden aus den Elektroden injizierte Ladungsträger, dissoziierte Ionen sowie aus Haftstellen freigesetzte Elektronen zusammengefasst. Derartige Haftstellen werden zur Beschreibung der amorphen Bereiche in teilkristallinen Polymeren eingeführt und bezeichnen lokalisierte Bereiche in der verbotenen Zone zwischen Valenz- und Leitungsband, in denen die Schrödinger-Gleichung reellwertige Lösungen annimmt, in denen sich also Elektronen mit einer Wahrscheinlichkeit $p > 0$ aufhalten können. Haftstellen (englisch: *traps*) leisten einen negativen Beitrag zur effektiven Elektronenbeweglichkeit, solange Elektronen dort gebunden sind und somit nicht für den Ladungstransport zur Verfügung stehen. Dies wird durch den Korrekturfaktor θ ausgedrückt, welcher das Verhältnis der Elektronendichte im Leitungsband n_e und der Elektronendichte in Haftstellen n_H für das Energieniveau W_H beschreibt [Dis92]:

$$\theta = \frac{n_e}{n_H} = \frac{N_{\text{eff}}}{N_H} \exp\left(-\frac{W_L - W_H}{kT}\right) = \frac{N_{\text{eff}}}{N_H} \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) \tag{2-7}$$

Mit der effektiven Zustandsdichte N_{eff}, der effektiven Haftstellendichte N_H auf dem Energieniveau W_H und der Haftstellentiefe ΔW.
Haftstellen werden gemäß ihres Energieniveaus in flache und tiefe Haftstellen eingeteilt, wobei die Verweildauer t_H von Ladungsträgern mit der Haftstellentiefe korrespondiert. Für flache Haftstellen < 1 eV liegt die mittlere Verweildauer im Bereich 10^{-13} s bis 10^{-11} s, sodass diese zum Ladungstransport

beitragen. Elektronen können sich hierbei durch Hüpf- oder Tunnelprozesse zwischen Haftstellen bewegen oder durch thermische Anregung aus einer flachen Haftstelle in das Leitungsband gelangen. Demgegenüber werden für tiefe Haftstellen ($\geq$ 1 eV) Verweildauern von mehr als 500 s angegeben, die mit zunehmender Temperatur und elektrischer Feldstärke abnehmen. Bei hohen Temperaturen können somit zusätzliche Ladungsträger aus den tiefen Haftstellen befreit werden und am Ladungstransport teilnehmen [Bla01; Meu00; Tey05]. Die beschriebene Materialstruktur eines teilkristallinen Dielektrikums ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

Haftstellen werden mit chemischen und physikalischen Fehlstellen im Material assoziiert, wobei im Allgemeinen chemische Fehlstellen als tiefe und physikalische Fehlstellen als flache Haftstellen wirken. Eine Ausnahme bildet für VPE das Vernetzungsnebenprodukt Cumylalkohol, welches ebenfalls flache Haftstellen ausbildet, wohingegen Acetophenon und α-Methylstyrol tiefe Haftstellen verursachen. In teilkristallinen Polymeren bilden ferner Grenzflächen zwischen amorphen und kristallinen Regionen tiefe Haftstellen aus [Meu00; Tey05].

Raumladung, die sich in tiefen Haftstellen bildet, wird unter Gleichspannung aufgrund der resultierenden lokalen Feldüberhöhung als wesentliche Ursache für elektrische Alterung in Polymeren angesehen. Gleichzeitig verändert sich infolge von Alterung, beispielsweise aufgrund von elektrischer oder thermischer Beanspruchung, die Materialstruktur von polymeren Isoliermaterialien, sodass die Haftstellendichte und -tiefe in gealtertem Material von der in neuwertigem Material abweicht [Dis92; Dis97; Mon19; Zha95]. Im Anfangsstadium der Alterung unter erhöhter Temperatur und bei Kontakt mit Luftsauerstoff bedingt Oxidation an der Materialoberfläche die Bildung von *surface states*, die als tiefe Haftstellen agieren, sodass weniger Ladungsträger von der Oberfläche ins Material gelangen können. Mit zunehmender Alterung wird hingegen eine höhere effektive Leitfähigkeit gemessen, die mit einer Zunahme flacher Haftstellen im Material erklärt werden kann. Der Übergang zwischen diesen beiden Phasen elektro-thermischer Alterung findet bei PE innerhalb einiger Stunden bis Tage bereits bei Alterungstemperaturen ab 90 °C statt [Li16; Liu17; Tan17].

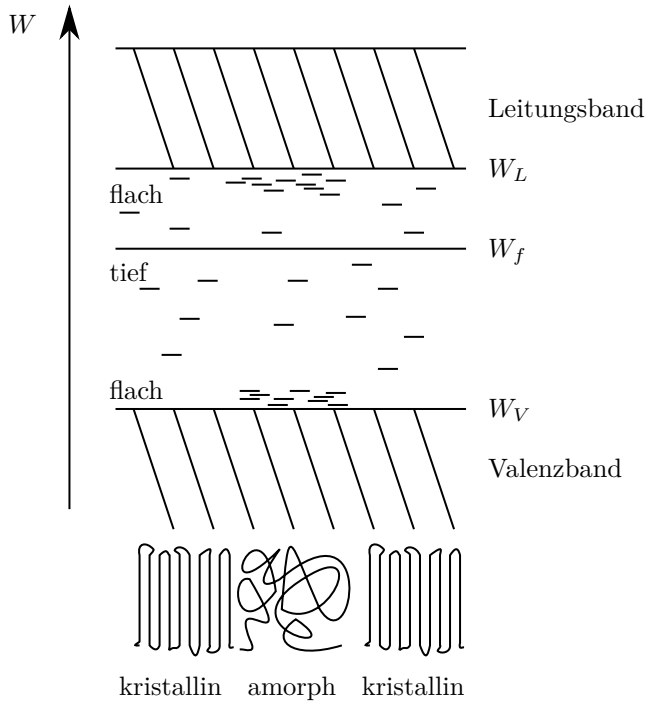


Abbildung 2-3: Energiebändermodell mit Haftstellen in teilkristallinen Strukturen (nach [Dis92])

2.2.1 Ladungstransport bei niedrigen Feldstärken

Bei niedrigen elektrischen Feldstärken wird Eigenleitung und Ionenleitung in Polymeren beschrieben.

Eigenleitung Entsprechend dem ohmschen Gesetz besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Leitungsstromdichte J sowie der elektrischen Feldstärke E:

$$J = \sigma E. \tag{2-8}$$

Die intrinsische Leitfähigkeit σ ergibt sich aus der Elektronendichte im Leitungsband eines Materials sowie deren Elementarladung und Beweglichkeit

und liegt für isolierende Werkstoffe bei etwa $10^{-70} - 10^{-30}$ S/cm. Unter Vernachlässigung von Haftstellenleitung liegt eine negative Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit aufgrund der mit der Temperatur steigenden Stoßwahrscheinlichkeit zwischen Elektronen und Kristallgitter vor. Der Beitrag der Eigenleitung zum Ladungstransport in Polymeren ist demzufolge vernachlässigbar. Vielmehr bestimmen dissoziierte Ionen, injizierte Ladungsträger oder aus Haftstellen freigesetzte Elektronen den Ladungstransport [Dis92; Kit05].

Ionenleitung Bei niedrigen elektrischen Feldstärken ist die Anzahl generierter Ladungsträger vernachlässigbar, sodass der Ladungstransport durch Ionenleitung dominiert wird. Die Ionenleitfähigkeit ergibt sich aus dem Arrhenius-Gesetz:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{W_a}{k_B T}\right) \tag{2-9}$$

mit der Aktivierungsenergie W_a und der Leitfähigkeit σ_0 für $T \to \infty$ [Dis92; Mot48; ODw73].

2.2.2 Ladungstransport bei hohen Feldstärken

Bei hohen elektrischen Feldstärken wird weiter unterschieden zwischen Leitungsmechanismen, die durch den Kontakt zwischen Elektroden und Dielektrikum kontrolliert werden und Leitungsmechanismen, die durch das Dielektrikum selbst kontrolliert werden.

Injektion Ladungsinjektion aus den Elektroden ist die Konsequenz einer verringerten Potentialbarriere zwischen Metall und Dielektrikum. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes wird die Potentialbarriere in ihrer Höhe proportional zum Abstand von der Elektrode abgesenkt. Zusätzlich bedingt die im Metall vorhandene Spiegelladung eine weitere Reduktion der Energie eines injizierten Elektrons, wie in Abbildung 2-4 dargestellt.

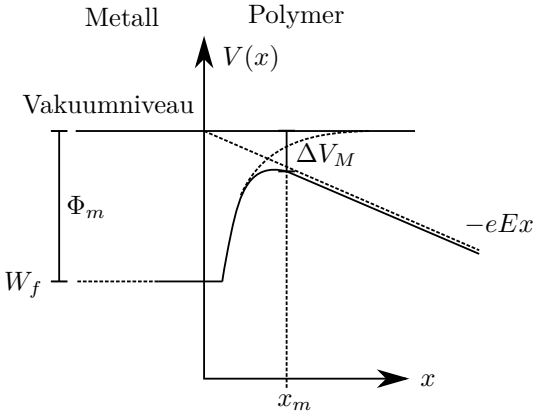


Abbildung 2-4: Modifizierte Potentialbarriere an Metall-Polymer-Grenzflächen infolge elektrischer Belastung (nach [Dis92])

Die potentielle Energie nimmt ihr Maximum im Abstand x_m von der metallischen Elektrode an, und wird dort um den Wert ΔV_M gegenüber dem Vakuumniveau reduziert. Der beschriebene Vorgang wird als Schottky-Injektion bezeichnet und tritt bei Feldstärken oberhalb von 1 kV/mm auf. Maßgeblich für die Injektion von Elektronen ist dabei die Beschaffenheit des Kontaktes zwischen Elektrode und Dielektrikum sowie die Austrittsarbeit des Metalls. Die Injektionsstromdichte beträgt

$$J = AT^2 exp(-\frac{\phi_m - \beta\sqrt{E}}{k_B T}) \tag{2-10}$$

mit der Richardson-Schottky-Konstante A, dem Schottky-Koeffizienten β und der Austrittsarbeit der Elektrode ϕ_m [Dis92]. Damit gilt für Schottky-Injektion:

$$\ln(\frac{J}{T^2}) \propto \sqrt{E} \tag{2-11}$$

Für sehr hohe elektrische Feldstärken oberhalb von 100 kV/mm tritt ferner Feldemission nach dem Nordheim-Fowler-Mechanismus auf. Elektronen können in diesem Fall die Energiebarriere durchtunneln und somit in das Dielektrikum injiziert werden [Dis92; ODw73].

Unter den durch das Dielektrikum gesteuerten Ladungstransportmechanismen sind der Effekt der raumladungsbegrenzten Stromdichte, die Hopping-Leitung sowie der Poole-Frenkel-Mechanismus zusammengefasst.

Raumladungsbegrenzte Stromdichte Unter der Annahme eines ohmschen Kontakts zwischen Elektrode und Dielektrikum setzt sich die Stromdichte aus einem intrinsischen und einem Injektionsterm zusammen [Dis92]:

$$J = \sigma E + \frac{9\varepsilon\mu U^2}{8d^3} \tag{2-12}$$

Mit der Ladungsträgerbeweglichkeit μ, der angelegten Spannung U und der Dicke des Materials d. Sofern die Struktur des Dielektrikums Haftstellen aufweist, trägt lediglich der Anteil θ der injizierten Ladungsträger zum Leitungsstrom bei, wohingegen der Großteil in Haftstellen gebunden wird. Der Injektionsterm wird somit um den Faktor θ ergänzt [Dis92]. Sobald die angelegte Spannung einen Schwellwert U_I erreicht, überschreitet der injektionsbedingte den aus Eigenleitung resultierenden Anteil der elektrischen Stromdichte. Dieser Schwellwert korrespondiert mit der in Kapitel 1.2.1 eingeführten Injektionsfeldstärke und berechnet sich durch Gleichsetzen von intrinsischer und Injektionsstromdichte zu

$$U_I = \frac{8\sigma d^2}{9\varepsilon\mu} \tag{2-13}$$

Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung kann oberhalb von U_I zunächst als quadratisch betrachtet werden. Bei weiterer Steigerung der Spannung werden zunehmend mehr Ladungsträger injiziert, bis deren Anzahl bei $U = U_{II}$ näherungsweise so groß ist wie die Anzahl der im Material vorhandenen Haftstellen. Alle weiteren injizierten Ladungsträger tragen somit vollständig zum Ladungstransport bei, d.h. $\theta = 1$, sodass die Stromdichte schlagartig ansteigt und im weiteren Verlauf wiederum quadratisch mit der Spannung zunimmt. Es ergibt sich der in Abbildung 2-5 dargestellte Verlauf mit

$$\ln(J) \propto \ln(U) \tag{2-14}$$

für Spannungen unterhalb von U_{II} [Dis92; Mot48].

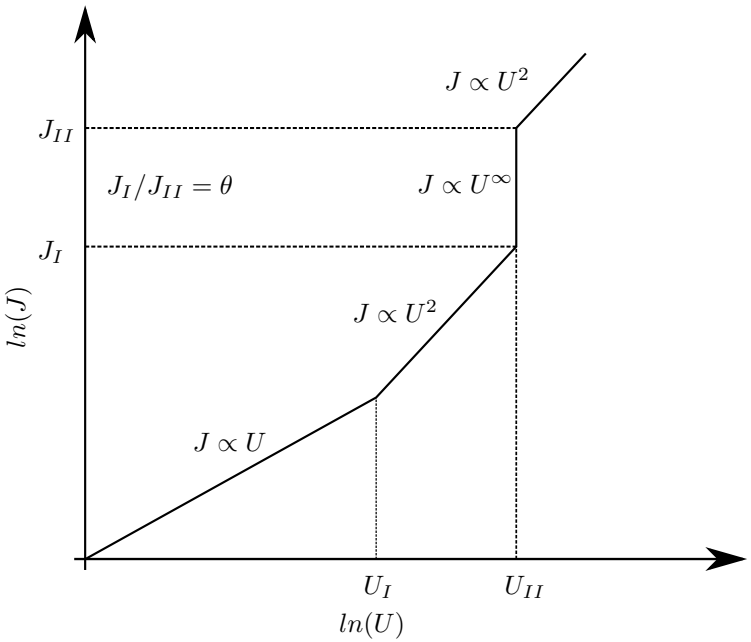


Abbildung 2-5: Stromdichte in Abhängigkeit von der angelegten Spannung (nach [Dis92])

- Eigenleitung: $0 < U < U_I, J \propto U$
- haftstellenbegrenzter Ladungstransport: $U_I < U < U_{II}, J \propto U^2$
- alle Haftstellen besetzt: $U = U_{II}$
- haftstellenfreier Ladungstransport: $U > U_{II}, J \propto U^2$

Sofern die Haftstellen unterschiedliche Energieniveaus belegen, kann keine diskrete zweite Schwellspannung U_{II} angegeben werden. Vielmehr ereignet sich ein rapider Anstieg der Stromdichte über einen kontinuierlichen Spannungsbereich, der in der Regel dem elektrischen Durchschlag des Dielektrikums vorausgeht [Dis05; Mon00]. Der Mechanismus der raumladungsbegrenzten Stromdichte ist stark abhängig von der Dicke des Dielektrikums

und wird vorwiegend an Folien mit Stärken im Bereich einiger zehn µm beobachtet [Dis92].

Hopping-Leitung Der Begriff Hopping-Leitung bezeichnet die thermische Anregung von in Haftstellen befindlichen Elektronen, die diese befähigt, die Potentialbarriere zur benachbarten Haftstelle durch Tunneln zu überwinden. Hopping-Leitung kann somit nur auftreten, sofern freie Haftstellen im Material verfügbar sind, also im Bereich des haftstellenbegrenzten Ladungstransports. Die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Ladungstransports setzt sich entsprechend zusammen aus der Wahrscheinlichkeit der thermischen Anregung und der Wahrscheinlichkeit des Tunnelprozesses. Die Ladungsträgerbeweglichkeit ergibt sich dann zu

$$\mu = \frac{2va}{E} \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T}\right) \sinh\left(\frac{eEa}{2k_B T}\right) \tag{2-15}$$

Mit der Escape-Frequenz v, dem Abstand zwischen benachbarten Haftstellen a und der Haftstellentiefe E_t [Bla01; Dis92; Tey05]. Mit $\sigma = qn\mu$, $J = \sigma E$ und $\sinh x \approx x$ für kleine x lässt sich daraus der Zusammenhang

$$\ln(\sigma) \propto \frac{1}{T} \tag{2-16}$$

ableiten.

Poole-Frenkel-Mechanismus Der Poole-Frenkel-Mechanismus beschreibt die Generation von Ladungsträgern im Dielektrikum aus Donatoren bzw. Akzeptoren. Dabei handelt es sich um Zustände nahe dem Leitungsband (Donatoren) bzw. Valenzband (Akzeptoren), welche durch thermische Anregung ionisiert werden und infolgedessen Elektronen abgeben (Donatoren) oder aufnehmen (Akzeptoren) können, die im Folgenden für den Ladungstransport zur Verfügung stehen. Ein befreites Elektron verfügt aufgrund der zwischen ihn und dem ionisierten Donator wirkenden Coulomb-Kraft über

eine mit dem Abstand zum Donator linear abfallende potentielle Energie:

$$E_{pot}(r) = \frac{-e^2}{4\pi\varepsilon r} \tag{2-17}$$

Diese wird durch Einwirkung eines elektrischen Feldes in Feldrichtung abgesenkt, sodass das freigesetzte Elektron unter erhöhter Wahrscheinlichkeit in das Leitungsband gelangen kann. Hier ist ebenfalls eine Hopping-Bewegung möglich. Der resultierende Energiebandverlauf verhält sich analog zu der zuvor beschriebenen Thermo-Emission von Elektronen aus dem Leiter gemäß dem Schottky-Mechanismus. Der resultierende Potentialverlauf ist in Abbildung 2-6 skizziert.

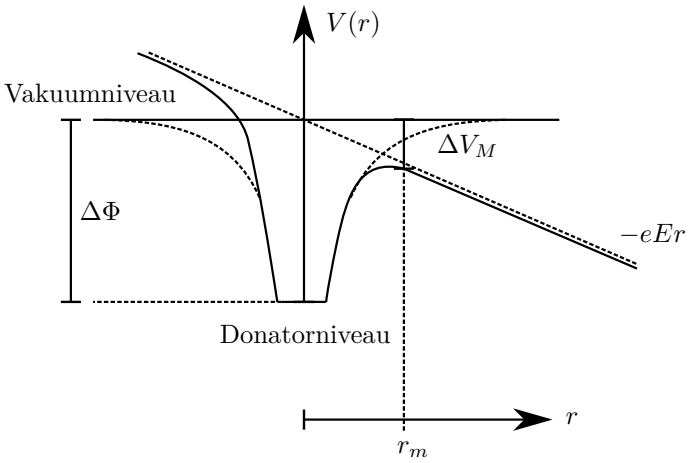


Abbildung 2-6: Potentielle Energie eines Elektrons in der Umgebung eines ionisierten Donators (nach [Dis92])

Es ergibt sich die effektive Ladungsträgerbeweglichkeit

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi k_B^2 T^2 \varepsilon}}\right) \tag{2-18}$$

mit der intrinsischen Ladungsträgerbeweglichkeit μ_0 [Dis92; Fre38; ODw73].

Für den Poole-Frenkel-Mechanismus gilt somit die Proportionalität

$$\ln(\sigma) \propto \sqrt{E}. \tag{2-19}$$

2.3 Oberflächenphysik

Die Beschreibung von Feststoffoberflächen aus elektrischer Perspektive anhand des Bändermodells ist in Kapitel 1.2.1 erläutert. Im Folgenden werden daher lediglich die physikalischen Grundlagen zum Verständnis von Oberflächen- und Grenzflächenphänomenen zusammengefasst. Zunächst werden die Oberflächenenergie und die Rauheit behandelt, welche den Kontakt zwischen zwei Feststoffoberflächen maßgeblich definieren. Anschließend wird der zwischen Kabel und Garnitur herrschende Anpressdruck mittels Kontaktmechanik beschrieben sowie die Grundlagen der Permeation, beispielsweise von Schmiermitteln an der Kabel-Muffen-Grenzfläche in die angrenzenden Feststoffe, erläutert.

2.3.1 Kontaktwinkel und Rauheit

Feststoffoberflächen bezeichnen im engeren Sinne in der Regel die Grenzfläche zwischen einem Feststoff und einem Gas, die sich durch eine thermodynamische freie Energie > 0 auszeichnet, welche jedoch im Streben hin zu einem thermodynamisch stabilen Zustand ihren Minimalwert annimmt. Die Eigenschaften dieser Grenzfläche sind richtungsabhängig, wobei sich in Normalrichtung ein Gradient der physikalischen Eigenschaften ergibt, wie in Abbildung 2-7 dargestellt. Die Breite der Grenzfläche ist dann definiert als der Abstand zwischen den beiden Punkten, an denen die betrachtete Eigenschaft den Wert der jeweiligen angrenzenden Vollmaterialien annimmt [Ada97; Bod06]. Wie bereits in Kapitel 1.2.2 erläutert, kann diese Breite näherungsweise durch die Summe der Oberflächenrauheiten der aufeinander treffenden Materialien beschrieben werden [Bod06].

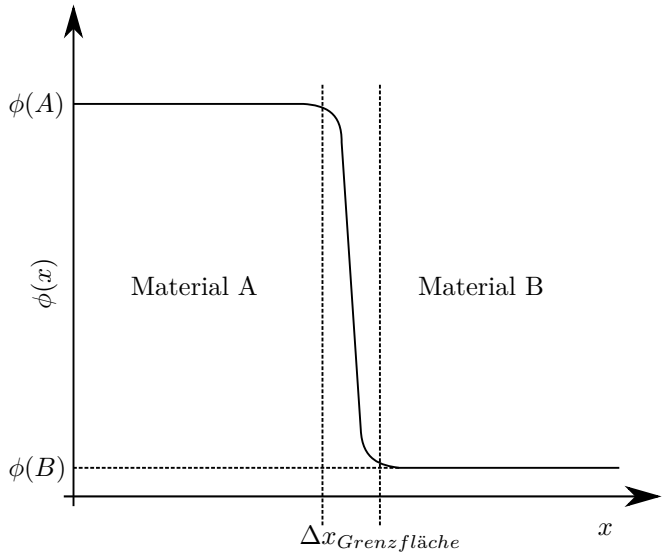


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung einer Materialgrenzfläche (nach [Bod06])

Die Energie E, die zum Erzeugen einer Oberfläche je Flächeneinheit A aufgewendet werden muss, ist die sogenannte Oberflächenenergie

$$\gamma = \frac{E}{A}. \tag{2-20}$$

Für Flüssigkeiten entspricht die Oberflächenenergie der bekannten Oberflächenspannung, die ursächlich für die Tropfenbildung ist und durch direkte Messungen quantifiziert werden kann. Im Gegensatz dazu lässt sich die Oberflächenenergie einer Feststoffoberfläche indirekt beispielsweise aus der Messung des Kontaktwinkels zwischen der Oberfläche und einem aufgebrachten Flüssigkeitstropfen ableiten, wie in Abbildung 2-8 dargestellt.

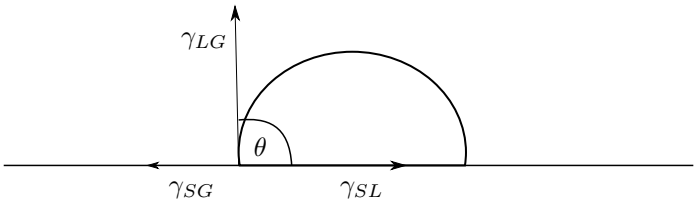


Abbildung 2-8: Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Grenzflächenspannungen an einer Feststoff-Gas-Grenzfläche (nach [Wen36])

Es gilt die Young'sche Gleichung

$$cos(\theta) = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \tag{2-21}$$

mit den Grenzflächenspannungen γ_{SG} zwischen dem Feststoff und dem umgebenden Gas, γ_{SL} zwischen Feststoff und der aufgesetzten Flüssigkeit und γ_{LG} zwischen Flüssigkeit und Gas [You05].
Die Oberflächenergie von Feststoffen kann im Allgemeinen durch wiederholte Messung des Kontakwinkels mit verschiedenen Prüfflüssigkeiten bestimmt werden. Aufgrund der unpolaren Methyl- bzw. Kohlenwasserstoffgruppen weisen Silikone sowie Polyethylen im Allgemeinen geringe Oberflächenenergien im Bereich 20-30 mN/m auf. Damit einher geht eine geringe Benetzbarkeit der jeweiligen Materialien sowie eine geringe Adhäsion [Kop17]. Nach Zisman lässt sich die Oberflächenenergie dann durch die Messung des Kontaktwinkels mit mindestens zwei unterschiedlichen Prüfflüssigkeiten grafisch bestimmen. Dabei wird der jeweilige $\cos(\theta)$ gegen die Oberflächenspannung der Flüssigkeit aufgetragen, wobei sich eine Gerade ergibt. Die Oberflächenenergie des betrachteten Feststoffes ist dann der Punkt, an dem $\cos(\theta) = 1$, was einem Kontaktwinkel von 0° entspricht [Zis64]. Für Feststoffe, die einen polaren Anteil aufweisen, kann die Oberflächenenergie beispielsweise gemäß der Methode nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble bestimmt werden [DIN20a; Kae70; Owe69; Rab71].
Die Oberflächenenergie von Feststoffen kann sich durch äußere Einwirkung verändern. Infolge von Wärmeeinwirkung, beispielsweise durch Abschleifen

der Kabelisolierung während der Muffenmontage, entstehen freie Radikale, an denen sich Sauerstoffatome aus der Umgebung bevorzugt anlagern. Die resultierenden Carbonylgruppen erhöhen wiederum die Oberflächenenergie des VPE [Doe18].
Makroskopisch werden Feststoffoberflächen durch ihre Rauheit charakterisiert. Dabei gibt die mittlere arithmetische Höhe S_a einer Oberfläche den Höhenunterschied von lokalen Erhebungen oder Tälern zum arithmetischen Mittel der Oberfläche gemäß

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| \, dx \, dy \tag{2-22}$$

an. Die mittlere quadratische Höhe S_q bezeichnet das quadratische Mittel mit

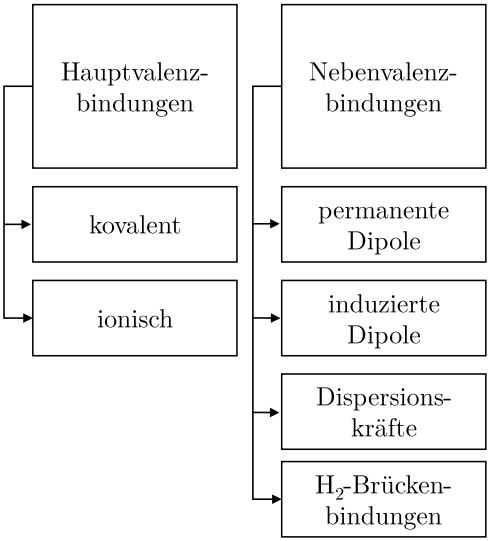
$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) \, dx \, dy}. \tag{2-23}$$

Schließlich bezeichnen die Parameter S_p, S_v und S_z den Wert der höchsten Spitze, der niedrigsten Senke sowie die Summe der beiden zuvor genannten [DIN20b].
Im Allgemeinen weisen Oberflächen mit zunehmender Rauheit größere Oberflächenenergie auf [Ada97]. Sofern jedoch die Feststoffoberfläche eine geringe Oberflächenenergie aufweist ($\cos(\theta) > 90°$), wird mit zunehmender Rauheit ein größerer Randwinkel gemessen, falls die Unebenheiten in der Größenordnung von wenigen Mikrometern liegen. Diese Beobachtung entspricht dem aus der Natur bekannten Phänomen des Lotuseffekts. Der gemessene Kontaktwinkel wird dann gegenüber dem Kontaktwinkel einer glatten Oberfläche desselben Materials um den Faktor r erhöht, welcher das Verhältnis der tatsächlichen Oberfläche (Oberfläche unter Einbeziehung der Mikrospitzen) zur geometrischen Oberfläche (Oberfläche entsprechend der Kantenlängen der betrachteten Materialprobe) angibt [Wen36].

2.3.2 Kontaktmechanik und Permeation

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten dielektrischen Grenzflächen zwischen Kabelisolierung und Garnitur bilden sich über mehrere Mikrometer

hinweg aus, sodass die bekannten chemischen Bindungskräfte mit ihrer Reichweite im Sub-Nanometerbereich (s. Abbildung 2-9) keine Wirkung entfalten.



Bindungs-energie	40 – 80 kJ/mol	2 – 20 kJ/mol
Reichweite	0,075 – 0,3 nm	0,3 – 1,0 nm

Abbildung 2-9: Einteilung der chemischen Bindungen (nach [Ehr11])

Die beteiligten Feststoffe müssen somit physikalisch durch Ausübung eines Anpressdrucks miteinander in Kontakt gebracht werden. Der Anpressdruck ergibt sich dabei für die vorliegende zylindrische Anordnung aus den geometrischen Abmessungen von Kabel und Garnitur sowie aus den mechanischen

Eigenschaften von Kabelisolierung und Garnitur vereinfacht zu:

$$p = \frac{U}{\frac{R}{E_0}\left(\frac{r_0^2 + R^2}{r_0^2 - R^2} + \vartheta_0\right) + \frac{R}{E_i}\left(\frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} + \vartheta_i\right)} \tag{2-24}$$

Dabei bezeichnet U die Differenz aus dem Außenradius R der Kabelisolierung und dem Innenradius der Kabelgarnitur (sog. Übermaß), E_0 und E_i den Elastizitätsmoduln der Garnitur beziehungsweise Kabelsiolierung und ϑ_0 sowie ϑ_i die jeweilige Querkontraktionszahl. r_0 ist der Außenradius der Kabelgarnitur und r_i der Innenradius der Kabelisolierung [DIN17a]. Mit $r_i = 0$ wird das Kabel vereinfacht als Vollkörper angenommen.
Der Anpressdruck gilt als maßgebliches Designkriterium bei der Auslegung von Kabelgarnituren sowohl in AC- als auch in DC-Anwendungen, da er wesentlich die elektrische Festigkeit in tangentialer Richtung bestimmt [Kan19; Kun00; Luo21]. Übliche Werte der tangentialen elektrischen Belastung im Betrieb von 5-10 kV/mm können experimentell von Materialgrenzflächen mit Anpressdrücken im Bereich von 0,02-1,16 MPa isoliert werden, wobei neben dem Grenzflächendruck die Elasizität der verwendeten Materialien, die entsprechenden Oberflächenrauheiten und die Verwendung von Schmiermittel die elektrische Festigkeit signifikant beeinflussen und die Durchschlagfestigkeit im Allgemeinen bei Gleichspannungsbelastung höher ist als an Grenzflächen unter Wechselspannungsbelastung [Kan19; Kun00; Zhu19a; Zhu19b].
Durch Berücksichtigung der Rautiefe R_{zI} der Kabelisolierung sowie R_{zA} der Garnitur ergibt sich das wirksame Übermaß [DIN17a]

$$U_w = U - 0{,}4 \cdot (R_{zA} + R_{zI}). \tag{2-25}$$

Die tatsächliche Kontaktfläche zwischen einem elastischen Körper mit rauer Oberfläche und einer glatten starren Ebene ist nach dem von Greenwood und Williamson entwickelten stochastischen Modell näherungsweise proportional zur wirkenden Normalkraft [Gre66]. Basierend darauf wurden verschiedene Vereinfachungen eingeführt, wobei aber der Zusammenhang zwischen tatsächlicher Kontaktfläche und Normalkraft weiterhin propor-

tional bleibt [Bus75; Car08; Car11; Gre06; Tho99; Nay71]. Erst das von Persson in 2001 entwickelte Modell behält seine Gültigkeit auch für große Anpressdrücke, sodass die tatsächliche Kontaktfläche anders als im Falle der oben genannten Modelle niemals größer wird als die geometrische Fläche [Per02; Per06; Per07; Yan08].
Um den Körper der Aufschiebemuffe auf der Kabelisolierung zu bewegen, muss gemäß den Amontonsschen Gesetzen die Reibungskraft F_R überwunden werden:

$$F_R = \mu F_N \tag{2-26}$$

mit dem Reibungskoeffizienten μ und der Anpresskraft F_N. Die Reibungskraft ist somit unabhängig von der Oberflächenrauheit und der Kontaktfläche der beiden Materialien, sofern die tatsächliche Kontaktfläche deutlich kleiner als die geometrische Kontaktfläche ist. Diese Bedingung ist für Elastomere oft nicht erfüllt, sodass dann die Reibungskraft mit der Anpresskraft zunimmt. Ferner steigt die Reibungskraft mit zunehmender Kontaktzeit an, sodass Kabelgarnituren nach langer Betriebsdauer weniger beweglich sind, was im Falle des polymeren Garniturenmaterials auf dessen viskoelastischen Eigenschaften zurückgeführt werden kann. Infolgedessen nimmt die Kontaktfläche mit der Zeit kontinuierlich zu [Pop15].
Durch Verwendung von Schmiermitteln wird die tangential wirkende Reibungskraft reduziert und gleichzeitig die in Normalrichtung wirkende Anpresskraft erhöht (sog. viskose Adhäsion), indem anstelle von trockener Reibung nun Flüssigkeitsreibung vorliegt. Für inkompressible Schmiermittel mit linear-viskosen Eigenschaften gilt bei quasistatischer Strömung die vereinfachte Navier-Stokes-Gleichung:

$$\eta \Delta \vec{v} = \boldsymbol{\nabla} p \tag{2-27}$$

mit der dynamischen Viskosität η, der Strömungsgeschwindigkeit $\vec{v}$ und dem Druck p in der Flüssigkeit. Sofern die Neigung zwischen der Kabel- und der Muffenoberfläche klein ist, ergibt sich damit für den Reibungskoeffizienten:

$$\mu \approx 2\sqrt{\frac{\eta v_0}{lp}} \tag{2-28}$$

mit der relativen Geschwindigkeit v_0, der Länge des Gleitkontaktes l und dem mittleren Druck $p = F_N/A$ im Kontaktgebiet. Mit zunehmendem Druck sinkt der Reibungskoeffizient, wobei dadurch auch die Spaltdicke zwischen den beiden Feststoffen, welche mit dem Schmiermittel gefüllt ist, abnimmt. Wenn der Anpressdruck so hoch ist, dass die Feststoffe nicht mehr ausschließlich mit dem Schmiermittel, sondern auch miteinander in Kontakt sind, geht die Flüssigkeitsreibung in Mischreibung über. Die spezifische Schmierfilmdicke λ, die durch den Quotienten aus der Schmierfilmdicke und der mittleren Oberflächenrauheit S_a beschrieben wird, liegt für Mischreibung im Intervall $0{,}2 < \lambda < 3$. Im Falle der Mischreibung erhöht sich der Reibungskoeffizient wieder, wobei das Verhältnis von Reibungskoeffizient und dem Parameter $\eta v_0/P$ durch die sogenannte Stribeck-Kurve ausgedrückt wird [Pop15; Str03].
Wie bereits in Kapitel 1.2.3 beschrieben, handelt es sich bei den üblicherweise verwendeten Schmierfetten um thixotrope Pasten, die somit nichtnewtonsche Eigenschaften aufweisen. Die Fließeigenschaften dieser Schmierfette werden dabei durch die Verwendung spezieller Füllstoffe eingestellt [Bac18; Gro91; Per87]. Im Gegensatz zu ungefüllten Schmierölen kann somit verhindert werden, dass das Schmierfett durch den Anpressdruck vollständig aus der Grenzfläche herausgepresst wird [Pop15].

Permeation und Diffusion Beim Kontakt des Schmierfetts mit den angrenzenden festen Isolierstoffen kann Permeation auftreten. Die niedermolekularen Bestandteile agieren in diesem Fall als Permeat. Sie lagern sich zunächst an der Feststoffoberfläche an (Adsorption), bevor sie durch die molekularen Zwischenräume diffundieren. Aufgrund der geringen Menge an Schmierfett und der großen Wanddicke von Kabelisolierung und Garnitur wird üblicherweise keine Desorption, also ein Austritt des Permeats auf der anderen Seite des Feststoffes beobachtet, sodass die Permeation im betrachteten Fall lediglich die Adsorption sowie die Diffusion umfasst [Dom12; Eye08]. Der Permeationskoeffizient P wird mit

$$P = DS \tag{2-29}$$

durch den Diffusionskoeffizienten D sowie den Löslichkeitskoeffizienten S ausgedrückt.
Für die Diffusion gilt entsprechend dem 1. Fickschen Gesetz im eindimensionalen stationären Fall:

$$J = -D\frac{\delta c}{\delta x} \tag{2-30}$$

mit der Teilchenstromdichte J, dem Konzentrationsgradienten $\delta c/\delta x$ und dem Diffusionskoeffizienten D. Für den nicht stationären Fall, in dem sich die Teilchenkonzentration infolge der Diffusion ändert, lässt sich mittels der Kontinuitätsgleichung das 2. Ficksche Gesetz ableiten:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \tag{2-31}$$

Eine mögliche Lösung für konstante Diffusionskoeffizienten D ergibt sich mit

$$c(x,t) = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}}\exp\left(-x^2/4Dt\right) \tag{2-32}$$

wobei M die ursprünglich vorhandene Stoffmenge beschreibt [Cra75]. Für einen plattenförmigen Probekörper, der einseitig in Kontakt mit einer Flüssigkeit ist, resultiert aus der Diffusion der Flüssigkeit in den Feststoff ein Flüssigkeitsgehalt gemäß

$$\frac{c(t)}{c_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}\exp\left(-\frac{(2k-1)^2 D\pi^2 t}{d^2}\right) \tag{2-33}$$

mit der Sättigungskonzentration c_∞ und der Dicke des Probekörpers d. Für $c(t)/c_\infty < 0.4$ kann angenommen werden, dass

$$\frac{c(t)}{c_\infty} = \frac{4}{d}\sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \tag{2-34}$$

sodass der Diffusionskoeffizient als Steigung aus der Geradengleichung bestimmt werden kann [Cra77].
Die Diffusionsgeschwindigkeit steigt mit zunehmender Temperatur und sinkt mit der Vernetzungsdichte sowie dem Kristallisationsgrad des Feststoffes sowie mit der Molekülgröße des Permeats [Dom12; Ehr11; Eye08]. In Expe-

rimenten mit Silikongummi und unterschiedlichen Schmierfetten wird die Sättigungskonzentration je nach Umgebungstemperatur und verwendeter Fettmenge nach wenigen Tagen bis Monaten erreicht [Hu22; Nie18; Wan22; Wan21].
Die Quellung der betrachteten Polymere entsprechend ihrem Löslichkeitskoeffizienten S ist ein physikalischer Prozess und wird den äußeren Alterungserscheinungen zugerechnet [Ehr11; Eye08]. Dabei verhindert die vernetzte Struktur sowohl des VPE als auch des SiR die vollständige Auflösung der Polymere durch das Schmierfett. Stattdessen bewirkt die Quellung eine Volumenvergrößerung sowie eine Weichmachung infolge der Streckung von Polymerketten [Dom12; Kol14]. Die Quellbarkeit eines Polymers nimmt mit seinem Vernetzungsgrad ab [Dom12; Eye08]. Die bekannten Auswirkungen von Quellung auf die elektrischen Eigenschaften von SiR sind in Kapitel 1.2.4 beschrieben.

3 Experimentelles Vorgehen

Auf Grundlage der in Kapitel 1 hergeleiteten Motivation sowie der in Kapitel 2 erläuterten physikalischen Zusammenhänge wird im Folgenden eine Versuchsmethodik zur Untersuchung der Wechselwirkungen an dielektrischen Isolierstoffgrenzflächen in Kabelmuffen entwickelt und beschrieben. Dabei werden zunächst Anforderungen an die Versuchsmethodik definiert, welche als Basis für die Parametrierung der experimentellen Alterung sowie der Auswahl, Durchführung und Auswertung der Messungen zur Charakterisierung des Alterungsverhaltens und der Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Materialien dienen.

3.1 Anforderungen

Zunächst werden die zentralen Anforderungen an das zu entwickelnde Prüfverfahren sowie an die Auswertemethode definiert:

- Die Implementierung des Verfahrens soll möglichst **unkompliziert** und die Durchführung der Experimente soll **kosten- und zeiteffizient** sein, um mögliche systematische Fehlerquellen zu verringern und um eine Vielzahl möglicher Materialkombinationen mit vertretbarem Aufwand untersuchen zu können.
- Sofern **Standards** für die einzelnen Prüfungen existieren, sollen diese angewendet werden, sodass bereits bestehende Prüfaufbauten verwendet werden können sowie Vergleichbarkeit mit bereits durchgeführten Experimenten gegeben ist.
- Das Verfahren soll geeignet sein, Materialveränderungen aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den festen Dielektrika und den verwendeten Schmierfetten zu untersuchen; es sollen dabei idealerweise **keine zusätzlichen Alterungsvorgänge** ausgelöst werden.
- Das Verfahren soll geeignet sein, Veränderungen in den ausgewählten Materialparametern mit der Zeit beobachten zu können, um die **Dynamik der Alterung** abbilden zu können.

- Die Bedingungen während der Alterung der Probekörper sowie während der Messungen zur Charakterisierung der fortschreitenden Alterung sollen denen im Betrieb möglichst ähnlich sein, sodass die **Ergebnisse übertragbar** sind.
- Die Experimente sollen eine möglichst hohe **Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit** aufweisen, und die Auswertemethode soll **robust** gegenüber Ausreißern sein.

3.2 Versuchsablauf

Basierend auf den zuvor beschriebenen Anforderungen wird der in Abbildung 3-1 dargestellte Versuchsablauf definiert. Die kursiv geschriebenen Parameter werden dann in exemplarisch durchgeführten Versuchsreihen variiert. Es werden Materialproben aus VPE sowie aus SiR verwendet, die jeweils die Kabel- und Muffenisolierung repräsentieren. Dabei wird die Oberflächenbehandlung der VPE-Prüflinge als Variationsparameter variiert, um den Einfluss auf das Alterungs- und das Ladungstransportverhalten zu ermitteln. Ferner werden unterschiedliche silikonbasierte Schmierfette auf der Grenzfläche zwischen VPE und SiR aufgetragen und somit der Einfluss von Unterschieden im Silikon sowie Art und Menge der Füllstoffe untersucht. Die Geometrie und Herstellung der Feststoffprüflinge sowie Details zu den Schmierfetten sind in Kapitel 3.3 beschrieben. Dort werden auch die nicht-elektrischen Messungen erläutert. Dabei handelt es sich um die Ermittlung der Dicke der einzelnen Materialprüflinge, um daraus abgeleitete Größen wie die elektrische Feldstärke für verschiedene Prüfspannungen zu messen, und um die Masse der Probekörper im Verlauf der Alterung, um die Diffusion der niedermolekularen Bestandteile aus den Schmierfetten in die Feststoffe zu evaluieren.
Die Bedingungen während der künstlichen thermischen Alterung der Materialproben werden in Kapitel 3.4 definiert. Dazu wird zunächst die im Betrieb an der Kabel-Muffen-Grenzfläche herrschende Temperatur simulativ ermittelt und ausgehend davon in Vorversuchen eine geeignete Alterungstemperatur und Dauer sowie sinnvolle Entnahmezeitpunkte validiert.
Abschließend werden die durchgeführten elektrischen Messungen in Kapi-

tel 3.5 beschrieben. Dabei werden zunächst die verwendeten Prüfaufbauten erläutert und anschließend, erneut auf Basis von Simulationen, die Prüfspannungen festgelegt. Es wird eine Betriebsspannung von 525 kV, ausgehend von den in Deutschland geplanten Korridorprojekten (s. Kapitel 1.1) angenommen. Für jede der elektrischen Messungen wird die Reproduzierbarkeit sowie die Wiederholbarkeit und die Streuung der Ergebnisse in Vorversuchen ermittelt, um die Aussagekraft der in Kapitel 4 präsentierten Ergebnisse einordnen zu können. Ferner werden anhand der Vorversuche die Auswertung und Berechnung der abgeleiteten Größen exemplarisch durchgeführt. An den einzelnen Materialprüflingen werden dabei die relative Permittivität ε_r sowie die Stromdichte J gemessen. Die Stromdichtemessung erfolgt unter Variation der Prüfspannung U sowie der Umgebungstemperatur T. Somit können die in den Vorversuchen ermittelten Ergebnisse auf Übereinstimmung mit den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Ladungstransportmechanismen geprüft werden und anschließend durch Anwendung eines plausiblen Modells die entsprechenden Materialparameter berechnet werden. Darüber hinaus wird die Raumladungsverteilung ρ an kombinierten VPE-SiR-Prüflingen gemessen, sodass die Grenzflächenladung in Abhängigkeit der variierten Untersuchungsparameter ermittelt werden kann. Hier wird ebenfalls die Prüfspannung U variiert, um eine mögliche Abhängigkeit der Grenzflächenladung von der anliegenden Spannung zu untersuchen.

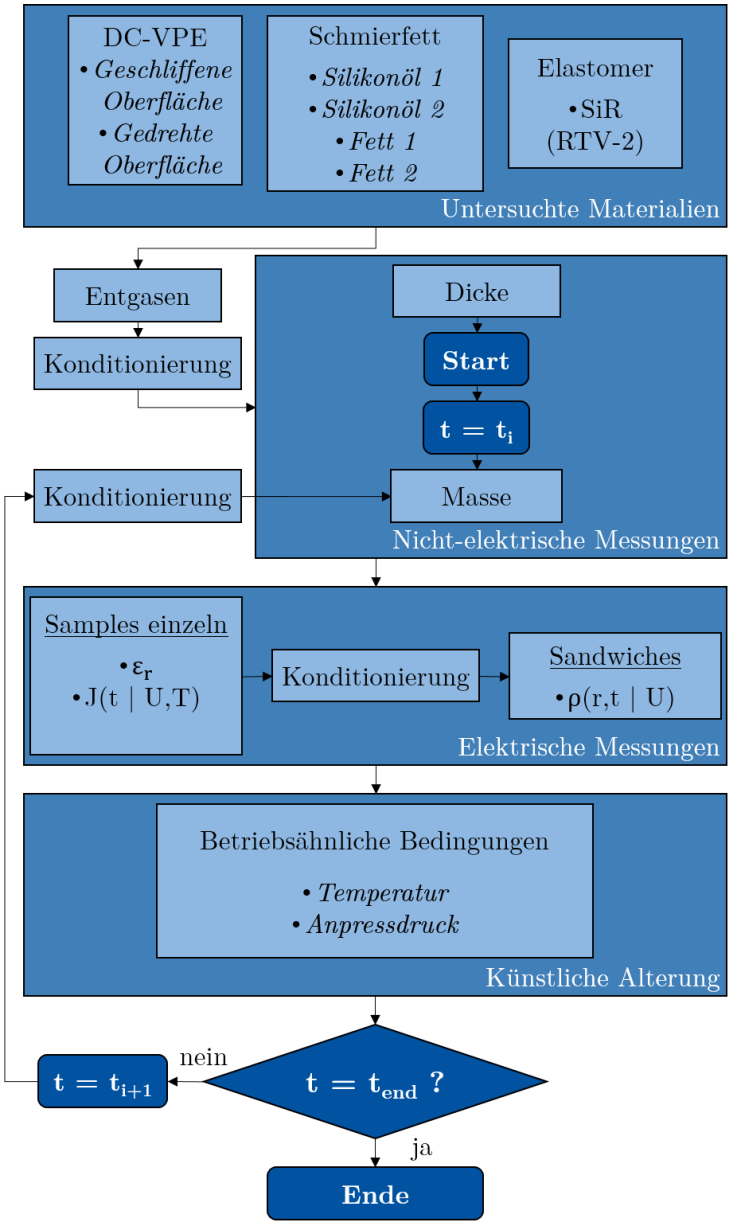


Abbildung 3-1: Versuchsablauf

3.3 Untersuchte Materialien und nicht-elektrische Messungen

Um den Anforderungen einer einfachen Implementation sowie standardisierten Prüfverfahren gerecht zu werden, werden plattenförmige Materialprüflinge untersucht. Diese werden mit den verschiedenen Schmierfetten in einer sogenannten Sandwich-Anordnung geschichtet, welche die Kabel-Muffe-Grenzfläche nachbildet (s. Abbildung 3-2).

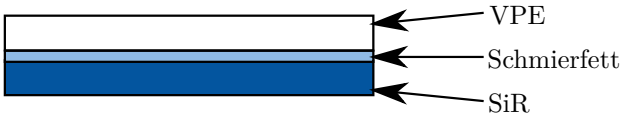


Abbildung 3-2: Schema Sandwich-Prüfling

Die quadratischen SiR-Platten mit einer Dicke von 1 mm und 100 mm Seitenlänge entsprechend [DIN17b; DIN18b] werden in der institutseigenen Materialverarbeitung des IAEW hergestellt. Es handelt sich um ein kommerziell verfügbares raumtemperaturvernetzendes Zweikomponentensystem, welches sich laut Hersteller durch seine geringe Viskosität und damit gute Verarbeitbarkeit auszeichnet [Wac21a]. Die beiden Komponenten werden unter Vakuum vermischt und die verwendete Gussform nach Eingießen des Kautschuks erneut vakuumiert, sodass hohlraumfreie Prüflinge mit definierter Geometrie resultieren.
Die plattenförmigen VPE-Prüflinge werden aus einem 320 kV HGÜ-Kabel gefertigt. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Kabelstück von 100 mm Länge vom Kabel abgesägt und anschließenden die äußeren Schichten bis auf die äußere Leitschicht händisch entfernt. Anschließend wird die freigelegte Kabelader längs halbiert und der Leiter entnommen, sodass ein U-förmiges Stück Kabelisolierung inklusive Leitschichten resultiert. Dieses wird für zwei Stunden bei einer Temperatur von 130 °C in einem Umluftofen erwärmt, wodurch das Material erweicht. Somit kann die Kabelisolierung mittels einer Presse zu einem Quader gepresst werden. Nach mindestens sechs Stunden Abkühlzeit wird der Quader aus der Presse entnommen und mittels einer Bandsäge in quadratische Platten mit 100 mm Seitenlänge und einer Dicke

im Bereich 0,5 mm bis 1 mm geschnitten. Um eine plane Oberfläche zu erreichen, werden die VPE-Platten nach dem Sägen zusätzlich abgedreht. Aufgrund der kurzen Erwärmungsdauer wird keine signifikante Alterung des VPE infolge der Prüflingsvorbereitung erwartet, zumal die Materialproben aus dem Inneren der Isolierung entnommen werden, sodass während der Erwärmung kein Luftkontakt besteht und somit keine Oxidation stattfindet [Tan17; Yan21].
Im Anschluss wird die VPE-Oberfläche mittels Schleifpapier händisch abgeschliffen. Dabei wird entsprechend der Empfehlung für EHV-Kabel eine Körnung von 1200 verwendet [CIG11]. Die Oberflächeneigenschaften der untersuchten Materialien werden im folgenden Kapitel 3.3.1 behandelt.
Es werden je zwei unterschiedliche Silikonöle und Schmierfette auf Silikonbasis verwendet, um die Unterschiede in der Zusammensetzung der Schmierfette zu untersuchen. Bei den Silikonölen handelt es sich um funktionelle Öle mit Phenyl-Gruppen, die sich lediglich in ihrer Kettenlänge bzw. Viskosität voneinander unterscheiden [Wac22; Wac20]. Im Folgenden wird das Öl mit der geringeren Viskosität von 500 mm^2/s als "Öl 1" und das Öl mit der höheren Viskosität von 1000 mm^2/s als "Öl 2" bezeichnet. Öl 2 weist somit eine um etwa 40% höhere mittlere Kettenlänge auf als Öl 1 [Dom12]. Die erste der beiden untersuchten Pasten, im Folgenden als "Fett 1" bezeichnet, basiert dabei auf dem Öl 1 und einem nicht näher benannten Feststoff, durch die im Vergleich zum Öl erhöhte Viskosität eingestellt wird [Wac21b]. Das zweite untersuchte "Fett 2" basiert ebenfalls auf Öl 1, weist jedoch im Vergleich zu Fett 1 einen anderen Füllstoff mit geringerem Anteil auf. Mit der Wahl der Öle und Fette lässt sich somit der Einfluss der Kettenlänge sowie von Art und Menge der Füllstoffe untersuchen.
Für die Durchführung der Versuchsreihen gemäß Abbildung 3-1 werden die Probekörper aus VPE und SiR nach der Herstellung und Oberflächenbehandlung zunächst mit Isopropylalkohol gereinigt und dann in einem Wärmeschrank (*IKA OVEN 125 control*) für eine Dauer von 72 Stunden bei 80 °C entgast. Anschließend werden die Materialproben in einer Klimakammer (*BINDER KMF 720*) entsprechend [DIN08b] mindestens 96 Stunden lang bei 23 °C und 50% r.F. konditioniert. Ferner wird vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen zunächst die Dicke eines jeden Prüflings mittels

eines digitalen Dickenmessgeräts (*Käfer FD 50*) an je vier verschiedenen Stellen gemessen und der arithmetische Mittelwert als Messwert notiert. Mit Beginn des Versuchsablaufs wird dann für den Startzeitpunkt $t = 0$ h zunächst das Gewicht der Probekörper mittels einer Feinwaage (*Sartorius Practum 224-1S*) gemessen und die Messung der relativen Permittivität entsprechend Kapitel 3.5.2 sowie der zeitabhängigen Stromdichte wie in Kapitel 3.5.3 durchgeführt. Anschließend werden die bis hierhin einzeln untersuchten VPE- und SiR-Probekörper mit den unterschiedlichen Schmierfetten zu Sandwich-Anordnungen zusammengefügt und die Raumladungsverteilung wie in Kapitel 3.5.4 beschrieben gemessen. Pro Sandwich-Prüfling werden dabei 2 g ± 0,05 g Fett aufgetragen, um die im Betrieb vorliegende dünne Fettschicht nachzubilden. Bei einer Dichte der untersuchten Fette von etwa 1,1 g/cm^3 entsprechen 2 g einem Volumen von 0,55 cm^3, was auf der Oberfläche der Prüflinge von 10 cm x 10 cm verteilt einer Dicke von 180 µm entspricht.

3.3.1 Charakterisierung der Prüflingsoberfläche

Wie in Kapitel 3.3 erwähnt, werden die VPE-Prüflinge nach dem Abdrehen händisch nachgeschliffen. Der Einfluss dieser Oberflächenbehandlung auf die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Oberflächenparameter wird einmalig ermittelt und die Ergebnisse im Folgenden beschrieben. Die Oberflächenstruktur unterscheidet sich je nach Oberflächenbehandlung, wie in Abbildung 3-3 dargestellt. Nach dem Abdrehen zeigt sich erwartungsgemäß eine kreisförmige Struktur rings um den Mittelpunkt der Prüflingsoberfläche, wohingegen durch das zusätzliche Abschleifen des VPE eine gefurchte Oberfläche ergibt.

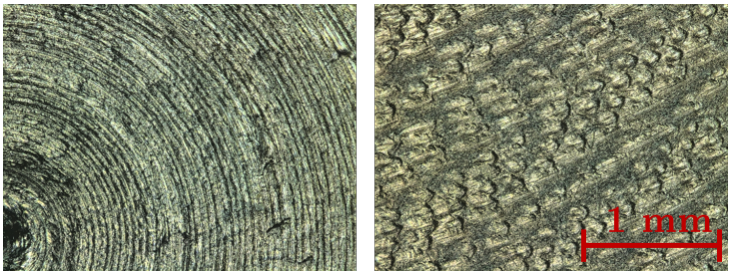
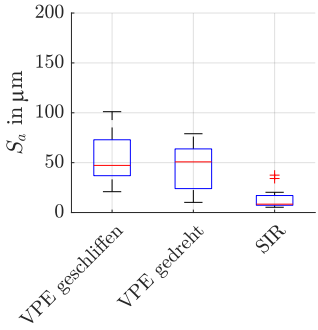


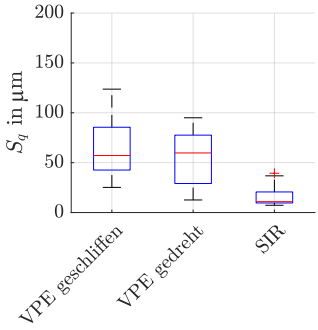
Abbildung 3-3: Oberfläche von VPE nach Drehen (li.) und Schleifen (re.)

Die entsprechenden Rauheitsparameter werden mittels Laser-Mikroskop (*Keyence VK-X105*) an vier verschiedenen Prüflingen je Material und je Prüfling an drei unterschiedlichen Stellen auf der Prüflingsoberfläche mit fünffacher Vergrößerung ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-4 gezeigt. Die Medianwerte für die gedrehten und geschliffenen VPE-Oberflächen unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander, wobei die gedrehte Oberfläche jeweils tendenziell höhere Werte für die Rauheitsparameter aufweist. Im Vergleich dazu weisen die untersuchten Silikon-Probekörper eine geringere Rauheit bei kleinerer Streuung auf. Dies liegt in der vergleichsweise glatten Oberfläche der zur Herstellung verwendeten Gussform begründet. Lediglich S_v ist für SiR vergleichbar mit VPE, was auf Luftblasen an der Oberfläche einiger der untersuchten SiR-Prüflinge zurückzuführen ist. Mit der Schmierfilmdicke von 180 µm und der Rauheit der Grenzfläche $S_{a,\mathrm{Grenz}} = S_{a,\mathrm{VPE}} + S_{a,\mathrm{SiR}}$ ergibt sich eine spezifische Schmierfilmdicke von $\lambda_{\mathrm{geschliffen}} = 2{,}5$ und $\lambda_{\mathrm{gedreht}} = 2{,}8$ für die VPE-Proben mit geschliffener bzw. gedrehter Oberfläche. Somit liegt gemäß Kapitel 2.3.2 für beide Fälle Mischreibung vor.

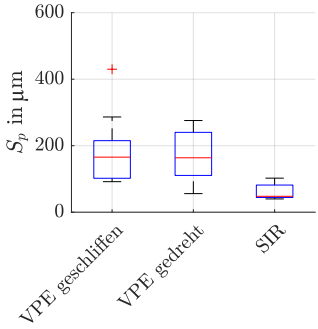
Weiterhin wird die Oberflächenenergie der untersuchten Materialien ermittelt. Für die VPE- und die Silikonprüflinge wird dabei die Zisman-Methode mit Benzylalkohol, Glycerin und destilliertem Wasser als Prüfflüssigkeiten angewendet. Wie für die Rauheitsparameter werden je Material vier Prüflinge und je Prüfling drei unterschiedliche Stellen an der Oberfläche untersucht. Die Messung des Kontaktwinkels erfolgt nach [DIN20a] im statischen Verfahren unter Zuhilfenahme eines optischen Kontaktwinkel-



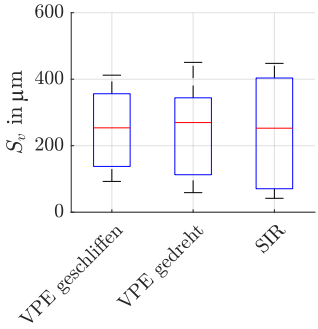
(a) mittlere arithmetische Höhe



(b) mittlere quadratische Höhe



(c) höchste Spitze



(d) niedrigste Senke

Abbildung 3-4: Parameter der Oberflächenrauheit für die untersuchten Materialien

messgeräts (*DataPhysics OCA15EC*). Das Tropfenvolumen beträgt jeweils 5 µl. Es wird die Oberflächenenergie für jeden der jeweils vier untersuchten Probekörper aus dem Mittelwert der gemessenen Tropfenrandwinkel bestimmt. Zusätzlich wird die Oberflächenspannung der beiden untersuchten Öle mithilfe der *pendant drop* Methode bestimmt. Die so ermittelten Oberflächenenergien sind in Abbildung 3-5 dargestellt. Wie erwartet, ergeben sich niedrige Werte von < 20 mN/m für die Silikone und Werte um 30 mN/m für die VPE-Oberflächen [Doe18; Kop17]. Auch hier ist kein signifikanter Unterschied zwischen der geschliffenen und der abgedrehten Oberfläche ersichtlich. Zumindest für die Mediane gilt aber der in Kapitel 2.3.1 beschriebene Zusammenhang und die geringfügig höhere Rauheit der gedrehten VPE-Prüflinge geht mit einer tendenziell höheren Oberflächenenergie einher.

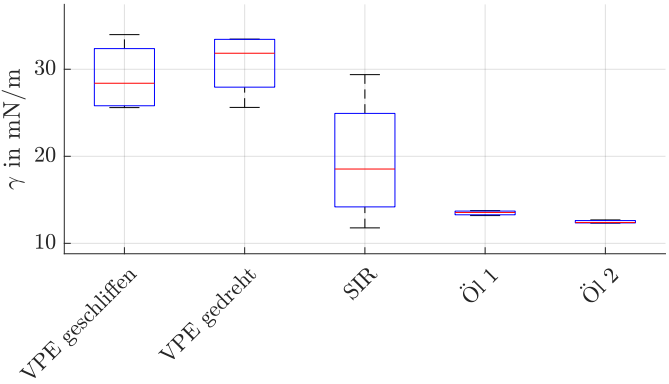


Abbildung 3-5: Oberflächenenergie der untersuchten Feststoffe und Fette

Um zu ermitteln, ob sich die Oberflächenbehandlung der VPE-Prüflinge trotz der Ähnlichkeit der präsentierten Messergebnisse auf das Alterungsverhalten und auf die Ladungstransportmechanismen auswirkt, wird im Folgenden eine Versuchsreihe mit Prüflingen mit gedrehter Oberfläche durchgeführt. Für alle anderen Versuchsreihen werden VPE-Prüflinge mit geschliffener Oberfläche genutzt, um die Oberflächenbehandlung bei der Muffenmontage nachzubilden.

3.4 Künstliche Alterung

Im Folgenden werden die Bedingungen für die künstliche Alterung definiert und validiert. Es wird eine rein thermische Alterung durchgeführt, da die betrachteten Materialien unpolar sind, sodass die Schmierfettdiffusion lediglich von der Umgebungstemperatur und nicht vom elektrischen Feld beeinflusst wird [Dom12]. Um die Alterungstemperatur festzulegen, wird zunächst simulativ die Temperaturverteilung in der Kabelmuffe im Betrieb ermittelt. In *COMSOL Multiphysics* wird dafür ein generisches Modell eines HGÜ-Kabels mit Kabelmuffe erstellt und anschließend mithilfe der Finite Elemente Methode (FEM) analytisch gelöst. Da die Versuchsmethode für Entwicklungsprüfungen für zukünftige Kabelsysteme genutzt werden soll, wird die Spannung zu 525 kV gewählt. Die Modellgeometrie und die im Folgenden genutzten Schnittlinien zur Auswertung der Simulationsergebnisse sind in Abbildung 3-6 teilweise dargestellt. Um Randeffekte zu vermeiden,

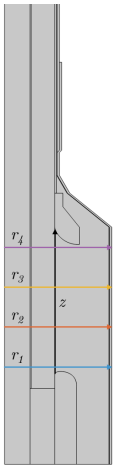


Abbildung 3-6: Geometrie Simulationsmodell

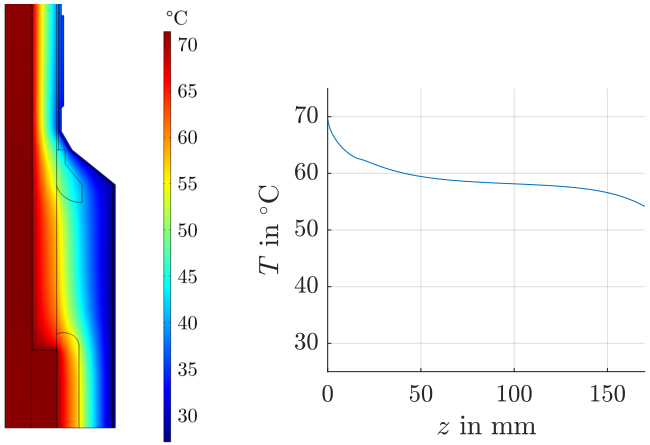
werden zusätzlich 3 m freies Kabel außerhalb der Kabelmuffe simuliert. Die Kabelgeometrie ist entsprechend den Angaben in [Poe19] gewählt (Leiterquerschnitt 2500 mm^2, Isolierdicke 26 mm). Die elektrische Leitfähigkeit

wird durch Formel 1-3 mit den elektrischen Parametern aus [Fro18] ausgedrückt. Die thermischen Parameter sind in Tabelle 3-1 aufgeführt. Die Umgebungstemperatur wird zu Beginn der Simulation auf 293,15 K gesetzt und ein konvektiver Wärmefluss zwischen der Umgebung und der Kabel- bzw. Muffenoberfläche angenommen [Fro18]. Es wird eine Nennspannung von 525 kV und ein Nennstrom von 2000 A zum Zeitpunkt $t = 0$ s angelegt bzw. eingespeist und die elektrische Feldverteilung sowie die resultierende Temperaturverteilung berechnet.

	VPE	SiR
Wärmekapazität [J/kgK]	2000	1800
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,33	0,26
Dichte [kg/m^3]	930	1270

Tabelle 3-1: Thermische Materialeigenschaften zur Modellierung von Kabel und Kabelmuffe in *COMSOL Multiphysics*

Die stationäre Temperaturverteilung in der Geometrie sowie entlang der Grenzfläche zwischen Kabel und Muffe ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Der Punkt $z = 0$ mm entspricht dabei dem Leiterverbinder, an dem die maximale Leitertemperatur von 70 °C herrscht, der Punkt $z = 170$ mm entspricht dem Deflektor an der äußeren Leitschichtkante, wo die Temperatur auf etwa 55 °C abgesunken ist. Da experimentell in der Regel eine beschleunigte Alterung durch Erhöhung der Temperatur im Vergleich zum Betrieb erreicht werden soll, wird somit zunächst eine Alterungstemperatur von mehr als 70 °C als sinnvoll erachtet.



(a) Übersicht (b) entlang der Grenzfläche

Abbildung 3-7: Temperaturverteilung in Kabel und Muffe im stationären Fall

Die Temperaturverteilung wird zusätzlich in radialer Richtung, ausgehend vom Leiter ($r = 0$ mm) bis zur Oberfläche der Kabelmuffe ($r = 120$ mm) ausgewertet, wie in Abbildung 3-8 dargestellt. Es werden vier Auswertelinien senkrecht zur Grenzfläche betrachtet, die gleichmäßig im Bereich zwischen Leiterverbinder und Deflektor angeordnet werden. Der Bereich 2 mm um die Kabel-Muffe-Grenzfläche ist mit den gestrichelten Linien im Diagramm angedeutet. Die Temperatur fällt zwischen den gestrichelten Linien, die die Gesamtdicke der untersuchten Sandwich-Anordnung beinhaltet, um weniger als 2 K ab. Diese Temperaturdifferenz ist vernachlässigbar klein, sodass die Alterung bei konstanter Temperatur in einem Laborofen durchgeführt werden kann.

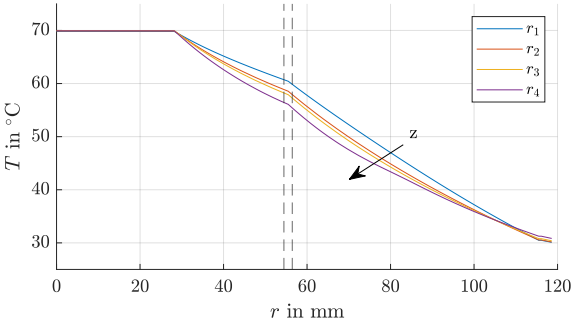
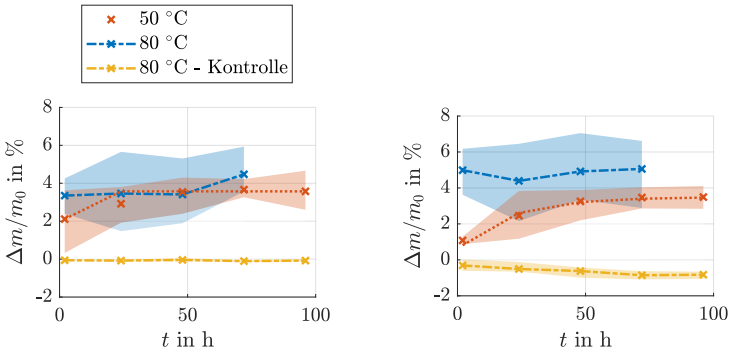


Abbildung 3-8: Temperaturgradient senkrecht zur untersuchten Grenzfläche entlang der in Abbildung 3-6 dargestellten Auswertelinien im stationären Fall

Um die Alterungstemperatur und die Versuchsdauer sowie die Entnahmezeitpunkte experimentell zu validieren, wird ein Diffusionsversuch mit vier Sandwich-Prüflingen durchgeführt. Die VPE- und SiR-Prüflinge werden dabei wie zuvor beschrieben mit 2 g vom Fett 1 geschichtet und bei erhöhter Temperatur in einem Laborofen (*IKA125 control - dry*) gelagert. Die zeitabhängige Veränderung der Masse der Prüflinge wird als Bewertungskriterium für die fortschreitende Diffusion der flüssigen Bestandteile aus dem Fett in die Dielektrika festgelegt. Die Messintervalle werden in Anlehnung an [DIN08a] auf 24 Stunden, 48 Stunden, 72 Stunden und 96 Stunden festgelegt. In vergleichbaren Versuchen hat sich eine Dauer von bis zu 14 Tagen als sinnvoll erwiesen, um die Permeation von Schmierfett vollständig abzubilden [Hua18; Nie18; Suh00; Yan20]. In den zitierten Untersuchungen wurden jedoch die Feststoffe in Schmierfett eingetaucht, sodass ein signifikant größerer Anteil an Schmierfett für die Diffusion zur Verfügung stand. Um die laut Formel 2-33 schnelle Massezunahme zu Beginn der Fickschen Diffusion mit abbilden zu können, wird ein zusätzlicher Messpunkt nach 2 Stunden Wärmelagerung ergänzt. Die Sandwich-Prüflinge werden zu jedem der genannten Zeitpunkte aus dem Laborofen entnommen, das Schmierfett mittels eines Metallspatels von der Oberfläche entfernt und separat gelagert und die VPE- und SiR-Prüflinge dann einzeln gewogen.

Im Anschluss wird das zuvor entnommene Fett wieder aufgetragen und die Sandwich-Prüflinge für die nächste Lagerungsperiode zurück in den Laborofen gelegt. Zur Kontrolle werden vier weitere Sandwich-Prüflinge ohne Schmierfett untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-9 dargestellt. Der farbig hinterlegte Bereich wird dabei durch den jeweils kleinsten und größten Messwert begrenzt, die gestrichelte Linie entspricht dem Mittelwert der Messwerte für den jeweiligen Messzeitpunkt. Es ist erkennbar, dass für die zunächst erprobte erhöhte Lagerungstemperatur von 80 °C bereits innerhalb der ersten zwei Stunden der Lagerung der Gleichgewichtszustand erreicht wird, es findet im weiteren Verlauf keine weitere Massezunahme statt. Diese erhöhte Temperatur ist somit nicht geeignet, die Dynamik der Alterung abzubilden, sodass im nächsten Schritt das Experiment mit einer deutlich verringerten Temperatur von lediglich 50 °C wiederholt wird. In diesem Fall kann eine hohe Übereinstimmung der gemessenen Masseänderung mit Formel 2-33 beobachtet werden. Es werden dafür lediglich die ersten vier Summanden verwendet. Der Determinationskoeffizient r^2 beträgt sowohl für VPE als auch für SiR mehr als 0,95. Die gefitteten Kurven sind jeweils als gepunktete Linie eingezeichnet. Es kann somit gefolgert werden, dass die Lagerungstemperatur von 50 °C geeignet ist, die zeitabhängige Diffusion des Schmierfettes in die Dielektrika zu untersuchen. Somit kann auch das partielle Aufschmelzen der Kristallite im VPE (s. Kapitel 1.2.3) als zusätzliche ungewollte Alterungserscheinung ausgeschlossen werden. Ferner sind 96 Stunden Lagerung ausreichend, um bei der geringen verwendeten Menge an Schmierfett das Diffusionsgleichgewicht näherungsweise zu erreichen. Die Kontrollgruppe zeigt nahezu keine Veränderung der Masse. Somit kann ausgeschlossen werden, dass die gemessene Massezunahme auf anderen Ursachen als der Permeation von mobilen Bestandteilen des Silikonfettes in die VPE- und die SiR-Prüflinge beruht.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 3-9: Einfluss der Temperatur auf die Diffusion von Silikonpaste (gepunktete Linie: *curve fit* gemäß Formel 2-33 für 50 °C) (nach [Net23])

Um während der Alterung einen gleichbleibend guten Kontakt zwischen den Materialien zu gewährleisten und den im Betrieb herrschenden Anpressdruck nachzubilden, wird eine simple Federkonstruktion wie in Abbildung 3-10 angefertigt. In der Abbildung wird ein Schnitt mit zwei Federn gezeigt, die Anordnung besteht jedoch aus insgesamt vier Federn, sodass vier Sandwich-Prüflinge parallel eingespannt werden können. Die Sandwich-Prüflinge (dargestellt in blau) werden mit dem SiR-Prüfling nach unten auf eine Grundplatte aus Aluminium gelegt. Auf das VPE an der Oberseite wirkt über eine Druckfeder ein mechanischer Druck, der durch eine runde Polytetrafluorethylen (PTFE)-Scheibe gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt wird. Abstandhalter und eine Deckelplatte aus Aluminium fixieren die Druckfedern. Die Anordnung ist für einen Druck von 2,5 bar dimensioniert und somit vergleichbar mit Drücken in Kabelgarnituren [Luo20]. Es ist zu beachten, dass der Druck abweichend zum Betrieb auf einer Stauchung der Materialien beruht und nicht auf einer Pressverbindung. In der Kabelmuffe unterliegt das SiR einer Zugbelastung, wodurch die Schmierfettdiffusion verstärkt wird [Zhu18]. Diese ist durch die gewählte plattenförmige Geometrie nicht reproduzierbar. Der Druck in der Anordnung wird über eine

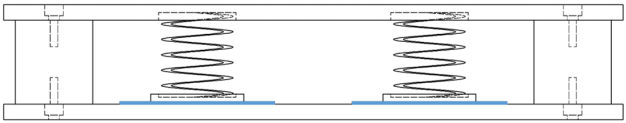


Abbildung 3-10: Probenhalterung [Net23]

Dauer von 15 Tagen bei zyklischer thermischer Belastung an drei Sandwich-Prüflingen mittels Dehnungsmessstreifen gemessen. Die Anordnung mit den eingespannten Prüflingen wird dafür in einem Laborofen gelagert, der händisch in unregelmäßigen Abständen ein- und ausgeschaltet wird. Der Ofen wird jeweils auf 60 °C aufgeheizt, also 10 K oberhalb der Lagerungstemperatur von 50 °C, um eine *worst case*-Abschätzung für eine mögliche Druckvariation zu erhalten. Die Messkontakte der Dehnungsmessstreifen sowie eines Wärmefühlers zur Aufzeichnung der Temperatur werden aus dem Ofen herausgeführt, sodass die Werte im laufenden Betrieb aufgezeichnet werden können. Druck und Temperatur sind in Abbildung 3-11 dargestellt, wobei die schwarze Kurve die Temperatur und die blaue Kurve den Mittelwert des Anpressdrucks darstellt. Der blau hinterlegte Bereich wird durch den jeweils kleinsten und größten der drei Messwerte für jeden Zeitpunkt begrenzt. Es ist erkennbar, dass der Anpressdruck zunächst etwas oberhalb der Zielgröße von 2,5 bar liegt und nach den ersten Zyklen tendenziell leicht abnimmt, sich jedoch mit fortschreitender Dauer auf dem Zielwert stabilisiert. Mit Erwärmung ergibt sich jeweils eine geringe Druckabnahme um weniger als 0,5 bar, welche auf temperaturbedingte Spannungsrelaxation in den Sandwichprüflingen zurückzuführen ist. Die Anordnung ist somit geeignet, einen gleichbleibenden Anpressdruck in der Größenordung des im Betriebs herrschenden Anpressdrucks herzustellen. Ein möglicher Einfluss des Anpressdrucks wird in einer Wiederholung des Diffusionsexperiments untersucht. Dabei verbleibt die Prüflingshalterung permanent im Ofen und somit auf 50 °C, lediglich die Sandwich-Prüflinge werden für jede Gewichtsmessung entnommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Tatsächlich ergeben sich bei den mit Druck beaufschlagten Prüflingen Abweichungen in der beobachteten Massezunahme verglichen mit den

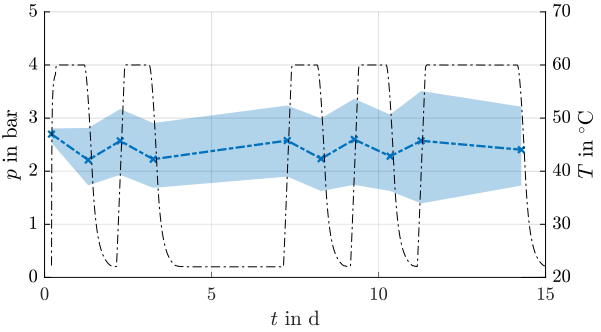
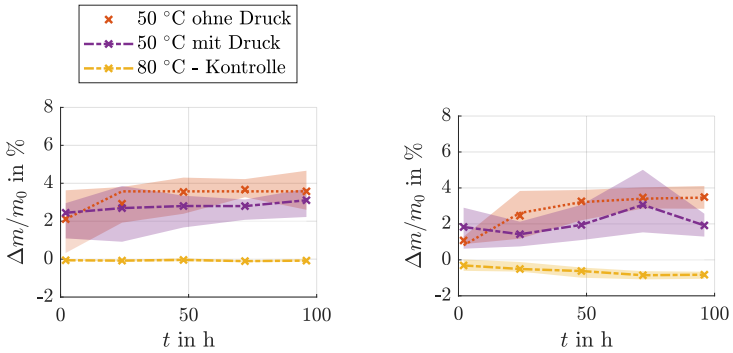


Abbildung 3-11: Anpressdruck (blau) über der Zeit bei zyklischer thermischer (schwarz) Belastung (nach [Net23])

drucklos gelagerten Probekörpern. Die Massezunahme der mit Anpressdruck gelagerten Prüflinge lässt sich nicht durch Formel 2-33 beschreiben. Es ist möglich, dass durch den erhöhten Anpressdruck die Diffusion befördert wird und somit wie zuvor bei erhöhter Temperatur bereits nach 2 Stunden Lagerungsdauer der Gleichgewichtszustand erreicht wird. Die Anordnung wird im Folgenden weiter verwendet, um einen guten Kontakt zwischen den VPE- und den SiR-Prüflingen zu gewährleisten. Der Anpressdruck wird jedoch als weiterer Untersuchungsparameter aufgenommen und eine Versuchsreihe bei 50 °C ohne Druck durchgeführt. Um Wechselwirkungen zwischen Druck und Temperatur zu untersuchen und um auszuschließen, dass auch nach Erreichen des Diffusionsgleichgewichts noch Veränderungen der elektrischen Materialparameter auftreten, wird ferner eine Versuchsreihe ohne Druck mit 70 °C Alterungstemperatur durchgeführt.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 3-12: Einfluss des Anpressdrucks auf die Diffusion von Silikonpaste (gepunktete Linie: *curve fit* gemäß Formel 2-33 für 50 °C ohne Druck) (nach [Net23])

3.5 Elektrische Messungen

Zur Bewertung der Materialveränderungen infolge von Schmierfettdiffusion werden nach jedem Alterungsintervall drei unterschiedliche elektrische Messungen durchgeführt: die Messung der relativen Permittivität der einzelnen Materialien, der Stromdichte durch die einzelnen Materialien für verschiedene Prüfspannungen und Umgebungstemperaturen sowie der Raumladungsverteilung in den Sandwich-Prüflingen für verschiedene Prüfspannungen bei Raumtemperatur. Die Messaufbauten, die Versuchsdurchführung und die Auswertung der Messergebnisse werden im Folgenden beschrieben sowie die Wahl der Prüfspannungen und Temperaturen hergeleitet. Zudem werden die Wiederholbarkeit, die Reproduzierbarkeit und die Streuung der Messergebnisse für jede Messung ermittelt.

3.5.1 Bewertung der Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Streuung

Die in diesem Kapitel vorgestellten elektrischen Messungen werden zunächst hinsichtlich ihrer Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit sowie der Streuung

der Ergebnisse bewertet. Zu diesem Zweck werden jeweils mindestens drei Probekörper untersucht und jede Messung unter identischen Bedingungen an unterschiedlichen Tagen dreimal wiederholt. Die Reihenfolge der Versuche und der untersuchten Prüflinge wird jeweils randomisiert, um systematische Abweichungen auszuschließen. Die Wiederholbarkeit ist dann die Abweichung aufgrund des Prüfaufbaus, die sich bei der Messung desselben Prüflings unter identischen Prüfbedingungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ergibt. Die Reproduzierbarkeit bzw. die Streuung ist die Variation der Messergebnisse aufgrund von Unterschieden zwischen den Prüflingen desselben Materials unter veränderten bzw. identischen Prüfbedingungen. Als Maß für die Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Streuung wird für jede Messung der Variationskoeffizient als Quotient aus der Standardabweichung und dem Mittelwert für die jeweilige Datengrundlage berechnet. Durch diese Normierung der Standardabweichung lassen sich die drei Werte jeweils für die verschiedenen verwendeten Messverfahren miteinander vergleichen, obwohl die Ergebnisse sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Ein kleinerer Wert ist dabei gleichbedeutend mit einer geringeren Abweichung, also mit einer besseren Wiederholbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit sowie einer geringeren Streuung.

3.5.2 Messung der relativen Permittivität

Die Prüflingskapazität wird gemäß [DIN18b] mithilfe eines universellen Strommessystems (*OMICRON MI 600*) mit einer Prüfspannung von 1 kV ± 100 V mit 50 Hz gemessen. Es wird eine aus Messing gefertigte Schutzringelektrode mit einer effektiven Fläche von $A_{\text{eff}} = 19{,}55\ \text{cm}^2$ verwendet. Die relative Permittivität kann dann aus der gemessenen Kapazität C_{Mess} gemäß

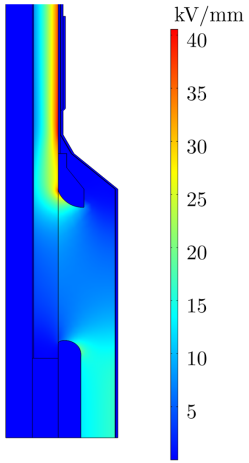
$$\varepsilon_r = \frac{C_{\text{Mess}}}{\varepsilon_0 \cdot \frac{A_{\text{eff}}}{d}} \tag{3-1}$$

berechnet werden. Die Messung wird zur Bewertung von Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit an je vier VPE- und SiR-Prüflingen durchgeführt und jeweils dreimal an unterschiedlichen Tagen wiederholt. Vor und zwischen den Messungen werden die Prüflinge bei 23 °C und 50% r.F. gelagert.
Der Mittelwert für die relative Permittivität aus allen Messungen beträgt

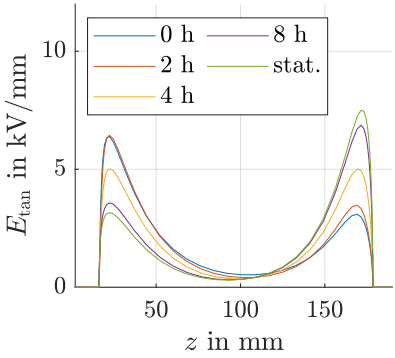
für VPE $\varepsilon_{r,\mathrm{VPE}} = 2{,}1$, wobei die Wiederholbarkeit bei maximal 2% liegt. Der Median beträgt 2,2. Für SiR wird eine mittlere relative Permittivität von $\varepsilon_{r,\mathrm{SiR}} = 2{,}6$ mit einer maximalen Wiederholbarkeit von 12% gemessen. Der Median beträgt in diesem Fall 2,8. Die Reproduzierbarkeit beträgt für beide Materialien 15% und die Streuung beträgt jeweils 16%. Die Werte für die relative Permittivität liegen jeweils geringfügig unterhalb in der Literatur veröffentlichten Referenzwerten [Küc09], aber in einem vergleichbaren Verhältnis zueinander. Die Wiederholbarkeit ist für SiR signifikant größer als für VPE, was auf die Herstellung der SiR-Prüflinge im Labor zurückzuführen sein kann. Der Herstellungsprozess unterliegt somit größeren Schwankungen im Vergleich mit der Herstellung der Kabelisolierung, aus der die VPE-Materialprüflinge gewonnen werden. Die Reproduzierbarkeit ist für beide Materialien vergleichbar und höher als in [DIN18b] gefordert - hier wird eine maximale Abweichung von 10% zugelassen. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden.

3.5.3 Messung des Polarisationsstroms

Die Messung der Stromdichte an den einzelnen Materialien wird in Anlehnung an [DIN17b] mit einem Picoamperemeter (*Keithley 6485E*) durchgeführt. Eine selbst gebaute Multiplexer-Anordnung erlaubt die parallele Messung an acht Materialprüflingen. Diese werden jeweils mit einer Schutzringelektrode aus Aluminium mit $A_{\mathrm{eff}} = 8{,}3\ \mathrm{cm}^2$ an den Multiplexereingang angeschlossen und die acht Eingänge sequentiell mit einer Schaltfrequenz von 1/s auf den Ausgang geschaltet, welcher wiederum mit dem Eingang des Picoamperemeters verbunden ist, das mit einer Rate von 1/s misst. Da die Stromdichte stark vom elektrischen Feld sowie von der Umgebungstemperatur abhängig ist, wird die Messung unter Variation dieser beiden Größen durchgeführt. Als Temperaturen werden 20 °C, 50 °C und 70 °C ausgewählt, sodass die Spanne möglicher Betriebstemperaturen in der Kabelmuffe abgedeckt sind. Zur Festlegung der Prüfspannungen wird die in *COMSOL Multiphysics* berechnete zeitabhängige elektrische Feldverteilung gemäß Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 betrachtet. Dabei ist die tangentiale bzw. radiale Feldstärke entlang der in Abbildung 3-6 gekennzeichneten Auswertelinien in z- und in r-Richtung dargestellt. Je



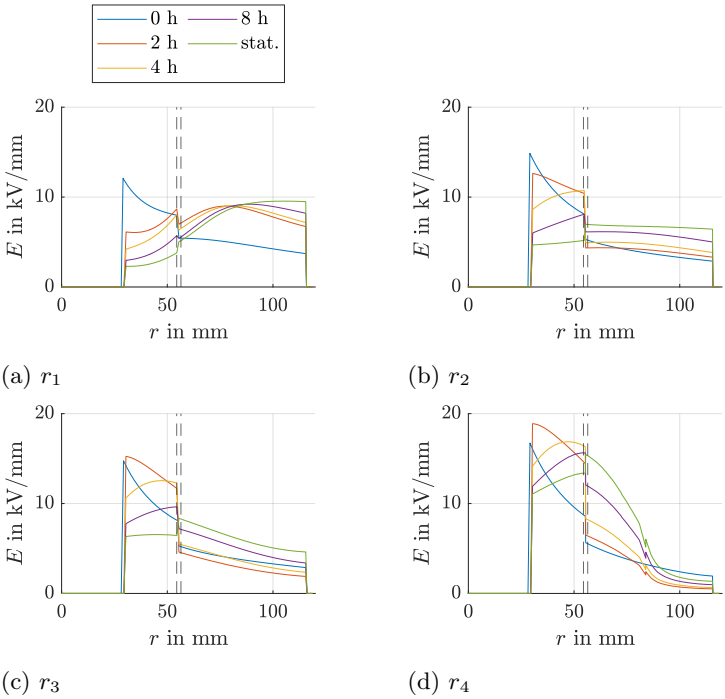
(a) Übersicht stationär



(b) tangentiale Feldstärke entlang der Grenzfläche

Abbildung 3-13: Feldverteilung in Kabel und Muffe

nach Zeitpunkt nach dem Zuschalten der Nennspannung und je nach Ort entlang der dielektrischen Grenzfläche treten Feldstärken im Bereich von etwa 5-15 kV/mm auf. Die zeitliche Veränderung der Feldverteilung ist dabei auf den Übergang vom Verschiebungs- zum Strömungsfeld und auf die auf den Stromfluss zurückzuführende ohmsche Erwärmung der Materialien zurückzuführen, wodurch sich die lokale elektrische Leitfähigkeit mit der Zeit verändert. Insbesondere die höheren Spannungen, die zur Belastung der Isolierung oberhalb der Injektionsfeldstärke führen, sind für die Untersuchungen von Interesse, sodass die Prüfspannungen zu $U_{\mathrm{Test}} = 10$ kV, 12 kV und 15 kV gewählt werden. Die Prüfspannung wird durch ein Hochspannungsnetzgerät (*Heinzinger HNCs 60000*) bereitgestellt und händisch mit einer Abweichung von ± 300 V eingestellt. Für die SiR-Prüflinge mit 1 mm Dicke ergeben sich somit nominelle Feldstärken von 10 kV/mm, 12 kV/mm und 15 kV/mm, für die VPE-Prüflinge mit Dicken im Bereich von 0,5-1 mm betragen die nominellen elektrischen Feldstärken entsprechend bis zu 20 kV/mm, 24 kV/mm und 30 kV/mm. Zur Ermittlung der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Stromdichtemessung werden jeweils vier



(a) r_1 (b) r_2

(c) r_3 (d) r_4

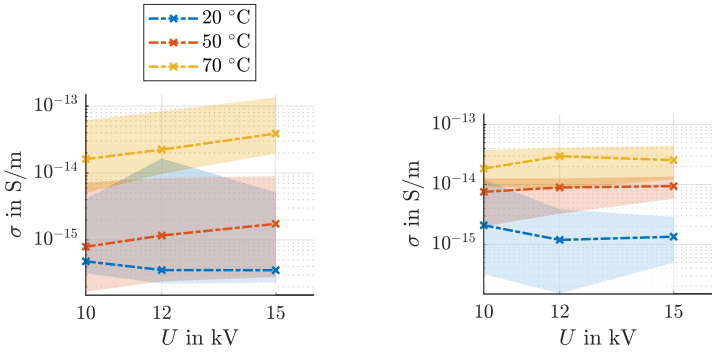
Abbildung 3-14: Feldstärke senkrecht zur untersuchten Grenzfläche entlang der in Abbildung 3-6 dargestellten Auswertelinien

VPE- sowie SiR-Prüflinge untersucht und die Messung für jede mögliche Temperatur-Spannungs-Kombination dreimal wiederholt. Die Messungen werden randomisiert ausgeführt, um systematische Fehler, beispielsweise durch *memory*-Effekte in den untersuchten Materialprüflingen, ausschließen zu können [Fre20]. Es wird also die Reihenfolge der Temperaturen randomisiert und für jede Temperatur die Messung als ein Block mit randomisierter Reihenfolge der Prüfspannungen sowie randomisierter Zuordnung der Prüflinge zu den einzelnen Multiplexer-Kanälen durchgeführt. Vor und zwischen jedem Messblock werden die Probekörper für mindestens 6 Stunden bei 23 °C und 50% r.F. konditioniert und dann für mindestens 4 Stunden im Messaufbau auf die Zieltemperatur temperiert, sodass die Anordnung mit Beginn der Messung thermisch eingeschwungen ist.
Die eigentliche Prüfdauer sollte möglichst kurz gewählt werden, da *memory*-Effekte umso ausgeprägter sind, je länger die Prüfspannung anliegt [Ada81]. Andererseits beträgt die Dauer bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustand in Isoliermaterialien, an dem alle Polarisationsprozesse abgeschlossen sind und nur noch der eigentliche Leitungsstrom gemessen wird, je nach Umgebungstemperatur mehrere Stunden bis Monate [Maz13]. Insofern wäre eine möglichst lange Messdauer wünschenswert, damit die gemessene Stromdichte nicht durch überlagerte Polarisationsströme verfälscht wird. Als Kompromiss zwischen diesen gegensätzlichen Anforderungen wird die Prüfdauer zu 20 Minuten festgelegt, gefolgt von 20 Minuten mit ausgeschalteter Prüfspannung. Um zu verifizieren, dass dies ausreichend lang ist, werden im Rahmen der Vorversuche 9 Experimente mit einer verlängerten Messdauer von 12 Stunden durchgeführt und die Ergebnisse mit denen nach 20 Minuten verglichen. Die mittlere Abweichung der gemessenen Ströme nach 20 Minuten bzw. 12 Stunden beträgt 38% für SiR und 35% für VPE. Für beide Materialien ist die Abweichung vergleichbar mit der Wiederholbarkeit bzw. kleiner als die reguläre Streuung der Ergebnisse (s.u.) und nicht abhängig von der Prüfspannung und der Temperatur. Somit ist davon auszugehen, dass durch die Messdauer von 20 Minuten keine signifikante oder systematische Überschätzung des Messwerts aufgrund verbleibender Polarisationsströme auftritt.
Für die Auswertung der Strommessung wird aus dem Median der letz-

ten 10 Messwerte bei eingeschalteter Spannung je Prüfling die elektrische Leitfähigkeit gemäß

$$\sigma = \frac{I_{\mathrm{Mess}}}{U_{\mathrm{Test}}} \frac{d}{A_{\mathrm{eff}}} \tag{3-2}$$

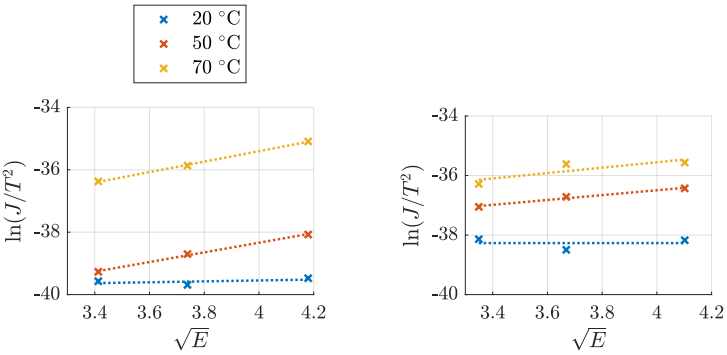
berechnet. Je Messung und Material wird dann der Median der vier einzelnen Werte als Messergebnis angegeben. Die Verwendung des Medians ist im Vergleich zum arithmetischen Mittel robuster gegenüber Ausreißern. Die Leitfähigkeit der untersuchten Prüflinge in Abhängigkeit der Prüfspannung für die verschiedenen Temperaturen ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Es ergibt sich für beide Materialien der erwartete Anstieg der Leitfähigkeit mit der Temperatur und bei 50 °C und 70 °C mit der Prüfspannung. Bei 20 °C ist keine klare Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Prüfspannung ersichtlich. Ferner streuen die Ergebnisse stark. Die Wiederholbarkeit beträgt für VPE im Mittel 36%, für SiR 43%. Die Reproduzierbarkeit beträgt für VPE 117% und für SiR lediglich 55%. Die Streuung beträgt für VPE 93% und für SiR 45%. Alle drei Kennzahlen nehmen im Allgemeinen mit steigender Temperatur und steigender Prüfspannung ab. Lediglich bei VPE zeigen sich bei eine 12 kV höhere Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit als bei 10 kV, und bei 50 °C eine höhere Wiederholbarkeit als bei 20 °C. Die Werte für Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit liegen im Mittel innerhalb der in [DIN17b] vorgegebenen Grenzen.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 3-15: Elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfspannung

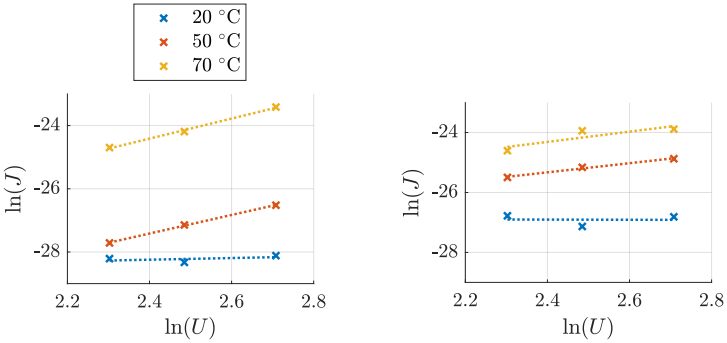
Zur Auswertung der Ergebnisse wird im Folgenden ermittelt, welcher der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Ladungstransportmechanismen am ehesten auf den ermittelten Zusammenhang zwischen der gemessenen Stromdichte, der Temperatur und der Prüfspannung zutrifft. Dafür wird jeweils der Medianwert aus allen Messwerten je Material und Experiment gebildet und mittels der Methode der kleinsten Quadrate eine lineare Funktion approximiert. Entsprechend Gleichung 2-11 ist in Abbildung 3-16 $\ln(J/T^2)$ über $\sqrt{E}$ aufgetragen. Für 50 °C und 70 °C ergibt sich für beide Materialien eine sehr hohe Übereinstimmung der Messwerte mit der linearen Funktion, bei 20 °C ist der Determinationskoeffizient jedoch sowohl für VPE als auch für SiR negativ. Es ist somit zumindest bei 20 °C nicht von einem durch Injektion dominierten Ladungstransport auszugehen.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 3-16: Zusammenhang zwischen $\ln(J/T^2)$ und $\sqrt{E}$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

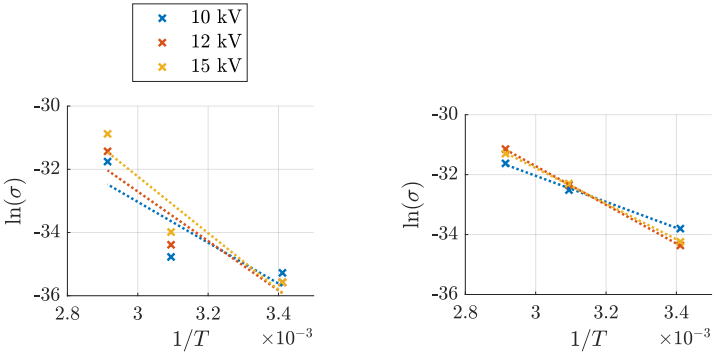
Ein vergleichbares Bild ergibt sich bei der Darstellung von $\ln(J)$ über $\ln(U)$ entsprechend Gleichung 2-14, wie in Abbildung 3-17 dargestellt. Somit kann bei 20 °C die raumladungsbegrenzte Stromdichte als dominanter Ladungstransportmechanismus ausgeschlossen werden.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 3-17: Zusammenhang zwischen $\ln(J)$ und $\ln(U)$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

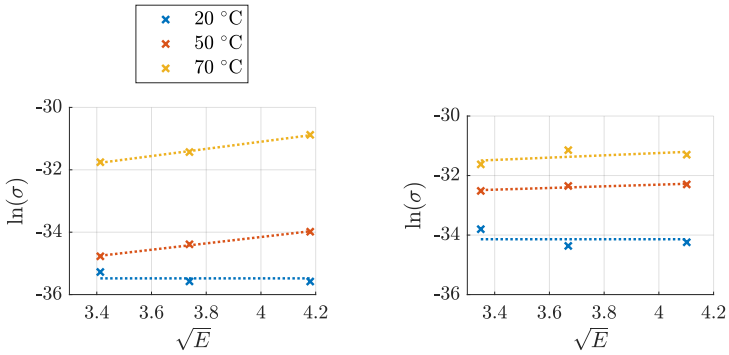
In Abbildung 3-18 ist gemäß Gleichung 2-16 $\ln(\sigma)$ über $1/T$ aufgetragen. Für SiR ergibt sich für alle Temperaturen ein exakt linearer Zusammenhang mit $r^2 = 1$. Für VPE ist der Determinationskoeffizient in jedem Fall größer als 0,6 und insbesondere immer positiv, es besteht also für die hopping-Leitung eine höhere Übereinstimmung mit dem gesuchten linearen Zusammenhang als mit der Nullhypothese.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 3-18: Zusammenhang zwischen $\ln(\sigma)$ und $1/T$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a - b \cdot x$)

Zur Untersuchung des Ladungstransports entsprechend dem Poole-Frenkel-Mechanismus wird nach Formel 2-19 $\ln(\sigma)$ über $\sqrt{E}$ aufgetragen, wie in Abbildung 3-19 gezeigt. Wie für die Injektion und die raumladungsbegrenzte Stromdichte ist bei den hohen Temperaturen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der linearen Funktion erkennbar, bei 20 °C ist der Determinationskoeffizient jedoch negativ, der Zusammenhang gemäß der Modellvorstellung des Poole-Frenkel-Mechanismus ist somit nicht zutreffend.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 3-19: Zusammenhang zwischen $\ln(\sigma)$ und $\sqrt{E}$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

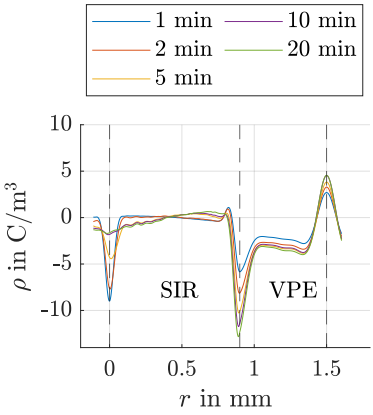
Es wird geschlussfolgert, dass die Modellvorstellung der hopping-Leitung am ehesten geeignet ist, die Messwerte zu interpretieren, da nur hier ein eindeutiger Zusammenhang für alle Temperaturen erkennbar ist. Mit Formel 2-15 kann dann aus den Medianwerten der elektrischen Leitfähigkeit die Haftstellentiefe bzw. Aktivierungsenergie E_t berechnet werden. Dafür werden die Messwerte über alle Prüfspannungen zusammengefasst. Es ergibt sich somit eine Haftstellentiefe von 0,67 eV für die untersuchten VPE-Prüflinge und von 0,48 eV für die SiR-Prüflinge. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit veröffentlichten Ergebnissen für die beiden Materialien unter vergleichbaren Versuchsbedingungen [Doe20; Tal13; Vu15; Wan21].

3.5.4 Messung der Raumladungsverteilung

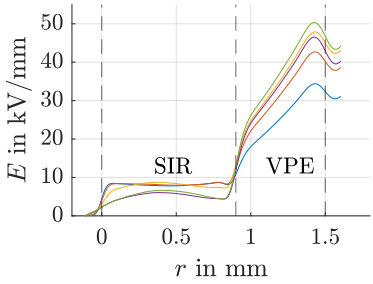
Zusätzlich zur Messung der dielektrischen Eigenschaften und der elektrischen Leitfähigkeit, die jeweils an den VPE- und SiR-Prüflingen einzeln vorgenommen werden, wird zu jedem Entnahmezeitpunkt die ortsabhängige Raumladungsverteilung an den Sandwich-Probekörpern gemessen. Zu diesem Zweck wird ein Prüfstand zur akustischen Raumladungsmessung

mittels der *pulsed electro-acoustic method* (PEA) aufgebaut und in Betrieb genommen. Aufgrund der vergleichbaren geometrischen und akustischen Eigenschaften der untersuchten Probekörper erfolgt die Dimensionierung der akustischen Detektionseinheit analog zu [Hus21], sodass die Vorgaben aus [CIG06] eingehalten werden. Im Unterschied zum referenzierten Prüfstand wird für diese Arbeit ein leistungselektronischer Hochspannungsschalter (*Behlke HTS 50-08-UF*) als Impulsspannungsgenerator zur Anregung der Raumladungsträger im untersuchten Probekörper genutzt. Somit ergibt sich eine Impulsspannung mit 1500 V Amplitude und 18 ns Impulsbreite. Das Messsignal ist dann ausreichend hoch, sodass abweichend zum in [Hus21] beschriebenen Prüfaufbau lediglich ein Verstärker (*Wenteq ABL0300-00-4030*) benötigt wird. Ferner wird die Messung ausschließlich bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Gleichspannung zur Polarisation der Probekörper wird über dasselbe Hochspannungsnetzgerät wie zur Messung des Polarisationsstroms (*Heinzinger HNCs 60000*) bereitgestellt. Aufgrund der im Vergleich zu den einzelnen Materialprüflingen größeren Dicke der Sandwichprüflinge werden für die Raumladungsmessung zweifach höhere Prüfspannungen von 20 kV, 25 kV und 30 kV gewählt. Wie in Kapitel 3.5.3 beträgt die Messdauer jeweils 20 Minuten bei zugeschalteter und bei abgeschalteter Spannung, sodass die Ergebnisse mit denen der Stromdichtemessung im Zusammenhang betrachtet werden können. Während der Messdauer wird der Prüfling kontinuierlich mit der Impulsspannung mit einer Frequenz von 1 kHz beaufschlagt. Die Messung erfolgt 1 Minute, 2 Minuten, 5 Minuten, 10 Minuten und 20 Minuten nach dem Zu- bzw. Abschalten der Prüfspannung, sodass der zeitabhängige Auf- und Abbau der Raum- und Grenzflächenladung während der Messdauer untersucht werden kann. Zu diesen Zeitpunkten werden automatisiert jeweils 500 Spannungs-Zeit-Kurven als Messwerte aus einem USB-Oszilloskop (*Picoscope 5244A*) ausgelesen und aufgezeichnet. Das Abtastintervall beträgt 2 ns bei einer Auflösung von 12 bit. Die jeweils 500 Messwerte werden zur Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses gemittelt und anschließend mittels eines Hochpass mit 750 kHz Grenzfrequenz sowie abschließend mit einem Gaußschen Tiefpass mit 5 MHz Grenzfrequenz gefiltert, sodass sich ein ausreichend glatter Verlauf des Spannungs-Zeit-Diagramms ergibt. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus lediglich auf

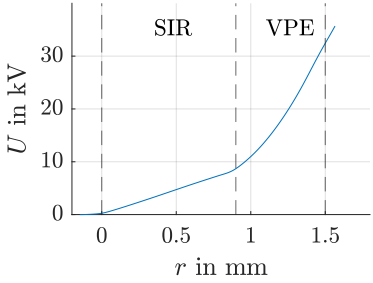
der Höhe der Raumladung an der Grenzfläche zwischen VPE und SiR. Die rechnerische Entfernung der Systemantwort (engl. *deconvolution*) wirkt sich nur marginal darauf aus, sodass auf diesen rechenintensiven Schritt in der Verarbeitung der Messdaten verzichtet werden kann. Somit wird nach Filterung der Daten nur noch die Kalibrierung durchgeführt, wobei die gemessene Spannung in die vorhandene Raumladung und die Zeit in die Position im Probekörper umgerechnet wird. Aus der Raumladungsverteilung lässt sich dann mittels Integration die elektrische Feldverteilung und daraus wiederum die angelegte Spannung berechnen. Ein exemplarisches Ergebnis aus einer Messung mit 30 kV Polarisationsspannung ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Zur Validierung der Messung wird in diesem Fall die Systemantwort entfernt, sodass kein Überschwingen der Impulse bei der Erd- und der Hochspannungselektrode erkennbar ist. Es ist erkennbar, dass die Feldverteilung qualitativ der in Abbildung 3-14 simulierten Feldverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$ h entspricht, wenn die thermischen Bedingungen in der simulierten Kabelmuffe denen während der PEA-Messung bei Raumtemperatur ähneln.



(a) Raumladung

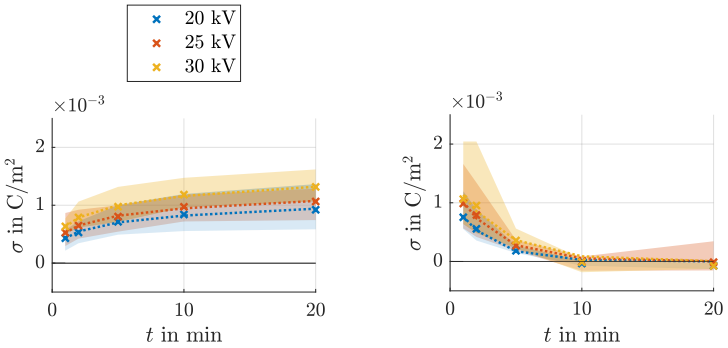


(b) elektrische Feldstärke



(c) Spannung

Abbildung 3-20: Exemplarisches Ergebnis einer Raumladungsmessung mit 30 kV Polarisationsspannung



(a) Polarisation (b) Depolarisation

Abbildung 3-21: Zeitliche Veränderung der Grenzflächenladung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \pm b \cdot \ln(x)$)

Durch Integration der Raumladung im Bereich der Materialgrenzfläche ergibt sich die in Abbildung 3-21 dargestellte Flächenladungsdichte in Abhängigkeit von der Messdauer für die unterschiedlichen Prüfspannungen. Der Verlauf des Auf- und Abbaus der Grenzflächenladung entspricht nahezu exakt dem erwarteten logarithmischen Verlauf mit $r^2 > 0{,}97$ für alle abgebildeten Verläufe [Dis06; Le 05]. Ferner ist erkennbar, dass innerhalb der 20 Minuten Messung bei ausgeschalteter Polarisationsspannung die Depolarisation der Sandwichprüflinge abgeschlossen ist. Zur Ermittlung der Wiederholbarkeit und der Reproduzierbarkeit sowie der Streuung wird an drei unterschiedlichen Sandwichprüflingen die Messung bei jeweils allen drei Prüfspannungen in zufälliger Reihenfolge durchgeführt. Die Wiederholbarkeit beträgt im Mittel 93%, die Reproduzierbarkeit beträgt 233% und die Streuung beträgt 135%. Die Messergebnisse weisen somit eine hohe Variation auf. Nichtsdestotrotz ist in Abbildung 3-21 die erwartungsgemäß tendenziell höhere Grenzflächenladung mit steigender Polarisationsspannung erkennbar. Es liegt keine Abhängigkeit der Wiederholbarkeit, der Reproduzierbarkeit oder der Streuung von der Höhe der Polarisationsspannung vor.

Die Haftstelleneigenschaften werden aus den Messungen bei abgeschalteter Polarisationsspannung gemäß Gleichung 1-11 und Gleichung 1-12 berechnet.

Dazu wird je Messzeitpunkt der Median aller entsprechenden Messwerte gebildet und die entstandenen Zeit-Ladungs-Wertepaare jeweils mit der logarithmischen Funktion angenähert. Aus den Parametern der approximierten Funktion werden dann die in Tabelle 3-2 aufgeführten Werte ermittelt. Gemäß Gleichung 1-11 beschreibt μ die Ladungsträgerbeweglichkeit. $Q(0)$, N und Δ_E sind die in Gleichung 1-12 eingeführten Parameter: $Q(0)$ ist die während der Polarisation ins Material eingebrachte Ladung, die unmittelbar nach Abschalten der Polarisationsspannung zum Zeitpunkt $t = 0$ min gemessen wird. N ist die Anzahl der besetzten Haftstellen je Energieniveau und Δ_E ist die energetische Spanne, innerhalb der sich die Ladungsträger aufhalten. Erwartungsgemäß nehmen alle Werte mit steigender Polarisationsspannung zu. Zu beachten ist, dass für die Anwendung der Modelle und Berechnung der entsprechenden Parameter nach [Dis06] und nach [Maz03] nicht die Flächen-, sondern die Raumladungsdichte zugrunde gelegt werden muss. Diese wird durch Division der Flächenladungsdichte durch die jeweilige Breite der Raumladungszone ermittelt. Abweichend zu der in [Tzi10] präsentierten Anwendung der Methode nach [Dis06] wird über die gesamte Messdauer eine logarithmische Abnahme der Raumladung beobachtet anstelle von zwei dezidiert voneinander zu unterscheidenden Kurven. Es lässt sich schließen, dass im Rahmen der Messdauer von 20 Minuten somit lediglich die niedrigen Haftstellen geleert werden und es einer längerer Messdauer bedarf, um tiefe Hafstellen untersuchen zu können.

Parameter	20 kV	25 kV	30 kV
$Q(0)$ in $\mathrm{C/m^3}$	0,52	0,66	0,73
N in $10^{19}\cdot$ $\mathrm{1/eVm^3}$	5,3	6,4	7,0
Δ_E in eV	0,061	0,064	0,065
μ in $10^{11}\cdot$ $\mathrm{m^2/Vs}$	2,8	3,9	4,3

Tabelle 3-2: Haftstelleneigenschaften für unterschiedliche Prüfspannungen

4 Ergebnisse und Modellbildung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuchsreihen unter Anwendung der in Abbildung 3-1 skizzierten Methode präsentiert und diskutiert. Wie in Kapitel 3 erläutert, werden dabei die Oberflächenbearbeitung der VPE-Prüflinge, die Bedingungen während der künstlichen Alterung sowie die an der VPE-SiR-Grenzfläche aufgetragenen Schmierfette variiert, sodass jeweils der Einfluss dieser Parameter auf das Alterungsverhalten der Prüflinge untersucht werden kann. Je Parameter werden vier Sandwich-Prüflinge untersucht. Die Durchführung und Auswertung der Experimente erfolgt im Wesentlichen nach dem in Kapitel 3 hergeleiteten Vorgehen. Die Entnahmezeitpunkte werden aus praktischen Gründen geringfügig angepasst auf 4 Stunden, 8 Stunden, 24 Stunden, 48 Stunden und 96 Stunden nach Beginn der Alterung. Die Konditionierung der Prüflinge zwischen den einzelnen Messungen in einem laufenden Alterungszyklus wird jeweils für mindestens 6 Stunden durchgeführt. Die Prüflinge werden für die temperaturabhängige Stromdichtemessung jeweils für mindestens 4 Stunden auf die Zieltemperatur aufgeheizt, sodass die Messung im thermisch eingeschwungenen Zustand erfolgt. Die Reihenfolge der Temperaturen für die Stromdichtemessungen sowie der Prüfspannungen für die Stromdichte- und für die Raumladungsmessungen werden randomisiert. Die Experimente werden für jeden vollen Alterungszyklus in Blöcken von je 2x4 Sandwich-Prüflingen durchgeführt, wobei die Auswahl der Prüflinge je Block ebenfalls randomisiert wird. Für die Versuchsauswertung wird jeweils der Median der vier Messwerte je Experiment und Parameterset betrachtet, um den Einfluss von Ausreißern zu begrenzen. Abgeleitete Größen werden für jeden Prüfling einzeln berechnet und anschließend der Median gebildet. In den folgenden Abbildungen wird zunächst die Veränderung der in Kapitel 3 eingeführten Parameter über der Alterungsdauer dargestellt. Der Medianwert jedes Parameters ist durch ein Kreuz markiert. Zur Orientierung wird zusätzlich eine Kurve der Form $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$ eingefügt, die an die jeweiligen Medianwerte angepasst ist. Darüber hinaus werden lineare Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern untersucht, wobei die Medianwerte wie zuvor durch Kreuze dargestellt und zusätzlich jeweils durch eine Funktion der Form $y(x) = a + b \cdot x$

approximiert werden. Aufgrund der im Allgemeinen großen Schwankungen der Messwerte wird zugunsten der Übersichtlichkeit auf die Darstellung von Fehlerbalken oder Messwertbereichen verzichtet. Dies impliziert, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen in der Regel statistisch nicht signifikant sind und es sich lediglich um Tendenzen handelt. Die mittlere Streuung der Versuchsergebnisse für die durchgeführten Messungen ist in Tabelle 4-1 aufgeführt. Im Vergleich zu den in Kapitel 3 diskutierten Vorversuchen ist kein signifikanter Unterschied ersichtlich.

VPE | SiR	rel. Permittivität	el. Leitfähigkeit	Grenzflächenladung
Vorversuche	16% | 16%	93% | 45%	135%
Ergebnisse	19% | 7%	85% | 69%	47%

Tabelle 4-1: Mittlere Messwertstreuung in den Vorversuchen sowie den Messergebnissen

Bei den untersuchten Materialien handelt es sich großteils um kommerziell erhältliche Materialien, die nicht für den Einsatz in HGÜ-Kabelsystemen designt und optimiert sind. Lediglich die VPE-Prüflinge sind aus einem 320 kV HGÜ-Kabel entnommen, sodass hier eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die reale Anwendung gegeben ist. Da in der Regel dasselbe VPE für die 525 kV-Spannungsebene verwendet wird wie für 320 kV, gilt diese Übertragbarkeit auch spannungsübergreifend. Die verwendeten Schmierfette sowie das Silikon für die SiR-Prüflinge sind jedoch nicht für die Anwendung in HGÜ-Kabelsystemen optimiert. Daher liegt der Fokus weniger auf der quantitativen Auswertung der Ergebnisse, sondern auf dem Vergleich der verschiedenen Untersuchungsparameter sowie der Veränderung der Messergebnisse mit zunehmender Alterungsdauer.
Für die Raumladungsmessung und die daraus abgeleiteten Größen wird qualitativ kein Einfluss der Prüfspannung beobachtet. Für die Stromdichtemessung verhalten sich die Ergebnisse über alle Prüfspannungen bei 50 °C und 70 °C qualitativ ebenfalls ähnlich. Demgegenüber treten hohe Streuungen der bei 20 °C erzielten Messergebnisse auf, was sich mit den in Abbildung 3-15 dargestellten breiten Wertebereichen sowohl für VPE als auch für SiR deckt. Sofern nicht anderweitig angegeben, werden daher je-

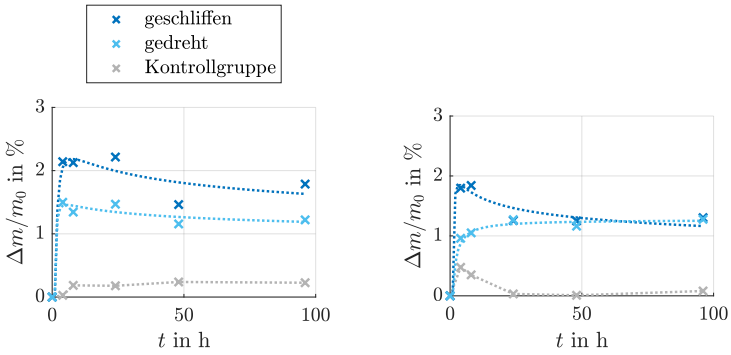
weils die Ergebnisse der Stromdichtemessung bei der maximalen Temperatur von 70 °C und der maximalen Prüfspannung von 15 kV gezeigt, analog dazu die Ergebnisse der Raumladungsmessung bei der maximalen Prüfspannung von 30 kV.

4.1 Einfluss der Oberflächenbearbeitung

Zunächst wird der Einfluss der Oberflächenbearbeitung der VPE-Prüflinge untersucht. Dafür werden Prüflinge mit gedrehter und mit abgeschliffener Oberfläche miteinander verglichen. Gemäß den in Kapitel 3.3.1 diskutierten Ergebnissen unterscheiden sich die Oberflächenenergie sowie die Rauheit der VPE-Prüflinge mit gedrehter und geschliffener Oberfläche nur unwesentlich voneinander. Nichtsdestotrotz wird angenommen, dass die Art der Oberflächenbearbeitung sich auf die Anzahl und Art der Haftstellen in Oberflächennähe auswirkt, sodass sich ein unterschiedliches elektrisches Verhalten ergibt.

4.1.1 Veränderung von Masse und relativer Permittivität

Die Veränderung der Masse von VPE und SiR im Laufe der Alterung ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Für beide gezeigten Varianten wurde Fett 1 an der Materialgrenzfläche aufgetragen. Die Kontrollgruppe wurde ohne Schmierfett bei 50 °C gealtert. Für VPE ist eine höhere Massezunahme der Prüflinge mit geschliffener als mit gedrehter Oberfläche bei ähnlichem Kurvenverlauf erkennbar. Möglicherweise erleichtert die durch das Abschleifen veränderte Oberflächenstruktur die Adsorption des Schmierfetts. Abbildung 3-5 zeigt, dass durch das Abschleifen die Oberflächenenergie gegenüber der abgedrehten Oberfläche tendenziell sinkt und sich damit der Oberflächenspannung des Silikonöls annähert. Somit wird demnach der Kontakt zwischen beiden Materialien verbessert, was die Adsorption und infolgedessen auch die Aufnahme der mobilen niedermolekularen Bestandteile durch die VPE-Prüflinge begünstigen könnte.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-1: Relative Masseänderung für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Für SiR ist die Massezunahme zunächst ebenfalls größer bei den Prüflingen, die mit den VPE-Prüflingen mit geschliffener Oberfläche in Kontakt waren, allerdings gleichen sich die Werte nach 48 Stunden und 96 Stunden Alterungsdauer an.

Wie in [Nie18] ist ein nicht-monotoner Verlauf der Gewichtszunahme sowohl für VPE als auch für SiR zu beobachten, sodass sich im Gegensatz zu den in Kapitel 3.4 gezeigten Ergebnissen keine rein Ficksche Diffusion entsprechend Formel 2-33 annehmen lässt. Der wesentliche Unterschied zwischen den Experimenten liegt darin, dass nun zusätzlich elektrische Messungen nach jedem Entnahmeintervall durchgeführt wurden. Insbesondere die Stromdichtemessung bei 70 °C stellt damit eine höhere thermische Belastung dar, als die Prüflinge sie während der Alterung erfahren. Es ist möglich, dass der in [Nie18] vermutete Abbau der Polymerketten durch die funktionellen Gruppen im Schmierfett durch die erhöhte Temperatur während der Stromdichtemessung gefördert und beschleunigt wird. Darüber hinaus ist es möglich, dass durch die erhöhte Temperatur eine Nachvernetzung in den SiR-Proben stattfindet. Die resultierende erhöhte Vernetzungsdichte führt dann zu einem verringerten Diffusionskoeffizienten und somit zu einer

geringeren Massezunahme [Kro10]. Unklar ist, wieso dieses Verhalten bei der Gruppe der SiR-Proben, die in Kontakt mit den VPE-Proben mit abgedrehter Oberfläche gealtert wurden, nicht auftritt. Dort wird eine monoton steigende Massezunahme gemessen. Weiterhin ist es denkbar, dass während der Stromdichtemessung bei 50 °C und 70 °C ein Teil der zuvor eindiffundierten flüchtigen Bestandteile des Schmierfetts wieder aus den VPE- sowie den SiR-Proben ausdiffundiert, sodass der Massezunahme eine -abnahme folgt.
Die Proben der Kontrollgruppe zeigen über die Alterungsdauer nahezu keine Veränderung ihrer Masse. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass die beobachtete Massezunahme für die anderen Prüflinge auf die Aufnahme von niedermolekularen Bestandteilen aus dem Schmierfett zurückzuführen ist. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass durch die Entgasung vor Beginn der Experimente der Großteil der flüchtigen Vernetzungsnebenprodukte aus den Prüflingen entfernt worden ist. Andernfalls müsste für die Kontrollgruppe eine Abnahme der Masse mit zunehmender Alterungsdauer beobachtet werden.
In Abbildung 4-2 ist die summierte Masseänderung der jeweils in einem Sandwichprüfling kombinierten VPE- und SiR-Proben bezogen auf die zum Zeitpunkt $t = 0$ h aufgetragene Schmierfettmasse über der Alterungsdauer aufgetragen. Das Verhalten ähnelt dem der VPE-Prüflinge in Abbildung 4-1 und es wird eine höhere Massezunahme für die Prüflinge mit abgeschliffener Oberfläche verzeichnet.

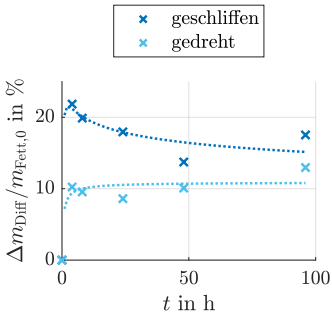
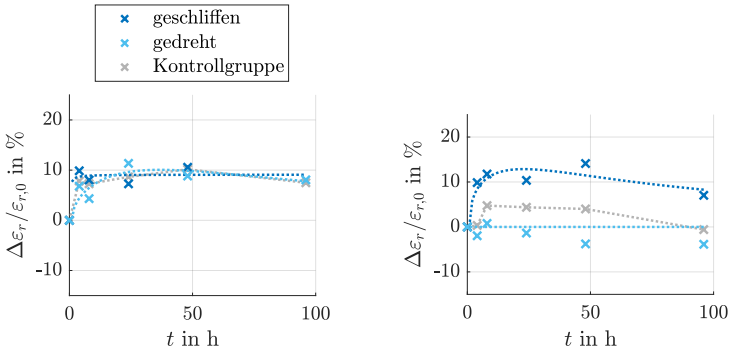


Abbildung 4-2: Gesamte relative Masseänderung für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Demgegenüber ist die in Abbildung 4-3 dargestellte Veränderung der relativen Permittivität für alle untersuchten VPE-Prüflinge nahezu identisch. Insbesondere wird auch für die Kontrollgruppe eine Zunahme der relativen Permittivität innerhalb der ersten Alterungsperiode um etwa 10% festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass alle VPE-Proben während der Versuche eine Alterung erfahren. Möglicherweise handelt es sich dabei um Thermo-Oxidation, welche aufgrund der Erhöhung polarer Carbonyl-Gruppen in einer erhöhten relativen Permittivität resultiert [Dai21; Tan19]. Die relativ geringe Zunahme der relativen Permittivität deutet dabei auf eine nur schwach ausgeprägte oxidative Alterung hin. Für VPE findet in diesem Stadium noch keine Zersetzung der Materialstruktur statt, sondern es werden die als Additiv eingebrachten Antioxidantien durch Reaktion mit dem umgebenden Luftsauerstoff "verbraucht" [Sur20]. Diese Annahme einer gering ausgeprägten oxidativen Alterung wird durch die Beobachtung gestützt, dass rein optisch keine Verfärbung der VPE-Prüflinge während der Alterungsdauer erkennbar ist.
Auch für die Kontrollgruppe der SiR-Prüflinge findet eine Veränderung der relativen Permittivität während der Versuche statt. Diese ist jedoch geringer und flacht nach 48 Stunden soweit ab, dass zum Ende der Alterungsdauer nahezu der Ausgangswert erreicht wird. Im Vergleich dazu steigt die Permittivität für die mit geschliffenen VPE-Proben gealterten SiR-Prüflinge

im Laufe der Alterung an. Dies lässt sich mit der Vergrößerung des freien Volumens durch die Aufnahme von Schmierfett erklären, wie in Kapitel 1.2.4 erläutert. Für die mit gedrehten VPE-Proben gealterten SiR-Prüflinge wird jedoch nahezu keine bzw. eine schwach ausgeprägte Abnahme der relativen Permittivität gemessen. Es ist unklar, wieso die Zunahme der relativen Permittivität nur an den SiR-Prüflingen beobachtet wird, die gemeinsam mit VPE-Proben mit geschliffener Oberfläche gealtert wurden, zumal sich in der Massezunahme gemäß Abbildung 4-1 kein bleibender Unterschied darstellt.



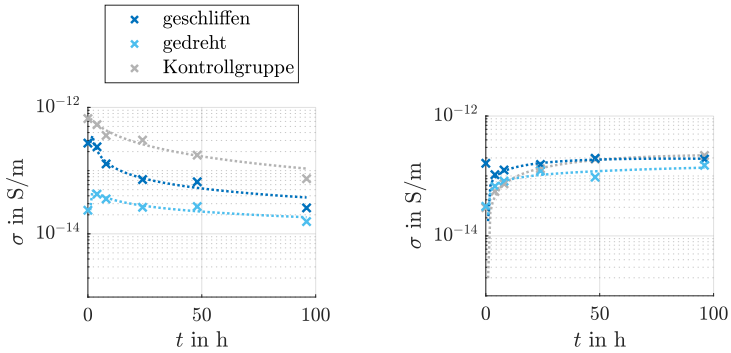
(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-3: Relative Änderung der Permittivität für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

4.1.2 Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit

Die in Abbildung 4-4 dargestellte elektrische Leitfähigkeit der VPE- und SiR-Prüflinge weist einen gegenläufigen Trend auf. Da die elektrische Leitfähigkeit der während der Alterung in die Feststoffe diffundierenden niedermolekularen Bestandteile in der Größenordnung 10^{-12} - 10^{-10} S/m und somit oberhalb der von VPE und SiR liegt, wäre eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit der Feststoffe mit zunehmender Schmierfettdiffusion zu erwarten [Tia01; Wu98]. Für die VPE-Prüflinge wird jedoch mit zunehmender

Alterungsdauer trotz der Schmierfettdiffusion eine Abnahme der Leitfähigkeit beobachtet. Dies deutet darauf hin, dass strukturelle Veränderungen in den VPE-Proben auftreten, die die Erhöhung der Leitfähigkeit durch die Schmierfettdiffusion überlagern. Anders als bei der relativen Permittivität sind für die Leitfähigkeit der verschiedenen Gruppen von VPE-Proben Unterschiede ersichtlich, wobei die Messwerte für die Kontrollgruppe am höchsten und für die Proben mit gedrehter Oberfläche am niedrigsten sind. Dies deckt sich mit den in [Doe18] präsentierten Ergebnissen: dort wird für VPE-Prüflinge mit geschnittener Oberfläche, die strukturell den hier untersuchten abgedrehten Prülingen ähnelt, ein geringerer Injektionsstrom gegenüber Prüflingen mit geschliffener Oberfläche beobachtet. Die gemessene Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit stützt die Vermutung, dass eine thermo-oxidative Alterung in geringem Ausmaß stattfindet: während bei ausgeprägt oxidierten VPE-Prüflingen eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit messbar ist, wird zu Beginn der Alterung eine Abnahme der Leitfähigkeit verzeichnet. Dieses Phänomen wird auf eine initiale Zunahme tiefer Haftstellen zurückgeführt, welche dem Transport von Ladungsträgern durch das Material entgegenstehen. Weiterhin findet die Oxidation aufgrund der dort erhöhten Sauerstoffkonzentration vornehmlich an der Materialoberfläche statt. Die dort somit erhöhte Anzahl von Haftstellen kann die Injektion von Ladungsträgern erschweren, was sich makroskopisch ebenfalls in einer verringerten elektrischen Leitfähigkeit niederschlägt [Liu17; Tan19].
Demgegenüber sind für die SiR-Prüflinge keine wesentlichen Unterschiede erkennbar. Für alle untersuchten Prüflinge wird eine Zunahme der Leitfähigkeit beobachtet, die durch die Schmierfettdiffusion erklärt werden kann. Da jedoch auch für die Kontrollgruppe ohne Schmierfett die elektrische Leitfähigkeit mit zunehmender Alterungsdauer ansteigt, ist davon auszugehen, dass auch die SiR-Prüflinge eine Veränderung in der Materialstruktur infolge der Alterung erfahren, die unabhängig vom Schmierfett ist.

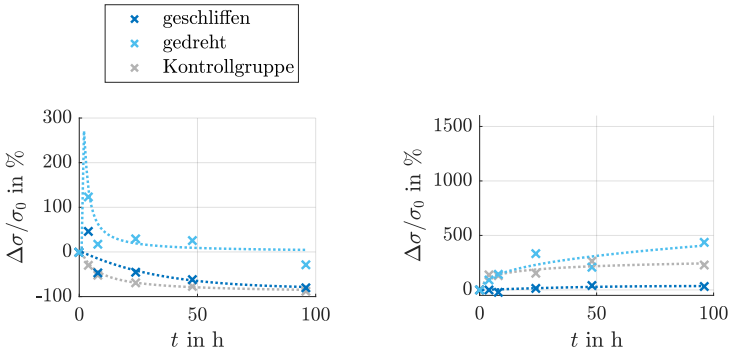


(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-4: Elektrische Leitfähigkeit für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Bei Betrachtung der in Abbildung 4-5 dargestellten relativen Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit fällt auf, dass sich für VPE eine große Ähnlichkeit zwischen der Kontrollgruppe und den Prüflingen mit geschliffener Oberfläche ergibt und beide eine Abnahme ihrer Leitfähigkeit erfahren, wohingegen für die Prüflinge mit abgedrehter Oberfläche nach einer initialen Zunahme und folgender Abnahme für Alterungsdauern von 8 Stunden und länger nahezu kein Unterschied zu der vor Beginn der Alterung gemessenen elektrischen Leitfähigkeit besteht. Aus Abbildung 4-1 geht hervor, dass für die VPE-Prüflinge mit geschliffener Oberfläche eine höhere Massezunahme vorliegt als für die Prüflinge mit gedrehter Oberfläche. Für VPE scheint die Diffusion von Schmierfett also nicht direkt mit der Änderung der Leitfähigkeit zusammenzuhängen, sofern die Kontrollgruppe in die Überlegung mit einbezogen wird: die Kontrollgruppe sowie die Prüflinge mit geschliffener Oberfläche verzeichnen die kleinsten bzw. größte Massezunahme, aber eine vergleichbare und größere Abnahme ihrer elektrischen Leitfähigkeit als die Prüflinge mit gedrehter Oberfläche. Es ist jedoch denkbar, dass die für die Kontrollgruppe vermutete oxidative Alterung durch das Aufbringen von Schmierfett gehemmt oder unterbunden wird. In diesem Fall wäre die

Abnahme der Leitfähigkeit für die VPE-Prüflinge mit geschliffener Oberfläche möglicherweise eine Folge der Schmierfettdiffusion und somit auf einen anderen Mechanismus zurückzuführen als das Verhalten der Kontrollgruppe. Dementsprechend wäre die Höhe der Gewichtszunahme für die VPE-Prüflinge mit Ausnahme der Kontrollgruppe sehr wohl ein möglicher Indikator für die Höhe der Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit. Die nur unwesentliche Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit der VPE-Prüflinge mit gedrehter Oberfläche lässt sich dann durch deren geringe Massezunahme erklären.



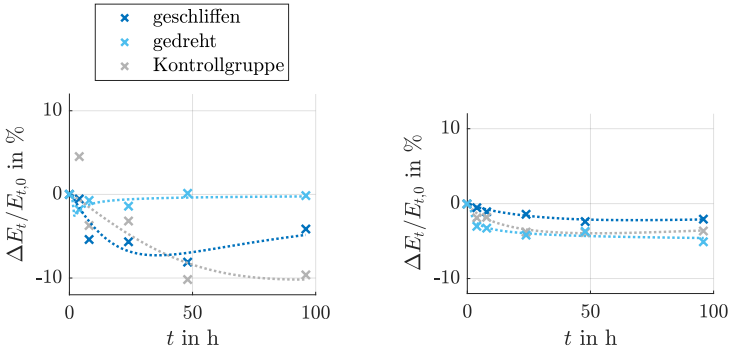
(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-5: Relative Änderung der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Die Zunahme der Leitfähigkeit für die SiR-Prüflinge scheint keinen Zusammenhang mit der Massezunahme aufzuweisen, verhält sich aber genau umgekehrt zu der in Abbildung 4-3 dargestellten Zunahme der relativen Permittivität. Wie zuvor bei VPE beobachtet, findet eine Veränderung der Leitfähigkeit auch bei der Kontrollgruppe statt, was auf einen Alterungsmechanismus unabhängig von der Schmierfettdiffusion hindeutet. Da SiR jedoch im Allgemeinen oxidationsbeständig ist, scheint es sich dabei um einen dritten Alterungsmechanismus zu handeln. Wie bereits in Kapitel 4.1.1 erwähnt, handelt es sich dabei möglicherweise um eine Nachvernetzung in-

folge der erhöhten Temperatur während der Alterungsversuche und der Stromdichtemessungen. Die zusätzlichen Vernetzungspunkte bilden daebei flache Haftstellen aus, sodass infolgedessen die elektrische Leitfähigkeit in der Kontrollgruppe ansteigt. Durch Diffusion von Schmierfett werden darüber hinaus physikalische Vernetzungspunkte aufgebrochen und das freie Volumen zunächst vergrößert und anschließend mit eindiffundiertem Schmierfett besetzt. Dies resultiert gemäß [Hua18; Wan21; Yan20] ebenfalls in einer Zunahme flacher und einer Abnahme tiefer Haftstellen, sodass die elektrische Leitfähigkeit weiter zunimmt. Somit wäre für die mit Schmierfett gealterten SiR-Prüflinge eine noch stärker ausgeprägte Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit zu erwarten als für die Kontrollgruppe. Es ist unklar, wieso im Gegensatz dazu die mit den geschliffenen VPE-Prüflingen gealterten SiR-Proben nahezu keine Veränderung ihrer elektrischen Leitfähigkeit im Zuge der Alterung erfahren. Denkbar ist, dass das eindiffundierte Schmierfett die Nachvernetzung verhindert, aber die geringe Menge nicht ausreicht, um ein Aufbrechen der Polymerketten zu verursachen. Dies erklärt jedoch nicht, wieso für SiR ein unterschiedliches Verhalten in Abhängigkeit von der Art der Oberflächenbearbeitung der VPE-Proben beobachtet wird.
Die in Abbildung 4-6 gezeigte Änderung der Aktivierungsenergie verhält sich für VPE nahezu analog zur Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit: es ist eine deutliche Verringerung von E_t für die Kontrollgruppe sowie für die Prüflinge mit geschliffener Oberfläche erkennbar, wohingegen der Wert für die Prüflinge mit gedrehter Oberfläche nahezu unverändert über die gesamte Alterungsdauer bleibt.
Für SiR verhält sich die Aktivierungsenergie im Wesentlichen qualitativ wie die Invertierung der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit. Eine stärkere Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit geht somit mit einer stärkeren Abnahme der Aktivierungsenergie einher, wobei die Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen äußerst schwach ausgeprägt sind. Der Zusammenhang mit der Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit ist insofern plausibel, als dass eine verringerte Aktivierungsenergie bedeutet, dass bei gleichbleibender Temperatur und Prüfspannung mehr Ladungsträger aus ihren Haftstellen gelöst werden und am Ladungstransport teilnehmen können, was sich makroskopisch als Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit

bemerkbar macht. Für VPE scheint dieser Zusammenhang nicht vorzuliegen. Dabei ist zu beachten, dass für die Berechnung der Aktivierungsenergie nach Formel 2-16 alle Stromdichtemesswerte mit einbezogen werden, also auch jene, die bei geringen Prüfspannungen und Temperaturen gewonnen wurden. Diese Messwerte sind absolut sehr niedrig und liegen damit im unteren Bereich der Messempfindlichkeit des verwendeten Prüfaufbaus. Es ist nicht auszuschließen, dass durch die entsprechend erhöhte Streuung der Messwerte die daraus berechnete Aktivierungsenergie und deren Veränderung für die untersuchten VPE-Prüflinge unplausibel sind.



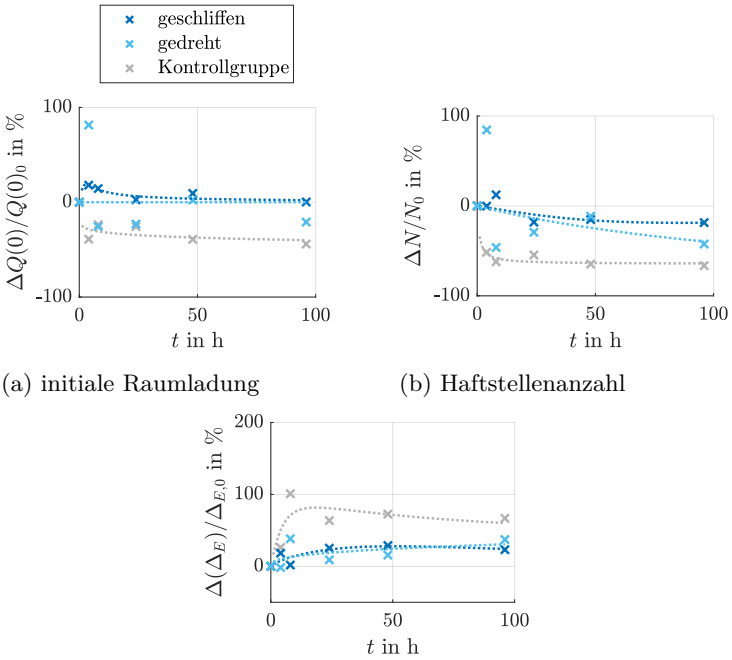
(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-6: Relative Änderung der Aktivierungsenergie für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

4.1.3 Veränderung der Haftstelleneigenschaften

Die aus den Raumladungsmessungen berechnete Veränderung von $Q(0)$, N und Δ_E sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Für alle drei Größen weist die Kontrollgruppe jeweils die stärkste Veränderung auf. Während $Q(0)$ für die mit Fett gealterten Proben nahezu konstant bleibt, nimmt die Anzahl besetzter Haftstellen N leicht ab und die Haftstellentiefe Δ_E im Gegenzug geringfügig zu. Für keine der drei Größen ist ein Unterschied für die Art

der Oberflächenbearbeitung der VPE-Prüflinge zu erkennen. Die in Abbildung 3-3 gezeigte unterschiedliche Struktur der VPE-Oberfläche verursacht somit keine messbaren Unterschiede in der Raumladungsbildung an der Materialgrenzfläche zwischen VPE und SiR.
Bezüglich der Kontrollgruppe ist es denkbar, dass die in Abbildung 4-5 gezeigte abnehmende Leitfähigkeit der VPE-Prüflinge dazu führt, dass mit zunehmender Alterungsdauer weniger Ladungsträger während der Polarisationsdauer an die Grenzfläche gelangen und somit die Höhe von $Q(0)$ abnimmt. VPE-seitig sind dann auch weniger Ladungsträger in Haftstellen gebunden, weil durch die oxidierte Materialoberfläche absolut weniger Ladungsträger injiziert werden.
Für SiR befinden sich Ladungsträger in den durch die Nachvernetzung neu erzeugten flachen Haftstellen, jedoch werden sie wegen der niedrigen Energieniveaus dieser Haftstellen bereits so kurz nach Abschalten der Polarisationsspannung freigesetzt und abgeleitet, dass der Vorgang messtechnisch nicht erfassbar ist. Somit ergibt sich insgesamt die beobachtete Abnahme von N.



(a) initiale Raumladung

(b) Haftstellenanzahl

(c) Haftstellentiefe

Abbildung 4-7: Relative Änderung der Haftstellenparameter ermittelt aus Messung des Raumladungsabbaus für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

In Abbildung 4-8 ist die nach Formel 1-11 berechnete Ladungsträgerbeweglichkeit über der Haftstellentiefe abgebildet. Wie zuvor sind die jeweiligen Medianwerte durch Kreuze dargestellt, die gepunktete Linie stellt eine Trendlinie mit $y(x) = a + b \cdot x$ dar. Für alle Gruppen ergibt sich ein negativer Zusammenhang, wobei der Korrelationskoeffizient für die Sandwich-Prüflinge mit gedrehten VPE-Proben lediglich schwach ausgeprägt ist. Das Ergebnis lässt sich so interpretieren, dass der beobachtete Anstieg von Δ_E für die Kontrollgruppe mit einer Abnahme der Ladungsträgerbeweglichkeit und somit der elektrischen Leitfähigkeit in Grenzschichtnähe einhergeht. Da

für die SiR-Prüflinge jedoch eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit ermittelt wurde, scheint die VPE-Seite mit der abnehmenden Leitfähigkeit den Ladungsauf- und Abbau an der Materialgrenzfläche in dieser Hinsicht zu dominieren.

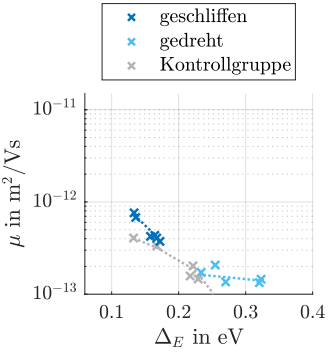
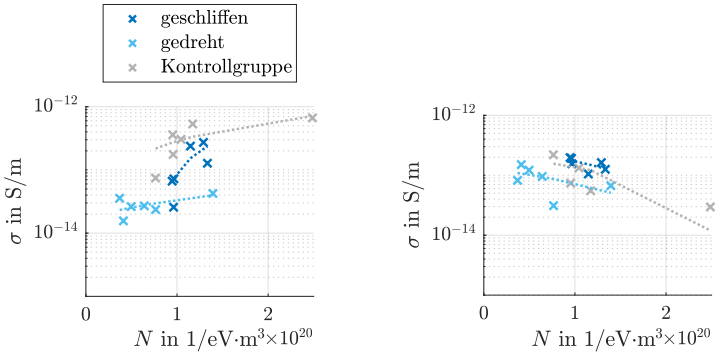


Abbildung 4-8: Ladungsträgerbeweglichkeit über der Haftstellentiefe für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

Analog wird in Abbildung 4-9 gezeigt, dass eine Zunahme von N mit einer zunehmenden Leitfähigkeit für VPE sowie mit einer abnehmenden Leitfähigkeit für SiR korreliert. Die in Abbildung 4-7 dargestellte Abnahme von N für die Kontrollgruppe scheint somit im Wesentlichen von der Abnahme der Leitfähigkeit der VPE-Prüflinge beeinflusst zu sein. Der Zusammenhang von N und σ ist für SiR für beide Arten der Oberflächenbearbeitung der VPE-Prüflinge sowie für die Kontrollgruppe vergleichbar, die Punktescharen liegen nahe beieinander und die Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich -0,5 bis -0,7 und weisen somit keine großen Unterschiede auf. Für VPE ist der Zusammenhang hingegen für die Prüflinge mit geschliffener Oberfläche am stärksten und für jene mit gedrehter Oberfläche am schwächsten ausgeprägt. Möglicherweise werden durch das Abschleifen der Oberfläche neue flache Haftstellen erzeugt, in denen vermehrt Ladungsansammlung stattfindet. Somit steigt bei zunehmender elektrischer Leitfähigkeit die Anzahl N der besetzten Haftstellen für Prüflinge mit geschliffener Oberfläche stärker an

als für Prüflinge mit gedrehter Oberfläche.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-9: Elektrische Leitfähigkeit über der Haftstellenanzahl für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

Aus Abbildung 4-10 geht hervor, dass eine positive Korrelation zwischen $Q(0)$ und dem Verhältnis der Leitfähigkeiten für beide Arten der Oberflächenbearbeitung sowie für die Kontrollgruppe vorliegt. Die für die Kontrollgruppe beobachtete Abnahme von $Q(0)$ über der Alterungsdauer geht somit mit einem abnehmenden Wert für $\sigma_{\mathrm{VPE}}/\sigma_{\mathrm{SiR}}$ einher. Dieser Zusammenhang unterstützt die Hypothese, dass die Abnahme in der Leitfähigkeit von VPE den Raumladungsaufbau während der Polarisation und somit $Q(0)$ verringert. Ferner bestätigt diese Beobachtung die Aussage, dass oberhalb der Injektionsfeldstärke die durch Maxwell-Wagner-Sillars-Polarisation verursachte gegenüber der injizierten Grenzflächenladung vernachlässigbar ist [Che04; Das14; Hu16]. Andernfalls müsste gemäß Gleichung 1-7 die gemessene Ladung $Q(0)$ für $\sigma_{\mathrm{VPE}}/\sigma_{\mathrm{SiR}} = 1$ ihr Minimum erreichen.

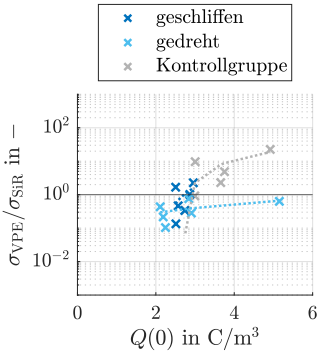


Abbildung 4-10: Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR über der Raumladung für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

Für die VPE-Prüflinge mit abgedrehter Oberfläche wird während der Alterung eine geringere Veränderung in den elektrischen Eigenschaften sowie eine geringere Massezunahme beobachtet als für die VPE-Prüflinge mit abgeschliffener Oberfläche. Dies deutet darauf hin, dass durch das Abschleifen die Adsorption von Schmierfett und die darauf resultierenden Alterungsvorgänge verstärkt werden. Darüberhinaus zeigt sich auch in den ohne Schmierfett gealterten Kontrollgruppen für VPE und für SiR eine Veränderung in den elektrischen Materialeigenschaften. Eine mögliche Ursache ist, dass zusätzlich zur Alterung durch die Aufnahme niedermolekularer Bestandteile aus dem Schmierfett weitere Alterungsmechanismen aktiv sind. Die Ergebnisse für VPE deuten auf eine schwach ausgeprägte Oxidation mit zunehmender Alterungsdauer hin. Für SiR wird vermutet, dass eine Nachvernetzung des Materials während der Alterung stattfindet.

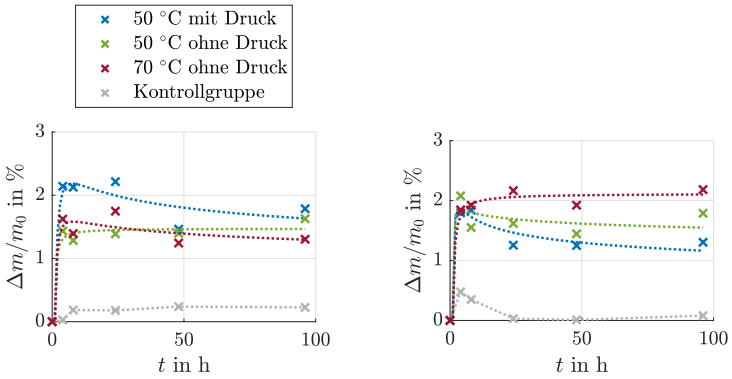
4.2 Einfluss der Alterungsbedingungen

Im Folgenden wird der Einfluss der Bedingungen während der thermischen Alterung untersucht. Dabei werden die Alterungstemperatur und der Anpressdruck variiert. In Kapitel 3.4 wurden beide Parameter im Vorversuch

zur Festlegung der Versuchsdauer und Entnahmezeitpunkte bereits berücksichtigt. Dabei wurde jedoch ausschließlich die Massezunahme als Maß für die Diffusion niedermolekularer Bestandteile aus dem Schmierfett in die VPE- und SiR-Proben betrachtet. Indem nun der gesamte Versuchsablauf unter Variation von Temperatur und Anpressdruck durchgeführt wird, lässt sich der Einfluss dieser Parameter insbesondere auf die Veränderung der elektrischen Eigenschaften mit fortschreitender Alterungsdauer bestimmen.

4.2.1 Veränderung von Masse und relativer Permittivität

Die in Abbildung 4-11 dargestellte Veränderung der Masse über der Alterungsdauer zeigt wie im vorherigen Abschnitt nur geringfügige Unterschiede für die untersuchten VPE-Prüflinge. Tendenziell ist die Massezunahme höher, wenn die Sandwich-Prüflinge während der Alterung unter Druck in der dafür aufgebauten Prüflingshalterung gelagert werden. Die ohne Druck bei 50 °C und ohne Druck bei 70 °C gealterten Prüflinge unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Massezunahme nahezu nicht. Es wird vermutet, dass durch den aufgebrachten Druck ein besserer Kontakt der VPE-Prüflinge zu den angrenzenden SiR-Prüflingen und dem dazwischen aufgebrachten Schmierfett gewährleistet ist, sodass die Diffusion niedermolekularer Bestandteile aus dem Schmierfett in die VPE-Proben begünstigt wird.
Im Gegensatz dazu ist die Massezunahme in den SiR-Proben mit Lagerung in der Druckvorrichtung gegenüber den ohne Druck gelagerten Proben verringert. Möglicherweise wird durch die Kompression der SiR-Prüflinge in der Druckvorrichtung das im Material vorhandene freie Volumen komprimiert, sodass weniger Raum für die Einlagerung von Schmierfett vorhanden ist [Wan21]. Die tendenziell geringere Massezunahme für SiR unter Druck wird bereits im Vorversuch (vgl. Abbildung 3-12) beobachtet. Außerdem wird eine erhöhte und monotone Massezunahme für die SiR-Prüflinge bei erhöhter Temperatur gemessen. Da hier die Temperatur während der Alterung genauso groß ist wie während der Stromdichtemessung, halten sich die Schmierfettdiffusion und das Ausgasen flüchtiger Bestandteile die Waage, sodass keine Masseabnahme beobachtet wird.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-11: Relative Masseänderung für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Die in Abbildung 4-12 gezeigte gesamte relative Masseänderung der VPE- und SiR-Proben ähnelt qualitativ eher den für die VPE-Prüflingen in Abbildung 4-11 dargestellten Kurvenverläufen. Es ist jedoch für Alterungsdauern von 48 Stunden und darüber hinaus nahezu kein Unterschied in der Masseänderung für die untersuchten Alterungsbedingungen mehr erkennbar.

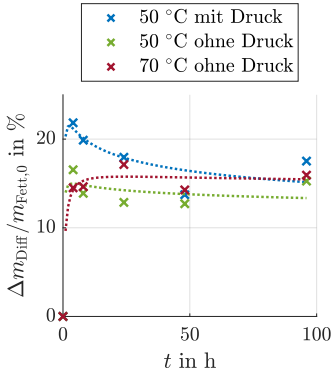
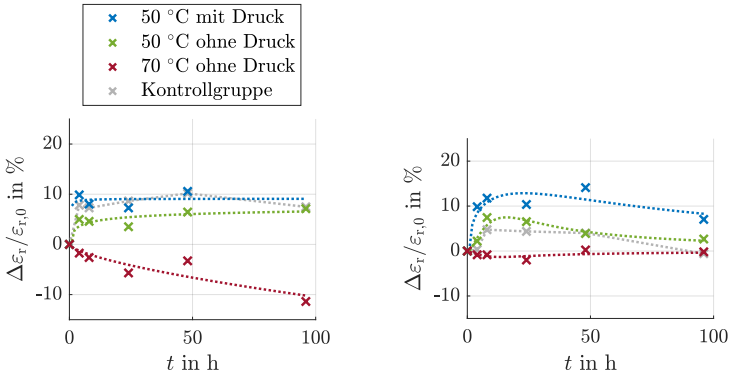


Abbildung 4-12: Gesamte relative Masseänderung für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Für VPE scheint einzig die Erhöhung der Alterungstemperatur die in Abbildung 4-13 gezeigte Veränderung der relativen Permittivität zu beeinflussen: während die anderen untersuchten Materialproben wie die Kontrollgruppe einen leichten Anstieg ihrer Permittivität aufweisen, findet für die bei 70 °C gealterten Proben mit zunehmender Alterungsdauer eine Abnahme der relativen Permittivität statt. Dies steht im Widerspruch zur erwarteten Zunahme der relativen Permittivität infolge von oxidativer Alterung.
Für SiR ist die Zunahme der relativen Permittivität umso geringer, je höher die in Abbildung 4-11 dargestellte Massezunahme ist. Dies steht im Widerspruch zu der zuvor aufgestellten Hypothese, dass mit zunehmender Schmierfettdiffusion die relative Permittivität steigt. Möglicherweise überwiegt oberhalb einer bestimmten Menge von eindiffundiertem Schmierfett der Effekt der verringerten Nachvernetzung des SiR, da eine höhere Vernetzungsdichte sich in einer weiteren Zunahme der relativen Permittivität äußern würde [Sur20]. Zudem ist es möglich, dass durch das in die SiR-Prüflinge diffundierte Schmierfett die Bewegungsfreiheit der Molekülketten und somit die relative Permittivität reduziert werden [Hu22; Li23].

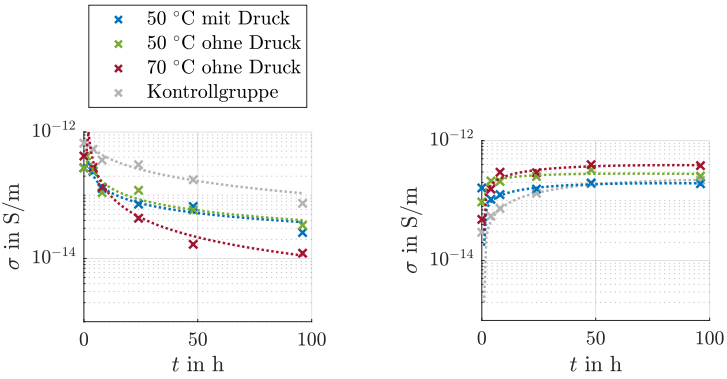


(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-13: Relative Änderung der Permittivität für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

4.2.2 Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit bzw. deren Veränderung für die unter verschiedenen Bedingungen gealterten VPE- und SiR-Prüflinge sind in Abbildung 4-14 sowie in Abbildung 4-15 dargestellt. Dabei ergeben sich für die bei 70 °C gealterten Prüflinge für VPE die niedrigsten Werte und die größte Abnahme, für SiR umgekehrt die höchste absolut gemessene elektrische Leitfähigkeit sowie die am stärksten ausgeprägte Zunahme mit fortschreitender Alterung. Für beide Dielektrika ist lediglich ein geringer Einfluss des Anpressdrucks während der Alterung erkennbar, wobei die relative Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit sowohl für VPE als auch für SiR für die ohne Druck gealterten Proben tendenziell stärker ausgeprägt ist. Damit weisen die ohne Druck gelagerten Proben eine größere Ähnlichkeit mit der jeweiligen Kontrollgruppe auf.

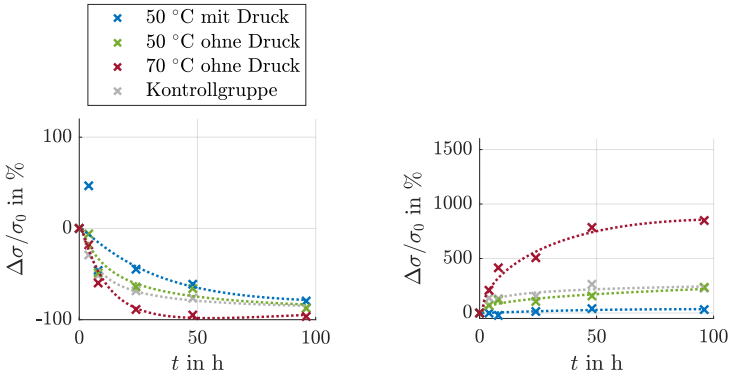


(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-14: Elektrische Leitfähigkeit für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Die niedrige elektrische Leitfähigkeit bzw. stärker ausgeprägte Abnahme für die bei höherer Temperatur gealterten VPE-Prüflinge deutet darauf hin, dass durch die Erhöhung der Alterungstemperatur eine verstärkte Oxidation der Prüflinge stattfindet, sodass die in Kapitel 4.1.2 für die Kontrollgruppe beschriebenen Phänomene auch für diese Gruppe denkbar sind. Auch unter Ausklammern der Kontrollgruppe ist jedoch kein Zusammenhang zwischen der Veränderung der relativen Masse und der elektrischen Leitfähigkeit ersichtlich. Es zeigt sich jedoch, dass die Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit stärker ist für die Gruppen von VPE-Prüflingen, die gemäß Abbildung 4-13 eine größere Veränderung ihrer relativen Permittivität aufweisen.

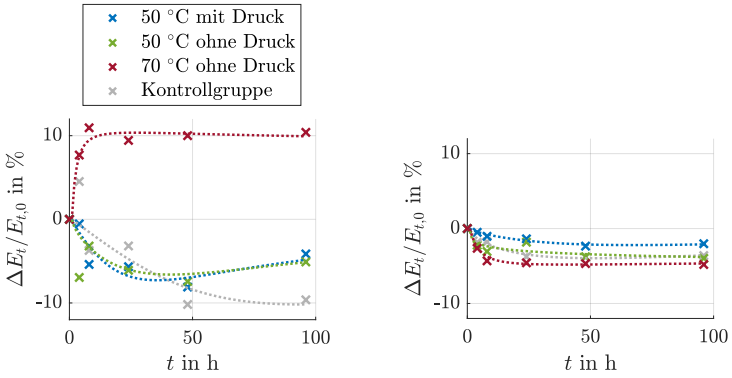
Für SiR wird beobachtet, dass die Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit mit der in Abbildung 4-11 dargestellten Massezunahme einhergeht und sich damit genau konträr zur Veränderung der relativen Permittivität verhält.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-15: Relative Änderung der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Die in Abbildung 4-16 gezeigte Veränderung der Aktivierungsenergie ist lediglich für die bei erhöhter Temperatur gealterten VPE-Prüflingen positiv, für alle anderen Prüflinge wird eine Abnahme mit zunehmender Alterungsdauer beobachtet. Möglicherweise ist die Neubildung tiefer Haftstellen durch die Oxidation ursächlich für diese Erhöhung von E_t, wodurch sich auch die beobachtete Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit erklären ließe. Insbesondere für VPE verhalten sich die mit und ohne Druck bei 50 °C gealterten Prüflinge hinsichtlich ihrer Aktivierungsenergie gleichartig.
Für SiR sind für alle untersuchten Gruppen nur marginale Unterschiede ersichtlich. Dabei ist jedoch analog zu den zuvor beschriebenen Zusammenhängen die Abnahme von E_t umso ausgeprägter, je stärker die Massezunahme bzw. der Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit für die entsprechende Gruppe ist.

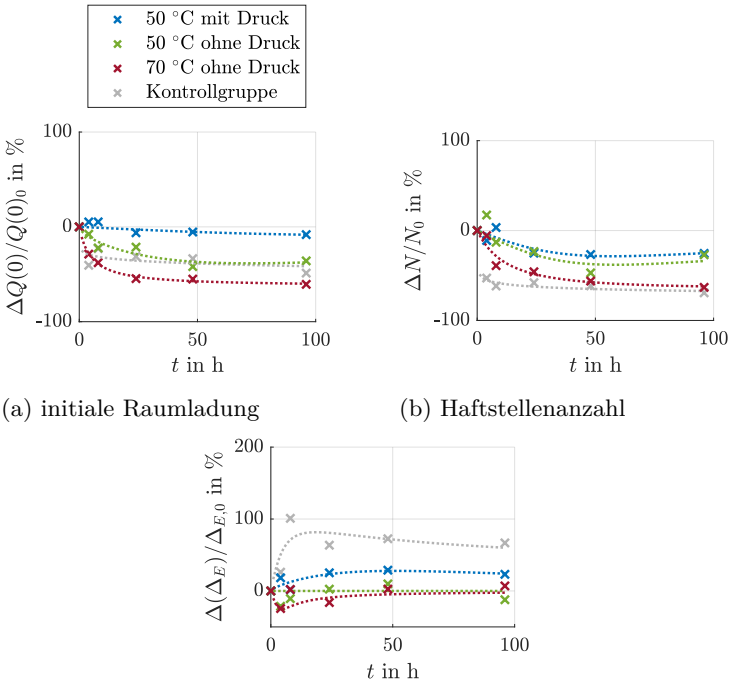


(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-16: Relative Änderung der Aktivierungsenergie für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

4.2.3 Veränderung der Haftstelleneigenschaften

Die Veränderung der Haftstelleneigenschaften gemäß Abbildung 4-17 weisen eine Abnahme von $Q(0)$ sowie von N bei nahezu gleichbleibender Haftstellentiefe für die bei 70 °C gealterten Sandwich-Prüflinge auf. Es wird vermutet, dass, wie in Kapitel 4.1.3 für die Kontrollgruppe beschrieben, die Abnahme von $Q(0)$ durch die Abnahme der Leitfähigkeit auf der VPE-Seite und die Abnahme von N durch die Zunahme der Leitfähigkeit auf der SiR-Seite getrieben wird. Dabei weist Δ_E für die bei erhöhter Temperatur gealterten Prüflinge beinahe keine Veränderung mit zunehmender Alterungsdauer auf. Es ist denkbar, dass sich die Verschiebung in Richtung tiefer Energieniveaus für VPE und die Verschiebung in Richtung flacher Energieniveaus für SiR gegenseitig ausgleichen.



(a) initiale Raumladung

(b) Haftstellenanzahl

(c) Haftstellentiefe

Abbildung 4-17: Relative Änderung der Haftstellenparameter ermittelt aus Messung des Raumladungsabbaus für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Wie zuvor ist der in Abbildung 4-18 dargestellte negative Zusammenhang zwischen der Ladungsträgerbeweglichkeit und der Haftstellentiefe für den untersuchten Grenzflächenbereich erkennbar. Bezüglich der Alterungsparameter lassen sich die untersuchten Gruppen weder durch die abgedeckten Wertebereiche noch durch die Stärke der Korrelation voneinander unterscheiden. Die Ladungsträgerbeweglichkeit nimmt also bei zunehmender Haftstellentiefe für alle untersuchten Alterungsbedingungen gleichermaßen ab.

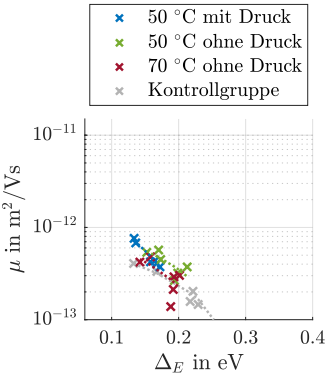
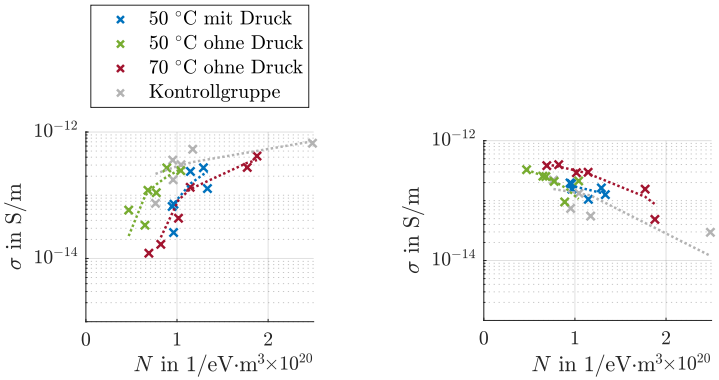


Abbildung 4-18: Ladungsträgerbeweglichkeit über der Haftstellentiefe für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

Ebenfalls analog zu Abbildung 4-9 ist auch aus Abbildung 4-19 ein positiver Zusammenhang zwischen der Anzahl besetzter Haftstellen und der elektrischen Leitfähigkeit für VPE und ein gegensätzlicher Zusammenhang für SiR ersichtlich. Auch hier sind keine klar voneinander abgegrenzten Bereiche oder Unterschiede in der Steilheit für die verschiedenen Alterungsbedingungen erkennbar.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-19: Elektrische Leitfähigkeit über der Haftstellenanzahl für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

Wie in Kapitel 4.1.3 diskutiert, geht aus Abbildung 4-20 auch für die untersuchten Alterungsbedingungen eine positive Korrelation zwischen $Q(0)$ und dem Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR hervor. Obwohl die bei 70 °C gealterten Prüflinge sich hinsichtlich der bisher diskutierten Größen von den anderen Gruppen und insbesondere auch von der Kontrollgruppe unterscheiden, sind die berechneten Werte für das Verhältnis der Leitfähigkeiten denen der anderen Alterungsbedingungen ähnlicher als denen der Kontrollgruppe: lediglich für zwei Messungen ergibt sich ein Verhältnis von $\sigma_{\mathrm{VPE}}/\sigma_{\mathrm{SiR}} > 1$ für die bei 70 °C ohne Druck gealterten Prüflinge, wohingegen in der Kontrollgruppe alle bis auf zwei Messungen ein Verhältnis von weniger als eins aufweisen. Dieser Parameter, der aus makroskopischer Perspektive als wesentlich für die elektrische Feldverteilung gemäß Gleichung 1-7 angesehen wird, spiegelt demnach nicht zwangsläufig die aus mikroskopischer Perspektive relevanten Raumladungsphänomene an Materialgrenzflächen wider.

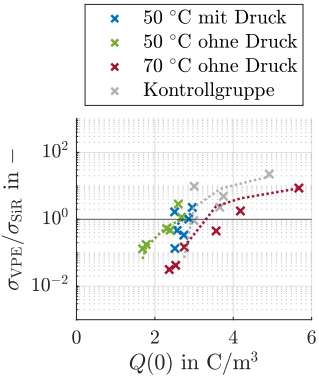


Abbildung 4-20: Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR über der Raumladung für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

Zwischen den mit und ohne extern ausgeübtem Anpressdruck gealterten Prüflingen werden nur geringfügige Unterschiede beobachtet. Im Gegensatz dazu verstärkt die Erhöhung der Alterungstemperatur von 50 °C auf 70 °C die Ab- bzw. Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR und infolgedessen auch der Raumladungsparameter. Die Alterungstemperatur sollte demnach entsprechend der in Kapitel 3.4 dargestellten Vorgehensweise abhängig von der vorgesehenen Betriebstemperatur des Kabelsystems ausgewählt werden.

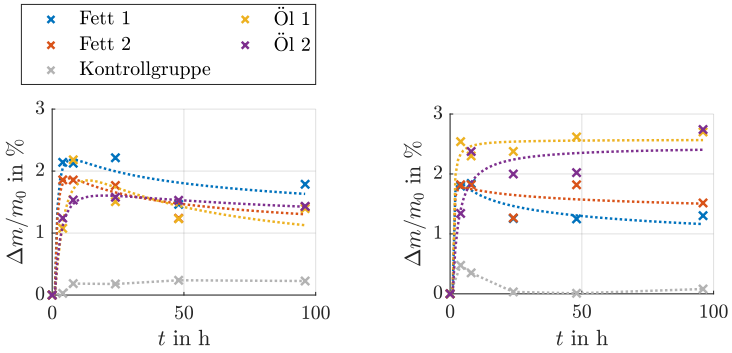
4.3 Einfluss des Schmierfettes

Abschließend wird der Einfluss des verwendeten Schmierfettes untersucht. Dabei werden VPE-Prüflinge mit geschliffener Oberfläche verwendet und die Alterung bei 50 °C mit aufgebrachtem Anpressdruck durchgeführt.

4.3.1 Veränderung von Masse und relativer Permittivität

Wie zuvor weist der Gewichtsanstieg für VPE infolge der Alterung mit verschiedenen Schmierfetten einen nicht-monotonen Verlauf auf, was in

Abbildung 4-21 erkennbar ist. Es sind dabei keine ausgeprägten Unterschiede für die verschiedenen Fette erkennbar.
Für die untersuchten SiR-Proben ergeben sich unterschiedliche Verläufe der Zeit-Gewichtskurven in Abhängigkeit der untersuchten Schmierfette: die mit den beiden Ölen gealterten Materialproben zeigen einen monoton steigenden Gewichtsverlauf, wohingegen die Masse der mit den Fetten gealterten Proben zunächst zu- und bereits nach acht Stunden Alterung leicht abnimmt. Möglicherweise enthalten die Fette im Gegensatz zu den Ölen zusätzliche flüchtige Bestandteile, die mit zunehmender Alterungsdauer wieder aus dem SiR ausgasen, wohingegen sich die niedermolekularen Bestandteile aus den Ölen dauerhaft in der Polymerstruktur einlagern. Wie erwartet weisen die mit den Ölen gealterten Proben eine höhere Gewichtszunahme auf, da im Vergleich zu Fett in den Ölen mehr niedermolekulare Bestandteile für die Diffusion zur Verfügung stehen. Darüber hinaus wird eine schnellere Gewichtszunahme für die mit Öl 1 gealterten SiR-Proben beobachtet, was auf die niedrigere Kettenlänge verglichen mit Öl 2 zurückzuführen ist. Die beiden untersuchten Fette, welche auf Öl 1 basieren, weisen ebenfalls eine schnelle Gewichtszunahme während der ersten Alterungsperiode auf. Darüber hinaus ist die Massezunahme für Fett 2 geringfügig höher als für Fett 1. Dies könnte in der geringeren Füllstoffmenge in Fett 2 begründet liegen, sodass wiederum mehr niedermolekulare Bestandteile als in Fett 1 für die Diffusion zur Verfügung stehen.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-21: Relative Masseänderung für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) (nach [Net25])

Die relative Masseänderung der Sandwich-Prüflinge bezogen auf die Masse des bei $t = 0$ h aufgetragenen Schmierfetts ist in Abbildung 4-22 dargestellt, wobei die Verläufe denen für SiR in Abbildung 4-21 ähneln. Es ist somit davon auszugehen, dass für die hier untersuchten Prüflinge die Diffusion in die SiR-Prüflinge dominant gegenüber VPE ist, was auf die vergleichsweise höhere Diffusivität von Silikonen zurückzuführen ist.

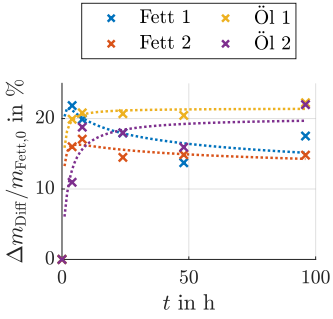
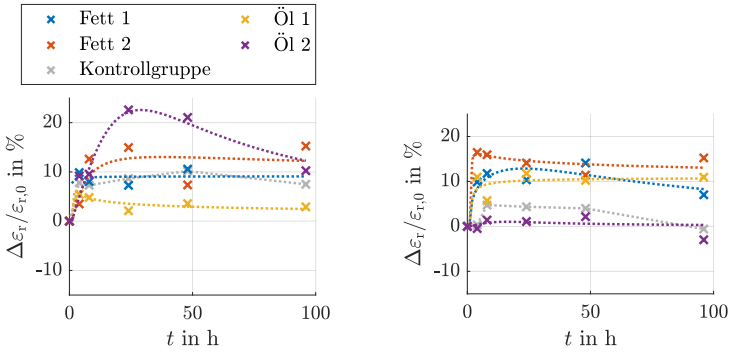


Abbildung 4-22: Gesamte relative Masseänderung für verschiedene Schmierfette (nach [Net25])

Die Veränderung der relativen Permittivität für VPE und SiR ist in Abbildung 4-23 dargestellt. Für SiR ist tendenziell eine Ähnlichkeit im Verlauf für Fett 1, Fett 2 und Öl 1 erkennbar, wobei für die mit Öl 2 gealterten Prüflinge nahezu keine Veränderung in ihrer relativen Permittivität erfahren und damit den Prüflingen aus der Kontrollgruppe ähneln. Die Erhöhung der Permittivität für die auf Öl 1 basierenden Fette kann auf die in Kapitel 1.2.4 erläuterte Zunahme des freien Volumens durch das Aufbrechen physikalischer Vernetzungen zurückgeführt werden. Demgegenüber schränkt das höherviskose Öl 2, wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, die molekulare Beweglichkeit ein, sodass infolgedessen keine höhere Permittivität in den entsprechenden SiR-Prüflingen gemessen wird [Hu22; Li23]. Ferner sind sich die SiR-Proben und das Öl 2 aufgrund von dessen längerer Kettenlänge strukturell ähnlicher als die auf Öl 1 basierenden Fette. Die mit Öl 2 gealterten SiR-Prüflinge weisen somit ein ähnliches Verhalten auf wie die ohne Schmierfett gealterte Kontrollgruppe.
Auch für VPE scheinen sich die beiden auf Öl 1 basierenden Schmierfette ähnlich auszuwirken, es ergibt sich eine zeitabhängige Zunahme der relativen Permittivität vergleichbar mit der Kontrollgruppe. Wie in Kapitel 4.1 diskutiert, deutet diese Veränderung für die Kontrollgruppe darauf hin, dass eine Alterung der VPE-Proben unabhängig von der Schmierfettdiffusion stattfindet. Es ist somit aufgrund der ähnlichen Kurvenverläufe möglich, dass die Permittivität für die Kontrollgruppe sowie für die mit Fett 1 und Fett 2 gelagerten Prüflinge unabhängig vom aufgetragenen Schmierfett infolge von Oxidation zunimmt. Demgegenüber steigt die Permittivität für die mit Öl 1 gealterten VPE-Prüflinge nur geringfügig an. Möglicherweise wirkt das an der Oberfläche befindliche sowie in die Materialstruktur diffundierte Silikonöl als Barriere und hemmt so die Oxidation, wodurch der Anstieg der relativen Permittivität reduziert wird [Net22]. Demgegenüber ist für die mit Öl 2 gealterten VPE-Prüflinge ein starker Anstieg der relativen Permittivität innerhalb der ersten 24 Stunden zu verzeichnen, gefolgt von einer geringfügigen Abnahme nach 48 Stunden. Mit Ende des Experiments nach 96 Stunden ist die Zunahme vergleichbar hoch wie für die Kontrollgruppe bzw. die beiden Fette.



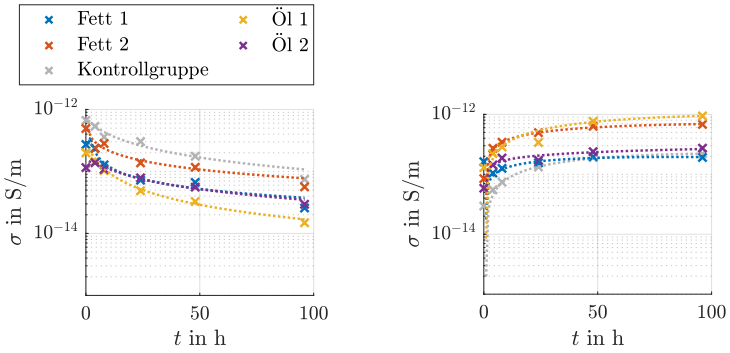
(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-23: Relative Änderung der Permittivität für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

4.3.2 Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit

Analog zu den zuvor für die anderen Untersuchungsparameter diskutierten Ergebnissen zeigt sich auch in Abbildung 4-24 eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit für VPE und eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit für SiR. Dabei ergeben sich die höchsten Absolutwerte für die mit Fett 2 gealterten VPE-Prüflinge, die sich nur unwesentlich von der Kontrollgruppe unterscheiden. Für die mit Öl 1 gealterten Prüflinge stellen sich demgegenüber die niedrigsten Werte für die Leitfähigkeit ein. Die Messwerte für die mit Fett 1 und Öl 2 gealterten VPE-Prüflinge sind nahezu identisch und liegen zwischen den beiden zuvor genannten Extremen.
Für die SiR-Prüflinge lassen sich hinsichtlich der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit zwei Gruppen klassifizieren: die mit Fett 1 und Öl 2 gealterten Proben sowie die Kontrollgruppe weisen vergleichsweise niedrige Werte auf, wohingegen die elektrische Leitfähigkeit für die mit Fett 2 und Öl 1 gealterten SiR-Proben nach Abschluss des Experiments etwa eine halbe Größenordnung höher ist. Innerhalb derselben Schmierfettgruppe (Öl verglichen mit Fett) bildet sich somit die in Kapitel 4.3.1 beschriebene höhere

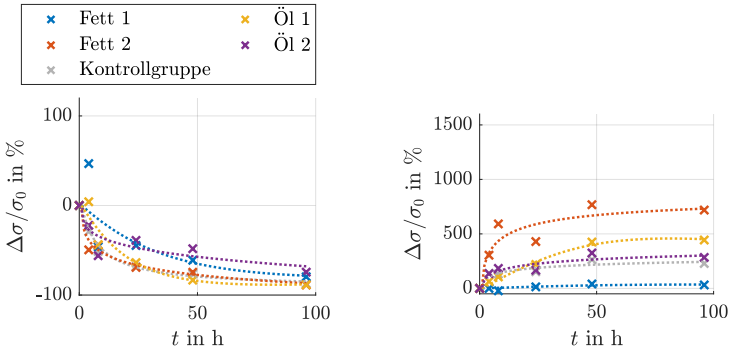
Massezunahme für jeweils eine Materialkombination in einer erhöhten elektrischen Leitfähigkeit ab. Es wird vermutet, dass der vergleichsweise hohe Anteil kurzkettiger niedermolekularer Anteile in Öl 1 und Fett 2 die stärkste Zunahme in freiem Volumen im SiR durch Aufbruch der Molekülketten und somit eine stärkere Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit verglichen mit den anderen Schmierfetten verursacht [Hua18; Wan21; Yan20; Zhu18].



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-24: Elektrische Leitfähigkeit für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) (nach [Net25])

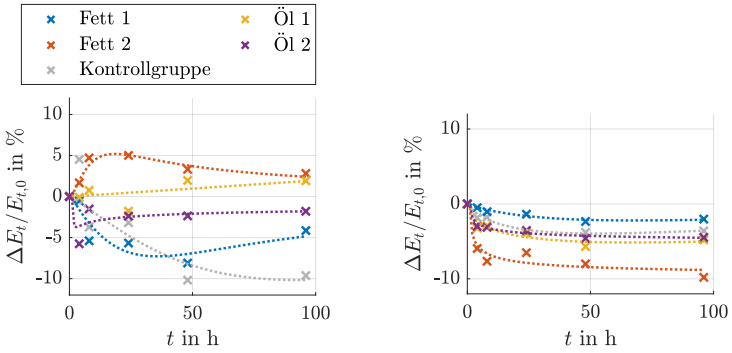
Die in Abbildung 4-25 dargestellte relative Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit weist für VPE keinen ersichtlichen Unterschied in Abhängigkeit der untersuchten Schmierfette auf. Für SiR ergibt sich die höchste Zunahme der Leitfähigkeit analog zur Veränderung der relativen Permittivität bei den mit Fett 2 gealterten Prüflingen. Ebenfalls ähneln die mit Öl 2 gealterten Proben auch hier in ihrem Verhalten der Kontrollgruppe. Diese Ähnlichkeit lässt sich durch die zuvor beschriebene strukturelle Ähnlichkeit des SiR mit Öl 2 erklären. Demgegenüber findet die geringste Zunahme der Leitfähigkeit bei den mit Fett 1 gealterten Prüflingen statt. Wie bei den Absolutwerten zeigt sich demnach eine höhere Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit jeweils für das Fett bzw. Öl, welches die höhere Gewichtszunahme im SiR verursacht.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-25: Relative Änderung der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

Die in Abbildung 4-26 dargestellte Änderung der Aktivierungsenergie verhält sich für VPE und SiR nahezu gegenläufig: die mit Fett 2 gealterten Probekörper erfahren für VPE die größte Zunahme, wohingegen für die entsprechenden SiR-Prüflinge die stärkste Abnahme stattfindet. Für SiR zeigt sich darüber hinaus wie zuvor der invertierte Zusammenhang zwischen zunehmender elektrischer Leitfähigkeit und abnehmender Aktivierungsenergie.



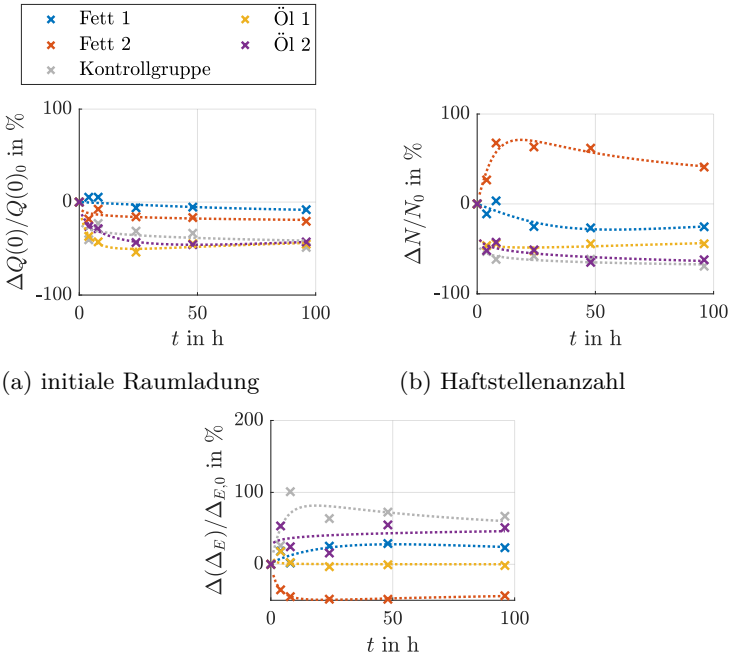
(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-26: Relative Änderung der Aktivierungsenergie für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$)

4.3.3 Veränderung der Haftstelleneigenschaften

Die Veränderung von $Q(0)$, N und Δ_E sind in Abbildung 4-27 abgebildet. Für alle drei Parameter ist die Veränderung der mit Fett 1 gealterten Prüflinge am schwächsten ausgeprägt. Dies deckt sich mit der geringen Masseaufnahme der entsprechenden SiR-Prüflinge. Demgegenüber weisen die mit Fett 2 gealterten Prüflinge als einzige eine Zunahme in der Anzahl der besetzten Haftstellen und eine Abnahme der Haftstellentiefe auf. Da der Wert von $Q(0)$ für Fett 2 ähnlich wie für Fett 1 lediglich geringfügig während der Alterung abnimmt, ist davon auszugehen, dass es sich bei den zusätzlichen besetzten Haftstellen um sehr flache Haftstellen handelt, sodass die Entladung nahezu instantan nach Abschalten der Polarisationsspannung stattfindet und die in diesen Haftstellen gebundenen Ladungsträger nicht messtechnisch erfasst und durch $Q(0)$ abgebildet werden können. Demzufolge lässt sich die Abnahme von Δ_E als Verschiebung der Haftstellenenergien hin zu niedrigeren Energieniveaus interpretieren. Die in Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26 dargestellte starke Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit von SiR bei gleichzeitiger Abnahme der Aktivierungsenergie stützt diese Hypothese, wohingegen für VPE ein Absinken der Leitfähigkeit beobachtet

wird. Nichtsdestotrotz ist die absolut gemessene Leitfähigkeit für VPE mit Fett 2 höher als für die anderen untersuchten Schmierfette. Es ist möglich, dass darüber hinaus die in Fett 2 eingesetzten Füllstoffe an der Grenzfläche als zusätzliche flache Haftstellen agieren [Suh00].
Im Fall von Öl 1 wird eine Abnahme von $Q(0)$ und N beobachtet, wohingegen Δ_E nahezu unverändert bleibt. Die durch die hohe Massezunahme in SiR verursachte Zunahme in der elektrischen Leitfähigkeit und damit die erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass Ladungsträger während der Polarisationsphase durch die SiR-Prüflinge an die Grenzschicht gelangen und dort als Raumladung Haftstellen besetzen, wird möglicherweise durch die niedrige Leitfähigkeit auf der VPE-Seite ausgeglichen. Es ist denkbar, dass sich Δ_E für SiR in Richtung flacherer und für VPE in Richtung tieferer Haftstellen bewegt, sodass der Wert konstant bleibt.
Für Öl 2 wird eine Abnahme von $Q(0)$ ähnlich wie für Öl 1 und für die Kontrollgruppe beobachtet. Die bereits für SiR beobachtete Ähnlichkeit findet sich in den Raumladungseigenschaften der Grenzflächen wieder. Ferner nimmt N mit zunehmender Alterungsdauer nahezu in dem Maße ab, in dem Δ_E zunimmt. In diesem Fall ist die elektrische Leitfähigkeit absolut sowohl für VPE als auch für SiR gering, sodass von beiden Seiten nur wenige Ladungsträger an die Grenzfläche gelangen können. Die Zunahme von Δ_E ist dann als Vergrößerung in Richtung tiefer Haftstellen zu interpretieren.



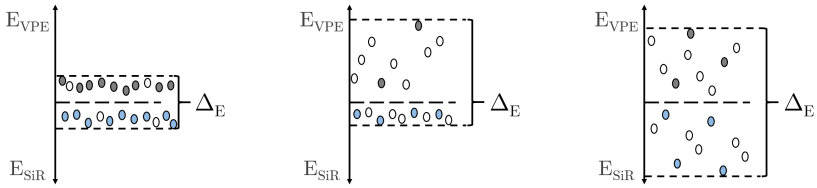
(a) initiale Raumladung

(b) Haftstellenanzahl

(c) Haftstellentiefe

Abbildung 4-27: Relative Änderung der Haftstellenparameter ermittelt aus Messung des Raumladungsabbaus für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) (nach [Net25])

Die aufgestellten Hypothesen zu den verschiedenen Schmierfetten sind in Abbildung 4-28 schematisch dargestellt.



(a) Fett 2 (b) Öl 1 (c) Öl 2

Abbildung 4-28: Visualisierung der Haftstelleneigenschaften für verschiedene untersuchte Fett (nach [Net25])

In Abbildung 4-29 ist die Ladungsträgerbeweglichkeit über Δ_E aufgetragen. Es ergibt sich wie in den vorherigen Kapiteln für alle Schmierfette ein negativer Zusammenhang mit Korrelationskoeffizienten von -0,6 oder niedriger. Eine Zunahme von Δ_E, wie gemäß Abbildung 4-27 für alle Fette außer Fett 2 beobachtet, korreliert somit in einer Abnahme der Ladungsträgerbeweglichkeit an der Materialgrenzfläche. Dieser Zusammenhang stützt die Hypothese, dass die Zunahme von Δ_E einer Verschiebung hin zu tieferen Haftstellen entspricht. Im Gegensatz dazu ist die für Fett 2 beobachtete Abnahme von Δ_E gleichbedeutend mit einer Zunahme der Beweglichkeit in Grenzflächennähe aufgrund von flachen Haftstellen in den VPE- und SiR-Prüflingen sowie potentiell den Füllstoffen.

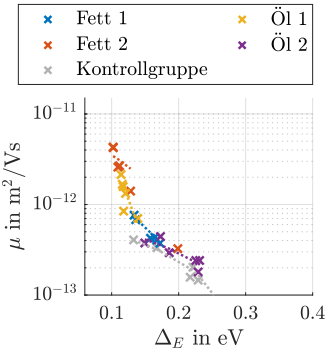
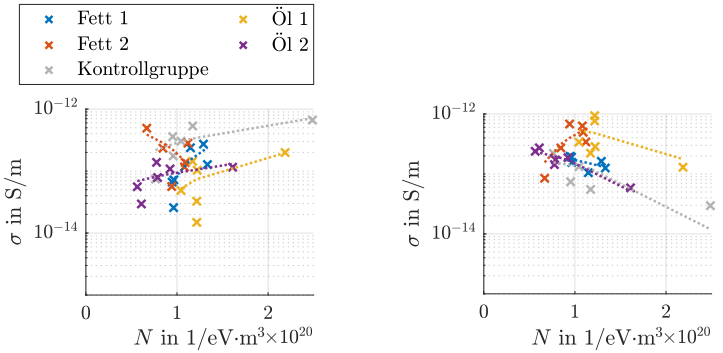


Abbildung 4-29: Ladungsträgerbeweglichkeit über der Haftstellentiefe für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) (nach [Net25])

In Abbildung 4-30 wird die für VPE und SiR jeweils ermittelte Leitfähigkeit über der Anzahl gefüllter Haftstellen an der Grenzfläche aufgetragen. Es ergibt sich wie in den vorherigen Abschnitten eine generell positive Korrelation für VPE sowie eine negative Korrelation für SiR. Einzig auf die mit Fett 2 gealterten Proben trifft für beide Materialien das Gegenteil zu. Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,7 bzw. 0,7, die lineare Beziehung ist also jeweils stark ausgeprägt.



(a) VPE (b) SiR

Abbildung 4-30: Elektrische Leitfähigkeit über der Haftstellenanzahl für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$)

Der in Abbildung 4-31 dargestellte Zusammenhang zwischen $Q(0)$ und dem Verhältnis aus der Leitfähigkeit von VPE und SiR ist für alle untersuchten Materialkombinationen positiv. Fett 2 hebt sich dabei von den anderen untersuchten Fetten ab und weist eine deutlich größere Steilheit auf. $Q(0)$ verändert sich demnach für ein veränderliches $\sigma_{\mathrm{VPE}}/\sigma_{\mathrm{SiR}}$-Verhältnis weniger stark, wenn Fett 2 anstelle eines der anderen untersuchten Schmierfette genutzt wird. Dies könnte ein weiterer Indikator dafür sein, dass in diesem Fall die Zusammensetzung, also insbesondere die in Fett 2 eingesetzten Schmierfette, ausschlaggebend für die Raumladungsansammlung in Grenzflächennähe sind und die elektrischen Materialeigenschaften von VPE und SiR demzufolge weniger stark ins Gewicht fallen.

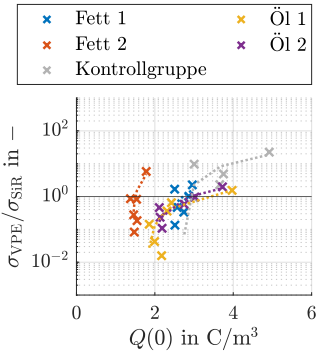


Abbildung 4-31: Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR über der Raumladung für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) (nach [Net25])

Die in den VPE- und SiR gemessenen Veränderungen der Materialeigenschaften für unterschiedliche Schmierfette scheinen mit der Menge der verfügbaren niedermolekularen Bestandteile zusammenzuhängen, d.h. für die Öle ergeben sich grundsätzliche stärkere Veränderungen als für die Fette. Insbesondere bezüglich der Raumladungsparameter hebt sich Fett 2 jedoch deutlich von den anderen untersuchten Schmierfetten ab. Im Unterschied zu den anderen untersuchten Schmierfetten wird dort eine Zunahme besetzter Haftstellen und gleichzeitig eine Abnahme der Haftstellentiefe beobachtet, was auf eine Zunahme flacher Haftstellen hinweist. Neben neuen Haftstellen in den SiR-Proben können dies an der Grenzfläche verbleibende Füllstoffe aus dem Schmierfett sein, die somit den Ladungsauf- und Abbau an der Grenzfläche und somit auch die elektrische Feldverteilung im gesamten Isoliersystem beeinflussen. Die Art der Füllstoffe scheint somit ein entscheidender Parameter bei der Wahl des Schmiermittels zu sein.

5 Diskussion und Empfehlungen

Die in Kapitel 3.1 formulierten Anforderungen werden durch die entwickelte Untersuchungsmethodik weitgehend erfüllt: die Wahl von plattenförmigen Probekörpern gemäß Kapitel 3.3 erlaubt eine normkonforme Messung der elektrischen Materialeigenschaften sowie der Raumladungsverteilung an der Materialgrenzfläche. Somit lassen sich die in Kapitel 3.5 genutzten Prüfstände mit vergleichsweise geringem Aufwand aufbauen bzw. im Idealfall bereits vorhandene Prüfstände nutzen. Ferner kann aufgrund der simplen Geometrie eine thermische Alterung im Laborofen mit geringem Aufwand realisiert werden. Die verwendete Prüflingshalterung stellt dabei einen guten Kontakt zwischen den Probekörpern sicher, bildet jedoch den Anpressdruck durch Kompression statt durch Fugenpressung nach und verändert somit die Schmierfettdiffusion in die SiR-Prüflinge. Die Wahl der Alterungstemperatur und der Entnahmezeitpunkte, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, ermöglicht die Beobachtung von Materialveränderungen mit der Zeit. Die zuvor durchgeführten FEM-Simulationen ermöglichen es, betriebsähnliche Umgebungsbedingungen während der Alterung sowie während der elektrischen Messungen zu reproduzieren, um eine möglichst hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Durch die Durchführung der in Kapitel 3.5 beschriebenen Vorversuche kann die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Experimente bewertet werden. Diese könnte durch die Verwendung von industriell hergestellten Probekörpern verbessert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden SiR-Probekörper mit einfachem Equipment im Materialverarbeitungslabor hergestellt und VPE-Probekörper in der mechanischen Werkstatt aus 320-kV-Kabeladern gewonnen. Durch die Verwendung von eigens dafür hergestellten Werkzeugen und Anlagen ließen sich Schwankungen und somit systematische Abweichungen im Herstellungsprozess reduzieren.

In den in Kapitel 4 präsentierten und diskutierten Ergebnissen werden Veränderungen der elektrischen Materialeigenschaften auch für die jeweiligen Kontrollgruppen beobachtet. Diese Veränderungen sind somit nicht auf die Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Materialien zurückzuführen. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse wird vermutet, dass im Fall der

VPE-Prüflinge eine geringfügig ausgeprägte Oxidation der Materialproben, insbesondere in Oberflächennähe, stattfindet. Diese äußert sich in einer Zunahme der relativen Permittivität sowie in einer Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit. Für SiR wird eine Nachvernetzung der Materialproben vermutet, welche mit einer Zunahme sowohl der relativen Permittivität als auch der elektrischen Leitfähigkeit einhergeht. An der Materialgrenzfläche wird somit eine Abnahme der initialen Raumladung $Q(0)$ sowie der Anzahl der besetzten Haftstellen N und eine Zunahme der Haftstellentiefe Δ_E beobachtet. Sowohl die Oxidation als auch die Nachvernetzung werden durch erhöhte Temperaturen beschleunigt. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Stromdichtemessung bei 70 °C somit einen höheren Anteil an diesen Alterungsprozessen hat als die eigentliche Alterung der Sandwich-Prüflinge bei 50 °C. Insofern gilt es abzuwägen, ob die Stromdichtemessung bei erhöhter Temperatur durchgeführt werden sollte oder nicht. Qualitativ lassen sich die in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse auch aus den bei 50 °C erzielten Messergebnissen ableiten. Alternativ könnten Anstrengungen unternommen werden, um die Oxidation der VPE-Proben zu unterbinden, indem die Alterung sowie die Stromdichtemessungen unter Ausschluss von Luftsauerstoff, z.B. in Stickstoff, durchgeführt würden [Net22]. Der dafür notwendige Aufwand ist jedoch vergleichsweise hoch und durch die erhöhte Komplexität werden zusätzliche potentielle Fehlerquellen geschaffen. Insofern ist die Verringerung der Temperatur während der Stromdichtemessung der empfohlene Weg.

Die für die jeweiligen Untersuchungsparameter mit den verschiedenen Messungen erzielten Ergebnisse sind grundsätzlich in sich schlüssig. Die Auswahl der Messmethoden und die Auswertung der Ergebnisse unter Anwendung der Modellvorstellung von hopping-Leitung und der in [Dis06] und [Maz03] entwickelten Modelle sind für die Modellbildung geeignet. Somit lässt sich aus der Stromdichtemessung neben der elektrischen Leitfähigkeit die Aktivierungsenergie bzw. Haftstellentiefe E_t ableiten, indem die Messung bei verschiedenen Temperaturen und Prüfspannungen durchgeführt wird. Diese Größe gibt Aufschluss darüber, wie groß die Energiebarriere ist, die die Ladungsträger überwinden müssen, um zum Ladungstransport beizutragen. Aus der Raumladungsmessung lassen sich die Ladungsmenge Q(0), die

Anzahl der besetzten Haftstellen N und die Haftstellentiefe Δ_E sowie die Ladungsträgerbeweglichkeit μ bestimmen. In Kombination ermöglicht es die Kenntnis dieser Kennwerte, den Einfluss der untersuchten Parameter auf die Art und Anzahl der am Ladungstransport beteiligten Haftstellen abzuschätzen. Es lassen sich somit messtechnisch nicht direkt ermittelbare mikroskopische Materialgrößen aus der Messung makroskopischer Eigenschaften ableiten. Mit einer Erhöhung der Messdauer ließen sich zusätzlich Vorgänge in tieferen Haftstellen untersuchen, sofern der damit einhergehende erhöhte Zeitaufwand leistbar ist. Lediglich die Veränderung der Masse und der relativen Permittivität von VPE bilden teilweise die aus den Stromdichte- und Raumladungsmessungen abgeleiteten Veränderungen nicht ab. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte dies bedacht werden.
Sofern lediglich das elektrische Verhalten der Materialien und Grenzflächen von Interesse ist, sind die gewählten Messungen ideal geeignet, um beides für beispielsweise verschiedene Schmierfette zu untersuchen. Wenn jedoch darüber hinaus Materialien gezielt für den Einsatz in HGÜ-Kabelsystemen designt und modifiziert werden sollen, sind weitere Analysemethoden hilfreich, um die physikalischen und thermische Materialeigenschaften zu untersuchen. So könnte z.B. die chemikalische und physikalische Vernetzungsdichte oder der Carbonyl-Index ermittelt werden, um die fortschreitende Nachvernetzung und Oxidation zu untersuchen. Dabei ist zu beachten, dass die Analysemethoden teilweise nicht zerstörungsfrei sind, d.h. eine fortlaufende Untersuchung derselben Probekörper wäre somit nicht möglich und es ergäbe sich ein höherer Materialbedarf. Es wäre denkbar, die vorgeschlagene Untersuchungsmethodik gemäß Kapitel 3 als ersten Schritt für das Screening vieler möglicher Materialkombinationen mit verhältnismäßig geringem Aufwand anzuwenden. In einem zweiten Schritt können dann einige besonders vielversprechende Materialien mittels tiefer gehender Analysemethoden detaillierter untersucht und ggf. gezielt weiter angepasst werden. Dabei sollte auch die Anzahl der untersuchten Prüflinge je Materialkombination erhöht werden, um eine höhere statistische Aussagekraft der Ergebnisse sicherzustellen. Schließlich muss mithilfe von Modellprüflingen und anschließend im Rahmen der Präqualifikation das gesamte System im Zusammenspiel unter Betriebsbedingungen geprüft werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in Deutschland geplanten HGÜ-Kabelsysteme mit 525 kV Nennspannung, je 2 GW Übertragungsleistung und Systemlängen von mehreren hundert Kilometern gelten weltweit als wegweisend und sind notwendig, um die Zielsetzung der Energiewende zu erreichen. Es werden polymerisolierte Kabelsysteme verwendet, für die bisher wenig Betriebserfahrung vorliegt. Unter Gleichspannung und bei Überschreiten der sogenannten Injektionsfeldstärke dominieren aus den Elektroden injizierte Ladungsträger das elektrische Verhalten in polymeren Isoliersystemen. Dabei sammeln sich Raumladungen in der Isolierung und insbesondere an Materialgrenzflächen, die in Garnituren unvermeidbar sind. Raumladung bewirkt eine Veränderung der lokalen elektrischen Feldstärke und darf daher während der vorgesehenen 40-jährigen Betriebsdauer nicht unzulässig hoch werden, um eine Überbeanspruchung bis hin zum elektrischen Durchschlag des Isoliersystems zu vermeiden. Es handelt sich jedoch bei den injizierten Raumladungen um mikroskopische Phänomene, für die bisher keine geschlossenen physikalischen Modelle vorliegen und die messtechnisch nicht direkt zugänglich sind. Über unterschiedliche empirische Ladungstransportmodelle wird daher ein Zusammenhang zwischen messtechnisch erfassbaren makroskopischen Materialeigenschaften, wie der elektrischen Gleichstromleitfähigkeit und der Raumladungsverteilung, und den mikroskopischen Materialparametern, die die Raumladungsbildung beeinflussen, hergestellt. Bereits bei der Auswahl der im Kabelsystem zu verwendenden Materialien sind Entwicklungsprüfungen notwendig, sodass die Kompatibilität der Materialien sichergestellt werden kann. Neben der Isolierung von Kabel und Garnitur sollte auch das für die Montage verwendete Schmierfett untersucht werden, welches durch Diffusionsvorgänge die Eigenschaften der angrenzenden Feststoffe und somit auch das Raumladungsverhalten beeinflussen kann. Diese Entwicklungsprüfungen sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht standardisiert, sodass Ergebnisse im Allgemeinen nicht vergleichbar und übertragbar sind.

Versuchsmethode Das erste Teilziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Versuchsmethode zur Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen

Kabel- und Garniturenisolierung und Schmierfett. Dafür werden zunächst Anforderungen an die Methode definiert, um die praktische Umsetzbarkeit einerseits und die Aussagekräftigkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse andererseits sicherzustellen. Anschließend wird der Ablauf basierend auf einer experimentellen Alterung der untersuchten Materialien definiert. Als Messgrößen zwischen den Alterungsintervallen werden die Masse der Prüflinge sowie ihre relative Permittivität, Leitfähigkeit und die Raumladungsbildung zwischen Kabel- und Garniturenisolierung ausgewählt. Um die Isolierung nachzubilden, werden plattenförmige Probekörper aus VPE und SiR hergestellt. Die Temperatur während der künstlichen Alterung wird mithilfe einer FEM-Simulation sowie durch Vorversuche ermittelt. Dabei zeigt sich, dass eine Alterungstemperatur in derselben Größenordnung wie die Betriebstemperatur ausreichend ist, um die Wechselwirkungen zwischen Schmierfett und Feststoffen innerhalb von 96 Stunden zu untersuchen. Die Alterungsintervalle werden so gewählt, dass die näherungsweise logarithmische Diffusion des Schmierfetts zeitlich abgebildet werden kann. Die Prüfstände für die elektrischen Messungen werden aufgebaut und in Betrieb genommen. In Vorversuchen werden die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen bestimmt und mit den vorliegenden normativen Vorgaben abgeglichen. Zur Auswahl der Prüfspannungen für die Messung der Leitfähigkeit und der Raumladung wird erneut die FEM-Simulation genutzt, sodass die Messergebnisse auf den Betrieb übertragbar sind. Sowohl für VPE als auch für SiR zeigt sich wie erwartet eine mit der Temperatur und Prüfspannung steigende effektive Gleichstromleitfähigkeit, wenngleich insbesondere die bei 20 °C ermittelten Messwerte eine hohe Schwankung aufweisen. Die Messwerte stimmen mit der hopping-Modellvorstellung überein, sodass sich daraus die Aktivierungsenergie E_t ableiten lässt. Zur Auswertung der Raumladungsmessungen wird der zeitabhängige Ladungsabbau im Bereich der Materialgrenzfläche betrachtet, woraus die Ladungsmenge $Q(0)$, die Anzahl besetzter Haftstellen N, die Haftstellentiefe Δ_E und die Ladungsträgerbeweglichkeit μ berechnet werden.

Experimentelle Untersuchungen Die entwickelte Versuchsmethode wird angewendet, um das zweite Teilziel der Arbeit zu erreichen und die Wechsel-

wirkungen zwischen Kabel- und Garniturenisolierung und unterschiedlichen Schmierfetten zu untersuchen. Zunächst werden die Oberflächenbearbeitung der VPE-Prüflinge sowie die Alterungsbedingungen variiert, um weitere Empfehlungen für die Versuchsmethode abzuleiten. Dabei zeigt sich, dass lediglich abgedrehte VPE-Prüflinge im Gegensatz zu denen mit abgeschliffener Oberfläche im Laufe der Alterung weniger Schmierfett aufnehmen und möglicherweise infolgedessen nahezu keine Veränderung ihrer elektrischen Leitfähigkeit erfahren. Diese ist jedoch absolut deutlich niedriger als bei geschliffener Oberfläche, was auf geringere Injektion von Ladungsträgern zurückzuführen ist. Die Raumladungsparameter zeigen keinen Einfluss der Oberflächenbearbeitung. Ferner wird auch in den Kontrollgruppen, die ohne Schmierfett gealtert werden, eine Veränderung der elektrischen Parameter mit zunehmender Alterungsdauer gemessen. Es wird vermutet, dass in den VPE-Prüflingen eine Oxidation und in den SiR-Prüflingen eine Nachvernetzung aufgrund der erhöhten Temperatur stattfindet. Die Variation der Alterungsparameter ergibt, dass eine Alterung bei noch höherer Temperatur die beobachteten alterungsbedingten Veränderungen der Materialeigenschaften verstärkt. Zwischen den mit und ohne extern aufgebrachtem Anpressdruck gealterten Prüflingen lassen sich nur geringfügige Unterschiede erkennen. Bei den untersuchten Schmierfetten zeigt sich, dass für SiR wie erwartet eine höhere Menge niedermolekularer Bestandteile mit einer erhöhten Massezunahme einhergehen, und dass die Massezunahme langsamer ist, wenn die Kettenlänge des Silikons steigt. Sofern Schmierfette und Silikonöle getrennt betrachtet werden, geht für SiR eine höhere Masseänderung mit einer höheren Änderung der elektrischen Leitfähigkeit einher. Für VPE unterscheiden sich beide Größen für die verschiedenen Schmierfette nur unwesentlich voneinander. Bei Betrachtung der Haftstelleneigenschaften sticht eins der untersuchten Schmierfette durch eine Zunahme von N und eine Abnahme von Δ_E hervor, wohingegen sich beide Größen für die anderen untersuchten Schmierfette genau gegensätzlich verhalten. Es wird vermutet, dass insbesondere die Füllstoffe des Schmierfetts ausschlaggebend für dieses abweichende Verhalten sind.

Empfehlungen Als drittes und letztes Teilziel werden aus den gewonnenen Erkenntnissen Empfehlungen für die Anwendung der entwickelten Versuchsmethode für Entwicklungsprüfungen formuliert. Die Wahl der Alterungstemperatur und Prüfspannungen auf Grundlage von FEM-Simulationen und Vorversuchen stellen die Übertragbarkeit der Ergebnisse für den Betrieb sicher und ermöglichen es, die Versuchsmethode bei Bedarf für neue betriebliche Bedingungen anzupassen. Es wird empfohlen, die Prüflingsherstellung durch Verwendung geeigneter Werkzeuge und Maschinen zu verbessern, um möglichst geringe Abweichungen in der Materialstruktur zu gewährleisten und somit systematische Fehler zu reduzieren. Da die ungewollte Alterung der Prüflinge in den Kontrollgruppen möglicherweise durch die Stromdichtemessung bei 70 °C stärker verursacht wird als durch die eigentliche thermische Alterung, wird empfohlen, die Temperatur zukünftig zu reduzieren. Ferner wird eine Verlängerung der Messdauer für die Stromdichte- und Raumladungsmessung empfohlen, sodass auch tiefe Haftstellen untersucht werden können. Um tiefergehende Kenntnisse über die Veränderungen der Materialstruktur infolge der Schmierfettdiffusion zu erlangen, können außerdem zusätzliche Analysemethoden bemüht werden.

Ausblick Die entwickelte Versuchsmethode ist prinzipiell auf alle isolierenden Materialkombinationen und Betriebsbedingungen übertragbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die exemplarischen Versuchsreihen kommerziell verfügbare Materialien verwendet, wohingegen für HGÜ-Kabelsysteme in der Regel spezielle *compounds* mit zusätzlichen Füllstoffen entwickelt und eingesetzt werden. Somit wäre ein logischer nächster Schritt die Anwendung der Versuchsmethode auf projektspezifische Materialkombinationen. In diesem Fall sollte zunächst eine große Zahl an Materialien mit der beschriebenen Versuchsmethode *gescreent* werden und anschließend in einem zweiten Schritt die vielversprechendsten Kombinationen mittels erweiterter Analysemethoden wie z.B. der Messung der Vernetzungsdichte untersucht werden. Ferner muss die Methode für die Untersuchung von leitfähigen Dielektrika, beispielsweise Leitschichten, Deflektoren oder feldsteuernde Materialien, angepasst werden, sodass alle in der Garnitur auftretenden Grenzflächen abgebildet werden können. Um die so durchgeführten Ent-

wicklungsprüfungen zu validieren, sind anschließende Untersuchungen an Modellprüflingen durchzuführen. Somit lässt sich die Übertragbarkeit von der Material- auf die Systemebene untersuchen und die Ergebnisse der Entwicklungsprüfungen *benchmarken*. Auf makroskopischer Ebene können die so gewonnenen Ergebnisse in ein FEM-Modell integriert werden, mit dem perspektivischen Ziel eines Lebensdauermodells für die gesamte Garnitur. Auf mikroskopischer Ebene wäre eine Erweiterung des *bipolar charge transport model* um die alterunsbedingten Veränderungen der elektrischen Materialeigenschaften denkbar.

Quellenverzeichnis

[50H23] 50Hertz Transmission GmbH u. a., Hrsg.: Netzentwicklungsplan Strom 2037. 2023.

[Ada81] Adamec, V.; Calderwood, J. H.: „On the determination of electrical conductivity in polyethylene“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 14.8 (1981), S. 1487–1494.

[Ada97] Adamson, A. W.; Gast, A. P.: Physical chemistry of surfaces. 6. ed. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 1997.

[Ali94] Alison, J. M.; Hill, R. M.: „A model for bipolar charge transport, trapping and recombination in degassed crosslinked polyethene“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 27.6 (1994), S. 1291–1299.

[An20] An, Y.-G. u. a.: „A Study on the Behavior of Interfacial Space Charge at Polymer Dielectric Double-Layer Simulating the HVDC Cable Joints“. In: *2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020)*. Hrsg. von IEEE. 2020.

[Baa18] Baadj, Y. A.: „Bipolar Charge Transport Model Optimized to Simulate the Space Charge Build-Up Within the Bi-Dielectric System“. In: *Transactions on electrical and electronic materials* (2018), S. 1–9.

[Bac18] Bach, R. u. a.: „Untersuchung von hochviskosen Silikonpasten hinsichtlich ihres Durchschlags- und Verlustfaktorverhaltens“. In: *VDE Hochspannungstechnik*. Hrsg. von VDE. ETG-Fachbericht. VDE-Verlag, 2018.

[Baf20] Baferani, M. A. u. a.: „Electric field tailoring in HVDC cable joints utilizing electro-thermal simulation: effect of field grading materials“. In: *Electrical Insulation Conference (EIC)*. Hrsg. von IEEE. 2020, S. 400–404.

[Ben10] Benz, T.: „320-kV-VPE-Kabel für die Hochspannungsgleichstromübertragung – Erfahrungen und Entwicklungstrends“. In: *Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung*. Hrsg. von J. Kindersberger. ETG-Fachbericht. VDE-Verlag, 2010.

[Bla01] Blaise, G.: „Charge localization and transport in disordered dielectric materials“. In: *Journal of Electrostatics* 50.2 (2001), S. 69–89.

[Bly05] Blythe, A. R.; Bloor, D.: Electrical properties of polymers. 2. ed. Cambridge Univ. Press, 2005.

[Bod06] Bodega, R.: „Space charge accumulation in polymeric high voltage DC cable systems“. Dissertation. Politecnico di Milano, 2006.

[Bog04] Boggs, S.: „A rational consideration of space charge“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 20.4 (2004), S. 22–27.

[Bri10] Brillson, L. J.: Surfaces and Interfaces of Electronic Materials. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.

[Bun15] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Bundesbedarfsplangesetz: BBPIG. 2015.

[Bus75] Bush, A. W.; Gibson, R. D.; Thomas, T. R.: „The elastic contact of a rough surface“. In: *Wear* 35.1 (1975), S. 87–111.

[Byg99] Byggeth, M. u. a.: „The development of an extruded HVDC cable system and its first application in the Gotland HVDC light project“. In: *5th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 1999.

[Car08] Carbone, G.; Bottiglione, F.: „Asperity contact theories: Do they predict linearity between contact area and load?“ In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 56.8 (2008), S. 2555–2572.

[Car11] Carbone, G.; Bottiglione, F.: „Contact mechanics of rough surfaces: a comparison between theories“. In: *Meccanica* 46.3 (2011), S. 557–565.

[Che04] Chen, G. u. a.: „Effect of polyethylene interface on space charge formation“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 11.1 (2004), S. 113–121.

[Che19] Chen, X. u. a.: „Numerical Analysis of Thermo-Electric Field for AC XLPE Cable in DC Operation Based on Conduction Current Measurement“. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 8226–8234.

[Che20a] Chen, J. u. a.: „Space charge dynamics in double-layered insulation cable under polarity reversal voltage“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 27.2 (2020), S. 622–630.

[Che20b] Chen, Y. u. a.: „Insulating polysiloxane coating for XLPE-Si-rubber interfaces with high long-term stability“. In: *Polymer Composites* (2020), S. 1–9.

[Chr15] Christen, T.: „HVDC insulation boundary conditions for modeling and simulation“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 22.1 (2015), S. 35–44.

[CIG02] CIGRE: TB 210 - Interfaces in Accessories for Extruded HV and EHV Cables. 2002.

[CIG06] CIGRE: TB 288 - Space Charge Measurement in Dielectrics and Insulating Materials. 2006.

[CIG11] CIGRE: TB 476 - Cable Accessory Workmanship on Extruded High Voltage Cables. 2011.

[CIG12a] CIGRE: TB 496 - Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV. 2012.

[CIG12b] CIGRE: TB 520 - Material properties of solid HVDC insulation systems. 2012.

[CIG15] CIGRE: TB 636 - Diagnostics and Accelerated Life Endurance Testing of Polymeric Materials for HVDC Application. 2015.

[CIG19] CIGRE: Interaction between cable and accessory materials in HVAC and HVDC applications: Proposal for the creation of a new working group. 2019.

[CIG20] CIGRE: TB 794 - Field grading in electrical insulation systems. 2020.

[CIG21] CIGRE: TB 852 - Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to and including 800 kV. 2021.

[Cra18] Crastan, V.: Elektrische Energieversorgung. 2., aktualisierte Auflage. Springer Vieweg, 2018.

[Cra75] Crank, J.: The Mathematics of Diffusion. Clarendon Press, 1975.

[Cra77] J. Crank, Hrsg.: Diffusion in polymers. 3. print. Bd. 14. Acad. Pr, 1977.

[Cri07] Crine, J.-P.: „A molecular approach to the electrical ageing of XLPE cables“. In: *7th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 2007.

[Dai21] Dai, X. u. a.: „Multi-dimensional Analysis and Correlation Mechanism of Thermal Degradation Characteristics of XLPE Insulation for Extra High Voltage Submarine Cable“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 28.5 (2021), S. 1488–1496.

[Dak48] Dakin, T. W.: „Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon“. In: *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 67.1 (1948), S. 113–122.

[Dan97] Dang, C.; Fournier, D.: „Dielectric performance of interfaces in premolded cable joints“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 12.1 (1997), S. 29–32.

[Das14] Das, S.; Gupta, N.: „Interfacial charge behaviour at dielectric - dielectric interfaces“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 21.3 (2014), S. 1302–1311.

[Deb29] Debye, P. J. W.: Polar molecules. The Chemical Catalog Company, Inc, 1929.

[Del07] Delpino, S. u. a.: „The effect of temperature on space charge accumulated at chemical and physical interfaces of HVDC polymeric insulation systems“. In: *2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. IEEE, 2007, S. 498–501.

[Del08] Delpino, S. u. a.: „Polymeric HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation. Part 2: Insulation Interfaces“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 24.1 (2008).

[Deu14] Deutsche Energie-Agentur GmbH, Hrsg.: Technologieübersicht: Das deutsche Höchstspannungsnetz: Technologien und Rahmenbedingungen. 2014.

[DIN06] DIN EN: Elektroisolierstoffe - Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens: Teil 2: Leitfaden zur Bestimmung thermischer Langzeiteigenschaften von Elektroisolierstoffen - Auswahl der Prüfmerkmale. 2006.

[DIN08a] DIN EN ISO: Kunststoffe: Bestimmung der Wasseraufnahme. 2008.

[DIN08b] DIN EN ISO: Kunststoffe: Normalklimate für Konditionierung und Prüfung. 2008.

[DIN11a] DIN EN: Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen. 2011.

[DIN11b] DIN EN: Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Elektroisolierstoffe: Grundlagen. 2011.

[DIN12] DIN: Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien: Polymere Werkstoffe. 2012.

[DIN14] DIN EN: Elektroisolierstoffe - Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens: Teil 1: Warmlagerungsverfahren und Auswertung von Prüfergebnissen. 2014.

[DIN17a] DIN: Pressverbände: Teil 1: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für zylindrische Pressverbände. 2017.

[DIN17b] DIN EN: Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Isolierstoffe: Teil 3-1: Bestimmung resistiver Eigenschaften (Gleichspannungsverfahren) - Durchgangswiderstand und spezifischer Durchgangswiderstand - Basisverfahren. 2017.

[DIN18a] DIN EN: Kabel, isolierte Leitungen und Glasfaserkabel – Prüfverfahren für nichtmetallene Werkstoffe: Sonstige Prüfungen – Thermische Alterungsverfahren – Alterung im Wärmeschrank. 2018.

[DIN18b] DIN EN IEC: Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Elektroisolierstoffe: Relative Permittivität und Verlustfaktor –Technische Frequenzen (0,1 Hz bis 10 MHz) – Wechselspannungsverfahren. 2018.

[DIN19a] DIN EN: Kabel, isolierte Leitungen und Glasfaserkabel – Prüfverfahren für nichtmetallene Werkstoffe: Mechanische Prüfungen – Prüfungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Isolier- und Mantelwerkstoffen. 2019.

[DIN19b] DIN IEC: Kabel zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ): Kabel mit extrudierter Isolierung und ihre Garnituren für Nennspannungen bis 320 kV für Anwendungen an Land: Prüfverfahren und Anforderungen. 2019.

[DIN20a] DIN EN ISO: Beschichtungsstoffe - Benetzbarkeit: Teil 2: Bestimmung der freien Oberflächenenergie fester Oberflächen durch Messung des Kontaktwinkels. 2020.

[DIN20b] DIN EN ISO: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft: Teil 2: Begriffe, Definitionen und Oberflächen-Kenngrößen. 2020.

[Dis05] Dissado, L. A. u. a.: „Demonstrating a threshold for trapped space charge accumulation in solid dielectrics under dc field“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 12.3 (2005), S. 612–620.

[Dis06] Dissado, L. A. u. a.: „Decay of space charge in a glassy epoxy resin following voltage removal“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 13.4 (2006), S. 903–916.

[Dis92] Dissado, L. A.; Fothergill, J. C.: Electrical degradation and breakdown in polymers. Bd. 9. IEE materials & devices series. Peregrinus, 1992.

[Dis97] Dissado, L. A.; Mazzanti, G.; Montanari, G. C.: „The role of trapped space charges in the electrical aging of insulating materials“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 4.5 (1997), S. 496–506.

[Doe18] Doedens Espen: „Characterization of Different Interface Types for HVDC Extruded Cable Applications“. Lizenziat. Chalmers, 2018.

[Doe20] Doedens Espen; Jarvid, E. M.; Serdyuk, Y. V.: „Roughness Enhanced Charge Injection and Field Dependent Conduction Mechanisms for Bipolar Charge Transport Models“. In: *International Conference on Dielectrics (ICD)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2020, S. 413–417.

[Dom12] Domininghaus, H. u. a.: Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen ; mit 275 Tabellen. 8., neu bearb. und erw. Aufl. VDI-Buch. Springer, 2012.

[Dül20] Düllmann, P. u. a.: „DC-DC Intersystem Faults in Parallel Partially-Cabled HVDC Links“. In: *VDE Hochspannungstechnik*. Hrsg. von VDE. ETG-Fachbericht. VDE Verlag, 2020.

[Ehr11] Ehrenstein, G. W.: Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung. 3. Aufl. Hanser, 2011.

[Eol75] Eoll, C.: „Theory of Stress Distribution in Insulation of High-Voltage DC Cables: Part I“. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* EI-10.1 (1975), S. 27–35.

[Eye08] Eyerer, P.; Elsner, P.; Hirth, T.: Polymer Engineering: Technologien und Praxis ; mit 155 Tabellen. VDI. Springer, 2008.

[Fre20] Freye, C.: „Methoden und Aspekte zur Leitfähigkeitsanalyse von Isolationsmaterialien der Kabeltechnologie und zur Isolationskoordination für Systeme der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)“. Dissertation. TU Dortmund, 2020.

[Fre38] Frenkel, J.: „On Pre-Breakdown Phenomena in Insulators and Electronic Semi-Conductors“. In: *Physical Review* 54.8 (1938), S. 647–648.

[Fri19] Frisk, N.-B. u. a.: „Qualification of 400 and 525 kV HVDC XLPE cable systems including a multitude of accessory configurations“. In: *10th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 2019.

[Fro18] Frobin, S. u. a.: „A Generic Approach for HVDC Cable Accessories Modelling“. In: *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2018, S. 1–6.

[Gho14] Ghorbani, H. u. a.: „HVDC Cable Systems—Highlighting Extruded Technology“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 29.1 (2014), S. 414–421.

[Gho15] Ghorbani, H. u. a.: „Extra high voltage DC extruded cable system qualification“. In: *International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. Hrsg. von IEEE. 2015, S. 236–241.

[Gre06] Greenwood, J. A.: „A simplified elliptic model of rough surface contact“. In: *Wear* 261.2 (2006), S. 191–200.

[Gre66] Greenwood, J. A.; Williamson, J. B. P.: „Contact of nominally flat surfaces“. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 295.1442 (1966), S. 300–319.

[Gro91] Groeger, J. H.: „Long-term performance of silicone lubricants used for separable interface electrical connectors“. In: *3rd International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 1991.

[Han03] Hanley, T. L. u. a.: „A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 19.1 (2003), S. 13–24.

[Han17] Han, C. u. a.: „Trap dependent interface charge behaviors of fluorinated HVDC cable accessories“. In: *Proceedings of 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2017)*. IEEE, 2017, S. 621–624.

[Här18] Häring, D. u. a.: „Evaluierung von extrudierten HGÜ-Kabelsystemen“. In: *VDE Hochspannungstechnik*. Hrsg. von VDE. ETG-Fachbericht. VDE-Verlag, 2018.

[Hei99] Heinhold, L.; Stubbe, R.: Kabel und Leitungen für Starkstrom: Grundlagen und Produkt-Know-how für das Projektieren von Kabelanlagen. 5., wesentl. überarb. und erw. Aufl. Publicis MCD Verl., 1999.

[Hip95] Hippel, A. R. von: Dielectrics and waves. New ed. Artech House microwave library. Artech House, 1995.

[Hop15] Hopmann, C. u. a.: Technologie der Kunststoffe: Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung. 4., aktualisierte Aufl. Hanser, 2015.

[Hou15] Hou, S. u. a.: „Electric field calculation and analysis of HVDC cable joints with nonlinear materials“. In: *ICPADM 2015*. Hrsg. von IEEE. 2015, S. 184–187.

[Hu16] Hu, J.; Wu, J.; Yin, Y.: „Space charge on the contact interface between two insulations of the same materials“. In: *CMD2016*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2016, S. 761–764.

[Hu22] Hu, H. u. a.: „Changes in Dielectric and Mechanical Properties of Silicone Rubber Caused by Silicone Grease Absorption“. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2022, S. 1–4.

[Hua18] Huang, R. u. a.: „Effect of silicone grease soaking on electrical tree degradation of silicone rubber“. In: *ICPADM 2018*. IEEE, 2018, S. 504–507.

[Hus20] Hussain, R. u. a.: „Development of a Liquid Silicone Rubber for the application in HVDC Cable Accessories“. In: *VDE Hochspannungstechnik*. Hrsg. von VDE. ETG-Fachbericht. VDE Verlag, 2020.

[Hus21] Hussain, R.: „Elektrische Charakterisierung von Flüssigsilikonelastomer mit nanoskaligem Carbon Black für den Einsatz in HGÜ-Kabelgarnituren“. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2021.

[IEC12] IEC: Calibration of space charge measuring equipment based on pulsed electroacoustic (PEA) measurement principle. 2012.

[Jia22] Jiang, Q. u. a.: „Effect of Silicone Grease Coating on Space Charge Characteristics of XLPE / SIR Interface“. In: *International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2022, S. 3712–3715.

[Jin18] Jin, L. u. a.: „Surface Layer Fluorination-Modulated Space Charge Behaviors in HVDC Cable Accessory“. In: *Polymers* 10 (2018), S. 500.

[Jon83] Jonscher, A. K.: Dielectric relaxation in solids: A. K. Jonscher. Chelsea Dielectrics Press, 1983.

[Kae70] Kaelble, D. H.: „Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids“. In: *The Journal of Adhesion* 2.2 (1970), S. 66–81.

[Kan19] Kantar, E.: „Longitudinal AC Electrical Breakdown Strength of Polymer Interfaces: Experimental and theoretical examination of solid-solid interfaces considering elasticity, surface roughness, and contact pressure“. Dissertation. NTNU, 2019.

[Kit05] Kittel, C.: Introduction to solid state physics. 8. ed. Wiley, 2005.

[Kol14] Koltzenburg, S.; Maskos, M.; Nuyken, O.: Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen. Lehrbuch. Springer Spektrum, 2014.

[Kop17] Kopczynska, A.; Ehrenstein, G. W.: Oberflächenspannung von Kunststoffen: Messmethoden am LKT. 2017.

[Kre95] Kreuger, F. H.: Industrial high DC voltage: 1. fields, 2. breakdowns, 3. tests. Delft Univ. Press, 1995.

[Kro10] Krongauz, V. V.: „Diffusion in polymers dependence on crosslink density“. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 102.2 (2010), S. 435–445.

[Küc09] Küchler, A.: Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen. 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. VDI-Buch. Springer, 2009.

[Kun00] Kunze, D.: „Untersuchungen an Grenzflächen zwischen Polymerwerkstoffen unter elektrischer Hochfeldbeanspruchung in der Garniturentechnik VPE-isolierter Hochspannungskabel“. Dissertation. Universität Hannover, 2000.

[Lan13] Lan, L. u. a.: „Effect of surface fluorination on space charge behavior at LDPE/EPDM interface“. In: *International Conference on Solid Dielectrics (ICD)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2013, S. 444–447.

[Le 05] Le Roy, S. u. a.: „Computer simulation of space charge distribution in an XLPE-EPR sandwich“. In: *2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Hrsg. von IEEE. IEEE Operations Center, 2005, S. 661–664.

[Lew02] Lewis, T. J.: „Polyethylene under electrical stress“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 9.5 (2002), S. 717–729.

[Li16] Li, Z. u. a.: „Thermal ageing and its impact on charge trap density and breakdown strength in polyethylene“. In: *2016 IEEE CEIDP - IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE, 2016, S. 907–910.

[Li17] Li, J.; Du, B.; Xu, H.: „Suppressing interface charge between LDPE and EPDM for HVDC cable accessory insulation“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24.3 (2017), S. 1331–1339.

[Li18a] Li, J. u. a.: „Simulation of Interface Charge Behaviors in HVDC Cable Accessory Based on Bipolar Carrier Transportation Model“. In: *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*. IEEE, 2018, S. 1–4.

[Li18b] Li, Z.; Du, B.: „Polymeric insulation for high-voltage dc extruded cables: challenges and development directions“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 34.6 (2018), S. 30–43.

[Li23] Li, X. u. a.: „Effect of Silicone Grease on the Dielectric Property of Silicone Rubber for Cable Joint“. In: *International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*. Hrsg. von IEEE. 2023, S. 1–4.

[Lia20] Liang, H. u. a.: „Improved space charge transport model in bi–layer dielectrics—considering carrier dynamic equilibrium“. In: *High Voltage* 5.2 (2020), S. 176–183.

[Lin20] Lin, S. u. a.: „Water Tree Propagation in a Wide Temperature Range: Insight into the Role of Mechanical Behaviors of Crosslinked Polyethylene (XLPE) Material“. In: *Polymers* 13.1 (2020).

[Liu17] Liu, N.: „Space charge characteristics in polymer materials and their relation with ageing“. Doctoral. University of Southampton, 2017.

[Luo20] Luo, Y. u. a.: „A Sophisticated Method of the Mechanical Design of Cable Accessories Focusing on Interface Contact Pressure“. In: *Energies* 13.11 (2020), S. 2976.

[Luo21] Luo, Y. u. a.: „Failure Analysis of HVDC Cable Accessories During R&D Tests“. In: *International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2021, S. 1–4.

[Maz03] Mazzanti, G.; Montanari, G. C.; Alison, J. M.: „A space-charge based method for the estimation of apparent mobility and trap depth as markers for insulation degradation-theoretical basis and experimental validation“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 10.2 (2003), S. 187–197.

[Maz13] Mazzanti, G.; Marzinotto, M.: Extruded Cables For High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development. 1. Aufl. John Wiley & Sons, 2013.

[Maz17] Mazzanti, G.: „Life and reliability models for high voltage DC extruded cables“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 33.4 (2017), S. 42–52.

[Maz19a] Mazzanti, G. u. a.: „The insulation of HVDC extruded cable system joints. Part 1: Review of materials, design and testing procedures“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 26.3 (2019), S. 964–972.

[Maz19b] Mazzanti, G. u. a.: „The insulation of HVDC extruded cable system joints. Part 2: Proposal of a new AC voltage PD measurement protocol for quality control during routine tests“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 26.3 (2019), S. 973–980.

[Meu00] Meunier, M.; Quirke, N.: „Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators“. In: *The Journal of Chemical Physics* 113.1 (2000), S. 369–376.

[Moh15] Mohamad, A. u. a.: „Surface fluorinated epoxy resin for high voltage DC application“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 22.1 (2015), S. 101–108.

[Mon00] Montanari, G. C.: „The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 7.3 (2000), S. 309–315.

[Mon18] Montanari, G. C. u. a.: „Next generation polymeric high voltage direct current cables—A quantum leap needed?“ In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 34.2 (2018), S. 24–31.

[Mon19] Montanari, G. C.; Seri, P.; Dissado, L. A.: „Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: A new approach and similarities to mechanical aging“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 26.2 (2019), S. 634–641.

[Moo97] Moore, G. F.: Electric cables handbook. 3. ed. Blackwell Science, 1997.

[Mor07] Morshuis, P. H. F. u. a.: „Dielectric Interfaces in DC Constructions: Space Charge and Polarization Phenomena“. In: *2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. IEEE, 2007, S. 450–453.

[Mot48] Mott, N. F.; Gurney, R. W.: Electronic processes in ionic crystals. 2. ed., reprinted. The international series of monographs on physics. Clarendon Press, 1948.

[Nad99] Nadolny, Z.: „Effect of mechanical pressure and silicone grease on partial discharge characteristics for model XLPE transmission cable joint“. In: *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*. Hrsg. von IEEE. IEEE Conference Publications. The @Univ. of Alabama Press, 1999, 5.297.P5–5.300.P5.

[Nay71] Nayak, P. R.: „Random Process Model of Rough Surfaces“. In: *Journal of Lubrication Technology* 93.3 (1971), S. 398–407.

[Net22] Nett, I. u. a.: „Experimental Investigations on Electro-Thermal Ageing of EPDM for HVDC Cable Joints“. In: *2022 Paris Session*. Hrsg. von CIGRE. 2022.

[Net23] Nett, I.; Langenberg, N.; Moser, A.: „A Method for Experimental Assessment of Interactions between Cable and Accessory Materials in HVDC Cable Joints“. In: *11th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 2023.

[Net25] Nett, I.; Leterme, W.: „Impact of Lubricant on Charge Dynamics at Macroscopic Interfaces in HVDC Cable Joints“. In: *High Voltage* (2025).

[Nie18] Niedik, C. F.; Jenau, F.: „Investigation on Interaction between Lubricants and Polymeric Cable Insulations“. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2018, S. 1–4.

[ODw73] O'Dwyer, J. J.: The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. Monographs on the physics and chemistry of materials. Clarendon Press, 1973.

[Oed11] Oeding, D.; Oswald, B. R.: Elektrische Kraftwerke und Netze: Mit 140 Tabellen. 7. Aufl. Springer, 2011.

[Owe69] Owens, D. K.; Wendt, R. C.: „Estimation of the surface free energy of polymers". In: *Journal of Applied Polymer Science* 13.8 (1969), S. 1741–1747.

[Per02] Persson, B. N. J.: „Adhesion between an elastic body and a randomly rough hard surface". In: *The European physical journal. E, Soft matter* 8.4 (2002), S. 385–401.

[Per06] Persson, B.: „Contact mechanics for randomly rough surfaces". In: *Surface Science Reports* 61.4 (2006), S. 201–227.

[Per07] Persson, B. N. J.: „Relation between interfacial separation and load: a general theory of contact mechanics". In: *Physical review letters* 99.12 (2007), S. 125502.

[Per87] Perry, D. D.; Bolcar, J. P.: „Aging Characteristics of Silicone Greases in Assembled Premolded Separable Connectors". In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 2.3 (1987), S. 628–631.

[Pes98] Peschke, E.: Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung: Entwicklung, Herstellung, Prüfung, Montage und Betrieb von Kabeln und deren Garnituren. Publicis-MCD-Verl., 1998.

[Poe19] Poehler, S. u. a.: „PQ Test of Extruded HVDC 525-kV-Underground Cables: Results and Conclusion". In: *10th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 2019.

[Pop15] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[Qin15] Qin, Y. u. a.: „Impacts of Temperature on the Distribution of Electric-field in HVDC Cable Joint". In: *ICPADM 2015*. Hrsg. von IEEE. 2015, S. 224–227.

[Rab71] Rabel, W.: „Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren“. In: *Farbe und Lack* 77 (1971), S. 997–1005.

[Sal11] Saltzer, M. u. a.: „Electro-thermal simulations of HVDC cable joints“. In: *Feldsteuernde Isoliersysteme*. Hrsg. von V. Hinrichsen. ETG-Fachbericht. VDE-Verlag, 2011.

[Sch07] Schweidler, E. R. von: „Studien über die Anomalien im Verhalten der Dielektrika“. In: *Annalen der Physik* 329.14 (1907), S. 711–770.

[Shi19] Shigemori, N. u. a.: „Development of 350 kV and 525 kV HVDC extruded cable system“. In: *10th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 2019.

[Sil37] Sillars, R. W.: „The properties of a dielectric containing semiconducting particles of various shapes“. In: *Institution of Electrical Engineers - Proceedings of the Wireless Section of the Institution* 12.35 (1937), S. 139–155.

[Spe18] Spelzhausen, S.; Ionian, M.-R.; Plath, R.: „Influence of Coupling Materials on Space Charge Measurements of Silicone Elastomers“. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2018, S. 1–4.

[Sta17] Stancu, C. u. a.: „Influence of the properties of the joint insulation components on the space charge and electric field“. In: *Materials, methods & technologies* 11 (2017), S. 76–91.

[Str03] Stribeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. Bd. 7. Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen. Springer, 1903.

[Suh00] Suh, K. S. u. a.: „Interfacial properties of XLPE/EPDM laminates“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 7.2 (2000), S. 216–221.

[Sur20] Suraci, S. V. u. a.: „Degradation Assessment of Polyethylene-Based Material Through Electrical and Chemical-Physical Analyses“. In: *Energies* 13.3 (2020), S. 650.

[Tak19] Takada, T. u. a.: „Space charge accumulation in double-layer dielectric systems—measurement methods and quantum chemical calculations“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 35.5 (2019), S. 36–46.

[Tal13] Taleb, M. u. a.: „Modeling of charge injection and extraction in a metal/polymer interface through an exponential distribution of surface states“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 20.1 (2013), S. 311–320.

[Tan17] Tantipattarakul, S.; Vaughan, A.; Andritsch, T.: „The influence of thermally aged surface of polyethylene blend films on space charge and charge transport dynamics“. In: *Proceedings of 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2017)*. IEEE, 2017, S. 331–334.

[Tan19] Tantipattarakul, S.; Vaughan, A. S.; Andritsch, T.: „On the influence of morphology and chemical defects on charge transport dynamics in polyethylene: thermal ageing and concentration gradient“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 52.39 (2019), S. 395302.

[Tey05] Teyssedre, G.; Laurent, C.: „Charge transport modeling in insulating polymers: From molecular to macroscopic scale“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 12.5 (2005), S. 857–875.

[Tey23] Teyssedre, G.; Notingher, P.: „Materials for HVAC and HVDC insulated cable applications: scientific challenges and threats: Tutorial 2“. In: *11th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 2023.

[Tho99] T. R. Thomas, Hrsg.: Rough surfaces. 2. ed. Imperial College Press, 1999.

[Thu12] Thue, W. A.: Electrical power cable engineering. 3. ed. CRC Press, 2012.

[Tia01] Tian, Y.; Meng, Y.; Wen, S.: „Electrorheology of a zeolite/silicone oil suspension under dc fields“. In: *Journal of Applied Physics* 90.1 (2001), S. 493–496.

[Tzi10] Tzimas, A. u. a.: „The effect of dc poling duration on space charge relaxation in virgin XLPE cable peelings“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 43.21 (2010), S. 215401.

[Vis11] Vissouvanadin, B. u. a.: „A methodology for the assessment of HVDC-XLPE cable insulation“. In: *8th International Conference on Power Insulated Cables*. Hrsg. von Jicable. 2011.

[Vu13] Vu, T. T. N. u. a.: „Electric field profile measurement and modeling in multi-dielectrics for HVDC application“. In: *International Conference on Solid Dielectrics (ICD)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2013, S. 413–416.

[Vu15] Vu, T. T. N. u. a.: „Correlating conductivity and space charge measurements in multi-dielectrics under various electrical and thermal stresses“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 22.1 (2015), S. 117–127.

[Vu17] Vu, T. T. N. u. a.: „Maxwell–Wagner Effect in Multi-Layered Dielectrics: Interfacial Charge Measurement and Modelling“. In: *Technologies* 5.2 (2017), S. 27.

[Wac20] Wacker Chemie AG, Hrsg.: WACKER® AP 1000: Technical Datasheet. 2020.

[Wac21a] Wacker Chemie AG, Hrsg.: POWERSIL® 600 A/B: Technical Data Sheet. 2021.

[Wac21b] Wacker Chemie AG: POWERSIL® PASTE AP: Technical Data Sheet. Hrsg. von Wacker Chemie AG. 2021.

[Wac22] Wacker Chemie AG, Hrsg.: WACKER® AP 500: Technical Data Sheet. 2022.

[Wag14] Wagner, K. W.: „Erklärung der dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen“. In: *Archiv für Elektrotechnik* 2.9 (1914), S. 371–387.

[Wan21] Wang, Z. u. a.: „Property Failure of Silicone Rubber Caused by Silicone Grease Absorption“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 28.1 (2021), S. 326–332.

[Wan22] Wang, X. u. a.: „Study on Reliability and Selection of Silicone Grease Used for Coating at the Interface Between Cable and Accessory“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 29.6 (2022), S. 2354–2362.

[Wen36] Wenzel, R. N.: „Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water“. In: *Industrial & Engineering Chemistry* 28.8 (1936), S. 988–994.

[Wu98] Wu, C. W.; Conrad, H.: „The temperature dependence of the conductivity of silicone oil and related electrorheology of suspensions containing zeolite particles“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 31.23 (1998), S. 3403–3409.

[Yan08] Yang, C.; Persson, B. N. J.: „Contact mechanics: contact area and interfacial separation from small contact to full contact“. In: *Journal of Physics: Condensed Matter* 20.21 (2008), S. 215214.

[Yan20] Yan, Z. u. a.: „Electrical tree in silicone rubber: Roles of silicone grease and switching impulses“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 27.3 (2020), S. 829–836.

[Yan21] Yang, Z. u. a.: „Study on melting characteristics of crystals in thermal aged XLPE cable insulation at elevated temperature“. In: *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 32.12 (2021), S. 16194–16202.

[Ye18] Ye, H. u. a.: „Design aspects on HVDC cable joints“. In: *ICPADM 2018*. IEEE, 2018, S. 300–304.

[You05] Young, T.: „III. An essay on the cohesion of fluids“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 95 (1805), S. 65–87.

[Zha19] Zhang, R. D.; Freitag, C.; Wagner, A.: „Challenges of cable engineering from offshore to onshore and project to operation“. In: *10th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 2019.

[Zha95] Zhang, Y.; Lewiner, J.; Hampton, N.: „Evidence of a strong correlation between space charge buildup and breakdown in cable insulators under DC stress“. In: *4th International Conference on Insulated Power Cables*. Hrsg. von Jicable. 1995.

[Zhu18] Zhu, B. u. a.: „Effects of Silicone Grease on Silicone Rubber in Physical Characteristics“. In: *Proceedings of 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC 2018)*. IEEE Press, 2018, S. 407–410.

[Zhu19a] Zhu, B. u. a.: „Interface resistivity and interfacial DC breakdown voltage of double-layer dielectrics“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 26.4 (2019), S. 1181–1189.

[Zhu19b] Zhu, B. u. a.: „Relationship between the interfacial ramped DC breakdown voltage and the morphology of the XLPE/SiR interface“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 26.3 (2019), S. 689–697.

[Zhu19c] Zhu, M. u. a.: „Effect of XLPE/EPDM Interface on Space Charge Behavior in Cable Accessory“. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 183554–183564.

[Zis64] Zisman, W. A.: „Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution“. In: *Contact Angle, Wettability, and Adhesion*. Hrsg. von F. M. Fowkes. Bd. 43. Advances in Chemistry. American Chemical Society, 1964, S. 1–51.

Abbildungsverzeichnis

1-1 Geplante HGÜ-Korridore gemäß [50H23] 3
1-2 Allgemeiner Aufbau von herkömmlichen Hoch- und Höchstspannungskabeln (nach [Pes98]) 6
1-3 Montage des Muffenkörpers 7
1-4 Allgemeiner Aufbau von Aufschiebemuffen für HGÜ-Kabel (nach [Gho15]) 9
1-5 Feldverteilung entlang der Kabelisolierung (nach [Moo97]) . 12
1-6 Dreischichtmodell zur Abbildung realer Grenzflächen (nach [Bod06]) 16
1-7 Schematischer Aufbau des *bipolar charge transport model* (nach [Ali94]) 17
1-8 Strukturformel Polyethylen 18
1-9 Strukturformel PDMS 20
1-10 Veränderung der Materialstruktur von SiR durch Quellung in Silikonfett (nach [Yan20]) 23

2-1 Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität (nach [Jon83]) 31
2-2 Bändermodell für ideale Einkristalle (nach [Dis92]) 33
2-3 Energiebändermodell mit Haftstellen in teilkristallinen Strukturen (nach [Dis92]) 35
2-4 Modifizierte Potentialbarriere an Metall-Polymer-Grenzflächen infolge elektrischer Belastung (nach [Dis92]) 37
2-5 Stromdichte in Abhängigkeit von der angelegten Spannung (nach [Dis92]) 39
2-6 Potentielle Energie eines Elektrons in der Umgebung eines ionisierten Donators (nach [Dis92]) 41
2-7 Schematische Darstellung einer Materialgrenzfläche (nach [Bod06]) 43
2-8 Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Grenzflächenspannungen an einer Feststoff-Gas-Grenzfläche (nach [Wen36]) 44

2-9 Einteilung der chemischen Bindungen (nach [Ehr11]) 46

3-1 Versuchsablauf 56
3-2 Schema Sandwich-Prüfling 57
3-3 Oberfläche von VPE nach Drehen (li.) und Schleifen (re.) . 60
3-4 Parameter der Oberflächenrauheit für die untersuchten Materialien 61
3-5 Oberflächenenergie der untersuchten Feststoffe und Fette . . 62
3-6 Geometrie Simulationsmodell 63
3-7 Temperaturverteilung in Kabel und Muffe im stationären Fall 65
3-8 Temperaturgradient senkrecht zur untersuchten Grenzfläche entlang der in Abbildung 3-6 dargestellten Auswertelinien im stationären Fall 66
3-9 Einfluss der Temperatur auf die Diffusion von Silikonpaste (gepunktete Linie: *curve fit* gemäß Formel 2-33 für 50 °C) (nach [Net23]) 68
3-10 Probenhalterung [Net23] 69
3-11 Anpressdruck (blau) über der Zeit bei zyklischer thermischer (schwarz) Belastung (nach [Net23]) 70
3-12 Einfluss des Anpressdrucks auf die Diffusion von Silikonpaste (gepunktete Linie: *curve fit* gemäß Formel 2-33 für 50 °C ohne Druck) (nach [Net23]) 71
3-13 Feldverteilung in Kabel und Muffe 74
3-14 Feldstärke senkrecht zur untersuchten Grenzfläche entlang der in Abbildung 3-6 dargestellten Auswertelinien 75
3-15 Elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfspannung 78
3-16 Zusammenhang zwischen $\ln(J/T^2)$ und $\sqrt{E}$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 79
3-17 Zusammenhang zwischen $\ln(J)$ und $\ln(U)$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 79

3-18 Zusammenhang zwischen $\ln(\sigma)$ und $1/T$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a - b \cdot x$) 80
3-19 Zusammenhang zwischen $\ln(\sigma)$ und $\sqrt{E}$ (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 81
3-20 Exemplarisches Ergebnis einer Raumladungsmessung mit 30 kV Polarisationsspannung 84
3-21 Zeitliche Veränderung der Grenzflächenladung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \pm b \cdot \ln(x)$) 85

4-1 Relative Masseänderung für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 90
4-2 Gesamte relative Masseänderung für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 92
4-3 Relative Änderung der Permittivität für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 93
4-4 Elektrische Leitfähigkeit für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 95
4-5 Relative Änderung der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 96
4-6 Relative Änderung der Aktivierungsenergie für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 98
4-7 Relative Änderung der Haftstellenparameter ermittelt aus Messung des Raumladungsabbaus für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 100
4-8 Ladungsträgerbeweglichkeit über der Haftstellentiefe für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 101

4-9 Elektrische Leitfähigkeit über der Haftstellenanzahl für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 102
4-10 Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR über der Raumladung für verschiedene Oberflächenbearbeitung (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) . . . 103
4-11 Relative Masseänderung für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 105
4-12 Gesamte relative Masseänderung für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 106
4-13 Relative Änderung der Permittivität für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 107
4-14 Elektrische Leitfähigkeit für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 108
4-15 Relative Änderung der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 109
4-16 Relative Änderung der Aktivierungsenergie für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 110
4-17 Relative Änderung der Haftstellenparameter ermittelt aus Messung des Raumladungsabbaus für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 111
4-18 Ladungsträgerbeweglichkeit über der Haftstellentiefe für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 112
4-19 Elektrische Leitfähigkeit über der Haftstellenanzahl für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 113

4-20 Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR über der Raumladung für verschiedene Alterungsbedingungen (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 114
4-21 Relative Masseänderung für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) (nach [Net25]) 116
4-22 Gesamte relative Masseänderung für verschiedene Schmierfette (nach [Net25]) 116
4-23 Relative Änderung der Permittivität für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 118
4-24 Elektrische Leitfähigkeit für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) (nach [Net25]) 119
4-25 Relative Änderung der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 120
4-26 Relative Änderung der Aktivierungsenergie für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) 121
4-27 Relative Änderung der Haftstellenparameter ermittelt aus Messung des Raumladungsabbaus für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a \cdot x^{-n} + b \cdot x^{m}$) (nach [Net25]) 123
4-28 Visualisierung der Haftstelleneigenschaften für verschiedene untersuchte Fett (nach [Net25]) 124
4-29 Ladungsträgerbeweglichkeit über der Haftstellentiefe für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) (nach [Net25]) 125
4-30 Elektrische Leitfähigkeit über der Haftstellenanzahl für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) 126

4-31 Verhältnis der elektrischen Leitfähigkeit von VPE und SiR über der Raumladung für verschiedene Schmierfette (gepunktete Linien: *curve fit* mit $y(x) = a + b \cdot x$) (nach [Net25]) . . 127

Tabellenverzeichnis

1-1 Typische Werte für mittlere Betriebsfeldstärken extrudierter HGÜ-Kabel [Ben10; Poe19] 5

3-1 Thermische Materialeigenschaften zur Modellierung von Kabel und Kabelmuffe in *COMSOL Multiphysics* 64
3-2 Haftstelleneigenschaften für unterschiedliche Prüfspannungen 86

4-1 Mittlere Messwertstreuung in den Vorversuchen sowie den Messergebnissen 88

Abkürzungsverzeichnis

AC *alternating current*

BCTM *bipolar charge transport model*

CIGRE *Conseil International des Grands Réseaux Électricques*

DC *direct current*

DIN Deutsches Institut für Normung

EHV *extra high voltage*

EN Europäische Norm

EPDM Ethylen-Propylen-Dien-Monomer

FEF *field enhancement factor*

FEM Finite Elemente Methode

HDÜ Hochspannungsdrehstromübertragung

HGÜ Hochspannungsgleichstromübertragung

HTV *high temperature vulcanizing silicone rubber*

IAEW Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft

IEC *International Electrotechnical Commission*

IGBT *insulated gate bipolar transistor*

LCC *line commutated converter*

LDPE *low density polyethylene*

LSR *liquid silicone rubber*

PDMS Polydimethylsiloxan

PEA *pulsed electro-acoustic method*

PTFE Polytetrafluorethylen

PE Polyethylen

PEA *pulsed electro-acoustic method*

SiR *silicone rubber*

TB *Technical Brochure*

TS *Technical Specification*

VPE vernetztes Polyethylen

VSC *voltage source converter*

XLPE *cross-linked polyethylene*

Symbolverzeichnis

a	Abstand zwischen benachbarten Haftstellen
A	Richardson-Schottky-Konstante; Flächeneinheit
c	Konzentration
C	elektrische Kapazität
d	Dicke
D	elektrische Flussdichte; Diffusionskoeffizient
E	elektrische Feldstärke; Energie; Elastizitätsmodul
E_t	thermische Aktivierungsenergie, Haftstellentiefe
$f(t)$	dielektrische Sprungantwort
F	Kraft
I	elektrischer Strom
J	elektrische Stromdichte; Teilchenstromdichte
k_B	Boltzmann-Konstante
M	Stoffmenge
n	Anzahl der Monomereinheiten, Vernetzungsgrad; Zeitkonstante
n_e	Elektronendichte im Leitungsband
n_H	Elektronendichte in Haftstellen
N	Anzahl besetzter Haftstellen
N_{eff}	effektive Zustandsdichte
N_H	effektive Haftstellendichte
r_a	Außenradius der Kabelisolierung
r_i	Innenradius der Kabelisolierung
p	Wahrscheinlichkeit; Druck
P	elektrische Polarisation; Permeationskoeffizient
Q	elektrische Raumladungsdichte
R_z	Rautiefe
S	Löslichkeitskoeffizient
S_a	mittlere arithmetische Höhe
S_p	maximale Spitzenhöhe
S_q	mittlere quadratische Höhe

S_v	maximale Senkenhöhe
S_z	Summe aus S_p und S_v
t_H	Aufenthaltsdauer von Ladungsträgern in Haftstellen
T	Temperatur
T_g	Glasübergangstemperatur
U	elektrische Spannung; Übermaß
v	Escape-Frequenz; Geschwindigkeit
W_a	Aktivierungsenergie
W_C	dielektrische Verlustleistung
W_f	Fermi-Niveau
W_g	Bandabstand
W_L	Leitungsband
W_V	Valenzband
α	Temperaturkoeffizient
β	Feldstärkekoeffizient; Schottky-Koeffizient
γ	Oberflächenenergie
γ_{LG}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Gas
γ_{SG}	Grenzflächenspannung zwischen Feststoff und Gas
γ_{SL}	Grenzflächenspannung zwischen Feststoff und Flüssigkeit
$\delta(t)$	Dirac-Impuls
Δ_E	Spanne zwischen niedrigster und höchster besetzter Haftstelle
ε	Permittivität
η	dynamische Viskosität
θ	Kontaktwinkel
ϑ	Querkontraktionszahl
λ	spezifische Schmierfilmdicke
λ_T	Wärmeleitfähigkeit
μ	Ladungsträgerbeweglichkeit; Reibungskoeffizient
Φ_m	Austrittsarbeit
ρ	elektrische Raumladungsdichte
σ	effektive Gleichstromleitfähigkeit; elektrische Flächenladungsdichte
τ	Zeitkonstante

Publikationsliste

Nett, I.; Leterme, W.: „Impact of Lubricant on Charge Dynamics at Macroscopic Interfaces in HVDC Cable Joints“. In: *High Voltage*. 2025.

Nett, I.; Langenberg, N.; Moser, A.: „A Method for Experimental Assessment of Interactions between Cable and Accessory Insulation Materials in HVDC Cable Joints“. In: *11th International Conference on Insulated Power Cables.* Hrsg. von Jicable. 2023.

Nett, I.; Machetti, D.; Soppe, B.; Bendig, M.; Moser, A.: „Influence of lubricant on charge transport dynamics in multilayer dielectrics“. In: *International Symposium on HVDC Cable Systems.* Hrsg. von Jicable. 2021.

Nett, I.; Bendig, M.; Soppe, B.; Dittrich, B.; Wagner, A.; Karmokar, T.; Hergert, A.: „Experimental investigations on electro-thermal ageing of EPDM for HVDC cable joints“. In: *CIGRE Session 2022.*

Nett, I.; Ballweber, T.; Bendig, M.; Soppe, B.; Freitag, C.; Wagner, A.; Hergert, A.: „Effect of Ageing on the Dielectric properties of EPDM for HVDC Cable Joints“. In: *VDE-Hochspannungstechnik 2020.* Hrsg. von VDE. ETG-Fachbericht. Berlin und Offenbach: VDE-Verlag, 2020.

CIGRE WG B1.68: TB 912 - Condition evaluation and lifetime strategy of HV cable systems. 2023. *(Mitwirkung als Sekretärin)*

CIGRE JWG B1/D1.75: TB 968 - Interaction between cable and accessory materials in HVAC and HVDC applications. 2025. *(Mitwirkung als Young Member)*

Gerlach, R.; **Nett, I.**; Moser, A.; Karmokar, T.; Soppe, B.; Wagner, A.; Häring, D.: „Experimental Approach to Test the Dielectric Strength of Polymeric Cable Insulation for Dynamic DC Voltage Stresses“. In: *11th International Conference on Insulated Power Cables.* Hrsg. von Jicable. 2023.

Gerlach, R.; Machetti, D.; **Nett, I.**; Karmokar, T.; Soppe, B.; Wagner, A.; Häring, D.: „On the Design of Test Circuits for the Generation of Dynamic Voltages for the Investigation of HVDC Cables“. In: *VDE-Hochspannungstechnik 2022*. Hrsg. von VDE. ETG-Fachbericht. Berlin und Offenbach: VDE-Verlag, 2022.

Gallesi, F.; Guastavino, F.; Torello, E.; **Nett, I.**; Soppe, B.; Vocke, J.: „Investigations of the Electrical Tree Growth at Different Voltages and Frequencies“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 30.6 (2023), S. 2490-2497.

Gallesi, F.; Guastavino, F.; **Nett, I.**; Puffer, R.; Soppe, B.; Vocke, J.: „Preliminary Investigations of the Electrical Tree Growth at Frequencies of 50 Hz and 2.2 kHz by means of Partial Discharge Analysis“. In: *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. Hrsg. von IEEE. 2021.

Machetti, D.; **Nett, I.**; Domm, M.; Seifert, J.: „Electrical Investigations on the Interface between a FRP Tube and a Low-Density Polymeric Foam“. In: *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Hrsg. von IEEE. 2021.

Abschlussarbeiten

Bachelorarbeiten

Rabl, S.: „Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur ortsaufgelösten Messung von Raumladungen in Isoliermaterialien“. 2022.

Gomaa, M.: „Entwicklung einer Methodik zur experimentellen Untersuchung von Materialwechselwirkungen in Isoliersystemen für HGÜ-Kabel“. 2022.

Taktak, A.: „Development of a connector design for partial discharge testing on medium voltage switchgear“. 2021.

Jeromin, C.: „Aufbau eines Prüfstandes zur ortsaufgelösten Messung von Raumladungen in Isoliermaterialien“. 2021.

Inoue, S.: „Identifikation von Einflussfaktoren auf die Raumladungsverteilung an gleichspannungsbelasteten Isolierstoffgrenzflächen“. 2021.

Engel, D.: „Modellierung der elektrischen Feldverteilung an gleichspannungsbelasteten Isoliergrenzflächen“. 2021.

Jaber, I.: „Elektrische Charakterisierung von Isoliermaterialien zur Anwendung in HGÜ-Kabelgarnituren“. 2020.

Thayananthan, T.: „Identifikation von Einflussparametern auf Schädigungsprozesse an gleichspannungsbelasteten VPE-Grenzflächen“. 2019.

Kamp, F.: „Entwicklung einer Versuchsmethodik zur Untersuchung von gleichspannungsbelasteten Isolierstoffgrenzflächen“. 2019.

Masterarbeiten

Yan, Q.: „Implementierung einer Auswertemethodik zur ortsaufgelösten Messung von Raumladung in polymeren Isoliermaterialien“. 2021.

Sendzik, T.: „Elektrische Charakterisierung von Isoliermaterialien zur Anwendung in Isoliersystemen für HGÜ-Kabel und Garnituren“. 2021.

Smedley, J.: „Modelling of the electrical field distribution in HVDC cable accessories“. 2021.

Merk, I.: „Investigation of influencing factors on breakdown mechanisms in DC-stressed insulation interfaces“. 2020.

Kepdo, F.: „Untersuchung der Schädigungsprozesse an VPE-Grenzflächen unter überlagerter Gleich- und Stoßspannung“. 2020.

Debus, M.: „Untersuchung von Einflussparametern auf Schädigungsprozesse an Materialgrenzflächen unter inhomogener Gleichspannungsbelastung“. 2019.

Gerlach, R.: „Entwicklung einer Versuchsmethodik zur Untersuchung der elektrischen Schädigungsprozesse an gleichspannungsbelasteten Isolierstoffgrenzflächen“. 2018.

Lebenslauf

02.04.2025	Promotionsprüfung zur Dr.-Ing.
seit 06/2024	Asset Specialist DC & Offshore Cable
	TenneT TSO GmbH
06/2018 - 03/2024	Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin
	Institut für elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW)
	RWTH Aachen
10/2011 - 04/2018	Studium Elektrotechnik, Informationstechnik und Technische Informatik
	RWTH Aachen
2011	Allgemeine Hochschulreife
	Erzbischöfliches Ursulinengymnasium, Köln
1992	geboren in Bergisch Gladbach, Deutschland